

## L'anthropisation des cours d'eau pressions et impacts environnementaux

### 1.1. Les pressions anthropiques en général

L'Homme implanté près des cours d'eau en exploite les nombreuses ressources (eau, nourriture, graviers, potentiel hydro-électrique, voie navigable, aspects récréatifs...) tout en se protégeant des risques inhérents à ces environnements fluviaux (inondations, érosions latérales, pollutions, maladies...) (Downs et Gregory, 2004). L'intensité et la nature des pressions exercées sur les cours d'eau ont considérablement évolué à travers l'histoire, depuis les « *sociétés hydrauliques* » du Proche-Orient et de la Chine en activité il y a près de 5 000 ans (Wittfogel, 1956, cité par Downs et Gregory, 2004 ; Gregory, 2006).

Les **pressions indirectes** portent sur l'occupation des sols et sur la structure du réseau de drainage du bassin versant. Ces paramètres déterminent les flux liquides et solides qui parviennent jusqu'au cours d'eau et façonnent la dynamique fluviale (Grosprêtre, 2011). L'urbanisation est ainsi devenue l'une des principales sources de perturbation anthropique des systèmes fluviaux depuis les années 1950 (Chin, 2006). Les **pressions directes** affectent le lit mineur et les berges. Il en existe trois types (Wasson *et al.*, 1998) :

- *l'entretien* : élimination de la végétation, nettoyage du bois mort... ;
- *les terrassements* : extractions, curage, recalibrage, rectification, reprofilage ;
- *les ouvrages* : barrages, seuils, épis, endiguements, protections de berges.

Les cours d'eau ont le plus souvent été aménagés en combinant plusieurs de ces techniques. La chenalisation regroupe par exemple une variété d'opérations : curage, recalibrage, rectification, reprofilage, endiguements, protections de berges, entretien (Brookes, 1988). Ces interventions composites ont couramment été entreprises dans les projets d'aménagement à buts multiples qui ont vu le jour durant la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle dans certains grands bassins fluviaux mondiaux, par exemple sur la Tennessee River (Etats-Unis) et la Yellow River (Chine) pour la protection contre les inondations, la navigation et la production hydro-électrique (Downs et Gregory, 2004).

Le **Rhin supérieur**, objet de la présente thèse, a été aménagé dès le 19<sup>ème</sup> siècle, comme la plupart des grands axes fluviaux européens (Danube, Rhône...). Il a subi des phases successives de chenalisation, de construction d'épis et de barrages. Nous présentons plus en détail ces trois types de travaux.

## 1.2. Les travaux en rivière

### 1.2.1. La chenalisation

La chenalisation concerne tous les aménagements qui modifient le tracé en plan, la section en travers ou la pente, et qui visent ou aboutissent directement ou indirectement à une **accélération des écoulements** (Wasson *et al.*, 1998). Cette intervention a été utilisée dans le passé principalement pour augmenter la débitance et protéger les terrains riverains contre les inondations. Elle a également souvent été entreprise pour améliorer la navigabilité, fixer les berges ou assécher les terrains pour l'agriculture, l'industrie et le développement urbain (Brookes, 1988).

Les digues sont l'élément structurant de la plupart des travaux de chenalisation. Ouvrages longitudinaux s'opposant au passage de l'eau, leur première construction remonte à 4 000 ans, quand un ancien bras du Nil a été aménagé en canal afin d'irriguer des cultures (Bethemont, 2000). Les grands travaux de chenalisation des plaines alluviales européennes ont eu lieu essentiellement au 19<sup>ème</sup> siècle. La plupart des rivières alpines et périalpines adoptait alors un style en tresses, résultant à la fois de la détérioration climatique du Petit Age Glaciaire (1550-1850) et de la forte pression agro-pastorale exercée sur les bassins montagnards, ces facteurs ayant augmenté les débits liquides et accru la charge sédimentaire fournie par les processus de versants (Bravard et Peiry, 1993). Les travaux ont consisté à concentrer les eaux du lit majeur, parfois large de plusieurs kilomètres, en un chenal unique entre des digues de hautes et de basses eaux distantes de quelques centaines de mètres. Le Danube (Hohensinner *et al.*, 2004), le Rhône (Poinsard et Salvador, 1993) et ses affluents, Drôme, Durance, Isère, Arve (Bravard et Peiry, 1993), ont ainsi été chenalisés, au même titre que le **Rhin supérieur** (Humbert et Descombes, 1985).

### 1.2.2. Les épis

Les épis sont des ouvrages transversaux, ancrés dans la berge et barrant une partie du lit mineur. Leur fonction est de **modifier les conditions d'écoulement** (Degoutte, 2006). Sur l'Elbe (Allemagne) et la Waal (delta du Rhin), les premiers épis ont été construits aux 15<sup>ème</sup> et 16<sup>ème</sup> siècles pour favoriser la sédimentation dans des secteurs où les écoulements divergeaient, et ainsi gagner des terres agricoles (Weitbrecht, 2004 ; Middelkoop, 1997). Les épis peuvent également servir à protéger une berge de l'érosion (Degoutte, 2006).

Sur les grands axes fluviaux européens, ces ouvrages ont principalement été employés pour **améliorer la navigabilité**. Par exemple, le profil en long du Rhône a été régularisé en adoptant un système de digues et de tenons (épis reliant les digues à la berge), puis en construisant les « casiers Girardon », combinant digues, tenons, épis noyés, plongeants et seuils de fond (épis noyés prolongés jusqu'à la berge opposée) (Poinsard et Salvador, 1993). La méthode intégrait les lois empiriques établies par Fargue sur la Garonne (Jamme, 1969). Ces techniques ont ensuite servi de modèle pour l'aménagement de la Loire (Olivier, 2004) et du **Rhin supérieur** au début du 20<sup>ème</sup> siècle (Humbert et Descombes, 1985).

Les épis sont des ouvrages au fonctionnement et à la conception complexes. Plusieurs types de structures existent, et leur classification peut reposer sur différents critères (Jamme, 1969 ; Przedwojski *et al.*, 1995, cités par Yossef, 2005) :

- *la technique et les matériaux de construction* : les épis sont fabriqués en enrochements, graviers, sable, gabions ou bois. Leur hauteur (épis noyés ou émergés dans des conditions normales) et leur structure (épis pleins ou perméables) diffèrent selon l'effet recherché sur l'écoulement et selon le mode de transport des sédiments ;
- *la forme en plan et l'inclinaison* : les épis peuvent être droits, en croise, en « T », et construits perpendiculairement ou inclinés par rapport à la berge. Ceux pointant vers l'aval tendent à attirer les écoulements vers eux, et ceux pointant vers l'amont dévient le courant vers le chenal ;
- *la longueur et l'espacement* : ces deux critères dépendent de la largeur du lit, de la position de l'épi et de la contraction du chenal souhaitée. Ils définissent le ratio d'aspect (longueur de l'épi / espacement entre deux épis), paramètre important qui détermine le patron hydrodynamique entre et à proximité des ouvrages (Weitbrecht, 2004).

### 1.2.3. Les barrages

Ouvrages transversaux barrant totalement le lit mineur, les premiers barrages ont été implantés en Egypte il y a 5 000 ans (Bethemont, 2000). Leur construction s'est peu à peu répandue dans toutes les régions du monde et s'est multipliée au siècle dernier, en particulier depuis les années 1950 : alors que le nombre de grands barrages<sup>1</sup> était estimé à 427 en 1900, il était de 5 268 en 1950, et il dépassait 45 000 en 1998, les ouvrages étant répartis dans 140 pays (Brandt, 2000 ; WCD, 2000). La France se classe au dixième rang mondial (569 grands barrages) et est le second constructeur européen après l'Espagne (WCD, 2000).

Les barrages sont généralement construits pour assurer une ou plusieurs fonctions, qu'il s'agisse de l'irrigation des terres agricoles, l'alimentation en eau potable, la régulation des débits, la production hydro-électrique, la dérivation des eaux dans un canal ou vers un autre bassin versant, la régulation du tirant d'eau pour la navigation, le contrôle des flux de sédiments ou encore la création d'un plan d'eau pour les loisirs (Brandt, 2000 ; [www.barrages-cfbr.eu](http://www.barrages-cfbr.eu)).

Pour la production hydro-électrique, (cas de l'aménagement de Kembs sur le Rhin), les barrages sont communément classés selon la hauteur de la chute  $H$  et la position sur le linéaire hydrographique, avec présence ou non d'un réservoir. Nous pouvons ainsi distinguer trois catégories (Bethemont, 2000 ; Viollet, 2010) :

- *les barrages de haute chute ( $H > 200$  m)* sont implantés en tête de bassin. Une conduite forcée prélève l'eau dans un lac ou depuis un captage en altitude, et l'achemine jusqu'à l'usine

---

<sup>1</sup> Un grand barrage est un ouvrage mesurant plus de 15 m de haut, ou mesurant entre 5 et 15 m et retenant plus de 3 millions de m<sup>3</sup> d'eau (WCD, 2000).

située en fond de vallée. Les aménagements de la Grande Dixence (Suisse) et des chutes Churchill (Canada) sont des exemples de haute chute ;

- les barrages de moyenne chute ( $40\text{ m} < H < 200\text{ m}$ ) sont le plus souvent construits sur le cours moyen des rivières. Un ouvrage barre le lit et crée un réservoir en son amont. Les barrages Hoover sur le Colorado (Etats-Unis), Itaipu sur le Parana (Paraguay) et Trois-Gorges sur le Yangtze (Chine) sont des ouvrages de moyenne chute ;
- les barrages de basse chute ( $H < 40\text{ m}$ ) sont implantés sur le cours inférieur des rivières et des grands fleuves navigables. Les contextes topographiques (larges plaines et faibles dénivelées) et humains (fortes densités de population) ne permettent généralement pas de construire un grand réservoir. Cette configuration « au fil de l'eau », sans possibilité de stockage, entraîne une dépendance marquée vis-à-vis des variations de débit. De fait, ces ouvrages sont le plus souvent des **barrages mobiles**, constitués de vannes qui font transiter les crues et permettent de maintenir un tirant d'eau constant pour la navigation et la production hydro-électrique ([www.barrages-cfbr.eu](http://www.barrages-cfbr.eu)). L'aménagement **en dérivation** permet de pallier à l'absence de réservoir (Tricart et Bravard, 1991 ; Bethemont, 2000) : le barrage relève le tirant d'eau en amont, et alimente un canal d'amenée sur lequel sont implantées l'usine et les écluses. Le débit turbiné est ensuite restitué au cours d'eau par un canal de fuite. Des ensembles en dérivation ont été mis en place sur le Rhône du lac Léman à la mer (Tricart et Bravard, 1991), sur la Durance en aval du lac de Serre-Ponçon (Warner, 2000) et sur le **Rhin supérieur** entre Kembs et Strasbourg (Humbert et Descombes, 1985). Le **Vieux Rhin**, objet de cette thèse, constitue un tronçon court-circuité de 50 km de long (fig. 1.2).

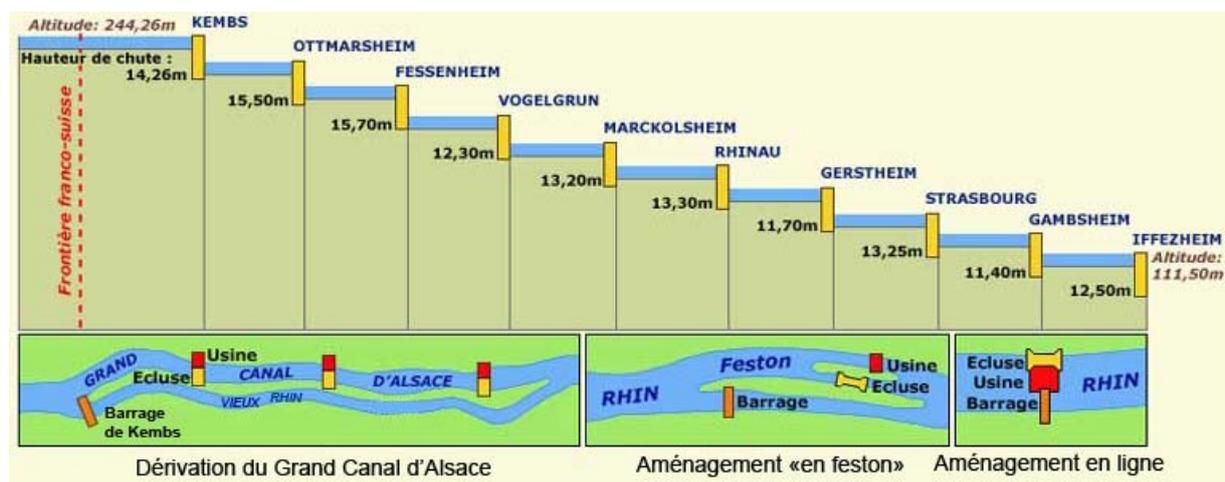


Figure 1.2 : Aménagement hydro-électrique du Rhin supérieur entre Kembs et Iffezheim : huit usines sont implantées en dérivation et deux usines sont implantées en ligne (d'après [www.encyclopedie.bsditions.fr](http://www.encyclopedie.bsditions.fr))

### 1.3. Les impacts morphologiques de ces travaux

#### 1.3.1. Bases théoriques du fonctionnement des cours d'eau

##### *Définitions*

En géomorphologie fluviale et en écologie, le cours d'eau est le plus souvent appréhendé en s'appuyant sur deux concepts complémentaires (fig. 1.3) :

1. **le système fluvial** (Schumm, 1977), qui décrit les transferts longitudinaux d'eau et de sédiments dans le bassin versant. Il est divisé en trois zones, au sein desquelles coexistent les processus d'érosion, de transport et de dépôt : la *zone de production*, où en termes de bilan l'érosion l'emporte sur le dépôt, la *zone de transfert*, où les deux processus s'équilibrent, et la *zone de stockage*, où le dépôt l'emporte sur l'érosion (Church, 2002) ;
2. **l'hydrosystème fluvial** (Roux, 1982 ; Amoros et Petts, 1993), sous-ensemble du système fluvial, qui appréhende les échanges et les interactions dans quatre dimensions : *longitudinale* (de l'amont vers l'aval), *latérale* (entre le lit mineur et la plaine alluviale), *verticale* (entre le chenal et la nappe d'accompagnement) et *temporelle*. Les diverses **connectivités écologiques** (Amoros et Roux, 1988, cités par Muhar et Jungwirth, 1998) qui régissent un hydrosystème fluvial impliquent des flux d'eau, de sédiments, d'énergie, de substances nutritives, de détritiques ainsi que le transit passif ou actif d'organismes vivants. Ces flux sont bidirectionnels et peuvent être étudiés à des niveaux scalaires emboîtés.

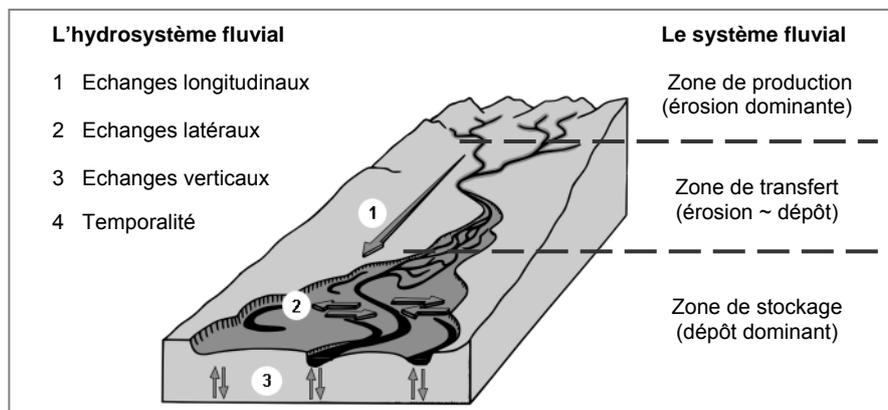


Figure 1.3 : Emboîtement schématisé de l'hydrosystème fluvial dans le système fluvial (d'après Amoros et Petts, 1993 ; Rollet, 2007 ; Morandi et Piégay, 2012)

##### *Principes de fonctionnement du système fluvial*

La dynamique du système fluvial est le résultat d'une combinaison de variables hiérarchisées agissant dans un jeu complexe de « processus-réponses » (Schumm, 1977) : les caractéristiques morphologiques (largeur, pente, sinuosité...) sont placées sous le contrôle des débits liquides et solides transitant dans le système, eux-mêmes dépendant de variables dominantes que sont le relief, la géologie, le climat et l'occupation du sol au sein du bassin versant (fig. 1.4).

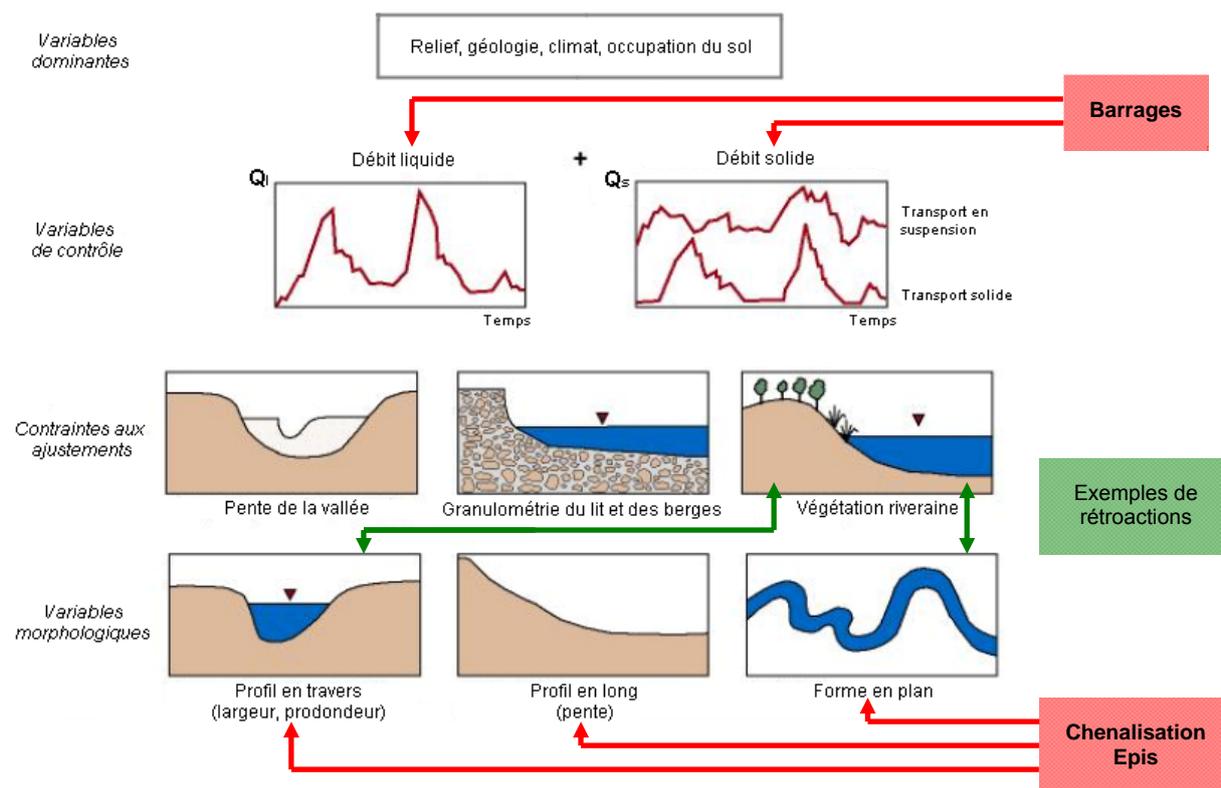


Figure 1.4 : Exemples d'interactions entre les variables hiérarchisées du système fluvial et les actions anthropiques (modifié d'après Thorne, 1997 et Bledsoe, 2010)

D'autres facteurs interviennent, tels que la pente de la vallée, la granulométrie du fond et des berges et la végétation riveraine. Certains auteurs (Petts, 1979 ; Thorne, 1997) ont décrit ces facteurs comme des « contraintes aux ajustements », car ils ont la capacité de limiter ou de favoriser les ajustements morphologiques induits par la modification des variables de contrôle. Par exemple, la végétation qui s'implante sur les berges participe à limiter la mobilité latérale et à réduire la largeur du lit mineur (Thorne, 1997). D'autres auteurs (Liébault et Piégay, 2002 ; Dufour, 2005) ont étudié les effets rétroactifs sur les contraintes aux ajustements : sur des cours d'eau des Alpes du Sud, il a été observé que l'enfoncement du lit peut entraîner le « perchement » des bancs latéraux, étant alors moins fréquemment inondés et donc plus facilement colonisables par la végétation pionnière. Celle-ci agit à son tour sur la morphologie en rétractant la bande active, ce qui peut avoir pour effet d'aggraver l'incision en cours.

En somme, le système fluvial se présente comme un **ensemble complexe d'interactions et de rétroactions** entre les variables le composant (fig. 1.4, flèches vertes), dans une logique d'**équilibre dynamique**, état moyen autour duquel les variables oscillent (Schumm, 1977 ; Knighton, 1984).

L'équilibre du système fluvial est classiquement formulé par la **balance de Lane** (1955) : elle relie la fourniture sédimentaire (débit solide  $Q_s$ , granulométrie  $D$ ) à la puissance fluviale (débit liquide  $Q_l$ , pente  $I$ ) capable de l'évacuer (fig. 1.5, a). Dans un tronçon en équilibre, les sédiments pénétrant dans le système sont transportés vers l'aval sans phénomène significatif de **dépôt**

(*aggradation*) ou d'**érosion** (*degradation*). En revanche, une perturbation de l'une ou plusieurs des variables est susceptible d'affecter cet équilibre durablement, et de façon parfois irréversible (Simon et Darby, 1999).

Compte-tenu de son influence croissante au cours de l'histoire, l'Homme est à intégrer dans le schéma de fonctionnement du système fluvial (fig. 1.4, flèches rouges et fig. 1.5, b). Les variables affectées diffèrent selon les aménagements : les barrages exercent un effet sur les débits liquides et solides, tandis que la chenalisation et l'implantation d'épis impactent directement les variables morphologiques.

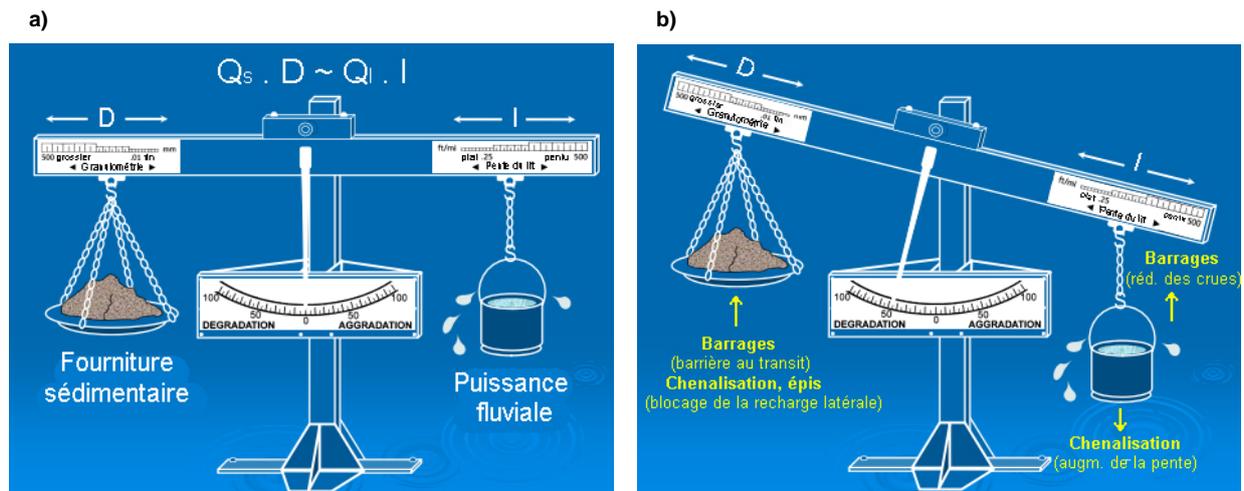


Figure 1.5 : a) Balance de Lane illustrée par Borland (1960). b) Déséquilibre de la balance avec l'anthropisation des cours d'eau (modifié d'après Bledsoe, 2010)

Nous présentons ci-après les impacts morphologiques spécifiques aux trois types de travaux en rivière.

