

CONSTRUIRE LE RETOUR D'EXPERIENCE  
DES OPERATIONS DE RESTAURATION HYDROMORPHOLOGIQUE

***ELEMENTS POUR UNE HARMONISATION DES  
CONCEPTS  
ET DES METHODES DE SUIVI SCIENTIFIQUE MINIMAL***

**VOLETS HYDROMORPHOLOGIE - HYDROECOLOGIE**

Version 1 au 29/05/2010



*Exemples de restauration hydromorphologique de niveau R2 : le Bolbec avant travaux (photo Silène Biotec) et après réalisation (photo Biotec).*

**Jean René Malavoi – Yves Souchon**

Avec la collaboration de P. Poulain (AEAG), S. Jego (AEAG), S. Stroffek (AERMetC), J. Peress (Onema), V. de Billy (Onema), D. Baril (Onema), J.M. Ditche (Onema), V. Vauclin (Onema), S. Richard (Onema), J.N. Gautier (AELB)

## Sommaire

<b>1. CONCEPTS DE BASE</b>	<b>8</b>
1.1. Travaux de restauration devant faire l'objet d'un suivi	8
1.2. Nécessité d'un diagnostic de dysfonctionnement correctement établi	9
1.3. Trajectoires d'amélioration	11
1.4. Concepts généraux d'Echelle spatiale et de méthodes de suivis	14
1.4.1. Les échelles spatiales emboîtées	14
1.4.2. Les méta-catégories d'intervention	15
1.4.3. Les échelles d'intervention et de réponse probable	16
1.4.4. Les échelles d'investigation	18
1.4.5. Synthèse	22
1.5. Echelle temporelle des suivis	25
1.5.1. Fréquence des mesures	25
1.5.2. Durée du suivi	29
<b>2. SUIVI ECHELLE STATIONNELLE</b>	<b>30</b>
2.1. Suivi hydromorphologique	31
2.1.1. Suivi des stations de contrôle	32
2.1.2. Compartiment lit mineur	34
2.1.3. Compartiment substrat	37
2.1.4. Altération : disparition de la ripisylve	40
2.1.5. Compartiment lit majeur et annexes hydrauliques	41
2.1.6. Compartiment nappe alluviale	42
2.2. Suivi biologique	44
2.2.1. Le concept d'habitat pour l'interprétation des données biologiques	44
2.2.2. Les protocoles biologiques	46
2.2.3. Le suivi de la chimie de l'eau	47
2.2.4. Le suivi de la température	47
<b>3. SUIVI ECHELLE ETENDUE</b>	<b>53</b>
3.1. Suivi hydromorphologique	53

3.1.1. Mesures à réaliser	53
<b>3.2. Suivi biologique</b>	<b>54</b>
<b>4. ELEMENTS COMPLEMENTAIRES D' UN SUIVI REUSSI</b>	<b>55</b>
<b>5. CONCLUSION</b>	<b>56</b>
<b>6. REFERENCES</b>	<b>58</b>
<b>7. ANNEXES</b>	<b>62</b>
<b>7.1 Annexe 1: Mandat:</b> mise en place d'une démarche de suivis d'opérations de restuaration physique des cours d'eau et d'évaluation des réponses écologiques	<b>63</b>
<b>7.2. Annexe 1bis : Niveaux d'ambition des travaux de restauration</b>	<b>70</b>
7.1.1. Préservation : catégorie P.	70
7.1.2. Limitation des dysfonctionnements futurs : catégorie L.	70
7.1.3. Restauration : catégorie R.	70
<b>7.3. Annexe 2 : définition d'un tronçon géomorphologique</b>	<b>74</b>
7.2.1. La sectorisation hydromorphologique	74
7.2.2. Postulat d'interprétation de la sectorisation	77
<b>7.4. Annexe 3 : protocole de description du colmatage superficiel</b>	<b>79</b>
<b>7.5. Annexe 4 : méthode granulométrique Evha</b>	<b>81</b>

## INTRODUCTION

Il existe aujourd'hui beaucoup d'attentes vis-à-vis des mises en œuvre de restaurations physiques (on utilise plutôt aujourd'hui le terme « hydromorphologique ») des cours d'eau. Elles sont unanimement considérées comme un investissement très important des prochaines décennies pour garantir leur gestion durable et pour atteindre ou maintenir leur « bon état » écologique demandé par la Directive Cadre Européenne sur les Eaux (DCE).

Un bilan des actions passées sur ce thème réalisé en 2006 et 2007 dans le bassin Rhône Méditerranée et Corse puis en Seine Normandie (Biotec et Malavoi, 2006, 2007), fait apparaître les points suivant :

- faible nombre d'initiatives passées,
- échelle généralement très locale (moins d'1 km),
- assez faible niveau d'ambition, une majorité de cas relevant de la seule diversification localisée des habitats (type R1, voir définition en Annexe 1), et non de la correction des processus physiques qui les génèrent, les entretiennent (régime de flux liquides et solides) et sont garants des habitats pour la vie aquatique,
- rareté des suivis sur l'efficacité hydromorphologique des actions mises en œuvre,
- quasi inexistence de suivi écologique, qui permettrait de qualifier la trajectoire des états écologiques et d'apprécier les gains de qualité.

La rareté de ces deux types de suivi ne permet pas de connaître les niveaux de restauration ou de qualité effectivement atteints, ce qui n'a pas permis d'élaborer un corps de doctrine sur les méthodes de restauration encore suffisamment bien assis.

Plusieurs synthèses internationales récentes (Bayley, 2002 ; Bernhardt et al., 2005 ; Palmer et al., 2005 ; Kondolf et al., 2006 ; Palmer et al., 2007 ; Bernhardt et al., 2008) dressent un constat assez similaire :

- faible pertinence du diagnostic préalable, qui privilégie trop souvent les symptômes locaux et n'analyse pas ou mal les altérations des processus à l'échelle plus large du bassin versant, qui sont souvent déterminantes, et qui limitent ou inhibent la récupération du milieu,
- définition initiale d'objectifs mesurables souvent floue,
- manque de partage de ces objectifs par les structures chargées de la mise en œuvre, avec un déficit patent de culture ou de vision communes du fonctionnement des cours d'eau et de leurs services écologiques associés,
- difficulté à prendre en compte les temps de réponse parfois longs des indicateurs biologiques :

- La réponse biologique dépend de la durée des cycles de vie propres à chaque groupe d'organismes ; elle est assez courte dans le cas des algues (< 1 an) et des macroinvertébrés (<1 an à 3 ans), mais plus longue pour les poissons (3 ans et plus),
  - Elle dépend aussi des capacités de recolonisation différentes selon les organismes, et des connexions avec des zones encore peuplées par ces organismes (« zones sources »),
  - En préalable, toutes ces dynamiques dépendent du temps de réajustement hydromorphologique du cours d'eau (en particulier de la structure et de la composition du substrat).
- difficulté à dégager, dans l'évolution des indicateurs, la part revenant à la restauration de celle liée à d'autres grands déterminants qui peuvent évoluer dans le même temps : régimes climatiques, hydrologiques, thermiques, régimes sédimentaires associés et pressions variées d'origine anthropique.

Nous sommes confrontés à une situation relativement paradoxale où les impacts d'un certain nombre d'atteintes à l'intégrité hydromorphologique des cours d'eau sont relativement bien connus et documentés (ex. synthèse dans Wasson et al., 1998), mais où la prévision des **trajectoires de restauration** est beaucoup plus incertaine (Kondolf et al., 2006), en raison :

- des modifications des autres déterminants survenues en même temps que les dégradations,
- de l'échelle des phénomènes,
- de l'aptitude à la recolonisation des groupes biologiques,
- du temps nécessaire pour qu'un nouvel état dynamique s'instaure, avec une forte composante régionale (géologie, climat, types de milieux aquatiques et leurs interconnexions, répartition et intensité des pressions anthropiques).

Certaines opérations de restauration des cours d'eau d'envergure sélectionnées parmi les mesures du programme adossé à chaque SDAGE représentent par conséquent de réelles opportunités pour mieux comprendre comment, avec quelle intensité et quelle variabilité, l'hydromorphologie et la biologie inter-réagissent. Cela à condition d'accompagner ces cas de restauration sélectionnés par des suivis bien construits, harmonisés nationalement qui permettront d'en tirer des enseignements génériques.

## Objectifs de la démarche engagée

Le présent rapport fait suite à une demande de la Direction du Contrôle des Usages et Action Territoriale (DCUAT) de l'Onema (**mandat automne 2009\* en annexe**). Il a pour but de présenter les principes qui devraient **guider de manière homogène à l'échelle nationale**, la mise en place de **suivis scientifiques minimaux** d'opérations de restauration hydromorphologique de portions de cours d'eau.

L'objectif principal est d'obtenir des données suffisamment homogènes à l'échelle nationale pour en tirer des enseignements techniques et scientifiques extrapolables, en tenant compte des types de cours d'eau, aux futures opérations de restauration. Les données de ce type étant actuellement très peu nombreuses, même à l'échelle européenne, il s'agira donc essentiellement de proposer des approches permettant de **vérifier l'efficacité écologique des travaux effectués et d'en tirer des conclusions opérationnelles, à l'échelle du site restauré et de son environnement proche**. Ce fond commun de données rassemblé, permettra donc l'exploitation technique ou scientifique des opérations de restauration, ainsi que leur valorisation grâce à la capitalisation nationale des retours d'expérience.

Nous proposons donc ici les éléments permettant la mise en œuvre de **suivis minimaux** selon un **tronc commun** qui permettra une interprétation nationale. Cela ne devra pas empêcher certains opérateurs de faire plus et mieux, en fonction des demandes et particularités locales, mais sans négliger la mise en œuvre de ce **tronc commun de suivi**.

La **valorisation sociologique** voire sociopolitique de certaines opérations de restauration pourra puiser dans ces éléments de suivi mais nécessitera d'autres types d'investigation.

Enfin, nous n'aborderons pas ici le suivi d'opérations de restauration globale de plus grande envergure spatiale, à l'échelle du bassin versant notamment, qui jouent également sur l'objectif général de préservation et de reconquête de l'état écologique : par exemple restauration ou protection des petits cours d'eau de têtes de bassin, implantation ou protection des ripisylves ou bandes enherbées pour augmenter la protection des cours d'eau par rapport aux intrants, mesures de restauration des zones humides ou gestion des impluviums urbains pour atténuer les irrégularités du cycle hydrologique, etc.... La démarche engagée n'a pas non plus pour ambition de proposer une méthodologie de suivi des

---

\* Mise en place d'une démarche de suivis d'opérations de restauration physique des cours d'eau et d'évaluation des réponses écologiques

Programmes De Mesures (PDM), qui doit être abordée dans le cadre de la mise en place du **RCO** (Réseau de Contrôle Opérationnel). On restera donc ici dans une approche technique et scientifique visant à mettre en relation, à l'échelle locale des sites visés par des travaux de restauration, bien sûr analysés dans leur contexte de bassin versant, des améliorations du fonctionnement hydromorphologique et des améliorations de l'état écologique.

Deux niveaux de suivi sont envisagés dans ce rapport :

- **Niveau de suivi scientifique minimal** (correspondant au suivi « technique et scientifique » dit « opérationnel » du mandat) : ce que l'on doit mesurer *a minima* pour toute opération de restauration hydromorphologique répondant aux critères d'éligibilité à un suivi (cf. « concepts »),
- **Niveau de suivi scientifique amélioré** : options pouvant être ajoutées « à la carte » en fonction des objectifs des travaux, de leur niveau d'ambition, de leur intérêt pédagogique (valeur de démonstration par l'exemple), de l'intérêt pour la recherche, etc. Ces options pourront prendre en compte :
  - des paramètres cibles complémentaires et leurs protocoles associés,
  - un plus grand nombre de campagnes de mesures, un nombre plus important de stations ou de sites (au sens de l'échelle d'investigation, voir plus loin), un temps de suivi plus long, etc.

Si le premier niveau sera assez détaillé dans ce document, car il devra être mis en œuvre dans tous les cas retenus en fonction des altérations identifiées, seules quelques pistes seront données pour le niveau « amélioré » qui restera donc ouvert.

Pour chaque thème (hydromorphologie, hydroécologie, etc.) sont identifiés les variables pertinentes à suivre et les **tendances d'amélioration attendues**.

# 1. CONCEPTS DE BASE

## 1.1. OPERATIONS DE RESTAURATION DEVANT FAIRE L'OBJET D'UN SUIVI

- Types d'opération

Nous proposons de suivre prioritairement les travaux de niveau d'ambition R2 et R3 (Malavoi, Adam, 2007, voir annexe 1bis), mais il n'est absolument pas exclu de documenter aussi des travaux de type R1, en fonction d'intérêt plus local.

**NB** : la restitution d'un espace de mobilité à un cours d'eau actuellement figé est une opération de niveau R3 (par exemple : suppression de protections de berges, écartement de digues et suppression des protections de berges qui les stabilisaient). En revanche, la préservation d'un espace de mobilité existant, n'est pas prise comme une action de restauration même si cette mobilité peut contribuer à restaurer des secteurs incisés par réinjection de charge solide et réduction de la pente.

- Linéaire du projet :
  - Minimum : **50 fois la largeur naturelle** du cours d'eau à pleins bords,
  - On peut éventuellement suivre des projets d'un linéaire plus faible s'il existe un intérêt particulier : projet d'intérêt sociopolitique avéré (1<sup>er</sup> cas de restauration dans une région ou un département, etc.), technique innovante, etc.
- Cas des effacements de seuils ou barrages :
  - Minimum de **hauteur de chute effacée** en cas d'ouvrage sans plan d'eau amont (ouvrage comblé par des sédiments en zone de montagne par exemple) : **2 m**
  - Sinon, minimum de **linéaire non influencé regagné** : 50 fois la largeur du lit mineur à pleins bords (largeur naturelle et non largeur dans l'emprise de la retenue).

Là encore il ne s'agit pas d'écarter tout suivi d'opérations de faible ampleur linéaire ou sur des ouvrages de faible chute ou de moindre influence linéaire du remous liquide. Il s'agit simplement d'orienter les suivis vers des opérations, qui ont de bonnes chances de produire un effet mesurable (fort gradient de changement) et nous semblent, de ce fait, les plus enrichissants scientifiquement.

Enfin, il peut être intéressant de suivre les effets d'orientations de gestion de type « non intervention » par exemple celui d'un arrêt de l'entretien systématique de la végétation rivulaire ou un arrêt des curages. En effet, sans être des actions de restauration proprement dites, ces modifications des modes de gestion peuvent se traduire par des améliorations du fonctionnement hydromorphologique et écologique. **Ces décisions sont à prendre au cas par cas en fonction de l'avis des experts locaux et des structures décisionnaires.**



## 1.2. NECESSITE D'UN DIAGNOSTIC DE DYSFONCTIONNEMENT CORRECTEMENT ETABLI

---

Avant tout projet de restauration de cours d'eau, il est essentiel qu'un diagnostic ait été posé : quels sont les facteurs limitants identifiés ? Dans quel cadre spatial s'expriment-ils, et quelle est leur emprise ?

Pour cela une étude préalable doit permettre de :

- Déterminer les éléments du fonctionnement naturel théorique du cours d'eau, *a minima* à l'échelle du **tronçon** (Annexe 2) dans lequel se situe le linéaire à restaurer et si possible sur les **tronçons adjacents** (situés immédiatement en amont et en aval) :
  - typologie géodynamique générale : puissance spécifique, érodabilité des berges, potentiel d'apports solides,
  - typologie des peuplements aquatiques, animaux et végétaux.
- déterminer les altérations hydromorphologiques subies par le cours d'eau à l'échelle du bassin versant (noté BV), du tronçon hydromorphologique dans lequel se situe le projet, du linéaire que l'on souhaite restaurer :
  - état général d'altération du BV (« atlas large échelle » de la base SYRAH, Chandesris et al., 2008),
  - état de modification du régime hydrologique (régime des crues et des étiages),
  - état de dégradation des caractéristiques géomorphologiques du tronçon et du linéaire à restaurer : travaux hydrauliques réalisés, linéaire altéré, époque de réalisation, impacts sur les caractéristiques hydrodynamiques, sur le tracé en plan, sur les faciès naturels, le substrat, etc (niveau tronçon de la base SYRAH, données EVACE ou QUALPHY (AE, 1998),...),
- Mettre en évidence les dysfonctionnements écologiques induits par ces altérations :
  - état de la qualité de l'eau,
  - état de dégradation du fonctionnement écologique : écart des paramètres biologiques par rapport à des situations témoins sans altération si les données existent (stations de référence) ou à des modèles selon leur pertinence régionale ; état des métriques structurelles des éléments de qualité de l'état écologique (analyse des données issues des réseaux DCE) ; si possible identification des fonctions altérées (ex. capacité de rétention, capacité d'assimilation, capacité d'habitat, etc.) et diagnostic des relations de cause à effets entre cet état et les altérations hydromorphologiques.

Le tableau suivant, qui n'est probablement pas exhaustif, présente les **principaux types d'altérations** hydromorphologiques, morpho-écologiques (interprétation écologique des altérations hydromorphologiques, notamment sous l'angle de « l'habitat ») et écologiques

que les actions de restauration doivent tenter de résorber. Pour chaque type d'altération **morpho-écologique**, nous avons indiqué les pressions qui en sont à l'origine.

Les « **compartiments** » **morpho-écologiques** altérés ont été classés en **7 catégories** et autant de couleurs : hydrologie, lit mineur (générique), lit mineur (substrat, y compris les bancs alluviaux exondés une grande partie de l'année), rives, habitats du lit majeur, habitats des annexes hydrauliques, nappe alluviale, physico-chimie.

**Tableau 1 : altérations hydromorphologiques et morphoécologiques**

Compartiment altéré	Élément de qualité DCE correspondants	Altérations hydromorphologiques	Altérations morpho-écologiques	Impacts écologiques	Pression
hydrologie	quantité et dynamique du débit liquide	modification des caractéristiques hydrodynamiques (crues et/ou étiages)	modification des paramètres d'habitats	perte de biodiversité et ou de biomasse, altération des peuplements, perte de fonctionnalités	modification du BV, barrages hydroélectriques ou d'irrigation
lit mineur	variation de la largeur et de la profondeur	homogénéisation des faciès	homogénéisation des habitats aquatiques		recalibrage, rectification, seuils, extractions
lit mineur	variation de la largeur et de la profondeur	élargissement du lit mineur	profondeurs limitantes en étiage		recalibrage
lit mineur	variation de la largeur et de la profondeur	incision du lit mineur	vitesse limitantes en crue		recalibrage, rescindement, endiguement étroit
substrat alluvial	structure et substrat du lit	surcharge en MES et/ou ralentissement de l'écoulement favorisant le dépôt des fines	colmatage des substrats grossiers		érosion des sols, recalibrage, amont seuil
substrat alluvial	structure et substrat du lit	blocage des processus d'érosion latérale	perte de capacité de recharge alluviale grossière et perte des processus de rajeunissement des milieux		protection berges, modif. régime des crues
substrat alluvial	transport des sédiments	perturbation fourniture et /ou transit de la charge de fond	perte de charge alluviale grossière et des habitats associés		seuil, barrage, extractions, modif. régime des crues
rives	structure de la rive	modif structure berge	Appauvrissement de la qualité écologique des rives (disparition de l'écotone de rive)		protection berges
rives	structure de la rive	disparition ripisylve	perte des habitats aquatiques liés à la ripisylve (racines)		suppression ripisylve + tous Wx se traduisant par une incision du lit mineur
lit majeur +annexes		incision du lit mineur	perte de fréquence et de durée de submersion du lit majeur et des annexes hydrauliques		recalibrage, rescindement, endiguement, extractions
nappe	connexion aux masses d'eau souterraines	incision du lit mineur	modification des relations nappe rivière (le cours d'eau draine la nappe en permanence)		recalibrage, rescindement, endiguement, extractions
nappe	connexion aux masses d'eau souterraines	talweg perché	modification des relations nappe rivière (la nappe draine le cours d'eau en permanence : perte de capacité d'accueil)		déplacement
physico-chimie		élargissement du lit mineur	réchauffement de l'eau et atteinte de conditions létales pour les biocénoses		recalibrage, suppression ripisylve
physico-chimie		élargissement du lit mineur	réchauffement de l'eau et aggravation des effets de l'eutrophisation		recalibrage, suppression ripisylve
physico-chimie		homogénéisation des faciès et/ou perte de substrat alluvial	réduction capacité auto-épuratoire		tous les wx se traduisant par perte de faciès et/ou de substrat alluvial
physico-chimie		disparition ripisylve	perte des fonctions auto-épuratoires liées à la ripisylve		tous les wx se traduisant par une disparition de la ripisylve

Les actions de suivi auront donc pour objectifs de :

- vérifier la disparition ou la réduction des altérations morpho-écologiques et/ou (selon les cas) hydromorphologiques qui ont été identifiées,
- vérifier la disparition ou la réduction des altérations (ou pertes de fonctionnalité) écologiques qui leur sont corrélées.

**NB** : il est important de garder toujours à l'esprit qu'**une grande partie des pressions** se traduisant par une détérioration des processus hydromorphologiques et une altération du fonctionnement écologique des cours d'eau **ont leur origine dans le bassin versant** au sens large : érosion des terres agricoles et apports de matières en suspension (MES) et de nutriments, altération de l'hydrologie par modification de l'occupation des sols ou de leur mode de gestion (drainage par exemple), ouvrages divers modifiant les apports solides et liquides, etc. Il est donc utile, voire indispensable, de **connaître les pressions à l'échelle du**

**bassin et leur évolution** pour réaliser une interprétation pertinente des suivis qui seront mis en œuvre à des échelles spatiales souvent très inférieures.

### 1.3. TRAJECTOIRES D'AMELIORATION

Si les dysfonctionnements écologiques induits par des altérations hydromorphologiques sont aujourd'hui relativement bien connus grâce à 50 ans de recherche dans ce domaine, il reste néanmoins très difficile de prédire l'évolution hydromorphologique d'un cours d'eau, et plus encore son évolution écologique, suite à des opérations de restauration hydromorphologique.

Ce qui est aujourd'hui largement admis par la communauté scientifique, c'est que la relation fonctionnement hydromorphologique/fonctionnement écologique n'est pas linéaire (Figure 1a), ce qui signifie, pour ce qui nous concerne ici que

**toute restauration hydromorphologique  
ne se traduit pas toujours, ou pas immédiatement, ou pas durablement  
par une amélioration du fonctionnement hydromorphologique ou écologique**

De nombreuses **trajectoires** d'évolution ont été recensées dans la littérature scientifique de ces dernières années. Ces trajectoires sont extrêmement variées, tant pour le compartiment hydromorphologique que pour le compartiment écologique (Figure 1b).

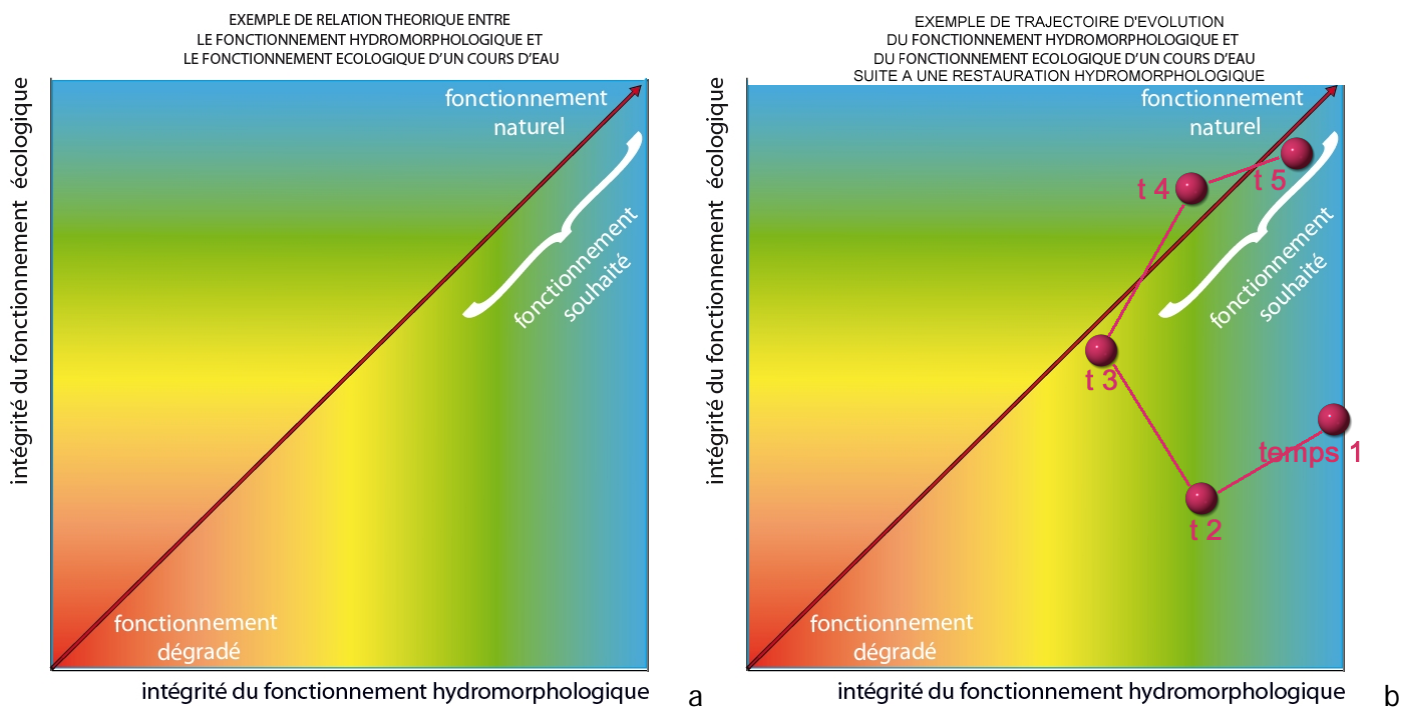


Figure 1 : (a) relation théorique « idéale » entre le fonctionnement hydromorphologique et le fonctionnement écologique d'un cours d'eau (b) exemple de trajectoires (théoriques) d'évolution au

**cours du temps (T1 à T5) du fonctionnement hydromorphologique et du fonctionnement écologique d'un cours d'eau suite à des travaux de restauration.**

Un **raisonnement collectif de type qualitatif** autour du projet, de ses options, une représentation par un schéma conceptuel des principales relations en jeu, un « pari » sur les trajectoires les plus probables et sur les fonctions et les métriques susceptibles de changer le plus **est un exercice à conseiller**, qui peut avoir une forte valeur heuristique pour le groupe en charge de la mise en œuvre et de l'accompagnement des travaux.

**NB** : dans certains cas bien typés comme celui de l'augmentation des débits réservés dans un tronçon sans modification majeure de la morphologie, il est important de s'aider de la modélisation des habitats (couplage entre modèles hydrauliques et modèles de préférence d'habitat d'espèces ou de guildes). Ces cas ne sont pas développés dans ce rapport. Nous renvoyons à la littérature de ce domaine (Sabaton et al., 2004 ; Lamouroux et al., 2006 ; Gouraud et al., 2008 ; Sabaton et al., 2008 ; Souchon et al., 2008 ; Poff et Zimmerman, 2010).

