



POLYTECH[®]
TOURS

Département
Aménagement et Environnement



Ecole d'ingénieurs
polytechnique
de l'université de Tours

CITERES

UMR 7324

**Cites, Territoires,
Environnement et Sociétés**

Equipe IPA-PE

**Ingénierie du Projet
d'Aménagement, Paysage,
Environnement**

Projet de Fin d'Etudes

Quelle gestion sédimentaire pour le Rhône et ses affluents ?



CHEREIL DE LA RIVIERE
Caroline

2017-2018

Tuteur pédagogique : Stéphane RODRIGUES

Tuteur professionnel : Sylvain REYNAUD



Quelle gestion sédimentaire pour le Rhône et ses affluents ?

CHEREIL DE LA RIVIERE Caroline

Tuteur pédagogique : Stéphane RODRIGUES

Tuteur entreprise : Sylvain REYNAUD

Année 2017-2018

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Ingénierie du Projet d'Aménagement, Paysage et Environnement de l'UMR 6173 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

Remerciements

Je remercie tout d'abord Sylvain Reynaud, mon tuteur professionnel pour avoir pris le temps de lire mon travail et de me conseiller, mais aussi pour m'avoir fait découvrir le fleuve Rhône, ses usages et ses enjeux lors de ma venue en entreprise en septembre.

Je remercie aussi Stéphane Rodrigues, mon tuteur pédagogique pour m'avoir conseillé sur la façon de mener à bien ce travail.

Sommaire

Table des matières

1. INTRODUCTION	2
2. PROBLEMATIQUE/ENJEUX.....	4
3. ETUDE DE CAS DU RHONE.....	5
3.1. LE BASSIN VERSANT ET SON COMPLEXE	5
3.1.1. Contexte géographique et hydrologique	5
3.1.2. Contexte géologique.....	6
3.1.3. Peuplements et populations piscicoles du Rhône	7
3.2. LES GRANDS AMENAGEMENTS DU RHONE ET LEURS IMPACTS	8
3.2.1. Historique des usages et enjeux du fleuve.....	8
3.2.2. Les ouvrages de navigation et les digues.....	9
3.2.3. Les barrages hydroélectriques	10
3.2.4. Les extractions de sédiments dans le lit mineur	12
3.2.5. Pollutions par les polychloro biphényles (PCB)	13
3.3. OBJECTIFS ET MOYENS DE GESTION SEDIMENTAIRE ACTUELS.....	14
3.3.1. Les chasses.....	14
3.3.2. Le curage/dragage d'entretien.....	14
3.4. ACTIONS DE RESTAURATION ET RENATURATION SUR LE RHONE.....	16
4. COMPARAISON AVEC D'AUTRES GRANDS FLEUVES EUROPEENS	20
4.1. LE RHIN	20
4.1.1. Contexte du fleuve et de son bassin versant.....	20
4.1.2. Problématiques rencontrées.....	20
4.1.3. Plan de gestion des sédiments pollués par les PCB.....	20
4.1.4. Test de réinjection de sédiments et érosion latérale	22
4.2. LE DANUBE.....	25
4.2.1. Contexte du fleuve et de son bassin versant.....	25
4.2.2. Problématiques rencontrées.....	25
4.2.3. Le projet HABSTURSED	25
4.2.4. Programme de gestion des sédiments du Danube	26
5. PRECONISATIONS POUR L'EVOLUTION DE LA GESTION SEDIMENTAIRE DU RHONE.....	27
6. CONCLUSION	29
ANNEXE 1 – LISTE DES ESPECES PISCICOLES REPERTORIEES SUR LE RHONE, LE RHONE EN 100 QUESTIONS, BRAVARD ET CLEMENS 2008	6
ANNEXE 2 - SYNTHESE DES APPORTS SEDIMENTAIRES DES AFFLUENTS AU RHONE, ETUDE SOGREAH, 2000	7