### 1.3.2. Les impacts de la chenalisation

La rectification, souvent rencontrée dans les travaux de chenalisation, a pour effet direct de diminuer la longueur développée du cours d'eau : sur le cours inférieur du Mississippi (Etats-Unis), 16 coupures de méandres ont raccourci le fleuve de 243 km dans les années 1920-1940 (Smith et Winkley, 1996) ; sur le cours moyen du Yangtze, 3 rectifications ont supprimé 78 km dans les années 1970 (Li *et al.*, 2007). En conséquence, la pente augmente, ce qui accroît les forces tractrices et la puissance fluviale, et fait pencher la balance vers une **incision**.

Contrairement aux érosions du fond du lit (*scour*), qui sont limitées spatialement et temporellement, l'incision désigne un enfoncement généralisé, pouvant durer plusieurs décennies et étant susceptible d'affecter toute une partie du réseau hydrographique (Galay, 1983 ; Simon et Darby, 1999). Sur le Mississippi, Hudson *et al.* (2008) ont mesuré sur deux tronçons chenalisés de 100 km chacun et sur une période de 14 ans, une incision moyenne de 3,5 m et 6 m, et supérieure à 10 m localement. En complément, la purge du chenal est souvent accentuée par

l'artificialisation des berges, qui supprime les possibilités de recharge par érosion latérale (Peiry, 2003).

Le basculement du profil en long consécutif à une rectification s'étend classiquement au-delà du tronçon aménagé : l'incision progresse vers l'amont par **érosion régressive**, et les matériaux prélevés sont déposés en aval (Brookes, 1988). Robbins et Simon (1983) (cités par Simon et Rinaldi, 2006) ont mis en évidence ce patron sur une rivière du Tennessee (fig. 1.6) : un recalibrage et une rectification ont été opérés en 1967, entre la confluence et une station de jaugeage implantée en amont. L'érosion a progressé jusqu'à une deuxième station en 1970, et a atteint une troisième station, à 21 km en amont du site aménagé, au milieu des années 1970. Le chenal incisé au droit de la première station s'est peu à peu exhaussé, avec l'arrivée des sédiments érodés depuis l'amont.

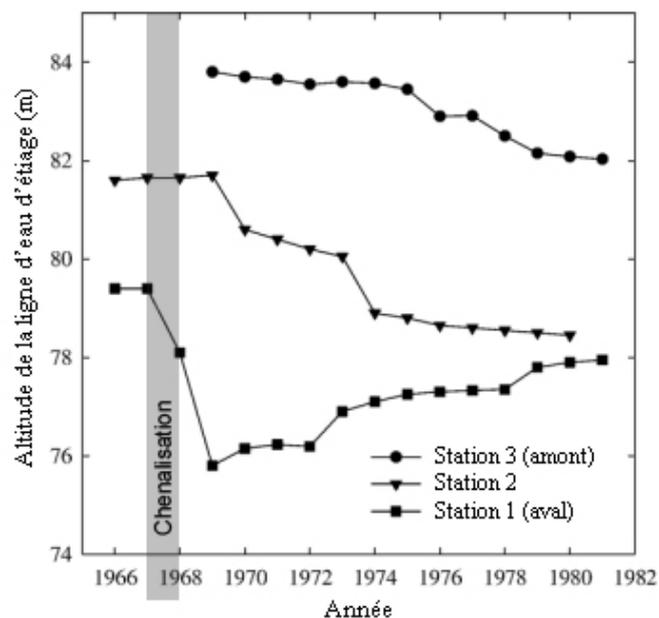


Figure 1.6 : Evolution de la ligne d'eau d'étiage sur la South Fork Forked Deer River : la chenalisation a été réalisée entre la confluence et la station 1 en 1967-68. La station 3 se trouve à 21 km en amont de la station 1 (Robbins et Simon, 1983, d'après Simon et Rinaldi, 2006)

### 1.3.3. Les impacts des épis

Les épis ont pour effet de modifier la magnitude et la direction des écoulements entre et à proximité des ouvrages, ce qui induit une géométrie spécifique de ces tronçons aménagés (Weitbrecht, 2004) : l'écoulement ralentit entre les épis, ce qui favorise le développement de **plages de dépôt entre les ouvrages**, tandis que la contraction du chenal accroît les forces tractrices et provoque une **incision du lit**. Sur la Waal, Ten Brinke *et al.* (2001, 2004) ont montré que ces deux processus sont liés, les matériaux déposés sur les marges provenant en partie de l'incision du fond.

Le ralentissement des écoulements tend à privilégier le **dépôt des fractions les plus fines** entre les épis, les fractions grossières restant en transit dans le chenal, en accord avec les travaux de

Hjulström (1935) décrivant les phases de transport, d'érosion et de sédimentation en fonction de la taille des particules et de la vitesse du courant. En effet, le lit de la Waal est composé de sables grossiers ( $D_{50}$  entre 0,5 et 4 mm), tandis que les champs d'épis sont constitués de sables plus fins ( $D_{50}$  entre 0,35 et 0,4 mm) (Ten Brinke *et al.*, 2004). Schwartz et Kozerski (2003) ont également identifié deux cortèges granulométriques entre les épis de l'Elbe : des sables fins et grossiers dans les secteurs où la vitesse moyenne est supérieure à 10 cm/s, et des boues dans les autres secteurs. La majeure partie de la bibliographie sur les épis concerne les lits sableux, cependant nous supposons que ce phénomène de dépôt sélectif puisse s'appliquer aux lits graveleux tels que le Vieux Rhin.

Enfin, Yossef et De Vriend (2010) ont modélisé en canal le comportement morphologique d'une section à épis. Les auteurs ont estimé que l'évolution sur le long terme serait un **comblement total des champs d'épis**. Les facteurs susceptibles d'inverser cette tendance seraient le rayon de courbure et les effets de rétroaction entre processus morpho- et hydrodynamiques. La colonisation végétale constitue par ailleurs un mécanisme pouvant accélérer le processus de comblement. Dans les sections court-circuitées du Rhône, la végétalisation des « casiers Girardon » émergés a en effet conduit à une accrétion de ces secteurs, par piégeage des sédiments fins (Raccasi, 2008).

#### 1.3.4. Les impacts des barrages

Les effets morphologiques des barrages ont fait l'objet de plusieurs synthèses scientifiques au cours de ces 30 dernières années (Petts, 1979 ; Williams et Wolman, 1984 ; Kondolf, 1997 ; Brandt, 2000 ; Grant *et al.*, 2003 ; Petts et Gurnell, 2005 ; Graf, 2006 ; Rollet, 2007 ; Schmidt et Wilcock, 2008 ; Souchon et Nicolas, 2011 ; Grant, 2012). Ces effets sont nombreux et plus complexes que ceux induits par la chenalisation et les épis, car les barrages modifient à la fois les débits liquides et solides, et les changements qu'ils imposent sont susceptibles d'affecter plus ou moins profondément les variables morphologiques.

##### *Impacts des barrages sur les variables de contrôle*

Les impacts sur les débits liquides varient selon le type de barrage. La modification la plus courante concerne **la fréquence, l'amplitude et la durée des débits extrêmes**, minimum et maximum : les pics de crue sont souvent diminués, alors que les débits d'étiage peuvent être augmentés (Magalligan et Nislow, 2005 ; Brandt, 2000). C'est le cas de la majorité des barrages-réservoirs. Les ouvrages en dérivation produisent généralement l'effet inverse sur les débits minimum : l'essentiel des débits est acheminé vers l'usine hydro-électrique, et un **débit réservé** est maintenu en aval du barrage, hors périodes de crue où le débit dépassant le débit d'équipement de l'usine est alors déversé dans le tronçon court-circuité. En France, la loi « pêche » de 1984 a fixé le débit réservé « *garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces* » (art. L 432-5 du Code de l'environnement) au 10<sup>ème</sup> du module pour les nouveaux ouvrages et au 40<sup>ème</sup> du module pour les ouvrages existants (Alava, 2009). Le plus souvent, ces valeurs sont très inférieures au module naturel, voire au débit d'étiage (fig. 1.7).

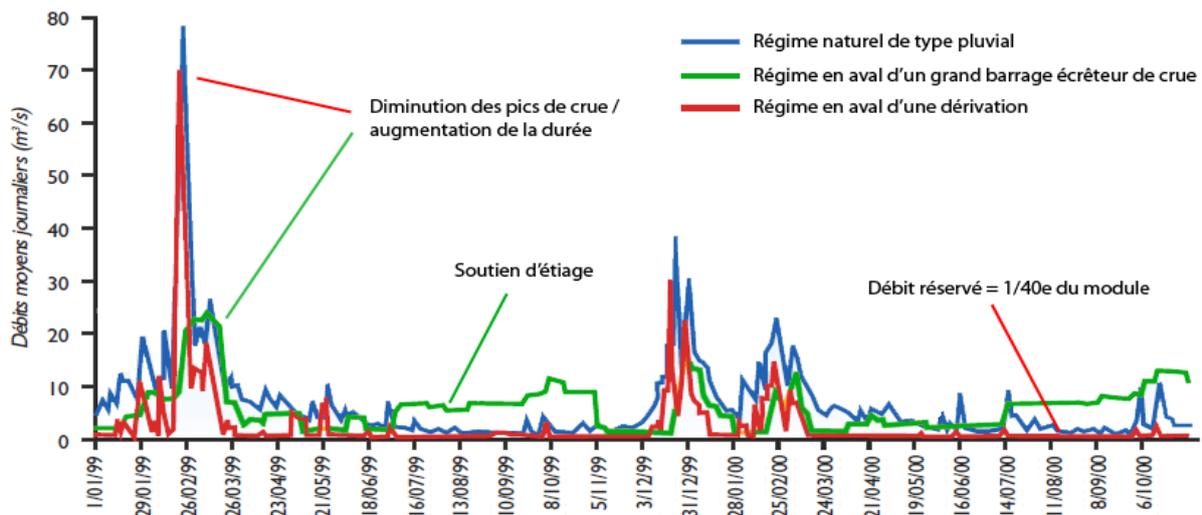


Figure 1.7 : Comparaison des caractéristiques de trois régimes hydrologiques théoriques : régime naturel de type pluvial, régime artificiel en aval d'un grand barrage écrêteur de crue, régime de débit réservé en aval d'une dérivation de centrale hydro-électrique (d'après Baran et Leroyer-Gravet, 2007)

Les impacts des barrages sur les débits solides sont également variables, selon si l'ouvrage est équipé de vannes permettant le transit. Le mode de gestion de la retenue entre aussi en jeu (réintroduction des matériaux de dragage en aval du barrage...). Mais, quand bien même les sédiments ne s'accumulent pas en amont, leur transport vers l'aval est conditionné par la puissance fluviale, qui se trouve également altérée. Schmidt et Wilcock (2008) ont exploité une base de données regroupant 61 tronçons aménagés de l'Ouest américain, soit plus de 4 000 km de cours d'eau. En utilisant la balance de Lane (1955) et les relations d'Einstein-Brown et de Chézy, les auteurs démontrent que :

$$I^* = \frac{(Q_s^*)^{0.5} (D^*)^{0.75}}{Q_l^*} \quad \text{avec :} \quad I^* = \frac{I_{post}}{I_{pré}} \quad Q_s^* = \frac{Q_{s,post}}{Q_{s,pré}} \quad Q_l^* = \frac{Q_{l,post}}{Q_{l,pré}} \quad D^* = \frac{D_{post}}{D_{pré}}$$

$I$  : pente du lit

$Q_s$  : débit solide

$Q_l$  : débit liquide (période de retour = 2 ans)

$D$  : diamètre moyen des sédiments du fond

$pré$  : condition d'avant barrage

$post$  : condition d'après barrage

$I^*$  exprime la **balance sédimentaire**, soit le potentiel de dépôt ou d'érosion en réponse à la modification des variables de contrôle. Trois cas de figure sont rencontrés :

- $I^* > 1$  : cela signifie qu'une augmentation de la pente est nécessaire pour transporter la fourniture sédimentaire post-barrage, compte-tenu de la modification des débits de crue. Il y a trop de sédiments à transporter, une condition post-barrage d'**excès sédimentaire** est donc prévisible ;
- $I^* < 1$  : une condition post-barrage de **déficit sédimentaire** est prévisible ;
- $I^* = 1$  : le tronçon est en **équilibre dynamique** entre le dépôt et l'érosion.

Les auteurs constatent une large gamme de valeurs prises par  $I^*$  (entre 0,08 et 1,64), expliquée par les nombreuses combinaisons d'ajustements possibles (fig. 1.8). Environ **67 % des tronçons sont en déficit sédimentaire**, et seulement 4 % sont en excès. Les 29 % restants sont en équilibre, ou indéterminés par manque de données.

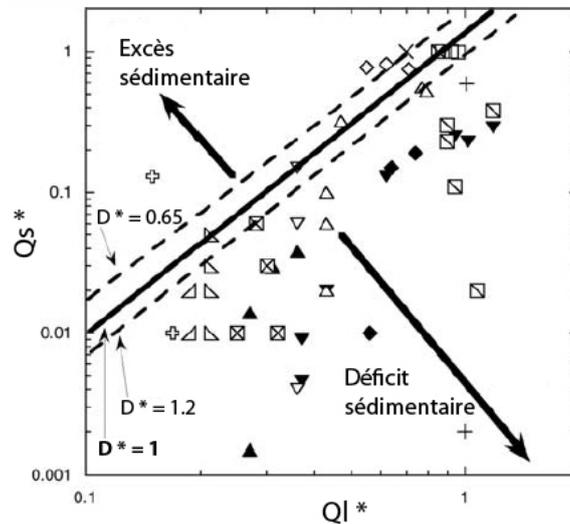


Figure 1.8 : Diagramme de modification des débits liquides ( $Q_l^*$ ) et solides ( $Q_s^*$ ) étant à l'origine d'un déficit ou d'un excès sédimentaire en aval de barrages. Les diagonales représentent l'équilibre dynamique ( $I^* = 1$ ) pour  $D^* = 0.65, 1$  et  $1.2$ . Chaque point représente un tronçon de rivière, et chaque figuré renvoie à une rivière différente dans la base de données (d'après Schmidt et Wilcock, 2008)

#### *Impacts des barrages sur les variables morphologiques*

Schumm (1969) a proposé quatre scénarios d'évolution découlant des combinaisons possibles de modification des variables de contrôle (fig. 1.9) (Petts et Gurnell, 2005).

Kondolf (1997) illustre les effets morphologiques des barrages avec le concept de *hungry water* : « l'eau affamée » relâchée par l'ouvrage se réalimente avec les sédiments du fond, ce qui provoque une **incision** et une **augmentation de la granulométrie du fond** (*bed coarsening*), par érosion sélective (scénario 1, fig. 1.9). Ce phénomène est toutefois limité, dans le cas où le barrage n'accroît pas le déficit sédimentaire et/ou si le laminage des crues est très significatif et réduit la puissance fluviale (scénario 2, fig. 1.9). Dans ce cas, la diminution de l'amplitude et de la durée des inondations favorise la **colonisation végétale** des milieux annexes au chenal et notamment des bancs, moins fréquemment immergés, ce qui provoque une **rétraction de la bande active** et un exhaussement des marges végétalisées (Martin et Johnson, 1987 ; Marston *et al.*, 1995 ; Johnson, 1997 ; Friedman *et al.*, 1998 ; Surian, 1999 ; Liébault et Piégay, 2002 ; Petts et Gurnell, 2005 ; Cadol *et al.*, 2010). Sur la Piave (Italie), Surian (1999) a montré que la bande active actuelle présente une largeur moyenne équivalente à 35 % de sa valeur du début du 20<sup>ème</sup> siècle, avant la construction des barrages.

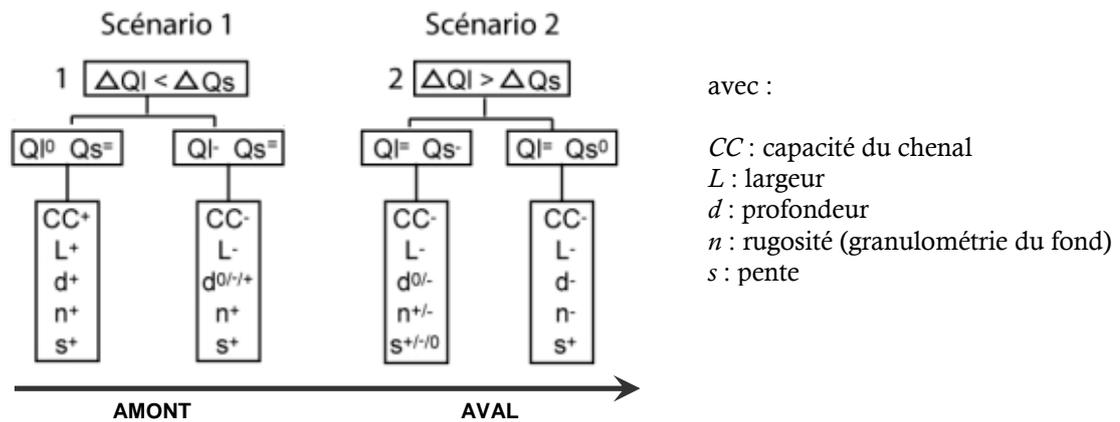


Figure 1.9 : Scénarios d'évolution d'un tronçon fluvial en aval d'un barrage, en réponse aux modifications relatives des débits liquides ( $Q_l$ ) et solides ( $Q_s$ ). L'importance des modifications décroît de l'amont vers l'aval (d'après Petts et Gurnell, 2005 basé sur Schumm, 1969)

Le patron longitudinal de rétraction est contrôlé par le facteur principal de perturbation : une prépondérance du **facteur hydrologique** se manifestera le plus souvent par une **végétalisation synchrone** sur l'ensemble du tronçon affecté, tandis qu'un **facteur sédimentaire** dominant se traduira par une **progression amont-aval** de l'impact, la végétation s'implantant préférentiellement sur les bancs latéraux « perchés » par la progression vers l'aval du front d'incision résultant du déficit sédimentaire (Liébault et Piégay, 2002 ; Dufour, 2005). Dans tous les cas, l'intensité des ajustements tend à diminuer avec la distance au barrage (fig. 1.9), car les effets sur les variables de contrôle sont atténués, et la présence d'affluents en aval modifie les conditions de crue et de fourniture sédimentaire (Schmidt et Wilcock, 2008).

### 1.3.5. Echelles spatio-temporelles d'ajustement et effets cumulatifs

Wasson *et al.* (1998) évoquent l'image du chêne et du roseau pour illustrer les deux réponses possibles d'un tronçon fluvial à une perturbation :

- soit le tronçon est **résilient**, c'est-à-dire que tel un élastique, il est facilement modifié mais est capable de s'auto-restaurer par des mécanismes de rétroaction ;
- soit le tronçon est **résistant**, c'est-à-dire qu'il est peu modifié jusqu'à un certain niveau de perturbation (*effet de seuil*), au-delà duquel les transformations peuvent être importantes.

L'atteinte d'un seuil, ainsi que la relation « force-résistance » qui existe entre l'intensité de la perturbation et les caractéristiques du tronçon (géologie, régime hydrologique, granulométrie du fond, cohésion des berges, type de végétation...) constituent les fondements du concept de **sensibilité au changement** (Graf, 1979 ; Schumm, 1991 ; Downs et Gregory, 1993).

Les échelles d'ajustement diffèrent alors selon la sensibilité du système au changement, la nature et l'intensité de la perturbation, et le temps nécessaire à la propagation de ce changement, si le tronçon enregistrant une modification des variables de contrôle est différent du tronçon affecté

par les ajustements (Church, 1995). Les changements peuvent s'exprimer à court terme, lors d'un épisode de crue, ou à moyen et long termes (plusieurs années voire dizaines, centaines d'années) plus à l'aval (Knighton, 1984 ; Amoros et Petts, 1993).

La réponse générale d'un cours d'eau à une perturbation est classiquement décomposée en un **temps de réaction** et un **temps de relaxation** (Graf, 1977) : le système évolue rapidement les premières années, puis il progresse de manière asymptotique jusqu'à l'atteinte du nouvel équilibre. La plupart des incisions et rétractions observées sur des tronçons fluviaux aménagés évolue selon ce modèle non linéaire (fig. 1.10) (Williams et Wolman, 1984 ; Surian et Rinaldi, 2003). Dans le cas de l'incision, le ralentissement, voire l'arrêt du processus, est contrôlé par un ou plusieurs facteurs : l'affleurement du substratum rocheux non mobilisable, la formation d'une couche de pavage, l'occurrence de nouvelles entrées sédimentaires par les versants ou par les affluents, la diminution de la capacité de transport, la colonisation végétale (Williams et Wolman, 1984).

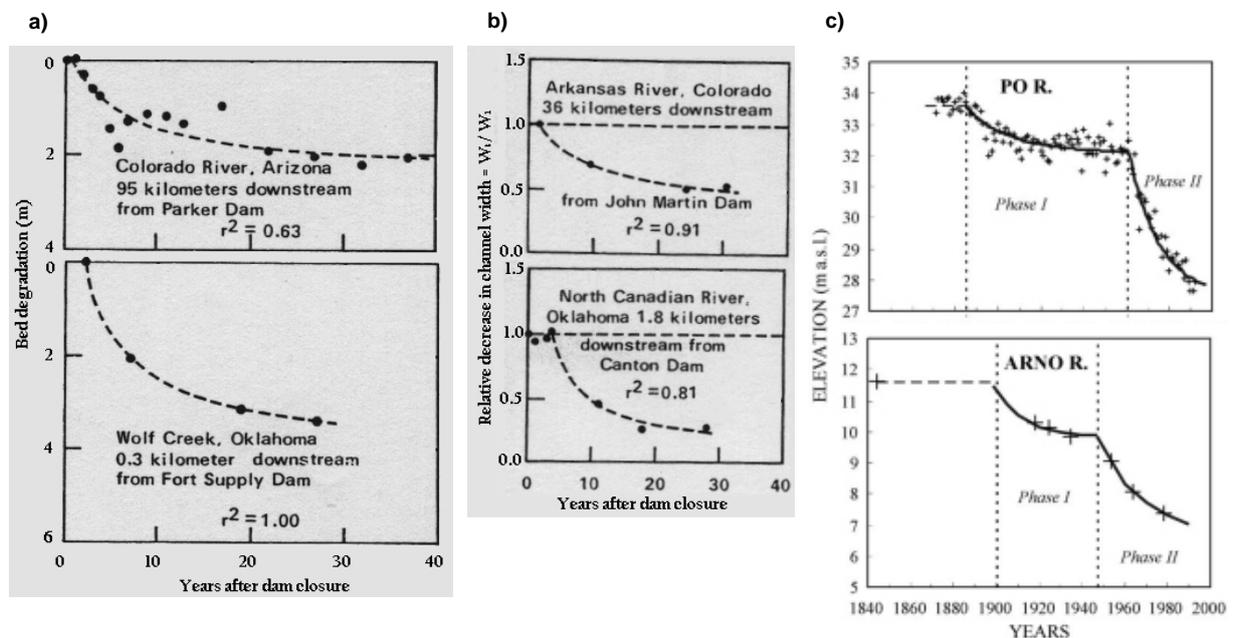


Figure 1.10 : Modèles d'ajustement de tronçons fluviaux aménagés : a) Fonction hyperbolique d'incision en aval de barrages. b) Fonction hyperbolique de rétraction en aval de barrages (Williams et Wolman, 1984). c) Fonction exponentielle d'incision après des changements d'occupation des sols (phase 1) et des barrages et extractions (phase 2) (Surian et Rinaldi, 2003)

Les exemples du Po et de l'Arno (Italie) (Surian et Rinaldi, 2003, fig. 1.10, c) illustrent les **effets cumulatifs** d'aménagements réalisés de façon concomitante ou successive. Dans ce contexte, le concept de **trajectoire temporelle d'ajustement** permet de mieux appréhender la réponse complexe d'un tronçon fluvial aménagé, au cours de laquelle les cycles, les tendances sur le long terme et les fluctuations sur le court terme se superposent (Brierley et Fryirs, 2005 ; Dufour, 2005 ; Hughes *et al.*, 2005 ; Brierley *et al.*, 2008 ; Dufour et Piégay, 2009).

