

RETOUR D'EXPÉRIENCE D'OPÉRATIONS DE RESTAURATION DE COURS D'EAU ET DE LEURS ANNEXES, MENÉES SUR LE BASSIN RMC

RAPPORT



Biologie appliquée sarl

65-67, cours de la Liberté 69003 LYON
Tél. : 04 78 14 06 06 Fax : 04 78 14 06 07
E-mail : biotec@biotec.fr



Bureau
Malavoi Jean-René
Géomorphologue

207, rue de l'Eglise 01600 PARCIEUX
Tél. : 04 37 92 97 04 Fax : 04 37 92 97 04
E-mail : JR.Malavoi@wanadoo.fr

**Document n° 05.079-ETU-101
Juin 2006**

TABLE DES MATIERES

1	RAPPEL DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	1
2	APPROCHES TYPOLOGIQUES.....	5
2.1	Typologie des dysfonctionnements à l'origine des travaux de restauration	5
2.1.1	Dysfonctionnement au sein du lit mineur	6
2.1.1.1	Dysfonctionnements liés à une incision du lit mineur	6
2.1.1.2	Dysfonctionnements liés à une modification drastique des caractéristiques de l'écoulement et de la nature des berges	9
2.1.1.3	Dysfonctionnements liés à une modification drastique des formations végétales riveraines	21
2.1.2	Dysfonctionnements au sein du lit majeur	25
2.1.2.1	Déconnexion lit mineur/lit majeur	25
2.1.2.2	Assèchement des milieux naturels humides du lit majeur	28
2.2	Typologie des cours d'eau	30
2.2.1	Typologie hydroécorégionale	30
2.2.2	Typologie géodynamique fonctionnelle	33
2.2.2.1	Fondement scientifiques	34
2.2.2.2	Proposition de typologie	36
2.2.3	Exemple de typologie sur la Région Franche-Comté	37
2.3	Typologie des travaux de restauration	42
2.3.1	Concepts et Terminologies	42
2.3.1.1	Concepts généraux	42
2.3.1.2	Terminologies actuellement utilisées	42
2.3.2	Niveaux d'ambition des travaux de restauration	44
2.3.3	Typologie des travaux de restauration par grandes familles de dysfonctionnements à traiter	50

	2.3.3.1	Dysfonctionnements au sein du lit mineur	51
	2.3.3.2	Dysfonctionnements au sein du lit majeur	59
3	AUDIT DES SITES DE RESTAURATION.....	61	
3.1	Remarques préliminaires		61
3.2	Analyse des cas traités, quelques aspects méthodologiques		63
3.3	Synthèse de quelques aspects techniques, sociologiques et fonciers		65
	3.3.1	Aspects fonciers	65
	3.3.2	Aspects sociologiques	67
	3.3.3	Aspects techniques	67
		3.3.3.1	Choix du gabarit du cours d'eau reméandré
		3.3.3.2	Notion d'entretien et de garantie
		3.3.3.3	Référence aux modèles naturels dans la restauration
3.4	Tableaux de synthèse des fiches		71
4	EXEMPLES ETRANGERS ET HORS BASSIN RMC	76	
4.1	Exemples allemands		77
	4.1.1	Les pionniers	78
		4.1.1.1	Le Holzbach
		4.1.1.2	La Wandse à Hamburg
		4.1.1.3	La Stelle
	4.1.2	Des exemples récents	82
		4.1.2.1	La Sulzbächle
		4.1.2.2	L'Alb
		4.1.2.3	L'Enz à Pforzheim
		4.1.2.4	L'Isar à Munich
4.2	Exemples suisses		89
	4.2.1	Aménagement hydroécologique de la Chèvre (canton du Jura)	91
	4.2.2	Réaménagement de la Vendline (canton du Jura)	92
	4.2.3	Réaménagement de la Cornoline (canton du Jura)	92
	4.2.4	Restauration du Rhône entre Leuk et Sierre (canton du Valais)	93
	4.2.5	Restauration du Chrebsbach (canton de Zürich)	96
4.3	Exemples italiens		99

4.4	Exemples français hors bassin RMC	101
4.4.1	Aménagement de l'ancienne retenue du barrage de Kernansquillec suite à son arasement	101
4.4.2	Aménagement de la Brenne à Vénarey-les-Laumes (Côte d'Or)	103
5	OUTIL D'AIDE A L'ANALYSE D'OPERATIONS DE RESTAURATION	106
5.1	Evaluation du contexte socio-politique et foncier	107
5.2	Evaluation de la qualité technique d'un projet de restauration	108
5.2.1	Nécessité d'une étude diagnostique	108
5.2.2	Nécessité de se positionner dans un niveau d'objectif	108
5.2.3	Nécessité de se positionner dans un niveau d'ambition	109
5.2.4	Nécessité de proposer un suivi scientifique des travaux réalisés afin d'évaluer leur réussite en termes morpho-écologiques et d'améliorer les techniques	109
5.3	Evaluation a priori de l'efficience probable d'un projet de restauration	111
5.3.1	Calcul du score d'efficience probable	111
5.3.2	Détermination de la longueur minimale pertinente	113
5.4	Tableaux de synthèse des familles de travaux par type de dysfonctionnement et niveau d'ambition	114
5.5	Exemples de fiches de demande de subvention etudes/travaux	121
5.5.1	Demande de subventionnement d'une étude préalable et d'avant-projet	121
5.5.2	Demande de subventionnement de travaux	122
6	CONCLUSION.....	125
7	BIBLIOGRAPHIE.....	127

1

RAPPEL DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS DE L'ETUDE

Des milliers de kilomètres de cours d'eau français ont vu depuis plusieurs décennies leurs caractéristiques géomorphologiques (géométrie, substrats,...) et géodynamiques (processus) fortement altérées par des interventions anthropiques diverses :

- **chenalisations** (recalibrage, rectification, endiguement), se traduisant notamment par une banalisation des caractéristiques abiotiques des milieux aquatiques;
- **extractions de matériaux** avec leurs effets bien connus que sont les incisions du lit mineur, la disparition du substrat alluvial, l'abaissement de la nappe d'accompagnement, etc.;
- **implantations de barrages et de seuils** avec des effets nombreux et variés tels que le piégeage des alluvions, la création de longs plans d'eau en amont en lieu et place des faciès d'écoulement naturels, l'augmentation du réchauffement de l'eau en été, etc.

Trois types de modifications essentielles constituent un frein à l'atteinte du bon état écologique des cours d'eau :

- **l'altération des flux** : modification des régimes hydrologiques, l'altération de l'équilibre sédimentaire (graviers, sables et fines);
- **l'altération des formes** : la géométrie des cours d'eau (simplifications des faciès, rectifications, rescindements ...);
- **l'altération de l'accès aux habitats** : perturbation ou rupture des connections avec les milieux connexes (lônes, basses, mares, prairies alluviales ...) et modification de la continuité biologique amont/aval (circulation des poissons et autres espèces aquatiques).

Or, il est maintenant admis que la composante physique des milieux aquatiques agit comme facteur limitant pour le bon fonctionnement des milieux aquatiques.

Actuellement, que se soit la mise en oeuvre de la Directive Cadre sur l'eau (DCE), la révision des SDAGE ou la construction du IX^{ème} programme d'intervention de l'Agence de l'eau, la composante hydromorphologique des milieux constitue un axe de travail majeur. Ce positionnement de l'hydromorphologie comme facteur limitant du bon fonctionnement et par la suite du bon état écologique, est le fruit du dialogue de plus en plus constructif entre la sphère scientifique et la sphère des institutionnels et des gestionnaires.

D'un autre côté, les conceptions scientifiques ont largement évolué entre le concept de "système fluvial" (Schumm, 1977), décrivant l'ensemble du bassin hydrographique comme un système où s'expriment des gradients longitudinaux (géomorphologique et hydrologique) jusqu'au concept d'hydrosystème fluvial (Amoros, Petts, 1993) qui intègre les quatre dimensions suivantes :

- la **dimension longitudinale** qui fait état des flux unidirectionnels le long du gradient amont-aval;
- la **dimension transversale** qui fait état des échanges avec les plaines alluviales;
- la **dimension verticale** qui fait état des échanges avec les écosystèmes superficiels et souterrains, aussi bien à proximité de l'axe fluvial (sous-écoulement fluvial) que sur les marges de la plaine (aquifère alluvial et nappes phréatique de versants);
- la **dimension temporelle** avec des temps de réaction variables entre l'échelle de l'unité fonctionnelle et l'échelle de bassin versant.

Ces travaux sont à la base d'une prise de conscience de l'importance des facteurs physiques dans le fonctionnement écologique des milieux aquatiques.

En parallèle de ce cheminement conceptuel, les gestionnaires et les institutionnels ont progressivement intégré ces nouveaux modes de gestion dans leurs politiques respectives. Ainsi, de la prise en compte des "contraintes environnementales" à la "gestion intégrée" d'un bassin versant, la composante hydromorphologique est identifiée comme un réel levier d'action pour l'amélioration de la qualité des milieux aquatiques.

Les programmes d'intervention de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse ont suivi cette évolution depuis 1980 :

- dans le cadre de son 4^{ème} **programme d'intervention (1982-1986)**, l'Agence avait créé un sous programme d'intervention financière alors intitulé "Aménagement des cours d'eau" destiné à fournir des moyens pour financer les volets B des contrats de rivière sur la "restauration des rivières". La réponse à la dégradation des milieux s'exprimait alors en terme d'aménagement;

- **dès 1987, le 5^{ème} programme** met en avant les techniques végétales et la notion d'entretien des cours d'eau;
- **en 1992, le 6^{ème} programme** intègre les avancées conceptuelles (concept d'hydrosystème) en substituant la notion d'aménagement des cours d'eau à la restauration et mise en valeur des milieux aquatiques;
- **le 7^{ème} programme, le 8^{ème} programme ainsi que le SDAGE RMC de 1996**, élargissent encore le cadre de travail avec notamment le concept d'espace de mobilité et la prise en compte des zones humides dans les politiques de préservation et de restauration des milieux aquatiques.

Notons que la géodynamique fluviale, facteur de contrôle majeur de l'écologie des milieux aquatiques est bien identifiée comme telle par la directive cadre sur l'eau (DCE, 2000/60/CE). La DCE incite à agir sur cette composante pour atteindre les objectifs de bon état en 2015.

L'objet de la présente étude "bilan des opérations de restauration", est donc de poser un regard sur le "passé" pour mieux construire un avenir qui devrait voir une augmentation des opérations de préservation et de restauration physique des milieux aquatiques. L'idée de fond de ce travail n'a pas été de juger les travaux réalisés par le passé, mais bien d'évaluer et d'analyser certaines opérations réalisées depuis une dizaine d'années afin d'intégrer ces retours d'expériences dans le futur SDAGE Rhône Méditerranée et le futur 9^{ème} programme d'intervention de l'Agence de l'Eau RM&C (2007-2012).

Il s'agit d'une approche en deux temps :

- **un retour d'expérience** sur une vingtaine d'opérations concrètes de restauration physique mises en œuvre sur le bassin RMC depuis une dizaine d'années;
- **l'élaboration des bases d'un outil d'aide à l'analyse des projets** à l'attention de l'Agence de l'Eau et des maîtres d'ouvrage éventuels de travaux de restauration.

Tant pour réaliser l'audit des opérations que pour élaborer l'outil d'aide à la décision, **l'utilisation d'approches typologiques** est nécessaire. L'élaboration de ces typologies fait l'objet de la première partie de ce document. Le retour d'expérience sur les sites de restauration analysés est présenté dans un second temps et est complété par quelques exemples "puisés" à l'étranger ou sur le territoire français mais hors bassin RMC. Une dernière partie propose les bases d'un outil d'aide à l'analyse des opérations de restauration à destination de l'agence.



Les travaux de restauration physique sélectionnés par cette étude touchent l'hydrologie (étiage et crue), le transport solide et la structure morphologique des lits majeur et mineur, mais ne concernent pas les travaux de restauration de la connectivité longitudinale des cours d'eau (passes à poissons par exemple), ni les travaux touchant uniquement la végétation (entretien, plantations, génie végétal).

De la même manière, la présente étude concerne la restauration de cours d'eau ayant subi des interventions anthropiques, sous forme de travaux divers ayant un impact avéré sur leur qualité physique. Il ne s'agit pas ici de traiter des actions anthropiques liées à certains usages (canoë, jet-ski, aviron, pêche, etc.), qui, si elles sont pratiquées en masse, peuvent également profondément altérer la qualité des cours d'eau.

2

APPROCHES TYPOLOGIQUES

Nous proposons une première typologie basée sur les principales catégories de dysfonctionnements physiques ayant conduit ou pouvant conduire à prendre une décision de restauration. Nous verrons ensuite que, selon le type géomorphologique de cours d'eau concerné, ces dysfonctionnements peuvent être précisément corrigés ou atténués par divers types de travaux.

2.1 TYPOLOGIE DES DYSFONCTIONNEMENTS A L'ORIGINE DES TRAVAUX DE RESTAURATION

Comme susmentionné, nous proposons ici une typologie des dysfonctionnements géomorphologiques et géodynamiques pouvant conduire à des travaux de restauration.

Cette typologie peut être déclinée selon deux compartiments :

- les dysfonctionnements observables à l'échelle du lit mineur/moyen;
- les dysfonctionnements observables à l'échelle du lit majeur.

2.1.1 Dysfonctionnement au sein du lit mineur

La typologie des dysfonctionnements au sein du lit mineur s'articule en 3 grandes "familles" ayant parfois des origines anthropiques différentes et pour lesquelles les "remèdes" seront aussi variés.

On peut également trouver une "logique" spatiale à la typologie présentée ci-dessous de manière hiérarchisée.

Ainsi, les dysfonctionnements de type « incision du lit » ont souvent une étendue spatiale très importante (plusieurs km voire dizaines de km) tandis que ceux liés à des protections de berges ou à une suppression de la végétation sont généralement beaucoup plus "localisés" :

- **dysfonctionnements liés à une incision du lit mineur;**
- **dysfonctionnements liés à une modification drastique des caractéristiques de l'écoulement et de la nature des berges;**
- **dysfonctionnements liés à une modification drastique des formations végétales riveraines.**

2.1.1.1 *Dysfonctionnements liés à une incision du lit mineur*

Causes anthropiques

Ce premier type de dysfonctionnement physique est généralement lié à l'une et/ou l'autre des trois grandes familles d'interventions impliquées dans la plupart des dysfonctionnements morpho-écologiques observés aujourd'hui sur les cours d'eau :

- **des barrages** en amont qui bloquent la charge sédimentaire de fond et conduisent à leur aval à une incision généralisée du lit mineur par reprise du stock alluvial disponible sur le fond du lit (érosion progressive). Ces ouvrages peuvent même conduire à de véritables métamorphoses fluviales (exemple de l'Isar ci-après où le tressage a été remplacé très rapidement par le méandrage suite à la construction d'un barrage. Le lit mineur s'est simultanément enfoncé de 2 m en moyenne lors de cette phase de métamorphose);
- **des extractions massives de granulats** en lit mineur (interdites en France depuis 1994); extractions sur le site d'exploitation, pouvant générer une érosion du lit, progressive à l'aval et régressive à l'amont. Même exploitées dans le lit majeur d'un cours d'eau, les extractions (ou anciennes extractions) de matériaux constituent un risque potentiel permanent de capture, générant les mêmes effets que ceux décrits ci-dessus (figure 1 ci-après);



Figure 1. Vues d'une capture de plan d'eau issue d'une ancienne extraction en lit majeur de la Moselle et abaissement très rapide du lit à l'amont (érosion régressive) (photos Biotec).

- dans une moindre mesure **des travaux de chenalisation** favorisant la concentration de l'écoulement en crue et donc les processus d'érosion du fond du lit;
- une cause supplémentaire vient parfois s'ajouter aux précédentes : **la modification de l'hydrologie de crue**. Ainsi par exemple, la réduction de la fréquence des crues morphogènes (Q1 à Q5) par un barrage écrêteur va permettre un développement important de la végétation arbustive puis arborée sur les bancs alluviaux, auparavant fréquemment remaniés. Cette végétalisation accentue la concentration de l'écoulement dans un chenal plus étroit et contribue à favoriser l'incision. De plus, elle empêche la remobilisation fréquente des alluvions grossières stockées sur les bancs du lit moyen et participe ainsi au déficit de charge sédimentaire en aval, donc à l'incision.

Impacts physiques et écologiques

L'incision du lit mineur peut conduire à plusieurs types de dysfonctionnements géomorphologiques et écologiques, non exclusifs les uns des autres :

- **changement complet de style fluvial** et notamment disparition du tressage au profit du méandrage (on parle alors de métamorphose fluviale). Les milieux naturels et les biocénoses liés au tressage disparaissent (figure 2 ci-après);

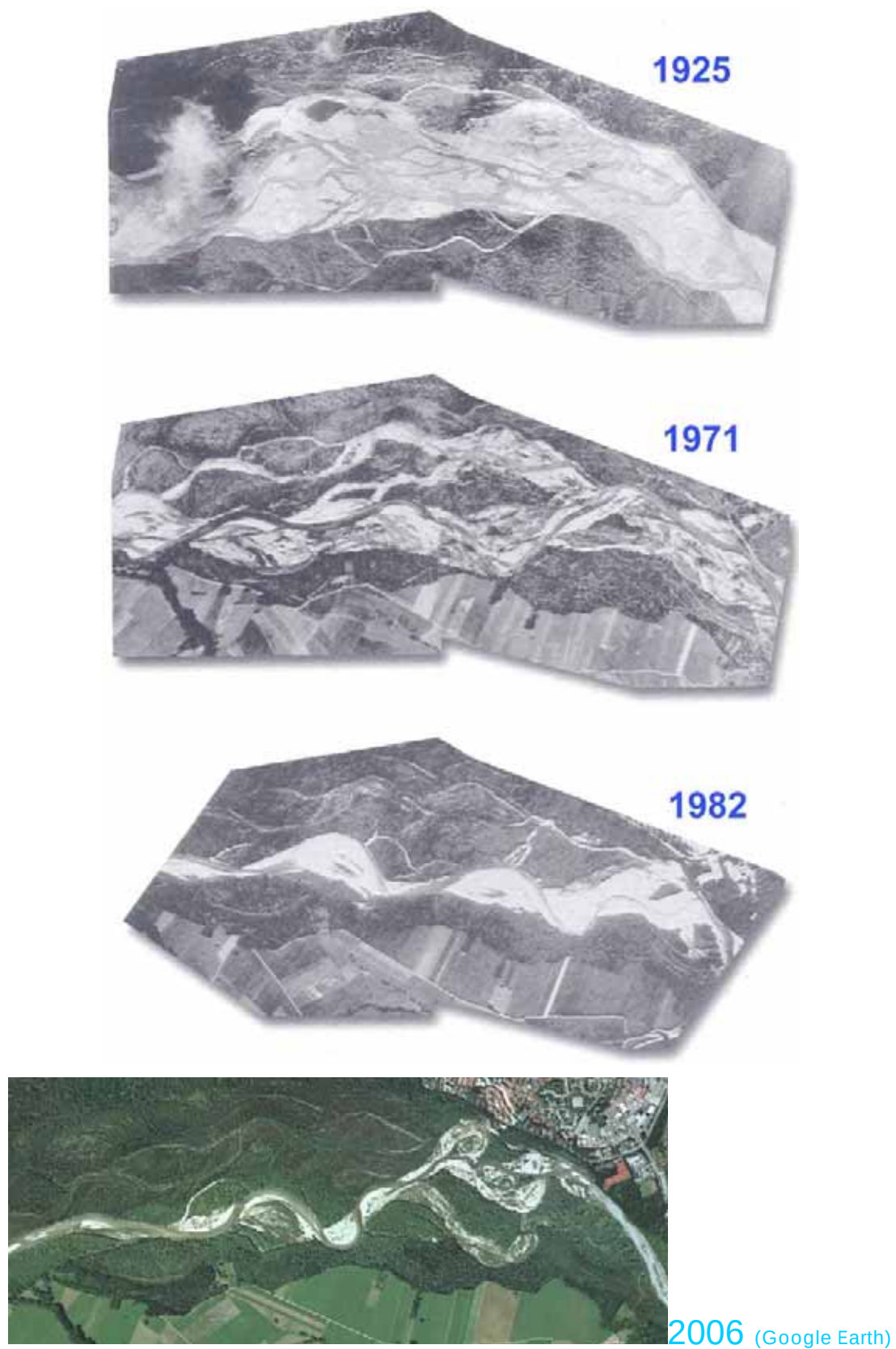


Figure 2. Métamorphose fluviale de l'Isar à Geretsried après la construction du barrage de Sylvenstein en 1959 (Source : A. Wagner, I. Wagner, 2002).

- **disparition du substrat alluvial** et remplacement de celui-ci par un affleurement généralisé du substratum sous jacent (la Loire Forézienne, l'Allier à Pont du Château, l'Ardèche à Aubenas, le Tarn en aval de Florac, la Garonne à Toulouse, etc.). **Les biocénoses aquatiques, pour la plupart inféodées à la présence d'un substrat alluvial, disparaissent.** Bien que cela ne soit pas encore totalement démontré, il semble que la disparition du substrat alluvial se traduise aussi par une réduction de la capacité autoépuration du cours d'eau;



Figure 3. Apparition du substratum rocheux (marnes oligocènes) sur l'Allier à gauche, la Loire au centre (photos Malavoi) puis sur l'Ardèche à Aubenas à droite (photo Biotec).

- **abaissement du niveau de la nappe alluviale** et dépérissement des milieux naturels liés à la présence d'une nappe haute. Remplacement des bois tendres de la ripisylve par des bois durs beaucoup moins représentatifs des milieux alluviaux, voire des essences néophytes beaucoup moins exigeantes en besoins hydriques (voir § impacts sur le lit majeur);
- l'incision du lit mineur peut également engendrer un dysfonctionnement géomorphologique supplémentaire représenté par une **érosion accrue des berges**. En effet, des glissements importants de talus peuvent être favorisés, pouvant suivant les cas représenter un plus en alimentant la charge solide du cours d'eau, mais bien souvent un effet négatif, avec un impact sur les risques d'inondations, la mise en suspension soudaine d'une grande quantité d'éléments fins, etc.

2.1.1.2 *Dysfonctionnements liés à une modification drastique des caractéristiques de l'écoulement et de la nature des berges*

Dans cette famille sont regroupés tous les dysfonctionnements se traduisant par une modification importante des conditions hydrodynamiques locales (vitesse, hauteurs d'eau) ainsi que des substrats. Ces trois paramètres sont souvent considérés comme les principaux descripteurs des **"habitats" aquatiques**. Nous y ajouterons aussi la disparition des **cachees et abris**, descripteurs secondaires importants, notamment vis à vis de la faune piscicole. Les protections de berges en génie civil sont incluses dans cette catégorie.

Les dysfonctionnements relevant de cette catégorie générale peuvent être déclinés en sous-catégories, plus ou moins redondantes entre elles :

- **modification des faciès d'écoulement** : généralement homogénéisation et simplification;
- **modification des vitesses et des profondeurs** : généralement réduction des vitesses et des profondeurs en étiage et augmentation en crue. Les conditions deviennent alors critiques pour les biocénoses;
- **réduction du linéaire de cours d'eau**;
- **remplacement des berges naturelles par des protections en enrochements, béton, palplanches, etc.**



Figure 4. Illustrations de berges artificielles inadaptées : murs en enrochements, palissades en bois, perrés bétonnés, etc. (photos Biotec).

Causes anthropiques

La plupart des dysfonctionnements évoqués ci-dessus relèvent de travaux de chenalisation (Wasson et al., 1998). La réduction du linéaire de cours d'eau, et par conséquent la réduction directe et immédiate de la "quantité d'habitat disponible" est liée à un type particulier mais très fréquent de chenalisation : le **rescindement** des méandres.

On peut ajouter aussi l'effet d'ouvrages transversaux tels que seuils et barrages qui se traduisent à leur amont par des faciès généralement lents et profonds en lieu et place des séquences naturelles de faciès d'écoulement (radiers, plats, mouilles etc., Malavoi, 1989).



Figure 5. Illustrations d'une succession de plans d'eau sur la Corrèze dans sa traversée de Tulle (photos Biotec).

Exemples de modifications des caractéristiques de l'écoulement liées à la chenalisation

La chenalisation des cours d'eau, initiée en France et plus généralement en Europe depuis plusieurs siècles mais accélérée au cours de la deuxième moitié du 20ème, avait généralement pour objectif principal, si ce n'est unique, la réduction locale de la fréquence, de la durée et de l'intensité des inondations. Dans les zones urbaines, cette chenalisation a été à juste titre motivée par la réduction des risques pour les populations. Elle a été justifiée par des **objectifs uniquement agricoles en zone rurale**, sur des dizaines de milliers de kilomètres : réduire la fréquence de submersion des terres cultivées (maïs) et faciliter l'exploitation des parcelles.

Les principaux types de travaux de chenalisation sont : le recalibrage, la rectification du tracé ou rescindement ainsi que l'endiguement.

Dans certains pays européens (Allemagne, Suisse, Pays bas, etc.), on a pu recenser (fréquemment) des cas extrêmes de chenalisation, en zone totalement rurale, avec le bétonnage systématique des berges et du fond et parfois même la **couverture complète du cours d'eau**.

- **Le recalibrage** : augmentation du gabarit du cours d'eau afin de permettre le transit sans débordement d'une crue de projet (souvent quinquennale à décennale en zone rurale et cinquantennale à bi-centennale en zone urbaine).

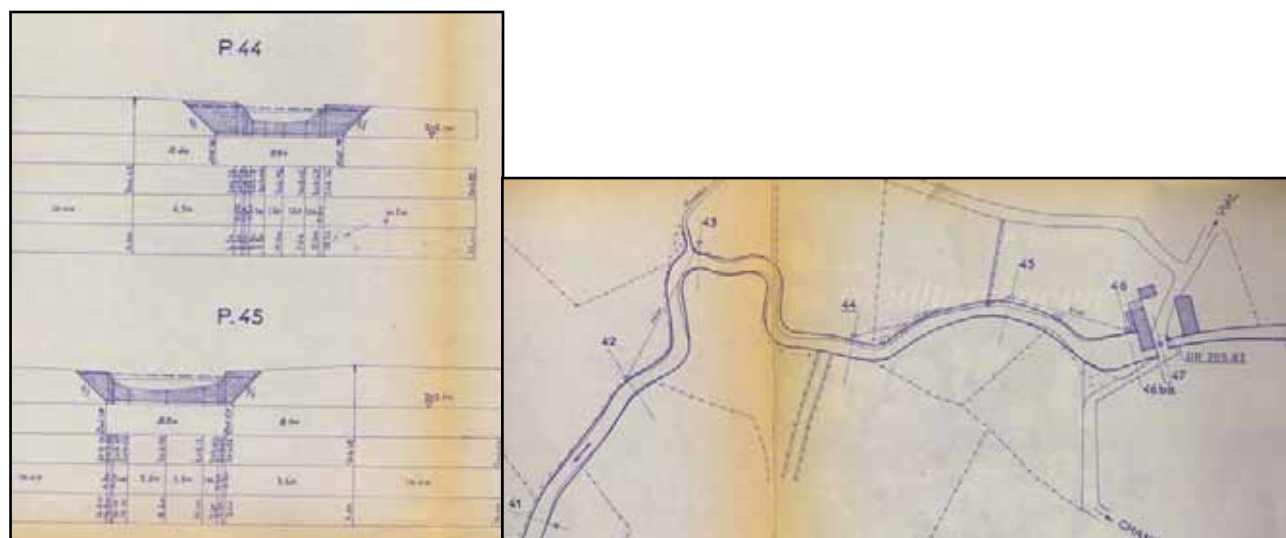


Figure 6. Exemple d'un avant projet de recalibrage de cours d'eau (Source : avant Projet DDA 01, 1969).

- **La rectification ou le rescindement** : recouplement des méandres et des sinuosités afin d'accélérer le passage de la crue et/ou de faciliter l'exploitation des parcelles (travaux souvent réalisés à l'occasion de remembrements).
Sur les cours d'eau navigables ou flottables, de nombreux rescindements avaient pour objectif l'amélioration de la navigation ou du flottage du bois.



Figure 7. Exemple de rescindement de méandres sur l'Orain (photo Luc Terraz).



Figure 8. Exemple d'avant projet de rescindement de méandres sur la Loue et tracé actuel. (Source : DDE 39 et IGN in Malavoi, 2006).

Un cas extrême de rectification de tracé, mais néanmoins assez courant, est lié au déplacement complet du cours d'eau au-delà de son talweg naturel.

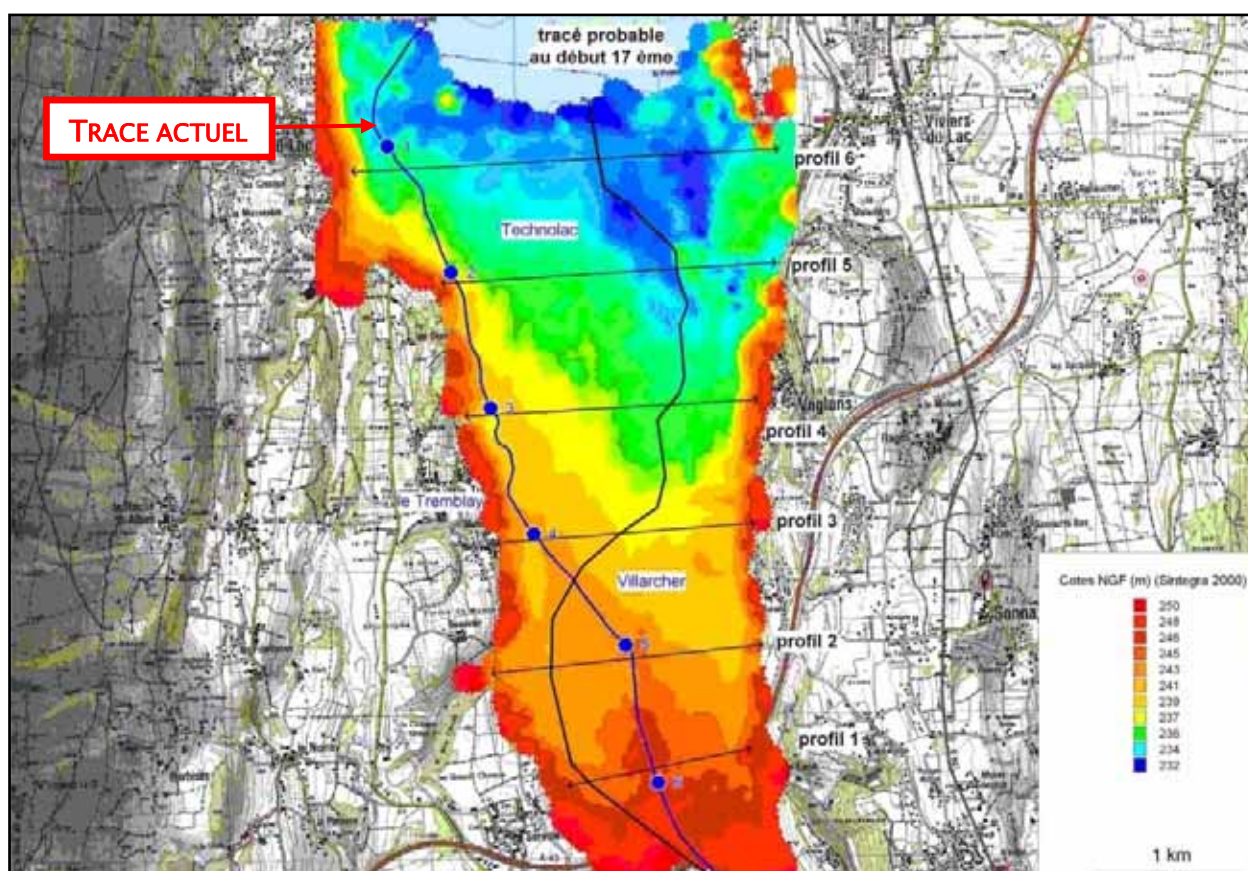


Figure 9. Illustration de la topographie de la basse vallée de la Lysse par rapport au tracé actuel du cours d'eau (étude Biotec/Hydrolac/Malavoi; 2005).