1. Introduction

La nécessité de préserver la ressource en eau est apparu dans les années 1960 à 1990, avec la première Loi sur l'Eau de 1964 relative au régime et à la répartition des eaux, ainsi que la lutte contre les pollutions. La gestion de l'eau est vue dans sa globalité avec l'implication de tous les usagers et de l'influence amont/aval. La seconde Loi sur l'Eau du 3 janvier 1992 intègre la notion de l'eau comme bien commun de la nation, ainsi que sa protection, sa mise en valeur et le développement de la ressource utilisable, dans le respect des équilibres naturels, sont d'intérêt général (Richard-Schott, 2011). Afin de répondre aux objectifs fixés par les lois sur l'eau, les Agences de l'Eau ont été créées dans une optique de cohérence sur le territoire du bassin hydrographique qui leur est confié. Pour planifier et gérer les actions à l'échelle du bassin versant, leur outil principal est le SDAGE ou Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux. A cela s'ajoute les SAGE ou Schéma d'Aménagement et Gestion des Eaux, qui constituent des outils plus opérationnels sur des secteurs plus réduits au sein du territoire.

Depuis 2000, la Directive Cadre Européenne sur l'Eau ou DCE impose d'atteindre le bon état des milieux aquatiques pour 2015, avec des reports d'objectifs possibles pour 2021 et 2027. Cette volonté a été renforcée par la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques ou LEMA de 2006.

Le transport solide des sédiments grossiers est un élément essentiel du bon fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux, et les altérations de la morphologie sont aujourd'hui un facteur principal expliquant le non atteinte du bon état écologique des eaux superficielles imposé par la DCE. En effet, le cycle de vie de nombreuses espèces aquatiques est lié à des habitats composés de graviers. Cette charge alluviale grossière et donc nécessaire au bon état écologique de l'eau, c'est pourquoi le bon fonctionnement du transport sédimentaire est aujourd'hui inscrit comme étant l'une des composantes indispensables à une amélioration de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques associés (Malavoi, 2011). Le déficit chronique, souvent d'origine anthropique, de cette charge en sédiments grossiers est considéré comme à l'origine de nombreux dysfonctionnements observés aujourd'hui sur la plupart des cours d'eau. De plus, il est nécessaire de gérer cette charge alluviale dans les cours d'eau présentant de nombreux usages, afin que cela ne présente pas de risques majeurs vis-à-vis des enjeux humains et socio-économiques.

Dans des conditions naturelles, les fleuves et rivières tendent à établir un équilibre dynamique en jouant sur (Malavoi, 2011) (Williams, 1984) :

- Les variables de contrôle, c'est-à-dire le débit liquide et le débit solide
- Les variables d'ajustement, c'est-à-dire la pente et la géométrie de la vallée, les caractéristiques sédimentologiques du fond du lit et des berges, et la végétation des berges

Toute rivière cherche son équilibre entre la charge alluviale imposée, soit le débit solide, et le débit liquide qui, couplé à la pente, fournit l'énergie nécessaire pour l'évacuer. Ainsi, lorsque qu'un évènement naturel ou d'origine anthropique vient à modifier ces variables de contrôle, le fleuve ou la rivière va s'adapter en jouant sur les variables de réponse afin de retrouver un équilibre dynamique (Williams, 1984).

Cela se traduit par la modification (Malavoi, 2011) :

- De la largeur du lit à pleins bords
- De la profondeur du lit à plein bords
- De la pente du lit
- De la sinuosité du cours d'eau
- Du style fluvial

Il est donc nécessaire de bien différencier les modifications des caractéristiques physiques du cours d'eau qui interviennent dans un processus d'ajustement pour maintenir un équilibre dynamique, par rapport aux modifications qui sont des indicateurs de dysfonctionnement.