Ces perturbations morphologiques pèsent sur le fonctionnement écologique des cours d'eau et ont également des répercussions économiques.

## 1.4. Les impacts écologiques et socio-économiques de ces travaux

### 1.4.1. Liens entre hydro-morphologie et écologie des cours d'eau

En 1980, Vannote *et al.* (cités par Dufour, 2005) proposaient le concept de **continuum fluvial** (*river continuum concept*) afin de décrire la structuration des communautés biologiques et du fonctionnement trophique selon le gradient amont-aval des conditions physiques. Les auteurs mettaient ainsi en évidence une modification longitudinale de la composition des populations de poissons et de macro-invertébrés.

Aujourd'hui, **il est très largement admis le rôle majeur des processus hydro-morphologiques sur le fonctionnement écologique des cours d'eau** : la dynamique fluviale façonne les habitats aquatiques et terrestres, et ceux-ci déterminent en grande partie l'abondance, la distribution et la composition des communautés faunistiques et floristiques (fig. 1.11) (Stillwater Sciences, 2002, 2005, 2006 ; Bunte, 2004). Dans ce système hiérarchisé qu'est le cours d'eau, une modification naturelle ou anthropique de l'une ou l'autre des variables d'ajustement ou de contrôle conduit irrémédiablement à une modification du compartiment biologique.

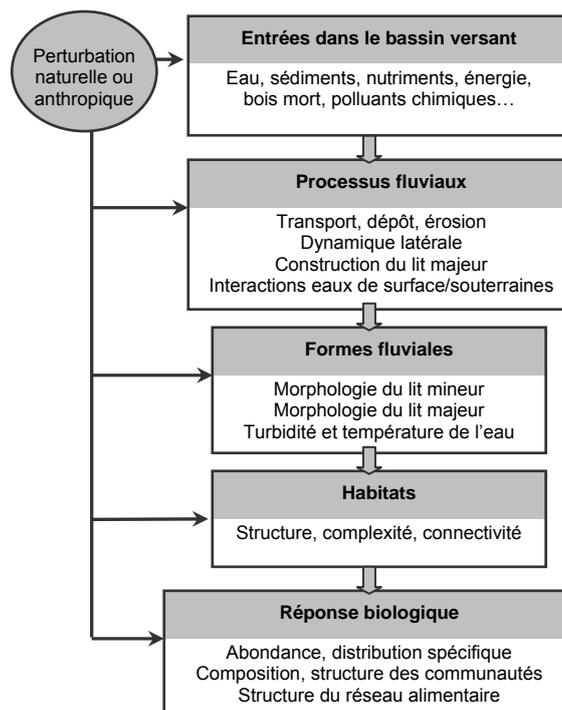


Figure 1.11 : Modèle conceptuel des liens entre les compartiments physiques et biologiques dans les systèmes alluviaux (d'après Stillwater Sciences, 2005)

### 1.4.2. Impacts écologiques et socio-économiques

L'incision d'un tronçon fluvial aménagé peut avoir de très nombreux effets sur les biocénoses aquatiques et terrestres ainsi que sur les activités socio-économiques liées au cours d'eau (tableau 1.1) (Bravard *et al.*, 1999).

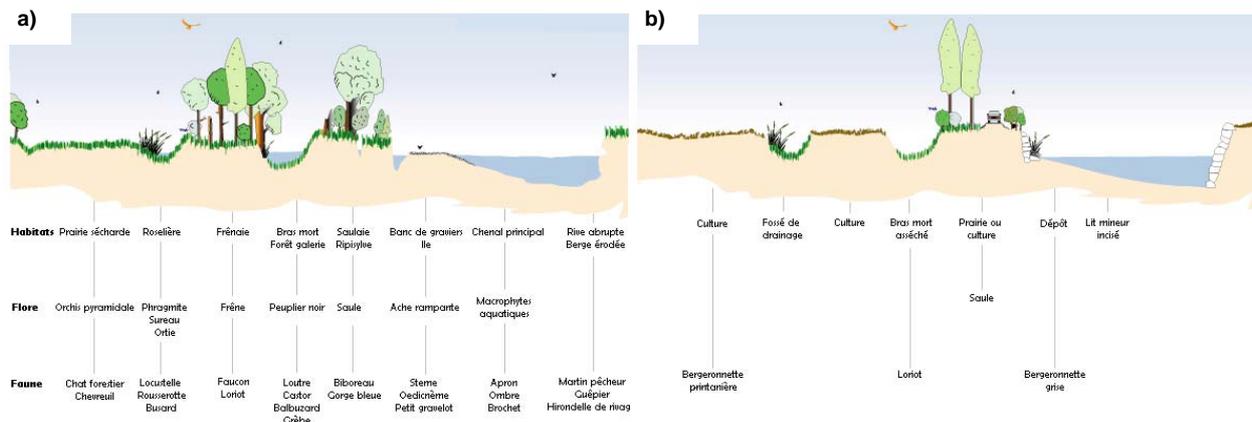
Impacts de l'incision sur la géométrie, la capacité de transport, la fourniture sédimentaire et les infrastructures	Impacts écologiques et socio-économiques
Abaissement du niveau d'eau	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Baisse du toit de la nappe et diminution des réserves d'eau souterraine</li> <li>* Modification de l'alimentation en eau et de la composition de la végétation riveraine</li> <li>* Assèchement des zones aquatiques périfluviales</li> <li>* Modifications physico-chimiques et altération de la qualité des eaux</li> <li>* Assèchement et perte des habitats hyporhéiques en berge</li> </ul>
Affouillement des ouvrages en lit mineur (seuils, piles de pont, pipelines, protections de berges)	* Destruction ou réparations coûteuses
Affouillement et érosion des berges et des versants riverains	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Elargissement et instabilité du chenal</li> <li>* Perte de terrains agricoles et d'infrastructures riveraines</li> <li>* Glissements de terrain</li> </ul>
Rétraction de la bande active, diminution du rapport largeur/profondeur	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Réduction des surfaces d'habitats aquatiques, altération des habitats riverains</li> <li>* Réduction de la surface du lit participant à la recharge souterraine</li> <li>* Concentration de l'écoulement et augmentation des forces tractrices susceptibles d'aggraver l'incision</li> </ul>
Simplification du chenal et abandon des chenaux multiples	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Homogénéisation des habitats aquatiques</li> <li>* Appauvrissement des communautés piscicoles</li> <li>* Réduction des habitats riverains</li> </ul>
Disparition des bancs de graviers	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Disparition d'habitats</li> <li>* Réduction de la biodiversité</li> </ul>
Pavage du fond	* Disparition des graviers pour la reproduction des poissons
Exhumation de barres rocheuses	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Disparition des graviers pour la reproduction des poissons</li> <li>* Disparition des habitats hyporhéiques</li> <li>* Obstacles à la migration piscicole</li> </ul>
Réduction des débordements	* Changements dans la mosaïque végétale
Augmentation des apports solides en aval	* Exhaussement des tronçons en aval

**Tableau 1.1 : Impacts écologiques et socio-économiques liés à l'incision d'un tronçon fluvial aménagé (d'après Bravard *et al.*, 1999)**

Dans le lit mineur, l'incision peut mettre en péril la stabilité des berges et des ouvrages de génie civil (seuils, piles de ponts...) (Bravard, 1994 ; Kondolf, 1997). De plus, la simplification des formes fluviales et la modification des vitesses et des profondeurs conduisent souvent à une homogénéisation des faciès d'écoulement et des substrats, ce qui entraîne une forte simplification des habitats pour les invertébrés et les poissons (Wasson *et al.*, 1998). Les situations d'incision sont également susceptibles d'aboutir à la formation d'un pavage, constitué de particules trop grossières pour pouvoir être mobilisées par les poissons au moment du frai (Kondolf, 1997). Dans de nombreuses rivières californiennes, la reproduction des salmonidés est ainsi menacée par la raréfaction des graviers compris entre 15 et 50 mm d'axe *b* (Kondolf et Wolman, 1993).

Dans le lit majeur, l'incision induite par les aménagements, ou les aménagements eux-mêmes (endiguements, protections de berges, barrages...), affectent la **connectivité écologique** dans ses trois dimensions : **longitudinale** (déconnexion des bras secondaires par l'amont ou l'aval), **latérale** (déconnexion totale des bras, diminution de la fréquence des débordements...) et

**verticale** (abaissement du toit de la nappe...). Ces déconnexions se traduisent par un assèchement des habitats et par un appauvrissement généralisé des biocénoses (Adam *et al.*, 2006) (fig. 1.12). Par exemple, la végétation des tronçons chenalisés évolue typiquement vers une réduction de la diversité spécifique et une homogénéisation de la structure des communautés (Bombino *et al.*, 2007 ; Dufour *et al.*, 2007).



**Figure 1.12 : Illustration des impacts de l'incision ou de la chenalisation sur les habitats et biocénoses liés au cours d'eau : situation avant (a) et après (b) aménagement (d'après une réalisation de L. Terraz, DREAL Franche-Comté, 2003 ; Adam *et al.*, 2006)**

Outre les effets de l'incision, les incidences écologiques et économiques des travaux en rivière sont variées. Elles concernent par exemple les modifications thermiques de l'eau dans la retenue des barrages ou en aval de dérivations (Olden et Naiman, 2010), l'aggravation des crues en aval de tronçons chenalisés (Wasson *et al.*, 1998)... Jamme (1969) cite le cas de la Tisza, un affluent du Danube dont la longueur du tracé a été réduite de moitié par des coupures de méandres au 19<sup>ème</sup> siècle, ce qui a eu pour effet d'amplifier la crue de 1879 et de détruire à 95 % la ville de Szeged située en aval.

Il ne faut cependant pas oublier que certains aménagements peuvent assurer des bénéfices écologiques. Les champs d'épis immergés peuvent par exemple servir de nurseries et d'abris pour la faune piscicole, et d'aires d'incubation pour les algues planctoniques (Reynolds *et al.*, 1991, cités par Sukhodolov *et al.*, 2002). Dans certains cas, les épis sont implantés spécialement pour restaurer une diversité de fond à un lit trop uniforme (Thompson, 2002 ; Degoutte, 2006 ; Adam *et al.*, 2007) ; encore faut-il que soient analysés les risques d'érosion de berges, d'incision localisée ou de sur-élévation de la ligne d'eau en crue pouvant résulter de ces ouvrages (Adam *et al.*, 2007).

Enfin, si les publications d'écologie ou de géomorphologie mettent largement en lumière les perturbations anthropiques des systèmes fluviaux, il faut rappeler que les aménagements entrepris dans un souci de gestion intégrée et de développement territorial et durable existent ! La construction du barrage hydro-électrique de Nam Theun 2 (Laos) en est un exemple récent (EDF, 2009 ; Salignat, 2012). Différentes actions sociales et environnementales ont accompagné le projet : reconstruction de 15 villages localisés dans la zone d'inondation, alimentation en eau

potable de 80 villages impactés en aval, proposition de techniques agricoles alternatives, protection de la faune sauvage, financement d'une réserve naturelle de 4 000 km<sup>2</sup>...

En France, le durcissement de la mise en concurrence des concessions hydro-électriques oblige depuis 2004 toutes les entreprises à présenter à l'Etat des offres conciliant efficacité énergétique et mesures compensatoires, pour une meilleure préservation des écosystèmes impactés et un respect des autres usages liés à l'eau (Leteurtrois *et al.*, 2006 ; EDF, 2012). Cet exemple de modification du cadre législatif s'inscrit dans le contexte d'une prise de conscience environnementale qui a débuté dans nos sociétés occidentales il y a déjà 50 ans (*environmental awareness*, Carson, 1962, cité par Downs et Gregory, 2004). Dans ce contexte, la restauration écologique ouvre la voie à un nouveau rapport entre l'Homme et le cours d'eau, et offre un champ d'actions et de recherches scientifiques particulièrement vaste.

## 2. La restauration des cours d'eau

### 2.1. Définitions

#### 2.1.1. Le retour à un état non perturbé

La restauration couvre de nombreux modes d'action, qui visent tous à améliorer la qualité écologique d'un milieu naturel dégradé par des interventions humaines. Cairns (1991) évoque « **un retour complet, structurel et fonctionnel, à un état non perturbé** ». Muhar *et al.* (1995) relatent « *l'ensemble des mesures qui modifient les altérations induites par l'Homme, de telle sorte que le fonctionnement écologique du nouvel état se rapproche d'une rivière naturelle* ». Le concept allemand de *leitbild* évoque une « situation idéale », soit le potentiel naturel d'un cours d'eau en l'absence de pressions économiques et politiques (Kern, 1992 ; Jungwirth *et al.*, 2002). Le concept de *naturalité*, employé initialement dans la gestion des forêts et des espaces naturels protégés (Peterken, 1996 ; Schnitzler-Lenoble, 2002) et récemment transposé aux hydrosystèmes fluviaux (Trémolières *et al.*, 2002 ; Wohl et Merritts, 2007), suggère également le retour à un état non anthropisé. En Europe, la Directive Cadre sur l'Eau exige d'atteindre le « *bon état écologique* » des masses d'eau d'ici 2015. Cet état est défini par rapport à des conditions biologiques, hydromorphologiques et physico-chimiques de référence, représentant « *pas ou très peu d'altérations anthropogéniques* » (annexe V). De ce point de vue, la DCE constitue l'une des plus ambitieuses actions collectives de promotion de la naturalité menée à ce jour (Newson et Large, 2006, cités par Dufour et Piégay, 2009).

Il est possible de positionner la restauration des cours d'eau sur un gradient opposant l'état naturel ou semi-naturel à l'état dégradé (Boon *et al.*, 1992) (fig. 1.13). La restauration intervient quand les actions de préservation, puis de limitation et d'atténuation des effets négatifs des activités humaines, ne sont pas suffisantes pour maintenir la qualité écologique du tronçon.

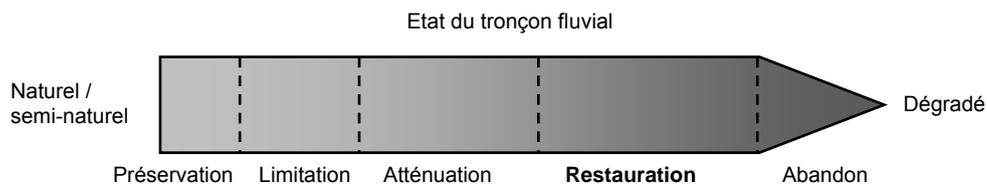


Figure 1.13 : Options de gestion selon l'état de dégradation d'un tronçon fluvial (d'après Boon *et al.*, 1992)

### 2.1.2. Des références statiques ...

Les premières restaurations, entreprises en Europe et aux Etats-Unis au cours des années 1980-1990, étaient principalement basées sur des références historiques statiques. De fait, elles se limitaient le plus souvent à **une simple « réparation » des formes fluviales altérées** (Dufour et Piégay, 2009). Dans certains cas, ces actions se sont soldées par un échec (Kondolf *et al.*, 2001). Depuis, une meilleure compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes nous permet de mieux diagnostiquer les causes des altérations, c'est-à-dire les perturbations des variables de contrôle du système fluvial, et ainsi orienter les actions vers **une restauration durable des processus** (Ward *et al.*, 2001 ; Wohl *et al.*, 2005 ; Kondolf *et al.*, 2006 ; Simon, 2008 ; Dufour et Piégay, 2009 ; Beechie *et al.*, 2010). Aussi, selon Wohl *et al.* (2005), la restauration « *participe à la réparation de l'intégrité écologique, en rétablissant les processus hydrologiques, géomorphologiques et écologiques* ».

### 2.1.3. ... à la formulation d'objectifs de restauration réalistes

Depuis les années 2000, le concept de **services écosystémiques** (Costanza *et al.*, 1997 ; MEA, 2005 ; Dufour *et al.*, 2010) est en passe de modifier les pratiques. En effet, pendant longtemps, la valeur des écosystèmes était seulement basée sur les biens qu'ils étaient en mesure de produire pour les populations humaines (eau, nourriture, graviers...). Or, les services et bénéfices dérivés directement ou indirectement des écosystèmes sont de plus en plus reconnus ; ils incluent le traitement des déchets, la séquestration du carbone, la régulation des eaux et du climat, les ressources génétiques, le bien-être (loisirs, développement personnel...) (Costanza *et al.*, 1997 ; Roni et Beechie, 2012). Cette prise de conscience de l'importance des écosystèmes pour l'existence humaine en général conduit à un intérêt croissant pour la restauration des milieux naturels (Roni et Beechie, 2012). La définition du WWF/IUCN (2000) résume bien ce nouvel état d'esprit, selon lequel la restauration est « *un processus qui vise à rétablir l'intégrité écologique tout en améliorant le bien-être de l'homme* ». A ce propos, Bazin et Barnaud (2002) ont identifié trois objectifs majeurs motivant un projet de restauration :

- *le retour à un bon niveau de biodiversité*, représenté par la qualité écologique du milieu ;
- *le rétablissement de la fonctionnalité des écosystèmes*, afin qu'ils remplissent à nouveau des fonctions écologiques et des services à l'échelle d'un territoire ;
- *la préoccupation d'une certaine efficacité économique*, les mesures devant répondre à des critères de faisabilité et de reproductibilité à plus grande échelle.

Les nouveaux concepts dressent le cadre actuel et futur de la restauration : avec le concept de *trajectoire temporelle*, la **réversibilité des ajustements est remise en cause**. Il devient alors préférable de penser l'évolution du site restauré comme un prolongement de sa trajectoire passée, plutôt que de viser un retour, idéalisé, vers une référence historique statique (fig. 1.14) (Dufour et Piégay, 2009). Par ailleurs, la restauration ne peut pas se limiter à une simple « renaturation », dans la mesure où elle doit répondre aux *besoins de la société*. Les enjeux résideraient donc désormais dans la **formulation d'objectifs de restauration réalistes**, fondés sur le diagnostic de « ce que nous pourrions avoir » (*i.e. quelles sont les possibilités de restauration compte-tenu de la trajectoire temporelle d'ajustement ?*), et de « ce que nous voulons » (*i.e. quels sont les besoins de la société à satisfaire et en quoi la restauration peut-elle y contribuer ?*) (Dufour et Piégay, 2009 ; Dufour et al., 2010) (fig. 1.15).

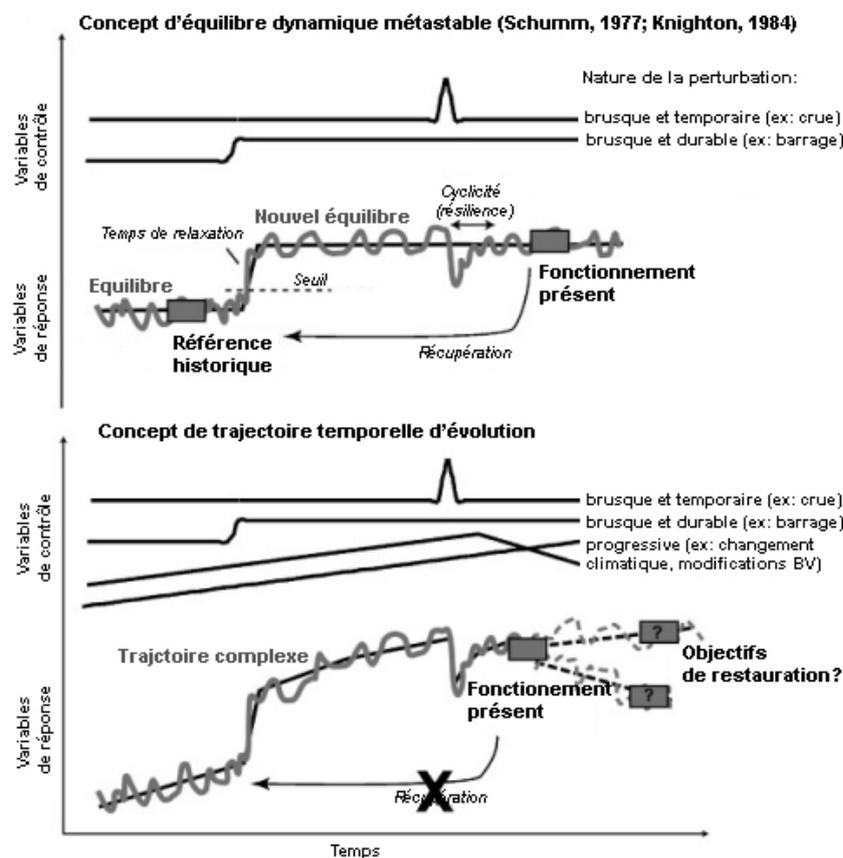


Figure 1.14 : Remise en cause de la réversibilité des processus avec le concept de trajectoire temporelle d'évolution (d'après Dufour et Piégay, 2009)

La plupart des programmes de restauration entrepris récemment consiste ainsi en des approches multifonctionnelles, combinant « renaturation » et satisfaction de besoins sociétaux, dans une perspective de développement durable et à large échelle (Habersack et Piégay, 2008). Par exemple, le projet d'aménagement intégré du Danube entre Vienne et Bratislava, lancé en 2002, vise simultanément à maintenir un tirant d'eau constant pour la navigation, stopper l'incision et améliorer l'état écologique du chenal et de ses marges (Reckendorfer *et al.*, 2005 ; Jungwirth, 2008). Plusieurs actions sont mises en œuvre dans ce cadre.

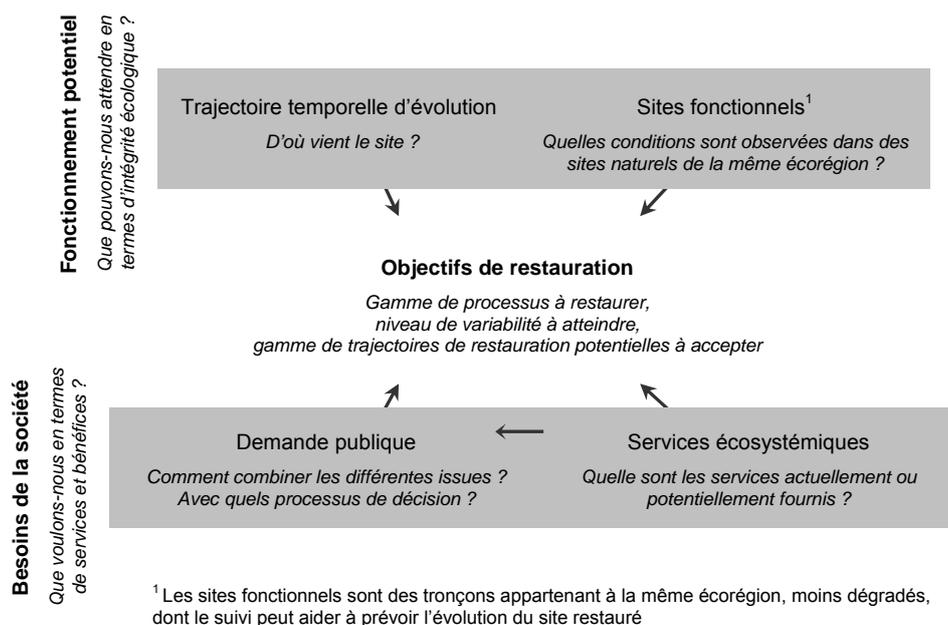


Figure 1.15 : Cadre conceptuel pour la définition d'objectifs de restauration (d'après Dufour et Piégay, 2009 ; Dufour *et al.*, 2010)

## 2.2. Des exemples d'opérations de restauration

La restauration physique des cours d'eau peut porter sur les **flux, liquides ou solides**, ou sur la **structure du lit** (Habersack et Piégay, 2008). L'intervention peut être menée **passivement** ou **activement**, selon qu'elle sollicite ou non la dynamique naturelle de la rivière une fois que les causes des perturbations ont été prises en compte (Kondolf, 2011). Par exemple, plus le cours d'eau sera puissant, avec des berges facilement érodables et des apports solides importants, plus la réactivation de sa dynamique latérale sera aisée (par simple suppression des enrochements), peu coûteuse et avec des effets rapides (Malavoi et Adam, 2007). A l'inverse, des interventions plus lourdes, coûteuses et aux résultats moins spectaculaires seront à envisager sur les cours d'eau peu puissants, peu dynamiques et à faibles apports grossiers (Malavoi et Adam, 2007). Une vue d'ensemble des principales options de restauration selon la nature des altérations hydro-morphologiques est donnée dans le tableau 1.2.