- **L'endiguement** plus ou moins étroit du lit mineur, souvent associé à une rectification du tracé.



Figure 10. Exemples de cours d'eau recalibrés, rectifiés et endigués (voire bétonnés); photo de gauche l'Aire dans le canton de Genève en Suisse et photo de droite l'Ouche en aval de Dijon (photos Malavoi).

Exemples de modifications des caractéristiques de l'écoulement liées à la présence d'ouvrages transversaux (seuils, barrages)

Ce type d'action anthropique a un effet encore plus immédiat et facilement identifiable que la chenalisation sur la simplification des faciès d'écoulement. Le constat est simple bien que non encore chiffré précisément : des dizaines de milliers de kilomètres de cours d'eau sont sous l'influence directe de seuils ou barrages qui se traduisent par une altération des faciès d'écoulement à leur amont. On parle "d'effet plan d'eau" ou "effet retenue" (Malavoi, Area, 2003).

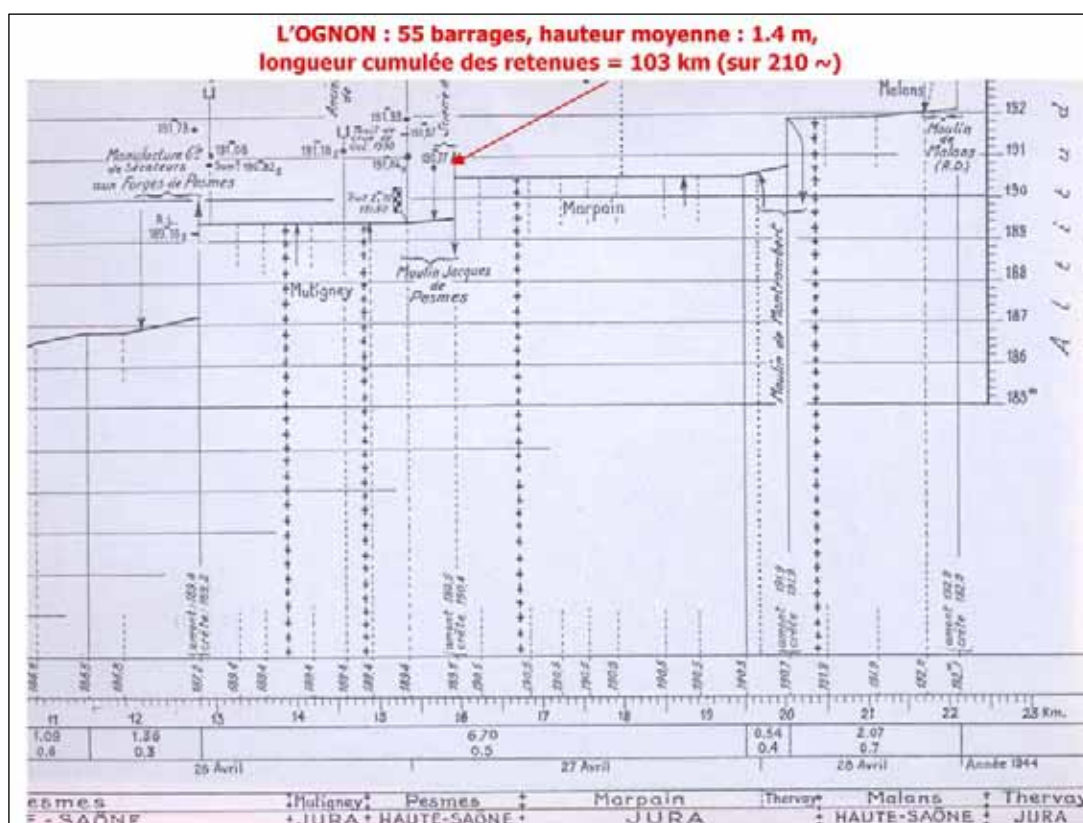


Figure 11. Extrait du profil en long IGN de l'Ognon et comparaison entre une portion naturelle (faciès variés, radiers, plats, mouilles) et une portion sous l'effet d'un seuil (chenal lentique sur 1 km) (photos Malavoi).

Impacts physiques et écologiques

La plupart des travaux de chenalisation ainsi que les ouvrages transversaux, se traduisent par une simplification des écoulements (faciès) et par conséquent des **habitats aquatiques**. Cette homogénéisation des faciès se convertit quasi-directement en une simplification des biocénoses aquatiques, c'est à dire en une **chute drastique de la biodiversité**. Parallèlement, une **chute sévère des biomasses** est généralement identifiée.

Le fait que le compartiment "habitat" soit le premier et le plus visiblement touché par ce type de travaux explique pourquoi la plupart des opérations de restauration se concentrent généralement sur la remise en état de ce compartiment.

Impacts physiques et écologiques liés à la chenalisation

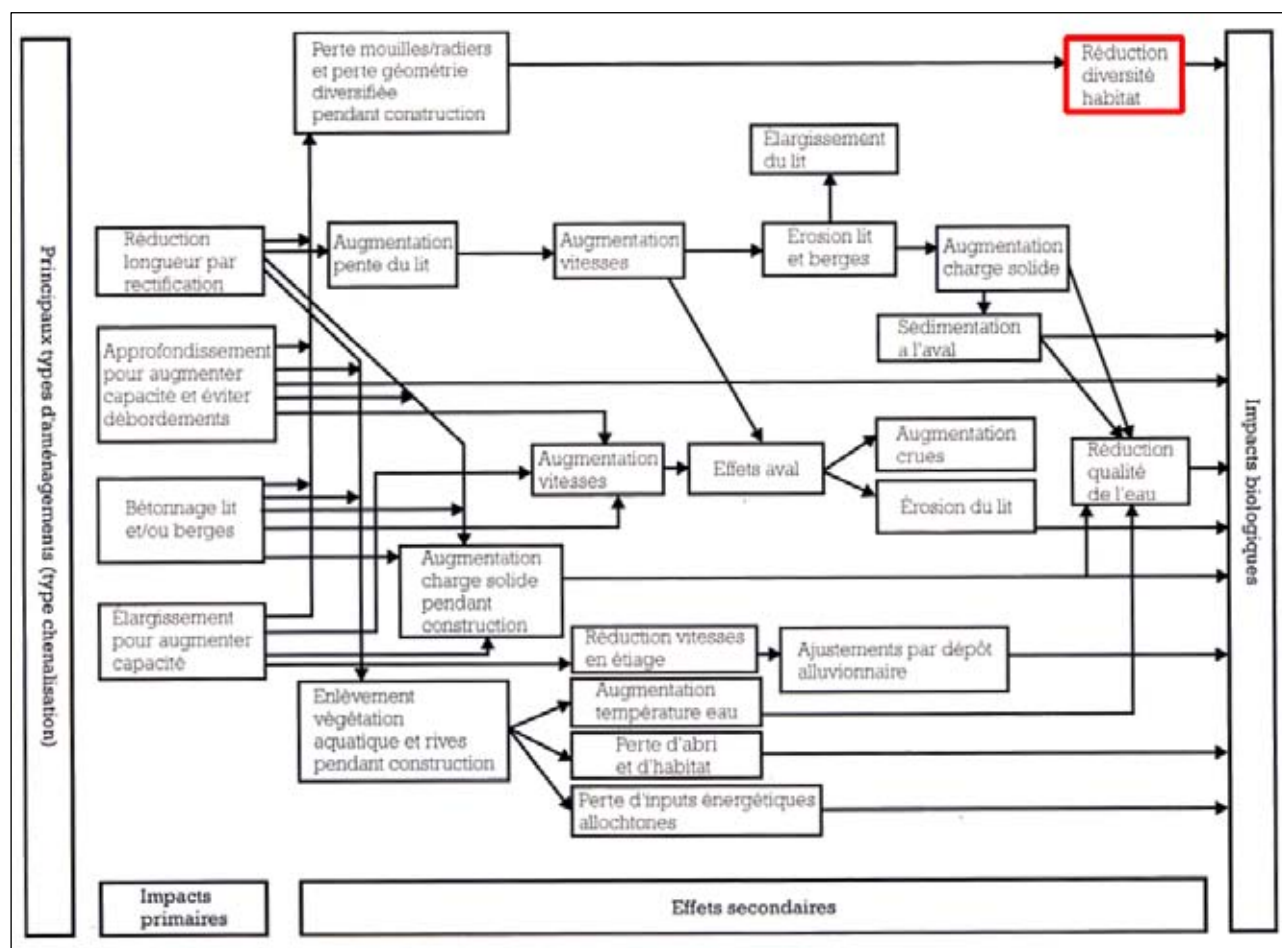


Figure 12. Synthèse des impacts géomorphologiques de la chenalisation (Wasson et al., 1998).

Rivières	Références bibliographiques	Temps écoulé depuis la chenalisation	Observations
Petits cours d'eau du Kansas	HUGGINS et al. (1974)	2 ans	Aucune différence significative n'apparaît entre les stations chenalisées et non chenalisées
Rivière de basse énergie de l'Iowa	SCARNECCHIA (1988)	5 ans	Réduction de 30% de la richesse spécifique des peuplements de poissons
Rivières du nord du Missouri	CONGDOM (1986)		Diminution de 61% du nombre d'espèces de poissons, de 82% de la productivité et de 86% de la croissance de poissons exploitables
Cours d'eau de basse énergie du Mississippi et Alabama	ARNER et al. (1976)	3 ans	Densité de plancton en moyenne 2 fois plus importante dans la portion chenalisée ; la diversité diminuée. La diversité des macroinvertébrés est de 70% inférieur. Modification de la nature des peuplements piscicoles
		52 ans	Densité de plancton en moyenne 2 fois moins importante dans la portion chenalisée et la diversité diminuée. Diminution de 50% de la diversité des macroinvertébrés et de 80 % de la biomasse piscicole et modification de la nature du peuplement.
Cours d'eau du Nord de la Caroline	TARPLEE et al. (1971)		La biomasse de poissons représente 32% de celle de la station témoin. Réduction de 75% du nombre de poissons pêchables, et de 79 % en volume et 28 % en richesse spécifique pour les invertébrés.
Rivière de faible énergie de l'Ontario	PORTT et al. (1986)	12 ans	Chute de 50 % de la densité et de 76 % de la biomasse de poissons. Le poids moyen des individus est 2 fois moins important.
Yankee Fork, Idaho Caroline du Nord	BROOKES (1988)	30 ans	97% moins productive que les sections naturelles (même cours d'eau)
		40 ans	Population de poissons 80% en dessous du niveau normal
Blackwater River, Missouri		50 ans	Production de poissons réduite de 77%
South Fork, Coeur d'Alene River		77 ans	Production de poissons réduite de 99%
Portneuf River, Idaho		86 ans	Production de poissons réduite de 83%

Figure 13. Exemples quantitatifs d'impacts écologiques liés à des travaux de chenalisation (in Wasson et al., 1998). Noter les réductions énormes de la diversité d'invertébrés et de la biomasse piscicole.

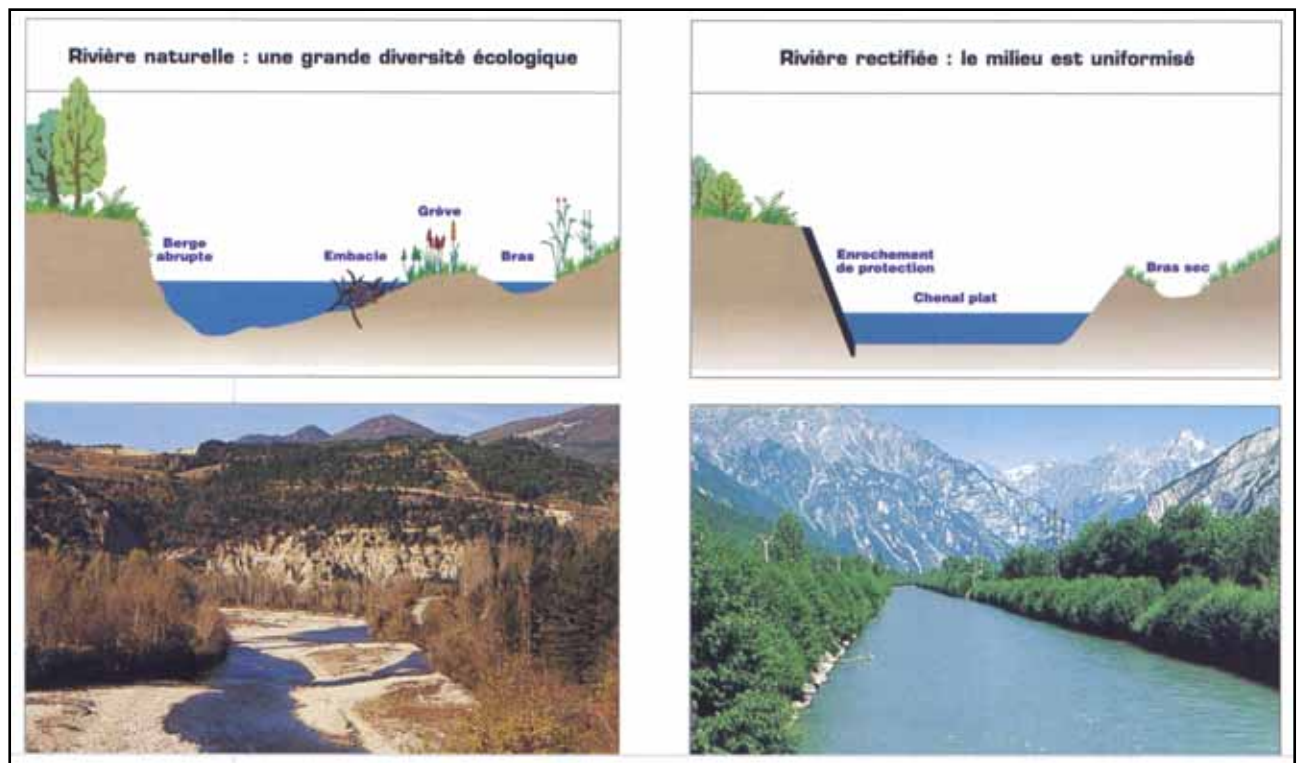


Figure 14. Exemple des effets de la chenalisation sur la simplification des caractéristiques géomorphologiques des cours d'eau et par conséquent des habitats aquatiques et rivulaires (in Malavoi et al., 1998).

Impacts physiques et écologiques liés aux seuils et barrages

Une étude récente a permis de faire le point sur les impacts physiques et écologiques des seuils¹ en rivière (Malavoi, Area, 2003). Hormis les aspects liés au franchissement, qui ne sont pas l'objet de cette étude, les seuils en rivière, quel que soit leur objectif initial (dérivation pour la force hydraulique ou l'irrigation, stabilisation du fond), ont des impacts extrêmement importants.

Ces impacts peuvent être déclinés en 3 grandes catégories :

- ils modifient les **flux** liquides, solides, biologiques;
- ils ont un effet **retenue**;
- ils ont un effet "**point dur**". Ces impacts sont présentés ci-dessous sous forme de schémas synthétiques.

¹ Par seuil, on définit ici tout barrage ou ouvrage transversal au cours d'eau dont la hauteur de chute est inférieure ou égale à 5 mètres.

Effets flux

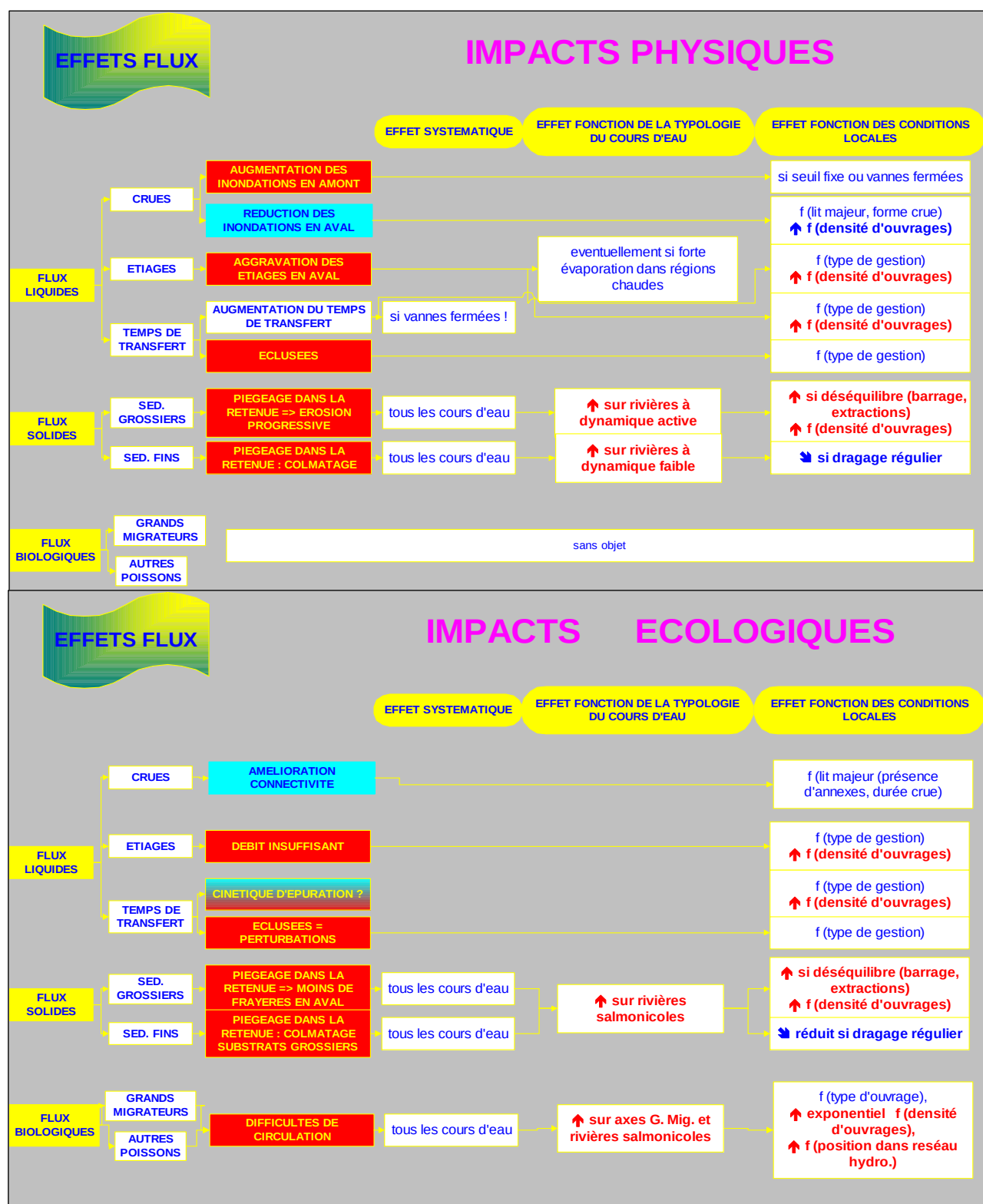


Figure 15. Effets flux : impacts physiques et écologiques des seuils et barrages (Malavoi, Area, 2003). En bleu apparaissent les effets potentiellement positifs.

Effets retenue

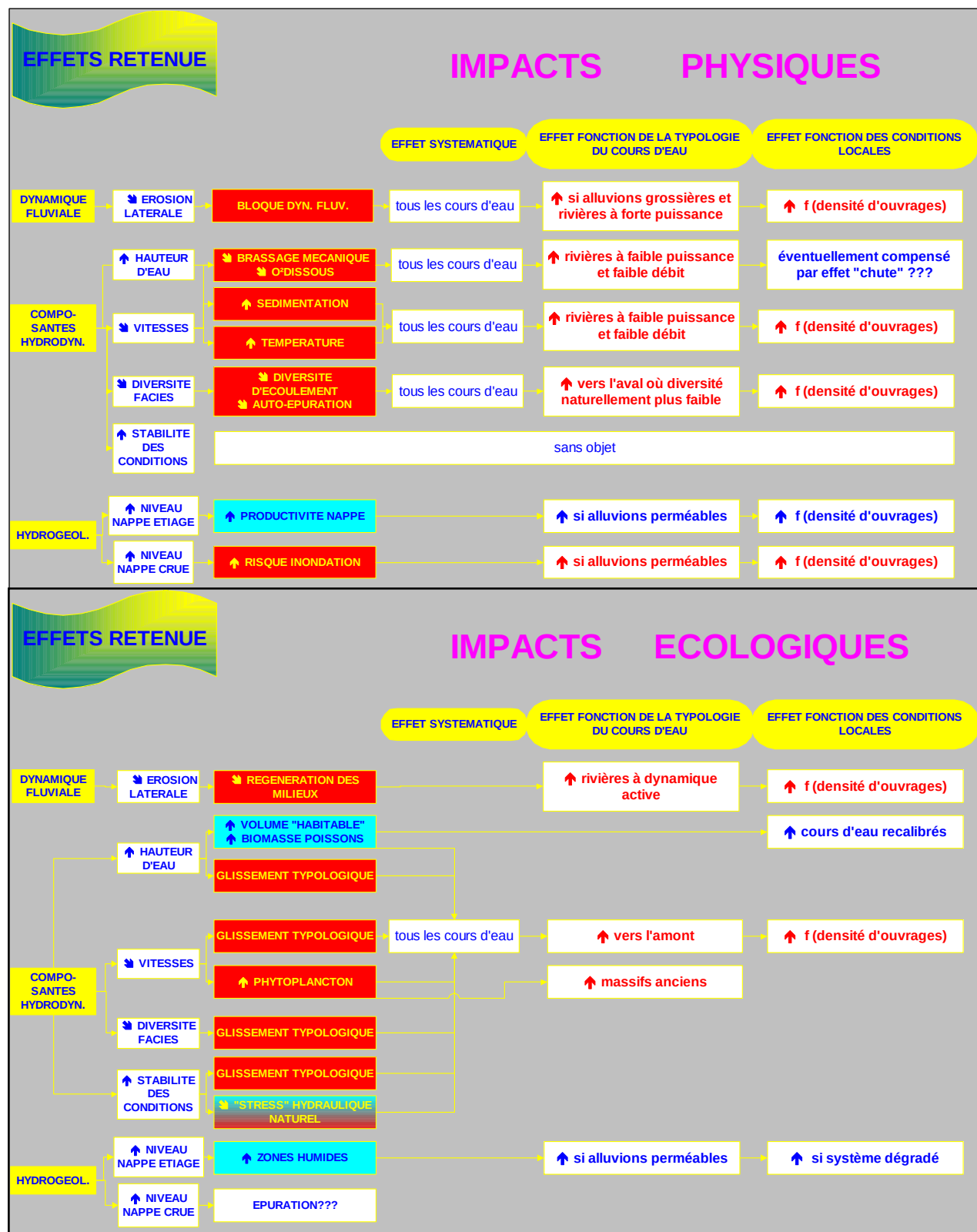


Figure 16. Effets retenue : impacts physiques et écologiques des seuils et barrages (Malavoi, Area, 2003). En bleu apparaissent les effets potentiellement positifs.

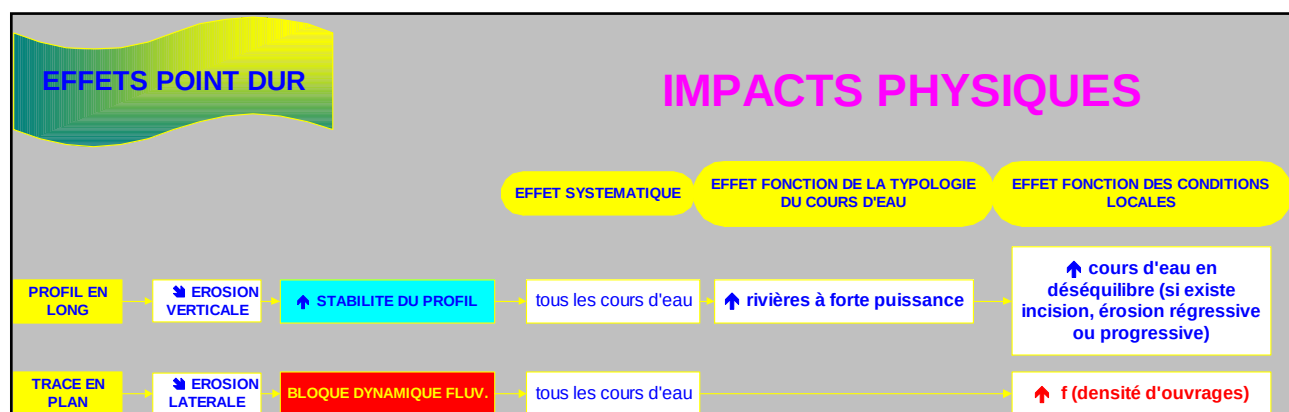
Effets point dur

Figure 17. Effets point dur : impacts physiques des seuils et barrages (Malavoi, Area, 2003). En bleu apparaissent les effets potentiellement positifs.

Il sera vu par la suite que le seul type de restauration véritablement efficace vis à vis des impacts des seuils est la suppression totale (arasement) ou à défaut partielle (dérasement) de l'ouvrage.

2.1.1.3 *Dysfonctionnements liés à une modification drastique des formations végétales riveraines*

Causes anthropiques

Ce type de dysfonctionnement accompagne parfois les précédents et particulièrement les travaux de chenalisation. Il n'est pas rare en effet, au moins en phase travaux, que la végétation des berges soit partiellement ou intégralement supprimée sur l'une ou les deux berges. Mais la suppression totale ou partielle des formations végétales riveraines peut aussi être tout simplement liée à des interventions plus ou moins fréquentes des riverains agriculteurs (les non agriculteurs ne suppriment généralement pas la végétation), voire des organismes gestionnaires (syndicats, collectivités locales, etc.).



Figure 18. Exemple de portions de cours d'eau sans végétation riveraine (photos Thévenet).

Pour décrire brièvement les impacts physiques et écologiques de la suppression des formations végétales riveraines, il est utile de rappeler les principales fonctions que celles-ci assurent en bordure de cours d'eau, donc indirectement les manques, lorsqu'elles sont supprimées :

- **Située à l'interface entre les milieux terrestres et aquatiques, la végétation rivulaire joue un rôle très important au sein des écosystèmes d'eau courante.** Les formations végétales riveraines sont essentielles pour beaucoup d'organismes vivants, notamment les mammifères, amphibiens, oiseaux, poissons, etc. En effet, la faune trouve dans cette mosaïque végétale des conditions favorables pour se cacher, se nourrir et se reproduire. La végétation rivulaire joue également un rôle de "corridor", exprimé par un cordon assurant une continuité entre des milieux souvent fragmentés, facilitant les échanges et les déplacements entre les différentes communautés animales.
- **Les racines des arbres, les troncs tombés dans l'eau, les débris végétaux (ou embâcles) créent une diversité d'habitats favorable à la faune aquatique,** en faisant office successivement de lieux de cache, de supports de ponte ou de source de nourriture pour de nombreux poissons et invertébrés.
- **La végétation des berges, en procurant de l'ombre au-dessus des eaux, permet également de maintenir une température des eaux fraîche,** ceci à la fois pour les bords du fleuve et surtout pour des milieux annexes tels que mares, bras morts, dépression marécageuse, etc. Une température des eaux élevée diminue la solubilité de l'oxygène dans l'eau, ce qui risque de provoquer une augmentation des affections virales ou bactériennes, indirectement une hausse de la mortalité des poissons.

- **Les formations végétales riveraines produisent de l'ombre au-dessus des eaux**, c'est-à-dire régulent la quantité de lumière qui pénètre en bordure de cours d'eau. A long terme, un surcroît de lumière peut être source de sur-développement d'algues aquatiques et d'eutrophisation du milieu, néfaste à la vie des organismes vivants.
- **Les formations végétales riveraines assurent un apport constant en matière organique** (végétale et animale), assurant l'échelle trophique (feuilles mortes, insectes tombant des arbres, etc.). De plus, beaucoup d'insectes ont besoin des tiges de la végétation riveraine pour se développer (éphémères, libellules, etc.).
- **Les formations végétales riveraines participent à l'élimination de pollutions diffuses**, en réduisant la teneur des eaux en nitrates et phosphates et en diminuant la concentration en pesticides.
- **Indépendamment de ces fonctions écologiques vitales pour le maintien de la biodiversité, la végétation rivulaire joue d'autres rôles ou procure d'autres avantages**, tels que le maintien des sols en place face à l'érosion, une fonction régulatrice du cycle hydrologique, un effet brise-vent ou encore des fonctions paysagères ou récréatives.

Le maintien des sols en place par une végétation adaptée des berges s'opère principalement par les deux effets mécaniques suivants :

- **Stabilisation du sol efficace en profondeur** grâce à la combinaison et l'interaction de végétaux, au développement racinaire à la fois dense, profond et traçant.



Figure 19.

A gauche, racines d'aulne glutineux (*Alnus glutinosa*), espèce végétale particulièrement adaptée aux bordures de cours d'eau.

A droite, embâcles formés par des cultivars de peupliers (*Populus x nigra*) facilement déchaussés en raison de leur faible développement racinaire d'une part et de leur port élevé d'autre part, favorisant une grande prise aux vents (photos Biotec).

- **Protection du sol en surface**, par la densité des tiges aériennes produites et la souplesse de ces dernières face aux contraintes hydrauliques.



Figure 20.

Effet de "peigne" de la végétation buissonnante adaptée à droite, favorisant le piégeage des particules en transport par les eaux et végétaux hélophytiques couchés sous l'effet des contraintes hydrauliques à gauche (photos Biotec).



ATTENTION : la végétalisation des bancs sédimentaires a pour effet de limiter la fréquence de mise en mouvement des alluvions. Cet effet peut devenir pénalisant lorsque le régime hydrologique de crue est modifié ou lorsque une période de faible hydraulité dure plus de 5 ans. Dans ce cas la sur-végétalisation peut induire une accentuation de l'incision locale et le piégeage des alluvions un déficit sédimentaire à l'aval. La végétalisation des bancs alluviaux est donc un processus à surveiller avec attention.

- **L'eau, de par sa nature, a toujours été un élément de modelage des formes du paysage.** Par sa présence, elle rend les sites plus attrayants, augmente la valeur récréative de ces secteurs et contribue globalement à la richesse économique et culturelle d'une région. La végétation rivulaire tient évidemment une place prépondérante dans la perception du paysage des milieux humides.