Dans ce rapport, je vais tout d'abord présenter le bassin versant du Rhône dans son contexte, ainsi que les aménagements réalisés, et leur impact sur le transit sédimentaire et les écosystèmes aquatiques. De plus, j'étudierais la gestion sédimentaire actuelle autour des aménagements du fleuve. Par la suite, je m'intéresserai aux plans de gestion sédimentaire mis en place sur d'autres grands fleuves Européens, afin de permettre un retour d'expérience et ainsi proposer des pistes dans le cadre de la mise en place d'une politique de gestion sédimentaire sur le Rhône.

2. Problématique/Enjeux

Historiquement, le Rhône est un couloir de circulation des individus et des marchandises, avec un fort potentiel économique. Il en a résulté de nombreux aménagements afin de favoriser la navigation et la production d'énergie hydroélectrique, ainsi que l'extraction de sédiments pour les besoins du génie civil.

Cependant, les grandes inondations du Haut-Rhône dans les années 90 et du Bas Rhône dans les années 1990 puis 2000, ont sensibilisé les riverains sur la présence de hauts fonds dans ce fleuve fortement anthropisé. De plus, l'évolution de la société tend vers une préoccupation croissante des questions environnementales de la part de tous les citoyens. Cela se traduit réglementairement sur les milieux aquatiques, avec notamment la Loi sur l'Eau, la Directive Cadre Européenne de 2000 ou encore la mise en place de Schéma de Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux. C'est donc dans ce contexte que s'inscrit le SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse 2016-2021 précise la nécessité de mettre en place une politique de gestion des sédiments.

Dans ce cadre, un projet d'accord-cadre de 2014 à 2018 entre la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (AERMC), l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) devenu depuis Agence Française pour la Biodiversité (AFB) et la Direction Régionale de l'Environnement et l'Aménagement et du Logement Rhône-Alpes (DREAL), propose l'élaboration d'un schéma directeur de gestion sédimentaire du Rhône.

3. Etude de cas du Rhône

3.1. Le bassin versant et son complexe

3.1.1. Contexte géographique et hydrologique

Le fleuve Rhône prend sa source dans le massif Alpin de Saint-Gothard en Suisse, plus précisément au Glacier de Furka à 1753 mètres d'altitude. Son linéaire total est de 812 kilomètres, dont 512 kilomètres en France, avec bassin versant total de 98 500 km² et 90 500 km² en France. Ainsi, ce fleuve draine 1/5^{ème} du territoire français et il est le 2^{ème} plus long fleuve Français (Bravard, 2008).

Son régime hydrologique est complexe en raison de l'étendue de son bassin versant dont le climat est océanique sur la partie amont et méditerranéen à l'aval. De plus, le Rhône a de très nombreux affluents dont 4 qui à eux seuls drainent 60% du bassin Rhodanien : l'Ain, la Saône, l'Isère, et la Durance. Le fleuve a ainsi un régime hydrologique glaciaire, nival et pluvial. Le Rhône connaît aussi quatre types de crues : les crues océaniques, cévenoles, méditerranéennes extensives et les crues extrêmes du Rhône, suite à la succession de phénomènes de pluie dont au moins une est une méditerranéenne extensive (Graner, 2017). Le débit moyen du fleuve est de l'ordre de 1700 mètres cubes par seconde, pour seulement 520 mètres cubes par seconde à l'étiage, tandis qu'il peut atteindre jusqu'à 11 300 mètres cubes par seconde lors d'une crue centennale, comme ce fut le cas en 2003 à Beaucaire (IRD, Institut de Recherche pour le Développement, 2015).