La loi sur l'eau et les milieux aquatiques de 2006 a modifié la loi « pêche » de 1984, en imposant l'**augmentation des débits réservés** en aval des barrages français d'ici 2014 : auparavant égal au 40<sup>ème</sup> du module pour les ouvrages existants, le débit minimal sera porté au 10<sup>ème</sup> du module si celui-ci est inférieur à 80 m<sup>3</sup>/s, et au 20<sup>ème</sup> du module sinon (Alava, 2009). Cette nouvelle loi introduit également la notion de « régime réservé », qui suggère la possibilité de fixer des débits différents selon la période de l'année, et ainsi **rétablir en partie une variabilité et une continuité hydrologiques**. Le relèvement des débits réservés a été entrepris dans les sections court-circuitées du Rhône à partir des années 1990, dans le cadre d'un programme de restauration hydraulique et écologique visant à retrouver un fleuve « *vif et courant* » (Bravard, 2006). Les autres actions de ce programme sont la restauration de la continuité biologique et la **reconnexion des annexes fluviales** asséchées (Olivier *et al.*, 2011).

Altérations hydro-morphologiques		Modification des débits liquides	Perturbation du transit sédimentaire	Blocage de la mobilité latérale	Homogénéisation des faciès	Appauvrissement du substrat	Déconnexion des milieux annexes	Baisse du toit de la nappe
Action sur...	Causes	Barrages	Barrages	Chenalisation, épis	Effets de l'incision <sup>1</sup>	Effets de l'incision	Effets de l'incision	Effets de l'incision
	Options de restauration							
... les flux liquides	Augmentation des débits réservés	X						X
	Restauration de la continuité hydrologique	X						X
... les flux liquides et la structure du lit	Reconnexion des annexes fluviales						X	X
... les flux solides	Restauration de la continuité sédimentaire		X		X	X	X	X
	Introduction de charge grossière		X		X	X	X	X
... les flux solides et la structure du lit	Élargissement du lit mineur		X	X	X	X	X	X
... la structure du lit	Diversification du fond				X	X		X

<sup>1</sup> L'incision est le plus souvent provoquée par les barrages, la chenalisation, les épis ou les extractions en lit mineur

**Tableau 1.2 : Principales options de restauration physique des cours d'eau selon la nature des altérations hydro-morphologiques (modifié d'après Habersack et Piégay, 2008)**

D'autres mesures sont focalisées sur les débits solides : le Rhône fait actuellement l'objet d'un schéma directeur visant à étudier les potentialités d'un **élargissement du lit mineur**, ce qui permettrait d'améliorer les capacités d'écoulement en crue, de réactiver la dynamique latérale et d'augmenter les flux sédimentaires jusqu'à la mer (Gaydou *et al.*, 2009 ; Moiroud et Bravard, 2012). Des actions similaires sont en cours sur le Danube, où il est prévu d'intervenir sur 40 % du linéaire entre Vienne et Bratislava, en retirant les enrochements et en remodelant les épis pour permettre au fleuve de refaçonner ses berges (Reckendorfer *et al.*, 2005 ; Kloesch *et al.*, 2011). Ce type d'intervention est souvent rencontré sur les cours d'eau périalpins, des exemples connus étant l'Isar (Allemagne) (Belau, 2002), la Drau (Autriche) (Habersack et Piégay, 2008) et la Thur (Suisse) (Woolsey *et al.*, 2005).

Une autre opération intéressant les flux solides est l'**introduction artificielle de charge grossière**. Elle est entreprise sur des tronçons en fort déficit sédimentaire, à la suite de l'interruption du transit par des barrages ou d'extractions sévères de granulats. C'est le cas des rivières de la

Central Valley en Californie (Kondolf *et al.*, 2005), du Rhin en aval du barrage d'Iffezheim (Kuhl, 1992), du Danube en aval de Vienne (Jungwirth, 2008), de la basse vallée de l'Ain (Rollet *et al.*, accepté), de l'Aar (Suisse) (Schälchli *et al.*, 2010) ou encore de la Mur (Autriche) (Kloesch *et al.*, 2008).

### 2.3. Le challenge des modèles prédictifs de réponse aux actions

Malavoi et Souchon (2010) constatent que si les trajectoires temporelles d'ajustement des tronçons fluviaux dégradés sont plutôt bien connues et documentées, en revanche les trajectoires de restauration restent difficiles à prédire. Evaluer le **potentiel de récupération** (*recovery potential*, Brierley et Fryirs, 2005), c'est-à-dire la capacité du site restauré à améliorer ses processus morphologiques au cours des prochaines décennies, est une tâche complexe, qui implique de considérer une multitude de facteurs naturels et anthropiques : trajectoire temporelle d'évolution (fonction de la sensibilité au changement), hydro-morphologie locale (occurrence des crues, contraintes aux ajustements...), forçages à large échelle (autres pressions anthropiques, changement climatique...) (Brierley et Fryirs, 2005 ; Doyle *et al.*, 2005).

Une approche simple serait d'utiliser notre connaissance des changements passés pour anticiper les évolutions futures. Cependant, beaucoup d'études soulignent le fait que **les trajectoires de restauration sont rarement symétriques aux trajectoires de dégradation** (Kondolf *et al.*, 2006 ; Duarte *et al.*, 2008 ; Palmer, 2009). Cette asymétrie serait inhérente aux variabilités naturelles et anthropiques précédemment évoquées.

Kondolf *et al.* (2008) ont imaginé le cas d'un barrage empêchant la remontée de salmonidés jusqu'à leurs habitats de frai. A la suppression de l'ouvrage, la première réponse potentielle serait une recolonisation rapide : la dégradation est *réversible* et la réponse est *symétrique* (fig. 1.16, a).

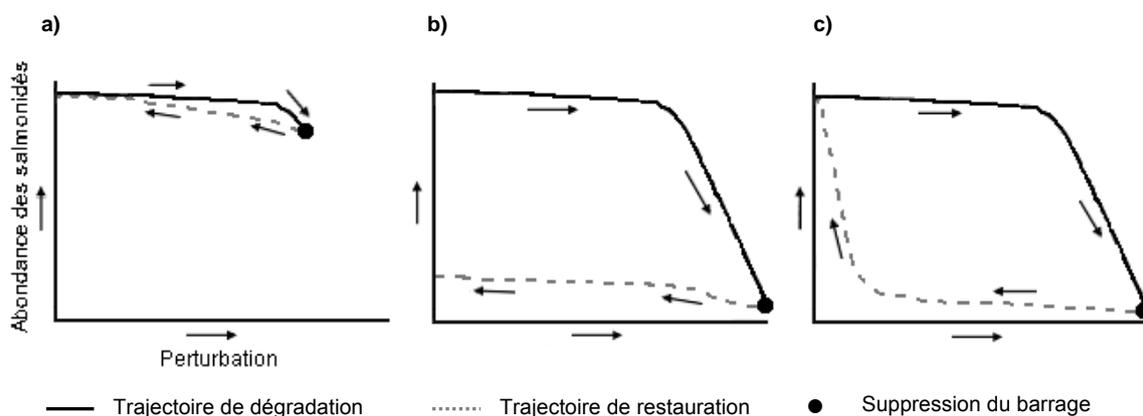


Figure 1.16 : Trajectoires temporelles de dégradation et de restauration proposées par Sarr (2002) et transposées par Kondolf *et al.* (2008) pour modéliser la réponse piscicole d'une suppression de barrage : a) dégradation réversible et restauration symétrique. b) dégradation irréversible. c) dégradation réversible et restauration asymétrique

Il est aussi probable que le tronçon ait subi trop de dégradations et qu'une simple reconnexion longitudinale soit insuffisante pour restaurer les habitats : la dégradation est *irréversible* et la réponse est *asymétrique* (fig. 1.16, b). Enfin, il est possible que d'autres pressions anthropiques aient réduit l'abondance spécifique et entravé le repeuplement au cours des premières années. L'élimination de ces pressions ainsi que les premières reproductions finiraient par rétablir le niveau d'abondance : la dégradation est *réversible* et la réponse est *asymétrique* (fig. 1.16, c).

A côté de ces cas simples, les trajectoires de restauration se révèlent souvent complexes et extrêmement diverses, tant pour le compartiment physique que biologique. Le rétablissement partiel ou total des fonctionnalités, ainsi que les temps de réponse, sont multiples (fig. 1.17) (Doyle *et al.*, 2005).

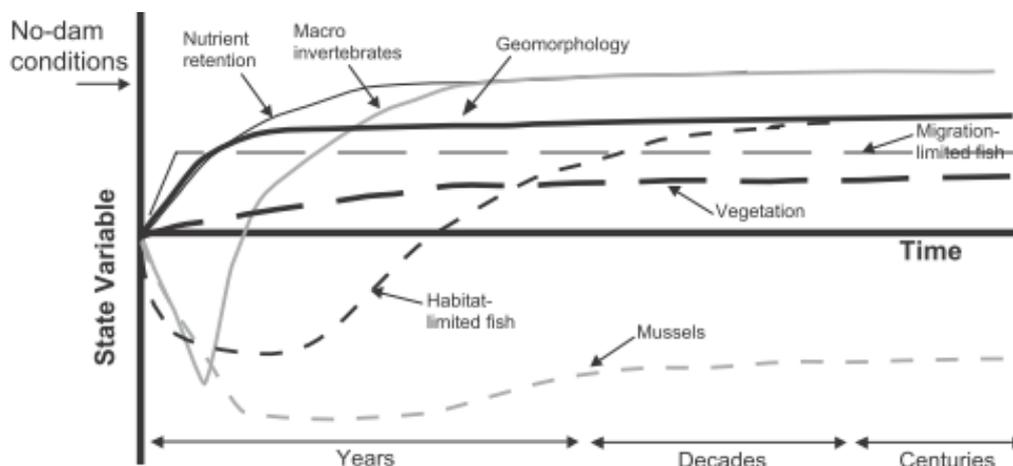


Figure 1.17 : Cadre conceptuel des trajectoires temporelles de restauration des compartiments physiques et biologiques à la suite de la suppression d'un barrage (Doyle *et al.*, 2005)

Face à cette complexité, les outils de modélisation actuels se trouvent limités pour prédire les réponses aux actions (Piégay *et al.*, 2005 ; Perrow *et al.*, 2008 ; Stewardson et Rutherford, 2008). L'**expérimentation** sur des sites pilotes, accompagnée d'un **suiti scientifique**, s'avère ainsi fondamentale pour améliorer les modèles, évaluer la pertinence de l'action et engager si nécessaire des mesures correctives, **selon une logique adaptative et dans une perspective durable**.

## 2.4. La gestion adaptative et la place de l'expérimentation en restauration

La gestion adaptative est née dans la sphère environnementale, au Canada et aux Etats-Unis, il y a plus de 20 ans (Holling, 1978 ; Walters, 1986 ; Halbert et Lee, 1991 ; Hilborn, 1992). Elle se définit comme **un processus systématique d'amélioration continue des pratiques**, grâce aux leçons tirées des pratiques antérieures. Il s'agit d'un « **apprentissage par l'action** » (*learning by doing*), c'est-à-dire une « expérience » dans le but de réduire les incertitudes entourant un projet complexe (MEA, 2005). La structure du projet est évolutive, les informations scientifiques collectées à chaque étape étant utilisées pour réviser et améliorer l'étape suivante (fig. 1.18).

Ce mode de gestion se révèle particulièrement adapté à la restauration de cours d'eau, dans la mesure où c'est **une discipline récente qui revêt encore souvent un caractère novateur**, ce qui justifie pleinement de procéder par itérations successives entre tests grandeur nature et modèles prédictifs. Aux Etats-Unis, une démarche adaptative est engagée sur le Colorado en aval du barrage Glen Canyon depuis 1996. Les effets de crues expérimentales sont évalués par le Centre de Recherche et de Suivi du Grand Canyon, dans le but de déterminer les modes de gestion optimaux pour restaurer les bancs de sable et les habitats en aval du barrage (Schmidt, 2012). Le Danube est également géré selon un mode adaptatif (Jungwirth, 2008) : des expériences sont conduites sur des modèles numériques et physiques (Hengl *et al.*, 2009 ; Huber *et al.*, 2011 ; Tritthart *et al.*, 2011) et sur un site pilote de 3 km de long (Schabuss *et al.*, 2008 ; Kloesch *et al.*, 2011), afin d'évaluer la faisabilité d'actions qui devraient concerner à terme 50 km. Un suivi scientifique d'accompagnement est programmé jusqu'en 2020 (Schabuss *et al.*, 2008).

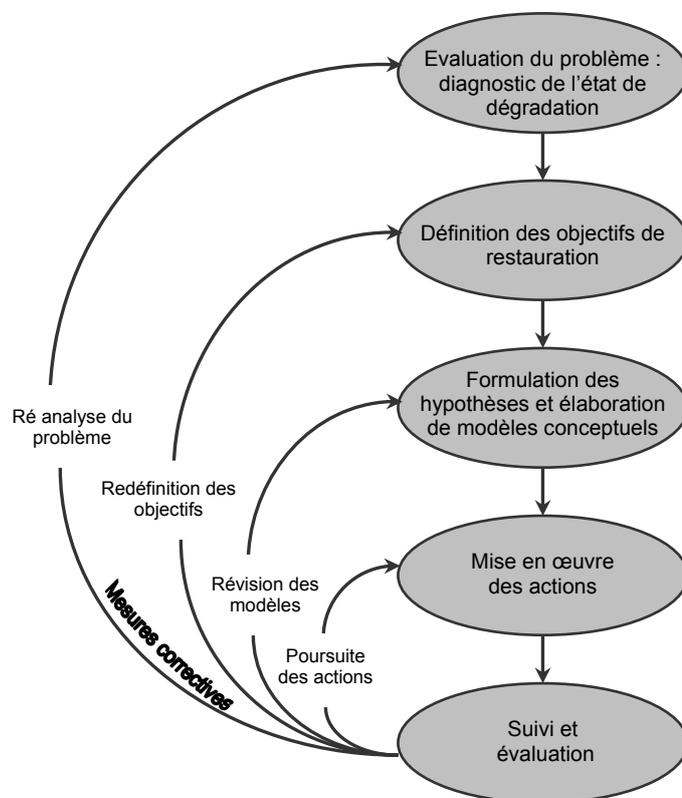


Figure 1.18 : Principe de la gestion adaptative appliquée à la restauration des cours d'eau (modifié d'après Stillwater Sciences, 2005)

Le **suivi** est à la base de la démarche adaptative (fig. 1.18). Il repose sur des **observations permettant de détecter les changements de paramètres physiques, chimiques ou biologiques** survenus après l'intervention (Roni, 2005). La caractérisation quantitative, semi-quantitative ou qualitative des changements se fait au moyen d'**indicateurs biotiques ou abiotiques**, qui rendent compte de l'évolution temporelle du site restauré par rapport à une référence (Morandi, 2010). Ces indicateurs, ainsi que les protocoles de mesure, sont à sélectionner dès l'avant-projet, en même temps que la formulation des objectifs, puisque le suivi doit **aider à déterminer dans quelle mesure les objectifs fixés ont été atteints** (Woolsey *et al.*, 2005).

Le suivi permet d'identifier les objectifs encore à atteindre, et d'engager si nécessaire des mesures complémentaires d'amélioration, selon une logique adaptative (Woolsey *et al.*, 2005). Par exemple, un suivi scientifique est en cours depuis 2002 en accompagnement du programme de restauration du Rhône. Les chercheurs ont tout d'abord mis au point les méthodes de mesure, et ont proposé des indicateurs d'évaluation des compartiments physiques (sédimentation des lônes, granulométrie...) et biologiques (poissons, macro-invertébrés...). Les données ainsi produites permettront d'établir des modèles prédictifs qui seront utilisés pour définir les futures stratégies de restauration et alléger les suivis d'accompagnement par la suite (Olivier et Lamouroux, 2009).

## 2.5. Apprécier la durabilité des actions

Un postulat fréquemment énoncé est que toute opération visant à atténuer des perturbations anthropiques - de fait, toute restauration - constitue une action positive et donc nécessaire (Rollet *et al.*, accepté). Pourtant, à partir du moment où l'Homme décide d'intervenir sur la nature, il est légitime de s'interroger sur **les gains et les pertes** que cette intervention peut générer. Par exemple, le relèvement du débit réservé est favorable aux écosystèmes aquatiques en général ; mais ce gain se traduit corrélativement par une perte des bancs exondés colonisés par les invertébrés terrestres (ECOTEC, 2006). Au-delà des pertes écologiques, il est important de s'assurer que les **risques pour la société** sont négligeables par rapport aux bénéfices à attendre. Sur ce point, la question des inondations est souvent intégrée à la réflexion. Sur l'Enz (Allemagne), des essais sur modèle physique ont permis de définir un scénario optimal d'élargissement et de revégétalisation des berges, permettant d'améliorer la qualité écologique et de rétablir les fonctions récréatives, tout en maintenant la capacité du tronçon à évacuer les crues (Bölscher *et al.*, 2005 ; Meixner *et al.*, 2006).

Ces exemples interrogent à nouveau sur les objectifs de restauration : sur quels processus ou espèces choisit-on de concentrer les efforts ? Quels usages doit-on valoriser, ou au contraire minimiser ?... (Dufour et Piégay, 2009). La restauration relève ainsi de la mise en balance d'une foule de contraintes, environnementales, sociétales et économiques. La **durabilité** se situe à l'interface de ces trois dimensions (fig. 1.19) (Woolsey *et al.*, 2005).

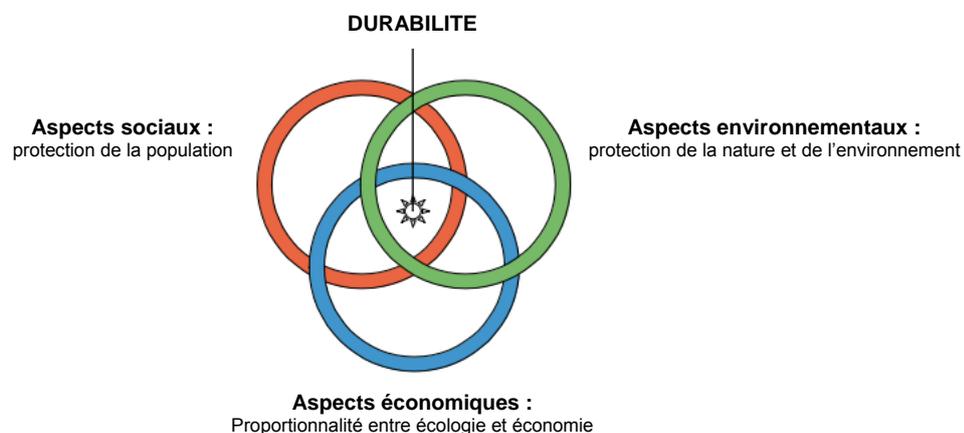


Figure 1.19 : Champ des contraintes de la durabilité (d'après Woolsey *et al.*, 2005)

Outre ces champs thématiques, le caractère durable des actions repose sur **une formulation des questions à l'échelle de tronçons plus longs, et sur des périodes de temps plus longues**. Le succès d'une restauration est souvent difficile à évaluer sur la base d'un suivi de quelques années (Hughes *et al.*, 2005). Les trajectoires temporelles de dégradation couvrent dans la plupart des cas plusieurs décennies, il est donc compréhensible que la restauration de tronçons fluviaux très modifiés nécessite des efforts sur le long terme (Kondolf *et al.*, 2008). De plus, la dimension multi-scalaire des processus et des composantes de l'hydrosystème impose de concevoir la restauration en prenant en compte tous les niveaux hiérarchiques, de l'habitat au bassin versant (Gregory, 2008). L'intégration d'échelles spatiales et temporelles emboîtées concourt ainsi à la **formulation de scénarios d'évolution**, dans une stratégie de gestion durable des hydrosystèmes.

## B/ Problématique de recherche

Cette thèse de géomorphologie s'inscrit dans une démarche de restauration écologique d'un tronçon fluvial dégradé par des activités humaines. L'utilisation croisée de méthodes empruntées à la géomorphologie historique et à la géomorphologie expérimentale se révèle particulièrement adaptée pour répondre à cette problématique générale.

### 1. L'intérêt de la géomorphologie historique : fonder le diagnostic sur la trajectoire temporelle d'évolution

Le gestionnaire de cours d'eau qui constate sur le terrain un chenal incisé ou des peuplements végétaux riverains très simplifiés, aura certes identifié des altérations, mais ce diagnostic de l'état actuel ne lui sera pas suffisant pour planifier des actions réparatoires et garantir leur efficacité sur le long terme. Rechercher les **causes** de ces altérations apparaît primordial pour définir des stratégies de restauration durables et à différentes échelles spatiales.

La géomorphologie historique permet de comprendre comment les changements se sont manifestés, à quelles vitesses le système a réagi à la suite de modifications des variables de contrôle. L'approche consiste à fonder le diagnostic non pas sur une référence statique avant perturbation, mais sur la **trajectoire temporelle d'ajustement**, en tenant compte des changements, réversibles ou irréversibles, et des besoins sociétaux actuels (Dufour et Piégay, 2009). De plus, la connaissance des ajustements passés permet d'**établir des objectifs de restauration réalistes**, compte-tenu de la sensibilité du système aux changements (Kondolf et Larson, 1995). L'approche historique permet également d'identifier les **processus** effectivement dégradés, et de **sélectionner les actions réparatoires les plus appropriées** (Mika *et al.*, 2010). Enfin, la détermination des trajectoires de dégradation peut aider, dans une certaine mesure, à prévoir les trajectoires de restauration. Il est évident qu'il n'existe pas de symétrie entre le temps d'ajustement aux pressions anciennes et le temps d'ajustement aux futures interventions (Kondolf *et al.*, 2006). Cependant, l'hypothèse est qu'une analyse espace-temps fine peut aider à identifier des indicateurs pour appréhender la réactivité du système, et en **déduire des évolutions potentielles** (Kondolf et Larson, 1995).

De nombreux travaux ont développé une approche géomorphologique rétrospective dans une optique de restauration écologique, par exemple sur l'Ain (Rollet, 2007), l'Isère (Girel *et al.*, 2003), le Rhône (Collilieux *et al.*, 2008), le Danube (Hohenshinner *et al.*, 2005), le Rhin aux Pays-Bas (Schoor *et al.*, 1999), ou encore en Espagne (Ollero, 2010), en Italie (Large et Petts, 1996), aux Etats-Unis (Kondolf et Larson, 1995) et en Australie (Brooks et Brierley, 2004 ; Mika *et al.*, 2010).

Le **Vieux Rhin**, tronçon de 50 km situé à la frontière franco-allemande, représente un terrain d'étude original pour développer une telle approche. Le tronçon a subi de multiples pressions

anthropiques qui se sont succédées dans le temps depuis le 19<sup>ème</sup> siècle : **correction** de son lit en tresses en un chenal unique pour la protection contre les inondations (milieu du 19<sup>ème</sup> siècle), **régularisation** au moyen d'épis pour améliorer la navigabilité de la voie d'eau (années 1930), et finalement construction du **barrage de Kembs** et du **Grand Canal d'Alsace** pour la navigation et la production hydroélectrique (1932-1959). Si les principaux impacts environnementaux de ces travaux ont déjà fait l'objet de descriptions générales (Carbiener, 1974 ; Humbert et Descombes, 1985 ; Maire, 1997), en revanche aucune analyse espace-temps fine n'avait été entreprise. De plus, dans le cadre des projets EDF « Erosion maîtrisée » et INTERREG « Redynamisation du Vieux Rhin », la compréhension du fonctionnement morphologique du tronçon fluvial s'est avérée fondamentale pour appréhender la sensibilité du Vieux Rhin aux changements et replacer les évolutions futures dans un contexte pluri-décennal. L'objectif de l'approche historique explorée dans cette thèse est donc double :

1. **reconstituer la trajectoire temporelle d'évolution du Rhin depuis le 19<sup>ème</sup> siècle ;**
2. **alimenter la réflexion sur les stratégies de restauration et aider à évaluer la sensibilité potentielle de l'hydrosystème aux futures actions.**

## **2. L'intérêt de la géomorphologie expérimentale : tester les actions et proposer des indicateurs**

Si la modélisation peut constituer une aide à la compréhension de certains phénomènes, la diversité des processus fluviaux observés sur le terrain continue à limiter la précision et la capacité de prédiction des outils (Piégay *et al.*, 2005 ; Perrow *et al.*, 2008 ; Stewardson et Rutherford, 2008). Certains processus physiques restent en effet difficiles à modéliser, parmi eux les échanges latéraux entre le lit mineur et le lit majeur et les ajustements géomorphologiques associés. Par ailleurs, les formules de transport solide utilisées dans les modèles ont été établies essentiellement en canal artificiel, et pour des conditions hydrauliques, géométriques et sédimentaires bien définies. Appliquées à des cas réels, les taux d'erreur peuvent dépasser 400 % (Cardoso et Neves, 1994 ; Molinas et Wu, 2001, cités par EDF R&D, 2009).