Figure 21. La végétation rivulaire et aquatique tient évidemment une place prépondérante dans la perception des paysages fluviaux (photos Biotec).

Lorsque l'absence de végétation riveraine se cumule avec une chenalisation, une incision du lit ou encore une retenue de seuil, les effets négatifs de ces interventions sont encore accentués.

2.1.2 Dysfonctionnements au sein du lit majeur

On peut identifier deux grands types de dysfonctionnements morpho-écologiques à l'échelle du lit majeur :

- **une déconnexion totale ou partielle avec le lit mineur.** Cette déconnexion peut toucher uniquement la plaine alluviale mais aussi les annexes hydrauliques (bras morts, noues, lônes, marais, etc.);
- **un "assèchement" ou une réduction de l'hydromorphie des sols des milieux humides du lit majeur.**

2.1.2.1 *Déconnexion lit mineur/lit majeur*

Causes anthropiques

Deux principaux types d'intervention peuvent aboutir à ce type de dysfonctionnement :

- **un endiguement plus ou moins étroit du lit mineur** pour contenir les eaux de débordement dans un espace restreint;
- **une incision du lit mineur** suite à des travaux de chenalisation (dont l'endiguement), à des extractions ou à un piégeage des alluvions en amont.



Figure 22. Exemples de lits majeurs déconnectés de leur lit mineur sous l'effet d'une chenalisation couplée à un endiguement (photos Malavoi).

Impacts physiques et écologiques

Ces déconnexions ont des caractéristiques très variables selon les cours d'eau et les interventions subies :

- elles peuvent être **permanentes** : plus aucune connexion n'existe quel que soit le niveau atteint par les crues;
- elles peuvent être **temporaires** ou se traduire « seulement » par une moindre fréquence de connexion : par exemple, les connexions qui avaient lieu au moins une fois par an ou une fois tous les 2 ans, ne se font plus que tous les 5 ans, tous les 10 ans, etc.

Selon l'intensité de ces "déconnexions", les impacts sur les milieux naturels sont plus ou moins importants et plus ou moins réversibles.

D'une manière générale la déconnexion du lit majeur de son lit mineur se traduit par :

- un appauvrissement des milieux naturels du lit majeur lié à une absence de submersion fréquente;
- un appauvrissement des biocénoses terrestres associées;
- un appauvrissement de certains compartiments des biocénoses aquatiques dont une partie du cycle de développement est lié à ces connexions (notamment la reproduction pour certaines espèces de poissons).

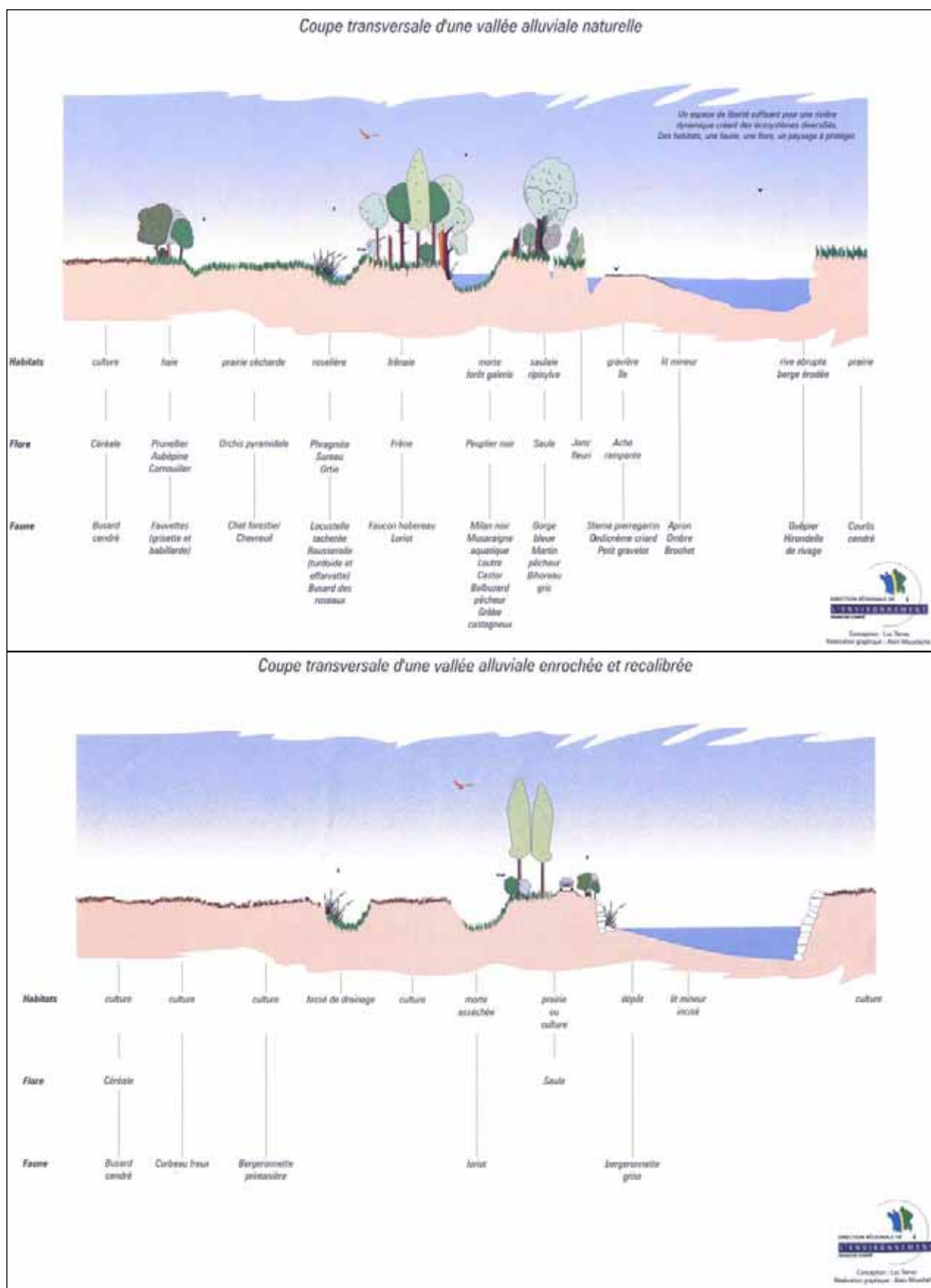


Figure 23. Exemple d'impacts de la chenalisation ou de l'incision sur les connexions lit majeur/lit mineur et les milieux naturels associés (L. Terraz).

2.1.2.2 *Assèchement des milieux naturels humides du lit majeur*

Indépendamment des processus de connexion hydraulique entre le lit mineur et son lit majeur, un dysfonctionnement important peut parfois être observé : l'assèchement des milieux humides du lit majeur.

Causes anthropiques

Ce sont souvent les mêmes que celles qui conduisent à la déconnexion mais c'est tout particulièrement l'incision du lit mineur dont les effets négatifs sont les plus importants.

Notons aussi le rôle important du drainage agricole en fond de vallée dont il faudra tenir compte dans une optique de restauration des zones humides du lit majeur.

Impacts physiques et écologiques

Cette incision, le plus souvent celle liée aux anciennes extractions en lit mineur, se traduit généralement par un abaissement corrélatif de la nappe alluviale d'accompagnement.

L'abaissement de la nappe est proportionnel au niveau d'incision du lit mineur. Il se transcrit par :

- une déconnexion du lit mineur de ses annexes hydrauliques (voir § précédent);
- un remplacement des espèces végétales liées à une nappe haute (bois tendres, frênaie, aulnaie) par des espèces à bois durs beaucoup plus ubiquistes et donc moins typiques des milieux alluviaux (chênaie notamment), voire néophytes (buddlejas, ailantes, etc.);
- une disparition des zones humides liées à une nappe haute au profit de milieux plus secs.

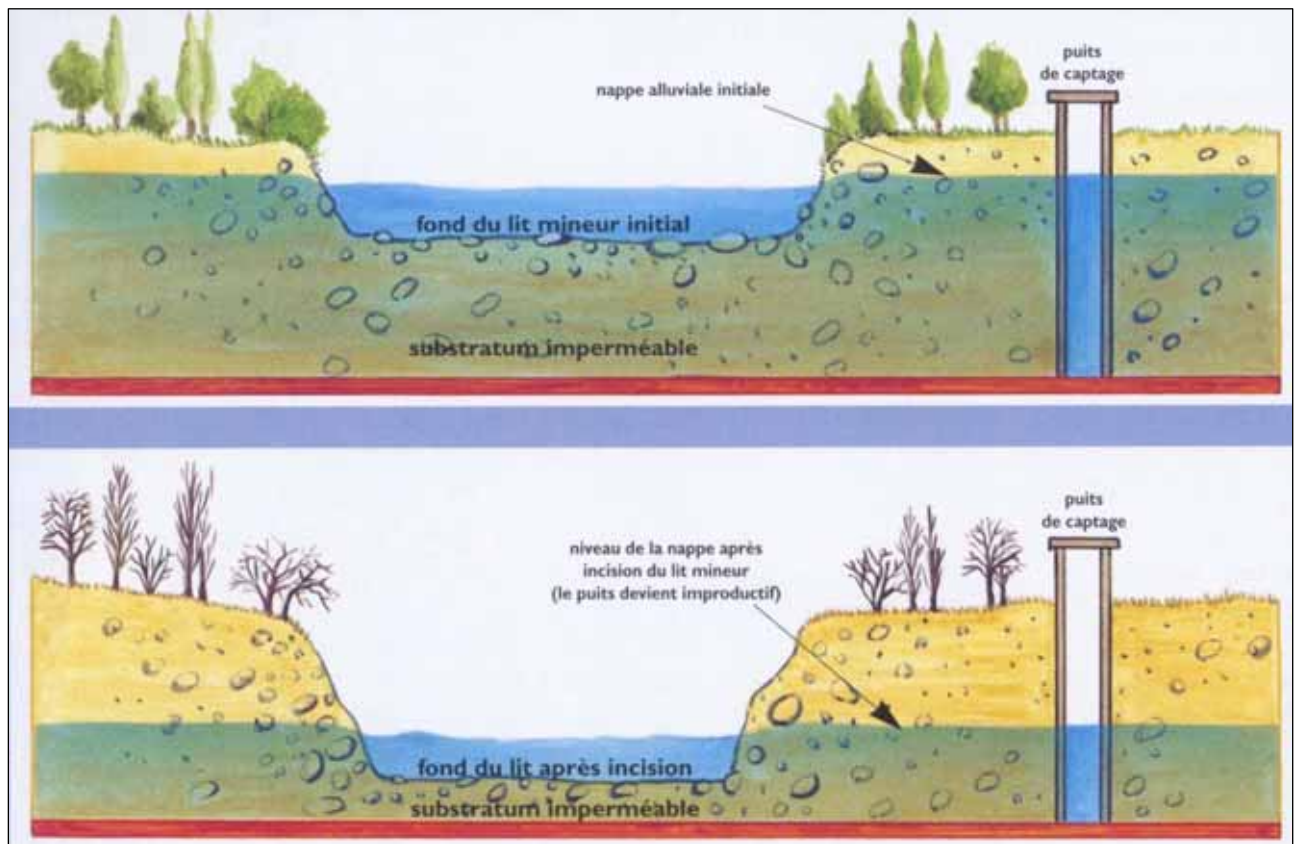


Figure 24. Exemple d'effets de l'incision sur les milieux naturels du lit majeur (Malavoi, In Bouchardy et al., 2002)

2.2 TYPOLOGIE DES COURS D'EAU

Les dysfonctionnements présentés ci-dessus ont des effets plus ou moins intenses et plus ou moins réversibles selon le « type » de cours d'eau sur lequel ils se manifestent.

La possibilité de les résorber voire de les supprimer sera en grande partie, elle aussi, fonction du type de cours d'eau.

Il existe de très nombreuses "typologies" de cours d'eau en France, en Europe et dans le monde. L'objectif n'est pas ici de les détailler mais de déterminer celle qui serait **la plus pertinente vis à vis de la mise en œuvre d'opérations de restauration de cours d'eau.**

2.2.1 Typologie hydroécorégionale

Cette approche typologique proposée par le Cemagref (2002) et servant de base à la définition des masses d'eau au sens de la DCE, est basée sur le postulat suivant : *"dans une même hydroécorégion, dont les limites sont déterminées par 3 variables de contrôle majeures : la géologie, le relief et le climat, les cours d'eau de même rang (ordination de Strahler) doivent présenter sensiblement le même fonctionnement physique et écologique"*.

Ont donc été définies à l'échelle de la France deux niveaux d'hydroécorégion (Cemagref, 2002) :

- les hydroécorégions de niveau 1 (HER1), basées sur de grandes entités géologiques et physiographiques;
- les hydroécorégions de niveau 2 (HER2), subdivisions des précédentes et basées sur des entités géologiques et physiographiques plus fines.

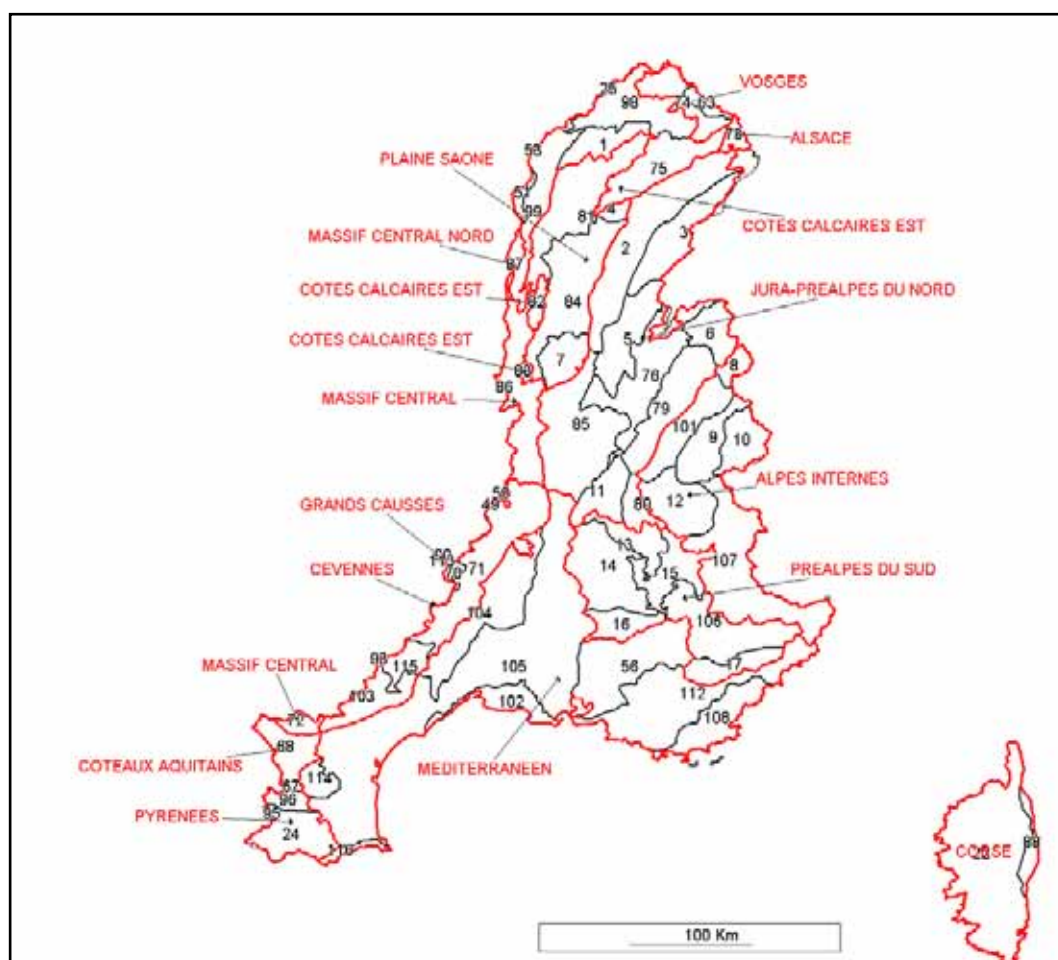


Figure 25. Les hydroécocorégions du bassin RMC. En rouge les HER1, en noir les HER2 (Cemagref, 2002).

Sur le bassin RMC, la répartition des cours d'eau dans ces 2 hydroécocorégions est présentée sur les figures suivantes.

	longueur (Km)	% du linéaire total
6 - MEDITERRANEEN	20483	24
5 - JURA-PREALPES DU NORD	12510	15
2 - ALPES INTERNES	9783	12
7 - PREALPES DU SUD	8674	10
16 - CORSE	8567	10
8 - CEVENNES	7434	9
15 - PLAINE SAONE	5526	7
10 - COTES CALCAIRES EST	3751	4
3 - MASSIF CENTRAL	2629	3
1 - PYRENEES	2071	2
14 - COTE AUX AQUITAINE	1319	2
4 - VOSGES	1078	1
18 - ALSACE	240	0
21 - MASSIF CENTRAL NORD	148	0
19 - GRANDS CAUSSES	8	0
total	84221	

Figure 26. Linéaires de cours d'eau dans les HER1 (sur la base des données Cemagref, 2002).

	longueur (Km)	% du linéaire total
105 - Plaine mediterraneenne	10064	12
22 - Corse	7898	9
71 - Cevennes	4768	6
107 - Alpes Internes du Sud	3620	4
104 - Garrigues sub cevenoles	2905	3
85 - Collines du Bas Dauphine	2771	3
14 - Prealpes dromois Baronnies	2650	3
84 - Bresse	2547	3
106 - Prealpes Digne Haute vallee du Var	2511	3
112 - Collines calcaires de basse provence	2345	3
76 - Piedmont Alpes Jura	2271	3
56 - Collines de Basses Provenances	2224	3
81 - Plaine de Bourgogne	2155	3
79 - Massifs Calcaires Chartreuse Aravis	2105	2
86 - Mont du Lyonnais - Pilat	2099	2
103 - Montagne Noire Climat cUvenol	1964	2
108 - Maures Esterel	1902	2
12 - Massif de l'Oisans	1730	2
2 - Jura premier plateau	1688	2
98 - Collines sous-Vosgiennes	1619	2
24 - Pyrenees orientales	1610	2
15 - Gapençais Embrunais	1610	2
9 - Massif Schisteux Maurienne Tarentaise	1555	2
101 - Massif Beaufortain Belledonne	1459	2
68 - Coteaux molassiques Est Aquitaine	1319	2
10 - Massif de la Vanoise	1121	1
5 - Jura sud	970	1
13 - Devoluy Vercors sud	879	1
6 - Massif Chablais Giffre	875	1
74 - Vosges greseuses	838	1
75 - Collines de Haute-Saone	811	1
114 - Corbieres	705	1
7 - Dombes	676	1
11 - Vercors nord	675	1
88 - Corse plaine d'Aleria	668	1
99 - Coes de Bourgogne	638	1
80 - Vallee du Drac	603	1
3 - Jura nord	553	1
17 - Plateaux calcaires de Provence	530	1
16 - Plateau calcaire de provence - Ventou	494	1
72 - Montagne noire	477	1
115 - Causses cevenoles	473	1
1 - Plateau calcaire haute Saone	317	0
8 - Massif du Mont Blanc	299	0
96 - Pyrenees Etage montagnard	298	0
116 - Bordure Orientale des Pyrenees	263	0
63 - Vosges granitiques	240	0
73 - Collines du Sundgau	240	0
70 - Haute Loire Cevenole	229	0
4 - Foret de Chaux	148	0
87 - Morvan - Charollais	148	0
82 - Cotes de Macon	129	0
51 - Bazois Auxois	123	0
67 - Bordure Pyreneenne Centrale	84	0
95 - Pyrenees Etage alpin et subalpin cent	79	0
83 - Beaujolais calcaire	78	0
102 - Plaine littorale mediterraneenne	75	0
50 - Hautes Terres Granitiques orientales	42	0
25 - Plateau lorrain	32	0
49 - Hautes Terres Volcaniques orientales-	11	0
113 - Grands Causses	8	0
53 - BP-Cotes calcaires	3	0

Figure 27. Linéaires de cours d'eau dans les HER2 (sur la base des données Cemagref, 2002).

D'un point de vue pratique vis à vis de la mise en œuvre d'une politique de restauration de cours d'eau sur le bassin RMC, cette typologie est actuellement assez difficile à utiliser en l'état dans la mesure où l'on n'a pas encore associé à ces HER 1 ou 2 les caractéristiques géodynamiques, par rang ou classe de rang, qui nous semblent être nécessaires à l'analyse de projets de restauration.

Ces caractéristiques sont *a minima* :

- la puissance spécifique², correspondant sommairement au produit de la pente X le débit, qui caractérise les potentialités dynamiques du cours d'eau;
- l'érodabilité des berges qui caractérise les possibilités d'érosion latérale;
- la présence d'une charge alluviale grossière qui est l'un des moteurs de la dynamique fluviale et l'un des composants majeurs des habitats aquatiques.

2.2.2 Typologie géodynamique fonctionnelle

Cette typologie géodynamique a pour objet de déterminer l'intensité de l'activité géodynamique actuelle ou potentielle du cours d'eau.

De celle-ci dépendent en grande partie :

- les caractéristiques géomorphologiques du cours d'eau : géométrie, substrats, intensité actuelle ou potentielle des processus d'érosion latérale, verticale et de transport solide;
- les caractéristiques écologiques globales;
- mais surtout, dans l'objectif qui est le nôtre aujourd'hui, les capacités d'ajustement géomorphologique suite à des travaux de restauration.

Notre postulat est le suivant :

- plus un cours d'eau est puissant;
- plus ses berges sont facilement érodables;
- plus son transport solide est intense.

² La puissance (Ω) est calculée comme suit : $\Omega = \gamma Q J$ (en watts/m)

La puissance spécifique (ω) est calculée comme suit : $\omega = \Omega / l$ (en watts/m²)

où γ est le poids volumique de l'eau (9810 N/m³), Q le débit (m³/s), J la pente de la ligne d'énergie en m/m, l la largeur du lit pour le débit utilisé (m)

- ⇒ meilleure sera la garantie de réponse positive du système;
- ⇒ plus rapides seront les résultats;
- ⇒ plus grande sera la pérennité des bénéfices écologiques de la restauration;
- ⇒ et ceci à moindre coût, puisque le cours d'eau effectuera lui-même une partie du travail de restauration

2.2.2.1 *Fondement scientifiques*

La puissance spécifique

D'un point de vue scientifique, il a été démontré depuis de nombreuses années que les capacités d'ajustement d'un cours d'eau étaient en grande partie fonction de sa puissance spécifique.

Les travaux pionniers de Brookes sur ce sujet (1983, 1985, 1986, 1988) repris dans Wasson et al. (1998) ont largement défriché le terrain.

D'une manière synthétique, les résultats de Brookes permettent d'identifier différents seuils de puissance spécifique :

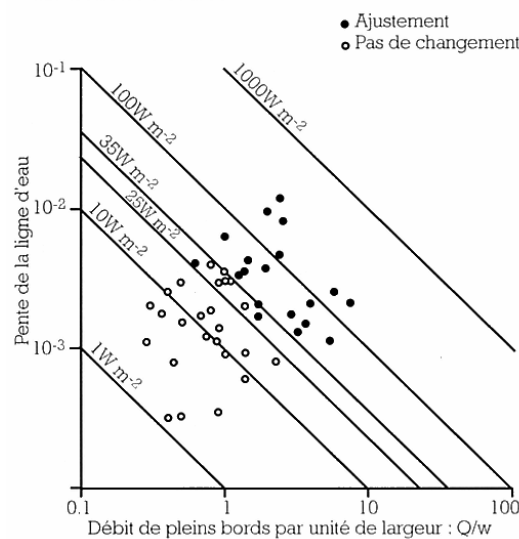


Figure 28. Les seuils de puissance spécifiques (d'après Brookes, 1988 in Wasson et al., 1998).

Un seuil "majeur" apparaît aux environs de 35 W/m^2 au-dessus duquel la puissance naturelle de cours d'eau anciennement chenalisés a permis à ces derniers de se réajuster morphologiquement et de retrouver petit à petit une géométrie plus naturelle. Un seuil mineur est visible aux environs de 25 W/m^2 . Les autres valeurs de puissance ne permettent pas d'identifier de seuils supplémentaires.

L'érodabilité des berges

Nos propres investigations nous amènent à penser que ce seuil autour de $25\text{-}35 \text{ W/m}^2$ peut être affiné en fonction des caractéristiques sédimentologiques des berges des cours d'eau et notamment de leur érodabilité.

Ainsi des cours d'eau présentant des puissances faibles ($10\text{-}15 \text{ W/m}^2$) peuvent néanmoins avoir une activité géodynamique relativement importante si leurs berges sont non ou peu cohésives (sables ou graviers par exemple) et s'ils reçoivent de l'amont une certaine quantité d'alluvions grossières qui, par leur dépôt sous forme de bancs, activent les processus d'érosion sur les berges opposées.



Figure 29. Exemple de berges facilement affouillables en présence de graviers non cohésifs sur une rivière à "faible puissance" (photos Biotec).

A l'inverse, des cours d'eau plus puissants ($40\text{-}50 \text{ W/m}^2$) mais coulant dans une plaine alluviale composée de sédiments plus cohésifs (limons, sables limoneux, argiles) seront probablement moins actifs, surtout si les apports solides provenant de l'amont sont modestes.

Le transport solide

Outre leur rôle en terme d'activation des processus géodynamiques, les apports de charge alluviale grossière en provenance de l'amont sont extrêmement importants en termes de recréation du substrat alluvial indispensable à de nombreux organismes composant les biocénoses aquatiques.

Compte-tenu de ces observations, il nous semble important de caractériser les cours d'eau, tout du moins dans un objectif d'évaluation de l'efficacité de travaux de restauration (voir chapitre 5), par :

- leur puissance spécifique - P;
- l'érodabilité potentielle naturelle de leurs berges (abstraction faite des protections éventuelles existantes) - B;
- leur transport solide (réel) - T.

2.2.2.2 Proposition de typologie

Sur la base de ces 3 variables, il est possible de proposer une typologie simple, qui pourrait être mise en œuvre à l'échelle du bassin (exemple de la Franche-Comté ci-après) ou renseignée au fur et à mesure dans le cadre d'études ponctuelles, préalables aux travaux de restauration.

	4	3	2	1
Puissance	< 10 W/m ²	30-10 W/m ²	100-30 W/m ²	> 100 W/m ²
Transport solide	Nul	Faible	Moyen	Fort
Erodabilité des berges	Nulle	Faible	Moyenne	Forte

Ainsi, par exemple pour le type P1B2T2 (à forte puissance spécifique, transport solide et érodabilité des berges moyens), le cours d'eau sera probablement très réactif et les travaux de restauration qui pourraient y être réalisés efficaces et avec des résultats positifs rapides. Dans ce cas, l'influence de la restauration sur les habitats sera indirecte ou "passive".

A l'inverse un type P4B3T4 (à très faible puissance, érodabilité des berges faible et transport solide nul) sera plus difficile à restaurer, avec des travaux qui devront être assez chers, car très aboutis dès le départ, du fait que la dynamique propre du cours d'eau ne pourra pas y contribuer. C'est-à-dire que la restauration doit intervenir directement sur les habitats; elle est donc nécessairement "active".

Nous verrons par la suite que ces 3 paramètres couplés à deux variables complémentaires qui sont **l'emprise disponible** pour la restauration et la **qualité de l'eau** peuvent être synthétisés sous forme de "scores", dont les valeurs donnent une image qualitative mais suffisante de l'efficacité probable de futurs travaux de restauration (évaluation de l'efficacité d'une opération de restauration).

2.2.3 Exemple de typologie sur la Région Franche-Comté

La DIREN Franche-Comté a souhaité se doter d'une base de données cartographiques sur les cours d'eau d'un rang supérieur ou égal à 3 (Malavoi et al., 2006).

Sur ces cours d'eau a été renseigné un certain nombre de variables géomorphologiques à l'échelle de tronçons homogènes de quelques kilomètres de longueur :

- des variables de contrôle: la pente de la vallée, le débit journalier de fréquence biennale, la largeur du fond de vallée, la puissance spécifique;
- des variables de réponse : la largeur du cours d'eau, la sinuosité, la quantité de bancs alluviaux visibles, les zones d'érosion active;
- et d'autres variables annexes telles que : l'appartenance à une HER1 ou HER2, le rang de Strahler, la surface du bassin versant.

Quelques exemples cartographiques sont présentés ci-après.

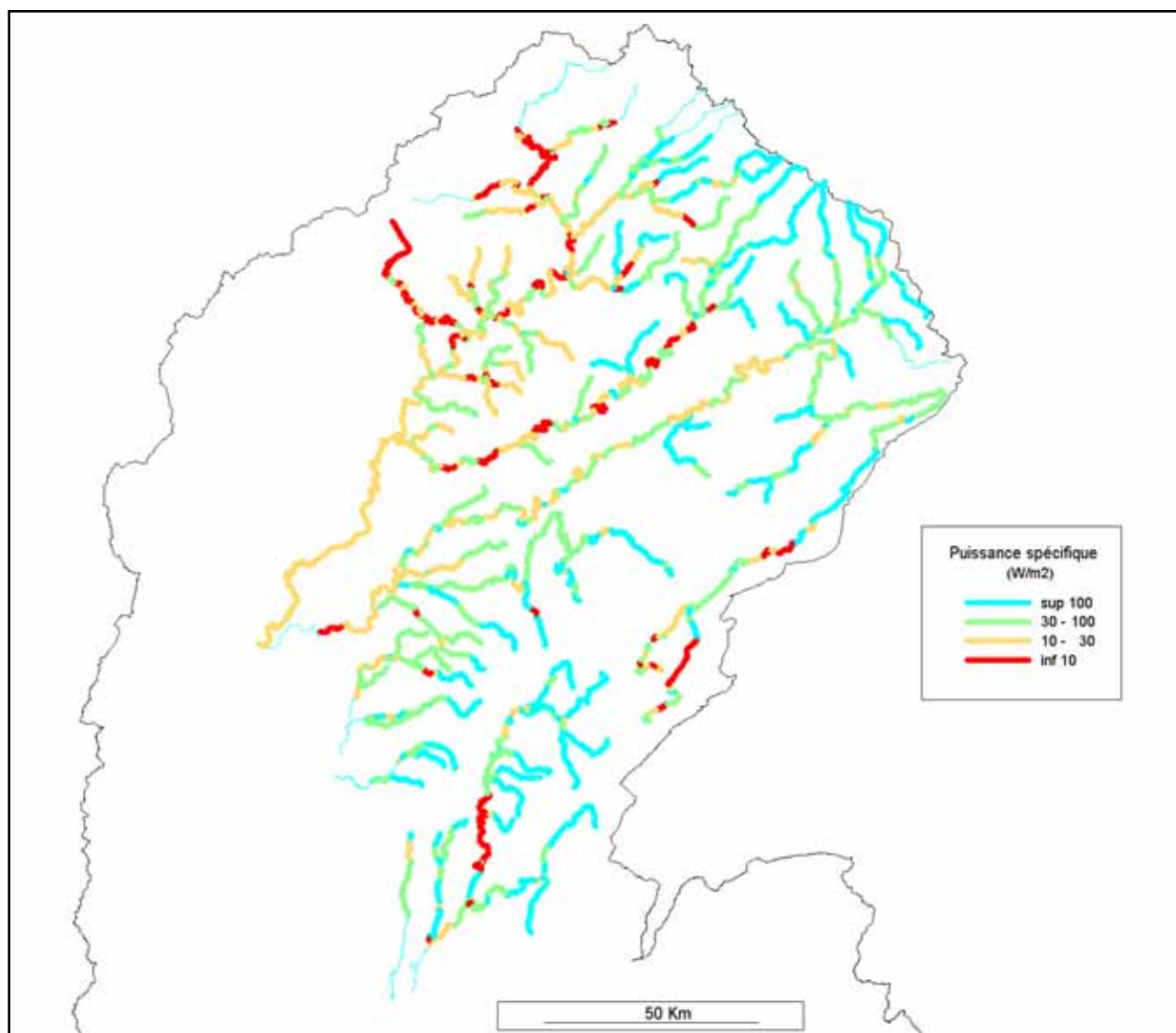


Figure 30. Carte de la puissance spécifique des cours d'eau en Franche Comté (Malavoi et al., 2006).