Le bassin versant du Rhône peut donc être divisé en 5 régions hydrographiques, représenté sur la carte ci-dessous (Richard-Schott, 2011):

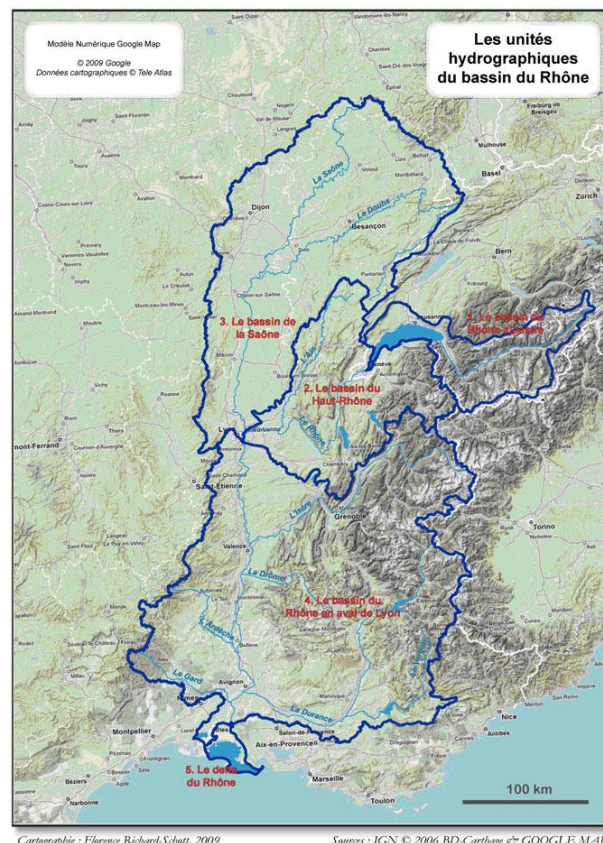


Figure 1 : Les 5 unités hydrographiques du bassin du Rhône, Richard-Schott, 2011

Figure 2 : Les 5 unités hydrographiques du bassin du Rhône, Richard-Schott, 2011

Soit, plus précisément (Bravard, 2008) :

- le Rhône alpestre, de la source au lac Léman, qui est un torrent en raison du relief élevé et accidenté du territoire ;
- le Haut Rhône Français, du Léman à la Saône, qui présente une pente moyenne de 1m/km avec une succession de gorges étroites et de plaines aux champs d'inondation étendus ;
- le Rhône moyen, de la Saône à l'Isère, qui se heurte à la barrière rocheuse du Massif Central avec une pente moyenne de 0,5 m/km ;
- le Rhône inférieur, de l'Isère à l'amont du delta, soumis au climat méditerranéen dans une suite de défilés et de plaines alluviales, la pente moyenne est de 0.6m/km ;
- le delta, à la hauteur de la ville de Arles, qui se sépare en deux bras qui enserrant la plaine de Camargue, la pente est de l'ordre de 4cm/km.

3.1.2. Contexte géologique

Le bassin versant du Rhône a une géologie très diversifiée, avec plusieurs grands ensembles caractéristiques (Agence de l'Eau rhône-méditerranée, 2017) :

- Des alluvions fluviales et fluvio-glaciaires quaternaires récentes, constituées de sables, graviers et galets, formant des nappes d'accompagnement. Ces formations se situent sur le couloir médian Saône-Rhône, mais aussi le Massif du Jura, les plateaux de Haute-Saône, les côtes Bourguignonnes, les Alpes, les massifs de la Sainte Victoire, de la Sainte Baume, des Maures et de l'Estérel, les Cévennes, sud de la Montagne noire, plateaux languedociens et Pyrénées audoises, et enfin les Pyrénées Orientales.
- Des formations détritiques sédimentaires de type sables, grès, molasses, cailloutis et poudingues d'âge tertiaire, situées en Franche-Comté (grès vosgiens), en Rhône-Alpes (molasses miocènes du Bas-Dauphiné), en Languedoc-Roussillon (sables pliocènes et grès astiens), ainsi qu'en Provence-Alpes-Côte-d'Azur (sables et molasses du miocène).
- Des formations carbonatées représentant à l'affleurement environ 40% du territoire. Ce sont des bandes de calcaires et de dolomies du Paléozoïque dans les Pyrénées, Corbières, Montagne Noire et Cévennes, des calcaires du Trias dans le Var, des calcaires de dolomies du Lias, du Jurassique et du Crétacé inférieur en Haute-Saône, dans les massifs jurassiens, les pré Alpes du Nord, en Provence, sur les plateaux Ardéchois et dans le Languedoc méditerranéen, ou encore des formations calcaires du Crétacé supérieur et du Tertiaire dans les Minervois, Fenouillèdes, Confluent, et Corbières occidentales.
- Des formations de socle des massifs anciens constitués de roches siliceuses cristallines de type granites, gneiss et schistes, ainsi que de terrains sédimentaires de type grès, calcaires et marnes. Ces formations sont localisées au sud des Vosges, sur la bordure Est et Sud-Est du massif Central, au sud du Languedoc-Roussillon, sur le pourtour méditerranéen et au niveau de la chaîne Alpine.