Pour compliquer les choses, une même trajectoire d'évolution du fonctionnement hydromorphologique, peut se traduire par différentes trajectoires d'évolution du compartiment écologique « global », elles mêmes dissociables par « élément de qualité » (invertébrés, poissons, macrophytes, etc.), mais aussi par espèces, stades de développement, etc.

Une trajectoire d'amélioration du fonctionnement hydromorphologique devrait donc, dans la théorie, se traduire par une trajectoire de même sens pour le compartiment écologique.

Dans la réalité d'autres paramètres peuvent induire des trajectoires différentes.

Par exemple :

- la variabilité intrinsèque des dynamiques écologiques,
- des événements hydrologiques peu fréquents, crues ou étiages exceptionnels, sont survenus dans le temps du suivi,
- l'échelle spatiale de la restauration peut être insuffisante,
- l'amélioration hydromorphologique apportée par la restauration s'est avérée faible en valeur absolue ou en valeur relative par rapport aux autres déterminants, identifiés comme facteurs limitants du système,
- la qualité de l'eau peut être pénalisante,
- le colmatage des substrats par des fines provenant de l'érosion des sols du BV peut altérer l'amélioration hydromorphologique globale,

- le réseau hydrographique secondaire, fondamental pour la reproduction de certaines espèces, peut rester altéré, ce qui se traduira par une « non amélioration » à l'échelle de la portion restaurée,
- idem pour les annexes hydrauliques ou le lit majeur qui resteraient dysfonctionnels,
- une partie des espèces attendues peut avoir disparu du bassin ou ne peut plus recoloniser à cause de l'existence de barrières (ex. zones urbaines pour les insectes adultes, déconnexions latérales ou ouvrages transversaux faisant obstacle à la recolonisation par les poissons),
- etc.

L'objectif du suivi sera donc de vérifier que le cours d'eau, ou du moins la portion restaurée, se situe, années après années, sur **une trajectoire d'amélioration**, quelle que soit sa forme.

Le simple positionnement du cours d'eau sur cette trajectoire pourrait être considéré comme un **premier niveau de « réussite »** des travaux mis en œuvre.

## 1.4. CONCEPTS GENERAUX D'ECHELLE SPATIALE ET DE METHODES DE SUIVIS

### 1.4.1. LES ECHELLES SPATIALES EMBOITEES

Nous identifions 3 échelles spatiales potentielles des effets d'intervention à vocation de restauration hydromorphologique :

- l'échelle du linéaire restauré,
- l'échelle du tronçon hydromorphologique homogène ou de plusieurs tronçons contigus,
- l'échelle du réseau hydrographique.

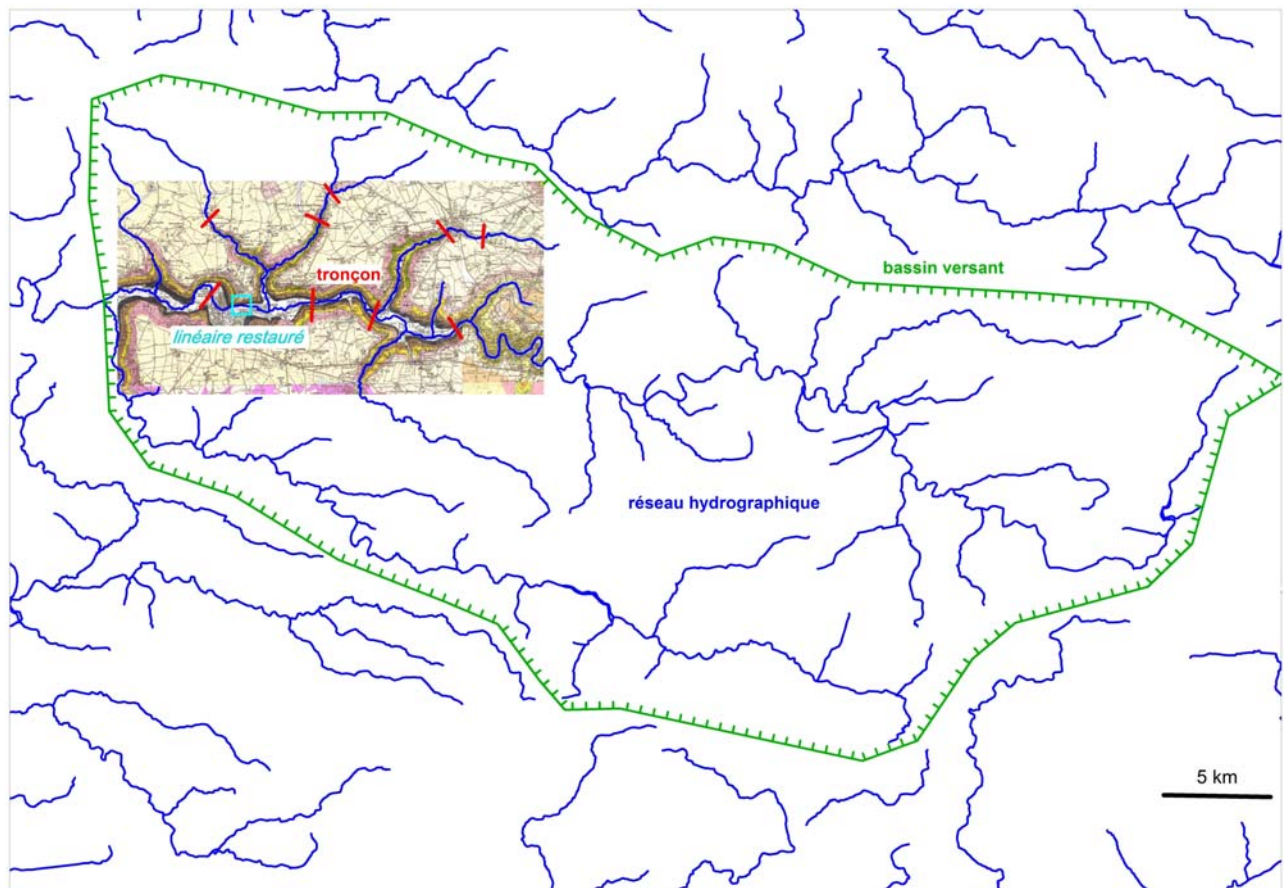


Figure 2 : les échelles emboîtées. Les traits rouges sont les limites des tronçons géomorphologiques homogènes.

Selon le compartiment suivi (hydromorphologie, hydroécologie), le type et l'ambition des travaux projetés, la typologie du cours d'eau, etc., ces 3 échelles ne seront pas à suivre avec le même niveau de précision, ni forcément les mêmes méthodes d'échantillonnage.

Un quatrième niveau de suivi, la **Masse d'Eau** au sens de la DCE, est susceptible d'intéresser les gestionnaires puisque c'est à ce niveau que se fait le rapportage européen de l'état des cours d'eau français (Réseau de Contrôle et de Surveillance-RCS) et des améliorations apportées par les Programmes De Mesures (PDM) mis en œuvre (Réseau de Contrôle Opérationnel-RCO). Toutefois cette maille spatiale est très arbitraire et sa délimitation a été très variable d'un grand bassin hydrographique à l'autre (Figure ). C'est pour cette raison qu'il ne nous semble pas opportun de proposer ici un suivi à l'échelle des Masses d'Eau, qui relèvera d'une méthodologie particulière dans le cadre du **RCO** (cf introduction).

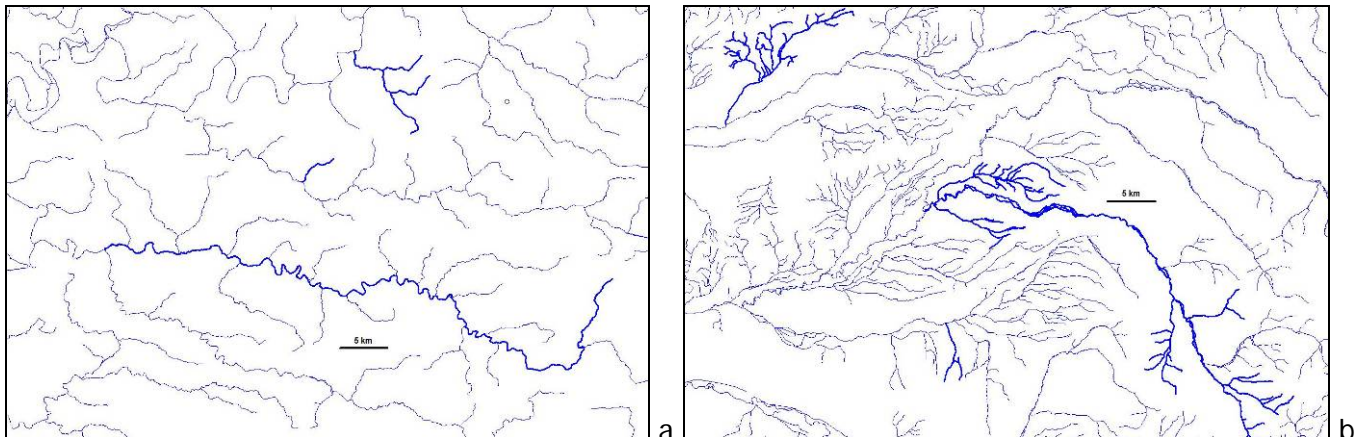


Figure 3 : exemples, à la même échelle, de 3 masses d'eau en Seine-Normandie (a) et de 3 masses d'eau en Loire-Bretagne (b) (chaque réseau de traits bleus épais est une masse d'eau). Noter la différence de densité du réseau de drainage et la différence de taille des masses d'eau.

#### 1.4.2. LES META-CATEGORIES D'INTERVENTION

On peut considérer qu'il existe deux grandes catégories d'interventions, au titre de la restauration hydromorphologique, dont les emprises spatiales des effets attendus peuvent être notablement différentes :

- **L'effacement d'obstacle de type seuil ou barrage** : la restauration aura très probablement des effets écologiques, voire hydromorphologiques, sur un linéaire très supérieur au seul linéaire directement restauré, ce dernier étant composé de l'aval immédiat de l'ouvrage, de l'ouvrage lui-même, et de la retenue d'eau en amont. Il sera donc intéressant de mettre en œuvre une stratégie de suivi permettant de mesurer ces effets,
- **La restauration « linéaire »** : reméandrage, écartement ou suppression de digues, remise du cours d'eau dans son talweg, etc. La restauration localisée aura très probablement des effets limités au linéaire restauré même si des effets plus larges que le seul site restauré et ses abords immédiats sont envisageables : l'écartement des digues sur le linéaire concerné va probablement modifier l'effet hydraulique du régime des crues et des inondations en aval, la suppression d'enrochements va réactiver la recharge

sédimentaire en aval, etc. Le linéaire qui pourrait être positivement impacté par ces interventions et la stratégie d'échantillonnage qui en découlera, seront à estimer au cas par cas par les chargés d'étude.

Comme exposé dans l'introduction, une troisième méta-catégorie d'intervention ne sera pas traitée ici. Elle concerne les opérations réalisées à l'échelle globale du bassin versant (mesures génériques de protection des cours d'eau de têtes de bassin, de zones humides de ripisylves, réduction des apports de MES par modification du type d'occupation des sols ou du mode de culture, augmentation des débits réservés, enherbement des collecteurs de drainage, replantation de haies, etc.).

### 1.4.3. LES ECHELLES D'INTERVENTION ET DE REPONSE PROBABLE

Un autre concept est nécessaire pour aborder ensuite la stratégie d'échantillonnage : il s'agit de l'échelle de réalisation de l'intervention et de l'emprise spatiale probable des réponses hydromorphologiques et biologiques, ce deuxième point étant déjà en partie abordé par le biais de la méta-catégorie d'intervention.

Il y a, pour simplifier, deux échelles spatiales d'intervention, qui correspondent généralement à deux échelles spatiales de réponse.

- L'échelle d'intervention locale :
  - on supprime un seuil sur un cours d'eau sur lequel il en existe d'autres,
  - on fait reméandrer 200 m de rivière sur un tronçon rectifié sur 6 km, on supprime 200 m de digues alors que l'ensemble du tronçon est endigué.

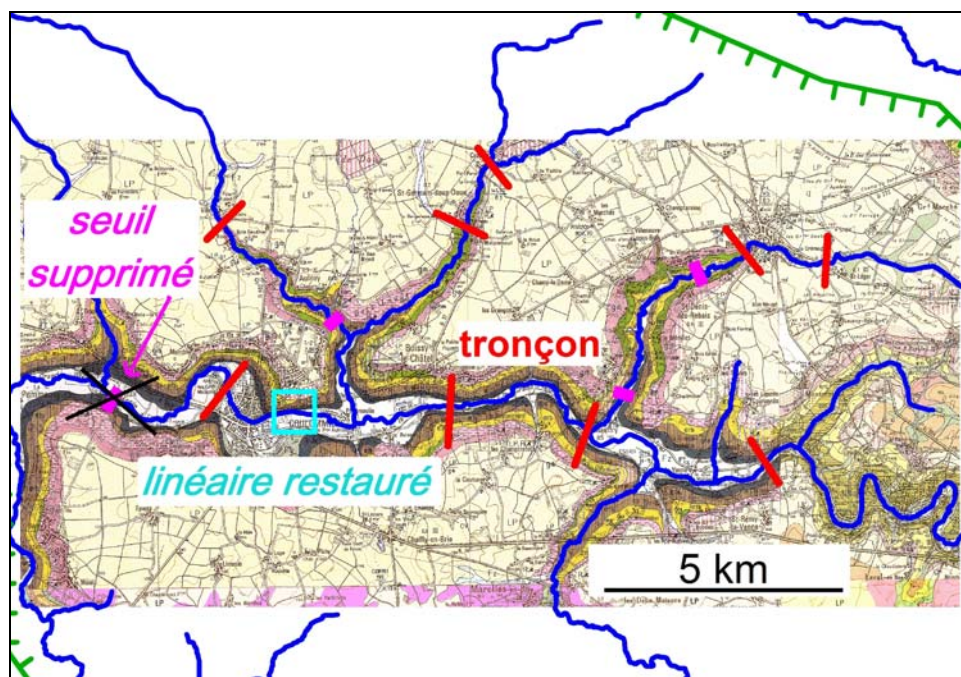


Figure 4 : exemples d'échelles d'intervention « locales ».



Les réponses hydromorphologiques et écologiques attendues sont d'abord locales, bien que, nous l'avons vu, la suppression d'un seuil puisse avoir des effets, notamment biologiques, plus larges que la simple emprise de l'ouvrage et de son plan d'eau (recolonisation biologique du réseau hydrographique décloisonné). C'est particulièrement vrai s'il s'agit du seul ouvrage « bloquant » sur tout un bassin auquel cas l'échelle de réponse devient beaucoup plus large (cf. ci-dessous).

- L'échelle d'intervention plus large :
  - on supprime plusieurs ouvrages ou un seul ouvrage mais qui bloquait tout ou la plus grande partie du réseau hydrographique, ou qui piégeait tous les sédiments venant de l'amont.
  - on fait reméandrer le cours d'eau, on supprime des digues, on restaure un espace de mobilité, on plante de la ripisylve sur un linéaire important, à l'échelle d'un ou plusieurs tronçons homogènes. Nous considérons par avis d'expert et en l'attente de données scientifiques supplémentaires, que l'on commence à atteindre ce niveau d'échelle « plus large » dès lors que l'intervention est réalisée sur un **linéaire supérieur à 100 fois la largeur du lit à pleins bords**.

On peut alors considérer que l'emprise spatiale des réponses sera importante et ira même probablement, quelle que soit la méta-catégorie d'intervention réalisée, très au delà du linéaire restauré. C'est une des réponses à mieux qualifier et quantifier par la présente initiative nationale de capitalisation des expériences.

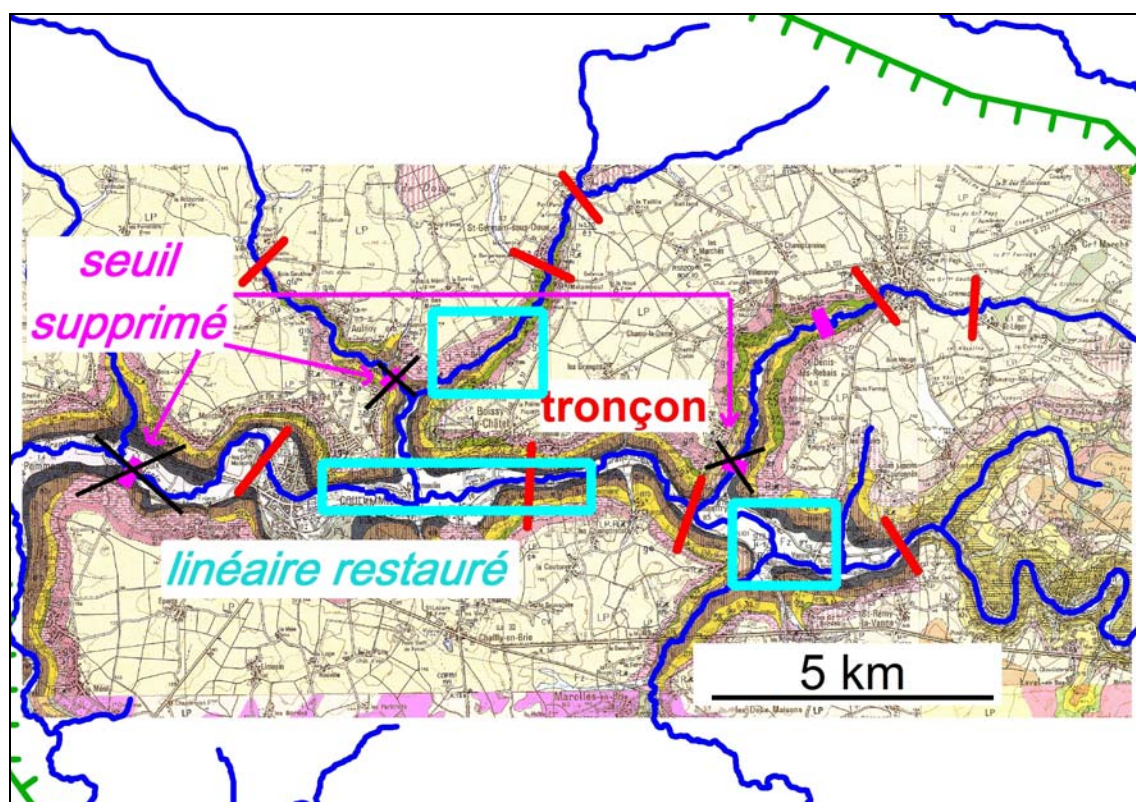


Figure 5: exemples d'échelles d'intervention plus larges. Trois secteurs assez longs sont restaurés.

#### 1.4.4. LES ECHELLES D'INVESTIGATION

Nous distinguerons ici **trois échelles d'investigation** des effets des mesures de restauration hydromorphologique :

- **L'échelle stationnelle** : on mesurera un certain nombre de caractéristiques hydromorphologiques et biologiques sur des « **stations** » d'une longueur relativement importante (**une quinzaine de fois la largeur du lit à pleins bords**), mais néanmoins limitée par les contraintes d'échantillonnage et de coût.

→ C'est cette échelle « stationnelle » qui apportera l'essentiel des éléments de connaissance des effets des opérations de restauration.

- **L'échelle de l'ensemble du linéaire restauré** : dans le cas où celui-ci sera peu étendu (ce qui reste encore le cas le plus fréquent...), on y mesurera de manière exhaustive un certain nombre de paramètres (faciès d'écoulement, ripisylve, protections de berges, etc., voir plus loin)

- **L'échelle étendue** : on mesurera les caractéristiques hydromorphologiques et biologiques sur des « **sites** », qui seront en réalité des micro-stations de faible longueur (environ 6 largeurs de lit à pleins bords) sur lesquelles ne seront mesurés que quelques paramètres.

→ Cette échelle viendra **compléter** les précédentes pour certains types d'investigations qui seront réalisées au delà du linéaire restauré proprement dit.

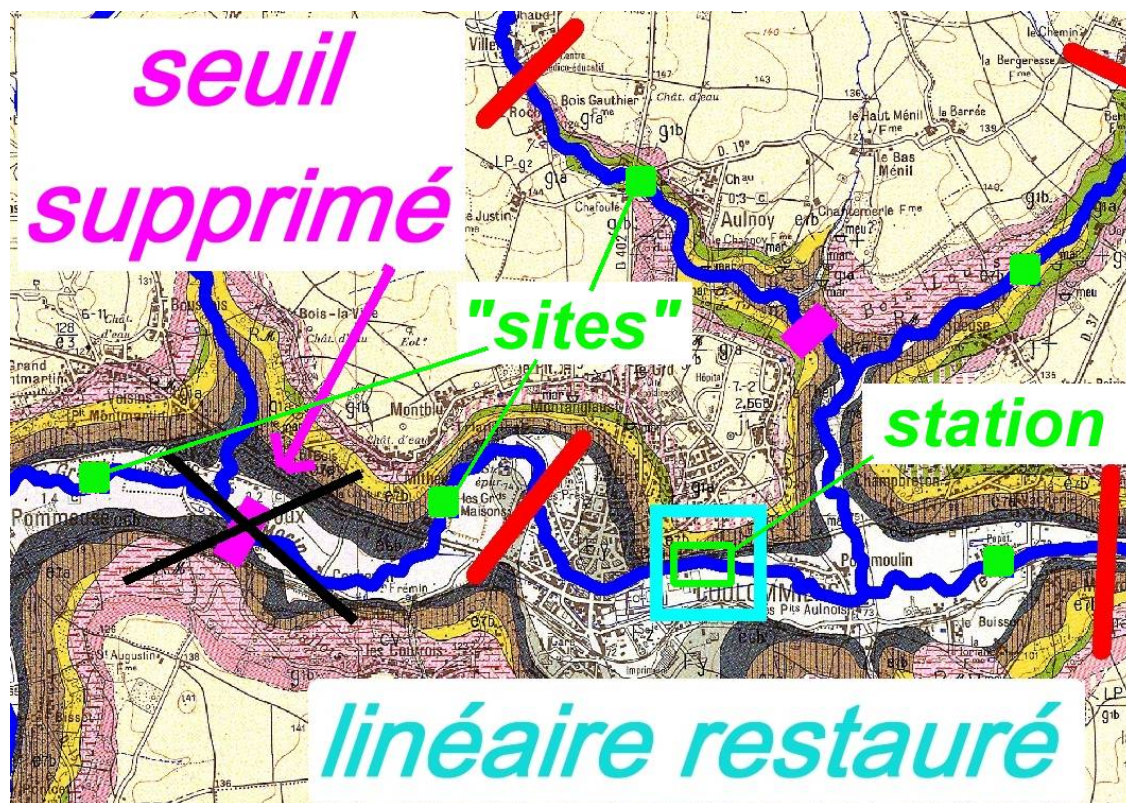


Figure 6 : les trois échelles d'investigation

#### 1.4.4.1. ECHELLE STATIONNELLE

##### ◆ Concepts d'état initial, de station altérée non restaurée, de station témoin

###### ➤ Etat initial

**IMPORTANT** : pour pouvoir établir un bilan des travaux de restauration, il importe de disposer d'une description de **l'état initial hydromorphologique et écologique** avant restauration, selon le même protocole que celui qui sera utilisé pour le suivi.

Il apparaît que pour le compartiment biologique, et notamment pour les peuplements de poissons, cet état initial doit être réalisé sur une **durée suffisante** pour tenir compte des cycles biologiques (maturité sexuelle pouvant varier entre 1 an et 4 ans pour les espèces les plus communes), des fluctuations interannuelles, liées elles-mêmes aux fluctuations des caractéristiques hydromorphologiques (fortes crues, étiages profonds) et physico-chimiques (ex. canicule induisant des températures d'eau anormalement élevées etc.). Or, dans la pratique, les états initiaux sont au mieux établis sur 1 voire 2 ans (durée d'instruction d'un dossier Loi sur l'Eau), ce qui est un temps court par rapport au calage d'un référentiel local optimal : **3 années seraient plus appropriées**.

**IMPORTANT** : un état initial doit aussi être réalisé sur les **3 échelles** (au sens de l'échelle d'échantillonnage, voir plus loin) qui seront éventuellement suivies.

###### ➤ Station altérée non restaurée

Une **solution alternative**, si l'on ne peut réaliser d'état initial sur une durée suffisante, consiste à rechercher, dans le même tronçon hydromorphologique, ou dans un tronçon assez similaire, une station subissant le même type d'altérations mais qui ne serait pas concernée par les travaux de restauration. C'est cette station « non restaurée » qui serait considérée comme « **station en état initial** » à observer de façon synchronique.

Il est bien évident que cette solution ne sera pas toujours réalisable, tant pour des raisons techniques que financières. Dans ce cas, un **état initial sur 3 ans** sur le site à restaurer sera donc le **minimum** à mettre en œuvre.

**NB** : même si l'on peut réaliser un état initial suffisant sur la station représentative du site qui sera restauré, le **suivi synchronique d'une station « non restaurée » est un plus** en terme de possibilités d'interprétation des résultats. Cette station nécessitera aussi un état initial si celui-ci est réalisé.

###### ➤ Station témoin

Une station « **témoin** » peut être suivi **en plus** de la station représentative du linéaire restauré. Une station « témoin » est une station de suivi située dans le même tronçon

hydromorphologique que le site qui sera restauré (si possible en amont ou dans un tronçon assez similaire), **mais qui ne subit pas l'altération** du site faisant l'objet de travaux de restauration et **qui sera a priori peu ou pas influencée** par ceux-ci.

Cette station témoin permettra de tenir compte, dans l'interprétation du suivi biologique, d'autres paramètres pouvant influencer l'évolution biologique post-restauration (la qualité de l'eau, les fortes crues et les étiages profonds, un apport massif de sédiments fins ou grossiers, d'autres flux en provenance du bassin versant, etc.). Cette station nécessitera aussi un état initial si celui-ci est réalisé, ou un suivi sur le même pas de temps si l'on travaille sur un triptyque comprenant site restauré, site non restauré et site témoin.

Un exemple d'échantillonnage à encourager est présenté sur la figure 8.