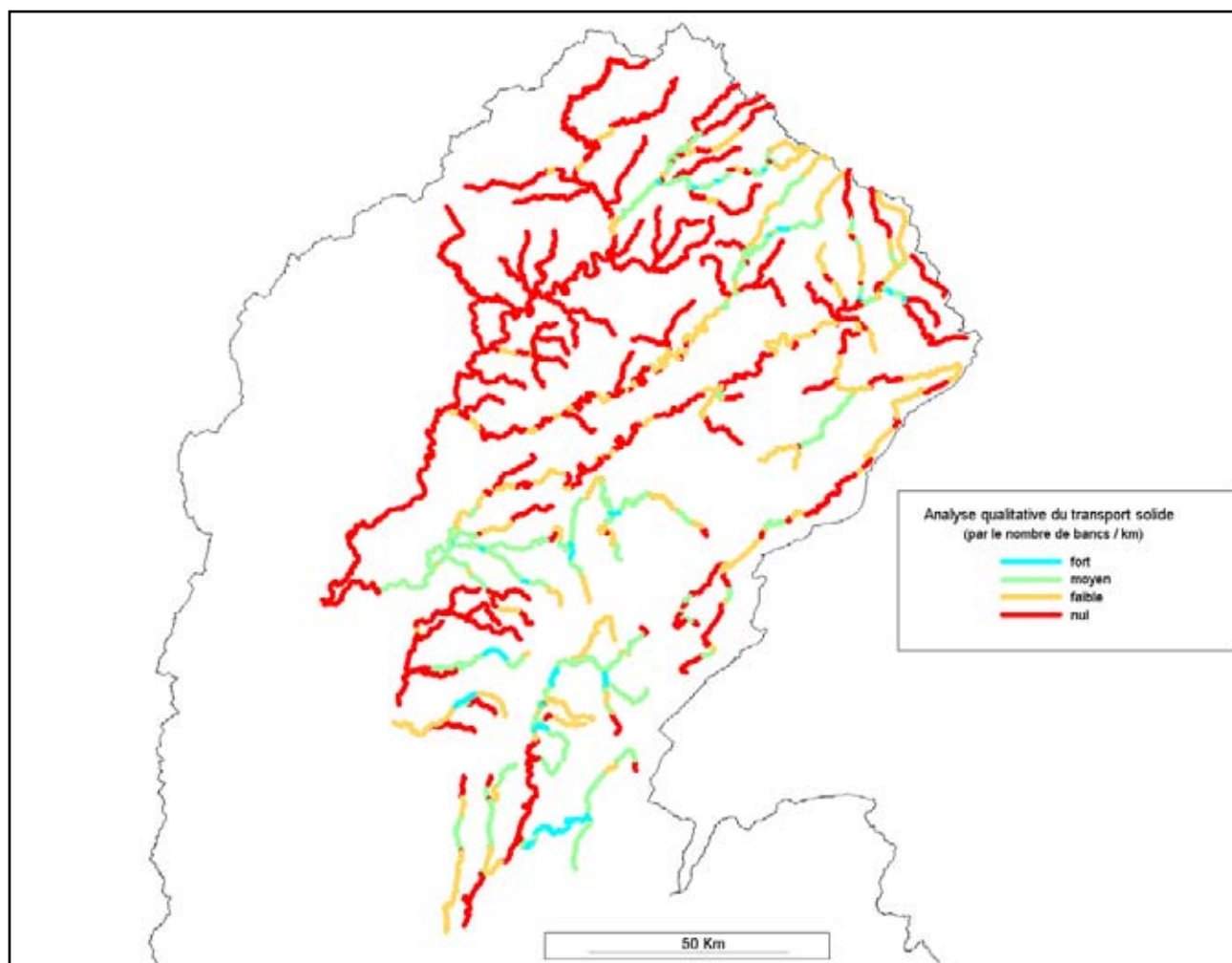


Figure 31. Carte qualitative du transport solide des cours d'eau en Franche Comté (Malavoi et al., 2006). Cette carte est basée sur le nombre de bancs alluviaux visibles/km de cours d'eau.

A partir des orthophotoplans de l'IGN ont été recensés de manière exhaustive tous les bancs alluviaux visibles sur les cours d'eau étudiés.

Trois "bémols" existent cependant qui ne donnent pas la possibilité à cette carte de refléter exactement le transport solide des cours d'eau :

- le débit lors des prises de vue de l'IGN qui, s'il est élevé, peut masquer la présence de bancs alluviaux (cela ne semble pas être le cas sur la série d'orthophotoplans utilisée ici);
- la présence de végétation riveraine qui masque parfois le cours d'eau;
- la présence de remous de seuils ou barrages, pouvant eux aussi masquer des bancs existants mais qui sont submergés.

Cette carte donne cependant une image assez fidèle des cours d'eau présentant un transport solide réel.

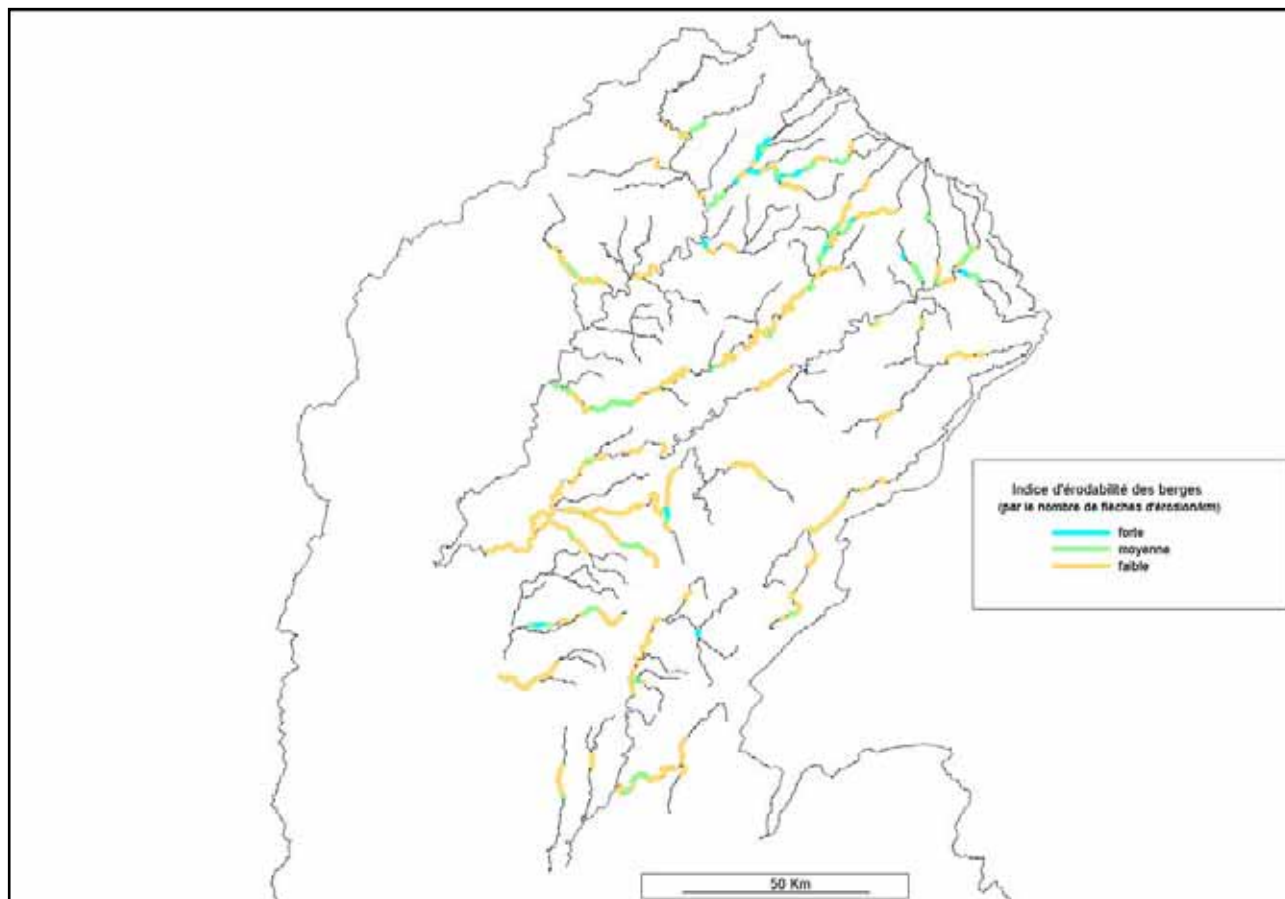


Figure 32. Carte qualitative de l'érodabilité des berges de cours d'eau en Franche Comté (Malavoi et al., 2006). Cette carte est basée sur le nombre de flèches d'érosion / km de cours d'eau.

Cette dernière carte ne représente pas exactement l'érodabilité potentielle des berges des cours d'eau. Elle est basée sur la présence de flèches d'érosion qui ont été mesurées en comparant le tracé des cours d'eau sur les scan25 (années 80) et sur les orthophotoplans (années 2000). Or ce n'est pas parce que l'on n'a pas observé d'érosion que les berges ne sont pas potentiellement érodables. Il se peut que des centaines de kilomètres de berges soient, ou protégés (enrochements ou autres techniques) ou sous l'emprise de retenues de seuils qui limitent l'intensité des processus érosifs.

Il est donc nécessaire aujourd'hui de compléter la carte d'érodabilité potentielle des berges :

- soit par des visites de terrain (méthode la plus fiable);
- soit par l'utilisation de bases de données telle que la BSS du BRGM (non totalement numérisée, donc très longue à traiter);
- soit par l'utilisation d'autres données existantes (coupes réalisées lors de forages d'essais, données concernant des puits de captage etc.).

NB : les valeurs disponibles dans la base de données de la Diren ne sont actuellement pas tout à fait suffisantes pour déterminer précisément la typologie géodynamique fonctionnelle. Elles fournissent cependant des éléments intéressants pour l'instruction de dossiers de demande de subvention de travaux de restauration.

2.3 TYPOLOGIE DES TRAVAUX DE RESTAURATION

2.3.1 Concepts et Terminologies

2.3.1.1 *Concepts généraux*

La restauration peut être menée "passivement" (en réduisant les "forces de dégradation") ou "activement" (par des interventions plus lourdes).

Le concept de **restauration passive** fait référence à la typologie géodynamique des cours d'eau présentée plus haut. Plus un cours d'eau sera puissant, avec des berges facilement érodables et un transport solide encore important, et plus sa restauration sera facile, peu coûteuse et avec des effets rapides. La simple suppression des forces de dégradation (enrochements, barrages) suffira généralement pour que le cours d'eau se réajuste rapidement, tant du point de vue physique qu'écologique (à condition toutefois pour ce dernier point, que la qualité physico-chimique de l'eau soit correcte).

La **restauration active** sera nécessaire sur les cours d'eau peu puissants, peu actifs et à faible transport solide. Elle nécessitera des travaux plus coûteux et donnera *a priori* des résultats moins spectaculaires.

2.3.1.2 *Terminologies actuellement utilisées*

De nombreuses terminologies dans le domaine de la restauration de cours d'eau sont utilisées par différents auteurs; ainsi il est souvent difficile de définir exactement de quoi il s'agit. C'est pourquoi nous avons essayé de rappeler quelques terminologies fréquentes et leur définition (sans prétention liée à leur exhaustivité ni à leur exactitude d'un point de vue étymologique) :

- **restauration :**
 - interventions humaines variées dont le but est de reconstituer des écosystèmes terrestres ou aquatiques dégradés, voire entièrement détruits par l'homme (Dictionnaire écologique, Ramade, 1993);
 - rétablissement en son état ancien ou en sa forme première (Petit Robert);
 - terme le plus utilisé en anglais "Restoration";
 - attention, il ne faut pas confondre la restauration morphologique fonctionnelle dont on parle ici avec la "restauration des cours d'eau" au sens de l'hydraulicien ou du "rattrapage d'entretien de la végétation" (enlèvement d'embâcles, gestion des arbres écroulés et penchés, élagage, taille, coupe sélective, etc.), qui fait également l'objet de nombreuses études techniques, guides et directives.

- **revitalisation** (absent du dictionnaire écologique et du Petit Robert);
 - réparation ou rétablissement d'un cours d'eau ou d'une partie de celui-ci, de manière à améliorer les propriétés écologiques du vivant : biologiques, chimiques et géomorphologiques (Lachat, 1996);
- **reconstitution** :
 - action de rétablir dans son état antérieur et normal (Petit Robert, absent du dictionnaire écologique);
 - remise en état et en place d'un cours d'eau, ou d'une partie de celui-ci, là où il coulait avant la correction, en tenant compte de tous les paramètres biologiques, chimiques et physiques (y compris géomorphologiques). Reconquérir ou réactiver des éléments perdus artificiellement au cours du temps, comme des zones alluviales, des bras morts, etc., sont des opérations de reconstitution. Le terme de reconstitution contient à la fois celui de revitalisation et de restauration (Lachat, 1996).
- **renaturation** (absent du dictionnaire écologique et du Petit Robert);
 - terme fréquemment utilisé en France mais pas à recommander; correspond à une mauvaise traduction de l'allemand "Renaturierung";
- **décorrection** (absent du dictionnaire écologique et du Petit Robert);
 - terme fréquemment utilisé en Suisse, peu en France, qui se comprend de lui-même;
- **réhabilitation** (absent du dictionnaire écologique);
 - action de remettre en bon état (Petit Robert).

On peut en déduire que le terme le plus approprié est bien "restauration", à la fois du point de vue du français et de l'écologie, de plus parfaitement compréhensible pour les anglophones. Pour éviter toute confusion et par souci de clarté, on peut recommander de parler de "**restauration morphoécologique et fonctionnelle**" des cours d'eau et de leurs annexes.

La notion de restauration fonctionnelle fait appel aux différentes fonctionnalités définies par l'agence; fonctionnalités devant être préservées ou restaurées pour atteindre un bon fonctionnement morpho-écologique (*Groupe de Travail Socio-Economie et Fonctionnalités (GdTSEF), 2005*) :

- **Régime Hydrologique (RHo)** suffisamment proche de la référence locale, surtout en variabilité, secondairement en abondance;

- **Régime Hydraulique (RHa)** du lit mineur suffisamment proche de la référence locale, surtout en variabilité, et surtout en lit mineur;
- **Régime Qualité (RQ, solutés)** suffisamment proche de la référence locale, avec qualité pas ou peu dégradée, eu égard aux conditions biogéochimiques de référence;
- **Régime Sédimentaire (RS, solides)** suffisamment proche de la référence locale, surtout en variabilité et en concentrations;
- **Fonctionnement global physico-chimique du lit mineur** suffisamment proche des références;
- **Végétation du lit mineur** (rives, berges et fonds) proche des références (saine, et fournie mais sans excès), avec effets d'écotones variés;
- **Lit majeur Inondé et végétalisé** dans des conditions proches des références, ou tout au le moins significativement (assez souvent), avec beaucoup d'écotones;
- **Zoocénoses en bonne conditions** d'habitats, de bonne santé, et proches des références;
- **Bio-Circulations amont-aval** suffisantes, suffisamment proches des références;
- **Régulation des débits** relative et proche des références;
- **Espace de Bon Fonctionnement (EBF)** d'extension pas trop éloigné des conditions de références.

2.3.2 Niveaux d'ambition des travaux de restauration

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

- si le fonctionnement morpho-écologique est encore bon :
 - ⇒ **préservation : catégorie P.**
 - Il s'agira le plus souvent d'opérations de sensibilisation ou de maîtrise foncière de secteurs menacés par une pression anthropique latente.*
- si le fonctionnement morpho-écologique est légèrement dégradé mais encore correct :
 - ⇒ **limitation des dysfonctionnements futurs : catégorie L.**
 - 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.*

- si l'état est dégradé :
 - ⇒ **restauration : catégorie R.**

Dans la catégorie 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 régulièrement de mettre en place des structures de diversification des écoulements : déflecteurs, petits seuils, 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 est surtout utilisé en zone urbaine ou péri-urbaine, où les contraintes foncières sont importantes;



Figure 33. Différents exemples d'aménagements essentiellement piscicoles : en haut à gauche risberme en enrochements sur la Bienne, en haut à droite agencement de blocs sur la Savoureuse, au centre amas de blocs et radier artificiel sur le Drugeon, en bas à gauche caches artificielles sur un petit ruisseau affluent de l'Allondon et en bas à droite aménagements piscicoles sur l'Arve (photos Biotec et Malavoi).

- **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 du lit mineur avant restauration). Il peut être atteint par exemple par un réméandrage 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 mis sous tuyau ou couvert, etc.;



Figure 34.

Remise à ciel ouvert (décorrection) d'un petit cours d'eau dans le Jura suisse (la Golatte) avec cependant une emprise limitée; photo de gauche lors des terrassements puis à droite 6 mois après les travaux (photos 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 lequel soit on laissera s'installer une végétation alluviale naturelle (corridor fluvial) ou au contraire on créera de toutes pièces une diversité de milieux biologiques annexes au cours d'eau (zones humides, mares, bocages, haies, secteurs pionniers, etc.).



Figure 35. Exemples de restaurations fonctionnelles de niveau R3 : en haut à gauche la Vurpillière puis à droite le Bief de Nanchez, en bas, milieux diversifiés "retrouvés" sur le Colostre (photos Biotec et Malavoi).

On comprend bien que 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.

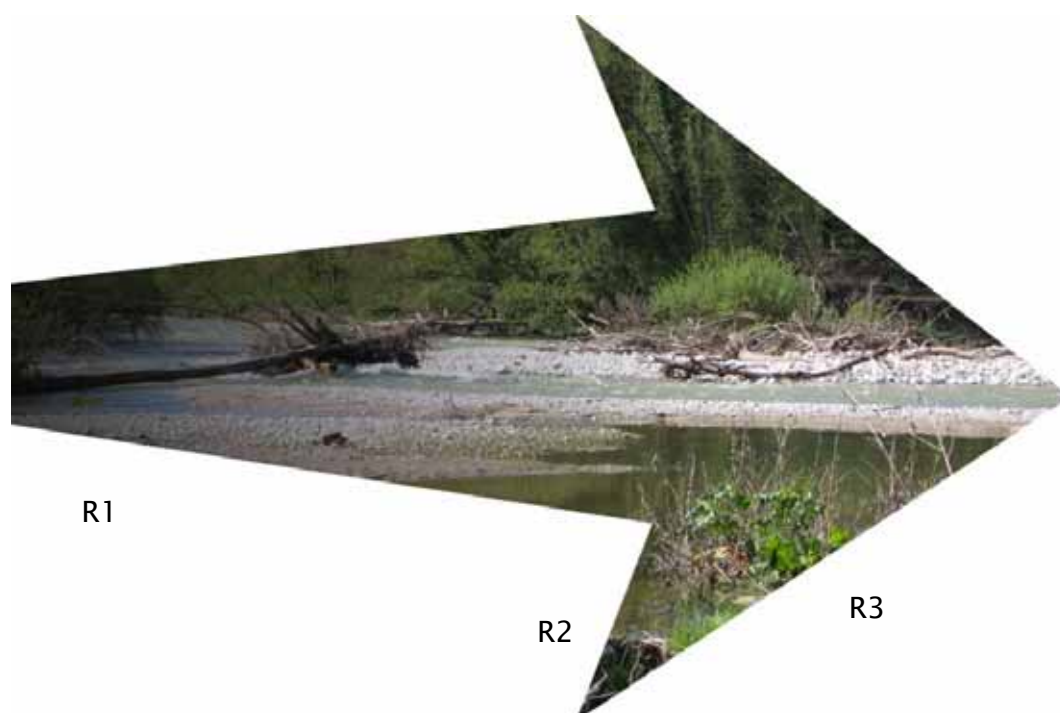


Figure 36. Illustration schématique d'un gradient continu des fonctionnalités entre R1 et R3, dont les limites entre les classes sont fictives.

NB : Il arrive parfois qu'un projet d'aménagement ait un objectif initial autre que la restauration des milieux aquatiques mais comporte néanmoins une démarche d'amélioration d'un milieu déjà dégradé. Par exemple, en présence d'un lit endigué ou recalibré, on peut rechercher une augmentation de la protection contre les inondations en élargissant le lit mineur ou en le surcreusant et intégrer dans un tel projet une démarche technique se rapprochant des opérations de restauration susmentionnées, pouvant aller de R1 à R3 : recréation d'un chenal d'étiage ou de chenaux secondaires, mise en place de structures de diversification des écoulements, plantation de végétaux rivulaires adaptés, création d'un espace de mobilité intra-digues, etc.).



Figure 37. Exemple d'élargissement hydraulique d'un cours d'eau (la Morges en traversée de ville en Suisse) et réaménagement du lit sous forme de petits seuils, végétalisation partielle des berges, etc. A gauche état initial, à droite deux ans après les travaux (photos Biotec).

2.3.3 Typologie des travaux de restauration par grandes familles de dysfonctionnements à traiter

Les grandes familles d'objectifs de travaux sont étroitement corrélées aux grandes familles de dysfonctionnements présentées plus haut, aussi reprendrons-nous ces types de dysfonctionnements pour les décliner en types de travaux envisageables.

Ces travaux sont eux-mêmes subdivisés en deux catégories, correspondant à deux échelles spatiales d'intervention :

- **travaux devant ou pouvant être réalisés à l'échelle globale** (en amont de la portion de cours d'eau impactée, voire à l'échelle du bassin versant);
- **travaux devant ou pouvant être réalisés à l'échelle locale** (au niveau de la portion de cours d'eau impactée).

Il arrive fréquemment que certains dysfonctionnements se cumulent : disparition du substrat alluvial + réduction des hauteurs d'eau à l'étiage + disparition des formations végétales riveraines. Il convient alors de cumuler également divers types d'interventions de restauration.

Nous verrons enfin que certains types de travaux de restauration peuvent avoir des effets positifs sur plusieurs types de dysfonctionnements :

- le reméandrage d'un cours d'eau rectifié peut ainsi freiner ou résorber les processus d'incision, améliorer l'hétérogénéité des faciès d'écoulement, augmenter les profondeurs d'eau à l'étiage, augmenter le linéaire de cours d'eau donc l'habitat disponible, etc.;
- la suppression de digues ou leur écartement permettra d'améliorer les fonctionnalités du lit mineur (réduction des vitesses en crue, amélioration des processus géodynamiques), mais aussi celles du lit majeur (meilleure connectivité), etc.;
- la suppression d'un seuil ou d'un barrage permettra d'élargir l'espace de liberté du cours d'eau, la création de surfaces pionnières colonisables par un type de végétation adaptée, la diversification des faciès d'écoulement et des habitats aquatiques, l'amélioration de la connectivité aval/amont, etc.

2.3.3.1 *Dysfonctionnements au sein du lit mineur*

a) Incision

Dysfonctionnement : métamorphose fluviale

Il s'agit là d'un dysfonctionnement majeur lié généralement à une modification drastique de l'une ou l'autre des deux variables de contrôle principales de la dynamique fluviale : le débit liquide ou, le plus souvent, le débit solide.

Le type le plus fréquent de métamorphose fluviale que l'on peut constater en France est le **remplacement du tressage, dont le développement nécessite de forts apports alluviaux grossiers, par du méandrage.**

Traitement global

La principale intervention à l'échelle globale consiste à restaurer les apports solides.

- Si le déficit provient d'un barrage bloquant les sédiments les solutions globales sont :
 - ⇒ suppression de l'ouvrage;

- ⇒ transfert des alluvions piégées vers l'aval de l'ouvrage;
 - ⇒ restauration d'une dynamique fluviale en aval (espace de mobilité) pour que le cours d'eau puisse se réalimenter en charge solide de fond.
- Si la métamorphose provient d'une disparition des apports solides provenant du bassin versant (végétalisation volontaire, déprise agropastorale, travaux RTM, curages, etc.) :
 - ⇒ dévégétalisation du bassin versant pour restaurer des apports sédimentaires;
 - ⇒ suppression des ouvrages RTM de piégeage des alluvions;
 - ⇒ transfert des alluvions piégées vers l'aval des ouvrages de piégeage;
 - ⇒ restauration d'une dynamique fluviale en aval (espace de mobilité) pour que le cours d'eau puisse se réalimenter en charge solide de fond.

D'une manière générale, on peut aussi s'appuyer sur une gestion de la végétation au sein du lit moyen, en évitant notamment qu'elle se développe de manière trop importante sur les bancs alluviaux, bloquant ainsi les processus de transfert de charge vers l'aval et favorisant l'incision par concentration de l'écoulement. Cette gestion volontariste, qui passe par un essartage régulier des bancs alluviaux, voire une scarification, est particulièrement indiquée sur les cours d'eau dont le régime des crues est modifié par des barrages écrêteurs, mais elle ne devrait pas être menée de manière systématique sans étude approfondie de l'historique et des causes du développement de cette végétation.

Traitement local

Il est quasiment impossible de traiter localement une métamorphose fluviale en terme de restauration. On peut en partie freiner la métamorphose "tressage ⇒ méandrage" par un entretien systématique de la végétation du lit moyen (bande active) pour éviter une fermeture trop rapide du milieu alluvial (c'est ce qui se réalise sur la moyenne et basse Durance, avec un objectif initial d'entretien du gabarit d'écoulement des crues).



Précaution à prendre :

- ⇒ *toute politique de gestion sédimentaire doit s'appuyer sur une bonne connaissance du régime hydrologique et notamment vérifier si le régime des crues morphogènes (Q1 à Q5) est naturel ou influencé.*

Dysfonctionnement : disparition du substrat alluvial au profit de la roche-mère

Traitement global

Similaire aux préconisations liées à une métamorphose fluviale.

Traitement local

- **S'il existe encore des apports alluviaux provenant de l'amont :** implantation de structures en lit mineur (mini-seuils, rampes, épis longs, etc.) pour bloquer localement une partie de la charge alluviale grossière en transit.
- **Si le cours d'eau est potentiellement dynamique :** mettre en œuvre un espace de mobilité qui permettra une recharge locale en alluvions grossières.



Précautions à prendre :

- ⇒ *attention de ne pas aggraver le déficit sédimentaire en aval bloquant le peu de charge solide en transport par le cours d'eau. Vérifier avec une étude de transport solide;*
- ⇒ *nécessité d'un travail important de sensibilisation locale au droit du site de mise en œuvre de l'espace de mobilité ou de mini-seuils (peur généralisée des érosions latérales ou d'un éventuel risque d'aggravation des inondations).*

- **S'il n'y a plus d'apports solides et si l'on ne peut mettre en œuvre une solution globale permettant de reconstituer des apports, on peut éventuellement proposer des apports artificiels d'alluvions (attention, coût très élevé) :**
 - ⇒ transfert depuis l'amont d'ouvrages de piégeage;
 - ⇒ transfert depuis des sites où un curage est nécessaire (enjeu hydraulique fort) sur la même rivière ou sur une rivière différente.



Précautions à prendre :

- ⇒ *nécessité d'un travail important de sensibilisation locale au droit du site de redépôt (peur généralisée des risques d'inondations);*
- ⇒ *utiliser des alluvions de nature pétrographique et de granulométrie équivalente à celles que l'on devrait trouver sur le site à restaurer;*
- ⇒ *régaler les alluvions redéposées pour ne pas trop réduire la section d'écoulement et pour ne pas produire des remblais trop hauts, susceptibles d'être facilement colonisés par des essences végétales indésirables et néophytes;*
- ⇒ *implanter éventuellement des structures de blocage des alluvions redéposées (cf § précédent).*

Dysfonctionnement : abaissement de la nappe

(NB : ce dysfonctionnement est plutôt prépondérant au lit majeur mais la plupart des interventions sont à mettre en œuvre en lit mineur)

Traitement global

Mêmes traitements globaux que précédemment

Traitement local

Mêmes traitement locaux que précédemment.

- Implantation éventuelle de seuils/rampes plus hauts pour relever immédiatement le niveau de la nappe



Précautions à prendre :

- ⇒ *l'implantation de seuils hauts génèrera les impacts "classiques" liés à la présence de seuils (voir § correspondant). Attention de ne pas remplacer un dysfonctionnement par un autre. Cette méthode ne doit être employée que si l'enjeu (ex. alimentation en eau potable) nécessite des mesures urgentes de rehausse de la nappe. Dans le cas contraire, il vaut peut-être mieux attendre (plusieurs années) une rehausse "naturelle" du fond alluvial qui entraînera une rehausse de la nappe.*

b) Modification drastique des caractéristiques de l'écoulement et de la nature des berges.

Cette grande famille de dysfonctionnements présente une forte diversité. Les traitements se font généralement à l'échelle locale.

Dysfonctionnement : homogénéisation des faciès d'écoulement

Ce type de dysfonctionnement apparaît sur la majorité des cours d'eau chenalisés. Il est aussi le dysfonctionnement dominant sur les cours d'eau où existent de nombreux seuils et barrages. Le traitement de ce type de dysfonctionnement, hormis s'il est lié au dysfonctionnement précédent (incision), se traite essentiellement au niveau local, c'est à dire à l'échelle de la portion de cours d'eau impactée.

- Si l'homogénéisation des faciès est liée à la **présence de seuils ou barrages**, la méthode la plus efficace consiste en la suppression de l'ouvrage, si celui ci n'a plus d'usage économique (NB : c'est le cas de 95 % des seuils sur le bassin Seine-Normandie, Area, 2002).



Précautions à prendre :

- ⇒ *si le cours d'eau est potentiellement actif, la simple suppression de l'ouvrage suffit généralement à retrouver une morphologie et une dynamique correctes. Une étude géomorphologique préalable est néanmoins indispensable pour vérifier que la suppression n'aura pas d'impacts négatifs, notamment en terme d'érosion régressive (risque d'affouillements d'ouvrages à l'amont : piles de pont, bâtiments, collecteurs existants en fond de lit, etc.), d'abaissement du niveau de la nappe, etc.. Dans ce cas, un arasement partiel peut être envisagé;*
- ⇒ *si le cours d'eau est peu actif, la suppression devra s'accompagner de techniques de restauration plus complexes (cf. § suivants) sur la partie qui sera à nouveau émergée. En effet, le cours d'eau n'aura pas la capacité de s'auto-ajuster et l'on risque, en l'absence de travaux de restauration assez aboutis, d'être confronté à une morphologie, une fonctionnalité et un aspect paysager médiocres.*

Les niveaux R1 à R3 peuvent se décliner en fonction :

- du niveau d'arasement de l'ouvrage;
- de l'ampleur des travaux connexes de restauration dans l'ancienne retenue.