3.1.3. Peuplements et populations piscicoles du Rhône

Le peuplement du Haut-Rhône est caractérisé par une faune rhéophile, c'est-à-dire qu'elle affectionne les courants rapides et les substrats grossiers. On y trouve donc la truite et l'ombre commun en faible effectif, ainsi que des cyprinidés : vandoise, hotu, spirin, barbeau fluviatile, viron, blageon et goujon. Le peuplement du Bas-Rhône est différent en raison de l'arrivée de la Saône et de ces eaux plus chaudes, mais aussi suite à l'influence du couloir de la chimie et des différents aménagements réalisés sur le fleuve. On y trouve une dominance d'espèces lénitophiles c'est-à-dire qui affectionnent les milieux lents et thermophiles, qui sont donc capables de vivre à des températures plus élevées : gardon, ablette, brème bordelière, perche-soleil, poisson-chat, brème commune, rotengle, tanche et anguille (Bravard, 2008).

Parmi les espèces citées ci-dessus, on peut aussi distinguer les espèces natives : le gardon, l'ablette, le chevesne, le spirin, la vandoise, le goujon, le barbeau fluviatile, la brème bordelière, le viron, la perche commune et le blageon, par rapport aux espèces introduites par l'homme : le hotu, le poisson-chat, la perche-soleil, le silure, le carassin argenté, et le pseudorasbora.

Les poissons migrateurs que l'on retrouve dans le Rhône sont la grande alose et l'alse feinte, la lamproie marine et la lamproie fluviatile, l'anguille, ainsi que l'esturgeon commun, espèce protégée en France mais disparue sur le fleuve Rhône. Ces espèces piscicoles sont des migrateurs amphihalins, ils ont donc la nécessité de se déplacer entre la mer et les eaux douces lors de leur cycle biologique. Cela rend donc particulièrement sensible aux modifications de leurs habitats et aux divers obstacles rendant difficile leur migration (Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée, 2017).

La totalité des espèces piscicoles répertoriées sur le Rhône sont consultables en **ANNEXE 1**.

La construction des aménagements Girardon et hydroélectriques ont modifié les conditions d'écoulements, la morphologie du fleuve, et fragmenté les espaces aquatiques. La diversité des habitats lothiques a diminué, ainsi sur le Haut-Rhône, les espèces rhéophiles sont quasiment absentes dans les secteurs court-circuités, plutôt préférés par des espèces d'eaux calmes. Sur le Bas-Rhône, les mêmes espèces rhéophiles que sur le Haut-Rhône étaient représentées de la Saône jusqu'à la confluence avec l'Eyrieux avant les aménagements. Aujourd'hui, ces espèces sont quasiment absentes de ce secteur, et ont été remplacé par des espèces moins exigeantes en termes d'habitats. De plus, la présence des poissons migrateurs a diminué en raison des ruptures de continuité écologique générées par les différents barrages (Bravard, 2008).

Cependant, les changements en termes de morphologie et de diversité d'habitats ne sont pas les seuls facteurs expliquant ces changements de peuplements piscicoles, il est important de prendre en compte le taux de pollution du fleuve qui affecte tout autant la faune et la flore aquatique.