Dans le contexte de la restauration, la nécessité de procéder à des **expérimentations** grandeur nature apparaît clairement. Cela permet d'écarter les risques liés à la manipulation du compartiment physique, et d'évaluer les bénéfices environnementaux à attendre. Les données *in situ* collectées au cours du **suivi géomorphologique** permettent en outre d'améliorer la performance des modèles hydrauliques, dont la calibration ne repose ainsi plus uniquement sur des essais en canal (Rollet, 2007).

Le suivi de l'expérience est fondamental sur le plan opérationnel, pour contrôler l'efficacité de l'action et engager si nécessaire des mesures correctives, selon une **logique adaptative** (Woolsey *et al.*, 2005). Cependant, concernant la restauration des cours d'eau en général, les synthèses récentes en France (Adam *et al.*, 2006 ; Malavoi et Souchon, 2010), en Suisse (Woolsey *et al.*, 2007) et aux Etats-Unis (Bash et Ryan, 2002 ; Palmer *et al.*, 2005 ; Kondolf *et al.*, 2007 ; Roni et Beechie, 2012), constatent que les suivis sont encore trop rares, faute de temps, de moyens

financiers et humains, et d'une formulation claire des objectifs en début de projet. Il en résulte un manque de recul conséquent sur la pertinence des actions réalisées. A l'échelle européenne, si la DCE ne prévoit pas que soit évalué un « état géomorphologique » des cours d'eau à l'image de l'état chimique et biologique, il existe cependant un véritable enjeu pour définir des indicateurs de suivi géomorphologique utilisables dans les futurs plans de gestion. Le choix des indicateurs pose les questions de stratégie d'échantillonnage, de reproductibilité, de coût...

La seconde partie de ce travail de thèse porte donc sur le **suivi géomorphologique d'une expérience d'introduction artificielle de charge grossière dans le Vieux Rhin**. Action phare du projet INTERREG, ce test a été engagé dans le but de déterminer la sensibilité du tronçon fluvial à ce type d'opération, afin d'évaluer la faisabilité d'entreprendre une restauration à plus large échelle et sur une temporalité plus longue. Le retour d'expérience doit également permettre de caler les modèles hydrauliques et d'aider, grâce aux résultats de ces derniers, à définir des scénarios d'évolution sur le long terme. La réflexion aborde à la fois l'évaluation des risques environnementaux et les bénéfices écologiques. L'objectif de la géomorphologie expérimentale développée dans cette thèse est donc triple :

1. **mener une analyse de risques**, en termes de stabilité du pavage, de protection des ouvrages existants et de sécurité des personnes ;
2. **estimer les premiers gains écologiques** ;
3. **tester des indicateurs** d'évaluation des effets morphologiques et écologiques d'une restauration engagée sur le long terme et à plus large échelle.

## C/ Cadre géographique

### 1. Généralités sur le système fluvial rhénan

Avec une superficie de bassin versant de 185 000 km<sup>2</sup> et une longueur de 1320 km, le Rhin est le troisième fleuve d'Europe après la Volga et le Danube. Il est l'unique fleuve d'Europe occidentale à relier les Alpes à la mer du Nord. Son module à l'embouchure est de 2 200 m<sup>3</sup>/s. Le bassin rhénan s'étend en tout ou partie sur dix pays. Il est communément divisé en cinq tronçons morphologiquement et hydrographiquement contrastés : le Rhin alpin, le Haut-Rhin, le Rhin supérieur, le Rhin moyen et le Rhin inférieur (fig. 1.20) (CHR, 1977 ; Humbert et Descombes, 1985 ; Uehlinger *et al.*, 2009).

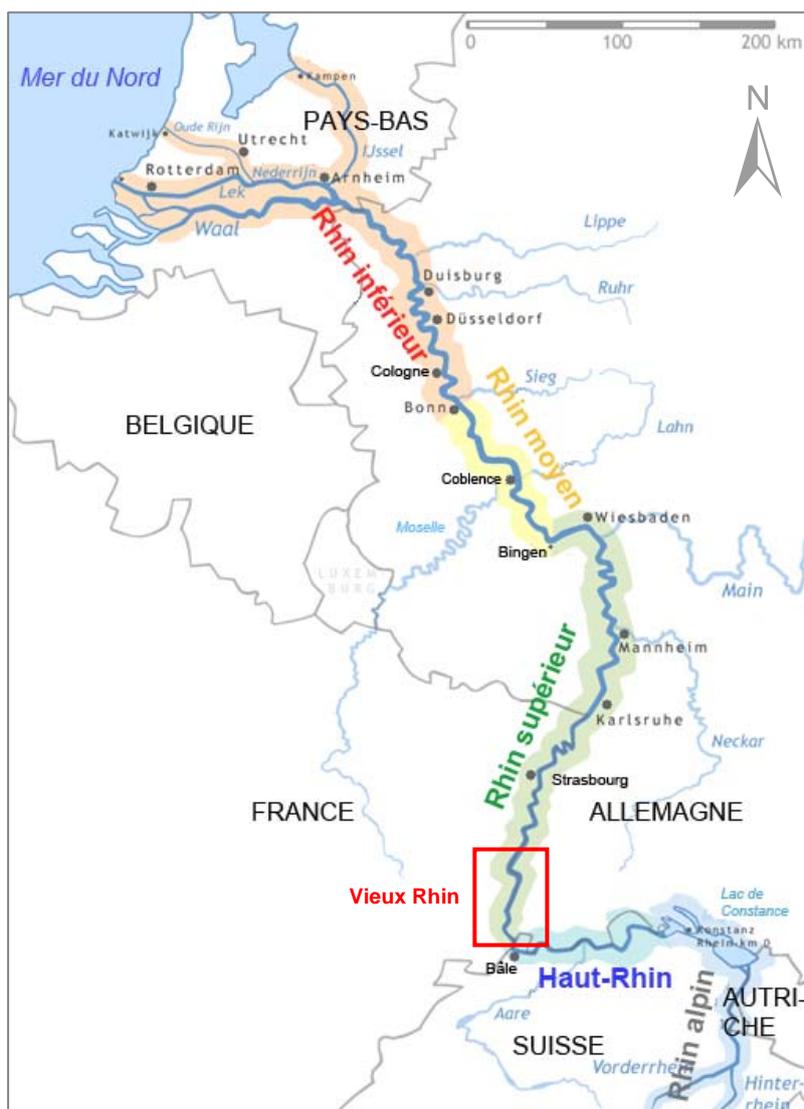


Figure 1.20 : Sectorisation longitudinale du système fluvial rhénan et localisation du tronçon d'étude

**Le Rhin alpin**, jusqu'au lac de Constance : le fleuve naît en Suisse de la réunion de deux branches, le Rhin antérieur (*Vorderrhein*), qui prend sa source dans le massif du Saint Gothard, à 2 344 m d'altitude, et le Rhin postérieur (*Hinterrhein*), qui naît dans le massif de l'Adula, à 2 216 m. Les deux torrents confluent à Reichenau, à 582 m. Pendant 170 km, la pente décroît de 1-3 m/km à 0,6 m/km, jusqu'au lac de Constance<sup>2</sup>. Ce large lac naturel, d'une superficie de 542 km<sup>2</sup> et d'une longueur de 76 km, pondère le régime hydrologique et réduit la fourniture sédimentaire en aval : plus de 3 millions de m<sup>3</sup> de sédiments transportés depuis l'amont y sont déposés chaque année, dont 40 000 m<sup>3</sup> d'éléments grossiers (Mikos, 1994).

**Le Haut-Rhin**, entre le lac de Constance et Bâle : sur ce tronçon, le fleuve est confiné entre les massifs de la Forêt Noire et du Jura, et il constitue la frontière entre la Suisse et l'Allemagne. Il franchit des calcaires du Jurassique au niveau des chutes de Schaffhouse. Ses principaux affluents sont la Thur et l'Aar. Ce dernier est plus important que le Rhin en termes de débit et de superficie de bassin versant. Le fleuve s'écoule avec une pente de 0,8-1,3 %. Après 140 km de lit régulier et encaissé, il parvient à Bâle dans la vaste plaine du fossé rhénan.

**Le Rhin supérieur**, entre Bâle et Bingen : le fossé d'effondrement rhénan s'étend sur 35 km de large et 310 km de long en aval de Bâle. Il est bordé par les massifs de la Forêt Noire et de l'Odenwald à l'Est, et par les Vosges et le Palatinat à l'Ouest. Le Rhin constitue la frontière entre la France et l'Allemagne sur environ 180 km. Sa pente est de 0,1 % dans le secteur du Vieux Rhin. Le fleuve reçoit peu d'affluents hormis l'Ill. Puis, le Neckar conflue à Mannheim et le Main à Mayence. Entre Mayence à Bingen, la pente est descendue à 0,025 %.

**Le Rhin moyen**, entre Bingen et Cologne : après la confluence avec la Nahe, le fleuve franchit le Massif Schisteux Rhénan sur 110 km, jusqu'à Bonn. Sa pente augmente à 0,04 %. Le fleuve reçoit successivement les eaux de la Lahn et de la Moselle. Entre Bonn et Cologne, il prend à nouveau l'aspect d'un cours d'eau de plaine avec de larges méandres.

**Le Rhin inférieur**, jusqu'à la mer : le fleuve reçoit les eaux de la Ruhr, de l'Emscher et de la Lippe. Sa pente diminue de 0,023 % à 0,008 %. Peu après son entrée dans les Pays-Bas, le lit se divise en trois branches principales, l'Ijssel, la Lek et la Waal. Le delta est formé par la confluence du Rhin et de la Meuse.

Le Vieux Rhin, tronçon d'étude de la présente thèse, est situé dans la moitié méridionale du Rhin supérieur, entre les villes de Kembs et de Breisach (fig. 1.20).

---

<sup>2</sup> Le kilométrage officiel du Rhin débute au pont de Constance (PK 0).

## 2. Physiographie du Rhin supérieur

### 2.1. Héritages géologiques et géomorphologiques

La formation du fossé rhénan (*Upper Rhine Graben*) a débuté à l'Eocène moyen (-49 à -37 millions d'années). En Alsace, l'effondrement total varie entre 2 000 et 4 000 m (Vogt, 1984, cité par Schmitt, 2010). C'est seulement depuis le début du Pléistocène (-2,6 millions d'années) que le Rhin s'écoule en direction de la mer du Nord *via* le fossé d'effondrement. Auparavant, la branche alpine s'est écoulée successivement vers le Danube et vers le Rhône (Preusser, 2008, cité par Schmitt, 2010).

La glaciation würmienne (-70 000 à -10 000 ans) survenue à la fin du Pléistocène a participé à constituer un important cône de déjection au débouché de la vallée du Haut-Rhin, lorsque le glacier alpin s'étendait jusqu'aux environs de Bâle. Le manteau d'alluvions fluvioglaciales (galets, graviers, sables, limons...) déposées en aval atteint par endroits une épaisseur de 250 m. Il renferme la plus importante réserve d'eau souterraine d'Europe occidentale (Simler *et al.*, 1979, cités par Schmitt, 2010).

Au cours de l'Holocène (derniers 10 000 ans), le profil en long du Rhin s'est ajusté en réponse à la modification de plusieurs facteurs de contrôle du système fluvial (Schmitt, 2010) :

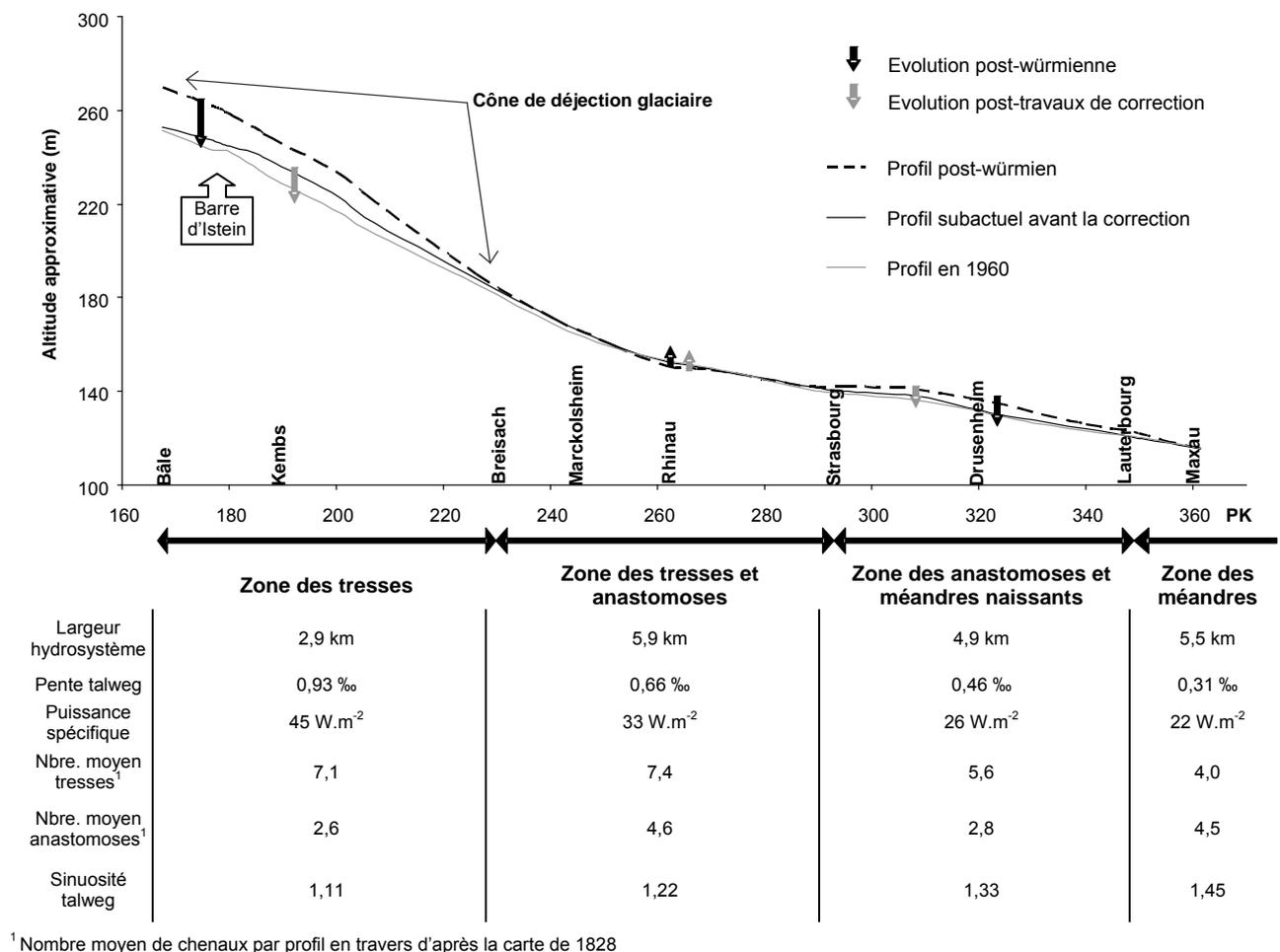
- une diminution globale des débits liquides et solides avec le réchauffement climatique (Hirth, 1971) ;
- un piégeage des alluvions dans les lacs suisses formés par le retrait des glaciers alpins, ce qui a fortement réduit la fourniture sédimentaire et a pondéré le régime hydrologique (Walser, 1959 ; Hirth, 1971) ;
- des mouvements tectoniques positifs au sud de Mulhouse (Nivière *et al.*, 2006) et négatifs à hauteur de Marckolsheim, voire jusqu'au nord de Strasbourg (Jung et Schlumberger, 1936 ; Vogt, 1980).

En conséquence, le lit du Rhin a connu les évolutions suivantes (Schmitt, 2010) :

- **secteur Bâle - Breisach : incision pouvant atteindre 25 m ;**
- secteur Breisach - Strasbourg : quasi-stabilité du profil en long, voire exhaussement à hauteur de Rhinau, lié à la subsidence et au dépôt des alluvions déstockées en amont ;
- secteur Strasbourg - Maxau : incision essentiellement d'origine tectonique, de 10 à 20 m.

## 2.2. Structuration longitudinale de la plaine alluviale du Rhin supérieur

Carbiener (1969, 1970, 1983) s'est basé sur l'évolution post-würmienne du profil en long, sur la morphologie du fond de vallée et sur le tracé du fleuve en 1828 pour sectoriser le Rhin supérieur en quatre zones homogènes (fig. 1.21). La **zone des tresses** s'étend entre Bâle et Breisach (soit le futur Vieux Rhin). D'autres types de chenaux étaient également présents dans ce secteur, en proportion réduite par rapport aux tresses. Il s'agit des *Giessen*, *Brunnenwasser*, *Altwasser* et *Muhlbach*, termes communément employés dans la littérature locale pour décrire les anciens bras du Rhin, et dont le fonctionnement hydro-morphologique s'apparente à des **anastomoses** (Carbiener, 1983 ; Carbiener et Dillmann, 1992 ; Schmitt, 1995).



**Figure 1.21 : Gradient longitudinal du Rhin supérieur entre Bâle et Maxau et caractérisation synthétique des secteurs du Rhin sauvage (1828) (d'après Carbiener, 1970 ; Carbiener et Dillmann, 1992 ; Schmitt, 2010)**

Kleinas (2003), Schmitt *et al.* (2007) et Schmitt (2010) ont cherché à affiner la sectorisation de Carbiener. A partir du tracé du fleuve en 1828, les auteurs ont retenu 27 variables relatives à la morphologie générale (sinuosité du talweg, largeur de l'hydrosystème), aux bancs, aux îles (nombre, distance au talweg, longueur moyenne...) et aux types de chenaux (distance au talweg, nombre). Les variables ont été mesurées sur 34 tronçons de 5 km de long entre Bâle et

Lauterbourg. Une analyse en composantes principales et une classification ascendante hiérarchique ont permis d'identifier plusieurs tronçons homogènes dominés par les tresses, les anastomoses et les méandres. Six variables de contrôle susceptibles d'expliquer l'évolution longitudinale ont été testées. Les analyses de régression ont montré que **la pente et l'évolution verticale holocène** sont les variables les plus discriminantes (fig. 1.22) (Schmitt, 2010).

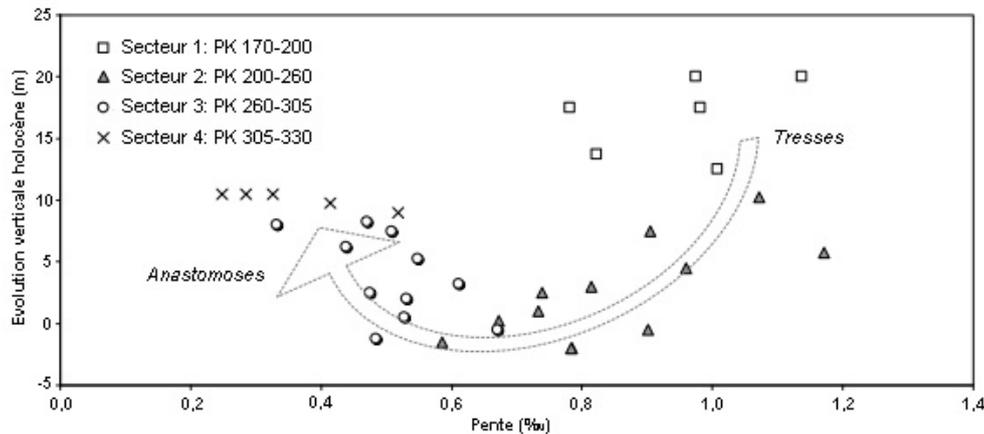


Figure 1.22 : Evolution des secteurs du Rhin supérieur en fonction de la pente et de l'évolution verticale holocène (modifié d'après Schmitt, 2010)

### 2.3. Régime hydrologique du Rhin supérieur

La mesure des débits du Rhin à Bâle a débuté en janvier 1808 (CECR, 1978). Dans un premier temps, le niveau du plan d'eau n'était relevé qu'une fois par jour, à 12 h. On passa plus tard, notamment pour les niveaux élevés, à trois observations par jour, complétées occasionnellement par des indications sur l'heure de formation et la hauteur des pointes de crue. Depuis janvier 1869, le niveau est relevé en continu par un limnigraphe (CECR, 1978). Pour les besoins de l'étude, les débits maximaux, minimaux et moyens mensuels avant 1869 ont été tirés de Ghezzi (1926), et les débits maximaux et moyens journaliers après 1869 ont été acquis auprès de l'Office Fédéral de l'Environnement suisse (OFEV).

Le bassin versant suisse a connu d'importants travaux hydrauliques au 19<sup>ème</sup> siècle. La pièce maîtresse de la « **première correction des eaux du Jura** » (1868 -1890) fut la dérivation de l'Aar dans le lac de Biene, afin d'assécher les terrains riverains et retarder la pointe de crue à la confluence avec l'Emme (Chavaz et Gyax, 1964). Ces interventions ont eu pour effet de modifier profondément le régime des crues du Rhin à Bâle, si bien que l'hydrologie contemporaine est communément analysée à partir de 1891 (figures 1.23, 1.24 et tableau 1.3) (CECR, 1978).

Le régime hydrologique du Rhin en aval de Bâle est largement conditionné par le bassin alpin. Il est de type **nivo-glaciaire**, les deux mois de plus hautes eaux étant juin et juillet (CHR, 1977) (fig. 1.23).

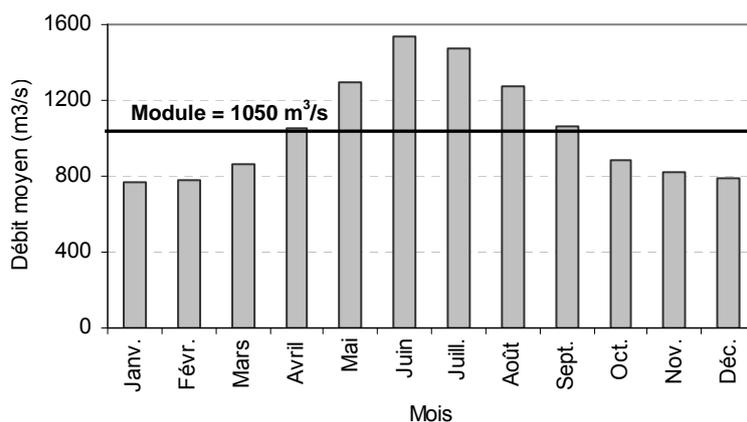


Figure 1.23 : Débits moyens mensuels interannuels et module du Rhin à Bâle sur la période 1891-2008

Sur la période 1891-2008, le Rhin à Bâle présente un **module de 1050 m<sup>3</sup>/s** et un étiage interannuel (moyenne des *QMNA*) de 450 m<sup>3</sup>/s. La crue centennale est estimée à 4650 m<sup>3</sup>/s et la crue biennale à 2800 m<sup>3</sup>/s (tableau 1.3). **Trois crues centennales ont été enregistrées au cours de ces 20 dernières années**, en mai 1994, mai 1999 et août 2007. Il s'agit des événements les plus importants depuis 1891, et des 7<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> plus importants depuis 1808 (fig. 1.24).