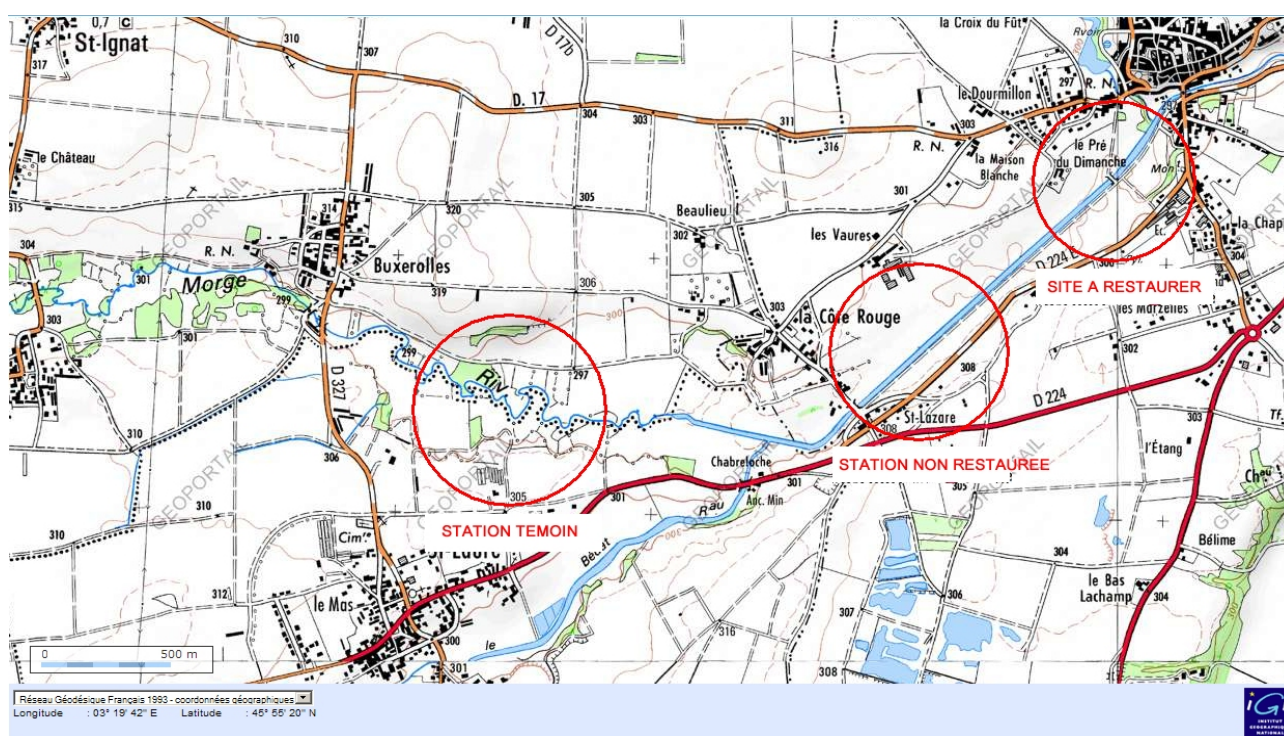


Figure7 : Exemple de configuration spatiale optimale de stations à suivre à l'échelle d'un site à restaurer.

#### ◆ Implantation des stations

Le suivi stationnel se fait *a minima* sur une **station représentative du linéaire restauré**. Des mesures sur une **station complémentaire** en aval ou en amont peuvent être souhaitables dans certains cas (voir 1.4.5).

- En aval si la restauration peut se traduire par :
  - une modification du transit sédimentaire en volume et en nature (arasement/dérasement de seuil ou barrage, dérivation de cours d'eau hors d'un

étang ou d'une gravière, redynamisation des processus d'érosion latérale, remobilisation de masses sédimentaires figées, etc.)

→ une amélioration de la qualité de l'eau (arasement/dérasement de seuil ou barrage, dérivation de cours d'eau hors d'un étang ou d'une gravière)

- En amont si la restauration peut se traduire par des processus géodynamiques régressifs (érosion régressive suite au dérasement d'un seuil ou barrage).

#### ◆ Longueur des stations

Sur la plupart des sites de restauration, malgré leurs dimensions encore modestes, il sera nécessaire de procéder à un **sous-échantillonnage** du site restauré avec une station de mesure d'une longueur de l'ordre de 14 fois la largeur du cours d'eau à pleins bords (protocole CARHYCE).

Un certain nombre de paramètres (faciès d'écoulement, ripisylve, état des berges par exemple) pourront cependant être suivis à l'échelle de l'ensemble du linéaire restauré.

#### 1.4.4.2. ECHELLE DU LINEAIRE RESTAURE

L'ensemble du linéaire restauré est analysé. Les paramètres à suivre seront fonction des altérations qui y ont été identifiées et que l'on souhaite résorber.

#### 1.4.4.3. ECHELLE ETENDUE

##### ◆ Nombre de sites de mesure

Il est extrêmement **difficile de fixer un nombre minimal de sites** à suivre. Ce nombre sera donc déterminé au cas par cas par le chargé d'étude et le comité de pilotage qui l'accompagne.

##### ◆ Répartition des sites de mesure

Deux solutions sont envisageables :

- placement aléatoire de **sites** sur la partie du réseau hydrographique potentiellement concernée par les effets des opérations de restauration mises en œuvre (il existe des modules très simples sous SIG).
  - C'est la solution statistiquement la plus pertinente
- détermination des **sites** par expertise.

**NB** : quelle que soit l'échelle d'investigation choisie, des mesures de l'**état initial** sont indispensables avant le suivi proprement dit.

### 1.4.5. SYNTHÈSE

Pour rendre opérationnels les concepts présentés ci-dessus, nous en couplons deux : méta-catégorie d'intervention et échelle d'intervention (et de réponse probable). Pour chacun des 4 couples, nous proposons une stratégie d'échantillonnage (échelle de d'investigation : ensemble du linéaire restauré, station, site ; nombre, etc.) pour un **suivi scientifique minimal** et des éléments pour mettre en œuvre un **suivi scientifique amélioré**.

Le détail des protocoles est présenté plus loin.

#### 1.4.5.1. CATÉGORIE OBSTACLE/ÉCHELLE LOCALE

Ex : on supprime un seuil ou un barrage.

##### ◆ Suivi scientifique minimal

- Une **station** dans l'emprise de la retenue  
→ Suivi hydromorphologique et biologique (mais sans état initial biologique dans la retenue)
- Un certain nombre de **sites** sur le réseau hydrographique en amont de l'ouvrage effacé, dont le nombre et l'implantation seront à déterminer au cas par cas, notamment en fonction du linéaire de réseau hydrographique « libéré » par l'opération  
→ Suivi essentiellement biologique
- **IMPORTANT** : une **station** pourra être réalisée en aval si le diagnostic préalable avait fait ressortir un déficit sédimentaire lié à l'ouvrage (piégeage des alluvions) comme induisant en aval des altérations hydromorphologiques de type incision, pavage, disparition du substrat alluvial, etc. Dans ce cas, l'effacement de l'obstacle peut être considéré comme une **opération de restauration pour l'aval** (en plus d'objectifs de résorption de dysfonctionnements « amont » (effet retenue, franchissement).  
→ Suivi hydromorphologique et biologique
- Cette **station** peut éventuellement être remplacée par plusieurs **sites**.

##### ◆ Suivi scientifique amélioré

- Description de certains paramètres sur **l'ensemble du linéaire restauré** (notamment faciès d'écoulement)
- Une **station** dans l'emprise de la retenue  
→ Avec état initial biologique
- Si aucune altération liée au piégeage des sédiments n'a été détectée, et qu'aucune **station** ou **site** n'est mesurée à ce titre en aval, il peut néanmoins être intéressant d'échantillonner quelques **sites** pour vérifier que la libération des alluvions piégées dans l'ancienne retenue ne génère pas d'impact en aval de type colmatage des substrats

alluviaux existants. **Attention**, les vitesses de propagation de la charge de fond sont faibles : quelques dizaines à centaines de mètres par an pour les matériaux graveleux, quelques centaines de mètres à quelques kilomètres pour les sables.

→ Suivi essentiellement hydromorphologique

#### 1.4.5.2. CATEGORIE RESTAURATION LINEAIRE /ECHELLE LOCALE

Ex : on recrée des méandres, on écarte des digues, etc., sur un linéaire très inférieur à 100 fois la largeur du lit à pleins bords.

##### ◆ Suivi scientifique minimal

- Une **station** représentative du linéaire restauré  
→ Suivi hydromorphologique et biologique

##### ◆ Suivi scientifique amélioré

- Description de certains paramètres sur **l'ensemble du linéaire restauré** (fonction des altérations dont on attend la résorption)  
→ Suivi essentiellement hydromorphologique
- Une **station** de contrôle altérée mais « non restaurée »  
→ Suivi hydromorphologique et biologique
- Une **station** « témoin » non altérée  
→ Suivi hydromorphologique et biologique

#### 1.4.5.3. CATEGORIE OBSTACLE/ECHELLE GLOBALE

Ex : on supprime plusieurs seuils ou barrages ou un seul ouvrage de ce type, mais très bloquant.

##### ◆ Suivi scientifique minimal

- Une **station** dans l'emprise de certaines des retenues supprimées jugées les plus représentatives (pour réduire les coûts)  
→ Suivi hydromorphologique
- Un certain nombre de **sites** sur le réseau hydrographique en amont des ouvrages effacés ou de l'ouvrage bloquant, dont le nombre et l'implantation seront à déterminer au cas par cas, notamment en fonction du linéaire de réseau hydrographique « libéré » par l'opération  
→ Suivi essentiellement biologique
- **IMPORTANT** : une **station** pourra être suivie en aval de l'ouvrage effacé le plus aval si l'étude préalable avait fait ressortir le déficit sédimentaire lié à l'ouvrage ou à la

succession d'ouvrages (piégeage des alluvions) comme induisant en aval des altérations hydromorphologiques de type incision, pavage, disparition du substrat alluvial, etc....

→ Suivi hydromorphologique et biologique

#### ◆ Suivi scientifique amélioré

- Une **station** dans l'emprise de chaque retenue supprimée  
→ Suivi hydromorphologique
- Description de certains paramètres sur **l'ensemble du linéaire restauré pour chaque retenue** (notamment faciès d'écoulement)
- Une **station** dans l'emprise de la retenue  
→ Avec état initial biologique
- Une **station** en aval de chaque ouvrage supprimé si l'étude préalable avait fait ressortir le déficit sédimentaire lié à l'ouvrage  
→ Suivi hydromorphologique et biologique
- Si aucune altération liée au piégeage des sédiments n'a été détectée, et qu'aucune station n'est par conséquent mesurée en aval du ou des ouvrages effacés, il peut être intéressant d'échantillonner quelques **sites** (2 ou 3) pour vérifier que la libération des alluvions piégées dans l'ancienne retenue ne génère pas d'impact en aval de type colmatage des substrats alluviaux existants.  
→ Suivi essentiellement hydromorphologique

#### 1.4.5.4. CATEGORIE RESTAURATION LINEAIRE /ECHELLE GLOBALE

Ex : on supprime plus de 100 fois la largeur de digues ou d'enrochement sur un linéaire continu.

NB : si le linéaire restauré est important mais très discontinu, il faudra s'orienter plutôt vers la stratégie d'échantillonnage du 1.4.5.2.

#### ◆ Suivi scientifique minimal

- Une **station** par tronçon hydromorphologique (si plusieurs tronçons sont dans l'emprise du linéaire restauré)  
→ Suivi hydromorphologique et biologique

#### ◆ Suivi scientifique amélioré

- Description de certains paramètres sur **l'ensemble du linéaire restauré** (fonction des altérations dont on attend la résorption)
- Une **station** de contrôle altérée mais « non restaurée » par tronçon  
→ Suivi hydromorphologique et biologique



- Une **station** « témoin » non altérée par tronçon  
→ Suivi hydromorphologique et biologique

Tableau de synthèse

	Suivi scientifique minimal	Suivi scientifique amélioré
Obstacle échelle locale	1 station dans l'emprise de la retenue (HM + Bio sans état initial)	qq paramètres sur l'ensemble du linéaire restauré (ex : faciès)
	N sites en amont sur réseau hydro.(Bio)	1 station dans l'emprise de la retenue (HM + Bio avec état initial)
	1 station en aval si déficit sédimentaire identifié (HM+Bio)	N sites pour suivre le transit sédimentaire (HM)
	et/ou N sites (HM+Bio)	
Restauration linéaire échelle locale	1 station représentative du linéaire restauré (HM + Bio)	qq paramètres sur l'ensemble du linéaire restauré (ex : faciès)
		1 station non restaurée
		1 station témoin
Obstacle échelle globale	1 station dans l'emprise de certaines retenues (HM + Bio sans état initial)	1 station dans l'emprise de chaque retenue (HM + Bio sans état initial)
	N sites en amont sur réseau hydro.(Bio)	qq paramètres sur l'ensemble du linéaire restauré (ex : faciès)
	1 station en aval de l'ouvrage le + aval si déficit sédimentaire identifié (HM+Bio)	1 station en aval de chaque ouvrage si déficit sédimentaire identifié (HM+Bio)
	et/ou N sites (HM+Bio)	N sites pour suivre le transit sédimentaire (HM)
Restauration linéaire échelle globale	1 station représentative du linéaire restauré dans chaque tronçon restauré (HM + Bio)	qq paramètres sur l'ensemble du linéaire restauré (ex : faciès)
	et/ou N sites (HM+Bio)	1 station non restaurée par tronçon
		1 station témoin par tronçon
		et/ou N sites (HM+Bio)

## 1.5. ECHELLE TEMPORELLE DES SUIVIS

### 1.5.1. FREQUENCE DES MESURES

#### 1.5.1.1. COMPARTIMENT HYDROLOGIE

Il est très important de disposer de l'information hydrologique pour interpréter les changements physiques et biologiques. On se référera soit à une station permanente d'un réseau de suivi hydrométrique, dont les données sont transposables aux stations suivies ou bien on équipera spécifiquement les stations suivies en fonction des enjeux et des moyens financiers mobilisables. De simples échelles à maximum pour enregistrer l'intensité des crues donneront déjà de précieuses informations.

#### 1.5.1.2. COMPARTIMENT TEMPERATURE

De la même façon, l'enregistrement des températures est primordial. Des techniques peu coûteuses en matériel sont disponibles, sous forme de petits enregistreurs immergeables de la taille d'un crayon. Il faudra veiller à l'étalonnage (ou à la vérification du bon étalonnage usine), mais cette donnée n'a pas besoin d'une incertitude inférieure à 0,2 °C.

Ce type de technologie permet déjà des enregistrements à des pas de temps infra journaliers, qui peuvent être intéressants pour interpréter des données physico-chimiques et biologiques.

N.B. : certains réseaux de mesures hydrologiques sont aussi équipés de sondes thermiques. Ce type de données sera également précieux pour comparer les résultats locaux obtenus et déceler certaines dérives possibles d'enregistrement.

#### 1.5.1.3. COMPARTIMENT HYDROMORPHOLOGIE

Pour le compartiment hydromorphologie, il semble important d'avoir un état initial puis un état immédiatement après travaux de restauration (cet état est parfois réalisé par défaut si le maître d'œuvre prévoit un récolement). Le pas de temps du suivi ultérieur ne sera pas fixe mais fonction des crues morphogènes. Nous proposons ainsi la mise en œuvre d'une campagne de suivi après chaque crue de fréquence au moins biennale. Si aucune crue biennale ou de fréquence moindre n'intervient dans les 2 ans, une campagne est alors programmée la 3<sup>ème</sup> année suivant les travaux.

#### 1.5.1.4. COMPARTIMENT BIOLOGIE

On doit d'abord s'interroger sur la pertinence de mesures immédiatement après travaux, qui vont souvent enregistrer les seuls effets de ces interventions, avec parfois des réponses instables et négatives à court terme (par ex. suite à la mise en mouvement d'une vague de sédiments fins qui s'évacuera ensuite progressivement).

Ensuite, il faut juger de l'opportunité d'entretenir une dynamique de mobilisation des partenaires locaux du projet : dans l'affirmative, des pêches électriques peuvent par exemple entretenir la « flamme » et mettre en évidence le retour d'espèces rhéophiles, une meilleure répartition des structures d'âge, un recrutement de juvéniles plus soutenu. On s'appuiera alors plus sur leur valeur locale de démonstration.

Le premier « rendez vous » qui aidera à mesurer réellement le « sens » du changement (premier point de la trajectoire) se situera à partir de la **3<sup>ème</sup> année** pour la plupart des taxons, en procédant à 3 prélèvements successifs. Il faut redire ici toute l'importance d'avoir préalablement posé des hypothèses sur les trajectoires possibles avec les cibles biologiques à atteindre, ce qui permettra d'ajuster au mieux ce « rendez-vous ».

On réitère également les éléments mis en avant pour caractériser la phase pré restauration (état initial) : caractérisation, pendant **3 ans** précédant les travaux et pendant 3 ans suivant les travaux, de la faune des macroinvertébrés benthiques et des poissons : pour les premiers, on vise une caractérisation du peuplement printanier avant envol des insectes (à ajuster en fonction des régimes climatiques) et pour les seconds, un échantillonnage quantitatif d'automne qui intègre le recrutement annuel avec des jeunes individus parvenus à une taille identifiable.

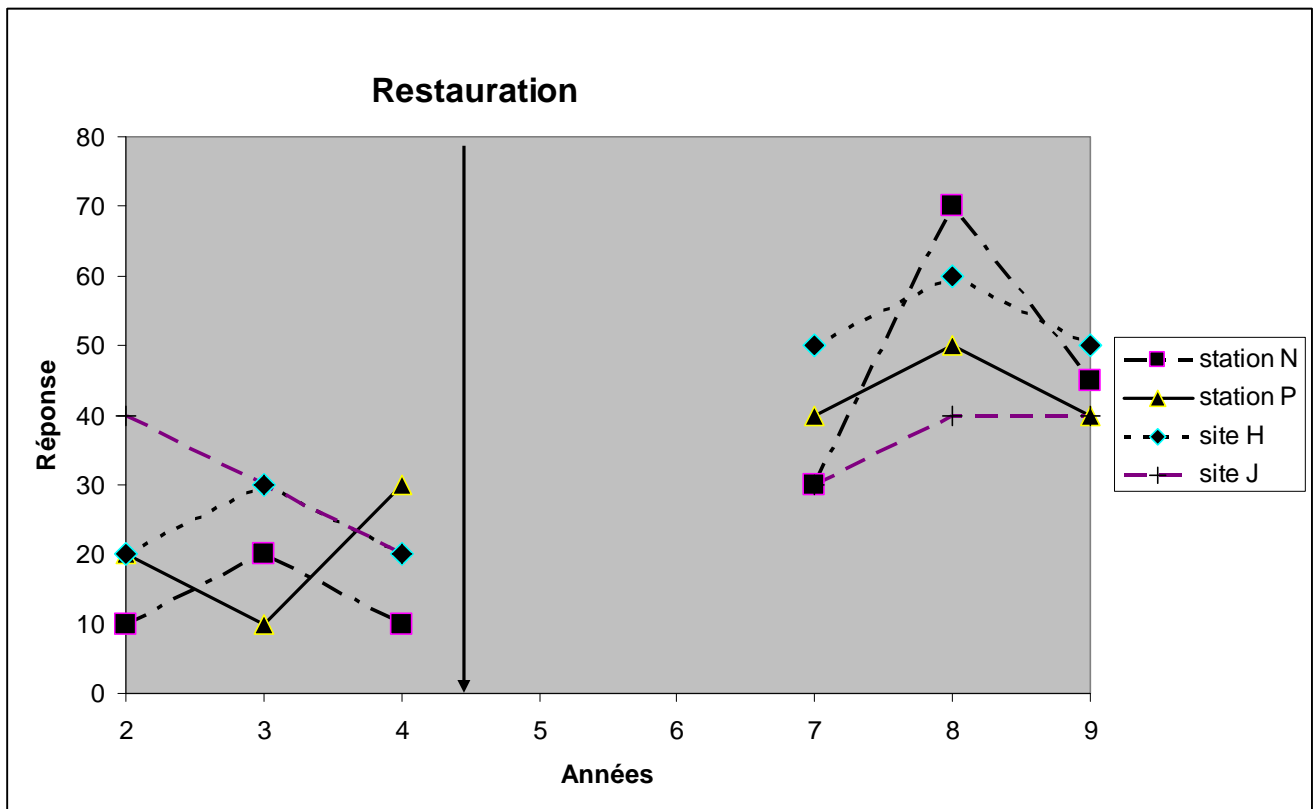


Figure 8 : protocole proposé pour le suivi biologique, avant et après restauration, dans le cas d'un suivi avec 2 stations, N et P, et deux sites, H et J.

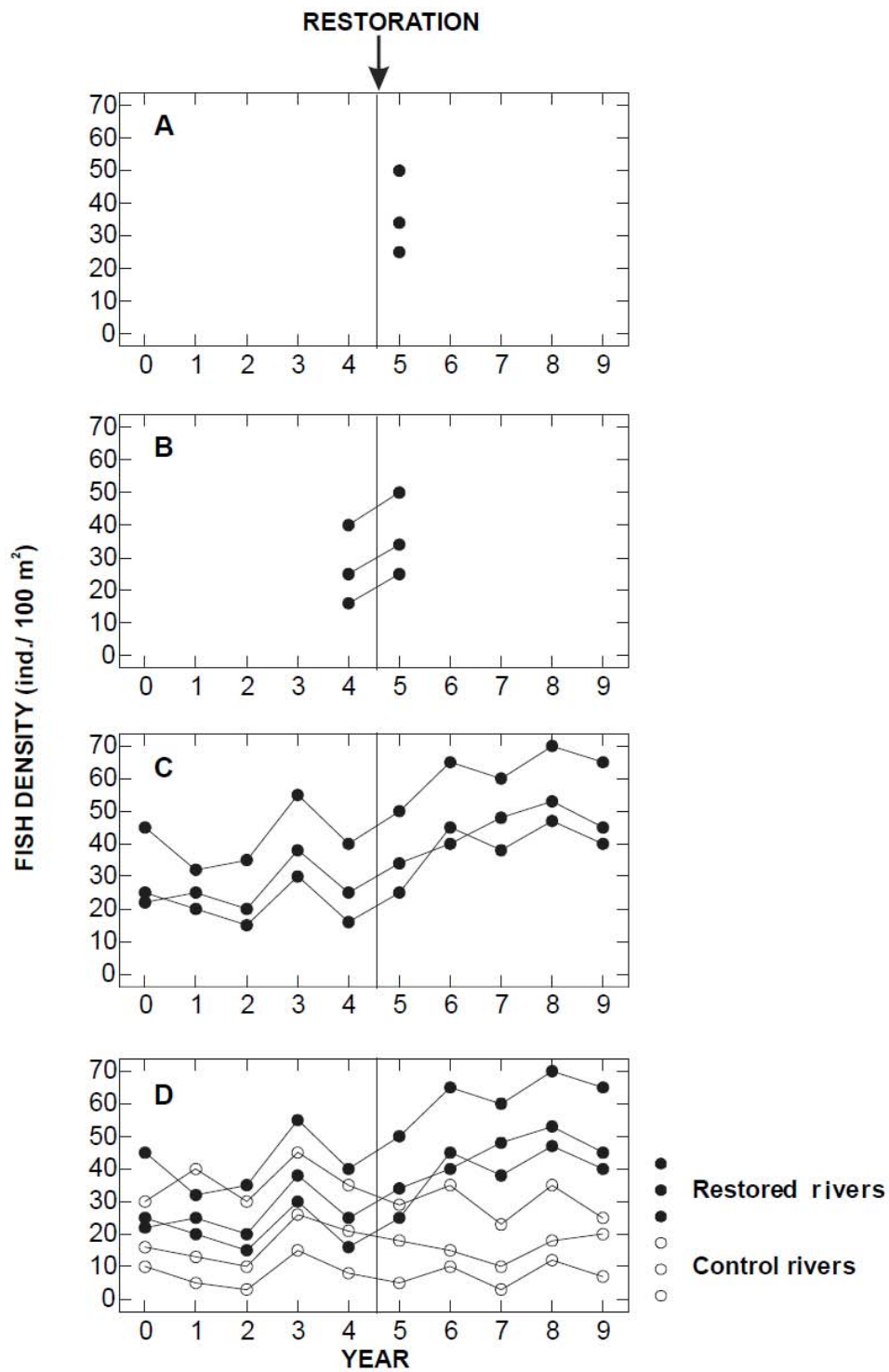


Figure 9 : exemple de protocoles possibles (A à D) pour un suivi biologique (Meissner, 2000). Suivi A : 1 année post travaux. Suivi B : 1 année pré et une année post sur 3 stations restaurées. Suivi C : 5 ans pré et 5 ans post sur 3 stations restaurées. Suivi D : 5 ans pré et 5 ans post sur 3 stations restaurées ET 3 stations témoins.

La figure 9 illustre différents protocoles envisageables. On comprend aisément que les suivis de type A et B sont peu opérants, sans possibilité d'y adjoindre un estimateur statistique ; les suivis C et D se rapprochent des règles de l'art (en particulier tous les développements réalisés autour de la méthode BACI (**B**efore/**A**fter **C**ontrol/**I**mpact, Smith, 2002) qui permet des analyses de variances.

A titre de repère sur la faisabilité technique et l'acceptation sociétale de suivis à mettre en œuvre, le protocole de suivi de la cellule nationale débits réservés (EDF, ministère en charge de l'écologie, agences, CSP/Onema, bureaux d'études, Cemagref, Universités : 1990-2004, relèvement du débit minimal réservé du 1/40<sup>ème</sup> au 1/10<sup>ème</sup> du module interannuel) était un D tronqué : caractérisation initiale ne couvrant qu'une année (Sabaton et al., 2005 ; Sabaton et al., 2008). Le protocole du suivi d'augmentation du débit réservé sur le Rhône à Pierre Bénite correspondait quant à lui à un C (Lamouroux et al., 2006). Dans les 2 cas les suivis se poursuivent, ce qui en fait des expériences pilotes à un niveau international, riches d'enseignements.

## **1.5.2. DUREE DU SUIVI**

### **1.5.2.1. COMPARTIMENT HYDROMORPHOLOGIE**

La durée minimale du suivi pour ce compartiment sera de 2 crues au moins biennales ou de 6 ans en l'absence de crue de cette fréquence (à caler avec le suivi biologique).

### **1.5.2.2. COMPARTIMENT BIOLOGIE**

Les trajectoires d'évolution écologique peuvent parfois comporter une phase « statique » avant amélioration ou être très sensible à la période qui suit immédiatement les travaux. On retiendra l'importance du rendez-vous à 3 ans répliqué au moins 3 années ; selon le même principe que pour l'état initial.

Pour des cas à intérêt plus stratégique, il serait important au niveau national de poursuivre l'effort au-delà de ce premier rendez vous, en constituant des séries temporelles plus longues.

Quel que soit le plan d'échantillonnage choisi, il sera utile, comme pour l'hydrologie, d'interpréter les résultats en les comparant à des stations des « réseaux durables » existants, notamment pour interpréter d'éventuels synchronismes écologiques liés aux grands déterminants (climat, hydrologie et température) et distinguer la part de changement spontané de celle spécifiquement attribuable aux travaux visant la restauration.

## 2. SUIVI ECHELLE STATIONNELLE

Que ce soit pour l'interprétation des évolutions hydromorphologiques ou biologiques, la mise en œuvre d'un protocole de description standardisée des caractéristiques hydromorphologiques stationnelles est indispensable pour le **niveau de suivi scientifique minimal**.

Le protocole CARHYCE (Onema : Baudoin et al., 2010), nous semble adapté à ce niveau minimal : il résulte d'un **compromis** nécessaire pour relever d'une part des variables ayant un sens pour une interprétation du fonctionnement géomorphologique et hydraulique, et d'autre part des variables à connotation plus biologique (paramètres d'habitat, abris, etc...).