3.2. Les grands aménagements du Rhône et leurs impacts

3.2.1. Historique des usages et enjeux du fleuve

La vallée du Rhône est historiquement un couloir de circulation des individus ainsi que des marchandises. La navigation sur le fleuve Rhône a débuté dès l'Antiquité avec le commerce du peuple Grec, puis par la suite lors de la conquête de la Gaule par les Romains. Au Moyen-âge, le fleuve est utilisé pour le transport de marchandises tels que des matériaux de construction, des aliments ou encore des tonneaux de vin.

Au 18^{ème} siècle, se développe un système économique et manufacturier autour du fleuve (viticulture, textile, chimie...). Cela se poursuit au 19^{ème} siècle avec le développement du commerce et de l'industrie, ainsi que l'essor des bateaux à vapeur. Il devient nécessaire d'aménager le Rhône, afin de permettre aux bateaux de disposer d'un tirant d'eau suffisant pour la navigation, tout en étant dans un contexte de concurrence avec le chemin de fer. Ainsi, le fleuve fut « rectifié » afin de permettre la navigation entre Lyon (le point kilométrique 0 ou PK 0) et la mer Méditerranéenne.

Lors de la 1^{ère} guerre mondiale, des industries chimiques se développent autour du fleuve, formant le couloir de la chimie. Par la suite, lors de la 2^{ème} guerre mondiale et le déclin économique associé, il fallut trouver une autre manière d'exploiter les ressources du Rhône, c'est ainsi que commença la production d'hydroélectricité et la construction des premiers barrages (Parrot, 2015).

Aujourd'hui, les notions de préservation écologique du Rhône, ainsi que des paysages naturels et loisirs associés devient une question majeure à prendre en compte dans l'aménagement de ce fleuve.

Ainsi, le Rhône est un fleuve qui a connu de grandes phases d'aménagement afin de permettre la navigation, mais aussi dans le but d'éviter le risque d'inondation pour la population alentour (Parrot, 2015) et enfin dans un but de production d'énergie.

On peut ainsi noter l'aménagement :

- Des digues « insubmersibles » suite à la crue de 1840
- Des digues basses de resserrement et premiers épis, au milieu du 19^{ème} siècle
- Des casiers Girardon à la fin du 19^{ème} siècle
- Des grands travaux d'aménagements hydroélectriques, dans la deuxième moitié du 20^{ème} siècle

Cependant, ces aménagements ont eu une influence sur la morphologie du fleuve, mais aussi sa diversité d'habitats pour la faune et la flore, ainsi que sa continuité écologique et sédimentaire. Nous allons étudier cela plus précisément dans les parties suivantes.

3.2.2. Les ouvrages de navigation et les digues

Les premiers aménagements visant à augmenter le nombre de jours permettant aisément la navigation sur le Rhône ont débuté vers 1845. Des digues longitudinales rectilignes ont été mises en place, cependant cette technique fut rapidement abandonnée car peu efficace pour resserrer le lit principal du fleuve. C'est pourquoi l'ingénieur O'Brien propose d'installer des digues submersibles dans les concavités et de barrer les bras secondaires. Cependant, les hauts fonds du fleuve continuent de se déplacer durant les épisodes de crues. Afin de les stabiliser, l'ingénieur Jacquet crée les épis noyés et les épis plongeants, ayant pour effet de combler les zones de mouilles et abaisser les zones de seuils (Bravard, 2008).

Par la suite, il fut lancé un grand programme visant à étendre et unifier le réseau de navigation Français, affirmé par la loi du 5 août 1879. Le but est de mettre en place un gabarit minimum assez grand pour recevoir les bateaux flamands, soit un gabarit de 38,5 mètres sur 5,20 avec un mouillage de 2,20 mètres, un tirant d'eau de 1,80 mètres et une hauteur libre de 3,50 mètres (Delahaye, 2009).