- Si l'homogénéisation des faciès est liée à des travaux de **chenalisation**, les techniques sont multiples et fonction du niveau d'ambition de la restauration (R1 à R3), de l'emprise disponible, des risques hydrauliques etc. NB : quel que soit ce niveau d'ambition, le type et l'intensité des travaux nécessaires à la restauration seront fonction du type géomorphologique. En effet, comme il a déjà été mentionné, plus le cours d'eau sera potentiellement dynamique et disposera d'un transport solide suffisant, plus les travaux nécessaires seront faibles (simple suppression des protections de berges par exemple) et plus les résultats seront rapidement positifs. A l'inverse un cours d'eau peu dynamique nécessitera des travaux de restauration importants et souvent coûteux pour que des résultats positifs puissent être observés rapidement :
 - ⇒ R1 : diversification des habitats aquatiques (déflecteurs, mini-seuils, risbermes alternées, caches artificielles, etc.);
 - ⇒ R2 : travaux plus aboutis de restauration (plantations de végétaux aquatiques, reprofilages différenciés des berges, reméandrage partiel, etc.);
 - ⇒ R3 : restauration complète des conditions géomorphologiques (tracé en plan d'équilibre, géométrie du lit et des berges, substrats) et géodynamiques naturelles (restauration d'un espace de mobilité).



Précautions à prendre :

- ⇒ *Le dimensionnement et le positionnement des structures de diversification de l'écoulement doit tenir compte de paramètres géomorphologiques locaux :*
 - *quel est le type d'habitat ou de séquence de faciès naturels sur le tronçon et le type de cours d'eau concerné ? Recherche et inspiration de "modèles" d'aménagement;*
 - *quelle doit être la taille, la forme, la nature, le lieu d'implantation des structures pour résister à la puissance hydraulique du cours d'eau ?*
 - *quelle sera l'évolution des dispositifs réalisés ? Ceci revient à réfléchir sur la pérennité des aménagements, à développer dans un esprit d'évolution positive et autonome et non de dégradation annoncée;*
- ⇒ *et de paramètres écologiques :*
 - *quels types de faciès ou d'habitat veut on recréer : faciès naturels, sous berges, caches contre les prédateurs, zones de frai, zone de repos etc. ?*
 - *éventuellement quelle espèce ou quel stade de développement veut-on favoriser : alevins, juvéniles, adultes ?*

Dysfonctionnement : réduction de la profondeur à l'étiage

Même s'il peut sembler redondant avec le précédent, ce dysfonctionnement est souvent lié à des travaux de chenalisation de type "recalibrage". Le surélargissement du lit mineur, typique de ce type d'intervention, se traduit par un étalement de la lame d'eau à l'étiage avec des profondeurs qui deviennent limitantes pour les biocénoses aquatiques et notamment les poissons et qui augmentent la vitesse de réchauffement de l'eau donc les effets de l'eutrophisation si celle-ci est présente.

Le traitement local de ce dysfonctionnement peut se faire au moyen de diverses techniques, non exclusives les unes des autres :

- R1 : réduction de la largeur du lit d'étiage par des systèmes de risbermes, de déflecteurs, d'épis ou tout autre structure hydraulique permettant de concentrer l'écoulement d'étiage dans un lit mieux dimensionné, garantissant a minima des profondeurs de l'ordre de 30-40 cm;
- R2 : reconstitution d'un lit d'étiage et d'un lit moyen (bancs alluviaux ou risbermes artificielles), écartement des digues si elles sont trop près du cours d'eau, reméandrage;
- R3 : R2 + espace de mobilité ou de fonctionnalité.



Précautions à prendre :

- ⇒ *comme précédemment, l'étude de projet doit tenir compte dans le dimensionnement et le positionnement des structures d'augmentation des profondeurs à l'étiage de paramètres géomorphologiques :*
 - *quel est la profondeur moyenne visée et pour quel débit (étiage sévère, étiage moyen, module, etc.) ?*
 - *quel est l'objectif : simple réhausse de la lame d'eau, réhausse concomitante de la nappe d'accompagnement, etc. ?*
 - *quelle doit être la taille, la forme, la nature des structures pour résister à la puissance hydraulique du cours d'eau ?*
- ⇒ *et de paramètres écologiques :*
 - *recherche d'une amélioration de l'habitat (cf § précédent);*
 - *recherche d'une amélioration de la franchissabilité d'un secteur.*

Dysfonctionnement : modification de la nature des berges

Ce type de dysfonctionnement accompagne généralement les travaux de chenalisation mais on peut trouver des protections de berges en génie civil indépendamment de ces opérations, comme simples mesures de lutte contre l'érosion latérale. Les méthodes de réduction de cet impact sont *a priori* simples : supprimer ces structures et s'inspirer des modèles naturels, de manière à obtenir des talus riverains "requalifiés" :

- R1 : mise en place de caches et abris le long des berges : agencements particuliers d'enrochements libres, de troncs et souches d'arbres, de sous-berges artificielles;
- R2 : recréation de berges naturelles, plantation de formations végétales variées et stratifiées, création de sous-berges artificielles en attendant que le système racinaire naturel se développe;
- R3 : R2 + espace de mobilité ou de fonctionnalité.



Précautions à prendre :

- ⇒ *nécessité d'un travail important de sensibilisation locale au droit du site de suppression des protections de berges (peur généralisée des érosions latérales);*
- ⇒ *éventuellement gestion foncière de la zone susceptible d'être à nouveau soumise à des processus d'érosion;*
- ⇒ *sur les rivières à faible ou modeste puissance et à berges basses (< 1.5 m), la plantation de végétaux riverains, même en sommet de berge peut réduire fortement les processus d'érosion latérale par ailleurs intéressants pour la restauration d'un fonctionnement plus naturel du cours d'eau*

c) Absence de végétation riveraine

Ce type de dysfonctionnement peut être résorbé "plus aisément" par plantation d'essences végétales variées et typiques de formations riveraines naturelles. **ATTENTION: il ne s'agit pas ici de réaliser des ouvrages de protection de berges au moyen de techniques sophistiquées de génie végétal** mais uniquement de planter des essences arborées ou arbustives en berge :

- R1: plantations sous forme de massifs stratifiés et disséminés;
- R2-R3 : plantation d'un corridor végétal plus étendu, fonction de l'emprise foncière disponible.

Il est à noter que sur des rivières actives, il pourra avantageusement être recherché le développement indirect de bonnes conditions de croissance pour des végétaux pionniers et adaptés. Il pourra ainsi s'agir d'érosions/dépôts forcés par la mise en place d'ouvrages déflecteurs, etc.



Figure 38. Vues de travaux de reconstitution de berges par des techniques indirectes (déflecteurs) sur la Bienne. La végétation riveraine adaptée est ainsi partiellement spontanée sur les dépôts favorisés par les épis (illustration de gauche avant travaux, au centre en fin de travaux et à droite 4 ans plus tard) (photos Biotec).

2.3.3.2 *Dysfonctionnements au sein du lit majeur*

Déconnexion lit mineur/lit majeur

- Si la cause en est une incision généralisée du lit mineur :
 - ⇒ voir travaux pour juguler l'incision du lit mineur, tant à l'échelle globale que locale; voir notamment les travaux destinés à remonter le niveau du fond du lit et de la nappe d'accompagnement. Il est également possible de prévoir des travaux sur les bras morts eux-mêmes pour recréer une connexion plus fréquente (curages voire approfondissements).
- Si la cause en est la présence de digues :
 - ⇒ R1 : abaissement localisé pour augmenter la fréquence de connexion; mise en place de clapets (exemple du Rhin);
 - ⇒ R2, R3 : écartement aux limites d'un espace de mobilité ou de fonctionnalité, voire suppression totale.



Précaution à prendre :

- ⇒ *nécessité d'une étude hydraulique pour vérification que l'opération n'aggrave pas les inondations de secteurs à enjeux forts (zones urbanisées).*

Assèchement des milieux naturels humides du lit majeur

- Si la cause en est une incision généralisée du lit mineur et donc un abaissement de la nappe (cas le plus fréquent) :
 - ⇒ voir travaux pour juguler l'incision du lit mineur, tant à l'échelle globale que locale.

3

AUDIT DES SITES DE RESTAURATION

3.1 REMARQUES PRELIMINAIRES

L'Agence de l'Eau RMC a fourni une liste d'une quarantaine d'opérations de restauration physique de cours d'eau déjà réalisées et pour lesquelles il existe un dossier dans chacune de ses délégations (Montpellier, Besançon, Lyon et Marseille). Le choix d'une vingtaine d'entre elles a été réalisé sur la base des critères de sélection suivants :

- importance du linéaire de cours d'eau restauré (non prise en compte d'opérations très ponctuelles);
- prise en compte de quelques opérations uniquement, ayant trait à un objectif essentiellement piscicole;
- non prise en compte d'opérations portant uniquement sur de la "protection de berge", même s'il a été fait recours à des techniques issues du génie végétal;
- non prise en compte d'opérations proposées par l'Agence mais pas encore réalisées;
- respect d'une certaine répartition "typologique" et géographique sur le territoire du bassin RMC.

Les sites proposés par l'Agence sont des opérations partiellement ou totalement financées par elle. Il existe des opérations de restauration de cours d'eau réalisées dans le cadre de projets (routiers, ferroviaires, d'urbanisme, etc.) dont l'Agence n'a pas été le partenaire et n'a donc pas forcément été informée. C'est par exemple le cas de la dérivation de l'Albarine à Argis qui a néanmoins été analysée.

La recherche et l'analyse des dossiers auprès des différentes délégations montre que l'Agence a bien en possession des dossiers **financiers** mais souvent très peu, voire pas du tout, de dossiers **techniques**. Souvent, la réalisation ne correspond donc pas exactement aux objectifs de départ annoncés dans ces dossiers financiers.

Enfin, beaucoup d'opérations proposées ne bénéficient pas d'une assez longue période d'observation permettant une analyse précise et pleinement objective des effets des travaux réalisés.

3.2 ANALYSE DES CAS TRAITES, QUELQUES ASPECTS METHODOLOGIQUES

Les opérations à analyser sur le bassin RMC font appel à des types de travaux de restauration très divers, menés à des échelles de longueur et de surface très variées et sur des cours d'eau très différents les uns des autres. Dans ce sens, pour permettre une analyse néanmoins objective de l'ensemble des sites, il a fallu faire appel à certains principes méthodologiques fondamentaux :

- les sites ont tous été visités conjointement par Jean-René Malavoi et Philippe Adam (Biotec), ainsi que par un représentant du Maître d'ouvrage ou d'un initiateur du projet;
- une fiche type a été élaborée au préalable à ces visites (voir fiches détaillées retranscrites dans un document annexe au présent rapport), de manière à collecter/renseigner le même type d'informations sur chaque site.

De plus, l'évaluation de la "réussite" d'un projet n'est pas facile vu la grande diversité des opérations visitées. Il nous semble qu'une clef d'entrée possible est liée à l'analyse des résultats par rapport à des objectifs de restauration donnés avant travaux. Dans cet esprit, il est légitime de hiérarchiser les objectifs selon 3 niveaux :

- **niveau 1 : objectifs généraux (nationaux);** dans ce cas (vraisemblablement le plus fréquent), les objectifs de restauration sont vagues et globaux, exemple :
 - *volonté de rétablissement de bras morts, de création de méandres, d'espaces de liberté;*
 - *favoriser un travail morphologique naturel du cours d'eau, la diversification des milieux, etc.*

Ce genre d'objectifs peut être identique à n'importe quel cours d'eau de France et d'ailleurs. De tels objectifs ne sont pas issus d'étude diagnostic ou faisant état de "référence" avant travaux de restauration.

- **niveau 2 : objectifs propres au cours d'eau concerné (semi-locaux);** ce type d'objectifs est basé sur une étude diagnostic de l'état du cours d'eau avant restauration. C'est-à-dire que par exemple, l'historique des travaux de chenalisation ou de recalibrage a été explicité et que les conséquences sur les milieux ont été identifiées. Ce niveau d'objectifs peut également faire appel à l'une ou l'autre espèce cible (en général faunistique et piscicole en particulier).

- **niveau 3 : objectifs locaux**; ce type d'objectifs est indissociable d'un état de référence avant travaux de correction, et de l'analyse précise (sur la faune piscicole, sur la flore, sur les milieux, morphologique, etc.) des impacts de ces travaux. Ce niveau d'objectifs fait fréquemment appel à des espèces cibles pour justifier des mesures précises voulues de restauration.

L'analyse de la réussite d'une opération de restauration est alors corrélée à son niveau d'objectifs. Ainsi une réalisation aux objectifs relativement "flous" et généraux peut néanmoins amener 100 % de réussite, au même titre qu'une réalisation qui a entraîné un programme complet de recherche et de suivis, avec un niveau d'objectifs beaucoup plus précis.

L'évaluation de la réussite d'un projet de restauration s'apprécie ainsi alors "simplement" qualitativement sous forme de pourcentage en rapport avec les objectifs initiaux, en évaluant si ceux-ci ont été totalement atteints, partiellement ou non.

Il était d'emblée convenu à travers le cahier des charges de la présente étude que l'analyse des opérations était qualitative et basée essentiellement sur des documents existants (dossier de financement, d'étude, de projet, de suivi, etc.) ainsi que sur la visite des sites. Aucune mesure ou relevé précis (piscicole, floristique, qualité de l'eau, etc.) n'a été réalisé dans le cadre de cette étude.

De plus, il faut rappeler que tous les sites ont été visités entre le mois de janvier et mars 2006, c'est-à-dire hors période de végétation. Il faut néanmoins préciser que si évidemment cette période ne permet pas d'apprécier clairement la diversité floristique des sites visités, l'absence d'herbes hautes, de mégaphorbiaies en plein développement ou de feuillages, a permis une très bonne visualisation des sites d'un point de vue physique.

3.3 SYNTHÈSE DE QUELQUES ASPECTS TECHNIQUES, SOCIOLOGIQUES ET FONCIERS

3.3.1 Aspects fonciers

La plupart des actions de restauration, dans tous les cas celles de niveaux R2 et R3, nécessitent une emprise foncière supplémentaire par rapport à la situation corrigée. Une démarche importante pour les maîtres d'ouvrage s'intéressant à des travaux de restauration est ainsi foncière. L'analyse des opérations sur le bassin RMC nous a permis de constater diverses formes de tractations avec les propriétaires riverains :

- **l'achat**; méthode simple mais la plus onéreuse. L'initiateur du projet de restauration est ainsi totalement autonome sur ses propres terres. L'acquisition foncière des terrains concernés par la restauration permet avec certitude de pérenniser les investissements réalisés. Il est difficile de donner des indicatifs de prix mais les terrains sont souvent négociés entre 0.5 et 2.0 €/m² (friches et terres agricoles);
- **la déclaration d'intérêt général (DIG)**; certains maîtres d'ouvrage introduisent par exemple des opérations de restauration de cours d'eau dans des programmes beaucoup plus globaux d'aménagement sur la rivière concernée. C'est par exemple le cas du Syndicat Mixte du Vidourle , qui a introduit dans un programme global d'aménagement et de gestion des berges du Vidourle, la réhabilitation de plusieurs bras morts, objet de la présente analyse. Cette méthode est sûre d'un point de vue juridique puisque les autorisations de travaux sont bien réelles, mais vu son caractère général il paraît inévitable de procéder ensuite préalablement aux travaux à une information précise aux propriétaires concernés;
- **la réalisation des travaux sur terrains privés mais avec autorisation écrite des propriétaires concernés**; ce cas est le plus fréquent des opérations visitées (voir exemple de demande d'autorisation figure 38).

Monsieur,

A la suite des crues dévastatrices de juillet 1960, le lit du Colostre a connu de nombreux reprofilages qui ont entraîné une chenalisation dommageable de la rivière en court-circuitant les méandres naturels.

Ces interventions ont eu l'effet inverse de celui attendu : l'accélération des courants et la formation d'embâcles ont régulièrement occasionné depuis des débordements importants et une érosion des berges conséquente.

Une amélioration intéressante de cette situation consiste à réduire les vitesses d'écoulement en remettant le Colostre dans ses méandres d'origine tout en gardant la possibilité d'évacuer le surplus du débit dans le lit actuel.

Cette solution a déjà été mise en place avec succès et donne entière satisfaction sur plusieurs secteurs du Colostre.

Elle permet un bon fonctionnement de la rivière sur deux plans :

- 1. plan hydraulique : la capacité d'évacuation des crues est doublée par la conservation de l'ancien chenal qui permet d'écouler le surplus des crues;*
- 2. plan piscicole : la diversité des faciès ainsi retrouvée, la diminution des vitesses d'écoulement et l'augmentation des surfaces mouillées sont garantes d'une amélioration sensible des conditions de vie de la faune piscicole.*

Les travaux à envisager concernent le terrain suivant dont vous êtes propriétaire :

- parcelle n°*
- commune de*

Nous sommes à votre disposition pour effectuer une visite sur place au cours de laquelle nous pourrions vous présenter le projet et les réalisations déjà effectuées.

Si cela n'est pas possible, vous pouvez nous appeler aux numéros de téléphone ci-dessus ou nous écrire aux adresses indiquées.

Vous pouvez nous signifier votre accord avec les termes de cette lettre en nous retournant un des exemplaires signé.

Sans opposition de votre part avant le, nous considérerons que vous ne voyez pas d'objection à la réalisation de ces travaux qui resteront entièrement à notre charge.

Assurés de votre compréhension, veuillez recevoir, Monsieur, l'expression de nos sentiments respectueux.

Figure 39.

Lettre type envoyée à tous les propriétaires riverains concernés par les travaux sur le Colostre en vue de l'obtention de leur accord. Source : Fédération des Alpes de Haute-Provence pour la pêche et la protection du milieu aquatique.

Cette manière de faire simple et peu onéreuse, puisque le riverain concerné reste propriétaire de son bien-fonds, connaît certaines limites en cas de changement de propriétaire, le nouveau venu n'étant peut-être pas au fait, voire pas du tout en accord avec les travaux réalisés sur sa parcelle.

Pour pallier à ce risque, de plus en plus de maîtres d'ouvrage, comme le Syndicat Mixte du Bassin Versant du Vistre par exemple, font inscrire les autorisations de travaux aux hypothèques. C'est-à-dire qu'un acte notarié est établi, dépendant ensuite de la parcelle concernée et non plus uniquement de son propriétaire.

3.3.2 Aspects sociologiques

Indépendamment de la nécessité de tractations foncières avec les propriétaires riverains tel que vu ci-dessus, un minimum de sensibilisation du "grand public" paraît inévitable à la réalisation de projets de restauration de cours d'eau. C'est précisément aussi en développant une démarche participative lors de l'élaboration d'un projet, par la réalisation de séances d'information à la population, d'expositions publiques, de plaquettes, d'articles de presse, etc., que le projet peut "mûrir" et se nourrir de divers aspects collatéraux et peut-être plus élargis que ceux imaginés au départ par les initiateurs du projet, comme il a été vu, très souvent, limités à des aspects piscicoles.

Par exemple, un projet de restauration au but initial essentiellement piscicole, peut intéresser un public plus élargi, avec le développement de sentier nature, de parcours didactique au sujet de l'importance de la préservation des milieux alluviaux, de certaines espèces floristiques et faunistiques rares ou protégées. Une telle démarche participative peut également accrocher diverses associations sportives intéressées (pêche à la mouche, fédération de canoë-kayak, etc.). C'est aussi ce "multi-fonctionnalisme" d'une opération de restauration qui va être portée d'un point de vue politique et qui sera la garantie de résultats sur le long terme. Il n'y a pas de projet fort sans volonté politique forte.

3.3.3 Aspects techniques

3.3.3.1 *Choix du gabarit du cours d'eau reméandré*

Une des "familles" de travaux de restauration de cours d'eau la plus fréquente consiste à faire "reméandrer" un cours d'eau dont le tracé a été rectifié. Pour le concepteur, il se pose alors la question du choix du gabarit à donner à ce "nouveau" cours d'eau. La visite de différentes opérations sur le bassin RMC a montré que dans la plupart des cas, le gabarit donné au nouveau tracé était choisi identique à celui du tracé chenalisé.

Ceci constitue souvent une "erreur" de conception, le tracé chenalisé ayant fréquemment été réalisé plus large que celui de l'état naturel antérieur, pour des raisons de débitance hydraulique. C'est ici qu'il faut rappeler la nécessité d'un minimum de recherches historiques lors de l'élaboration de travaux de "reméandrement", pour se calquer le plus fidèlement sur l'état "originel" du cours d'eau. Dans le doute ou en cas d'absence de toute donnée historique, il vaut mieux réaliser un nouveau chenal méandriforme "trop petit".

En effet, si le cours d'eau a une faible puissance, que les berges sont de nature cohésive et que le transport solide est faible (voir plus haut), un chenal réalisé "trop large" va très peu évoluer avec le temps. Par contre, cette "erreur" de dimensionnement est beaucoup moins dommageable sur un cours d'eau plus puissant et avec du transport, le milieu se régénérant de lui-même beaucoup plus vite (développement d'érosions de berge, de bancs alluviaux alternés, de mouilles, de radiers, etc.).



Figure 40. Lit relativement large et surcreusé sur un tronçon de cours d'eau peu puissant (la Drésine, proche de son débouché sur le Lac de Remoray) et sur un tronçon de cours d'eau plus puissant à droite (le Drugeon à Bonnevaux) (photos Malavoi/Biotec).

3.3.3.2 *Notion d'entretien et de garantie*

Beaucoup d'opérations de restauration de cours d'eau font appel à des travaux de végétalisation. Le développement végétal n'est pas toujours satisfaisant, ne correspondant pas totalement aux objectifs énoncés dans les dossiers d'études et de projets. Ainsi, pour s'assurer du développement végétal souhaité, il paraît indispensable d'exiger de l'entreprise titulaire du marché de travaux un suivi et une garantie des végétaux installés. Ce suivi minimal doit idéalement s'étaler sur trois périodes végétatives à suivre des travaux.

Cet entretien/garantie doit être assuré de manière régulière avec au moins une visite trimestrielle des travaux réalisés. En outre, il contiendra en principe les éléments suivants :

- remplacement des végétaux morts, dépérissants ou malades (un taux de 90 % de reprise est généralement recommandé);
- arrosages suffisants dans les régions où un déficit hydrique est avéré;
- fauchage de surfaces enherbées;
- élimination de toutes pousses d'espèces néophytes indésirables (*Reynoutria japonica*, *Buddleja davidii*, *Ailanthus altissima*, *Acer negundo*, *Robinia pseudacacia*, *Impatiens glandulifera*, etc.).

Après trois saisons végétatives, les végétaux auront ainsi gagné une certaine autonomie, assurant ainsi une grande partie des fonctions écologiques pour lesquelles ils ont été installés.

D'un point de vue pratique, ces notions de suivi et de garantie des végétaux installés sont à détailler dans le cahier des charges technique des travaux (CCTP). Leur montant financier doit être identifié clairement dans le détail quantitatif (DQ). Leur paiement, réglé lui par le cahier des charges administratif (CCAP), s'effectue généralement à raison de 50 % à l'issue de la 1^{ère} saison végétative, 30 % pour la 2^{ème} et 20 % pour la troisième et dernière saison d'entretien/garantie.

3.3.3.3 *Référence aux modèles naturels dans la restauration*

Plusieurs opérations de restauration, en particulier de type R1, s'intéressant précisément à un compartiment de l'hydrosystème, de surcroît souvent piscicole, font appel à toute une palette ou "mobilier" pour les poissons. C'est ainsi que se succèdent des amas de blocs, des caches artificielles, des radiers artificiels, des risbermes, etc.

S'il convient généralement de reconnaître une certaine efficacité de ce type d'aménagements sur la biomasse et la diversité des espèces piscicoles "retrouvées", on peut néanmoins regretter l'absence de références à des modèles naturels pour ce type d'opérations. La nature ne nous offre pas une "cartothèque" d'aménagements particuliers. Il nous paraît fondamental dans tout projet de restauration, quel que soit le niveau d'ambition choisi et le type de cours d'eau sur lequel on est appelé à travailler, de chercher à créer des ouvrages fonctionnels et surtout pérennes, à savoir des ouvrages capables d'une certaine autonomie à long terme.

Nous ne sommes pas contre la création de caches artificielles, d'amas de blocs, de risbermes en enrochements, etc., mais ces aménagements ne doivent pas être une fin en soi; ils doivent s'intégrer dans le paysage fluvial et accompagner un processus de végétalisation. Cette végétalisation sera ainsi soit directe et créée de toute pièce dans le cadre des travaux, soit spontanée et favorisée de manière indirecte par les aménagements (création de conditions adaptées à la croissance d'essences végétales riveraines par des terrassements appropriés proches de la ligne d'eau, la mise en place de substrats favorables, la création d'ouvrages déflecteurs des écoulements, etc.).

Par rapport à chaque type de cours d'eau, il existe un "idéal", une référence naturelle dont il faut s'inspirer. On peut ainsi douter de la pertinence "écologique" de la mise en place d'aménagements piscicoles en blocs dans le cadre de projets de restauration de cours d'eau s'écoulant dans des marais, des tourbières, etc.

3.4 TABLEAUX DE SYNTHESE DES FICHES

Les fiches détaillées des opérations visitées sont données dans un document annexe à la présente.

La synthèse "schématique" et succincte de ces différentes opérations est donnée ci-après sous forme de tableaux pour chacune des délégations de l'agence de l'eau RMC.

Ces tableaux reprennent ainsi les différentes variables et dénominations explicitées dans le présent rapport, à savoir la typologie des cours d'eau (HER1-HER2), une évaluation de la puissance spécifique, de la cohésion des berges et du transport solide, la description sommaire de l'opération (nom, année de réalisation), l'objectif dominant, le niveau d'ambition (R1 à R3), le niveau d'objectif (1 à 3), l'évaluation de l'atteinte de ce niveau d'objectif ceci qualitativement selon une échelle de 1 à 4 étoiles, le coût de réalisation au mètre linéaire traité ainsi qu'une évaluation qualitative de la reproductibilité de l'opération. Cette évaluation de la reproductibilité est quelque peu subjective et basée sur le gain écomorphologique atteint par rapport aux investissements financiers concédés. En effet, d'un point de vue expérimental, toute opération de restauration peut se justifier, cependant vus certains résultats, on peut émettre des doutes quant à la généralisation de telle ou telle opération à plus grande échelle et de manière systématique.

Cours d'eau	code RMC	Type rang-her1-her2	Puissance spécifique pour QJ2	Cohésion des berges	QS	Opération	Année	Travaux réalisés	Objectif dominant	Niveau d'ambition	Niveau définition objectif	Atteinte objectif (maxi : ++++)	Coût (€ HT/ml)	Reproductibilité
Drugeon amont	PCE-51	2-5-3	15 à 20	forte	faible	Restauration du Drugeon amont Bonnevaux	1997	Reméandrement	restauration globale	R3	3	+++	58	oui
Drugeon moyen	PCE-51	2-5-3	10 à 15	forte	faible	Restauration du Drugeon à Ste Colombe	2000	Reméandrement	restauration globale	R3	3	++	35	oui avec amélioration
Drugeon aval	PCE-51	2-5-3	10 à 15	forte	faible	Restauration du Drugeon à Dommarin	2005	restauration habitat	restauration habitat piscicole	R1	3	++	100	oui
Bief Rouget	(TPCE-51)	1-5-3	10 à 15	forte	faible	Restauration du bief Rouget	2001 et 2004	Reméandrement	restauration globale	R3	3	++	10	oui
Drésine et Vurpillières	PCE-51	2-5-3	30 à 40	forte	faible	Renaturation de la Basse Drésine et de la Vurpillières (lac de Rémorey)	1997 et 2000	Reméandrement	restauration globale	R3	3	+++	62	oui
Nanchez	PCE-5	2-5-3	15 à 20	forte	faible	Restauration du bief du Nanchez	1997	Reméandrement	restauration globale	R3	3	++	52	oui avec amélioration
Bienne	CEM-5	3-5-5	180 à 200	moyenne	faible	Amélioration des habitats aquatiques de la Bienne (Chassal)	2002	Blocs aménagements piscicoles, risbermes	restauration habitat piscicole	R1	3	++	245	oui
Ouche	CEM-15	4-15-81	35 à 40	faible	faible	Restauration de l'Ouche à Fauvernay	1996	Acquisitions fondrières	restauration globale	R3	2	++++	75	oui

Figure 41. Tableau de synthèse pour la délégation de Besançon.

Cours d'eau	code RMC	Type rang her1-her2	Puissance spécifique pour QJ2	Cohésion des berges	QS	Opération	Année	Travaux réalisés	Objectif dominant	Niveau d'ambition	Niveau définition objectif	Atteinte objectif (maxi : ++++)	Coût (€ HT/ml)	Reproductibilité
Ardèche	CEM-8	5-6-104	70 à 80	faible	faible	Mini-seuils à Aubenas	2001-2002	Création de mini seuils pour fixer les matériaux	restauration globale	R2	2	0	75	oui avec amélioration
Lignon	TPCE-8	3-8-71	300 à 350	moyenne	moyen à fort	Restauration d'un bras de crue à Pont de Biugnet (Jauliac - Ardèche - 07)	1998	Réouverture d'un bras	Hydraulique	R1	2	++	185	oui
Arve	GCE-53	5-5-76	70 à 80	faible	faible	Construction de seuils sur l'Arve	2001-2002 et 2004	Restauration du profil en long, acquisitions foncières	restauration globale	R2	3	+++	X	oui
Albarine	CEM 51	3-5-5	10 à 120	moyenne	faible à moyen	Déplacement de cours d'eau	1998-1999	Nouveau lit, élargissements, seuils, protections de berges végétales et mixtes	Lié à un projet routier	R2	1	++++	2500	oui

Figure 42. Tableau de synthèse pour la délégation de Rhône-Alpes.