Ce compromis porte sur la nature des variables et leur nombre, autorisant deux lectures complémentaires comme il vient d'être dit, sur leur reproductibilité inter opérateurs (mesures préférées à évaluation d'expert), tout en visant un temps de réalisation acceptable.

Ce choix est aussi dicté par le fait que ce protocole connaît un déploiement national, avec l'ambition de couvrir à un terme de 6 ans l'ensemble des stations des réseaux nationaux de référence et de contrôle de surveillance (près de 2000 stations). De ce fait, se met en place une solide ingénierie de méthodes de mesure, harmonisée au niveau national.

Le protocole CARHYCE n'est pas détaillé ici, le lecteur devant se référer au document technique le décrivant.

Il est évident que des analyses hydromorphologiques beaucoup plus fines pourraient (et pourront le cas échéant) être réalisées pour mieux suivre la restauration des processus géodynamiques et de la morphologie associée. Nous rappelons néanmoins que l'objectif de ce document est de proposer des éléments de **suivi « minimal »** sur la base d'un **tronc commun** homogène.

NB : pour simplifier la lecture, sont décrites dans ce chapitre « stationnel » les mesures qui concernent l'**ensemble du linéaire restauré**. L'emprise du suivi apparaît ainsi dans un paragraphe, le protocole de mesure adapté dans un autre.

## 2.1. SUIVI HYDROMORPHOLOGIQUE

L'interprétation du suivi hydromorphologique à l'échelle de la ou des station(s) de mesure portera principalement sur les altérations morpho-écologiques du Tableau 1. Si l'amélioration de ces altérations peut être établie sur la base du suivi des altérations hydromorphologiques, on suivra alors ces dernières.

Le tableau suivant, présente les **13 altérations** hydromorphologiques ou morpho-écologiques qui seront les paramètres dont on interprétera l'évolution après restauration.

**Tableau 2**  
Les paramètres à suivre pour les différents compartiments altérés

Compartiment altéré	Altérations morpho-écologique ou hydromorphologique	Résultats attendus de la restauration
lit mineur	homogénéisation des faciès	diversification des faciès
lit mineur	profondeurs limitantes en étiage	augmentation des profondeurs à l'étiage
lit mineur	vitesse limitantes en crue	réduction des vitesses en crues ou développement de zones refuges
substrat alluvial	colmatage des substrats grossiers	décolmatage du substrat grossier
substrat alluvial	blocage des processus d'érosion latérale	repris des processus d'érosion latérale et de recharge alluviale
substrat alluvial	perte de charge alluviale grossière et des habitats associés	réapparition des habitats associés au substrat alluvial (frayères notamment)
rives	modif structure berge	retour vers une structure plus naturelle
rives	disparition ripisylve	réapparition de la ripisylve
lit majeur +annexes	perte de fréquence et de durée de submersion du lit majeur et des annexes hydrauliques	retour vers des processus de connexion naturels
nappe	modification des relations nappe rivière (le cours d'eau draine la nappe en permanence)	réduction du drainage de la nappe par le cours d'eau
nappe	modification des relations nappe rivière (la nappe draine le cours d'eau en permanence : perte de capacité d'accueil)	réduction du drainage du cours d'eau par la nappe
physico-chimie	réchauffement de l'eau et atteinte de conditions létales pour les biocénoses	réduction des températures de l'eau
physico-chimie	réchauffement de l'eau et aggravation des effets de l'eutrophisation	réduction des effets de l'eutrophisation

Les indicateurs et les indices d'amélioration attendus après travaux sont présentés dans les paragraphes suivants, pour chaque compartiment, sous la forme suivante :

- le terme de gauche présente les valeurs de l'**indicateur** mesuré lors de l'état initial,

- le terme de droite les valeurs de ce même indicateur pour **l'état cible attendu (qui peut être l'état cible optimal)**,
- les flèches >>>> symbolisent le concept de **trajectoire**. L'évolution de la valeur de l'indicateur « état initial » vers celle de l'état cible attendu peut être considérée comme un **indice d'amélioration**. **Cependant**, l'ambition de tous travaux de restauration hydromorphologique de niveau R2-R3 devrait être en théorie, l'atteinte de l'état cible.

**ATTENTION** : l'approche visuelle étant intéressante tant du point de vue scientifique que pour aider à la « communication » autour des sites restaurés, il sera **indispensable** de prendre des photos avant/pendant/après travaux. L'idéal serait de réaliser des photos obliques à basse altitude (100 m sol) au moyen de tout objet volant, identifié ou non...(ULM, hélicoptère, drone ballon ou paramoteur etc...). Des photos obliques prises depuis le sol (si possible à partir de points un peu surélevés) seront déjà intéressantes. Enfin, des photos réalisées à partir de mats télescopiques sont une solution intermédiaire.

Sans entrer dans les détails, les prises de vues réalisées depuis des positions déterminées et stables dans le temps, et selon un même angle sont les plus intéressantes et les plus exploitables techniquement. Le choix de points et d'angles ou d'amers associés devra tenir compte d'évolutions possibles gênant les prises de vue, comme le développement de la végétation rivulaire. Dans la plupart des cas, seules des prises de vue depuis le sol seront possibles, ce qui renforce les précautions de reproductibilité souhaitables.



Figure 2 : exemples de petit ballon ou de mât télescopique (jusqu'à 15 m pour ce modèle) permettant de réaliser des photos à basse ou très basse altitude.



### 2.1.1. SUIVI DES STATIONS DE CONTROLE

L'inclusion de stations de contrôle dans l'échantillonnage est un plus.

Sur les stations de contrôle « témoin » ou « non restaurées », sur lesquelles on ne cherchera pas à suivre l'évolution d'altérations et pour lesquelles la mise en œuvre du protocole CARHYCE ne nous semble pas indispensable, il sera néanmoins nécessaire, pour interpréter les données biologiques qui y seront suivies, de disposer d'un minimum de caractérisation hydromorphologique de la station.

NB : la longueur de la station sera identique à celle d'une « station CARHYCE », soit 14 fois la largeur à pleins bords

#### 2.1.1.1. SUIVI SCIENTIFIQUE MINIMAL

- Photographies de la station sous tous les angles, avec les précautions assurant la comparabilité dans le temps évoquées plus haut.
- Les faciès d'écoulement
  - Ils seront cartographiés sur l'ensemble de la station de mesure (voir méthode plus loin).
- Les largeurs et profondeurs mouillées et à pleins bords
  - 4 profils en travers très simplifiés seront levés. On y mesurera la largeur et la profondeur moyenne à pleins bords ainsi que la largeur et la profondeur moyenne mouillée le jour de l'observation. Une incertitude maximale de 20-25% sur les mesures totales sera acceptable.
- La granulométrie du lit mineur
  - Une estimation visuelle de la granulométrie du lit sera réalisée sur les radiers, ou à défaut sur les faciès les plus lotiques de la station (auquel cas le faciès mesuré sera indiqué), selon le protocole EVHA (cf. annexe 4)
- La présence/absence d'une ripisylve, exprimée en pourcentage du linéaire de berge

#### 2.1.1.2. SUIVI SCIENTIFIQUE AMELIORE

Toute mesure complémentaire jugée utile par le chargé d'étude sera la bienvenue.

- Protocole CARHYCE complet
- Présence d'abris, de sous berges, de granulométrie favorable pour des frayères potentielles
- Etat du colmatage du lit mineur
- Caractérisation plus précise de la ripisylve en 3 strates de hauteur de la végétation (arborée, arbustive, rase) et en largeur d'emprise

Les paragraphes suivants fournissent des éléments de protocole de mesures hydromorphologiques à mettre en œuvre selon le niveau de suivi souhaité (minimal ou amélioré) et des pistes d'interprétation des évolutions observées.

## 2.1.2. COMPARTIMENT LIT MINEUR

### 2.1.2.1. ALTERATION : HOMOGENEITE DES FACIES D'ECOULEMENT

#### ◆ Indicateurs suivis et indices d'amélioration

- Types présents >>>> types théoriques ou « de référence»
  - Comme l'on ne dispose pas encore des types de faciès de référence par type de cours d'eau, on réalisera une analyse au cas par cas sur des portions non altérées du tronçon. Ex : actuellement PLAT LENTIQUE + CHENAL LENTIQUE >>>> objectif PLAT LENTIQUE – CHENAL LENTIQUE – RADIER – MOUILLE – PLAT COURANT
  - Si l'ensemble du tronçon est altéré, une simple augmentation de la diversité des faciès sera considérée comme un résultat positif.
- Proportions de faciès >>>> proportions théoriques
  - Id. remarques précédentes. Ex : actuellement PLAT LENTIQUE 50% + CHENAL LENTIQUE 50% >>>> Objectifs : PLAT LENTIQUE 10% – CHENAL LENTIQUE 30% – RADIER 20% – MOUILLE 20% – PLAT COURANT 20%

**NB** : les types et proportions de faciès d'écoulement théoriques par type de cours d'eau ne sont actuellement pas réellement connus, même si l'on dispose de quelques éléments théoriques (Cohen et al., 1998 pour le bassin de la Loire) ou d'exemples mieux documentés dans certaines régions. Des recherches sont en cours pour arriver à les déterminer plus objectivement, notamment pour améliorer les diagnostics de dysfonctionnement et les projets de restauration.

#### ◆ Emprise du suivi et protocole de mesure

##### ➤ Suivi scientifique minimal

###### ▪ *Emprise*

Station représentative du linéaire restauré

###### ▪ *Protocole*

Protocole CARHYCE

Voir paragraphe 2.3 sur les faciès d'écoulement du protocole Carhyce

➤ Suivi scientifique amélioré

▪ Emprise

Ensemble du linéaire restauré

▪ Protocole

Cartographie de la **longueur de chaque faciès** sur l'ensemble du linéaire restauré. Diverses méthodes peuvent être utilisées : à pied ou en bateau avec topofil ou GPS (excellente précision), survol basse altitude et prises de vues haute résolution (bonne précision), photo-interprétation de la BDortho® (moindre précision et possible uniquement sur les grands cours d'eau).

**11 types de faciès sont utilisés dont 6 principaux et 5 secondaires** (Malavoi, Souchon, 2002), les 4 mégatypes représentés à droite sur la Figure 3a sont une simplification utilisée dans le protocole CARHYCE.

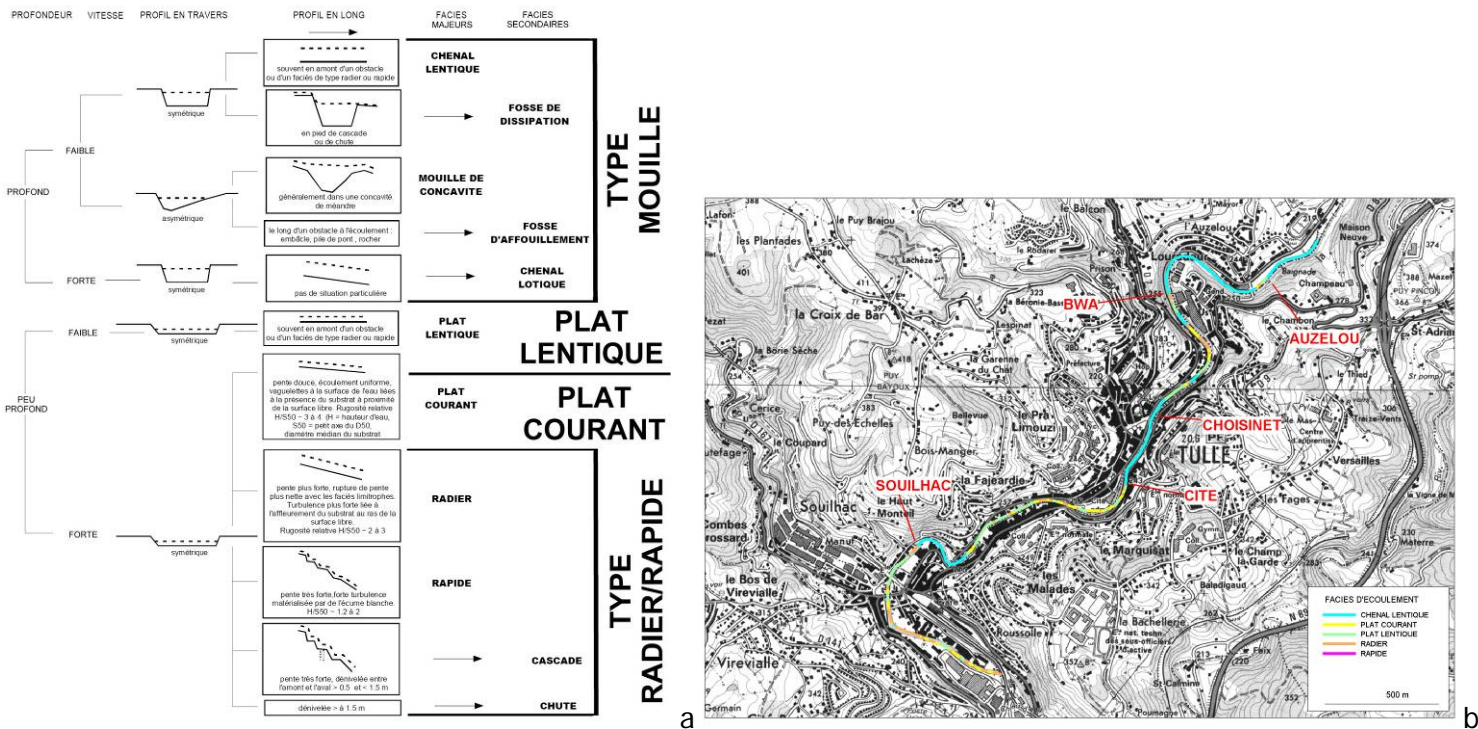


Figure 3 : (a) typologie des faciès d'écoulement (Malavoi, Souchon, 2002) et (b) exemple de cartographie à partir de mesures de terrain au GPS +/- 5 m (Malavoi, 2006)

2.1.2.2. ALTERATION : PROFONDEURS LIMITANTES EN ETIAGE

◆ Indicateurs suivis et indices d'amélioration

- Profondeurs à l'étiage >>>> profondeurs théoriques (*a priori* plus fortes s'il s'agit de restauration linéaire, l'inverse dans l'emprise d'un ancien seuil ou barrage)

On ajoute deux paramètres non directement liés à la profondeur à l'étiage mais qui sont des indicateurs hydromorphologiques pertinents de l'état d'altération de la géométrie hydraulique

- Profondeur pleins bords >>>> Profondeur pleins bords théorique (*a priori* plus faible)
- Largeur pleins bords >>>> Largeur pleins bords théorique (*a priori* plus faible)

#### ◆ Emprise du suivi et protocole de mesure

##### ➤ Suivi scientifique minimal

###### ▪ Emprise

Station représentative du linéaire restauré.

###### ▪ Protocole

Protocole CARHYCE

Paragraphe 2.1.1 sur la géométrie plein bord du protocole CARHYCE

##### ➤ Suivi scientifique amélioré

A développer si besoin

#### 2.1.2.3. ALTERATION : VITESSES LIMITANTES EN CRUE

#### ◆ Indicateurs suivis et indices d'amélioration

- Vitesses actuelles en crue >>>> vitesses théoriques (*a priori* plus faibles)

#### ◆ Emprise du suivi et protocole de mesure

##### ➤ Suivi scientifique minimal

###### ▪ Emprise

Station représentative du linéaire restauré.

###### ▪ Protocole

Protocole CARHYCE plus complément (cf. ci-dessous).

Il est très difficile de mesurer les vitesses dans un cours d'eau en crue. Le suivi consistera donc à calculer ces vitesses sur les transects.

En complément des données topographiques recueillies sur les 15 transects, une pente de la ligne d'eau est nécessaire pour réaliser un calcul hydraulique. L'idéal est de mesurer la cote de la ligne d'eau d'étiage (en altitude relative) au droit de chaque profil et de revenir faire les mêmes mesures à un débit égal ou supérieur au module pour « caler » les calculs hydrauliques.

Plusieurs solutions techniques sont ensuite envisageables pour obtenir les valeurs de vitesses pour différents débits : utilisation d'un modèle hydraulique filaire monodimensionnel, calcul section par section, etc.

➤ Suivi scientifique amélioré

A développer si besoin

### 2.1.3. COMPARTIMENT SUBSTRAT

#### 2.1.3.1. ALTERATION : COLMATAGE DES SUBSTRATS GROSSIERS

##### ◆ Indicateurs suivis et indices d'amélioration

- Niveau de colmatage actuel >>>> Niveau de colmatage théorique (*a priori* plus faible)

##### ◆ Emprise du suivi et protocole de mesures

➤ Suivi scientifique minimal

▪ *Emprise*

Station représentative du secteur restauré.

▪ *Protocole*

- Mesure du colmatage de surface : Protocole Archambaud et al. (Annexe 3)
- Mesure du colmatage profond : il n'est pas disponible à la parution de ce document, étant en cours de mise au point dans le cadre de l'amélioration du protocole CARHYCE.

➤ Suivi scientifique amélioré

A développer si besoin

#### 2.1.3.2. ALTERATION : BLOCAGE DES PROCESSUS D'EROSION LATÉRALE

##### ◆ Indicateurs suivis et indices d'amélioration

- Linéaire actuellement stabilisé >>>> absence de protections de berges

- Taux d'érosion actuels >>>> taux d'érosion théorique (*a priori* plus forts)

#### ◆ Emprise du suivi et protocole de mesures

##### ➤ Suivi scientifique minimal

###### ▪ Emprise

Ensemble du linéaire restauré

###### ▪ Protocole

- Le linéaire stabilisé par des protections d'origine anthropique est mesuré au topofil ou au GPS.
- Les taux d'érosion actuels sont évalués
  - par analyse diachronique si celle-ci est possible (largeur du cours d'eau supérieure à 10 m).
  - par toute autre donnée disponible
- Le suivi des taux d'érosion se fera sur la base :
  - De mesures *in situ* (suivi topographique)
  - Ou éventuellement à partir des séries de photographies aériennes IGN (pas de temps de 5 ans)

##### ➤ Suivi scientifique amélioré

A développer si besoin (emprise supérieure au linéaire restauré ?).

#### **2.1.3.3. ALTERATION : MANQUE OU ABSENCE DE FONCTIONNALITE DU SUBSTRAT ALLUVIAL**

#### ◆ Indicateurs suivis et indices d'amélioration

- Superficie actuelle >>>> superficie théorique (*a priori* supérieure)
- Granulométrie actuelle >>>> granulométrie théorique

#### ◆ Emprise du suivi et protocole de mesure

##### ➤ Suivi scientifique minimal

###### ▪ Emprise

Station représentative du linéaire restauré

###### ▪ Protocole

Protocole CARHYCE

Voir paragraphe 2.4 sur la granulométrie du protocole CARHYCE

Mesures de la granulométrie de la station par transect et dans les radiers

➤ Suivi scientifique amélioré

▪ Emprise

Ensemble du linéaire restauré

▪ Protocole

- 1<sup>ère</sup> étape : cartographie des affleurements rocheux
- 2<sup>ème</sup> étape : mesure de la granulométrie du lit
  - ➔ Partie description de substrat de la méthode EVHA, (cf. Annexe) au droit des points de mesure des transects de la station (si des transects ont été mesurés).
  - ➔ échantillonnage de type Wolman de 50 éléments sur un radier (ou sur le faciès présentant la granulométrie **mobile** la plus grossière de la station). Eviter les zones de pavage, les blocs hérités, etc.
- 3<sup>ème</sup> étape : cartographie des bancs alluviaux
  - ➔ A partir de la BDOrtho® si le cours d'eau est assez large (>5 m), sans ripisylve trop masquante et sans retenue de seuil. Cette méthode présente un biais lié au débit le jour de la prise de vue de la photographie aérienne.
  - ➔ Sur le terrain. On mesure la superficie des bancs au GPS ou avec toute autre méthode de mesure topographique quantitative (si l'on veut s'abstraire du biais lié au débit, on mesure non la superficie exondée mais l'ensemble de la macroforme, y compris la partie submergée)
  - ➔ On peut aussi travailler à partir de photographies aériennes prises lors d'une mission spécifique de survol à basse altitude.



Figure 4 : exemple de cartographie des superficies des bancs alluviaux à partir de la BDOrtho® IGN

- évaluation des volumes (hauteur des bancs par rapport à la cote moyenne du talweg)
- mesure de la granulométrie : 2 ou 3 mesures par station sur la partie du banc la plus proche du lit mouillé (on aura ainsi, en théorie, la granulométrie la plus grossière en transit).
- **2 étapes optionnelles :**
  - évaluation de l'épaisseur moyenne du substrat alluvial en 2 classes : < 0,5 m, > 0,5 m.
  - dans le cas d'un dysfonctionnement particulier du compartiment SUBSTRAT qui est la **disparition ou la raréfaction des frayères alluviales** de certaines espèces de poissons (liste ci-dessous : extrait de l'Arrêté du 23 avril 2008 en application de l'article R. 432-1 du code de l'environnement) : **localisation et cartographie des frayères**

Acipenser sturio : esturgeon européen.	Graviers, petits galets, gros galets.
Petromyzon marinus : lamproie marine.	Graviers, petits galets, gros galets.
Lampetra fluviatilis : lamproie de rivière.	Graviers, petits galets.
Lampetra planeri : lamproie de Planer.	Sables grossiers, graviers.
Salmo trutta : truites.	Graviers, petits galets.
Salmo salar : saumon atlantique.	Petits galets, gros galets.
Thymallus thymallus : ombre commun.	Graviers, petits galets.
Barbus meridionalis : barbeau méridional.	Graviers, petits galets.
Leuciscus leuciscus : vandoise.	Graviers, petits galets, gros galets.
Cottus gobio sp. : chabot.	Gros galets, petits blocs, gros blocs.

#### 2.1.4. ALTERATION : DISPARITION DE LA RIPISYLVE

Cette altération sera suivie de préférence aux diverses altérations morpho-écologiques qui peuvent en résulter (altération de la capacité d'autoépuration, perte des habitats racinaires de rive, réchauffement de l'eau) pour plus de facilité.

NB : le compartiment « rive » n'est pas traité directement mais les indicateurs d'amélioration concernant la structure de la berge et la présence de ripisylve le sont par ailleurs.

##### ◆ Indicateurs suivis et indices d'amélioration

- Linéaire de ripisylve sur chaque rive >>>> linéaire théorique (*a priori* supérieur)
- Epaisseur de ripisylve sur chaque rive >>>> épaisseur théorique (*a priori* supérieure)



- (éventuellement : essences de la ripisylve >>>> essences théoriques)

◆ **Emprise du suivi et protocole de mesures**

➤ Suivi scientifique minimal

- *Emprise*

Station représentative du secteur restauré

- *Protocole*

Linéaire et épaisseur peuvent se mesurer sur photo aérienne IGN, sur photos prises lors de survol à basse altitude, ou sur le terrain.

La détermination des essences peut se faire à partir de photos prises lors de survol à basse altitude, ou sur le terrain.

➤ Suivi scientifique amélioré

Ensemble du linéaire restauré

## 2.1.5. COMPARTIMENT LIT MAJEUR ET ANNEXES HYDRAULIQUES

### 2.1.5.1. ALTERATION : PERTE DE FREQUENCE ET DE DUREE DE SUBMERSION DU LIT MAJEUR ET DE CONNEXION DES ANNEXES HYDRAULIQUES

◆ **Indicateurs suivis et indices d'amélioration**

- Fréquence actuelle >>>> fréquence théorique (*a priori* supérieure)
- Durée actuelle >>>> durée théorique (*a priori* supérieure)

◆ **Emprise du suivi et protocole de mesures**

➤ Suivi scientifique minimal

- *Emprise*

Ensemble du linéaire restauré

- *Protocole*

- Lit majeur
  - Observations sur le terrain : fréquence et durée
- Annexes hydrauliques
  - observations de terrain

➤ Suivi scientifique amélioré

▪ Emprise

Ensemble du linéaire restauré

▪ Protocole

- Lit majeur
  - Détermination du débit de pleins bords et de sa fréquence (à partir des mesures CARHYCE)
  - Détermination de la durée de submersion à partir des chroniques hydrologiques
- Annexes hydrauliques
  - modélisation hydraulique des connexions sur la base de données topographiques suffisamment précises du lit mineur, du lit majeur et des annexes

## 2.1.6. COMPARTIMENT NAPPE ALLUVIALE

### 2.1.6.1. ALTERATION : DRAINAGE DE LA NAPPE PAR LE COURS D'EAU

Dysfonctionnement fréquent sur les cours d'eau incisés.

◆ **Indicateurs suivis et indices d'amélioration**

Niveau de la nappe (étiage, module) >>>> niveau théorique (*a priori* plus haut)

◆ **Emprise du suivi et protocole de mesures**

➤ Suivi scientifique minimal

▪ Emprise

Ensemble du linéaire restauré

▪ Protocole

- Installation de piézomètres dans le lit majeur et éventuellement dans les annexes hydrauliques, s'il y en a
- Mesures comparées des cotes en lit mineur et dans les piézomètres (ou les cotes de ligne d'eau phréatique dans les annexes) pour diverses gammes de débit, entre l'étiage et le module

➤ Suivi scientifique amélioré

A développer si besoin

### 2.1.6.2. ALTERATION : DRAINAGE DU COURS D'EAU PAR LA NAPPE

Dysfonctionnement observé sur les cours d'eau déplacés en limite de leur lit majeur.

A priori ce dysfonctionnement ne peut se résorber que par :

- Réinstallation du lit dans son talweg d'origine
- Etanchéification du lit (peu envisageable)

On s'interrogera sur l'utilité de suivre la résorption de ce dysfonctionnement

#### ◆ Indicateurs suivis et indices d'amélioration

Débit dans le cours d'eau (étiage, module) >>>> débit théorique (*a priori* plus haut)

#### ◆ Emprise du suivi et protocole de mesures

##### ➤ Suivi scientifique minimal

###### ▪ Emprise

Ensemble du linéaire restauré

###### ▪ Protocole

- Jaugeages en différents points du réseau
  - En amont de la zone qui a été déplacée
  - Dans la zone déplacée

NB : le compartiment RIVE n'est pas traité directement mais les indicateurs d'amélioration concernant la structure de la berge et la présence de ripisylve le sont par ailleurs.

##### ➤ Suivi scientifique amélioré

A développer si besoin

## 2.2. SUIVI BIOLOGIQUE

---

### 2.2.1. LE CONCEPT D'HABITAT POUR L'INTERPRETATION DES DONNEES BIOLOGIQUES

Le chapitre précédent était consacré au **sui**vi stationnel hydromorphologique, décrivant les conditions d'existence et de maintien de l'intégrité physique des cours d'eau et de leur dynamique, garantes du succès d'une restauration fonctionnelle, c'est-à-dire au retour à un équilibre dynamique durable entre forme et débits liquides et solides. Pour interpréter les tendances biologiques en lien avec le fonctionnement hydromorphologique, il est nécessaire de conduire une analyse complémentaire de l'habitat aquatique. Il s'agit en quelque sorte, de construire la transition entre l'hydromorphologie et la biologie selon le schéma de la figure 13.