Période de retour	Q <sub>2</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>10</sub>	Q <sub>30</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>100</sub>	Q <sub>300</sub>
Débit (m <sup>3</sup> /s)	2800	3350	3700	4200	4400	4650	5100

Tableau 1.3 : Débits instantanés du Rhin à Bâle sur la période 1891-2008 (ajustement de Pearson III, OFEV)

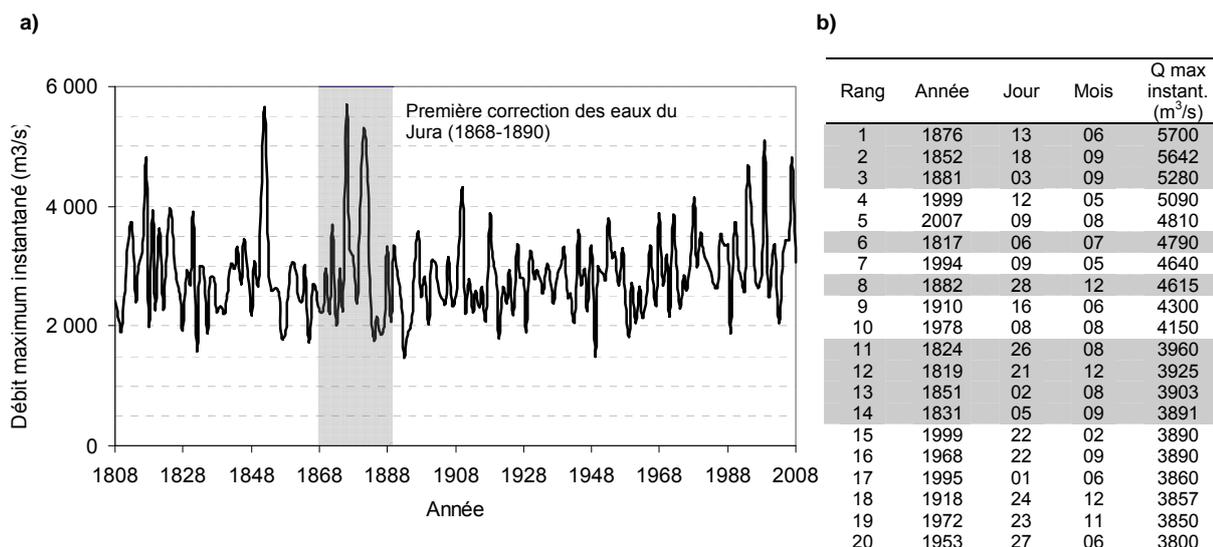


Figure 1.24 : a) Crues du Rhin à Bâle entre 1808 et 2008 (débits maximum annuels instantanés). b) 20 plus grandes crues enregistrées à Bâle depuis 1808 (débits maximum mensuels instantanés) ; les lignes grisées concernent la période avant 1890

### 3. Contexte historique de l'aménagement du Vieux Rhin

Le Rhin entre Kembs et Breisach a subi d'importants travaux hydrauliques entre le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle et le milieu du 20<sup>ème</sup> siècle, pour satisfaire essentiellement à des besoins de protection contre les inondations, d'amélioration de la navigabilité et d'exploitation du potentiel énergétique du fleuve. La chronologie et les modalités de réalisation des trois phases d'aménagement (correction, régularisation, canalisation) sont explicitées dans les paragraphes suivants en s'appuyant sur diverses sources bibliographiques (rapports d'ingénieurs, monographies, articles scientifiques, mémoires...) collectées auprès des archives et des services de gestion des eaux d'Alsace et du Baden-Württemberg.

#### 3.1. Le Rhin « sauvage » (début du 19<sup>ème</sup> siècle)

Jusqu'en 1840, le Rhin entre Bâle et Lauterbourg était un fleuve encore à l'état sauvage, composé de chenaux multiples, de bancs graveleux, d'îles végétalisées et de hauts-fonds gênant la navigation, sur une largeur pouvant dépasser 3 km (fig. 1.25) (Marchal et Delmas, 1959 ; Maire, 1997). L'intensité de la dynamique fluviale a entraîné la disparition de plusieurs villages riverains depuis le Moyen Age (Werner, 1928 ; Schmitt *et al.*, in prep.). Les bras morts laissés par la décrue étaient propices à l'insalubrité ; le paludisme régnait à l'état endémique à cette époque (Tricart et Bravard, 1991). L'instabilité du fleuve posait également des problèmes de délimitation de la frontière entre l'Alsace et le Grand Duché de Bade (Kintz, 2001), et de fixation des limites de parcelles entre propriétaires (Kaufmann, 1954).

Jusqu'au début du 19<sup>ème</sup> siècle, les populations riveraines ont cherché à se protéger des débordements par des aménagements locaux : construction de levées en terre, seuils artificiels sur les affluents, tentatives de pose d'épis en lit mineur... (Migneret, 1862). Mais ces interventions restaient fragmentées et ne permettaient pas d'éradiquer durablement les inondations (Werner, 1928 ; Decoville-Faller, 1961 ; Schmitt *et al.*, in prep.).

En 1789, le général français d'Arçon présente le premier projet global de correction du cours du Rhin. Il consiste à fixer un tracé naturel (d'Arçon, 1789, cité par Humbert et Descombes, 1985) : « (...) flatter les penchants du fleuve ; ne jamais heurter les directions qu'il affecte ; profiter de tous les creusages déjà opérés par le grand courant, et dans les parties à redresser, solliciter le courant lui-même à creuser le nouveau lit auquel on se propose de l'assujettir ; aboutir aux points nécessaires par des arrondissements moelleux, extrêmement doux ; enfin, aider toujours la nature et ne contraindre l'inconstance du fleuve qu'en l'invitant à suivre des routes plus faciles ». Cette citation est importante car elle n'est pas sans rappeler les principes de la régularisation, qui sera entreprise un siècle plus tard.



Figure 1.25 : Le Rhin en tresses et anastomoses vers 1830 : vue vers l'amont depuis le rocher d'Istein (peinture de P. Birman, 1758-1844)

En 1812, le colonel badois Tulla propose de fixer un tracé peu sinueux, dans le but de provoquer une incision et ainsi réduire les débordements (Tulla, 1825) : « *Il est évident qu'un terrain riverain est d'autant plus exposé aux inondations que le niveau du sol est plus bas, par rapport à celui des plus grandes ou des moyennes eaux du fleuve. La mesure la plus efficace pour éloigner tous les maux qui résultent d'un niveau trop bas du sol, (...) c'est de faire baisser le niveau des fleuves et des rivières, qui, pendant leur hauteur moyenne, attaquent les rives, et qui, pendant les grandes eaux, deviennent dangereuses par les inondations. (...) La seule opération par laquelle on puisse s'opposer aux ravages des fleuves et en faire baisser le niveau, (...) consiste : à donner aux fleuves la direction la plus droite possible, à couper ou barrer les bras secondaires, (...) en un mot, à rectifier les fleuves.* »

Les guerres de la Révolution contraignirent la France à abandonner le projet du général d'Arçon. C'est le projet de Tulla qui est finalement approuvé par la Convention du 5 avril 1840 entre la France et le Grand Duché de Bade. Les travaux sont réalisés entre Bâle et Strasbourg de 1842 à 1876.

### 3.2. La correction (1842-1876)

La correction a consisté à fixer le lit du fleuve **entre deux digues de basses eaux distantes de 200 à 250 m**, selon un tracé régulier formé de lignes droites et d'arcs de cercles d'un rayon minimum d'environ 1 000 m (fig. 1.26) (Migneret, 1862). Ce lit était dimensionné pour un débit d'environ **2 000 m<sup>3</sup>/s** (Bensing, 1966). Les digues ont été construites en sections de 600 à 900 m de long séparées par des intervalles de 50 à 60 m, ce qui ménageait une issue aux crues jusqu'aux digues de hautes eaux implantées environ 1 km en retrait (Tricart et Bravard, 1991 ; Lévy, 1982).

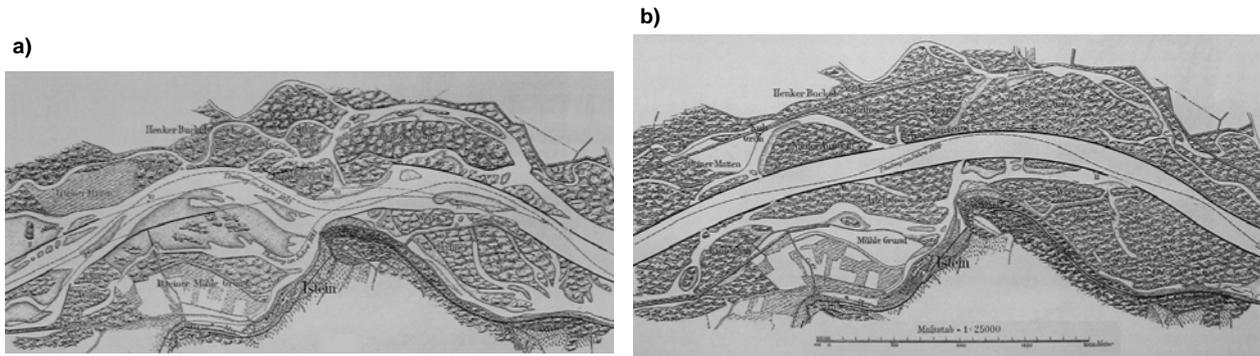


Figure 1.26 : Evolution du tracé en plan du Rhin au niveau d'Istein entre 1843 (a) et 1884 (b) (d'après Honsell, 1885)

Les ouvrages ont été construits en fascines remplies de pierres, recouvertes par des enrochements. L'arrière des digues était consolidé par de la terre et des graviers (Migneret, 1862 ; Honsell, 1885 ; Lévy, 1982). Le mode de construction a évolué au cours des travaux, les digues de basses eaux ayant dû être renforcées après les grandes crues de 1851 et 1852 (cf. fig. 1.24, b) (fig. 1.27, a) (Johnstone, 2010). L'essentiel de l'aménagement était achevé en 1876, néanmoins les grandes crues de 1876, 1881 et 1882 nécessitèrent de nouvelles consolidations (fig. 1.27, b) (Gallusser et Schenker, 1992).

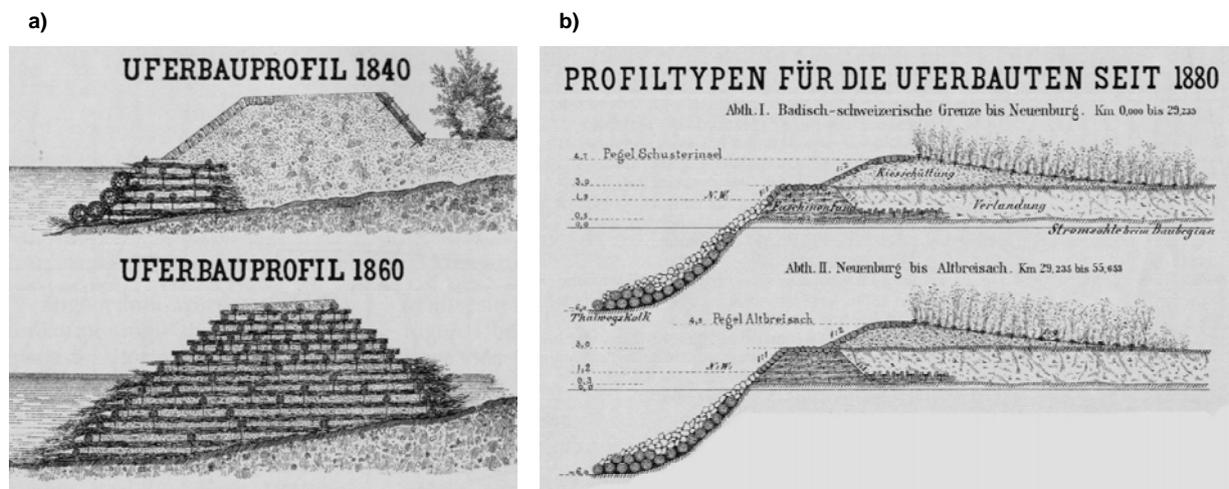


Figure 1.27 : Exemples de digues de correction construites en 1840, 1860 (a) et après 1880 (b) (d'après Honsell, 1885)

Au terme de la correction, le Rhin fut raccourci de 32 km entre Bâle et Lauterbourg, soit 14 % de son cours. L'aménagement provoqua l'incision prévue par Tulla, mais celle-ci dépassa largement les attentes initiales : suite à un enfoncement de 4 m dans la partie amont, en 1928 l'**affleurement rocheux d'Istein** constitue un seuil infranchissable par les bateaux 332 jours par an (fig. 1.28 et 1.29) (Humbert et Descombes, 1985). Plus à l'aval, l'augmentation des vitesses d'écoulement et le déplacement aléatoire des bancs compliquaient la navigation (Descombes, 1981). En 1909, C. Grad décrit la mobilité des formes dans le lit corrigé : « Pendant que le bateau file de toute la rapidité du courant, j'entends autour de moi (...) quelque chose comme le bruit de la grêle contre les vitres. (...) Ce

*bruit, me dit un des ingénieurs, vient du mouvement des cailloux, qui déplace au fond de l'eau les bancs de gravier ».*



Figure 1.28 : Vue de la barre d'Istein depuis l'aval (cliché F. Arnaud, 2009)

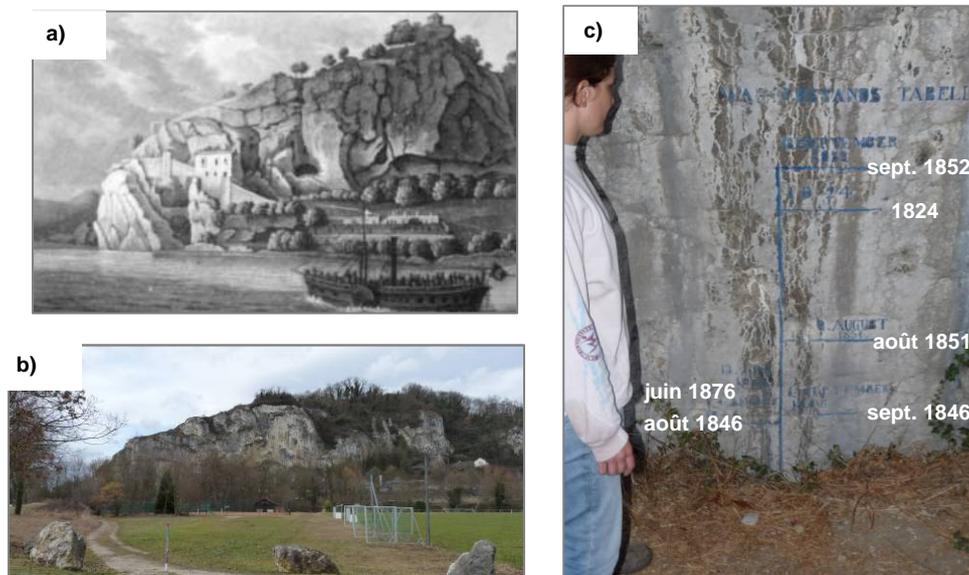


Figure 1.29 : Effets de la correction au niveau du rocher d'Istein : a) Rocher d'Istein au début du 19<sup>ème</sup> siècle (peinture présentée sur le panneau d'information du rocher d'Istein, date inconnue). b) Rocher d'Istein en 2010. c) Echelle des hautes eaux : la crue de septembre 1852 (5642 m<sup>3</sup>/s) a atteint 1,36 m au-dessus du sol. A la fin de la correction, le lit s'est incisé et la plus grande crue jamais enregistrée, en juin 1876 (5700 m<sup>3</sup>/s), est 89 cm plus bas que celle de 1852 (clichés F. Arnaud, 2010)

### 3.3. La régularisation (1931-1950)

#### 3.3.1. « Rhin libre ou canal ? »

Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, deux thèses s'affrontent pour rétablir la navigation jusqu'à Bâle : construire un canal latéral, ou aménager le Rhin lui-même (Antoine, 1922 ; Libault, 1924). La figure 1.30 présente une série de cartes postales éditées au début des années 1920 par les

défenseurs du projet du canal latéral ; celui-ci est comparé à la régularisation, qui conserve le Rhin « libre et sauvage ».

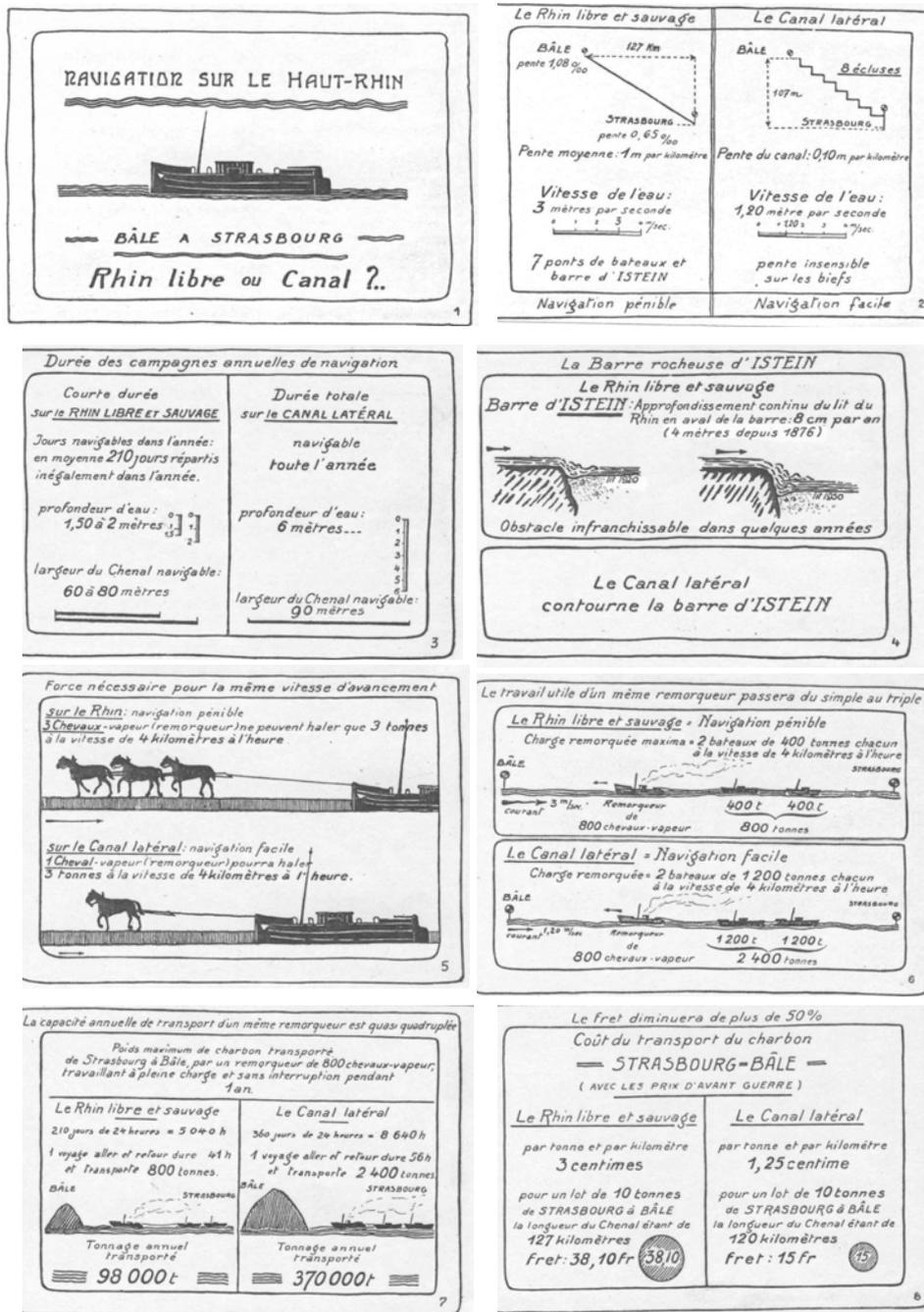


Figure 1.30 : Cartes postales éditées par les défenseurs du projet du canal latéral (années 1920, fourni par E. Dillmann)

Poitrat (1950) exposera *a posteriori* les avantages et inconvénients de ces deux aménagements qui furent finalement entrepris en même temps : « (...) si la France n'avait pas construit Kembs en 1928, la Suisse aurait été obligée d'en entreprendre la construction à ses frais vers 1934 car le Rhin aurait pratiquement cessé à cette date d'être navigable à la barre d'Istein » ; « Le moment semble maintenant proche où les travaux de canalisation et de régularisation pourront être harmonieusement poursuivis dans une complète unité de vue des trois puissances intéressées ».

La canalisation et la régularisation ont été approuvées en 1925 par la Commission Centrale pour la Navigation du Rhin (protocole CCNR 1925-I-20). Les deux projets n'étaient pas rivaux : la régularisation visait une amélioration rapide de la navigabilité, tandis que le canal latéral allait prendre 30 ans pour être réalisé, également pour la production hydro-électrique (Poitrat, 1950).

### 3.3.2. Principes de la régularisation

La régularisation a été entreprise selon les plans de l'ingénieur badois Honsell, inspiré des travaux de Girardon sur le Rhône (Humbert et Descombes, 1985) et de Fargue sur la Garonne (Lévy, 1982). Les épis ont été construits en aval de Strasbourg entre 1907 et 1924, puis entre Strasbourg et Istein à partir de 1931. Sur ce secteur, les travaux ont été financés à 60 % par la Suisse et à 40 % par l'Allemagne, le WSD de Freiburg dirigeant les opérations avec l'appui technique de la France (Marchal et Delmas, 1959). L'ensemble des travaux est consigné dans le rapport d'un ingénieur du WSD (Schneider, 1966).

L'objectif était de créer un chenal d'étiage (540 m<sup>3</sup>/s à Bâle) de **75 m de large, 2 m de profondeur et navigable au moins 318 jours par an** (Dpt. Féd. Int., 1929). Il s'agissait également de freiner l'incision du lit, en créant un tracé sinusoïdal censé ralentir le processus. Des épis ont été implantés environ tous les 100 m, chaque « champ d'épi » de 1 à 1,5 km de longueur alternant de manière régulière entre les deux rives (fig. 1.31) (Dpt. Féd. Int., 1929 ; Schneider, 1966).

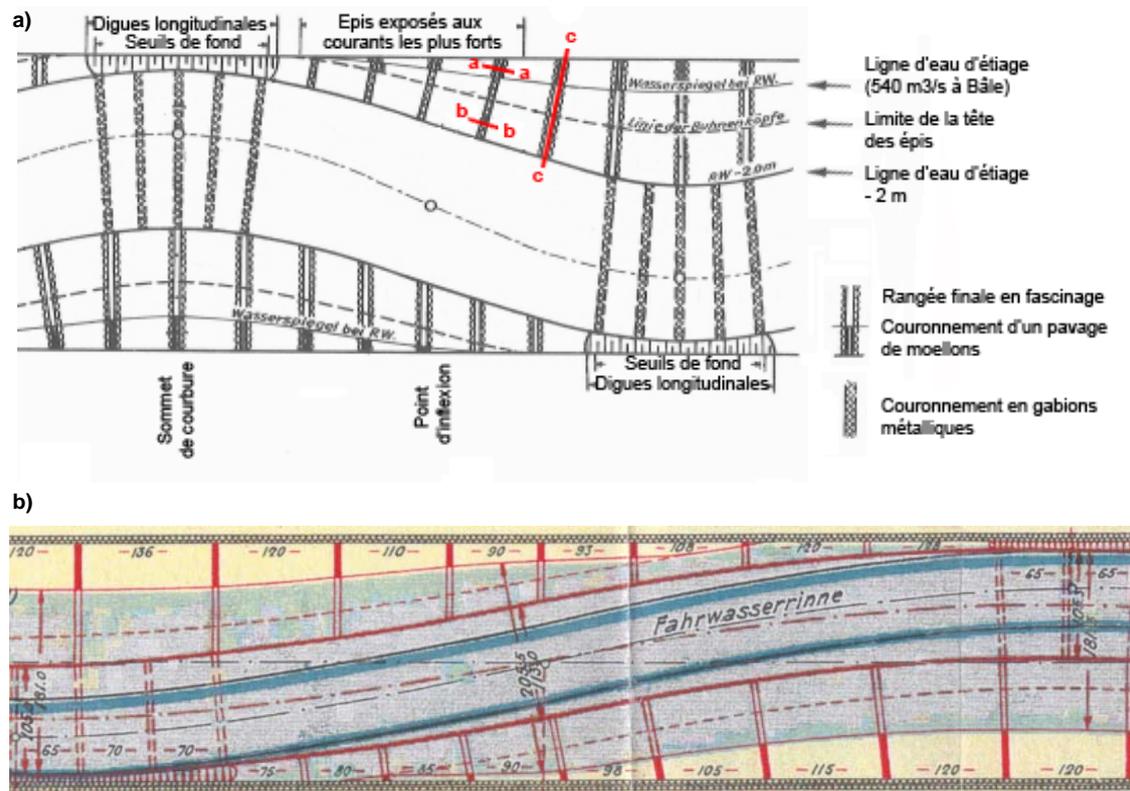


Figure 1.31 : Plans schématiques de disposition des ouvrages de la régularisation : a) Informations sur les matériaux de construction. Les profils a-a, b-b et c-c sont montrés dans la fig. 1.32, a (d'après Schneider, 1966). b) Informations sur les distances entre les ouvrages et sur la largeur du chenal navigable (en mètres) (d'après Dpt. Féd. Int., 1929)

Les épis ont été construits en immergeant une rangée de gabions en fascinage ou en grillage de 8 à 10 m de longueur, remplis de moellons et placés dans le sens du courant. Lorsque les graviers transportés et déposés atteignaient la hauteur de la rangée, une seconde était placée, et l'opération renouvelée jusqu'à la hauteur souhaitée. L'épi était ensuite couronné d'un pavage de moellons ou de gabions métalliques (fig. 1.31 et 1.32) (Poitrat, 1952 ; Lévy, 1982).