Cours d'eau	code RMC	Type rang her1-her2	Puissance spécifique pour QJ2	Cohésion des berges	QS	Opération	Année	Travaux réalisés	Objectif dominant	Niveau d'ambition	Niveau définition objectif	Atteinte objectif (maxi : ++++)	Coût (€ HT/ml)	Reproductibilité
Vallée Obscure	(TPCE 8)	2-8-71		forte	faible	Restauration patrimoine hydraulique	2003-2006	Réhabilitation de seuils et de terrasses	soutien étiage	X	3	?	X	non
Gardon Masillargues Attuech	CGE-62	5-6-104	50 à 60	faible	moyen à fort	Aménagement du Gardon à Marsillargues	1991	Abaissment du lit majeur	restauration ancien site d'extraction	R2	3	++	60	non
Vistre à Bouillargues	PCE-61	3-6-105	10 à 15	moyenne	faible	Réhabilitation du Vistre / Site pilote de Bouillargues	2003-2004	Terrassement méandrique en déblai et végétalisation	restauration globale	R2	2	+++	312	oui
Vistre à la Bastide	PCE-61	3-6-105	10 à 15	forte	faible	Réhabilitation du Vistre / Site pilote de la Bastide	2004	Terrassement en déblai et végétalisation	hydraulique + restauration	X	2	++	444	oui
Buffalon	PCE-61	2-6-105	15 à 20	moyenne	faible	Renaturation du Buffalon	2004	Terrassement, aménagements piscicoles et végétalisation	restauration globale	R2	2	+++	355	oui
Cubelle	TPCE-61	1-6-105	5 à 10	forte	faible	Réhabilitation de la Cubelle à Gallargues Le Montueux	2002	Végétalisation	restauration globale	R1	2	++	35	oui
Vidourle	CEM-61	5-6-105	40 à 50	moyenne	faible	Réhabilitation des bras morts et annexes du Vidourle	2001	Terrassement de bras et végétalisation	restauration globale	R1	2	+	X	mitigé

Figure 43. Tableau de synthèse pour la délégation de Montpellier.

Délégation de Marseille											
Cours d'eau	code RMC	Type rang-her1-her2	Puissance spécifique pour QJ2	Cohésion des berges	QS	Opération	Année	Travaux réalisés	Objectif dominant	Niveau d'ambition	Niveau définition objectif
Colostre	TPCE 6	4-6-56	800 à 900	moyenne	faible à moyen	Réhabilitation du Colostre	1999-2003	Reméandrement	restauration globale	R3	2
											Atteinte objectif (maxi : ++++)
											Coût (€ HT/ml)
											Reproductibilité
											X
											oui
Hors bassin RMC											
Cours d'eau	code RMC	Type rang-her1-her2	Puissance spécifique pour QJ2	Cohésion des berges	QS	Opération	Année	Travaux réalisés	Objectif dominant	Niveau d'ambition	Niveau définition objectif
Aire			30-40	moyenne	faible	Revitalisation	2002	Démolitions, terrassements, végétalisation	Restauration globale	R3	3
											Atteinte objectif (maxi : ++++)
											Coût (€ HT/ml)
											Reproductibilité
											780
											oui

Figure 44. Tableaux de synthèse pour la délégation de Marseille et hors bassin RMC.

4

EXEMPLES ETRANGERS ET HORS BASSIN RMC

Nous donnons ci-après quelques exemples de travaux de restauration fonctionnelle globale (niveau d'ambition type R2 ou R3), les travaux purement piscicoles étant déjà bien connus depuis de longues années. Il s'agit ainsi d'exemples allemands, qui apparaissent comme les pionniers dans ce domaine, puis quelques exemples suisses, italiens ainsi que français hors bassin RMC.

En ce qui concerne des exemples anglo-saxons, le lecteur intéressé pourra se documenter sur un site internet qui permet de télécharger gratuitement un ouvrage de synthèse très bien fait (*Manuel of River Restoration Techniques* : <http://www.therrc.co.uk/manual.php>).

4.1 EXEMPLES ALLEMANDS

Les "pionniers" de la restauration des cours d'eau sont probablement les allemands, suivis de près par les suisses et les anglais.

Dès la fin des années 70, suite à la prise de conscience du fort état de dégradation d'un linéaire important de cours d'eau, plusieurs scientifiques et techniciens travaillant sur la gestion des cours d'eau (Binder (1979)), ont proposé de "renaturer" certains cours d'eau particulièrement altérés. Il faut admettre que tant les allemands que les suisses étaient allés aussi très loin en matière d'altération des cours d'eau... Des centaines voire des milliers de kilomètres de cours d'eau rectifiés, recalibrés mais aussi "bétonnés" tant sur le fond que sur les berges et parfois même couverts par des dalles de béton et ce même en milieu rural. La réaction a donc été proportionnelle à l'état de dégradation des milieux.



Figure 45. Exemple de rivières chenalisées en Allemagne. (Handbuch Wasserbau, 1992).

4.1.1 Les pionniers

4.1.1.1 *Le Holzbach*

Le premier exemple de renaturation que nous avons pu trouver est celui du Holzbach en Rhénanie (d'après Tricot, 1989). Il s'agissait de restaurer un lit plus naturel en lieu et place du lit rectifié et recalibré au début du 20^{ème} siècle tout en évitant l'incision du lit et l'érosion des terrains riverains. Il fallait aussi que le "nouveau" cours d'eau demande le moins d'entretien possible. La longueur cumulée de la restauration réalisée est de 4 km.

On constate sur la figure suivante que le résultat est sans conteste intéressant mais l'aspect géomorphologique général (non respect des amplitudes et longueur d'onde d'équilibre) ressemble un peu à un jardin japonais.

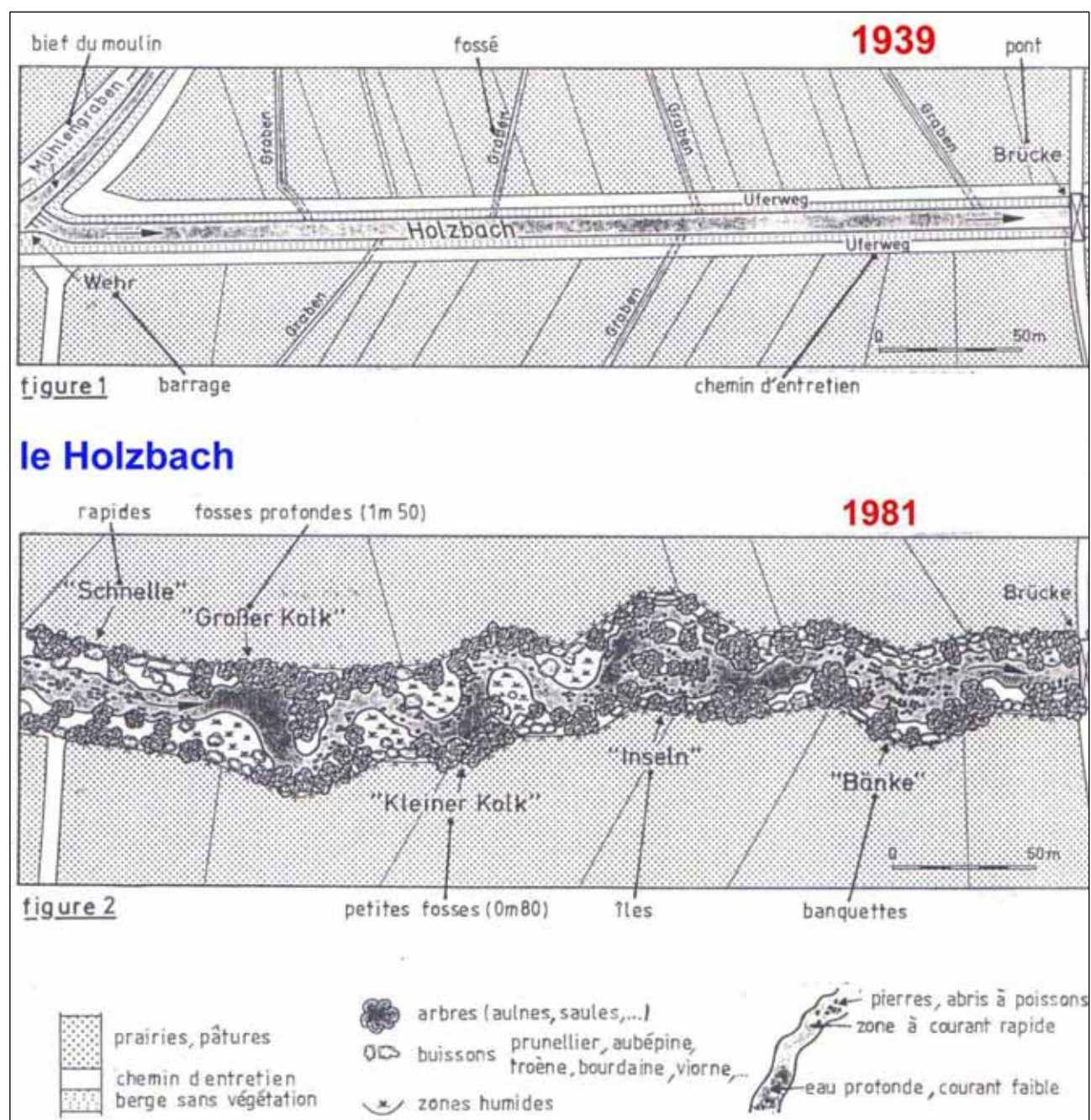


Figure 46. Renaturation du Holzbach (in Tricot, 1989). Niveau d'ambition R2.

4.1.1.2 *La Wandse à Hamburg*

Les méandres de ce cours d'eau à faible puissance (de l'ordre de 10-15 W/m²) avait été fortement rescindés au milieu du 20^{ème} siècle.

Un projet de renaturation a donc été bâti en 1981 avec pour objectif la reconquête, sur environ 1 Km, du fonctionnement physique et écologique naturel du cours d'eau.

Le principe avait été de recreuser les anciens méandres à partir de leur tracé retrouvé sur une carte antérieure aux rescindements. Un certain nombre d'indicateurs biologiques et notamment une végétation particulière (*Caltha palustris*, *Carex sp.*, *Phragmites communis*) permettait aussi de localiser encore assez facilement les anciens méandres sur le terrain.

Sur ce cours d'eau, il avait été décidé de conserver les anciennes portions rectilignes pour deux raisons :

- elles abritaient malgré tout une certaine quantité de faune aquatique (poissons, amphibiens et batraciens) et la recolonisation du nouveau lit en serait facilitée;
- elles fonctionneraient par la suite comme des "bras morts"

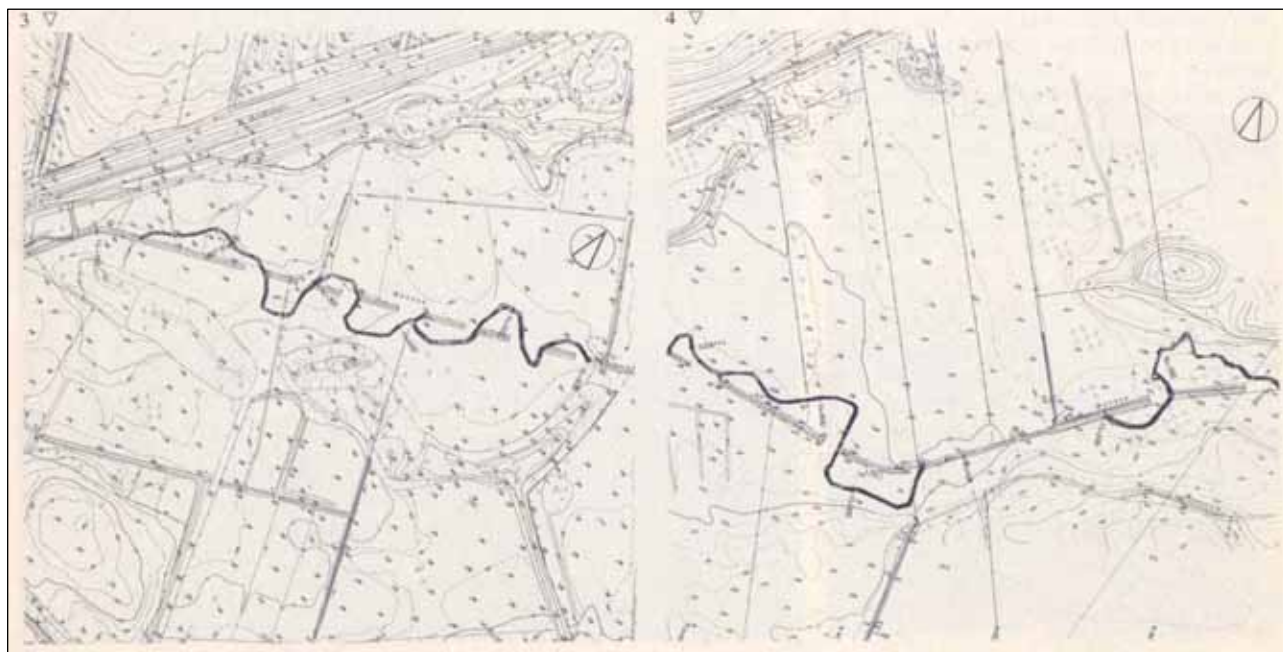


Figure 47. Avant-projet du reméandrage (Glitz, 1983). Niveau d'ambition R3.



Figure 48. Vue à la fin des travaux en février 1982 (Glitz, 1983). Niveau d'ambition R3.

4.1.1.3 ***La Stelle***

Sur ce cours d'eau la renaturation est indirectement liée à une stabilisation de berges, réalisée pour protéger des prairies. Dans le cadre de cette protection, il a été décidé de laisser la végétation naturelle s'implanter dans le lit mineur ainsi que sur les berges.

Cinq ans après les travaux, hormis l'absence de dynamique latérale du fait des protections, le milieu a retrouvé une physionomie quasi-naturelle.



Figure 49. La Stelle : rôle de la végétation dans la restauration des milieux. (Handbuch Wasserbau, 1992). Niveau d'ambition R2.

4.1.2 Des exemples récents

Depuis les années 80, le linéaire de cours d'eau renaturés augmente régulièrement en Allemagne. De nombreux projets restent néanmoins "pilotes".

4.1.2.1 *La Sulzbächle*

Là encore, l'objectif très général est le retour à un état et un fonctionnement plus naturel. Là encore l'état initial est excessivement dégradé et la première étape de la restauration a consisté à casser, enlever et mettre en décharge les plaques de béton.



Figure 50. La Sulzbächle avant restauration (vue lors d'un étiage très sec) (Handbuch Wasserbau, 1992).

Comme souvent dans les travaux réalisés en Allemagne, il ne s'agit pas de redonner une totale liberté à la rivière mais plutôt de lui recréer un minimum d'espace, un "corridor" alluvial naturel, duquel elle ne devra pas s'écarter.



Figure 51. La Sulzbächle après restauration (1990) (Handbuch Wasserbau, 1992). Niveau d'ambition R3.

4.1.2.2 *L'Alb*

Il s'agit là d'un petit projet très localisé au droit d'un franchissement routier. L'objectif était une restauration à la fois écologique et paysagère.



Figure 52. Vue du site avant (1987) et après travaux (1989) (Handbuch Wasserbau, 1992). Niveau d'ambition R2.

4.1.2.3 *L'Enz à Pforzheim*

Là encore, en traversé urbaine, l'objectif affiché était mixte et devait concilier les aspects écologiques et paysagers, tout en garantissant la capacité hydraulique du cours d'eau.

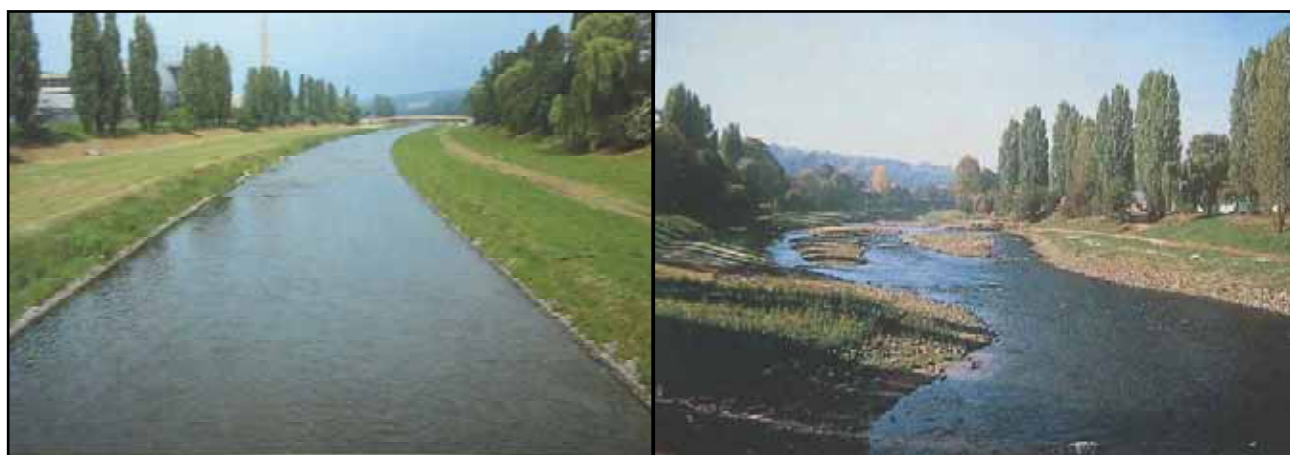


Figure 53. Vue du site avant (1987) et après travaux (1989) (Handbuch Wasser 2, 1995). Niveau d'ambition R2.

4.1.2.4 *L'Isar à Munich*

Initialement en tresse même en pleine ville (figure ci-dessous, extraite de Binder 2006)), l'Isar avait été rectifié, endigué, curé dès le début du 19^{ème} siècle. Son corsetage s'était poursuivi ensuite jusqu'au milieu du 20^{ème} siècle, par un endiguement étroit généralisé selon le principe que l'on retrouve tout le long de la moyenne vallée (exemple ci-après du secteur de Freising).

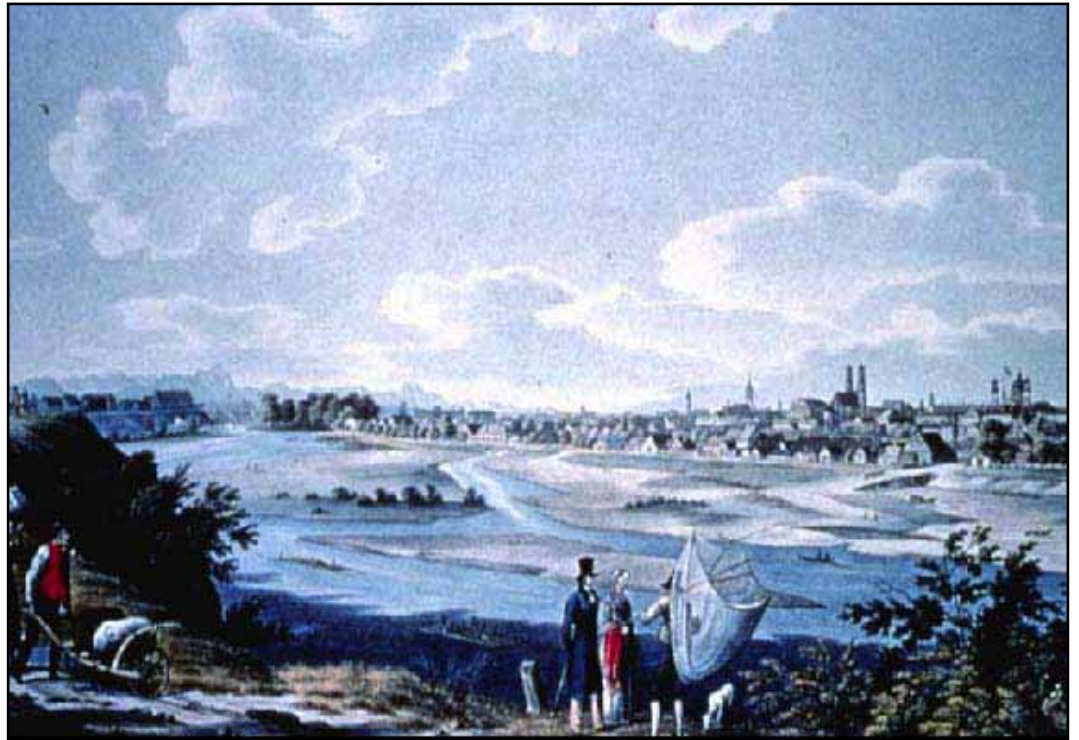


Figure 54. L'Isar à Munich en 1832 (Binder, 2006).

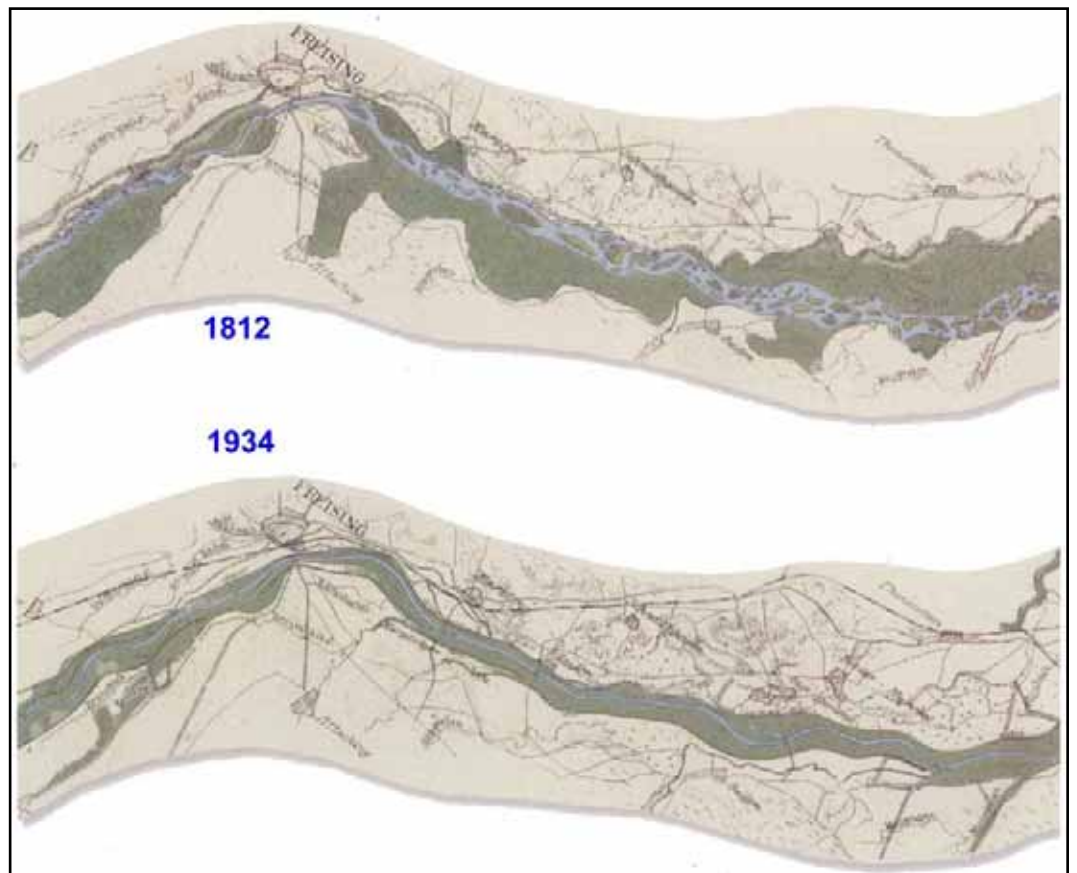


Figure 55. La chenalisation de l'Isar à Freising (Binder, 2006).



Figure 56. L'Isar à Munich aujourd'hui (Binder, 2006).

La prise de conscience de l'état de dégradation écologique et paysager de l'Isar a conduit la municipalité de Munich à se lancer en 1998 dans un ambitieux projet de renaturation. L'objectif affiché était clairement la reconquête d'un fonctionnement le plus naturel possible.

Les principes techniques étaient simples :

- recul de certaines digues;
- suppression des berges en béton et aplanissement de celles-ci;
- suppression de certains seuils;
- élargissement du lit moyen;
- réaménagement de prairies alluviales;
- apport de sédiments grossiers provenant de l'amont.

Les travaux de restauration, prévus sur environ 8 km, ont débuté en 2000 et se sont achevés en 2005.



Figure 57. Exemple de tronçon restauré sur l'Isar à Munich (Binder, 2006). Niveau d'ambition R2.

Outre une nette amélioration de la qualité écologique et paysagère, ainsi que de la qualité physico-chimique des eaux, le lit moyen de l'Isar renaturé est devenu aujourd'hui un site important pour les loisirs et la promenade.



Figure 58. Exemple de tronçon restauré sur l'Isar à Munich (Binder, 2006). Niveaux d'ambition R2-R3.

4.2

EXEMPLES SUISSES

A la différence de la France notamment, de très nombreux cours d'eau suisses ont subi des actions particulièrement traumatisantes, et ceci même dans des secteurs peu urbanisés (chenalisations, rescindements de méandres, mises sous tuyau, "bétonnages" du fond du lit et des berges, etc.), fréquemment dans le cadre de programmes d'occupation de chômeurs dans l'entre-deux guerres.

De ce fait, beaucoup d'opérations de restauration voient le jour depuis une vingtaine d'années, avec un souci majeur de "décorrection", n'intéressant pas uniquement un compartiment de l'hydrosystème. Il s'agit bien d'opérations de niveau R2 ou R3, plus particulièrement R2, puisque le foncier est "cher" et donc les espaces dévolus aux milieux fluviaux néanmoins relativement limités. Il s'agit souvent de projets dits de "compensation écologique" liés à des impacts avérés d'autres grands projets (routiers, remembrements, lignes à haute tension, terrains de golfs, etc.).

La législation en vigueur prévoit plusieurs instruments relevant de l'aménagement du territoire, de l'agriculture, de la protection de l'environnement et de l'économie des eaux pouvant servir à réserver un espace nécessaire pour les cours d'eau (voir encadré).



*Pour en savoir plus (source **un nouveau défi, réserver de l'espace pour les cours d'eau**. Brochure éditée par l'Office fédéral des eaux et de la géologie, en collaboration avec l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, l'Office fédéral de l'agriculture et l'Office fédéral de l'aménagement du territoire; Berne, mai 2000).*

- ⇒ *En effet, la loi (fédérale suisse) sur l'aménagement des cours d'eau exige que la protection contre les crues soit liée à des solutions écologiques et à la remise à l'état naturel des cours d'eau. La loi sur la protection des eaux vise à préserver les eaux des atteintes nuisibles. La loi sur l'agriculture prévoit une incitation financière à l'exploitation extensive sous la forme de paiements directs. D'autres conditions-cadre sont formulées dans la loi sur la protection de la nature et du paysage et dans la loi sur la pêche.*
- ⇒ *Conformément à l'art. 21 de l'ordonnance fédérale suisse sur l'aménagement des cours d'eau, les cantons (équivalents des départements français) doivent tenir compte des besoins d'espace des cours d'eau dans leurs plans directeurs et dans leurs plans d'affectation ainsi que dans d'autres activités ayant des effets sur l'organisation du territoire.*



⇒ Pour mémoire, les directives de la Confédération helvétique définissent 4 "zones" en relation avec l'espace réservé aux cours d'eau et toutes les fonctions et usages qui les accompagnent :

- **le fond du lit** correspond environ à la largeur du plan d'eau à niveau d'eau moyen. A l'état naturel, il présente une structure diversifiée et offre de nombreux habitats aux plantes aquatiques, aux poissons, oiseaux et autres animaux. Le fond du lit constitue la valeur de référence pour la détermination de la largeur de la zone riveraine et de la bande de divagation. Dans le cas de cours d'eau artificialisés, la largeur naturelle du fond du lit est estimée d'après les tronçons de référence restés à l'état naturel;

- **la zone riveraine** (berges incluses) sert d'habitat à une multitude d'espèces animales et végétales spécialisées. Selon la largeur du fond du lit, la zone riveraine doit s'étendre entre 5 à 15 m de part et d'autre afin d'assurer ses fonctions. A partir de 15 m, on admet qu'elle constitue un biotope riverain autonome.

Bande tampon : selon l'ordonnance sur les substances, les produits pour le traitement des plantes ainsi que les engrais ne doivent pas être utilisés sur une bande de 3 m de part et d'autre des eaux superficielles. Cette bande tampon est comprise dans la zone riveraine.

Dans les régions où l'apport de nutriments provenant de la zone agricole attenante est trop élevé (forte pente, exploitation intensive, protection insuffisante contre l'apport de nutriments, p. ex. absence de végétation appropriée ou de digue), la bande tampon doit être élargie (valeur égale, voire supérieure à celle de la zone riveraine);

- **une bande de divagation** qui comprend l'emprise nécessaire à la formation naturelle des méandres. Elle devrait atteindre au moins 5 à 6 fois la largeur du fond du lit naturel.

Toutefois, on ne délimitera une bande de divagation que si l'on entend maintenir ou rétablir la dynamique naturelle du cours d'eau et qu'aucun conflit d'intérêt majeur ne s'y oppose;

- **un espace récréatif**; les cours d'eau présentent un attrait particulier en tant qu'espace récréatif, notamment lorsqu'ils sont facilement accessibles. Il convient donc de prévoir un espace supplémentaire d'au moins 3 m (p. ex. pour des chemins) sur les tronçons situés à proximité de zones d'habitation ou longeant des itinéraires traditionnels de randonnée pédestre ou des pistes cyclables. Par ailleurs, il importe de réserver suffisamment de place pour les pique-niques et les jeux. Ces mesures augmentent encore la valeur récréative des cours d'eau.

4.2.1 Aménagement hydroécologique de la Chèvre (canton du Jura)

En 1989, un premier projet général de réaménagement hydroécologique de la Chèvre a été réalisé sur l'ensemble de la commune de Montsevelier.

En 2001, le projet de construction d'un trottoir dans le village de Montsevelier provoque le besoin de déplacer le cours d'eau d'environ 2 m, de manière à éviter la création d'une berge en dur (béton/enrochement) du côté de la route.

Par la même occasion, le ruisseau de la Chèvre a pu être restauré sur un linéaire de 350 m, grâce notamment à l'acquisition par la commune des terrains avoisinants. Ceci a permis de redonner un certain espace de liberté au cours d'eau ainsi qu'une nouvelle identité paysagère.



Figure 59.

En haut à gauche : (14.08.01) Etat initial après abattage et décapage de la terre végétale.

En haut à droite : 18.04.02) Grâce au terrain acheté par la commune, un espace de liberté de 30 m environ a pu être créé pour le ruisseau de la Chèvre; le bras-mort visible sur la photo est constitué en partie par l'ancien tracé du ruisseau.

En bas à gauche : (05.05.02) L'emprise importante donnée à la Chèvre permet une expansion des crues et participe ainsi à la diminution des débits de pointe par effet de rétention.

En bas à droite : (08.07.02) Evolution de l'aménagement avec la possibilité pour la Chèvre de modeler elle-même son nouveau lit (photos Biotec).

Niveau d'ambition R3.

4.2.2 Réaménagement de la Vendline (canton du Jura)

La Vendline était constituée d'éléments en béton mis en place dans les années 1930, formant des tronçons canalisés rectilignes utilisés comme évacuateur des eaux usées ou des drainages agricoles. Il en résultait une très mauvaise qualité d'eau, ainsi qu'un milieu et une végétation uniforme sans possibilité d'autoépuration ni de développement important de la vie.

Lors de la construction de la station d'épuration pour les communes de Vendlincourt et de Bonfol, un réaménagement à titre compensatoire de la Vendline a été entrepris sur une distance de 3.8 km. Le projet avait pour objectifs de redonner un aspect et un fonctionnement plus naturel à ce cours d'eau, tout en gardant les mêmes emprises cadastrales, soit 6 mètres.