Dans les années 1878-1884, c'est donc l'ingénieur en chef de la navigation du Rhône (M.Girardon) qui inventa les digues Girardon, le système définitif d'amélioration des « mauvais passages » pour la navigation et permettant de stabiliser le lit mineur du Rhône. Ce système permit d'accroître le tirant d'eau pour la navigation de 1 mètre 20 supplémentaire durant l'étiage (Commune de Sablons, 2017).

Ainsi, ces aménagements ont modifié l'espace fluvial et sa morphologie, mais aussi la temporalité des activités fluviales en diminuant les contraintes imposées par le fleuve et en diminuant les périodes de chômage pour les navires (Delahaye, 2009). La figure 2 ci-dessous, représente cette évolution du Rhône sur le secteur de péage de Roussillon (Gaydou, 2013). Sur ce secteur de Péage-de-Roussillon, nous pouvons voir que les ouvrages de navigation ont fixé le Rhône en un chenal unique, en déconnectant les lônes.

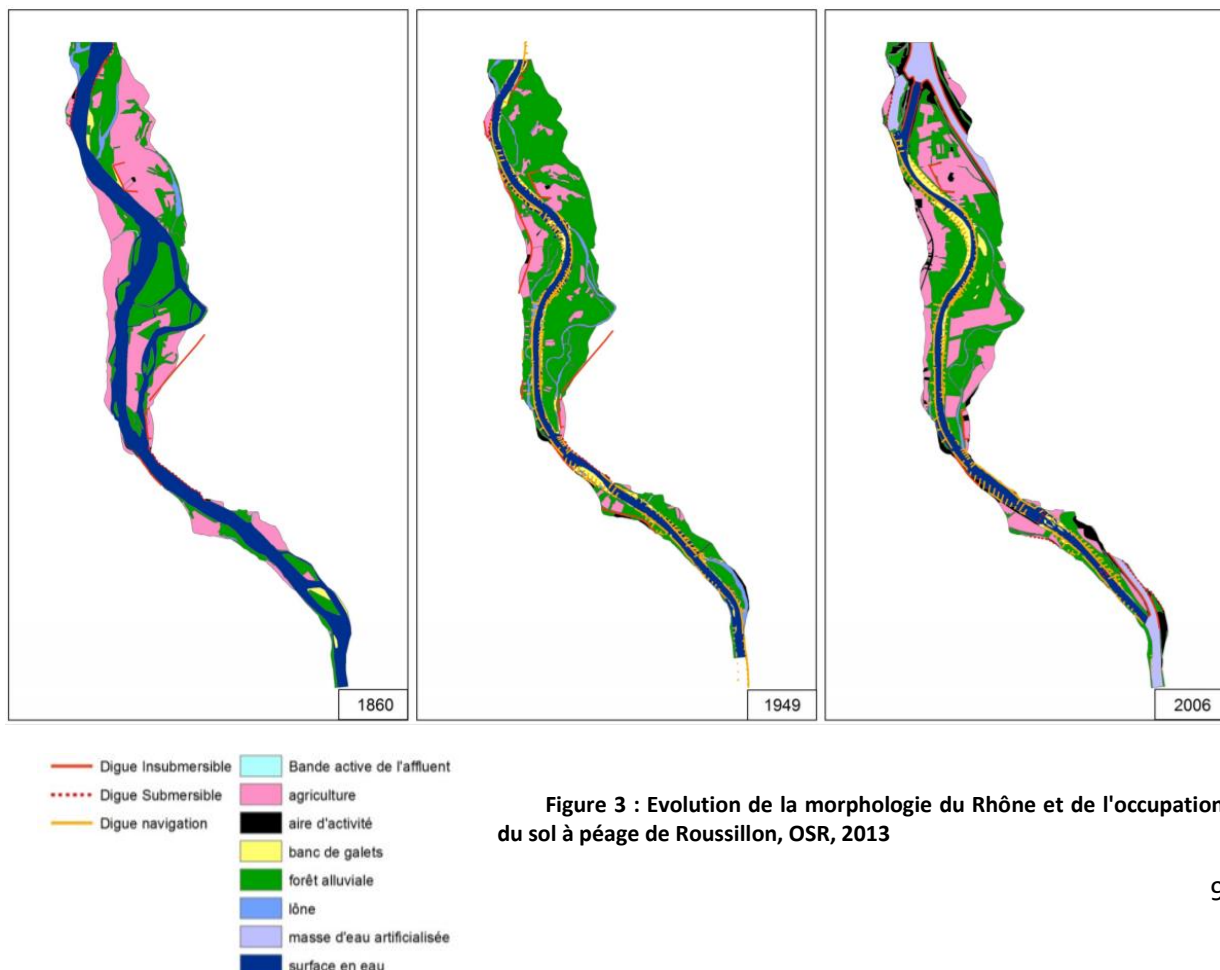


Figure 3 : Evolution de la morphologie du Rhône et de l'occupation du sol à péage de Roussillon, OSR, 2013