Par habitat, on entend la structure physique et sa dynamique perçues et utilisées par les êtres vivants, les habitants des écosystèmes en quelque sorte. D'où une analogie parfois rencontrée entre habitat et « adresse » des organismes (là où ils sont), notion complémentaire de celle plus large de niche (ce qu'ils font dans l'écosystème). On exclut d'emblée de cette définition les autres composantes abiotiques qui relèvent du climat aquatique, c'est-à-dire la physico-chimie et la thermie. Elles obéissent à des dynamiques différentes et ne sont pas régies uniformément par les mêmes facteurs de contrôle. Les actions de préservation ou de restauration seront elles-mêmes différentes s'il s'agit d'habitat physique ou de qualité de l'eau (Souchon, 2002).

La perception du milieu physique recouvre une dimension spatiale à l'échelle de la taille et de la mobilité des organismes, et une dimension temporelle fonction de leur durée de vie. La structure physique de l'habitat ne conditionne pas seulement les peuplements de poissons et d'invertébrés dans les hydrosystèmes. Tous les compartiments du milieu aquatique dépendent de conditions morphodynamiques : les possibilités d'enracinement des macrophytes, les zones favorables au développement des algues unicellulaires, l'accumulation des débris organiques, et les capacités mécaniques d'oxygénation de l'eau sont liées à cette structure physique de l'habitat. C'est donc un compartiment clé de la structuration des hydrosystèmes (Wasson et al., 1998).

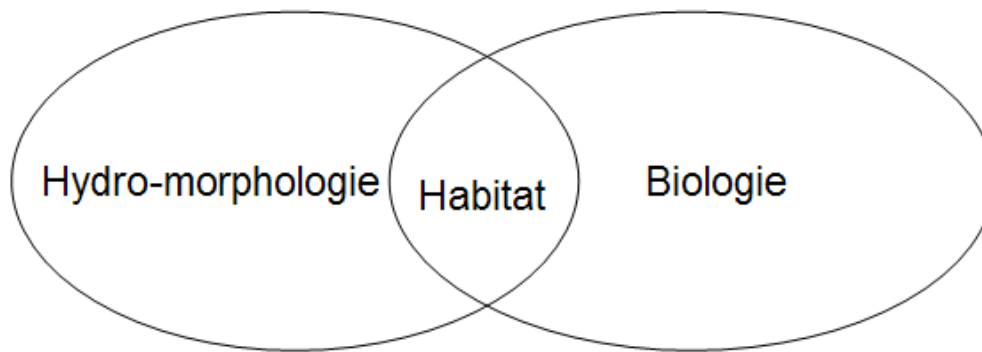


Figure 5 : représentation très simplifiée du cadre d'habitat à l'interface entre le complexe hydromorphologique et le domaine vivant : c'est au sein de ce cadre que s'exerce la dynamique biologique. On parle parfois de caractéristiques morpho-écologiques qui guident l'interprétation écologique, notamment par le biais de l'habitat, des caractéristiques hydromorphologiques.

#### 2.2.1.1. SUIVI SCIENTIFIQUE MINIMAL

**Rappel** : le protocole CARHYCE sera mis en œuvre pour tout suivi à l'échelle stationnelle.

Pour les cours d'eau non entièrement praticables à pied, on utilisera une embarcation ou un équipement de plongée, dans les limites des consignes de sécurité en vigueur.

#### 2.2.1.2. SUIVI SCIENTIFIQUE AMELIORE

- Focus sur les éléments de structure de l'habitat

Lorsque cela s'avérera nécessaire (suite à la phase de diagnostic), on pratiquera des quantifications ciblées (ex. description plus fine des surfaces de granulométrie favorables aux **frayères** de poissons, des abris sous berges, des amas de débris ligneux grossiers ou de la ripisylve).

- Focus sur la variabilité de l'habitat en fonction de l'hydrologie (interprétation tenant compte de la dynamique temporelle)

On pratiquera une deuxième campagne de mesures allégées en n'échantillonnant **que les hauteurs et les largeurs mouillées**. Cette campagne sera effectuée **à un débit supérieur** au débit observé lors de la description CARHYCE généralement pratiquée à une valeur de débit voisine de l'étiage : on visera un débit d'intervention si possible **autour de 4 fois** de

cette valeur. Les deux séries de mesures ainsi constituées permettront la mise en œuvre du d'**Estimhab**<sup>†</sup> et la modélisation de l'habitat aquatique en fonction du débit.

### 2.2.2. LES PROTOCOLES BIOLOGIQUES

Le suivi scientifique minimal concernera à la fois les macroinvertébrés benthiques (**protocole appliqué pour le réseau de référence où l'on conserve l'information élémentaire par bocal/habitat élémentaire**) et les poissons, pour lesquelles, partout où ce sera possible, on pratiquera **des échantillonnages quantitatifs** avec réalisation de la biométrie de façon à approcher les abondances et les structures de classe d'âge: au moins deux passages complets sans remise (Carle et Strube, 1978).

Dans le cas de milieux profonds (non prospectables à pied), les échantillonnages des poissons se font par ambiance ou « point ».

Pour les poissons, les échantillonnages seront pratiqués plutôt en période d'étiage pour une meilleure efficacité des pêches à l'électricité, de préférence en automne pour une image intégrée du peuplement (juvéniles de l'année et autres classes d'âge).

On prendra la précaution de **sauvegarder l'information élémentaire** avant agrégation dans une note indicielle (ex. listes faunistiques élémentaires de macroinvertébrés associés à tel type d'habitat ou information morpho-hydraulique d'un faciès ou d'une ambiance ou d'un « point » avec son échantillon de poissons associé en fonction du protocole de pêche). Ce qui garantit des possibilités plus nombreuses d'interprétation ultérieure.

L'avantage est évident, puisque l'on vise deux buts :

- la constitution d'une expérience qui doit dépasser la collection de cas individuels suivis de façon disparate et parfois incomplète soit sur le volet hydromorphologie, soit sur le volet habitat,
- une interprétation facilitée des cas en bénéficiant de comparaisons possibles avec des données de réseau acquises selon les mêmes démarches.

En fonction du diagnostic préalable et des hypothèses émises sur les trajectoires biologiques probables (on peut aussi penser à des modélisations prédictives), mais aussi en fonction des types de cours d'eau et de la nature des travaux envisagés, on décidera d'inclure ou non dans un suivi scientifique amélioré d'autres éléments de qualité comme les végétaux (Indice Biologique Macrophytes Rivières, IBMR). Concernant le compartiment algal, on sait

---

<sup>†</sup> <http://www.cemagref.fr/le-cemagref/lorganisation/les-centres/lyon/ur-maly/laboratoire-dynamiques-indicateurs-et-modeles-en-ecohydrologie/logiciels/estimhab-estimation-de-limpact-sur-lhabitat-aquatique-de-la-gestion-des-cours-deau>

par ailleurs que l'indice diatomique répond principalement à la chimie de l'eau ; il est vraisemblablement insuffisant pour traduire des évolutions plus quantitatives du biofilm, prévisibles en cas de modification de la ripisylve. Aucun protocole n'est conseillé à ce stade.

### **2.2.3. LE SUIVI DE LA CHIMIE DE L'EAU**

Il est important de caractériser les paramètres de composition chimique de l'eau, qui peuvent varier simultanément avec les éléments hydromorphologiques ou répondre à des modifications de rejets ponctuels ou diffus, voire à de modalités évolutives de transfert d'eau dans le bassin versant.

Classiquement on suivra en standard les paramètres physico-chimiques *in situ* de niveau 1 (T°C, pH, O<sub>2</sub> dissous et taux de saturation, conductivité), selon les protocoles en vigueur et les taux de détection définis par le diagnostic préalable, en faisant coïncider les mesures au mieux avec les collectes de données liées à la biologie. Pour l'oxygène dissous on pratiquera bien sûr des cycles de 24h.

En cas de pollutions de type excès de nutriments dans le bassin versant amont, on y ajoutera des paramètres physico-chimiques de niveau 2 en laboratoire : DBO<sub>5</sub>, DCO, NKj, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, P total, COD, MEST, turbidité hors épisodes de crue.

Pour des pollutions plus complexes, là encore le diagnostic préalable permettra de cibler au mieux les éléments à suivre de façon supplémentaire.

### **2.2.4. LE SUIVI DE LA TEMPERATURE**

C'est un paramètre essentiel au même titre que le débit pour comprendre les tendances biologiques observées. Le recueil sera systématique aux stations cibles, et sera basé sur le protocole retenu pour le réseau « thermie » de l'Onema.

### **2.2.5. LES REPONSES BIOLOGIQUES**

Il est très difficile de proposer en quelques lignes une synthèse des réponses biologiques attendues après restauration : elles dépendent entre autres et selon une liste non exhaustive du type de cours d'eau (grossièrement partitionnée entre forte énergie ou faible énergie), de la nature des communautés biologiques associées, de l'état d'altération contemporain, de l'état d'altération historique, de l'état du bassin versant et des causes de ces altérations et de leur emprise spatiale.

Nous proposons plutôt de compléter le présent rapport par un autre texte dédié pour développer ce point essentiel et accompagner l'interprétation des cas.

Néanmoins, quelques caractéristiques peuvent être évoquées :

**- Des trajectoires de restauration non linéaires :**

Les trajectoires de restauration ne sont pas forcément symétriques aux trajectoires de dégradation. Nombre d'entre elles ont été recensées dans la littérature scientifique de ces dernières années. Ces trajectoires sont extrêmement variées, tant pour le compartiment hydromorphologique que pour le compartiment écologique (figure 14).

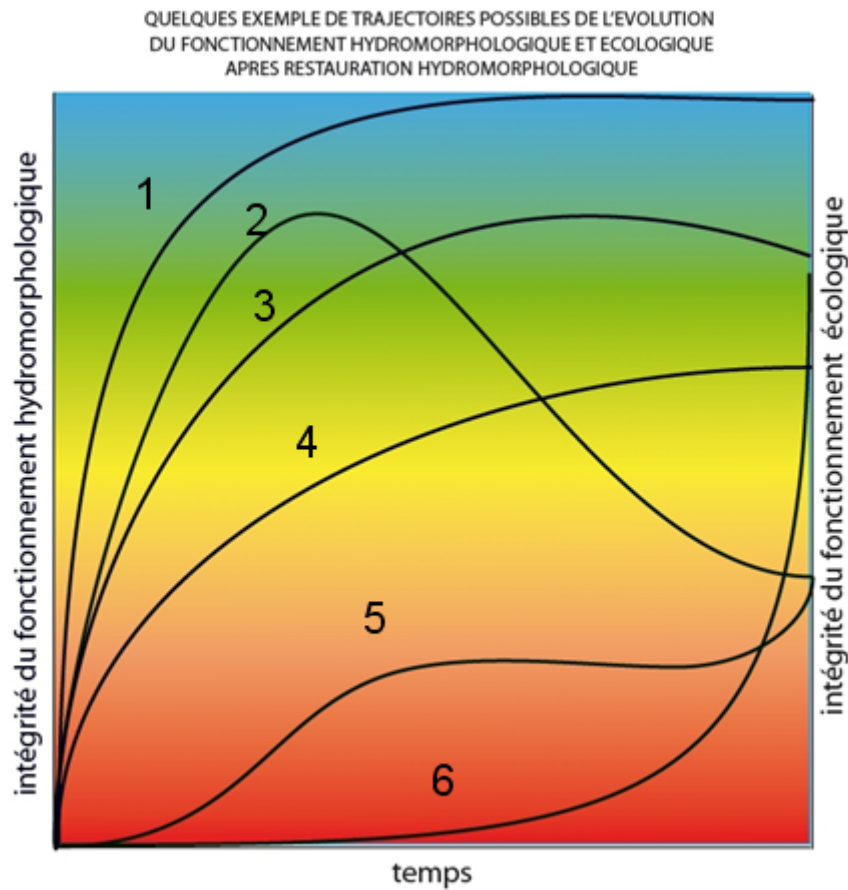


Figure 14 : différentes trajectoires possibles d'évolution au cours du temps, du fonctionnement hydromorphologique et du fonctionnement écologique d'un cours d'eau suite à des travaux de restauration (origine des axes). De manière théorique, les types de trajectoires (non exhaustifs) sont valables pour les deux compartiments.



On peut rencontrer des cas favorables, à effets positifs rapides (trajectoire 1), par exemple dans le cas d'arasement d'ouvrages bloquant une voie migratoire pour les poissons entre milieux de vie adulte et zones de reproduction (variables cibles : retour à l'effectivité des frayères et présence d'adultes reproducteurs). A l'autre extrême (trajectoire 6), des cas où la réponse biologique est ténue et parfois longue à se manifester, par exemple pour une communauté de poissons ou de macroinvertébrés, qui ne répondraient pas ou peu à des actions de diversification de l'habitat, si le caractère dynamique général type du cours d'eau d'origine n'est pas lui-même restauré.

A ce propos, on retiendra le conseil de Newson et Large (2006), qui nous mettent en garde par rapport à une utilisation abusive de l' « équation » magique assez ancrée dans les esprits « géodiversité = écodiversité », qu'il est préférable de remplacer par « fonctionnement physique dynamique = condition nécessaire pour l'expression du cadre d'habitat ». Les récents travaux de Jähnig et al. (2010), qui font la synthèse des effets des mesures de restauration en Autriche, République Tchèque, Allemagne, Italie et Pays Bas (26 cours d'eau) vont tout à fait dans le même sens.

Il est également possible de rencontrer des cas qui réagissent d'abord favorablement (trajectoire 2), mais qui retrouvent dans le temps des conditions assez médiocres, comme par exemple des situations de restauration morphologiques qui aident à recouvrir un substrat plus ouvert, mais dont les conditions de production de fines par le bassin versant finissent par reproduire un phénomène de colmatage.

Les trajectoires 3 et 4 sont des situations assez courantes, avec des gains assez longs à se manifester, ce qui justifie pourquoi nous préconisons une temporalité de suivi plutôt après 3 ans de travaux et qui plaide pour une observation si possible encore plus longue.

#### - des trajectoires distinctes selon les cibles biologiques :

On pourra s'intéresser à des espèces, à leurs traits écologiques ou fonctionnels, à des communautés et à leurs descripteurs, selon les hypothèses de changement qui relèveront de l'analyse préalable. Rappelons que l'ambition est d'apprendre des situations « expérimentales » de changement et que les candidats descripteurs de réponses sont nombreux.

S'agissant des **macroinvertébrés**, on peut se référer à la très récente synthèse magistrale de Statzner et Bêche (2010) relative à leurs traits et leur sensibilité connue par rapport à différents types de stress (Tabl. 3).

Facteur principal	Déchiqueteurs	Collecteurs récolteurs	Filtreurs	Racleurs	Perceurs	Prédateurs
Débit moyen annuel	-					
Etiage accentué	--	++	--	--	+-	+++
Réservoir		+	-	+		
Retenue locale	+		-	-		+
Chenalisation	--	++	--	-		--
Fragmentation plaine alluviale			-			++
Largeur lit	-					
Profondeur	+			+		-
Débit	+---	+-	+	+++	++	-
Taille du substrat, rugosité du lit		-	++-	++-	+	-
Mouvement du lit	-	-		-		-

Tableau 3. Sensibilité des traits écologiques (groupes fonctionnels alimentaires) des macroinvertébrés à différentes sources d'altération hydromorphologique exprimée généralement en intensité de réponse relative ou absolue du nombre de taxons, de leur abondance, de leur biomasse ou de leur production secondaire. Extrait du tableau 3 de Statzner et Bêche (2010).

S'agissant des **poissons**, on s'appuiera par exemple sur les hypothèses de sensibilité différenciée des métriques constitutives des différents indices mobilisables (Tableau 4).

IPR		EFI	
1- Nombre total d'espèces	↗ ou ↘	1- Densité d'espèces insectivores	↘
2- Nombre d'espèces rhéophiles	↘	2- Densité d'espèces omnivores	↗
3- Nombre d'espèces lithophiles	↘	3- Densité d'espèces phytophiles	↗
4- Densité d'individus tolérants	↗	4- Abondance relative des espèces lithophiles	↘
5- Densité d'individus invertivores	↘	5- Nombre d'espèces benthiques	↘
6- Densité d'individus omnivores	↗	6- Nombre d'espèces rhéophiles	↘
7- Densité totale d'individus	↗ ou ↘	7- Nombre relatif d'espèces intolérantes	↘
		8- Nombre relatif d'espèces tolérantes	↗
		9- Nombre d'espèces diadromes	↘
		10- Nombre d'espèces potamodromes	↘

Tableau 4. Métriques constitutives des indices poissons, Indice Poisson Rivière (IPR) et European Fish Index (EFI) ; le sens des flèches indique la réponse des métriques à un niveau de pression croissant.

S'agissant des réactions comparées des différents groupes à une même restauration, on raisonnera en fonction des gradients de changements de biotope les plus forts. Par exemple, dans le cas présenté figure 15, qui correspond à une opération de revitalisation d'un bras annexe, le gradient de changement le plus fort concerne le biotope colluvial recréé, en particulier l'extension du corridor boisé par rapport à la surface de lit principal qui subit peu de changement : il n'est donc pas surprenant de constater des évolutions significatives de la végétation alluviale, des carabidés et de la végétation aquatique et peu de changements visibles pour les poissons et les macroinvertébrés.

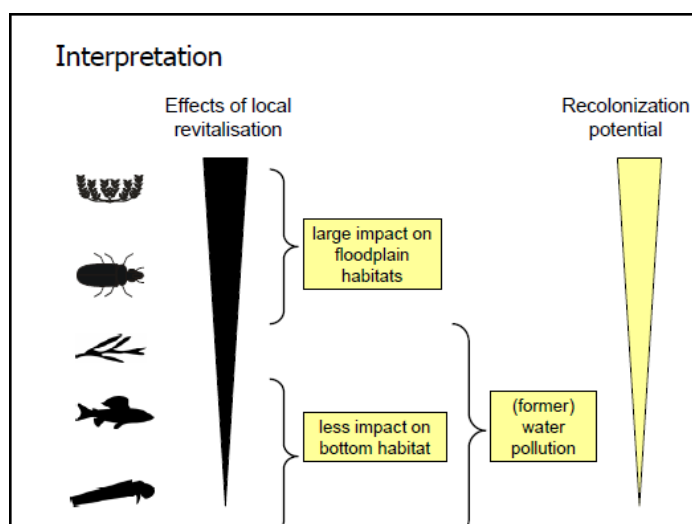


Figure 15. Effets biologiques différenciés d'une opération de restauration d'un grand cours d'eau : revitalisation d'un bras annexe (rivière Lahn près de Koblenz, Allemagne, Communication orale D. Hering, WFD Lille 2010<sup>‡</sup>).

- des bioindicateurs par élément de qualité sensu DCE peut-être trop globaux pour déceler des évolutions écologiques parfois subtiles et étagées sur un temps long

Au risque d'insister à nouveau, nous préconisons l'utilisation privilégiée des **protocoles** de prélèvement mis en œuvre au sein des réseaux renouvelés à l'occasion de l'entrée en vigueur de la DCE. Par contre, les expérimentations en vraie grandeur telles que celles qu'offrent les opérations de restauration à venir sont une opportunité à saisir pour affiner les connaissances sur la réaction au changement des métriques déjà sélectionnées et le test d'éventuelles nouvelles métriques. Cela est tout à fait dans l'esprit de boucles de progrès inscrit dans la DCE.

C'est pourquoi on distinguera donc bien les protocoles à standardiser au maximum, de l'analyse des métriques qui est gardée beaucoup plus ouverte dans le processus futur.

---

<sup>‡</sup> <http://www.wfdlille2010.org/Presentations/Tue%200900%20Hering%20Daniel.pdf> ; accédé le 29 mai 2010

## 3. SUIVI ECHELLE ETENDUE

Un suivi étendu, réalisé au delà de la zone directement restaurée, devrait améliorer notablement la connaissance scientifique des effets « large échelle » d'opérations de restauration souvent très localisées.

Cette approche est intéressante pour certains types d'évolution hydromorphologique ou biologique :

- **Hydromorphologique** : elle permet de suivre, sur un linéaire assez long, les processus de transport solide. On observera ainsi, le ré-engraissement sédimentaire de portions de cours d'eau où le *substratum* rocheux domine, la réapparition de substrat favorable à des frayères potentielles, etc., suite à des opérations de restauration de type effacement d'obstacle (seuil, barrage), la ré-ouverture d'un espace de mobilité par suppression de protections de berges, la réinjection ou la remobilisation de sédiments, etc...
- **Biologique** : il s'agit principalement de suivre les processus de recolonisation du réseau hydrographique, suite notamment à des opérations de type effacement d'obstacle (seuil, barrage).

Ce suivi s'appuiera sur des observations et mesures « allégées » par rapport au protocole stationnel décrit ci-avant, permettant de statuer par exemple sur l'évolution de la composition spécifique.

### 3.1. SUIVI HYDROMORPHOLOGIQUE

---

Les **mesures hydromorphologiques** porteront principalement sur l'observation de processus hydrosédimentaires, notamment la recharge alluviale en aval du ou des sites restaurés. Néanmoins, la description de quelques paramètres hydromorphologiques « de base » sera utile.

#### 3.1.1. MESURES A REALISER

Un « **site** » d'échantillonnage hydromorphologique équivaut à une micro-station d'une longueur de l'ordre de **6 largeurs de lit à pleins bords**.

##### 3.1.1.1. SUIVI SCIENTIFIQUE MINIMAL

- Mesure des différents faciès d'écoulement au topofil ou au GPS,
- Mesure de 2 profils en travers très simplifiés permettant d'obtenir des valeurs de largeur et profondeur à pleins bords. L'idéal est de les réaliser au droit de faciès de type plat

courant ou radier, si possible au niveau de points d'inflexion entre 2 sinuosités ou dans des portions rectilignes (portions du cours d'eau où le profil en travers est généralement symétrique),

- Mesure de la granulométrie de surface sur un radier ou, à défaut, sur le faciès le plus lotique, en notant le type de faciès choisi (protocole Wolman).

#### **3.1.1.2. SUIVI SCIENTIFIQUE AMELIORE**

- Si un déficit de substrat alluvial avait été identifié dans l'étude préalable : cartographie des substrats alluviaux présents
- Si un déficit de frayères potentielles avait été identifié dans l'étude préalable : cartographie des substrats favorables aux frayères potentielles

**NB** : le suivi scientifique amélioré peut aussi se traduire par une augmentation du nombre de sites.

## **3.2. SUIVI BIOLOGIQUE**

---

Utile pour les aspects concernant notamment la recolonisation du réseau hydrographique par les poissons voire les invertébrés, le suivi biologique à l'échelle du réseau hydrographique ne peut être facilement normalisé, à l'heure actuelle.

Il s'agira donc de définir au cas par cas des stratégies de suivi adaptées aux groupes ou aux espèces dont on espère la recolonisation.

Pour couvrir un linéaire suffisant, on aura par exemple recours à des échantillonnages allégés tels que des balayages rapides de radiers : « *quick sampling* » pour les macroinvertébrés, pêches de radiers pour les poissons rhéophiles telles que celles pratiquées dans les indices d'abondance visant les juvéniles saumons de l'année, pêches par ambiances judicieusement réparties, etc...

## 4. ELEMENTS COMPLEMENTAIRES D'UN SUIVI REUSSI

- **Validation, bancarisation** des données, à prévoir au plus tôt, dès la première campagne de mesure (ex. caractérisation initiale)
- **Exploitation régulière** des données et **maintien d'une attention** de la part des principaux partenaires des projets d'amélioration.

Il faut prévoir une mise en forme et une analyse des résultats à un pas de temps annuel, ce qui permet d'entretenir la « flamme », c'est à dire l'intérêt collectif pour le suivi, mais aussi de recueillir au fil du temps de précieux renseignements qualitatifs de la part des opérateurs. Il faut parfois penser à en extraire une information simplifiée à but de communication pour rendre compte simplement de l'avancement du suivi et déceler les premières tendances.

- **Synthèse** en fin de parcours

Elle doit répondre à la question initiale et vérifier si les objectifs originaux et les hypothèses posées sont confirmés ou non. C'est trivial, mais plus la question initiale est bien construite, plus la synthèse sera aisée.

- **Bancarisation nationale**

Essentielle pour la construction d'un retour d'expérience pour supporter des méta analyses de plusieurs cas, et si possible en extraire des lois communes généralisables. On rappelle ici l'importance d'avoir adopté des **protocoles de mesure standards**.

## 5. CONCLUSION

*« Les erreurs techniques usuelles proviennent très généralement de la méconnaissance des écosystèmes, dont l'étude doit être effectuée à l'échelle du bassin versant »*

*J. Verneaux, J.P. Vergon, M. Larinier, 1975*

Le défi collectif est clair : réussir un nombre significatif de suivis de travaux visant à la restauration hydromorphologique des cours d'eau pour accroître la pertinence des programmes de mesures (nature, envergure spatiale, complémentarités) susceptibles d'en améliorer l'état écologique. Il est par conséquent essentiel de comprendre les conditions de succès ou d'échec dans un domaine qui, par nature, s'avère plus complexe que celui du traitement physico-chimique des eaux.

Nous avons rappelé ici des principes qui nous paraissent essentiels pour aborder les restaurations hydromorphologiques et évaluer leur succès, tant du point de vue de l'hydromorphologie que de l'hydroécologie.

Nous affirmons clairement que seules **les restaurations qui traiteront les pathologies** relatives au dysfonctionnement physique et non **simplement leurs symptômes**, sont susceptibles d'être accompagnées de résultats durables et constituent un bon investissement, dans tous les sens du terme :

→ on redonne en effet à des cours d'eau les moyens de retrouver tout ou partie de leur fonctionnement dynamique ; ils parachèveront ensuite le travail eux-mêmes.

C'est pourquoi nous avons insisté sur l'importance que nous accordions au diagnostic préalable réalisé depuis l'ensemble du bassin versant jusqu'au tronçon de cours d'eau.

→ Sans bonne identification des facteurs limitant les fonctionnements hydromorphologiques et écologiques, la stratégie de réparation sera inopérante, tout comme accessoirement la stratégie de suivi.

On s'interrogera **d'abord** sur les stratégies réparatrices potentiellement efficaces à « large échelle » : le cas classique et répandu d'excès anormal de sédiments fins dans les cours d'eau trouve souvent ses causes dans le bassin versant ; c'est à cette échelle qu'il faut imaginer et mettre en œuvre des solutions. Parmi elles, la réservation d'une bande non



cultivée de 5 m le long des cours d'eau semble désormais bien reprise et admise au niveau européen<sup>§</sup>.

A échelle plus fine, la restauration hydromorphologique fait d'abord appel à des notions de **géomorphologie**, indispensables pour analyser les situations.

→ Le suivi proposé obéit d'abord à cette logique.

Ce n'est qu'ensuite qu'on y adjoint une logique « habitat » pour faire le lien avec le fonctionnement écologique, ce dernier non restreint au suivi des poissons.

Nous défendons également le recours systématique, pour les suivis minimaux, aux protocoles retenus dans les réseaux type DCE, normalisés ou en voie de l'être, de façon à se donner les moyens de comparer les résultats et à autoriser des analyses multi-sites ultérieures.