Figure 60. A gauche : (12.08.97) Ruisseau canalisé avec végétation banale et autoépuration inexistante. Au centre : (08.09.98) Etat à la fin des travaux. Un léger méandrage a été créé avec maintien de l'emprise initiale. A droite : (27.05.99) Etat du ruisseau après une saison. Développement des espèces typiques des berges de cours d'eau avec autoépuration retrouvée (photos Biotec). Niveau d'ambition R2.

4.2.3 Réaménagement de la Cornoline (canton du Jura)

Dans le cadre du remaniement parcellaire (remembrement) de Cornol, une emprise de 10 à 12 m sur un linéaire de 1'400 m a été réservée pour le réaménagement de la Cornoline en tant que compensation écologique.

Grâce à cette emprise relativement importante, le béton formant le lit et les pieds de berge a pu être évacué et les berges fortement adoucies. La berge gauche a été stabilisée à l'aide des techniques du génie biologique afin de protéger la canalisation des eaux usées du syndicat des eaux, tandis que la berge droite a été en majeure partie "simplement" végétalisée. Ceci permet à la Cornoline d'obtenir un certain espace de liberté.



Figure 61. A gauche : (14.02.00) Etat de la Cornoline avant travaux avec pieds de berge et seuils en béton, tracé rectiligne et végétation très peu diversifiée. Au centre : (27.09.01) Etat à la fin des terrassements avec la création de berges en pente douce et variées, ainsi que la création d'îlots. A droite : (10.06.02) Etat une année après les travaux avec le développement des plantes hélophytes (semi-aquatiques) qui permettent de stabiliser les pieds de berge et de diversifier la flore locale (photos Biotec). Niveau d'ambition R2.

4.2.4 Restauration du Rhône entre Leuk et Sierre (canton du Valais)

Source : brochure PRO NATURA "Davantage d'espace pour nos cours d'eau, pour l'homme et la nature", 1998, Biotec/Pro Natura.

Longueur du tronçon aménagé : env. 8'000 m
 Largeur du lit mineur : avant 50-200 m / après 200-600 m
 Débit de projet : $Q_{100} = 1'080 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit de débordement $1'320 \text{ m}^3/\text{s}$)
 Pente : 10 ‰
 Surface du bassin versant : 2'466.6 km²

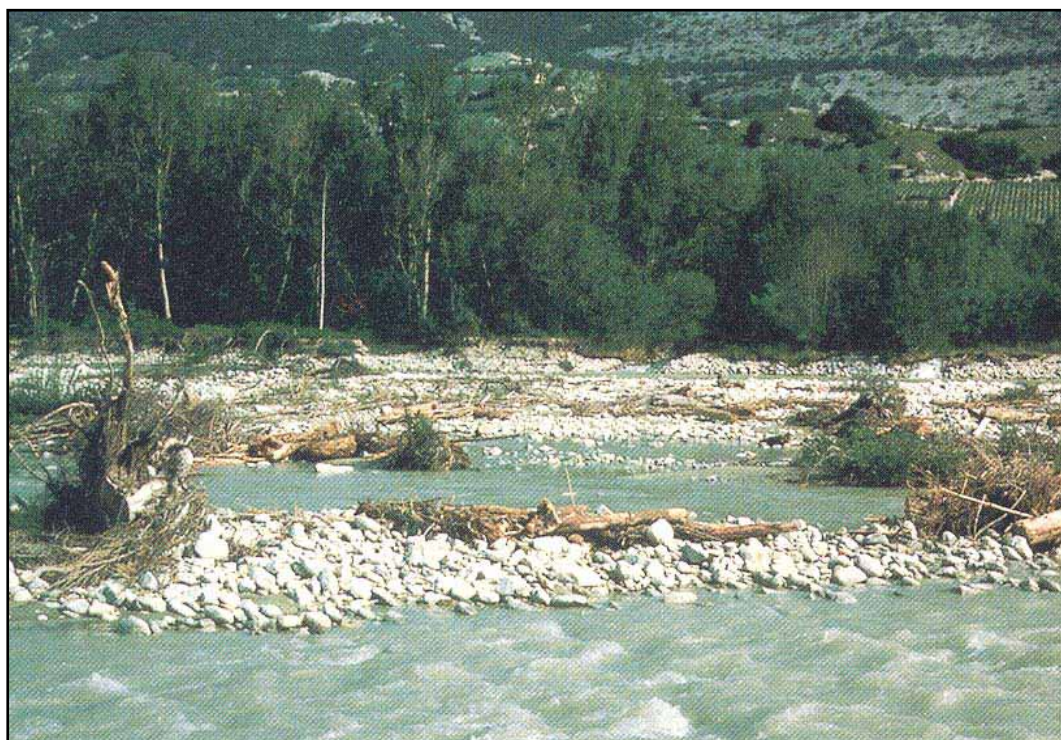


Figure 62. Illustration du réaménagement. Source : Pro Natura, Philippe Werner. Niveau d'ambition R3.

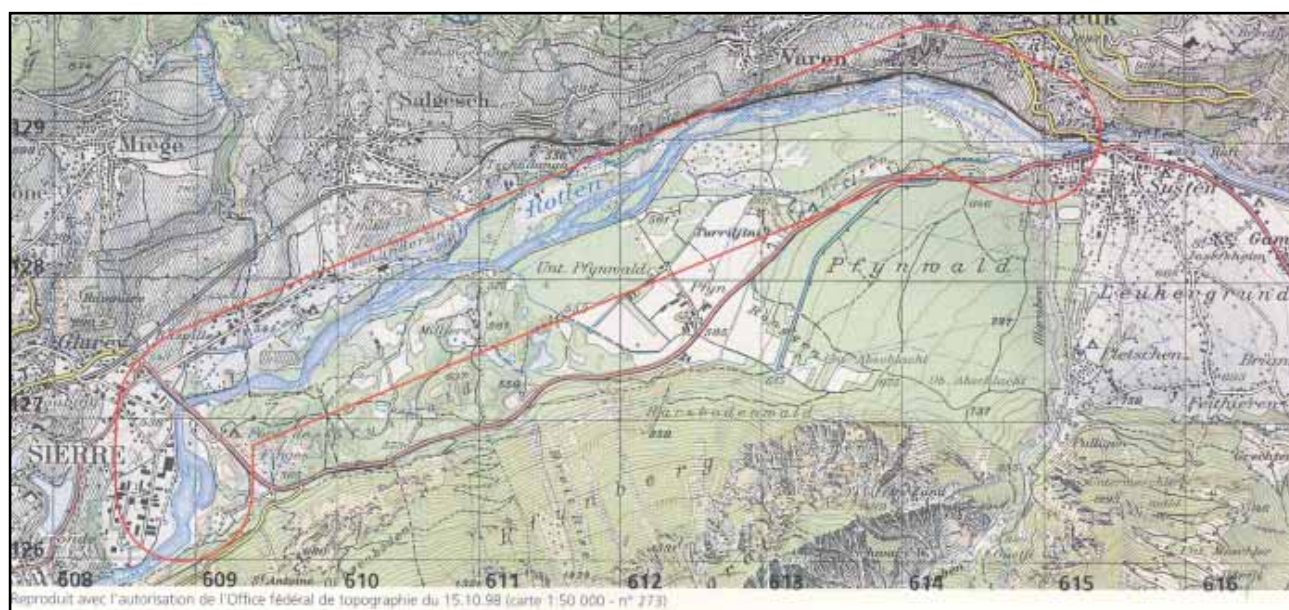


Figure 63. Localisation du secteur restauré. Source : Pro Natura.

Problématique

Le Rhône à Finges, dernier tronçon suisse corrigé, conserve une allure sauvage. Inclus dans l'inventaire des paysages d'importance nationale (CPN 3.73) depuis 1963, ce tronçon de fleuve est devenu, en 1992, la 5^{ème} zone alluviale d'importance nationale de Suisse par sa dimension. Son cours d'eau torrentiel en amont impose des mesures de protection contre les crues pour les villages, exploitations et équipements voisins. Après une vingtaine d'années de conflits entre responsables de la sécurité et protecteurs de la nature, ingénieurs et biologistes appliquent aujourd'hui une stratégie novatrice.

Historique

La dérivation de plus de 60 m³/s pour la production hydroélectrique au début du siècle passé et l'aménagement de digues dans les années 1960 ont réduit de moitié la surface soumise régulièrement à la dynamique alluviale, provoquant une fermeture des boisements. Dans le lit actif résiduel d'une largeur moyenne de 200 m, l'ouverture de trois exploitations de graviers a encore accentué le recul des biotopes pionniers, bancs de sables et de graviers, brousses de saules. Lors des crues de 1976, 1987 et 1993, les eaux qui avaient rompu les digues dans la partie amont du site, ont été piégées à l'extérieur des digues, recouvrant alors cultures et habitations.

Buts

Faisant suite aux propositions du Plan de protection élaboré en 1984 par Pro Natura, le canton du Valais a mis en œuvre une nouvelle stratégie de gestion du Rhône sauvage de Finges. Celle-ci coordonne les compensations de l'autoroute A9, les impératifs de l'Ordonnance sur les zones alluviales et les mesures de restauration des dégâts de la crue de 1993. Désormais, la sécurité est assurée par des mesures favorisant la conservation et le rétablissement des richesses naturelles et paysagères. Les mesures prévues jouent avec la force du fleuve, plutôt que contre elle. Les digues sont progressivement éloignées du lit actif pour donner une plus grande liberté au fleuve. Et, finalement, les impératifs de la sécurité et de la dynamique alluviale sont conciliés grâce à une extraction ciblée des matériaux apportés par l'Illgraben (environ 500'000 m³/an).

Mesures entreprises

Le concept de protection contre les crues prévoit :

- un léger abaissement du profil en long du lit actif dans la partie amont de Finges;
- la réouverture d'anciens bras secondaires, envahis par la forêt, pour permettre l'écoulement des crues éventuelles;
- la construction d'une arrière-digue en limite de la zone alluviale;
- la suppression des digues qui bordent le lit actif.

Le concept théorique est ajusté en fonction des résultats des essais effectués sur le site depuis 1994. La nouvelle gestion des graviers a déjà permis de supprimer certains enrochements et a favorisé les espèces liées aux surfaces jeunes : petite massette, tamarin, petit gravelot.

4.2.5 Restauration du Chrebsbach (canton de Zürich)

Source : brochure PRO NATURA "Davantage d'espaces pour nos cours d'eau, pour l'homme et la nature", 1998, Biotec).

Données de base

Maître d'ouvrage : canton de Zürich
Partenaire engagé : canton de Zürich
Années de réalisation : 1994-1995



Figure 64. Illustration du réaménagement. Source : ILU Ottomar Lang AG. Niveaux d'ambition R2-R3.

Longueur du tronçon aménagé : 500 m
Surface concernée : 15'000 m²
Débit de projet : 25 m³/s
Pente : 2-7 ‰
Surface du bassin versant : 17.4 km²

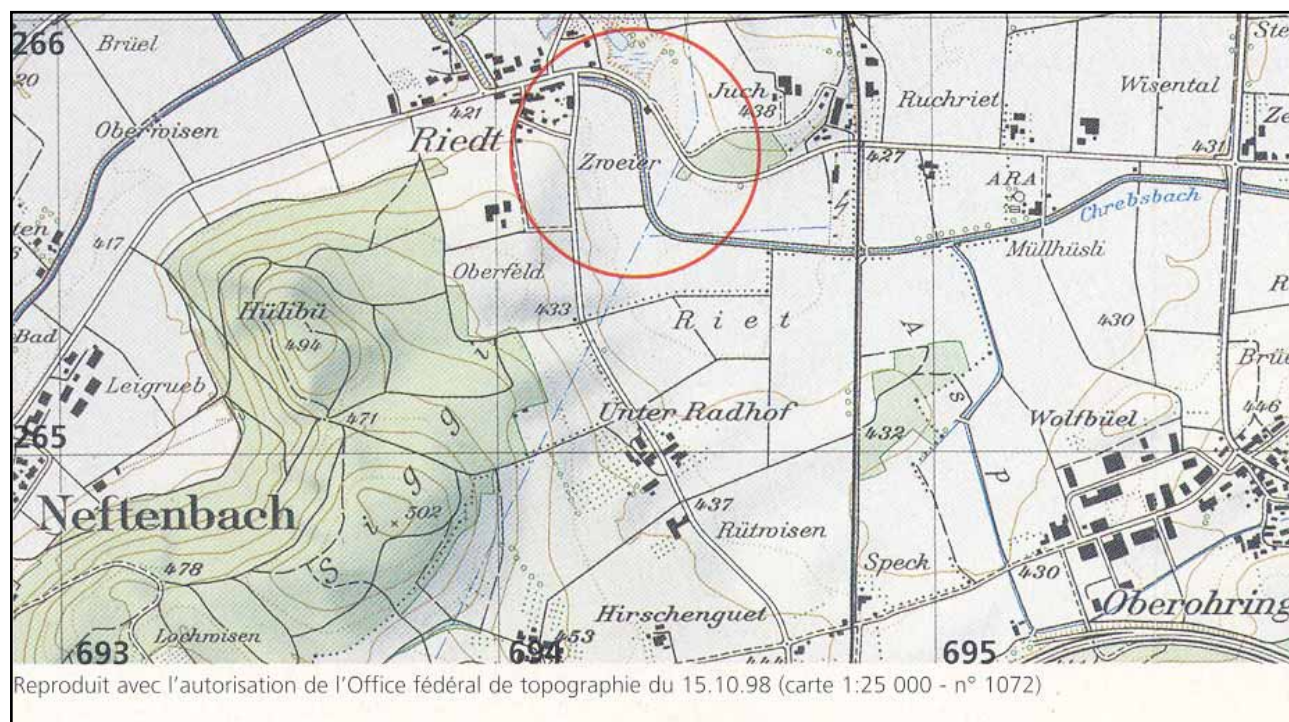


Figure 65. Localisation du secteur restauré. Source : Pro Natura.

Historique

Pour revitaliser restaurer les cours d'eau du canton de Zurich, le Conseil d'Etat a accordé en 1989 un crédit de base de 18 millions de francs (~ 12 millions d'euros). 628 tronçons de cours d'eau, s'étendant sur une longueur de 563 kilomètres, méritaient une revitalisation. Or, à ce jour (1998), la moitié du crédit a été utilisée ... pour revitaliser restaurer 15 kilomètres. La loi cantonale sur l'économie des eaux, entrée en vigueur en 1993, privilégie les techniques respectueuses de la nature dans les travaux d'aménagement hydraulique.

Problématique

Pendant les années 1970, le Chrebsbach a été canalisé, et son lit stabilisé et colmaté avec des blocs. Suite à ces travaux, le niveau de la nappe s'est abaissé, réduisant la potentialité d'approvisionnement en eau potable.

Buts

Compensation de l'autoroute A 4.2. Grâce à un remaniement parcellaire (remembrement), une surface de 2 ha a pu être confiée au canton. Parallèlement à la revitalisation du cours d'eau, deux étangs ont été aménagés. Les buts de la revitalisation sont :

- création d'un nouveau tracé du cours d'eau, avec une morphologie proche de celle d'un cours d'eau naturel;
- rehaussement du niveau du lit et augmentation générale du gabarit afin de donner plus d'espace au cours d'eau et des possibilités de divagation;
- protection de certaines berges par des techniques végétales (fascines, plantations);
- évacuation partielle des matériaux constituant l'ancien lit;
- protection du fond du lit avec des interventions minimales dans les derniers 200 mètres.

4.3 EXEMPLES ITALIENS

En Italie, les projets de restauration de cours d'eau sont encore rares. Plus souvent, il s'agit de réalisations dites environnementales qui font recours à des techniques du génie végétal (ou techniques combinées) pour stabiliser les berges, sans souci premier de la création d'une grande diversité d'habitats.



Figure 66. Rivière "Pesa" à Montelupo Fiorentino, province de Florence; illustration de technique végétale réalisée en protection de berge de cours d'eau; illustration de gauche avant les travaux, au centre en chantier puis à droite lors de la reprise végétale. Source : bureau IRIS, stratégie pour l'environnement, Maurizio Bacci (www.irisambiente.it).



Figure 67. Rivière "Esino" à Jesi, province d'Ancône; illustration de techniques combinées en protection de berge de cours d'eau; illustration de gauche avec une érosion dynamique avant travaux, au centre des épis déflecteurs en cours de réalisation et à droite peu de temps après le chantier. Source : bureau IRIS, stratégie pour l'environnement, Maurizio Bacci (www.irisambiente.it).

Mais comme en France, le génie biologique est appelé à ne devenir "qu'un outil" au service de la restauration des cours d'eau et de moins en moins un but en soi. La prise en compte environnementale des problèmes a amené le gouvernement italien à définir de nouvelles normes s'intéressant à la préservation et à la valorisation des systèmes alluviaux. C'est ainsi que dans les études de projets d'aménagement de cours d'eau, a été défini un "fascia di mobilité funzionale" (FM).

Cet "espace de mobilité fonctionnelle" s'intéresse à rechercher les différents tracés historiques du cours d'eau considéré dans un passé récent (~ 50 ans) pour en déduire les surfaces d'érosion potentielle, le but étant de démolir à court ou à moyen terme les structures existantes se trouvant à l'intérieur de cet espace de mobilité.

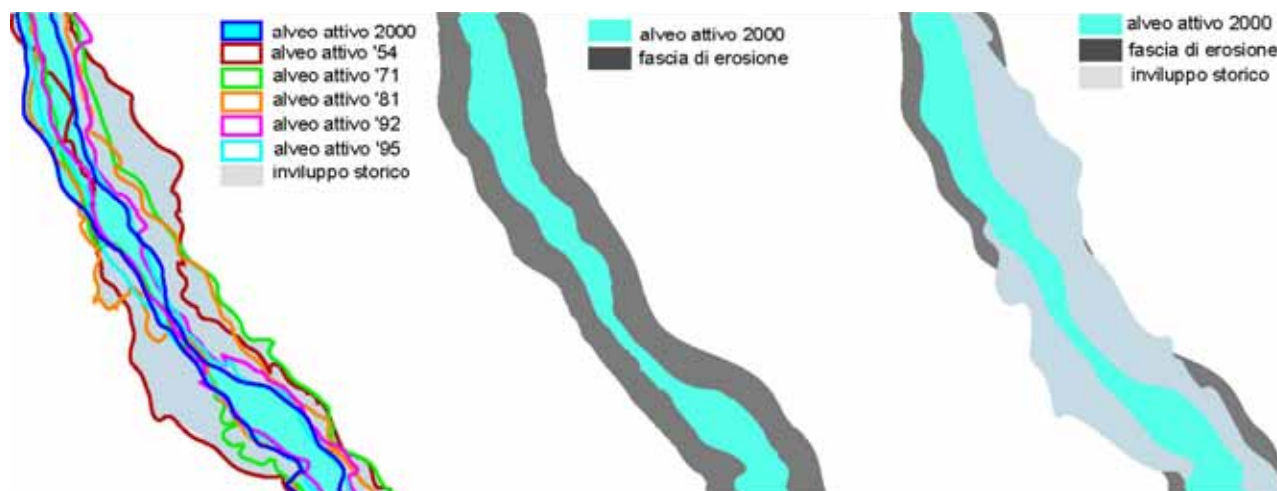


Figure 68. Délimitation de "l'espace de mobilité fonctionnelle" sur la rivière "Vara", avec à gauche les zones de mobilité des 50 dernières années, au centre la surface d'érosion potentielle et le lit actuel du cours d'eau et à droite la zone de mobilité fonctionnelle intégrant les différentes surfaces vues précédemment. Source : université de Florence, M. Rinaldi.



Figure 69. Restauration et report de digues sur la rivière "Zero", dans le but de réduire les apports de nutriments dans la lagune de Venise, en améliorant les capacités auto puratoires des formations végétales riveraines (source : photos B. Baldo, de la part de Bruno Boz, CIRF; Centro Italiano per la Riqualificazione Fluviale : www.cirf.org).

4.4 EXEMPLES FRANÇAIS HORS BASSIN RMC

4.4.1 Aménagement de l'ancienne retenue du barrage de Kernansquillec suite à son arasement

En 1920, débute la construction d'un barrage sur le Léguer à Kernansquillec (aval de Belle-Ile-en-Terre dans le département des Côtes d'Armor) dans un but de production d'électricité destiné à l'alimentation de papeteries. Terminé en 1923, le barrage mesure 15 mètres de hauteur pour une largeur de 110 mètres, délimitant un plan d'eau de quelques 12 hectares.

Dès 1965, l'avenir économique des papeteries est incertain, celui du barrage de Kernansquillec également. Propriété d'une société privée, le barrage revient à l'état en 1994, la concession n'ayant pas été renouvelée. Plusieurs associations souhaitent sa destruction, ceci pour des raisons environnementales (obstacle au transit des poissons migrateurs, notamment les saumons et les anguilles, malgré la présence d'un ascenseur, envasement considérable de la retenue, pollutions lors des vidanges, etc.). De plus, faute d'entretien, le barrage connaît de graves fissures, représentant une menace directe pour les populations à l'aval en cas de crue (lors de la crue de février 1995, des habitants ont dû être évacués d'urgence), ce qui va entraîner la décision de son démantèlement.

Bien que nécessaire pour garantir la sécurité publique et bénéfique pour l'écologie des milieux, le démantèlement du barrage ne fait pas l'unanimité. C'est pourquoi une action particulière de communication et d'information est mise en place. Puis, entre élus, pouvoirs publics et associations, tout le monde s'accorde pour faire de l'ancienne retenue un lieu de découverte de l'environnement, d'animation et de loisirs, présentant une très grande richesse au niveau de ses paysages, de sa faune et de sa flore.

Le démantèlement du barrage débute en 1996, avec la vidange très lente de la retenue pour limiter les pollutions à l'aval. Le Léguer devant reprendre son cours, les sédiments déposés au fil des ans dans l'ancienne retenue sont prélevés dans l'ancien chenal du cours d'eau puis évacués par "aspiro-dragage" et décantés dans des lagunes préparées spécialement à cet effet.

Une pêche électrique de sauvegarde est néanmoins effectuée à l'aval par précaution. Le barrage est ensuite démonté.

L'aménagement de l'ancienne retenue de Kernansquillec peut alors commencer. Les sédiments (boues asséchées) créent un paysage inaccessible constitué de crevasses et d'hectares d'orties. Un plan d'aménagement sectoriel est ainsi mis en place pour guider et accompagner les processus naturels de recolonisation végétale. C'est ainsi que certains secteurs sont laissés en l'état, notamment sous forme d'annexes hydrauliques. D'autres tronçons du Léguer, fortement exposés à l'érosion (susceptible d'entraîner des sédiments fins), sont stabilisés avec des techniques végétales. De grandes surfaces de l'ancienne retenue ont été labourées en profondeur pour supprimer les crevasses, puis ensemencées en prairies naturelles et en pâturages extensifs. L'ancienne retenue ou la "Vallée renaissante" a été ouverte à la fréquentation du public, avec la mise en place de plusieurs cheminements. Les saumons fraient à nouveau sur le site et la loutre est également présente.



Figure 70.

Vue de l'ancienne retenue après sa vidange et du barrage de Kernansquillec en cours de démolition. Source : brochure du Ministère de l'écologie et du développement durable.



Figure 71.

Vue des travaux de labour en cours sur la photo de gauche (09.05.2001) puis des prairies riveraines fraîchement reconstituées en bordure du Léguer à droite (07.09.2001). Photos Biotec.



Figure 72. Illustrations de la diversité des milieux et des faciès retrouvés quatre ans après les travaux de réhabilitation (08.09.2005). Photos Biotec.



Pour en savoir plus :

- ⇒ *la renaissance d'une vallée; démantèlement du barrage de Kernansquillec et réhabilitation du site. Brochure du Ministère de l'écologie et du développement durable, 23 pages;*
- ⇒ *association pour la protection et la mise en valeur de la vallée du Léguer, Belle-Isle-en-Terre, tél. 02 96 43 01 13*

4.4.2 Aménagement de la Brenne à Vénarey-les-Laumes (Côte d'Or)

Plus de 2'500 tonnes d'enrochements avaient été mises en place en protection des berges de la Brenne dans sa traversée de Vénarey-les-Laumes (département de Côte d'Or). Au fil des ans et des crues, cet enrochement s'est lentement dégradé, causant même la mort d'un pêcheur lors d'un effondrement localisé.

De plus, la configuration physique donnée au lit chenalisé de la Brenne dans sa traversée de Vénarey était source de développement d'atterrissements non contrôlés, en particulier de part et d'autre du pont de la RD 954, ayant ainsi des conséquences néfastes sur la débitance hydraulique de la rivière dans sa traversée de la localité.

Ces dysfonctionnements, couplés à des affouillements de berge au droit du camping municipal, ont poussé le Syndicat Intercommunal pour la Réalisation des Travaux d'Aménagement de la Vallée de l'Amançon (SIRTAVA), gestionnaire de la Brenne, à engager des travaux de restauration du lit et des berges du cours d'eau dans la traversée de Vénarey-les-Laumes.

Ces travaux, engagés dès le mois d'août 2001, ont permis de "décorriger" la rivière, notamment en enlevant les enrochements de protection de berge. Ceux-ci n'ont pas été évacués mais récupérés pour créer des ouvrages déflecteurs des courants hydrauliques (épis), de façon à accompagner les processus d'érosion et de dépôts dans des endroits judicieusement choisis et de manière à développer un lit d'étiage rétréci et plus diversifié. Les berges ont quant à elles été stabilisées à des degrés divers en fonction des enjeux riverains existants, mais toujours selon les principes du génie végétal.



Figure 73. Terrassement des berges et démontages des enrochements sur l'illustration de gauche (30.08.01) puis récupération des blocs et mise en place d'épis déflecteurs à droite (18.09.01). Photos Biotec.



Figure 74. Début de reprise végétale à gauche et formation des premiers atterrissements (14.03.02) puis même endroit en fin de première saison végétative à droite (25.09.02). Photos Biotec.



Figure 75. Deux ans après les travaux (07.10.03), la Brenne "décorrigée" retrouve une certaine diversité écologique avec différents faciès et toute une "mosaïque" végétale. Photos Biotec.



Figure 76. Cinq ans après les travaux (30.05.06), vues de la Brenne restaurée en aval du pont de la RD 954 à gauche et à l'amont à droite. Photos Biotec.

5

OUTIL D'AIDE A L'ANALYSE D'OPERATIONS DE RESTAURATION

Dans les prochaines décennies, DCE (Directive Cadre européenne sur l'Eau) oblige, il est souhaitable et probable que les projets de restauration de cours d'eau deviennent de plus en plus nombreux. Les finances disponibles pour ce type d'intervention n'étant cependant pas extensibles à l'infini, il faudra que les Agences de l'Eau puissent effectuer des choix quant aux demandes de subvention qui seront associées à ces projets.

Ces choix devraient à notre avis être effectués sur la base de trois types de critères :

- **le contexte socio-politique et foncier** (évaluation de la demande locale ou collective de restauration, des disponibilités foncières envisageables etc.);
- **la qualité technique du projet** (évaluation de la qualité des études préalables, de l'appréciation des dégradations et du niveau d'ambition à rechercher, de l'existence ou non d'une proposition de suivi scientifique, etc.);
- **l'évaluation *a priori* de l'efficience des travaux** (évaluation du rapport coût/efficacité probable de l'opération envisagée).

Le paragraphe 5.5 donne pour information deux projets de fiches à remplir pour une demande auprès de l'agence de l'eau, illustrant ces différents critères.

5.1 EVALUATION DU CONTEXTE SOCIO-POLITIQUE ET FONCIER

La demande de restauration est aujourd'hui généralement issue d'organismes divers : syndicats de rivières, fédérations de pêche, associations variées, etc., et souvent dans le cadre d'études plus globales de type Contrats de rivière ou Sages. Il est donc nécessaire de prévoir un investissement important en temps et en moyens de sensibilisation/communication pour que les riverains, les "politiques" et les divers partenaires de la gestion du cours d'eau adhèrent au projet de restauration.

Une étude de pré-évaluation des disponibilités foncières semble un préalable indispensable pour cerner au mieux le niveau d'ambition envisageable pour le projet.

Cette étude devrait idéalement être complétée par une étude sociologique minimale qui permettrait d'évaluer le contexte socio-politique local et les moyens à mettre en œuvre pour que le projet puisse être soutenu.

5.2 EVALUATION DE LA QUALITE TECHNIQUE D'UN PROJET DE RESTAURATION

5.2.1 Nécessité d'une étude diagnostique

Un projet de restauration doit être a minima basé sur une étude préalable comportant un certain nombre de compartiments. Comme susmentionné, l'idéal serait l'existence d'une étude globale pluridisciplinaire de type Contrat de rivière, Sage, etc.

Les compartiments essentiels devant être traités dans une telle étude préalable :

- **géomorphologie** : analyse de l'état de dégradation des caractéristiques géomorphologiques et typologie minimale (puissance, érodabilité, transport solide);
- **hydrologie** : état de modification du régime hydrologique;
- **écologie** : état de dégradation du fonctionnement écologique (écart par rapport à la référence historique ou typologique si les données existent).

5.2.2 Nécessité de se positionner dans un niveau d'objectif

Le pétitionnaire devra indiquer le niveau d'objectif qu'il vise.

Rappel des niveaux d'objectifs :

- **niveau 1 : objectifs généraux (nationaux)**; dans ce cas (vraisemblablement le plus fréquent), les objectifs de restauration sont vagues et globaux;
- **niveau 2 : objectifs propres au cours d'eau concerné (semi-locaux)**; ce type d'objectifs est basé sur une étude diagnostic de l'état du cours d'eau avant restauration. C'est-à-dire que par exemple, l'historique des travaux de chenalisation ou de recalibrage a été explicité et que les conséquences sur les milieux ont été identifiées. Ce niveau d'objectifs peut également faire appel à l'une ou l'autre espèce cible (en général faunistique et piscicole en particulier);

- **niveau 3 : objectifs locaux;** ce type d'objectifs est indissociable d'un état de référence avant travaux de correction, et de l'analyse précise (sur la faune piscicole, sur la flore, sur les milieux, morphologique, etc.) des impacts de ces travaux. Ce niveau d'objectifs fait fréquemment appel à des espèces cibles pour justifier des mesures précises voulues de restauration.

5.2.3 Nécessité de se positionner dans un niveau d'ambition

Rappelons que nous avons identifié plusieurs niveaux d'intervention sur un cours d'eau en fonction de son état de dégradation et des ambitions de restauration :

- Préservation : P
- Limitation des impacts : L
- Restauration : R1 à R3

Rappelons que ces trois niveaux d'ambition sont notamment fonction de l'emprise foncière qui sera disponible pour l'opération. Rien n'empêche de viser un niveau R3 et de tenter d'obtenir l'emprise foncière nécessaire pour que ce niveau d'ambition soit pertinent. Par contre, en traversée urbaine où l'on sait que l'on ne pourra pas "gagner" un mètre de terrain sur les berges, il n'est pas pertinent de viser un R3. Mieux vaut alors viser un niveau R1 très abouti.

5.2.4 Nécessité de proposer un suivi scientifique des travaux réalisés afin d'évaluer leur réussite en termes morpho-écologiques et d'améliorer les techniques

Au stade actuel de nos connaissances scientifiques, et probablement pour plusieurs décennies encore, il paraît indispensable que les travaux de restauration réalisés fassent l'objet durant plusieurs années d'un programme de suivi.