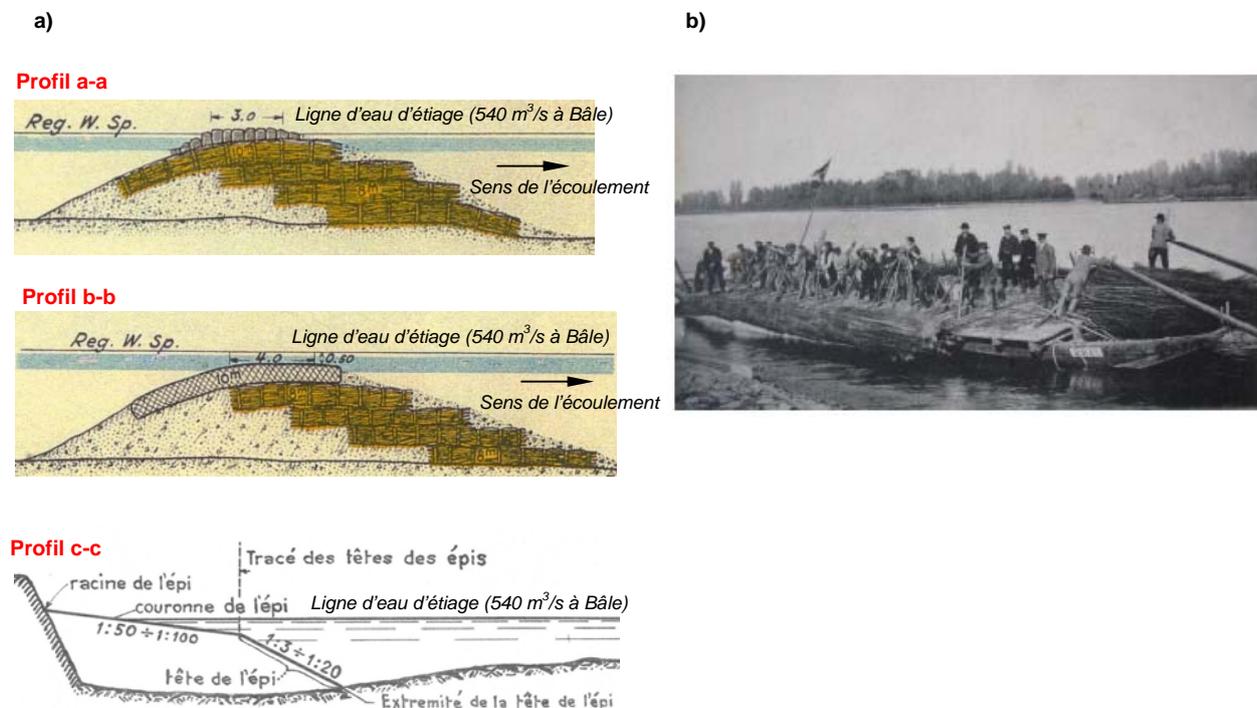


Figure 1.32 : a) Profils schématiques des épis (d'après Dpt. Féd. Int., 1929 ; Commission des travaux, 1953). b) Installation des gabions en fascinage (environ 1935, carte postale fournie par E. Dillmann)

Ce mode de construction, par étapes successives, explique que les dates de chantier soient données en termes de « premiers travaux » et de « travaux supplémentaires ». Les premiers travaux ont été réalisés entre 1931 et 1935. En 1939, les épis étaient construits à 85 % (Schneider, 1966).

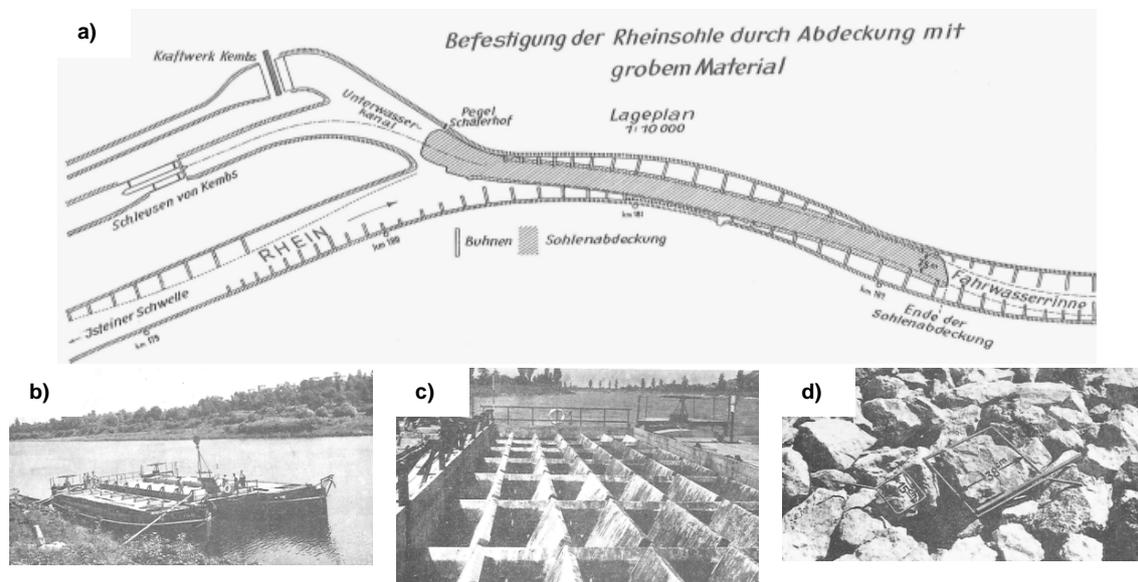
La régularisation améliora très rapidement le trafic fluvial jusqu'à Bâle, dès 4 ou 5 ans après le démarrage des travaux (Marchal et Delmas, 1959). Cependant, le problème principal restait l'incision, qui mettait notamment en péril les épis. Des essais sur modèle réduit réalisés par le Laboratoire d'Hydraulique de Karlsruhe en 1937 (cités par Marchal et Delmas, 1959) ont comparé les volumes érodés sur une période de 30 ans dans le secteur de Breisach, avec et sans épis. L'étude a montré que les épis ralentissaient l'incision au cours de la première décennie, puis le phénomène s'inversait, et pendant la troisième décennie le volume érodé était plus grand qu'en l'absence d'épis. Plusieurs travaux ont tenté de fixer le fond du lit.

### 3.3.3. Essais de fixation du lit

Les épis exposés aux courants les plus forts, et donc à l'incision la plus importante, étaient ceux situés en sortie de courbe (cf. fig. 1.31, a). Il était donc prévu de construire des **groupes de 5**

**seuils de fond** au sommet des courbures, raccordés aux berges par des « digues longitudinales », et raccordés aux épis en face de manière à former un ouvrage continu en travers du lit (fig. 1.31) (Marchal et Delmas, 1959). Ce système devait assurer la fixation complète du profil en travers, et l'arrêt de l'incision. Cependant, des essais menés par le Laboratoire d'Hydraulique de Karlsruhe entre 1937 et 1942 ont conduit à renoncer à ce dispositif, présentant les inconvénients d'accélérer l'écoulement au droit des groupes, et de former des mouilles profondes en aval, ce qui était incompatible avec la navigation (Marchal et Delmas, 1959 ; Schneider, 1966 ; Jamme, 1969). Seules quelques amorces de seuils de fond furent construites (Marchal et Delmas, 1959).

L'Ecole Polytechnique de Zurich procéda à une autre étude sur la mise en œuvre d'un revêtement continu de gros matériaux, censé former un **pavage artificiel** pour stopper l'incision (Schneider, 1966 ; Jamme, 1969). Un test grandeur nature fut réalisé en 1949, sur une section de 1 150 m en aval du canal de fuite de Kembs. Le revêtement était constitué de blocs entre 15 et 38 cm de diamètre (fig. 1.33).



**Figure 1.33 : Expérimentation portant sur la mise en place d'un pavage artificiel en aval du canal de fuite de Kembs en 1949 : a) Plan schématique de localisation. b) et c) Vues des barges de déversement des matériaux. d) Vue des matériaux entre 15 et 38 cm de diamètre (Schneider, 1966)**

Mais, compte-tenu de résultats décevants (destruction du pavage par les hélices des remorqueurs, affouillements dangereux pour la navigation), du coût extrêmement élevé de l'opération si elle avait dû être entreprise sur tous les secteurs en incision (dépassant très largement le coût des épis seuls), et enfin de la substitution progressive du Grand Canal d'Alsace au Rhin régularisé, ces essais furent abandonnés (Poitrat, 1950 ; Marchal et Delmas, 1959 ; Schneider, 1966). Cependant, il est à noter le caractère particulièrement innovant de ces recherches, tandis que des expérimentations similaires sont entreprises actuellement sur les secteurs incisés du Danube (Jungwirth, 2008).

L'incision progressant, et l'entretien des épis ayant été interrompu pendant la Seconde Guerre Mondiale, un quart des moellons utilisés entre Istein et Strasbourg a disparu à cette époque (Poitrat, 1950 ; Kaufmann, 1954). L'entretien des ouvrages fut définitivement arrêté avec la mise en eau des biefs du Grand Canal d'Alsace.

### 3.4. Le barrage de Kembs et le Grand Canal d'Alsace (1929-1959)

R. Koechlin, fondateur de la Société des Forces Motrices du Haut-Rhin, propose en 1902 un projet de canal latéral qui contournerait la barre d'Istein, soit le futur bief de Kembs (Libault, 1924). Le traité de Versailles de 1919 confère à la France « *le droit exclusif à l'énergie produite par l'aménagement du fleuve* » (art. 358). La construction du Grand Canal d'Alsace est finalement approuvée en 1925.

#### 3.4.1. Principes de la canalisation

Le barrage et le bief de Kembs ont été construits entre 1928 et 1932. Le barrage de dérivation est un ouvrage de basse chute, composé de cinq passes de 30 m de large fermées par des vannes de 12 m de haut. Il relève le niveau amont du fleuve d'environ 11 m, et le remous s'étend jusqu'à Bâle, 4 km en amont. En 1946, EDF a pris en charge les aménagements et a construit les biefs successifs d'Ottmarsheim, Fessenheim et Vogelgrün en 1952, 1956 et 1959 (fig. 1.34 et 1.35) (Lefoulon, 1959). Aujourd'hui, la chaîne hydro-électrique du Grand Canal d'Alsace produit près de 4 milliards de kWh par an, soit plus de 20 % des besoins en électricité de l'Alsace (EDF, 2007).

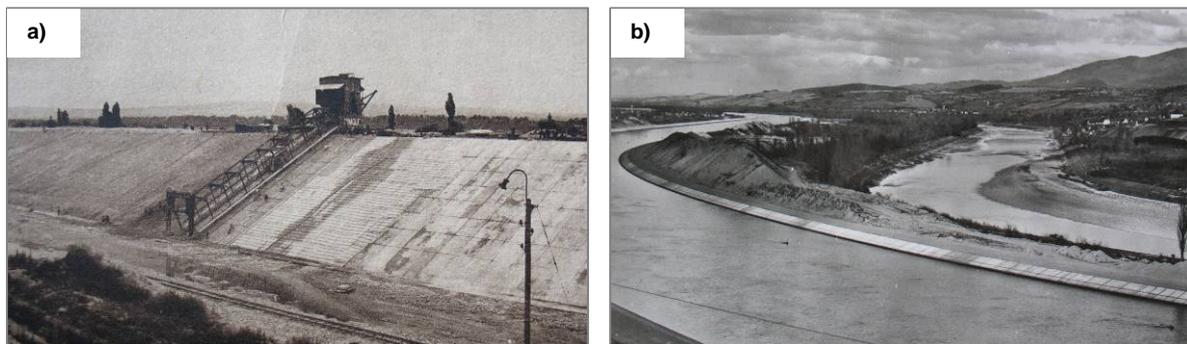
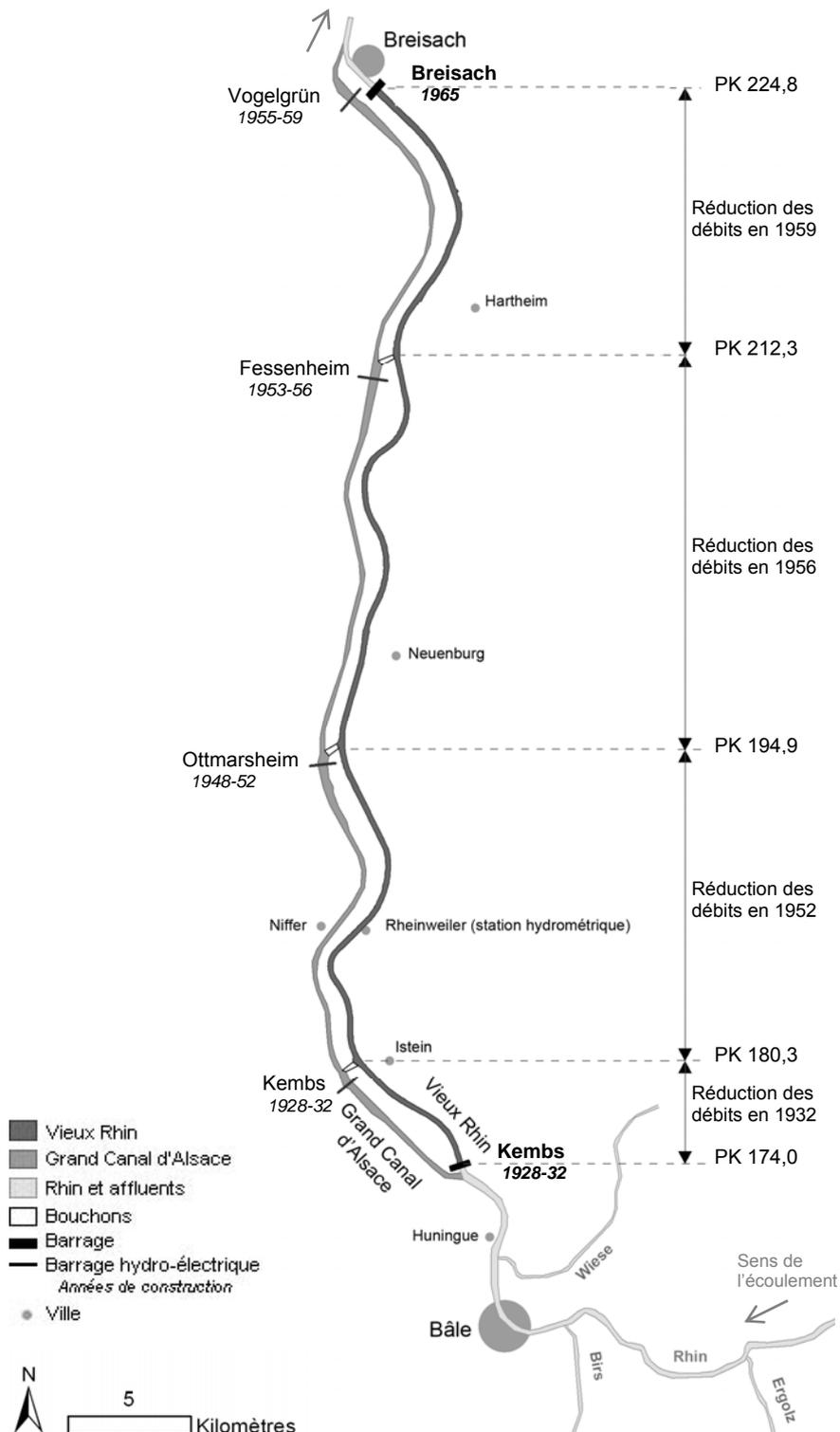


Figure 1.34 : a) Chantier de Kembs : machine à bétonner les talus (1930). b) Chantier d'Ottmarsheim : vue sur le Grand Canal d'Alsace et le Vieux Rhin (environ 1950) (cartes postales fournies par E. Dillmann)

Le Grand Canal d'Alsace a une largeur de 150 m au plan d'eau, 80 m au fond et une profondeur moyenne de 12 m. Il prend naissance 500 m en amont du barrage de Kembs. A l'amont de chaque aménagement, il se divise en un canal de force motrice (usine) et un canal de navigation (écluses) (EDF, 1982). A la mise en service de chaque bief, l'ancien canal de fuite reliant le chantier au Rhin corrigé a été partiellement comblé, ce qui explique que le Vieux Rhin actuel soit plus large au niveau des trois « bouchons » de Kembs, Ottmarsheim et Fessenheim.



**Figure 1.35 : Plan de situation du Vieux Rhin et du Grand Canal d'Alsace. Les années de construction des biefs successifs du Grand Canal d'Alsace et de réduction des débits dans les tronçons du Vieux Rhin correspondants sont indiquées**

La construction du barrage de Kembs a eu pour effet d'imposer de nouveaux débits liquides et solides pour le Vieux Rhin en aval. Les modifications de ces variables sont étudiées dans le paragraphe suivant.

### 3.4.2. Impacts du barrage de Kembs sur les débits liquides

La Wiese est l'unique affluent du Rhin entre Bâle et le barrage de Kembs. Ses crues représentent seulement 1,7 % des crues du Rhin à Bâle (Belleville, 2009). En considérant ces apports comme négligeables, le débit parvenant au barrage peut donc être assimilé à la **différence entre le débit du Rhin à Bâle et le débit entonné dans le Grand Canal d'Alsace**. Celui-ci correspond au débit d'équipement de l'usine de Kembs : de 850 m<sup>3</sup>/s en 1932, il a été relevé par paliers pour répondre à l'augmentation du trafic fluvial et des besoins en hydro-électricité. Depuis 1983, le débit turbiné est de **1400 m<sup>3</sup>/s** (fig. 1.36) (EDF, 1982 ; ECOTEC, 2006).

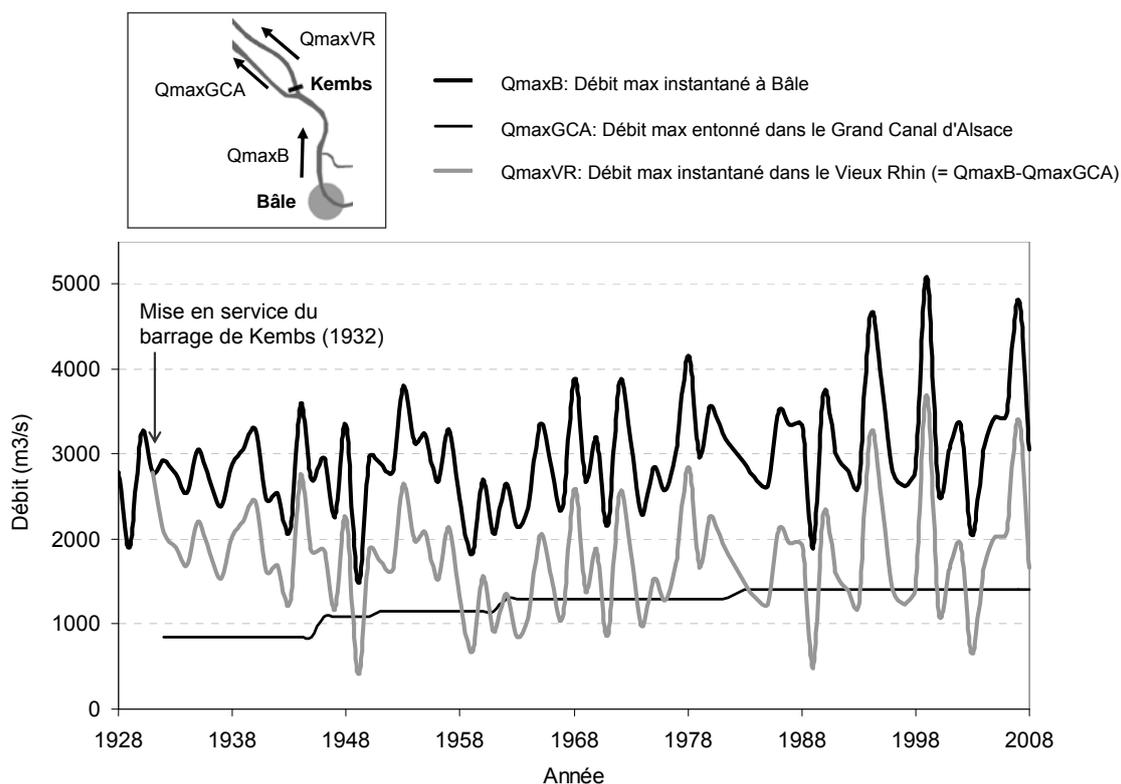


Figure 1.36 : Débits maximum annuels instantanés à Bâle et dans le Vieux Rhin entre 1928 et 2008. Le débit maximal entonné dans le Grand Canal d'Alsace a été augmenté par paliers, de 850 m<sup>3</sup>/s à 1400 m<sup>3</sup>/s

Le barrage de Kembs est considéré en *fonctionnement normal* tant que le débit à Bâle est inférieur à 2800 m<sup>3</sup>/s. Le niveau de la retenue est maintenu constant. Deux cas de figure existent (ECOTEC, 2006) :

- le débit est inférieur à 1430 m<sup>3</sup>/s (ou 1420 m<sup>3</sup>/s de décembre à février) :  **dans le Vieux Rhin transite un débit réservé de 30 m<sup>3</sup>/s (ou 20 m<sup>3</sup>/s)**. Le débit entonné dans le Grand Canal d'Alsace est égal au débit du Rhin à Bâle moins ce débit réservé ;
- le débit est compris entre 1430 m<sup>3</sup>/s et 2800 m<sup>3</sup>/s : 1400 m<sup>3</sup>/s sont entonnés dans le Grand Canal d'Alsace et **la différence est restituée au Vieux Rhin par l'ouverture des vannes**.

Au-delà de 2800 m<sup>3</sup>/s, l'aménagement est en *fonctionnement occasionnel* : le débit entonné dans le Grand Canal d'Alsace reste de 1400 m<sup>3</sup>/s, et les débits supplémentaires sont restitués au Vieux Rhin par les vannes du barrage, ce qui entraîne l'abaissement progressif du niveau de la retenue. La navigation devient interdite (ECOTEC, 2006).

*En cas de crues exceptionnelles*, des mesures consistent à intervenir directement sur le Grand Canal d'Alsace, en transférant du débit progressivement vers le Vieux Rhin, de manière à réactiver d'anciennes zones d'inondation au niveau de l'île du Rhin pour ralentir les écoulements en aval. Ces « **manœuvres exceptionnelles des usines hydro-électriques du Rhin** » représenteraient un volume de rétention d'environ 15 millions de m<sup>3</sup> entre Kembs et Breisach (ECOTEC, 2006). Ces manœuvres concernent les débits supérieurs à 3500 m<sup>3</sup>/s à Bâle et dépendent des conditions hydrologiques en aval (station de Maxau). A ce jour, aucune manœuvre exceptionnelle n'a dû être déclenchée sur le Rhin à la hauteur de la zone d'étude.