Le choix d'intensification d'un suivi ou suivi scientifique amélioré, en nombre de stations, en fréquence de mesure, en durée du suivi, en protocoles complémentaires, par rapport au suivi scientifique minimal sera fonction :

- du statut du site : cas de démonstration d'intérêt régional, cas d'école national, ou cas plus répandu,
- et du groupe humain le prenant en charge, avec ses objectifs et ses moyens spécifiques.

---

<sup>§</sup> Mesure dite « sans regret » (satisfera *a priori* plusieurs objectifs), même si l'effectivité et l'efficacité ne sont pas tout de suite précisément quantifiées

## 6. REFERENCES

*La plupart des références du Cemagref et du pôle Onema Cemagref sont directement téléchargeables à :*

*[http://www.cemagref.fr/le-cemagref/lorganisation/les-centres/lyon/ur-maly/Hydroecologie\\_Cours\\_dEau/bibliographie/publications-par-annee](http://www.cemagref.fr/le-cemagref/lorganisation/les-centres/lyon/ur-maly/Hydroecologie_Cours_dEau/bibliographie/publications-par-annee)*

Agences de l'Eau & Ministère de l'Environnement, 1998. SEQ Physique: a System for the Evaluation of the Physical Quality of Watercourses: 15 pp.

Bayley, P. B. (2002a). A review of studies on responses of salmon and trout to habitat change, with potential for application in the Pacific Northwest. Report to the Washington State Independent Science Panel. Washington: 29 p. + appendices.

Bayley, P. B. (2002b). A review of studies on responses of salmon and trout to habitat change, with potential for application in the Pacific Northwest. Report to the Washington State Independent Science Panel (supplement). Washington: 102 p.

Bernhardt, E. S., M. A. Palmer, Allan, J.D., Alexander, G., Barnas, K., Brooks, S., Carr, J., Dahm, C., Follstad-Shah, J., Galat, D.L., Gloss, S., Goodwin, P., Hart, D. D., Hassett, D., Jenkinson, R., Katz, S., Kondolf, G.M., Lake, P.S., Lave, R., Meyer, J.L., O'Donnell, T.K., Pagano, L., Powell, B., Sudduth, E. (2005). Restoration of U.S. rivers - a national synthesis. *Science*, 308, 636-637.

Bernhardt, E. S. and M. A. Palmer (2007). Restoring streams in an urbanizing world. *Freshwater Biology*, 52(4), 738-751.

BIOTEC, Malavoi J.R., 2007 : Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau. Publications de l'Agence de l'Eau Seine Normandie.

Carle, F. L. and M. R. Strub (1978). "A new method for estimating population size from removal data." *Biometrics* **34**(4): 621-630.

Chandesris, A., N. Mengin, Malavoi, J., Souchon, Y., Pella, H., Wasson, J.G. (2008). SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des cours d'eau : principes et méthodes, MEDAD: 64 p.

Chandesris A., Malavoi J.R., Mengin N., Wasson J.G., Souchon Y. (2009). Hydromorphology auditing: A generalized framework at a nation scale to view streams and rivers in their landscape context. Communication au congrès : The 7th International Symposium on

Ecohydraulics, 15 jan 2009 – Concepcion - Chile. Communication orale Souchon. Actes publiés.

Cohen, P., H. Andriamahefa, Wasson J.G. (1998). "Towards a regionalization of aquatic habitat: distribution of mesohabitats at the scale of a large basin." Regulated Rivers: Research and Management, 14: 391-404.

Gouraud V., Capra H., Sabaton C., Tissot L., Lim P., Vandewalle F., Fahrner G., Souchon Y. (2008). Long-term simulations of the dynamics of trout populations on river reaches bypassed by hydroelectric installations - analysis of the impact of different hydrological scenarios. *River Research and Applications*, 24, 9, 1185-1205.

Jähnig, S.J., Brabec K., Buffagni A., Erba S., Lorentz A.W., Ofenböck T., Verdonschot P.F.M., Hering D., 2010. A comparative analysis of restoration measures and their effects on hydromorphology and benthic invertebrates in 26 central and southern European rivers. *Journal of Applied Ecology*, 47, 671-680.

Kondolf, G. M. (2006). River restoration and meanders. *Ecology and Society*, 11(2).

Kondolf, G. M., P. L. Angermeier, Cummins, K., Dunne, T., Healey, M., Kimmerer, W. Moyle, P. B., Murphy, D., Patten, D., Railsback, S., Reed, D. J., Spies, R., Twiss, R. (2008). Projecting cumulative benefits of multiple river restoration projects: An example from the Sacramento-San Joaquin river system in California. *Environmental Management*, 42(6), 933-945.

Lamouroux, N., J. M. Olivier, Capra, H., Zylberblat, M., Chandesris, A., Roger, P. (2006). Fish community changes after minimum flow increase: testing quantitative predictions in the Rhône River at Pierre-Bénite, France. *Freshwater Biology*, 51(9), 1730-1743.

Malavoi J.R., Souchon Y. (2002). Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques. Note Technique. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 365, 1-16.

Meissner K. (2000). Experimental methods in the assessment and monitoring of rivers: benefits, limitations and integration with field survey. *Regional Environmental Publications* 189, 42 pages. URN:ISBN:9521108029. The publication is available also in printed form ISBN 952-11-0802-9.

Newson, M. D. and A. R. G. Large (2006). "'Natural' rivers, 'hydromorphological quality' and river restoration: a challenging new agenda for applied fluvial geomorphology." Earth Surface Processes and Landforms **31**(13): 1606-1624.

Palmer, M. A. (2009). Reforming watershed restoration: Science in need of application and applications in need of science. *Estuaries and Coasts*, 32(1), 1-17.

Palmer, M. A., E. S. Bernhardt, Allan, J. D., Lake, P. S., Alexander, G., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C. N., Follstad Shah, J., Galat, D. L., Loss, S. G., Goodwin, P., Hart, D. D., Hassett, B., Jenkinson, R., Kondolf, G. M., Lave, R., Meyer, J. L., O'Donnell, T. K., Pagano, L., Sudduth, E. (2005). Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology*, 42(2): 208-217.

Poff N.L. and Zimmerman J.K.H. 2010. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform environmental flows science and management. *Freshwater Biology* 55:194-20.

Roni, P., Hanson, K., Beechie, T., Pess, G., Pollock, M., Bartley, D.M. (2005). Habitat rehabilitation for inland fisheries. Global review of effectiveness and guidance for rehabilitation of freshwater ecosystems. *FAO Fisheries Technical Paper*. N° 484. Rome, FAO. 116 p.

Roni P., Hanson K., Beechie T., 2008. Global Review of the Physical and Biological Effectiveness of Stream Habitat Rehabilitation Techniques. *North American Journal of Fisheries Management*, 28, 856–890.

Sabaton, C., Y. Souchon, Capra, H., Gouraud, V., Lascaux, J.M., Tissot, L. (2008). Long-term brown trout populations responses to flow manipulation. *River Research and Applications*, 24: 476-505.

Sabaton, C., Y. Souchon, Lascaux, J.M., Vandewalle, F., Baran, P., Baril, B., Capra, H., Gouraud, V., Lauters, F., Lim, P., Merle, G., Paty, G. (2004). A French evaluation of microhabitat component of IFIM based on habitat and brown trout population monitoring. *Hydroécologie Appliquée*, Tome 14(1), 245-270.

Souchon, Y. (2002). L'habitat des cours d'eau dans tous ses états: Habilitation à diriger des recherches, Université Claude Bernard, Lyon I, 117 pages + articles en annexe.

Souchon Y., Sabaton S., Deibel R., Reiser D., Kershner J., Gard M., Katopodis C., Leonard P., Poff N.L., Miller W.J., Lamb B.L. (2008). Detecting biological responses to flow management: missed opportunities; future directions. *River Research and Applications*, 24, 506-518.

Statzner B., Bêche L.A., 2010. Can biological invertebrate traits resolve effects of multiple stressors on running water ecosystems? Can biological invertebrate traits resolve effects of multiple stressors on running water ecosystems? *Freshwater Biology* (2010), 55 (Suppl. 1), 80–119.

Wasson, J. G., J. R. Malavoi, Maridet, L., Souchon, Y., Paulin, L. (1998). Impacts écologiques de la chenalisation des rivières, Editions Cemagref, vol. 14, 158 p.

Version commerciale

<http://www.quae.com/fr/livre/?GCOI=27380100922540>

Version téléchargeable

[http://www.cemagref.fr/le-cemagref/lorganisation/les-centres/lyon/ur-maly/Hydroecologie\\_Cours\\_dEau/bibliographie/publications-par-annee/#2000](http://www.cemagref.fr/le-cemagref/lorganisation/les-centres/lyon/ur-maly/Hydroecologie_Cours_dEau/bibliographie/publications-par-annee/#2000)

Verneaux, J., J. P. Vergon, Larinier M. (1975). "Aspects écologiques des travaux d'aménagement des cours d'eau. Orientations et principes généraux." La Houille blanche 2-3: 127-131.

## 7. ANNEXES

## 7.1. ANNEXE 1 : MANDAT : MISE EN PLACE D'UNE DEMARCHE DE SUIVIS D'OPERATIONS DE RESTAURATION PHYSIQUE DES COURS D'EAU ET D'EVALUATION DES REPONSES ECOLOGIQUES- NOVEMBRE 2009

---



### PROJET DE MISE EN PLACE D'UNE DEMARCHE DE SUIVIS D'OPERATIONS DE RESTAURATION PHYSIQUE DES COURS D'EAU ET D'EVALUATION DES REPONSES ECOLOGIQUES

#### Contexte

Les dégradations hydromorphologiques des cours d'eau et masses d'eau, résultant de plusieurs décennies d'aménagement des rivières et des bassins versants dans un objectif de développement économique, sont désormais l'un des facteurs principaux de non atteinte du bon état écologique des masses d'eau aux horizons 2015 à 2027. Or ce bon état est rendu nécessaire par la DCE.

Des travaux importants de restauration physique seront nécessaires pour atteindre ce bon état, et ils sont au demeurant de types divers.

Cependant, on manque de connaissances sur l'effet de ces travaux de restauration (efficacité écologiques, ampleur des bénéfices, délais d'obtention, facteurs adverses éventuels...). Les suivis et l'évaluation des réponses écologiques, seuls outils permettant d'apporter des éléments quant à la réussite de l'opération, ont de ce fait une importance capitale.

Malgré cet enjeu, les suivis d'opérations sont peu souvent mis en œuvre et les rares exemples de suivis connus aujourd'hui ne présentent pas d'homogénéité méthodologique et manquent, au-delà des enseignements locaux, régulièrement de mise en valeur.

Il en résulte un manque de recul conséquent sur la pertinence des opérations réalisées.

De plus, afin de pouvoir susciter l'émergence des maîtrises d'ouvrage pour la restauration physique des cours d'eau, il faut avancer des arguments de natures variées, qui peuvent être fournis par la valorisation de retours d'expérience. L'ensemble des organismes impliqués de près ou de loin dans une opération de restauration (maître d'ouvrage, financeurs, partenaires techniques, riverains, population locale, scientifiques, autres partenaires divers) a également un intérêt à disposer d'éléments de connaissance et de comparaison vis-à-vis de la réussite du projet réalisé. Ces retours d'expériences locales doivent pouvoir être replacés dans un contexte plus large pour pouvoir en

évaluer l'intérêt, notamment pour ce qui touche à leur « transférabilité » à d'autres cours d'eaux ou tronçons de cours d'eau.

C'est pourquoi il est nécessaire de capitaliser et de valoriser les résultats d'opérations de restauration physique des cours d'eau.

Plusieurs démarches en ce sens ont été menées ou sont en cours au niveau des bassins. On peut citer par exemple sans exhaustivité :

- Maîtrise d'ouvrage par l'Agence de l'eau Seine-Normandie pour le suivi d'une dizaine de sites ateliers sélectionnés dans le cadre d'un appel à projets (début des travaux entre fin 2009 et 2011 selon les projets) ;
- Etude-bilan sur les retours d'expérience en matière de restauration physique (Biotec Malavoi, 2006). Projet de test d'un protocole de suivi d'opération de restauration en 2010 (*a priori* sur la Veyle).
- Lancement d'évaluation de projets de restauration de petits cours d'eau par l'Agence Loire Bretagne sur la base d'un rapport de l'ONEMA DiR4, incluant des reméandrages et de la recharge sédimentaire artificielle ;
- en cours en Rhin-Meuse : mise au point de protocoles de suivi et de méthodes d'évaluation d'opérations de restauration des annexes hydrauliques et protocoles de suivi des effets de la suppression de seuil sur les zones humides et nappes d'accompagnement ;
- Capitalisation de retours d'expériences de restauration dans un recueil sur la restauration physique des cours d'eau par l'ONEMA et les agences de l'eau ;

Afin d'améliorer les connaissances dans le domaine de la restauration physique des cours d'eau, l'ONEMA et ses partenaires techniques souhaitent développer les retours d'expérience et le suivi de l'efficacité de ses actions.

Le présent document résulte des travaux conduits lors d'une première réunion tenue le 10 juin 2009 avec le groupe des gestionnaires pour valider l'objectif de la démarche et les modalités de travail et des remarques du groupe de travail national relatif à l'hydromorphologie réuni le 17 juin 2009.

Il a été enrichi par des échanges entre les différentes directions de l'ONEMA pour favoriser une vision globale de la thématique.

Sont présentés au travers de cette note, le contexte du projet, les objectifs à court et moyen termes ainsi qu'un projet de mandat de groupe en annexe pour fin 2009-2010.

## **Objectifs**

L'ONEMA propose d'animer un groupe de travail visant à la mise en place progressive d'une démarche coordonnée de suivis, d'évaluation et de valorisation des réponses écologiques issues d'opérations de restauration physique des cours d'eau.



L'objectif de la démarche est de définir des protocoles homogènes de suivi des éléments hydromorphologiques, physico-chimiques, hydrologiques, biologiques ainsi que des méthodes d'évaluation des réponses selon des types de cas différents : l'objectif de restauration, le type de restauration, le type de cours d'eau (typologie géodynamique)...

L'approche sociologique et économique sera également intégrée au projet.

Le projet comprendra :

### **1/ A court-terme (mi-2010)**

L'objectif à court-terme est de proposer une méthodologie facilitant l'appropriation des retours d'expérience et permettant l'harmonisation des suivis. Trois étapes majeures sont prévues :

\* **Une première bancarisation des retours d'expérience** rédigés courant 2009 dans le cadre du recueil sur la restauration physique des cours d'eau. Ces retours d'expérience permettent en quelques pages et selon une trame identique, de valoriser les opérations de restauration ambitieuses auprès des maîtres d'ouvrage.

D'ici début 2010, ces fiches par opération de restauration seront accessibles sur un nouveau portail eaufrance permettant ainsi une large diffusion et des recherches géographiques ou thématiques (type d'opération de restauration).

\* **La détermination de critères de sélection d'opérations intéressantes à suivre**

\* **La constitution d'une « boîte à outils d'évaluation des projets de restauration physique des cours d'eau : objectifs et types de restauration – suivi – interprétation ».**

Cette boîte à outils devra proposer des méthodes de suivis et d'évaluation qui permettent :

- de vérifier l'efficacité des mesures mises en œuvre et la réussite de l'opération par rapport aux objectifs fixés : suivi « atteinte des objectifs »,
- d'alimenter des argumentaires en faveur de ces opérations de restauration auprès des maîtres d'ouvrages potentiels, ces opérations pouvant être valorisées comme sites « vitrine » : suivi « valorisation »
- de fournir aux partenaires techniques et scientifiques des données sur lesquelles ils pourront s'appuyer pour notamment aller plus loin dans l'analyse pressions / réponses (suivi « technique et scientifique » dit « opérationnel »).

Elle autorisera ainsi l'utilisateur à choisir des protocoles adaptés aux objectifs de l'évaluation qu'il s'est fixé (atteinte des objectifs, valorisation, opérationnel) et aux typologies de cas différents.

Les protocoles de suivis seront un compromis entre ce qui est acceptable techniquement, scientifiquement et financièrement pour un suivi « en routine » des opérations jugées intéressantes à évaluer. Ils tiendront compte également de la compatibilité des propositions avec les éventuelles normes existantes dans le domaine.

Les informations recueillies pourraient être capitalisées via une base de données dont les modalités pratiques sont à préciser.

## **2/ Perspectives de moyen et long terme (courant 2011-2015)**

L'objectif à plus long terme est véritablement d'évaluer l'efficacité écologique des mesures mises en œuvre et de considérer l'ensemble des autres intérêts (sociaux, économiques...) associés à la restauration physique des cours d'eau.

\* **L'enrichissement de la boîte à outils**, sur la base des expériences conduites ou envisagées à la fois dans les bassins par les agences, l'Onema, les collectivités, etc. et sur la base des résultats de projets de recherche internationaux ou nationaux (cf. la programmation mutualisée de la R&D pilotée par l'Onema au niveau national, notamment dans les domaines de la sociologie et de l'économie de l'environnement).

En effet, les maîtres d'ouvrages seront plus sensibles à des informations telles que l'effet de l'opération de restauration sur le paysage, sur son acceptabilité et la perception sociale de l'opération, sur ses effets sur les inondations ou sur la qualité de l'eau et sur la nappe d'accompagnement. Cette thématique doit encore être approfondie du point de vue de la R&D et sera par conséquent intégrée à la démarche dans une phase ultérieure, ce qui n'empêchera pas d'y réfléchir courant 2010.

\* **L'exploitation des premiers résultats de suivis**, à différentes échelles (bassin, inter-bassin, effet sur ME ?...)

### **Annexe : Projet de Mandat 2009**

#### **du groupe de Travail**

#### **Suivi et évaluation des opérations de restauration physique des cours d'eau**

Version validée le xxxx

#### **Le mandat du groupe de travail**

Le groupe de travail a été initié le 10 juin 2009.

Il a pour mission de proposer la mise en place progressive d'une démarche coordonnée de suivis, d'évaluation et de valorisation d'opérations de restauration physique de cours d'eau.

Cette démarche globale s'intéressera à :

- La valorisation des retours d'expérience d'opérations de restauration dans un but de faciliter la mobilisation des maîtres d'ouvrage (actualisation régulière de recueil de retours d'expérience diffusé début 2010).

- La bancarisation de données sur des opérations de restauration sélectionnées : dont la nature est à préciser dans le cadre de cette démarche (a minima les données de valorisation des retours d'expérience mis en ligne début 2010 et enrichi)
- La clarification des rôles des différents intervenants des milieux aquatiques autour d'un projet de suivi d'une opération de restauration et de son évaluation.
- L'exploitation technique ou scientifique des suivis opérationnels réalisés selon les protocoles à définir : dans l'objectif d'approfondir la connaissance des interactions au sein de l'hydrosystème et de mettre au point de nouvelles techniques d'ingénierie de restauration sur des sites pilotes d'études

Les acteurs des domaines de l'action territoriale, de la connaissance et des savoirs sont donc impliqués à un moment donné dans la démarche.

### **Composition et fonctionnement**

Un groupe pilote la démarche. En tant que de besoin, des experts techniques pourront être associés aux travaux du groupe de pilotage.

Le groupe de pilotage est animé par la direction du contrôle des usages et de l'action territoriale, département de l'action territoriale. L'organisation des aspects scientifiques et techniques est pilotée par la DAST de l'ONEMA. La DCIE de l'ONEMA est également impliquée dans la démarche pour ce qui concerne la bancarisation et la valorisation des données, ainsi que la cohérence avec la mise en œuvre des réseaux de contrôle DCE.

L'ordre du jour et le compte-rendu des réunions sont envoyés à tous les membres du groupe de pilotage et pour information aux membres du groupe « Hydromorphologie » piloté par la DEB. Certaines propositions du groupe pourront être soumises aux instances décisionnelles existantes concernées pour des volets de mise en œuvre de la démarche (bancarisation par exemple).

Livrables attendus et questions se posant à court terme (mi-2010) :

- a) « Cartographie » initiale d'opérations de restauration valorisables immédiatement (à partir du travail en cours pour le recueil d'hydromorphologie) et une première valorisation coordonnée début 2010 de sites « vitrines » (à priori diffusion prévue en format papier + internet sur le futur portail « milieux humides » au sens RAMSAR intégrant la sphère eaufrance).

→ Constitution d'une base de données « valorisation de restauration physique de cours d'eau » contenant essentiellement des données rédigées dans ce but (illustrations, photos, références biblio et contacts des acteurs locaux, mais pas de données brutes de suivi) consultables par tous sur internet selon les requêtes bassin et type de restauration.

→ À prévoir, une dynamique d'enrichissement pour l'avenir.

- b) Proposition et définition de critères de sélection de nouveaux sites en vue d'un enrichissement des retours d'expériences pour valorisation ou pour approfondissement scientifiques ou techniques.

- c) Une Boîte à outils « suivi et évaluation de la restauration physique des cours d'eau » mise à disposition des acteurs locaux dans les bassins. Elle fournira des protocoles d'acquisition de données sur des descripteurs pertinents tenant compte de la typologie des objectifs attendus de l'opération de restauration, ainsi que des éléments aidant à la définition de stratégies locales de suivis
- d) Réflexion sur les besoins et modalités de bancarisation des données relatives aux suivis mis en œuvre.

→ Avant même de passer au stade valorisation, faut-il prévoir une BDD spécifique aux suivis eux-mêmes et si oui, avec quel contenu : uniquement métadonnées (localisation, type restauration, objectifs et types de suivi, fréquence, opérateurs, cadre du projet...), ou bien s'orienter jusque vers une bancarisation des données de suivis produites pour faciliter une exploitation ultérieure et un partage de l'information (y compris photothèque) ?

- e) Expression de besoins en réponse aux questions précédentes et propositions d'organisation à soumettre aux instances ad hoc de validation le cas échéant (cette étape peut être déconnectée ou traitée justement dans les cadres décisionnels respectifs du type : groupe mutualisation R&D, groupe GCIB pour le SNDE pour alimenter la réflexion...)

### **Méthode de travail**

Sur T3 et T4 2009, la phase a) est en cours de réalisation dans le cadre du projet de recueil de restaurations physiques de cours d'eau.

Pour les tâches b) et c), le pôle d'hydroécologie de Lyon proposera une 1ère ébauche pour la fin 2009. Elle sera soumise pour avis et demande de précisions éventuelles au groupe de pilotage. Une validation technique sera assurée par consultation d'experts associés en tant que de besoin.

Le groupe de pilotage s'efforcera également d'exprimer des besoins en réponses aux questions concrètes se posant et de faire des propositions d'organisation à soumettre aux instances de validation (e).

<b>Etapes</b>	<b>Echéances</b>
Mise en place du groupe de pilotage et mandat du groupe	T4 2009
Proposition de critères de sélection d'opérations à suivre	Fin 2009 ou début 2010
Elaboration des premiers éléments d'une stratégie de suivi et lancement des approfondissements nécessaires	Fin 2009
Finalisation des protocoles de suivis et « boîte à outils »	Mi-2010

Définition de modalités d'organisation pour l'identification le plus en amont possible d'opérations de restauration intéressantes à suivre et pour la mise en œuvre des suivis	Début 2010
--	------------

Selon les calendriers de programmation des activités 2010 des différents partenaires concernés et l'avancement des éléments nécessaires à la démarche globale, des questions pourront rester en suspens ou s'étaler sur plusieurs années, notamment celles nécessitant des approfondissements du point de vue bancarisation ou R&D comme expliqué dans les perspectives.

Perspectives de moyen et long terme (2011-2015) et à une autre échelle spatiale:

- Développer les approches sociologiques et économie de l'environnement autour des opérations de restauration (réflexion à engager courant 2010 dans l'objectif de programmer des actions en 2011)
- D'étudier la/les techniques d'ingénierie mises en œuvre sur la base d'une exploitation de bilans antérieurs, de retours d'expériences, notamment à partir des connaissances acquises au travers des sites « pilotes » d'études à une échelle bassin ou interbassin.

De montrer une amélioration des indices ou des compartiments biologiques de la masse d'eau auxquelles l'opération a pu contribuer et d'évaluer la contribution de l'opération de restauration à l'atteinte du bon état de la masse d'eau. Cette thématique fera l'objet probablement de développement de recherche dans les années à venir et sera à lier avec le Réseau de Contrôle Opérationnel de la DCE. Pour plus d'informations contacter Josée Peress : [josee.peress@onema.fr](mailto:josee.peress@onema.fr), 01 45 14 36 39

Camille Barnetche : [camille.barnetche@onema.fr](mailto:camille.barnetche@onema.fr), 01.45.14.36.18 ou Franck Weingertner : [franck.weingertner@onema.fr](mailto:franck.weingertner@onema.fr), 01.45.14.88.95 en l'absence de Josée Peress

## **7.2. ANNEXE 1BIS : NIVEAUX D'AMBITION DES TRAVAUX DE RESTAURATION**

---

(Malavoi, Adam, 2007)

On peut définir trois grandes catégories d'actions sur un cours d'eau visant à préserver ou à restaurer un bon fonctionnement morpho-écologique :

### **7.2.1. PRÉSERVATION : CATÉGORIE P.**

Si le fonctionnement morpho-écologique est encore bon, il s'agira de mettre en œuvre des opérations de **préservation** de secteurs peu ou pas altérés mais menacés par une pression anthropique latente. Les actions peuvent se concrétiser par des arrêtés de biotopes, l'achat de terres sur un espace alluvial élargi ou en secteur de mobilité potentielle d'un cours d'eau, des contrats d'exploitation extensive de terres riveraines avec des agriculteurs, etc.). Elles peuvent se traduire déjà simplement par une sensibilisation des acteurs aux impacts générés par les interventions humaines et à l'importance de préserver des secteurs encore relativement épargnés.

### **7.2.2. LIMITATION DES DYSFONCTIONNEMENTS FUTURS : CATEGORIE L.**

Si le fonctionnement morpho-écologique est légèrement dégradé mais encore correct, une opération de restauration n'est peut être pas nécessaire mais il semble important de mettre en œuvre des actions qui bloquent les dysfonctionnements en cours de manifestation : seuils de fond pour stabiliser une incision qui commence à se manifester, espace de mobilité pour éviter une accentuation d'une incision encore modérée, meilleure gestion des débits à la sortie d'un barrage, meilleure gestion de la qualité de l'eau, etc.

### **7.2.3. RESTAURATION : CATEGORIE R.**

Si l'état est dégradé, il est nécessaire de réaliser mettre en œuvre un programme de restauration hydromorphologique. Dans cette catégorie d'intervention nommée **R**, on peut alors distinguer 3 niveaux d'objectifs de restauration (qui correspondent aussi à 3 niveaux d'ambition) :

- **niveau R1**; objectif de restauration d'un compartiment de l'hydrosystème, **souvent piscicole**, dans un contexte où l'on ne peut réaliser une véritable opération de restauration fonctionnelle. Il s'agit généralement de mettre en place des structures de diversification des écoulements et des habitats : déflecteurs, petits seuils, caches, frayères,

etc. Ce niveau d'ambition ne nécessite pas une grande emprise latérale. Il peut être mis en œuvre dans l'emprise actuelle du lit mineur ou légèrement augmentée. Il devrait être réservé aux zones urbaines ou péri-urbaines, où les contraintes foncières sont importantes mais on constate qu'il est fréquemment mis en œuvre en zone rurale, pour des raisons foncières aussi et probablement par manque d'ambition...