Tout projet de restauration devrait donc être accompagné d'un protocole scientifique de suivi.

NB : Ces protocoles pourront être plus ou moins légers selon le type de rivière, les travaux réalisés, la longueur restaurée, etc.

A minima devraient être suivis les compartiments :

- géomorphologique (évolution du fond, qualité des substrats, diversité des faciès d'écoulement etc.);

- écologique (biocénoses aquatiques et rivulaires);
- physico-chimique (paramètres classiques).

Un suivi sociologique de l'état de satisfaction des riverains serait un complément intéressant.

5.3 EVALUATION A PRIORI DE L'EFFICIENCE PROBABLE D'UN PROJET DE RESTAURATION

Ce dernier point permet d'évaluer l'efficacité probable d'un projet de restauration. Il peut permettre à l'Agence de l'Eau d'identifier les opérations qui pourraient, a priori, présenter les meilleurs taux de réussite.

5.3.1 Calcul du score d'efficacité probable

Le principe que nous proposons de retenir consiste à calculer un "score d'efficacité probable" de la restauration envisagée, sur la base :

- de la valeur des trois variables typologiques majeures présentées plus haut : puissance, transport solide, érodabilité des berges;
- de l'emprise foncière disponible pour réaliser la restauration;
- de la qualité de l'eau.

Les valeurs permettant de calculer ce score pour chacune des variables sont présentées ci-dessous. Elles sont très empiriques et ne sont pas validées scientifiquement. De même, chacune des variables a ici le même poids dans la note. On pourrait affiner en modulant la pondération.

NB : Ces paramètres sont évalués sur la base des caractéristiques moyennes du cours d'eau pour le tronçon concerné :

- la puissance spécifique est calculée en prenant la largeur moyenne naturelle à pleins bords;
- le transport solide est évalué en tenant compte de la présence éventuelle de sites de piégeage en amont du secteur à restaurer (barrages, anciennes fosses d'extractions, zones où des curages sont réalisés régulièrement, etc.);
- l'érodabilité des berges est évaluée en faisant abstraction des protections existantes. Il s'agit donc de l'érodabilité potentielle des berges naturelles.

puissance	<10 W/m ²	30-10 W/m ²	100-30 W/m ²	>100 W/m ²
	0	2.5	5	10
transport solide	nul	faible	moyen	fort
	0	2.5	5	10
érodabilité des berges	nulle	faible	moyenne	forte
	0	2.5	5	10
emprise disponible	I	< 3 x I	3 à 10 x I	>= 10 x I
	0	2.5	5	10
qualité de l'eau	mauvaise	médiocre	moyenne	bonne
	0	2	5	10

Figure 77. Variables permettant de calculer un "score d'efficacité probable" de la restauration envisagée.

A titre d'exemple, le classement de 3 de la vingtaine d'opérations de cours d'eau analysés peut être représenté par la note globale de son score (sur 50).

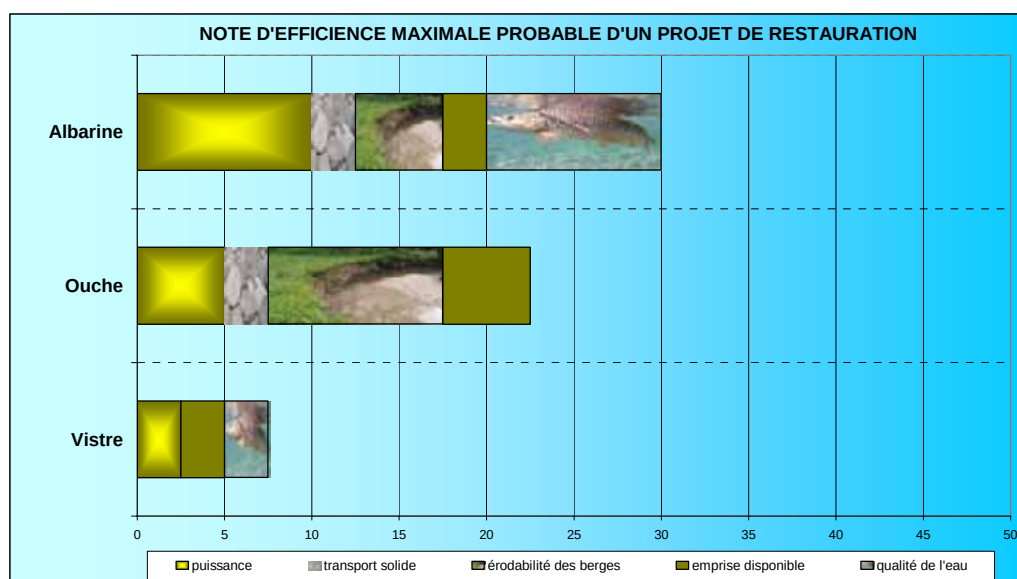


Figure 78. Score d'efficacité probable de 3 opérations de restauration de cours d'eau analysées dans cette étude.

L'axe des abscisses de la figure ci-dessus donne l'efficience probable d'une opération de restauration, ce qui peut également indirectement se traduire par le rapport coûts/efficacité des travaux envisagés.

Ainsi, sur un cours d'eau à score très bas (faible puissance, faible transport solide et érodabilité des berges, qualité d'eau médiocre et minimum d'espace pour réaliser les travaux), le projet devra nécessairement être très abouti et très construit dès le départ pour atteindre un minimum de résultats positifs, ce qui influe évidemment directement sur les coûts de réalisation des travaux de restauration (agencement de blocs, risbermes végétalisées, caches artificielles, radiers et mouilles artificiels, etc.). A l'inverse, un cours d'eau puissant, à berges très érodables et encore abondamment fourni en charge alluviale ne nécessitera que peu de travaux pour que les résultats soient rapidement positifs.



ATTENTION :

⇒ *cette approche ne doit pas amener à ne financer que les opérations présentant les meilleurs scores. Tous les cours d'eau dégradés méritent une restauration. La prise de décision finale reposera donc sur des critères complémentaires au seul score d'efficience probable, tels que l'existence d'approches globales de gestion (Sage, contrat de rivière), la présence de fortes volontés locales, des opportunités foncières, etc.*

5.3.2

Détermination de la longueur minimale pertinente

Dans le même registre, il nous semble important de vérifier si le linéaire concerné par le projet est pertinent par rapport au niveau d'objectif et au niveau d'ambition souhaité.

Par exemple, une opération de restauration de 100 m de rivière, qu'elle soit de niveau R1 ou R3, n'a que peu d'intérêt, sauf très localement, pour un cours d'eau dont la largeur sera supérieure à 10 m. Par contre, pour un cours d'eau dont la largeur est égale à 2 m, une telle restauration peut produire des effets positifs significatifs.

Nous proposons donc une évaluation sommaire et tout-à-fait empirique de la pertinence sur la base de la proportionnalité linéaire restauré/largeur du cours d'eau :

- **linéaire inférieur à 20 fois la largeur** (ou 30, ceci n'a pas pour but d'être rigoureusement précis) : effet vraisemblablement peu pertinent et uniquement local. Opération qui peut avoir éventuellement un intérêt en traversée urbaine couplé à un objectif paysager, donc si l'objectif n'est pas uniquement lié à la restauration;

- **linéaire compris entre 20 et 100 fois la largeur du cours d'eau** : l'effet reste local mais on se rapproche de dimensions pertinentes à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau;
- **linéaire supérieur à 100 fois la largeur** : on atteint des dimensions significatives vis à vis de la restauration de tronçons de cours d'eau. Le projet est réellement pertinent d'un point de vue de son linéaire d'intervention.

5.4

TABLEAUX DE SYNTHÈSE DES FAMILLES DE TRAVAUX PAR TYPE DE DYSFONCTIONNEMENT ET NIVEAU D'AMBITION

Pour synthétiser le chapitre 2.3.3 (*typologie des travaux de restauration par grandes familles de dysfonctionnements à traiter*) et donner quelques orientations de réflexions par niveau d'ambition (R1 à R3), nous proposons une série de tableaux. Cependant, vu l'étendue des dysfonctionnements possibles, des caractéristiques des cours d'eau et des possibilités de restauration, nous n'avons pas la prétention d'être exhaustif. Cette démarche est actuellement en cours de développement méthodologique.

Type de dysfonctionnement	Score physique (sur 30)	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Précautions à prendre
DYSFONCTIONNEMENTS AU SEIN DU LIT MINEUR				
1. Incision				
Métamorphose fluviale	0 < 10	R1	Echelle globale indispensable. On peut en partie freiner la métamorphose "tressage ⇒ méandrage" par un entretien systématique de la végétation du lit moyen (bande active) pour éviter une fermeture trop rapide du milieu alluvial	
		R2		
		R3		
	10 - 20	R1		
		R2		
		R3		
	> 20	R1		
		R2		
		R3		
Disparition des substrats	0 < 10	R1	Apport de matériaux + structures de blocage	* Utiliser des alluvions de nature pétrographique et de granulométrie équivalente à celles que l'on devrait trouver sur le site à restaurer * régaler les alluvions pour ne pas trop réduire la section d'écoulement
		R2	Apport de matériaux + structures de blocage	
		R3	Apport de matériaux + structures de blocage	
	10 - 20	R1	Apport éventuel de matériaux + structures de blocage	"
		R2	"	
		R3	R1/R2 + espace de liberté	
	> 20	R1	Structures de blocage	Attention à l'aggravation du déficit aval
		R2	"	
		R3	R1/R2 + espace de liberté	
Abaissement de la nappe (cf. lit majeur)	0 < 10	R1	Seuils hauts	Attention aux impacts lié à la présence de seuils
		R2	"	
		R3	"	
	10 - 20	R1	Seuils moyens	Attention aux impacts lié à la présence de seuils
		R2	"	
		R3	R1/R2 + espace de liberté	
	> 20	R1	Mini seuils, rampes	
		R2	"	
		R3	R1/R2 + espace de liberté	

Figure 79. Dysfonctionnement au sein du lit mineur; incision.

Type de dysfonctionnement	Score physique (sur 30)	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Précautions à prendre
2. Modification drastique des caractéristiques de l'écoulement et de la nature des berges				
Homogénéisation des faciès d'écoulement liée à la présence de seuils ou barrages	0 < 10	R1	Arasement partiel + travaux de restauration des habitats dans l'ancienne retenue	la réalisation de travaux de restauration est indispensable pour éviter une qualité écologique et paysagère médiocres
		R2	Arasement partiel plus poussé + travaux de restauration des habitats dans l'ancienne retenue	
		R3	Arasement total + travaux de restauration des habitats dans l'ancienne retenue	
	10 - 20	R1	Arasement partiel + travaux de restauration des habitats dans l'ancienne retenue si nécessaire	* la réalisation de travaux de restauration peut être utile pour éviter une qualité écologique et paysagère médiocres. * vérifier l'absence de risque d'érosion régressive ou l'absence d'enjeux pouvant être menacés
		R2	Arasement partiel plus poussé + travaux de restauration des habitats dans l'ancienne retenue si nécessaire	
		R3	Arasement total + travaux de restauration des habitats dans l'ancienne retenue si nécessaire	
	> 20	R1	Arasement partiel + travaux de restauration des habitats dans l'ancienne retenue si nécessaire	* la réalisation de travaux de restauration peut éventuellement (zone urbaine ou périurbaine) être utile pour améliorer la qualité écologique et paysagère. * vérifier l'absence de risque d'érosion régressive ou l'absence d'enjeux pouvant être menacés
		R2	Arasement partiel plus poussé + travaux de restauration des habitats dans l'ancienne retenue si nécessaire	
		R3	Arasement total + travaux de restauration des habitats dans l'ancienne retenue si nécessaire	

Figure 80. Dysfonctionnement au sein du lit mineur; modification drastique des caractéristiques de l'écoulement et de la nature des berges. Homogénéisation des faciès d'écoulement liée à la présence de seuils ou de barrages.

Type de dysfonctionnement	Score physique (sur 30)	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Précautions à prendre
Homogénéisation des faciès d'écoulement liée à une chenalisation	0 < 10	R1	Diversification minimale des écoulements (déflecteurs, risbermes, amas de blocs, structures diverses, etc.)	* Le dimensionnement et le positionnement des structures de diversification de l'écoulement doit tenir compte de paramètres géomorphologiques : quel est le type d'habitat ou de séquence de faciès naturels sur le tronçon concerné ; quelle doit être la taille, la forme, la nature des structures pour résister à la puissance hydraulique du cours d'eau. * et de paramètres écologiques : quels types de faciès ou d'habitat veut on recréer : sous berges, abris hydrauliques, caches contre les prédateurs, zones de fraie, zone de repos etc. ; éventuellement quelle espèce ou quel stade de développement veut on favoriser : alevins, juvéniles, adultes
		R2	Travaux plus aboutis de restauration piscicole, plantations de végétaux aquatiques, reprofilage des berges, reméandrage partiel	
		R3	Restauration complète des conditions géomorphologiques (tracé en plan d'équilibre, géométrie du lit et des berges, substrat)	
	10 - 20	R1	Diversification minimale des écoulements (déflecteurs, risbermes, amas de blocs, structures diverses, etc.)	
		R2	Travaux plus aboutis de restauration piscicole, plantations de végétaux aquatiques, reprofilage des berges, reméandrage partiel,	
		R3	Restauration complète des conditions géomorphologiques (tracé en plan d'équilibre, géométrie du lit et des berges, substrat) et géodynamiques (restauration d'un espace de mobilité) naturelles	
	> 20	R1	id R1 précédent	
		R2	id R2 précédent mais travaux moindres du fait de la puissance naturelle du cours d'eau	
		R3	id R3 précédent mais travaux moindres du fait de la puissance naturelle du cours d'eau	

Figure 81. Dysfonctionnement au sein du lit mineur; modification drastique des caractéristiques de l'écoulement et de la nature des berges. Homogénéisation des faciès liée à une chenalisation.

Type de dysfonctionnement	Score physique (sur 30)	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Précautions à prendre
Réduction de la profondeur d'eau à l'étiage	0 < 10	R1	Réduction de la largeur du lit d'étiage par toute structure hydraulique permettant de concentrer l'écoulement d'étiage dans un lit mieux dimensionné, garantissant a minima des profondeurs de l'ordre de 30-40 cm	* Le dimensionnement et le positionnement des structures hydrauliques doit tenir compte de paramètres géomorphologiques : Quel est la profondeur moyenne visée et pour quel débit (étiage sévère, étiage moyen, module, etc.) ? Quel est l'objectif : simple réhausse de la lame d'eau, réhausse concomitante de la nappe d'accompagnement, etc. ? Quelle doit être la taille, la forme, la nature des structures pour résister à la puissance hydraulique du cours d'eau ? * et de paramètres écologiques : S'agit il d'une recherche de l'amélioration de l'habitat. D'une amélioration de la franchissabilité d'un secteur par différentes espèces, etc. ?
		R2	Reconstruction d'un lit d'étiage et d'un lit moyen (bancs alluviaux ou risbermes artificielles), écartement des digues si elles sont trop près du cours d'eau, reméandrage	
		R3	R2 + espace de fonctionnalité	
	10 - 20	R1	id R1 précédent	
		R2	id R2 précédent mais travaux moindres du fait de la puissance naturelle du cours d'eau	
		R3	R2 + espace de mobilité	
	> 20	R1	id R1 précédent	
		R2	id R2 précédent mais travaux moindres du fait de la puissance naturelle du cours d'eau	
		R3	R2 + espace de mobilité	

Figure 82. Dysfonctionnement au sein du lit mineur; modification drastique des caractéristiques de l'écoulement et de la nature des berges. Réduction de la profondeur d'eau à l'étiage.

Type de dysfonctionnement	Score physique (sur 30)	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Précautions à prendre
Modification de la nature des berges	0 < 10	R1	Mise en place de caches et abris le long des berges : agencements particuliers d'enrochements libres, troncs d'arbres, sous berges artificielles	* Nécessité d'un travail important de sensibilisation locale au droit du site de suppression des protections de berges (peur généralisée des érosions latérales). * Eventuellement gestion foncière de la zone susceptible d'être à nouveau soumise à des processus d'érosion. * Sur les rivières à faible ou modeste puissance et à berges basses (<1.5 m), la plantation de végétaux riverains, même en sommet de berge peut réduire fortement les processus d'érosion latérale par ailleurs intéressants pour la restauration d'un fonctionnement plus naturel du cours d'eau.
		R2	Recréation de berges naturelles, plantation de végétaux adaptés, sous berges artificielles en attendant que le système racinaire naturel se développe	
		R3	R2 + espace de fonctionnalité	
	10 - 20	R1	id R1 précédent	
		R2	id R2 précédent mais travaux moindres du fait de la puissance naturelle du cours d'eau	
		R3	R2 + espace de mobilité	
	> 20	R1	id R1 précédent	
		R2	id R2 précédent mais travaux moindres du fait de la puissance naturelle du cours d'eau	
		R3	R2 + espace de mobilité	

Figure 83. Dysfonctionnement au sein du lit mineur; modification de la nature des berges.

Type de dysfonctionnement	Score physique (sur 30)	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Précautions à prendre
3. Modification drastique des formations végétales riveraines				
Végétation riveraine absente, très clairsemée ou inadaptée	0 < 10	R1	Plantations simples	* Sur les rivières à faible ou modeste puissance et à berges basses (<1.5 m), la plantation de végétaux riverains, même en sommet de berge peut réduire fortement les processus d'érosion latérale par ailleurs intéressants pour la restauration d'un fonctionnement plus naturel du cours d'eau.
		R2	Plantations plus étendues dans les limites de l'emprise foncière disponible	
		R3	Plantations plus étendues de manière à recréer un corridor fluvial	
	10 - 20	R1	id R1 précédent	
		R2	id R2 + R3 précédent mais possibilité de favoriser des bonnes conditions de croissance par des ouvrages indirects	
		R3		
	> 20	R1	id R1 précédent	
		R2		
		R3	id R2 + R3 précédent	

Figure 84. Dysfonctionnement au sein du lit mineur; modification drastique des formations végétales riveraines.

Type de dysfonctionnement	Score physique (sur 30)	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Précautions à prendre
Déconnexion lit mineur/lit majeur				
Cause : incision du lit mineur	0 < 10	R1	* Mêmes traitements locaux et globaux que ceux destinés à juguler l'incision du lit mineur. * Reconnexion des annexes hydrauliques perchées (curages, nettoyage)	
		R2	"	
		R3	"	
	10 - 20	R1	* Mêmes traitement locaux et globaux que ceux destinés à juguler l'incision du lit mineur. * Reconnexion des annexes hydrauliques perchées (curages, nettoyage)	
		R2	Espace de mobilité + éventuellement R1	
		R3	"	
	> 20	R1	* Mêmes traitement locaux et globaux que ceux destinés à juguler l'incision du lit mineur. * Reconnexion des annexes hydrauliques perchées (curages, nettoyage)	
		R2	Espace de mobilité + éventuellement R1	
		R3	"	

Figure 85. Dysfonctionnement au sein du lit majeur; déconnexion lit mineur/lit majeur liée à une incision du lit mineur.

Type de dysfonctionnement	Score physique (sur 30)	Niveau d'ambition souhaité R1 à R3	Familles de travaux envisageables à l'échelle locale	Précautions à prendre
Cause : présence de digues	0 < 10	R1	Abaissement localisé des digues pour augmenter la fréquence de connexion; mise en place de clapets (exemple Rhin)	Nécessité d'une étude hydraulique pour vérification que l'opération n'aggrave pas les inondations de secteurs à enjeux forts (zones urbanisées)
		R2	Ecartement des digues aux limites foncières possibles	
		R3	Ecartement des digues aux limites d'un espace de mobilité ou de fonctionnalité voire suppression totale	
	10 - 20	R1	id R1 précédent	
		R2	id R2 précédent	
		R3	id R3 précédent	
	> 20	R1	id R1 précédent	
		R2	id R2 précédent	
		R3	id R3 précédent	

Figure 86. Dysfonctionnement au sein du lit majeur; déconnexion lit mineur/lit majeur liée à la présence de digues.

5.5 EXEMPLES DE FICHES DE DEMANDE DE SUBVENTION ETUDES/TRAVAUX

Pour illustrer concrètement les propos des paragraphes 5.1 à 5.3, nous donnons ci-après deux projets de fiches à remplir pour une demande de subventions auprès de l'agence, soit pour le financement d'une étude préalable et pour le financement de travaux.

5.5.1 Demande de subventionnement d'une étude préalable et d'avant-projet

1) *Présentation générale*

- *Nom du cours d'eau :*
- *Département :*
- *Commune(s) concernée(s) :*
- *Linéaire concerné par les aménagements :*
- *Typologie du cours d'eau :*
- *Initiateur(s) du projet :*
- *Maître(s) d'ouvrage :*

- *Existence d'une étude cadre (contrat de rivière, étude globale, sage, etc.) :*
- *Maîtrise foncière :*

2) *Présentation spécifique*

- *Problématique :*
- *Type de dysfonctionnement :*
- *Positionnement par rapport à un niveau d'objectif :*

N1 :

N2 :

N3 :

- *Positionnement par rapport à un niveau d'ambition :*

- *préservation (P) :*

- *limitation d'impacts (L) :*

- *restauration (R) :*

- *Origine de la demande :*

- *individuelle* ☐
- *issue d'une association* ☐
- *volonté élargie* ☐

- *Caractéristiques de la station :*

puissance	<10 W/m2	30-10 W/m2	100-30 W/m2	>100 W/m2
	0	2.5	5	10
transport solide	nul	faible	moyen	fort
	0	2.5	5	10
érodabilité des berges	nulle	faible	moyenne	forte
	0	2.5	5	10
emprise disponible	I	< 3 x I	3 à 10 x I	>= 10 x I
	0	2.5	5	10
qualité de l'eau	mauvaise	médiocre	moyenne	bonne
	0	2	5	10

- *Score d'efficience probable de l'opération (somme des notes données aux caractéristiques de la station) :*
- *Aménagements envisagés :*
- *Coût de l'étude préalable et d'avant-projet (en € HT) :*

5.5.2 Demande de subventionnement de travaux

Les points 1 et 2, respectivement de "présentation générale et spécifique" du formulaire précédent (paragraphe 5.5.1) devraient être repris.

En outre, aucun subventionnement de travaux ne devrait être accordé sans étude préalable et d'avant-projet issue de la première demande.

Une telle étude doit d'une part affiner (confirmer, voire infirmer) les éléments de présentation générale et spécifique énoncés ci-dessus et d'autre part préciser :

- les dysfonctionnements constatés en terme de géomorphologie, d'hydrologie et/ou d'écologie;
- les éléments projetés, leurs coûts, à la fois de mise en œuvre et d'entretien;

- les impacts éventuels sur le milieu des travaux projetés;
- les démarches sociologiques et foncières envisagées ainsi que leur coût);
- les suivis prévus à mettre en place.

1) *Présentation générale*

- *Nom du cours d'eau :*
- *Département :*
- *Commune(s) concernée(s) :*
- *Linéaire concerné par les aménagements :*
- *Typologie du cours d'eau :*
- *Initiateur(s) du projet :*
- *Maître(s) d'ouvrage :*
- *Existence d'une étude cadre (contrat de rivière, étude globale, sage etc.) :*
- *Maîtrise foncière :*

2) *Présentation spécifique*

- *Problématique :*
- *Type de dysfonctionnement :*
- *Positionnement par rapport à un niveau d'objectif :*

N1 :

N2 :

N3 :

- *Positionnement par rapport à un niveau d'ambition :*

- *préservation (P) :*
- *limitation d'impacts (L) :*
- *restauration (R) :*

R1 :

R2 :

R3 :

- *Origine de la demande :*

- *individuelle* ☐
- *issue d'une association* ☐
- *volonté élargie* ☐

- *Caractéristiques de la station :*

puissance	<10 W/m2	30-10 W/m2	100-30 W/m2	>100 W/m2
	0	2.5	5	10
transport solide	nul	faible	moyen	fort
	0	2.5	5	10
érodabilité des berges	nulle	faible	moyenne	forte
	0	2.5	5	10
emprise disponible	I	< 3 x I	3 à 10 x I	>= 10 x I
	0	2.5	5	10
qualité de l'eau	mauvaise	médiocre	moyenne	bonne
	0	2	5	10

- *Score d'efficience probable de l'opération (somme des notes données aux caractéristiques de la station) :*
- *Aménagements envisagés :*
- *Coût de l'étude préalable et d'avant-projet (en € HT) :*

3) *Éléments issus de l'étude préalable*

- *Détail des dysfonctionnements :*
 - *géomorphologie :*
 - *hydrologie :*
 - *écologie :*
- *Éléments projetés :*
 - *Evaluation de l'impact des éléments projetés :*
 - *Coûts des éléments projetés (€ HT) :*
- *Acquisitions foncières, indemnisations, etc. :*
 - *Coûts (€ HT) :*
- *Publicité, démarches participatives envisagées, etc. :*
 - *Coûts (€ HT) :*
- *Suivis envisagés :*
 - *Durée :*
 - *Coûts :*
- *Total des investissements projetés (€ HT) :*

6

CONCLUSION

Les conclusions de cette étude s'intègrent à un objectif plus général de développement des opérations sur la morphologie et l'hydrologie des milieux aquatiques pour contribuer efficacement et durablement à l'atteinte des objectifs du SDAGE. Dans le futur SDAGE, au-delà des mesures techniques qui seront développées pour chacun des 3 thèmes (altération des flux, altération des formes et altération de la connectivité entre les habitats), l'objectif est d'intégrer effectivement la gestion hydromorphologique dans les politiques de gestion par bassin versant.

Cependant, le bilan du SDAGE de 1996 met en évidence que la mise en œuvre de ce type d'opération est particulièrement ralentie par la gestion du foncier ou par la prise en compte des aspects socioéconomiques. Il est donc primordial de développer des mesures pour lever les freins à la mise en œuvre de ces opérations. Il s'agira en particulier, de faire partager l'intérêt technique, social et économique des stratégies de préservation et de restauration physique.

Concrètement, 4 axes de travail sont identifiés :

- **évaluer et suivre l'impact des opérations de restauration** sur la biologie;
- **analyser le rôle des facteurs physiques** dans l'atteinte des objectifs du SDAGE et construire un outil d'aide à la décision en matière de restauration physique;
- **développer des outils** type guide SDAGE ou "Assistance à Maître d'Ouvrage" pour aider à la gestion du foncier dans les opérations de restauration physique;
- **prendre en compte les aspects sociologiques et économiques** dans la mise en œuvre des stratégies de gestion physique des milieux.

Par ailleurs, en matière de coûts, malgré des montants financiers importants, l'hydromorphologie est un axe essentiel du SDAGE à la vue des gains durables sur le fonctionnement et la qualité des milieux mais aussi des économies d'échelle à réaliser vis-à-vis d'autres orientations du SDAGE.

Les analyses coûts/bénéfices devront être développées comme argumentaire pour mettre en oeuvre des opérations en intégrant les attendus du bon fonctionnement hydromorphologique pour les milieux mais également pour les usages associés (production d'eau potable, tourisme, capacité autoépuratrice des milieux et préservation des ouvrages ayant une emprise dans le cours d'eau (pont, protection de berges, etc.).

En conclusion, compte tenu des compétences techniques, financières, sociologiques et juridiques qui seront nécessaires à la mise en oeuvre de tels projets, le chantier apparaît comme étant très ambitieux. Il est donc primordial de faire partager à l'ensemble des acteurs de la " communauté de l'eau " (décideurs, techniciens, financeurs) l'intérêt et la nécessité de la mise en oeuvre concrète des concepts et des théories relatives à la protection et à la restauration des milieux aquatiques.

L'appropriation, aussi bien des objectifs que des moyens, passe par l'élaboration et la mise à disposition d'outils au service d'une stratégie d'action optimisant les coûts et les bénéfices. Ces derniers devant être appréciés sur le long terme pour répondre à l'intérêt général et aux impératifs de développement durable.

Lyon, le 27 juin 2006

BIOTEC Biologie appliquée sarl
Philippe ADAM
Nicolas DEBIAIS

Jean-René MALAVOI

7

BIBLIOGRAPHIE

- Bautista S., Alloza J.A., Vallejo V.R. (2004) : Conceptual framework, criteria and methodology for the evaluation of restoration projects. The REACTION approach. CEE. Energy, Environment and Sustainable Development Program. 1998-2002.
- BINDER, W. (1979). Grundzüge der Gewässerpflege.- Schriftenr. Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft, H. 10, München.
- Conseil Supérieur de la Pêche. (2005). Restauration physique des cours d'eau dans le nord-est de la France. Plaque Gesteau.
- Fischenich J.C. (2003) : Technical Consideration for Evaluating Riverine/Riparian Restoration Projects. Env. Laboratory. US Army Engineer Research Center.
- Glitz D. (1983) : Künstliche Gerinne. Die Altarme von Morgen. In Garten und Landschaft. 2.
- Handbuch Wasser 2 (1995) : Naturnahe Umgestaltung von Fließgewässern. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- Handbuch Wasserbau (1992) : Naturnahe Umgestaltung von Fließgewässern. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- Kanton Zürich (1989) : Wieder Belebungs Programm für die Fließgewässer.
- Ländliche Neuordnung (1990) : Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen.
- MALAVOI J.R., BRAVARD J.P., PIEGAY H., HEROUIN E., RAMEZ E. , 1998 : Guide technique SDAGE n°2 : Méthode de délimitation de l'espace de liberté des cours d'eau.. AGENCE DE L'EAU RMC
- MALAVOI J.R., PARIS P., 2003 : Stratégie d'intervention de l'Agence de l'Eau sur les seuils en rivière.

- MALAVOI J.R, MICHELOT J.L., GENDRAUD N., 1999 : Guide technique : Travaux post-crue, bien analyser pour mieux agir. GRAIE (Groupe de recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau).
- Pedroli B, de Blust G., van Looy K, van Rooij S., (2002) : Setting targets in strategies for river restoration. *Landscape Ecology*. 17. 5-18.
- PRO NATURA, BIOTEC (1998). Davantage d'espace pour nos cours d'eau, pour l'homme et la nature. Contributions à la protection de la nature en Suisse, n° 20.
- Shields F.D., Copeland R.R., Kilingeman P.C., Doyle M.W., Simon A. (2003): Design for Stream Restoration. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. 08.
- The River Restoration Centre (2002) : Manuel of River Restoration Techniques. RRC. Web Edition.
- Wagner A, Wagner I. (2002): Flusslandschaft Isar. Bayerische Landesamt für Umweltschutz.
- Wasserwirtschaft in Bayern (1989) : Flüsse und Bäche: erhalten, entwickeln, gestalten. Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen.
- Wasserwirtschaft in Bayern (1997) : Flüsse, Auen, Täler : erhalten und entwickeln. Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen. WASSON J.G., MALAVOI J.R., MARIDET L., SOUCHON Y., PAULIN L. (1998) : Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. CEMAGREF eds. Coll. Etudes : "gestion des milieux aquatiques", n°14.



Pour mémoire :

Les fiches descriptives des opérations de restauration physique analysées sur le bassin RMC font l'objet d'un document annexe au présent rapport.