Le débit réservé transitant dans le Vieux Rhin représente **1/40<sup>ème</sup> du module du Rhin à Bâle**. Le débit de 1420-1430 m<sup>3</sup>/s a été dépassé en moyenne 69 jours par an entre 1932 et 2008. Le Vieux Rhin est donc en débit réservé **296 jours par an**, soit 81 % du temps.

Le débit-seuil de mise en mouvement a été estimé à **550 et 1000 m<sup>3</sup>/s en amont et en aval du PK 198**, respectivement (EDF R&D, 2009). Cela correspond à un débit à Bâle de 1950 et 2400 m<sup>3</sup>/s. Ces débits ont été dépassés en moyenne 15 et 3 jours par an entre 1932 et 2008. En l'absence de barrage, les débits de 550 et 1000 m<sup>3</sup>/s à Bâle seraient dépassés en moyenne 328 et 175 jours par an. **Le barrage de Kembs a donc réduit la fréquence de dépassement des débits-seuils d'un facteur 22 et 58.**

### 3.4.3. Impacts du barrage de Kembs sur les débits solides

Etudier l'impact sur les débits solides nécessite d'évaluer si le barrage de Kembs permet le transit des sédiments. En complément, une estimation des entrées sédimentaires à l'amont s'avère utile.

#### *Dynamique sédimentaire en amont du barrage*

Avant la construction de Kembs, le transport solide était déjà fortement altéré par la succession de 11 aménagements hydro-électriques construits à partir de 1898 entre le lac de Constance et Bâle, ainsi que par l'artificialisation des berges du fleuve et de ses affluents (Kolly, 1959 ; Peiry, 2003). Ces altérations anthropiques se superposent à un contexte sédimentaire naturel peu dynamique, avec le piégeage d'une partie des sédiments d'origine alpine par les nombreux lacs suisses (Walser, 1959 ; Bensing, 1966).

Entre la dernière usine (Birsfelden, PK 163) et le barrage de Kembs (PK 174), les deux principaux affluents susceptibles de fournir des sédiments au fleuve sont successivement la Birse et la Wiese. EDF CIH (2005) a procédé à l'analyse de relevés bathymétriques réalisés en 1990 et 2002 entre la confluence de la Birse et Kembs. L'étude a révélé les volumes suivants :

- Entre la confluence de la Birse et Bâle : 20 000 m<sup>3</sup> déposés, 280 000 m<sup>3</sup> érodés ;
- Sur 2,5 km en aval de Bâle : 90 000 m<sup>3</sup> érodés ;
- Sur les derniers 1,3 km en amont de Kembs : 70 000 m<sup>3</sup> déposés.

Il semblerait donc que 280 000 m<sup>3</sup> de sédiments aient transité par le barrage entre 1990 et 2002. Toutefois, il s'agit d'une estimation haute, étant donné que ces sédiments ont également pu être évacués vers le Grand Canal d'Alsace.

#### *Gestion des sédiments au barrage*

Le barrage de Kembs permet le transit sédimentaire exclusivement en crue, quand les vannes sont ouvertes. Sinon, les sédiments s'accumulent dans la retenue. Des carottages effectués en 2003 ont montré qu'il s'agit essentiellement de limons et d'argiles à l'amont immédiat du barrage, et de sables et de graviers en amont de la dérivation (ECOTEC, 2006).

Environ 35 000 m<sup>3</sup> de sédiments ont été dragués en amont du barrage entre 1991 et 2003, par pompage puis dilution dans le Grand Canal d'Alsace. Ce volume est en nette diminution par rapport aux décennies précédentes (240 000 m<sup>3</sup> entre 1965 et 1990), en raison d'une évolution dans les principes de gestion des retenues. Depuis 1994, à Kembs comme au niveau des autres barrages rhénans, il est en effet jugé préférable de curer moins souvent et moins profondément, ce qui favorise l'évacuation vers l'aval des sédiments superficiels (ECOTEC, 2006). Cette érosion ne survient que pour des débits dépassant 3500 m<sup>3</sup>/s, grâce à l'application de règles spécifiques d'exploitation en crue (ECOTEC, 2006). Entre 1990 et 2002, le Rhin a connu six crues supérieures à ce débit. Par ailleurs, nous savons que la crue de 2007 aurait érodé 50 000 m<sup>3</sup> (A. Clutier, EDF, communication personnelle). Ce volume serait cohérent avec les 280 000 m<sup>3</sup> potentiellement transportés entre 1990 et 2002 (EDF-CIH, 2005), qui auraient été évacués suite aux six autres crues.

#### *Conclusion sur les impacts du barrage sur les débits solides*

Trois éléments sont à retenir :

- Le barrage de Kembs interrompt le transit sédimentaire pour des débits inférieurs à 3500 m<sup>3</sup>/s (environ  $Q_{10}$ ) ;
- 330 000 m<sup>3</sup> de matériaux auraient été évacués vers le Vieux Rhin depuis 1990 ;
- en supposant que l'essentiel de la charge de fond soit stoppé par la chaîne hydro-électrique en amont, les sédiments évacués à Kembs seraient principalement des **sédiments fins**.

## 4. Contexte opérationnel de la restauration du Vieux Rhin

### 4.1. De l'aménagement du Rhin supérieur à sa restauration écologique

Les premières études sur les impacts environnementaux des travaux hydrauliques, ainsi que sur la richesse écologique du Rhin supérieur, datent des années 1970 (Carbiener, 1969, 1970, 1974 ; Schäfer, 1973). Ces études ont contribué à faire émerger les réflexions sur la **restauration écologique**, en parallèle de la **question des inondations**. En effet, si les deux principaux objectifs de l'aménagement du Rhin - navigabilité de la voie d'eau et production énergétique - étaient atteints dans les années 1980, en revanche les crues s'étaient aggravées en aval (Maire, 1997). Ce phénomène est principalement lié à l'accélération des écoulements dans le fleuve canalisé, et à la réduction drastique des surfaces inondables : en 1977, au terme de l'aménagement du Rhin supérieur (date de construction du dernier barrage d'Iffezheim), ces surfaces sont réduites à 140 km<sup>2</sup>, sur environ 1000 km<sup>2</sup> au début du 19<sup>ème</sup> siècle (Dister, 1992 ; Gallusser et Schenker, 1992).

La **convention franco-allemande du 6 décembre 1982** marque un engagement pour rétablir une partie des capacités de rétention des crues de la plaine rhénane. Le polder d'Erstein, au sud de Strasbourg, en est une concrétisation. Opérationnel depuis 2003, il présente la double fonction d'écêtement des crues et de restauration du fonctionnement écologique de l'hydrosystème (Schmitt *et al.*, 2009). En Allemagne, le **Programme Intégré pour le Rhin** (*Integriertes Rheinprogramm : IRP*), lancé en 1996, concilie également la protection contre les crues et la réhabilitation des milieux alluviaux (Ministerium für Umwelt und Verkehr, 1997). Une des mesures de ce programme est de décaisser la rive droite du Vieux Rhin sur 43 km de long et sur une largeur moyenne de 100 m, afin de créer une capacité de stockage d'environ 25 millions de m<sup>3</sup> (Schmitt *et al.*, 2009). Ces travaux ont débuté en 2009 et sont planifiés sur 15 ans. Environ 28 millions de m<sup>3</sup> de graviers seront excavés.

Outre les inondations, un autre problème majeur a longtemps été la **pollution des eaux** : au début des années 1980, le bassin rhénan compte 40 millions d'habitants, et la majeure partie des eaux usées est déversée directement dans le fleuve, en l'absence de système d'assainissement. Les engrais, saumures et matières industrielles s'ajoutent aux rejets, et confèrent au Rhin la réputation d'**égout de l'Europe**, alors même que 20 millions de personnes tirent leur eau potable du fleuve (De Gravelaine, 1979 ; Poindron, 1984). En 1986, l'incendie de l'entreprise bâloise Sandoz provoque le déversement de 20 tonnes de pesticides, ce qui crée une hécatombe parmi la faune aquatique jusqu'à Coblenze, et l'interruption des captages d'eau potable jusqu'aux Pays-Bas (CIPR, 2003a).

Ce véritable traumatisme va accélérer la concrétisation de mesures de protection et de sauvegarde du fleuve : dès 1987, la Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR) lance le Programme d'Action Rhin. Ses objectifs sont la réintroduction des espèces disparues dont le Saumon atlantique, la réhabilitation de la qualité de l'eau et la réduction des polluants dans les sédiments (CIPR, 2003a). Le nouveau plan « Rhin 2020, Programme pour le développement

« durable du Rhin » vise la prévention des inondations, la protection des eaux souterraines et la **restauration des écosystèmes**. Les enjeux sont de rétablir le réseau de biotopes caractéristiques du milieu rhénan, ainsi que la continuité écologique du fleuve et de ses affluents du lac de Constance à la mer du Nord (CIPR, 2001).

Ces formulations concordent avec les objectifs de la DCE. Une des « *questions importantes* » énoncée dans l'état des lieux de 2004 est en effet de « *retrouver les équilibres écologiques, en restaurant et en préservant les écosystèmes rhénans* » (DCE, 2005). Les nouveaux SDAGE Rhin et Meuse visent ainsi l'atteinte du bon potentiel écologique et du bon état chimique du fleuve, en tant que « *masse d'eau fortement modifiée* », d'ici 2027.

Enfin, le Rhin supérieur fait partie du réseau Natura 2000, et depuis 2008 il est inscrit sur la liste Ramsar des zones humides d'importance internationale. Désigner un fleuve transfrontalier sur un tronçon aussi long (170 km) et aussi anthropisé est une première, ce qui devrait amener les acteurs du Rhin à intensifier encore davantage leurs efforts de restauration dans les années à venir (Schmitt, 2010).

#### **4.2. Un engagement collectif pour la restauration du Vieux Rhin**

La qualité du milieu physique du Vieux Rhin en fait « *le tronçon le plus remarquable du Rhin supérieur* » (CIPR, 2003b). En effet, ce secteur a conservé une certaine diversité en matière d'habitats aquatiques et riverains, grâce à un tracé relativement sinueux montrant une variété d'écoulements, de profondeurs et de largeurs. De plus, le tronçon présente « *le meilleur potentiel de frayères pour le Saumon atlantique du Rhin supérieur* » (ECOTEC, 2006). Le Vieux Rhin se révèle donc être biologiquement intéressant, ce qui justifie sa protection.

Les jalons d'une restauration ont été posés lors de la conférence « Une chance pour le Rhin supérieur », tenue à Colmar en 2002 et réunissant des institutions et des organisations de protection de la nature suisses, allemandes et françaises. La conférence a souligné l'importance du Vieux Rhin pour la mise en réseau des biotopes, notamment pour la remontée du Saumon jusqu'à Bâle ; à la condition, évidemment, que des passes à poissons soient installées sur tous les barrages pour permettre la continuité biologique jusqu'au Vieux Rhin (pour l'instant, seuls Iffezheim et Gambshheim, les deux derniers barrages de la chaîne hydro-électrique du Rhin supérieur, sont équipés depuis 2000 et 2006).

A l'heure actuelle, les surfaces fonctionnelles pour les communautés de poissons sont limitées dans le Vieux Rhin, en raison du pavage et du colmatage du lit (Roche, 1991 ; Wetzlar, 2002). Deux points fondamentaux, à l'origine des principaux dysfonctionnements écologiques, ont été identifiés (Peiry, 2003) :

1. **le faible transport solide**, qui fige les formes fluviales et affecte le dynamisme des écosystèmes aquatiques et terrestres (groupements forestiers statiques appartenant aux

stades âgés des successions végétales alluviales, fond du lit très grossier défavorable à la faune piscicole) ;

2. **la faible largeur du corridor fluvial**, qui altère les groupements végétaux riverains du fait des contraintes hydrauliques importantes qu'elle induit en période de déversement (arbres tous inclinés vers l'aval, groupements de bois tendre dégradés par les crues).

Face à ces constats, les Organisations Non Gouvernementales réunies à la conférence de Colmar ont proposé leur vision de la restauration du Vieux Rhin, consistant à concilier la protection contre les crues, la mise en réseau des biotopes et la création d'un nouvel espace de vie pour les populations des territoires riverains (fig. 1.37).

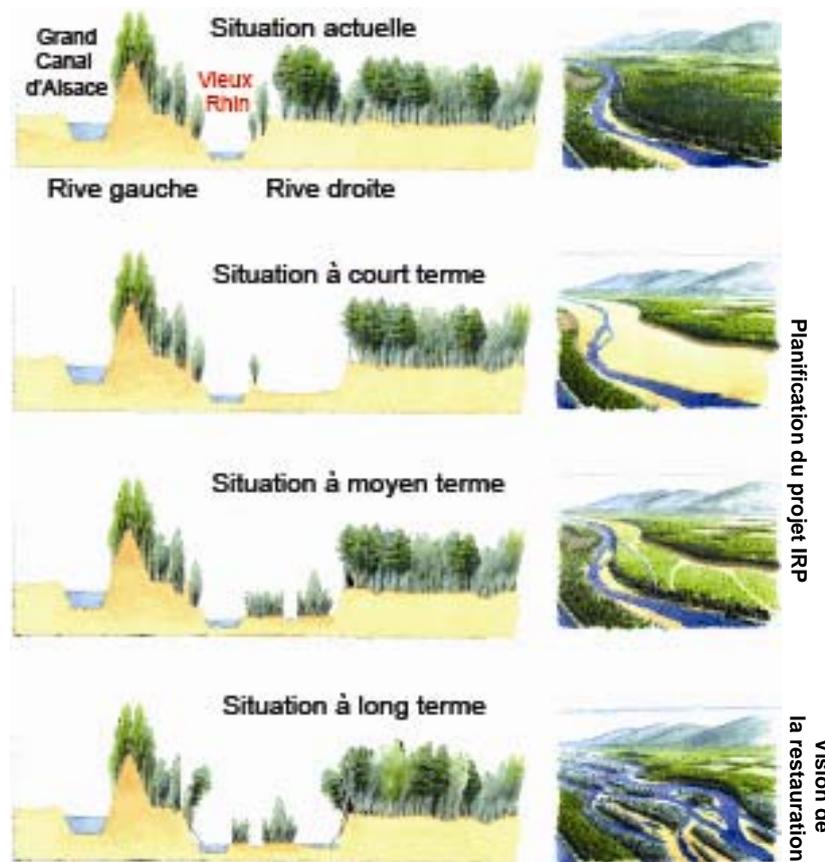


Figure 1.37 : Vision des Organisations Non Gouvernementales pour la restauration du Vieux Rhin (d'après Buisson, 2003)

C'est dans ce contexte émergent de restauration qu'ont été lancés récemment les projets EDF et INTERREG. Ils constituent le cadre opérationnel de la présente thèse.

### 4.3. Les projets EDF et INTERREG

Les concessions française et suisse attribuées à EDF sur la chute de l'aménagement hydro-électrique de Kembs sont arrivées à échéance le 31 décembre 2007. Dans le cadre du renouvellement de concession, EDF s'est engagé à mettre en place une série de mesures compensatoires visant à **restaurer la dynamique alluviale et augmenter la biodiversité dans le Vieux Rhin** (Peiry, 2003 ; ECOTEC, 2004, 2006). Parmi ces mesures, le relèvement du débit réservé, de 20-30 m<sup>3</sup>/s à 50-150 m<sup>3</sup>/s, est entré en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2011.

Une autre mesure concerne l'**érosion maîtrisée des berges de la rive gauche**. Par « érosion » », on entend la possibilité d'amorcer, *via* une action mécanique de fragilisation des berges, un processus érosif qui serait ensuite entretenu par les crues. Par « maîtrisée », on conçoit une intervention spatialement limitée, garantissant la sûreté des ouvrages annexes (Grand Canal d'Alsace...). EDF a identifié 13 km de berges pouvant être érodés, sur un total de 50 km. La restauration des apports sédimentaires latéraux viendrait compléter le relèvement du débit réservé, pour une amélioration sensible des habitats aquatiques (Piégay *et al.*, 2009, 2010 ; Clutier *et al.*, 2012).

Le projet INTERREG IV « Redynamisation du Vieux Rhin », lancé en 2009 par la région Alsace, ouvre plus largement la réflexion sur les scénarios de restauration, l'érosion maîtrisée étant une option parmi d'autres. L'objectif est de **définir un plan de restauration des fonctionnalités hydro-morphologiques et écologiques sur l'ensemble du Vieux Rhin et sur le long terme**. Les recherches sont focalisées sur la **redynamisation du transport solide**, dans le but de (i) multiplier les faciès morphologiques, (ii) rétablir si possible une zone alluviale composée de chenaux multiples, (iii) favoriser le développement d'habitats aquatiques et riverains pionniers présentant une grande valeur patrimoniale (Piégay *et al.*, 2010).

Le projet INTERREG réunit des équipes de recherche, des associations de protection de la nature et des décideurs français et allemands. 19 partenaires travaillent en concertation, sous la coordination scientifique de l'UMR 5600 du CNRS (fig. 1.38).

La restauration d'un certain transport solide est envisagée selon deux sources sédimentaires : une **introduction artificielle**, et une **recharge naturelle ou assistée par érosion latérale**. La question est ainsi de pouvoir comprendre quelles sont les meilleures modalités de recharge, comment le sédiment sera ensuite transféré vers l'aval et quels seront les habitats probables et les réponses écologiques associés (Piégay *et al.*, 2010).

Au-delà des gains écologiques, la manipulation du compartiment physique est susceptible de générer des risques, liés à la protection des ouvrages, à la satisfaction des usages actuels (navigation notamment) et à la sécurité des personnes (compatibilité des actions avec le projet IRP de rétention des crues). De fait, la réflexion engagée aborde à la fois l'**évaluation des risques environnementaux et des bénéfices écologiques** (fig. 1.39).

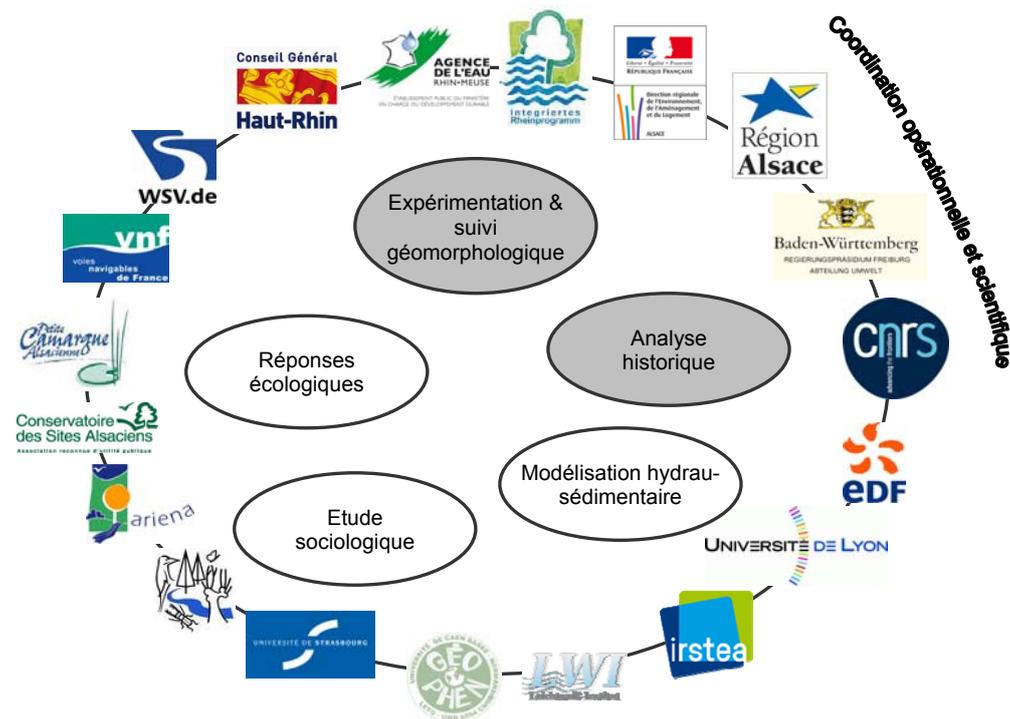


Figure 1.38 : Acteurs et champs thématiques inclus dans le projet INTERREG. Les champs grisés ont été traités dans la thèse (d'après Piégay *et al.*, 2009)

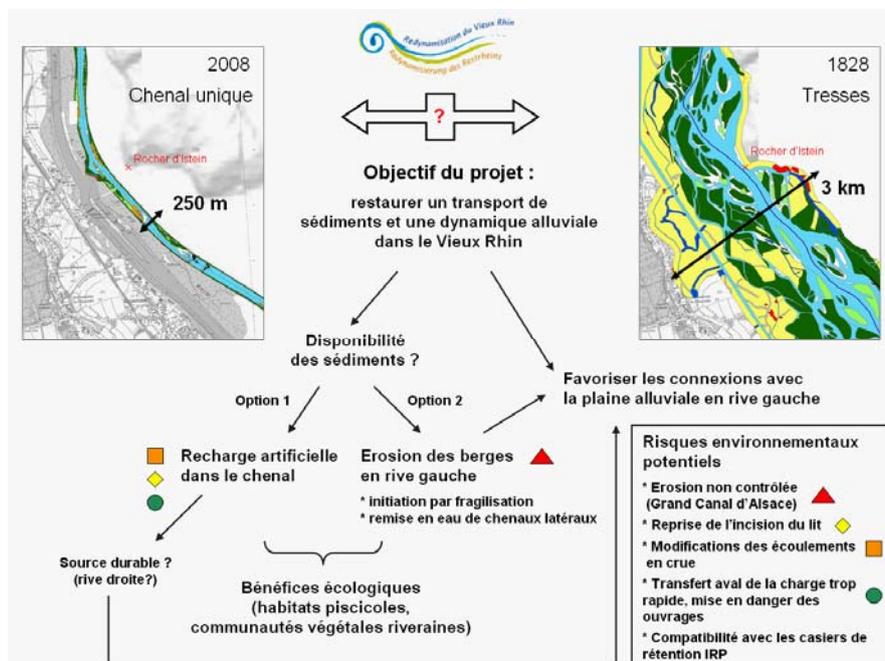


Figure 1.39 : Principe de la restauration du Vieux Rhin envisagée dans le projet INTERREG (d'après Piégay *et al.*, 2010)

Compte-tenu des risques potentiels et du caractère innovant des approches, les projets EDF et INTERREG reposent sur un **dispositif d'expérimentation et de simulation important, selon une logique adaptative**. Plusieurs sites pilotes ont été définis. Deux aborderont les modes d'initiation des processus érosifs, à partir de 2013 (projet EDF). Ils ont été précédés de simulations physiques réalisées par le LNHE (Die Moran, 2012). L'autre site pilote (projet INTERREG), dont le **suivi géomorphologique fait l'objet du chapitre 3 de la présente thèse**, a été mis en place en 2010. Il aborde la question du transfert de la charge *via* une **introduction artificielle de charge grossière**. L'évolution du dépôt sous l'action des crues doit permettre de fournir des éléments de base à la définition des scénarios. L'expérience est accompagnée de simulations numériques et physiques réalisées par l'IRSTEA (Béraud, 2012) et le LWI (Koll *et al.*, 2010).

Ces dispositifs expérimentaux sont complétés par plusieurs études : une **analyse historique, qui fait l'objet du chapitre 2 de la présente thèse**, deux **suivis écologiques** (EDF, Université de Strasbourg, Conservatoire des Sites Alsaciens, Petite Camargue Alsacienne) et une **étude sociologique** (Université de Strasbourg) (fig. 1.38).

L'ensemble des actions engagées dans les projets EDF et INTERREG permettra de proposer des scénarios d'évolution du Vieux Rhin pour les 20 prochaines années, dans le but de restaurer le transport solide et d'améliorer les fonctionnalités écologiques tout en préservant la sécurité des biens et des personnes et en garantissant la pérennité des usages actuels de l'un des plus grands fleuves européens.