Figure 6 : exemples de réalisations de niveau R1 (photos Malavoi, Biotec)

- **niveau R2**; objectif de restauration fonctionnelle plus globale. L'amélioration de tous les compartiments aquatiques et rivulaires est visée : transport solide, habitat aquatique, nappe alluviale, ripisylve. Ce niveau nécessite une emprise foncière plus importante (de 2 à 10 fois la largeur naturelle du lit mineur). Il peut être atteint par exemple par un reméandrage léger pour un cours d'eau rectifié, par un écartement des digues pour un cours d'eau fortement endigué, par la "remise" à ciel ouvert d'un lit de cours d'eau couvert, etc.;



Figure 7 : Exemples de réalisation de niveau R2 la Bièvre à Antony a) dans sa partie couverte) et b) immédiatement en aval, dans une partie remise à ciel ouvert (photos Malavoi)



Figure 8 : Exemples de réalisation de niveau R2 : le Bolbec à Bolbec. a) avant travaux (photo Silène Biotec), b) après (photo Biotec).

- **niveau R3**; niveau R2 + espace de mobilité ou de fonctionnalité. Restauration fonctionnelle complète de l'hydrosystème y compris de la dynamique d'érosion et du corridor fluvial. L'emprise nécessaire pour que ce niveau d'ambition soit pertinent est au minimum de l'ordre de 10 fois la largeur du lit mineur avant restauration.

Si le cours d'eau est actif ou potentiellement actif, cette emprise sera un véritable **espace de mobilité** qui lui permettra d'éroder ses berges et de retrouver une dynamique fluviale naturelle. Si le cours d'eau n'est pas potentiellement actif (faible puissance, berges cohésives, peu d'alluvions en transit), cette emprise sera plutôt un **espace de fonctionnalité**. Dans un tel espace de fonctionnalité, on laissera s'installer une végétation alluviale naturelle (corridor fluvial) ou on créera de toutes pièces une diversité de milieux biologiques annexes au cours d'eau (zones humides, mares, bocages, haies, secteurs pionniers, etc.).

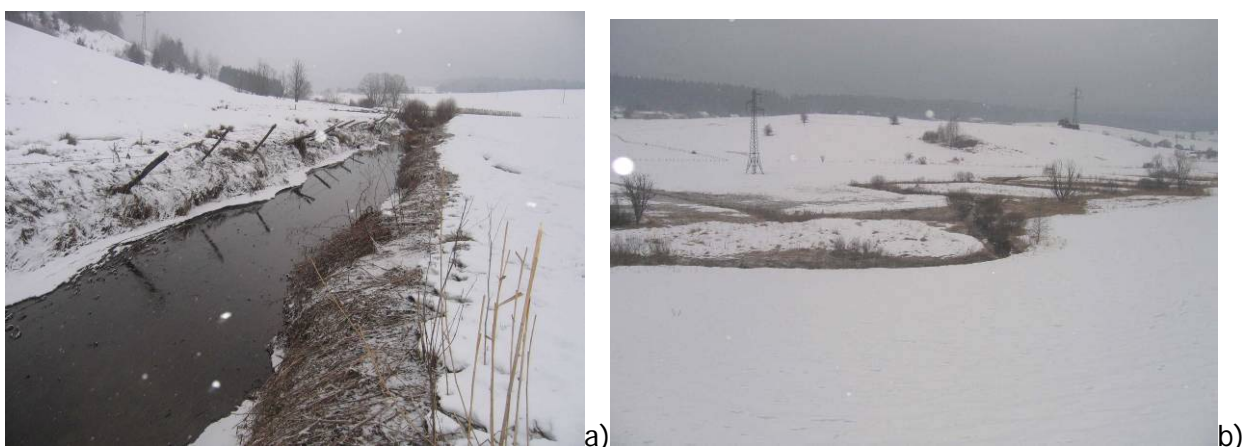


Figure 9 : Exemple de restauration fonctionnelle de niveau R3. Reméandrage d'un petit cours d'eau rectifié dans les années 60. a) amont non restauré b) aval restauré (l'ancien tracé rectiligne est bien visible à la corde des méandres). (photos Malavoi).



ATTENTION : cette catégorisation des niveaux de restauration correspond à un gradient continu allant de la restauration d'un nombre limité de fonctionnalités (R1) à un nombre maximal de fonctionnalités (R3). La limite entre ces "classes" est donc fictive.

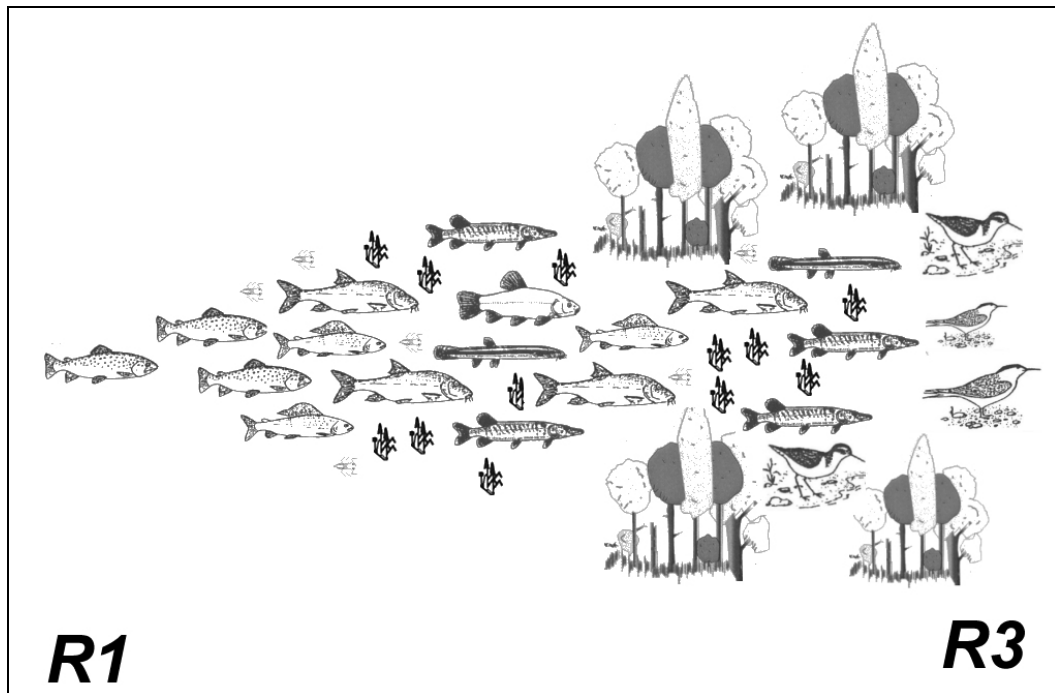


Figure 10 : Illustration schématique d'un gradient continu de restauration des fonctionnalités entre R1 et R3.

## 7.3. ANNEXE 2 : DEFINITION D'UN TRONÇON GEOMORPHOLOGIQUE

---

### 7.3.1. LA SECTORISATION HYDROMORPHOLOGIQUE

Par ordre décroissant de taille, les entités de sectorisation que nous utilisons actuellement sont les suivantes (les ordres de grandeur des longueurs de ces entités, exprimés en n fois la largeur à pleins bords, sont donnés entre parenthèses) :

\* secteur (quelques milliers de fois la largeur du lit à pleins bords (ℓ))

\* unité (>1000 ℓ)

\* **tronçon (100 à 1000 ℓ)**

\* sous-tronçon (100 à 1000 ℓ)

\* faciès (1 à 100 ℓ)

\* sous-faciès (1 à 100 ℓ)

\* ambiance (< ℓ)

\* micro-habitat (< ℓ)

NB : les deux dernières entités de sectorisation ont une signification plus écologique que géomorphologique dans la mesure où les tailles de ces habitats sont fonction de la taille de leurs « habitants ».

#### 7.3.1.1. QUELS NIVEAUX DE SECTORISATION SONT LES PLUS ADAPTES A LA GESTION ?

Il nous semble nécessaire de proposer une sectorisation à au moins deux niveaux :

- **niveau 1 : le tronçon géomorphologique homogène**

C'est le niveau de sectorisation qui nous paraît le plus pertinent pour une gestion globale et intégrée des cours d'eau. Il est utilisable par tous les acteurs et gestionnaires, quels que soient leurs domaines d'intervention. Ce niveau de résolution est basé exclusivement sur des paramètres géomorphologiques et hydrologiques de contrôle et les limites en ont été volontairement figées dans une cartographie nationale réalisée par le Cemagref (Valette et al., 2008).

- **niveau 2 : le sous-tronçon**

Pour ce niveau de sectorisation, chaque discipline scientifique, chaque gestionnaire, peut

utiliser sa propre gamme de paramètres discriminants : le géomorphologue peut identifier des sous-tronçons à méandres dans un tronçon globalement en tresses, des sous-tronçons endigués dans un tronçon à large fond de vallée ; le phyto-sociologue peut segmenter le linéaire sur la base de la présence-absence d'une ripisylve, d'une forêt alluviale ; le biologiste peut intégrer des critères de qualité d'eau, des fréquences de faciès d'écoulement etc...

**NB** : Les deux niveaux supérieurs de sectorisation (secteurs et unités) ont essentiellement un intérêt pour les « grands » gestionnaires dans le cadre de planifications de niveau national ou régional. Ils sont discriminés principalement sur la base de leur appartenance à une hydroécocorégion de niveau 1 (HER1) et de niveau 2 (HER2). Ces hydroécocorégions (Cemagref, 2002) sont en effet calées sur les variables majeures de contrôle géomorphologique que sont la géologie, le relief et le climat (cf dernier § de ce chapitre).

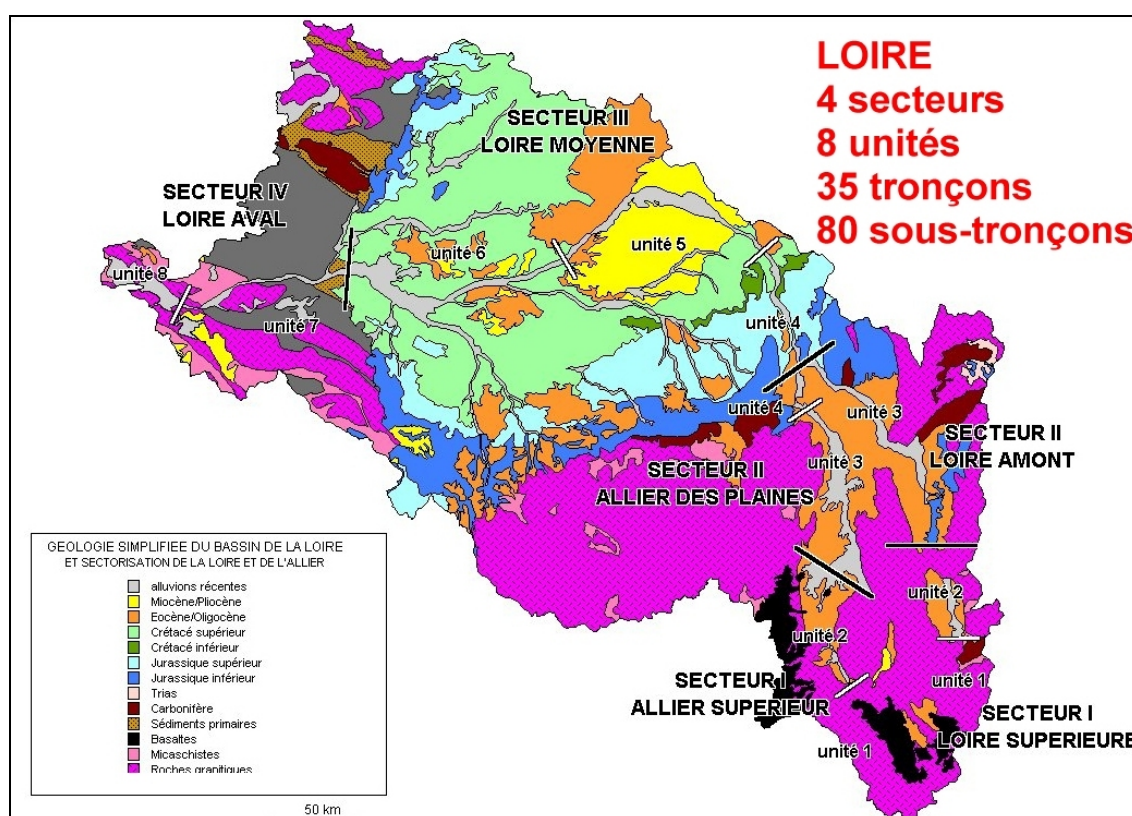


Figure 11 : Exemple de sectorisation de la Loire en secteurs, unités, tronçons et sous-tronçons (Malavoi, 2002)

### 7.3.1.2. METHODE RETENUE POUR LA SECTORISATION EN TRONÇONS HOMOGENES

Le découpage de 225 000 km de cours d'eau français (sur environ 500 000 au total) en tronçons homogènes a été réalisé par le Cemagref en 2008 (Valette *et al.*) sur la base des 3 paramètres de contrôle suivants, accessibles facilement dans les bases de données existantes

- La largeur du fond de vallée
- La pente de la vallée
- La confluence avec des cours d'eau importants (variable « hydrologique » de substitution aux valeurs réelles de débit, difficilement accessibles uniformément à l'heure actuelle).

◆ **Largeur du fond de vallée**

**Variable de contrôle essentielle** des processus géodynamiques, des phénomènes d'inondation, des processus écologiques au sein du corridor fluvial, voire des pressions socio-économiques, c'est la **largeur du fond de vallée alluvial** (Fz et Fyz des cartes géologiques), qui nous a guidés prioritairement dans la sectorisation en tronçons homogènes.

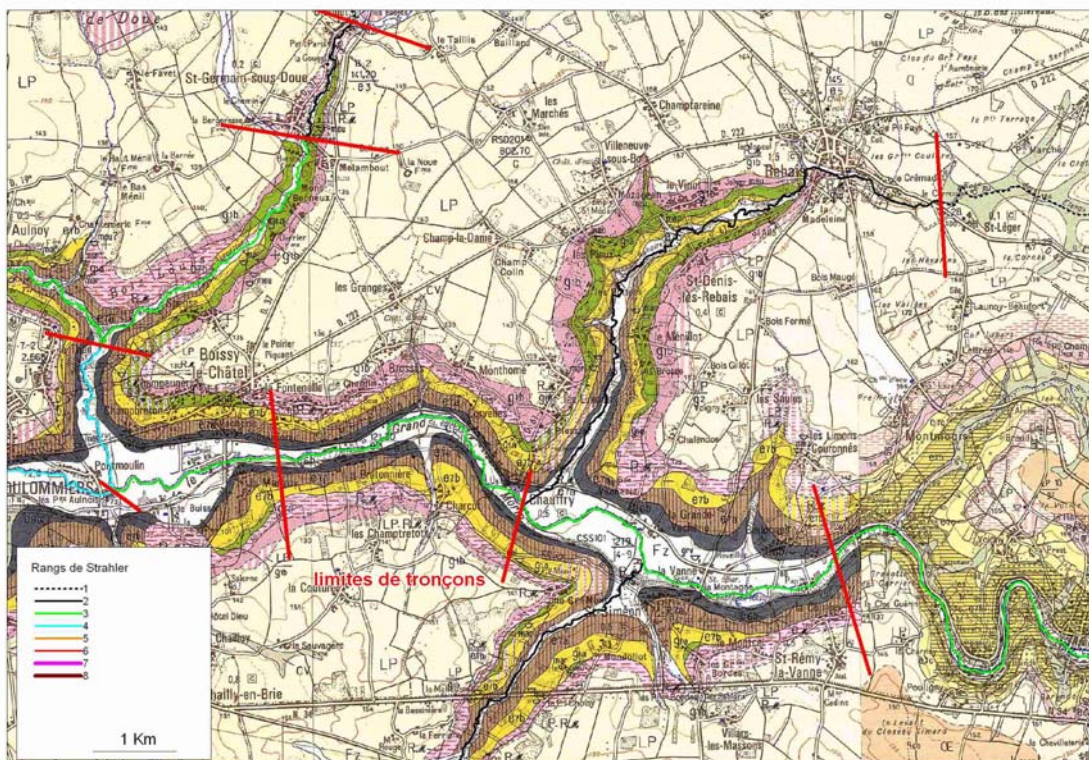


Figure 12 : exemple de sectorisation en tronçons homogènes sur la base de la forme du fond de vallée (BRGM)

◆ **Pente de la vallée**

Autre variable importante, la pente du fond de vallée renseigne sur l'énergie potentielle du cours d'eau et notamment sur sa capacité de mobilisation et de transport des sédiments. Cette variable a été déterminée visuellement à partir du MNT 50m (Modèle Numérique de Terrain) de l'IGN (BDalti), à partir duquel a été générée une couche avec les valeurs de pente et des courbes de niveau équidistantes de 5 ou 10 m.

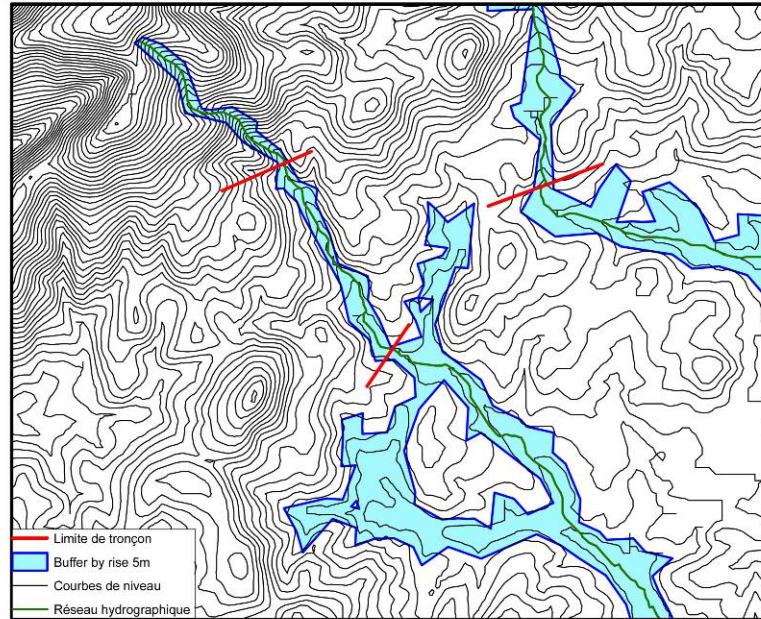


Figure 13 : Exemple de sectorisation en tronçons homogènes sur la base de la pente du fond de vallée

#### ◆ Hydrologie (ordination de Strahler)

La variable retenue est l'ordre de Strahler (1957). Ce système hiérarchique descendant de numérotation se prête bien à la quantification des réseaux hydrographiques et a également l'avantage de tenir compte de l'évolution longitudinale des cours d'eau. De plus, une bonne corrélation entre le rang de Strahler et la taille de la rivière a été démontrée (Bravard et Petit, 2000).

Ainsi, des limites de tronçon ont été placées :

- A chaque changement de rang de Strahler pour les rangs 1 à 3
- A chaque confluence avec un cours d'eau de rang  $n$  et  $n-1$  pour les rangs 4
- A chaque confluence avec un cours d'eau de rang  $n$ ,  $n-1$ ,  $n-2$  pour les rangs supérieurs à 5

#### 7.3.2. POSTULAT D'INTERPRETATION DE LA SECTORISATION

Le postulat est le suivant : si les paramètres de sectorisation et les variables typologiques associées ont été judicieusement choisis (et correctement renseignés), ils doivent permettre d'identifier des **tronçons homogènes au sein desquels, selon des lois de la géodynamique fluviale, les valeurs des variables de réponses devraient être elles aussi homogènes.**

Idéalement, on devrait pouvoir déterminer, compte tenu des valeurs des variables de contrôle, les caractéristiques précises des variables de réponse : style fluvial, largeur,

profondeur, pente du cours d'eau, intensité des processus géodynamiques, etc. On est malheureusement encore assez loin d'un résultat pertinent, compte tenu des fortes incertitudes qui subsistent dans les relations de géométrie hydraulique et de morphométrie (cf. chapitres précédents).

## **7.4. ANNEXE 3 : PROTOCOLE DE DESCRIPTION DU COLMATAGE SUPERFICIEL**

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

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

**Code 1.** Si les éléments se soulèvent facilement, nous attribuons la classe 1. Les éléments sont posés sur la sous-couche granulométrique et ne génèrent pas de nuage de limon lorsqu'ils sont soulevés.

**Code 2.** Si les éléments se soulèvent plus difficilement, nous attribuons la classe 2 en fonction de la quantité de limon qui se libère dans l'eau sous les éléments. Le nuage généré est peu dense, c'est-à-dire que la couche de surface est collée par une couche de limon légèrement colmatante, qui lie les éléments entre eux.

**Code 3.** Si les éléments se soulèvent avec un nuage de limon assez épais, nous attribuons la classe 3. Les éléments sont très enchâssés.

**Code 4.** Si les éléments se soulèvent difficilement, nous attribuons la classe 4. Le nuage de limon produit est très dense. La structure est enchâssée dans une sous-couche très compacte dont l'emprise est forte sur les éléments.

**Code 5.** Si les éléments ne se soulèvent pas ou très difficilement (structure cimentée ou sous forme d'un dallage) nous attribuons la classe 5. C'est le cas lorsque la granulométrie est recouverte par une épaisse couche de limon, cette classe granulométrique se retrouvant en Subs. Dom.

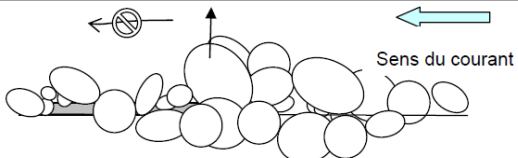
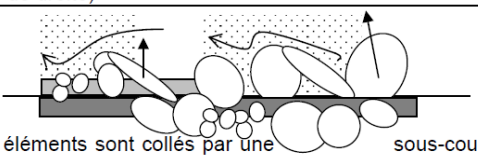
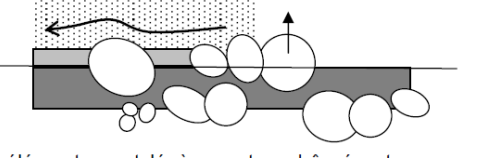
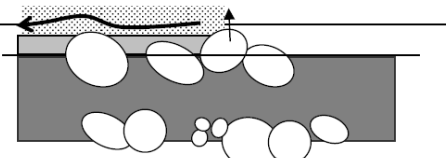
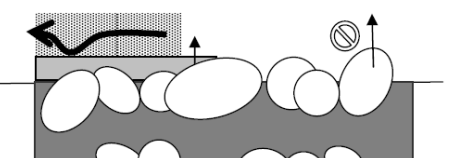
Code	Classes de Colmatage	Représentation du degré de colmatage (lorsque l'on soulève un élément du fond)
1	] 0 - 25%]	 <p>Les éléments sont posés. On peut observer soit un dépôt fin de limons peu colmatant (cas de gauche) soit aucun dépôt (cas de droite)</p>
2	] 25 - 50%]	 <p>Les éléments sont collés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

Figure 14 : exemple de méthode d'évaluation du degré de colmatage et d'enchâssement des matériaux du substrat alluvial (Archambaud et al., 2005)



## 7.5. ANNEXE 4 : METHODE GRANULOMETRIQUE EVHA

La méthode est celle utilisée dans le protocole « microhabitats » (MALAVOI et SOUCHON, 1989) \*\*. Elle permet de qualifier très rapidement le substrat alluvial d'un cours d'eau.

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

On utilise un code en 6 caractères :

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

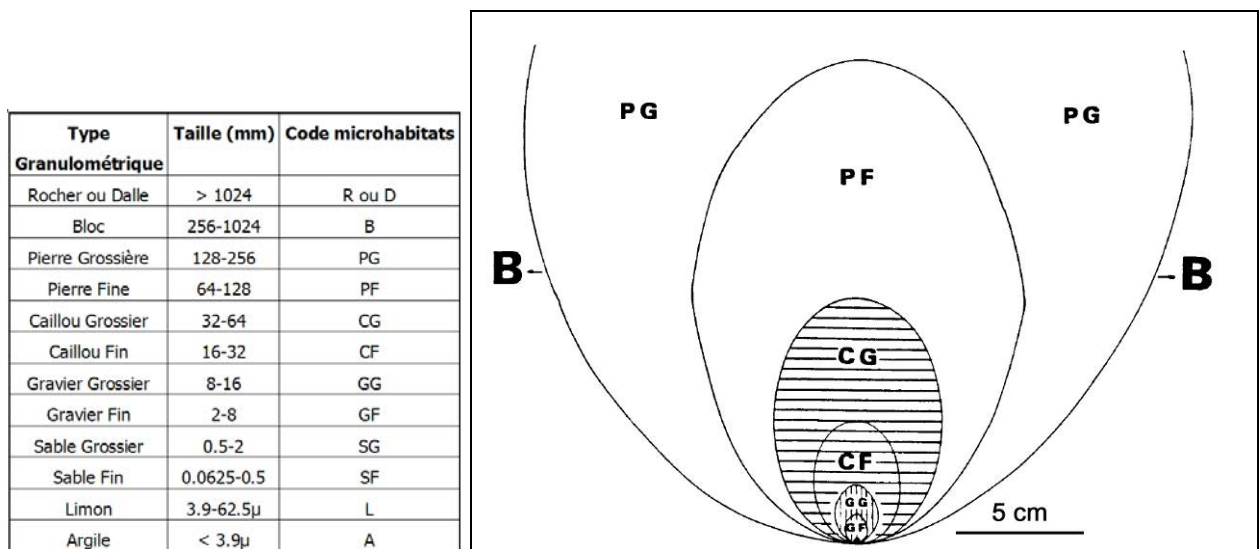


Figure 15 : Echelle granulométrique utilisée et gabarit pour les évaluations granulométriques visuelles (Malavoi, Souchon, 1989) (attention de bien mettre à l'échelle...)

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

Les deux autres indiquent la classe dominante en surface occupée (ex : PF), le substrat dominant pouvant aussi être le plus grossier (ex : PGPG).

\*\* MALAVOI J.R., SOUCHON Y., 1989 : Méthodologie de description et quantification des variables morphodynamiques d'un cours d'eau à fond caillouteux. Rev. Géo. Lyon. Vol 64, N°4, p 252-259

Les deux derniers caractères sont utilisés si deux classes dominantes apparaissent (cas fréquent) (ex : PGPFCG ci dessous).

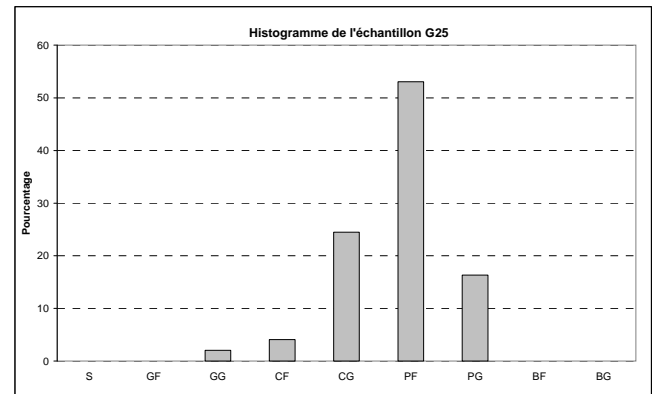


Figure 16 : le substrat correspondant à cette photo (mesure sous SIG de 49 éléments échantillonnés sur une grille virtuelle à mailles carrées, après mise à l'échelle de la photo) serait codé visuellement - PGPFCG -

**ANNEXE AU DOCUMENT**  
***ELEMENTS POUR UNE HARMONISATION DES CONCEPTS***  
***ET DES METHODES DE SUIVI SCIENTIFIQUE MINIMAL***

**AIDE AUX CHOIX DE STATIONS REPRESENTATIVES DU POINT DE VUE**  
**HYDROMORPHOLOGIQUE D'UN TRONÇON OU SOUS TRONÇON**  
**GEOMORPHOLOGIQUE**



05/04/2012

Il est très fréquent qu'une étude portant sur un cours d'eau nécessite de choisir une ou des **STATIONS** sur lesquelles seront réalisées un certain nombre de mesures (physiques, biologiques, etc.) qui ne peuvent l'être de manière exhaustive sur l'ensemble du linéaire.

Il est important que ces stations soient **représentatives** du linéaire plus important dont elles seront un **échantillon**.

Dans le cas d'études portant sur l'hydromorphologie (études diagnostiques, projets et suivi de mesures de restauration etc.), on cherchera donc une ou des stations représentatives du fonctionnement hydromorphologique du cours d'eau.

Trois étapes sont nécessaires pour mener à bien ce choix :

- Etape 1 : sectorisation et choix de l'entité de sectorisation dont la station devra être représentative
- Etape 2 : cartographie des faciès d'écoulement ou, *a minima*, détermination des types et des proportions moyennes des faciès présents dans l'entité que l'on souhaite décrire
- Etape 3 : choix de la ou des stations représentatives.

Cette méthode est particulièrement pertinente pour le choix des stations représentatives d'un tronçon ou sous tronçon naturel. Celle-ci peut être néanmoins mise en œuvre pour le choix de station sur un linéaire altéré qui va être restauré via la recherche de la représentativité des faciès présents actuellement dans le secteur altéré. Cette représentativité devra être réévaluée après restauration.

S'il s'avère que la station n'est plus représentative, elle pourra être déplacée dans une zone plus représentative. Dans le cas des effacements d'ouvrage, la station de suivi post restauration sera positionnée en fonction des faciès nouvellement exondés.

## 8. ETAPE 1 : SECTORISATION

Par ordre décroissant de taille, les entités de sectorisation que nous proposons (Malavoi et Paris, 2000) sont les suivantes (les ordres de grandeur des longueurs de ces entités, exprimés en n fois la largeur à pleins bords, sont donnés entre parenthèses) :

\* secteur (quelques milliers de fois la largeur du lit à pleins bords ( $\ell$ ))

\* unité (>1000  $\ell$ )

### \* tronçon (100 à 1000 $\ell$ )

\* sous-tronçon (100 à 1000  $\ell$ )

\* segment (10 à 100  $\ell$ )

\* faciès (1 à 100  $\ell$ )

\* sous-faciès (1 à 100  $\ell$ )

\* ambiance (<  $\ell$ )

\* micro-habitat (<  $\ell$ )

**NB** : les deux dernières entités de sectorisation ont une signification plus écologique que géomorphologique dans la mesure où les tailles de ces entités sont fonction de la taille de leurs « habitants ».

### 8.1. LE TRONÇON GEOMORPHOLOGIQUE HOMOGENE

---

C'est le niveau de sectorisation qui nous paraît le plus pertinent pour une gestion globale et intégrée des cours d'eau et **c'est donc a priori de ce niveau de sectorisation que la station de mesures doit être représentative.**

Ce niveau de résolution est basé exclusivement sur des paramètres géomorphologiques et hydrologiques de contrôle, non ou peu modifiables par l'Homme :

- La largeur du fond de vallée
- La pente de la vallée
- La confluence avec des cours d'eau importants (variable « hydrologique » de substitution aux valeurs réelles de débit, difficilement accessibles uniformément à l'heure actuelle).

Le découpage de 235 000 km de cours d'eau français (sur environ 500 000 au total) en tronçons homogènes a été réalisé sur ces bases par le Cemagref en 2008 (Valette *et al.*)

#### ◆ Largeur du fond de vallée

**Variable de contrôle essentielle** des processus géodynamiques, des phénomènes d'inondation, des processus écologiques au sein du corridor fluvial, voire des pressions socio-économiques, c'est la **largeur du fond de vallée alluvial** ( $Fz$  et  $Fyz$  des cartes géologiques), qui nous a guidés prioritairement dans la sectorisation en tronçons homogènes.

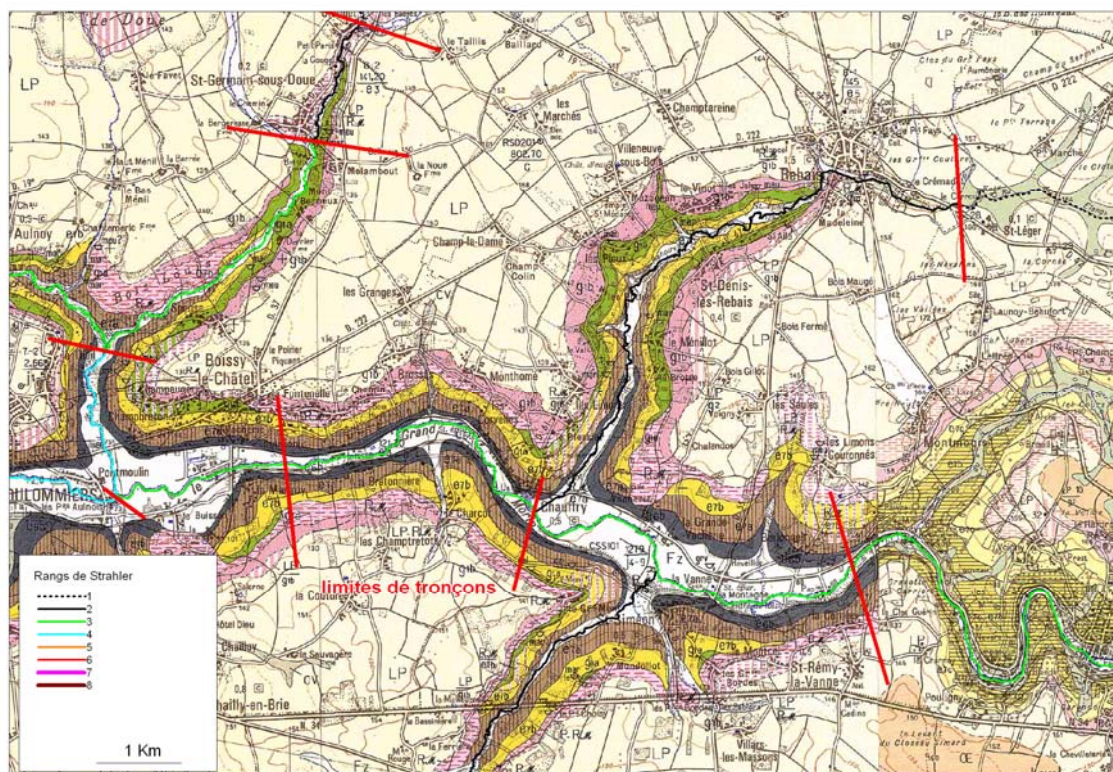


Figure 17 : exemple de sectorisation en tronçons homogènes sur la base de la forme du fond de vallée (fond BRGM)

#### ◆ Pente de la vallée

Autre variable importante, la pente du fond de vallée renseigne sur l'énergie potentielle du cours d'eau et notamment sur sa capacité de mobilisation et de transport des sédiments. Cette variable a été déterminée visuellement à partir du MNT 50m (Modèle Numérique de Terrain) de l'IGN (BDalti), à partir duquel a été générée une couche avec les valeurs de pente et des courbes de niveau équidistantes de 5 ou 10 m.

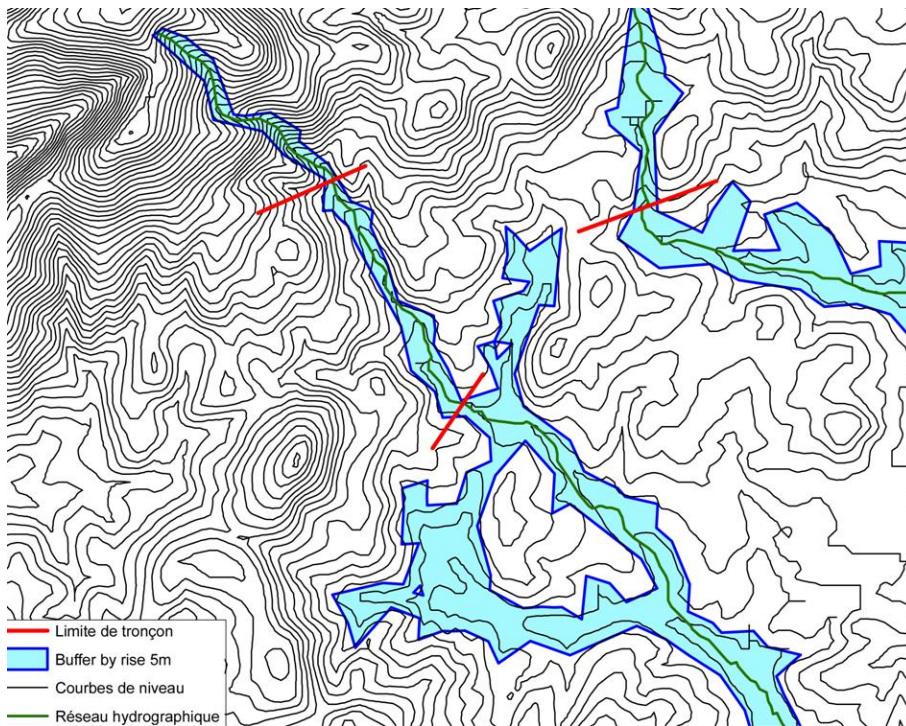


Figure 18 : Exemple de sectorisation en tronçons homogènes sur la base de la pente du fond de vallée

#### ◆ Hydrologie (ordination de Strahler)

La variable retenue est l'ordre de Strahler (1957). Ce système hiérarchique de numérotation se prête bien à la quantification des réseaux hydrographiques et a également l'avantage de tenir compte de l'évolution longitudinale des cours d'eau.

Ainsi, des limites de tronçon ont été placées :

- A chaque changement de rang de Strahler pour les rangs 1 à 3
- A chaque confluence avec un cours d'eau de rang  $n$  et  $n-1$  pour les rangs 4

- A chaque confluence avec un cours d'eau de rang  $n$ ,  $n-1$ ,  $n-2$  pour les rangs supérieurs à 5

## 8.2. LE SOUS-TRONÇON

---

Il peut être parfois pertinent, voire indispensable, de choisir des stations représentatives de SOUS-TRONÇONS et non plus uniquement de tronçons.

C'est le cas par exemple lorsqu'au sein d'un tronçon géomorphologique homogène, des interventions humaines ont modifié nettement la morphologie du cours d'eau.

On voit par exemple sur la figure ci-dessous qu'une seule station ne peut représenter correctement l'ensemble du tronçon dont une partie a été fortement modifiée par des travaux hydrauliques (rectification du tracé).

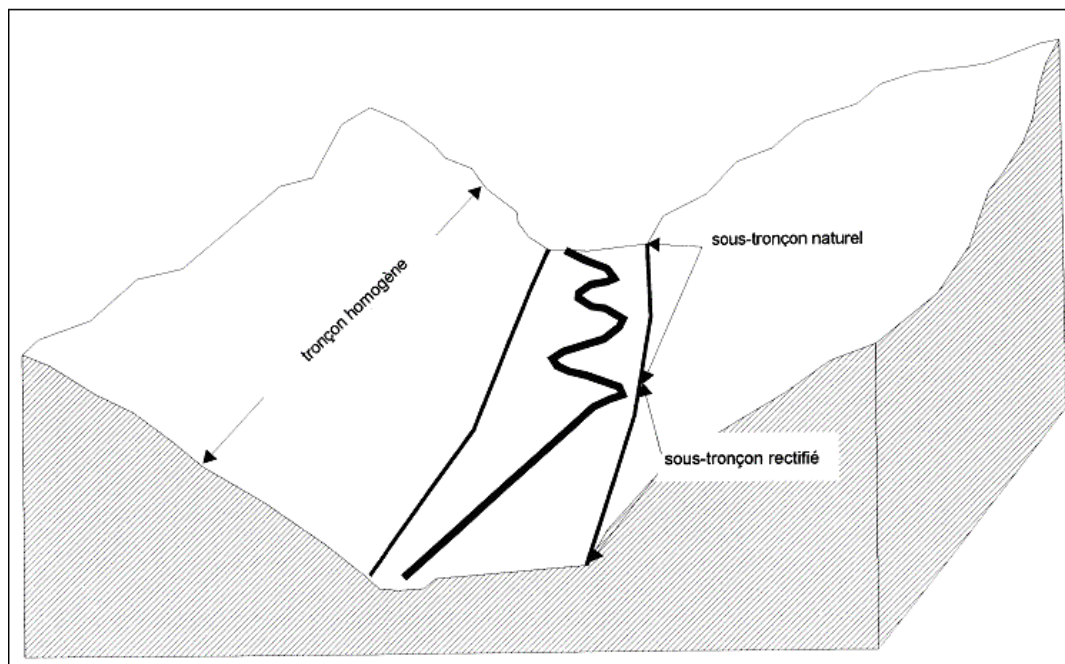


Figure 19 : un tronçon homogène scindé en deux sous-tronçons sur la base de l'artificialisation du tracé en plan



## 9. ETAPE 2 : IDENTIFICATION DES FACIES D'ECOULEMENT

La deuxième étape consiste à identifier et si possible quantifier (en longueur occupée sur le linéaire), les principaux types de faciès présents sur le ou les tronçons ou sous-tronçons que l'on souhaite décrire via la station d'étude, ou dans le cas d'un projet de restauration, ceux présents sur le linéaire qui va être restauré.

Les faciès d'écoulement sont de petites portions de cours d'eau (d'une longueur comprise entre 1 et 100 fois la largeur à pleins bords environ) présentant une homogénéité 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.

Les hydromorphologues considèrent les faciès comme les unités fondamentales des rivières. Ils leur attribuent notamment une fonction physique de dissipation optimale de l'énergie. Ces faciès sont également le reflet à long terme des contraintes 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 poissons (on parle alors de **méso-habitats**) ou pour composer leurs unités d'échantillonnage (prélèvements de macroinvertébrés benthiques, inventaires piscicoles).

L'identification des faciès d'écoulement est souvent problématique car, dans la réalité, il existe très peu de faciès « d'école ». Malavoi (1989) et Malavoi et Souchon (2002) ont proposé une approche qui, bien qu'entachées d'imperfections induisant un biais lié à l'opérateur, essaient d'objectiviser leur description au moyen d'une **clé de détermination**.

### 9.1. CRITERES DE DISCRIMINATION DES FACIES

---

Deux niveaux de classification sont proposés :

#### 9.1.1. 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, rapides, chenaux lotiques.

**NB** : 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.

### 9.1.2. 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 dichotomique actuellement utilisée (figure ci-dessous) 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.

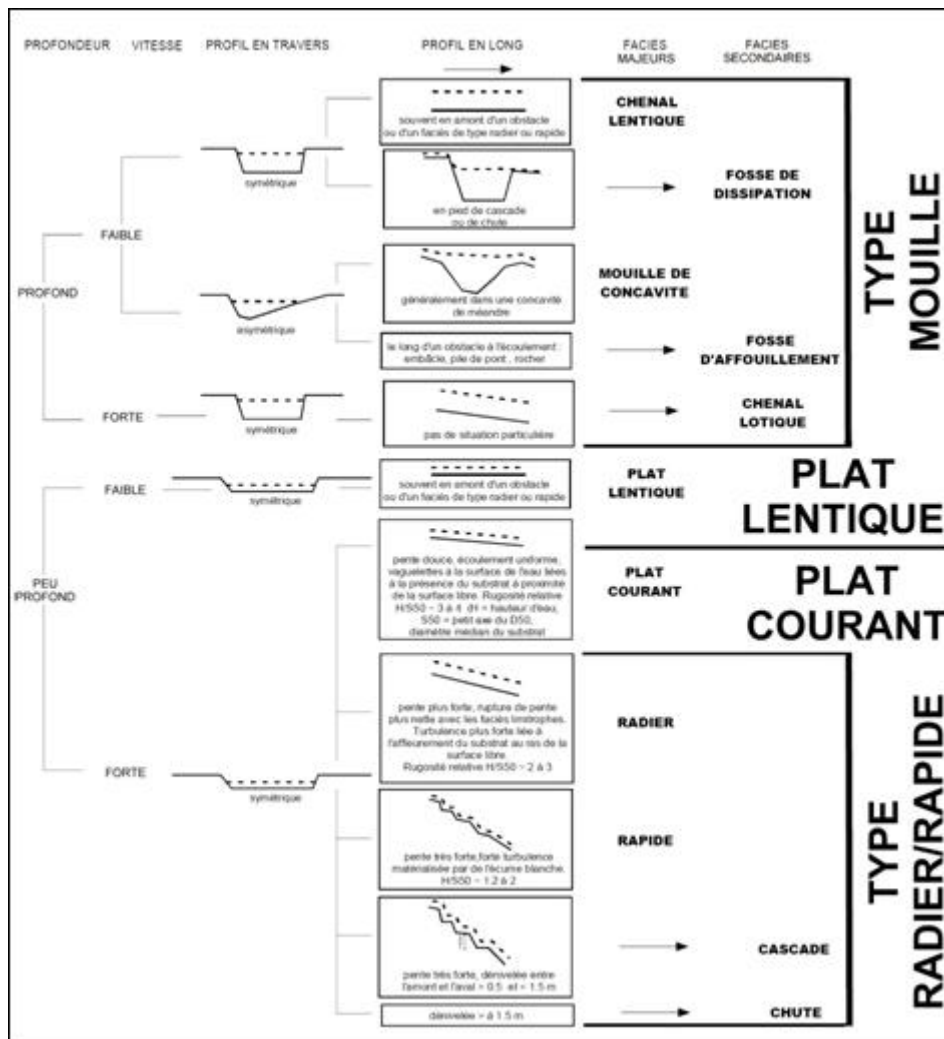


Figure 20 : clé de détermination simplifiée des faciès d'écoulement (Malavoi et Souchon, 2002)

Ces faciès d'écoulement, principalement générés par les processus géodynamiques d'érosion et de transport solide, sont l'un des principaux outils permettant de faire le **lien entre le fonctionnement hydromorphologique et le fonctionnement écologique d'un cours d'eau**.

Un exemple d'application de la typologie des faciès et de leur cartographie est présenté sur la figure suivante. L'étude dont est extraite cette figure (Malavoi, CSP 1999) avait pour objectif de cartographier les surfaces potentielles de reproduction et de développement

du saumon atlantique sur le bassin de l'Allier. Ces surfaces sont directement 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 et particulièrement les radiers à blocs.

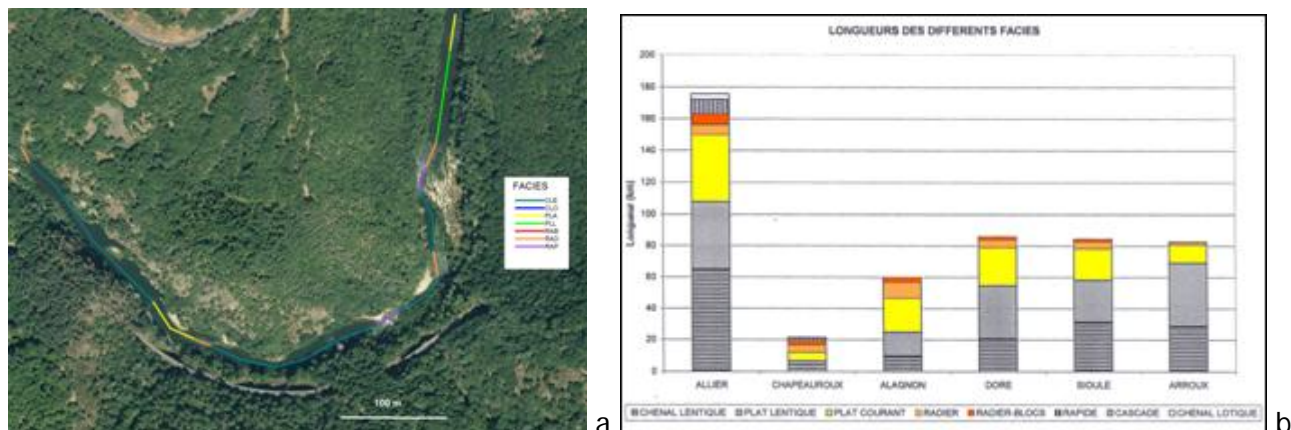


Figure 21 : (a) cartographie des faciès d'écoulement sur le haut Allier et (fond IGN) (b) synthèse de la cartographie réalisée sur les 6 cours d'eau « à saumon » du bassin de l'Allier (Malavoi, 1999). En couleur apparaissent les faciès intéressants pour la reproduction et le développement des saumons.

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.

ATTENTION : ces mesures ayant été réalisées sur des cours d'eau plutôt encaissés et à forte puissance du bassin de l'Allier, les résultats ne sont pas extrapolables à l'ensemble des types de cours d'eau français.

On observe que les radiers sont 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 3 : quelques exemples de longueur de faciès d'écoulement relatives à la largeur du cours d'eau à pleins bords.

	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
SIOULE	11.96	8.25	4.15	1.25	2.27	3.20		
<b>Médiane</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>1</b>

Ces ordres de grandeur permettent d'estimer qu'une station d'une longueur de l'ordre de **30 fois la largeur** permettrait, en théorie, d'échantillonner au moins un faciès de chaque type, sur ce type de cours d'eau du Massif Central, caractérisé par une forte influence des versants dans les processus géodynamiques et la morphologie qui en résulte : contraintes latérales fortes, parfois contraintes verticales (affleurement du substratum), apports d'éléments très grossiers (gros blocs et rochers) par éboulis de versant.

Sur les cours d'eau coulant dans de larges vallées alluviales, où l'influence des versants est moindre et les faciès d'écoulement moins diversifiés (radiers, plats, mouilles), on considère qu'une longueur de station de l'ordre de 10 à 20 fois la largeur, selon les types de cours d'eau, permet de mesurer au moins deux séquences complètes de faciès.

## 9.2. METHODE DE DESCRIPTION

---

### 9.2.1. DESCRIPTION EXHAUSTIVE DES FACIES PAR VOIE TERRESTRE

Cette méthode est valable sur des cours d'eau de petite dimension (2 à 10 m) ainsi que sur ceux longés par une ripisylve recouvrante. Elle n'est financièrement plus intéressante que la suivante que si le linéaire à décrire est faible (moins de 10 km). La description des faciès est réalisée au moyen de la clé présentée ici, lors d'une descente à pied du cours d'eau, les mesures et le positionnement étant effectués au topofil (précision de l'ordre de 50 cm) ou au GPS (si la ripisylve n'est pas trop recouvrante). Le report est ensuite effectué sur carte, comme pour la méthode suivante.

### 9.2.2. DESCRIPTION EXHAUSTIVE DES FACIES PAR ANALYSE AERIENNE

Cette méthode est particulièrement intéressante dans le cas d'études exhaustives portant sur des linéaires importants. Elle n'est cependant pas utilisable sur les petits cours d'eau à ripisylve très abondante pouvant masquer le lit mineur.

Un survol du cours d'eau en hélicoptère ou ULM est effectué à une altitude de l'ordre de 100 m du sol et une vitesse de déplacement de 60 km/h environ. Le cours d'eau est filmé en continu au moyen d'un caméscope. Les faciès observés sur le film sont ensuite reportés sur carte puis digitalisés et cartographiés. Le niveau de précision de cette méthode ne permet pas d'avoir la résolution de la méthode pédestre mais elle est beaucoup plus rapide, globalement moins coûteuse et elle permet surtout d'avoir un état de référence utilisable pour un suivi éventuel de la morphologie du cours d'eau. Il n'est pas possible, à cette échelle, d'obtenir avec précision les données quantitatives nécessaires pour une utilisation optimale de la clé de détermination (vitesses, profondeurs, granulométrie). On peut néanmoins, avec une certaine habitude, « évaluer » ces paramètres visuellement et se reporter alors à la clé pour classer les faciès observés. Il n'est pas inutile ensuite d'aller sur le terrain échantillonner certains faciès pour obtenir un minimum de valeurs quantifiées.

### **9.2.3. DESCRIPTION SOMMAIRE**

Si le budget de l'étude ne permet pas de réaliser une analyse exhaustive, on se contentera d'échantillonner le cours d'eau au droit de points de visite aléatoires ou guidés par la présence de routes, ponts etc. On évaluera ainsi les types de faciès présents et leurs proportions relatives.

## 10. ETAPE 3 : CHOIX DE LA OU DES STATIONS D'ETUDE

Il paraît nécessaire de mesurer **au moins une station par tronçon homogène**.

Le principe est alors de rechercher un station permettant, sur une longueur de 14 fois la largeur environ (longueur type d'une station du protocole CARHYCE), d'obtenir au moins une séquence complète des différents types de faciès présents sur le tronçon, voire 2.

Sur les cours d'eau dans lesquels la répartition des faciès est fortement influencée par la présence des versants et les affleurements du substratum (cours d'eau encaissés), il ne sera pas toujours évident de trouver LA station représentant tous les types. Dans ce cas, **deux stations** peuvent être nécessaires.

Sur les cours d'eau alluviaux dans lesquels la répartition des faciès est principalement guidée par les processus géodynamiques d'érosion/sédimentation, il est beaucoup plus aisé de trouver une station présentant une à deux séquences radier/plat/mouille.

**ATTENTION** : l'étude quantitative des faciès, quand elle peut être réalisée, permet de connaître les proportions des différents faciès. Il peut alors être décidé de ne pas chercher à tout prix à décrire une station présentant tous les faciès. En effet, certains faciès peuvent n'être que très peu représentés sur le tronçon et ne pas nécessiter de description précise. A contrario, certains faciès « rares » peuvent néanmoins présenter un fort intérêt, notamment du point de vue biologique. Par exemple un radier unique sur un tronçon à rapides/cascades/chenaux lenticulaires peut être la seule zone de reproduction pour certaines espèces de poissons. Il peut alors être important de l'inclure dans la station d'étude.