3.2.3. Les barrages hydroélectriques

Le premier aménagement hydroélectrique construit est celui de Jonage-Clusset en 1899 destiné à approvisionner Lyon en électricité, qui est construit en dérivation canalisée longue de 18 kilomètres. Il fut construit par les Forces Motrices du Rhône et est maintenant géré par EDF. Cet aménagement est innovant pour l'époque et d'autres constructions vont suivre.

La figure présente les principaux aménagements hydroélectriques exploités et entretenus par la CNR sur le Rhône par concession de l'état depuis 1934 (Bravard, 2008). Aujourd'hui, ils représentent 25% de la production hydroélectrique française :

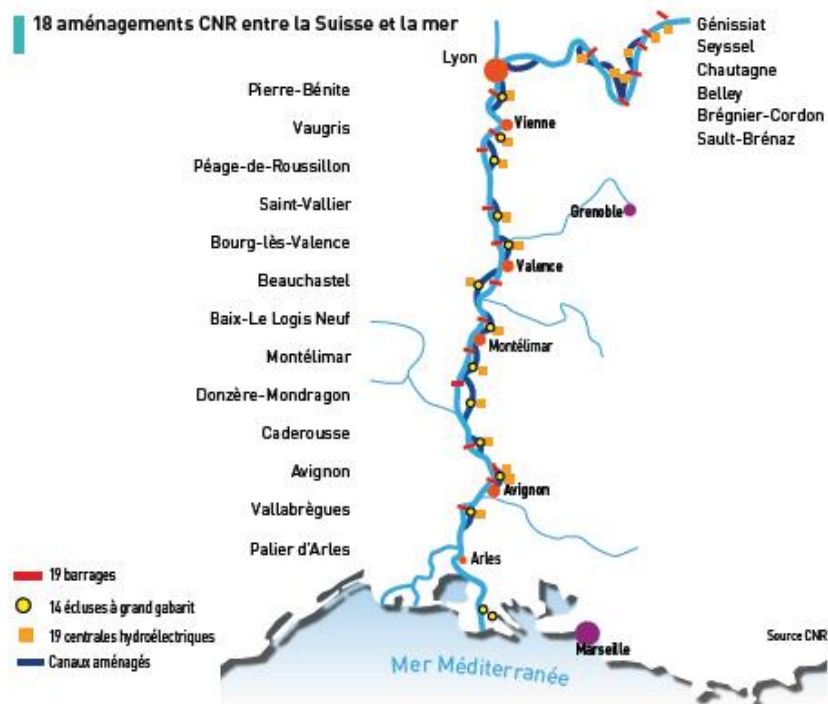


Figure 4 : Les principaux aménagements CNR sur le Rhône, Le Rhône en 100 questions, 2008

Les barrages constituent des points de rupture de la continuité géomorphologique et écologique des cours d'eau, leur impact sur le chenal sont (Petts, 1980) (Williams, 1984) :

- la modification des variables de contrôle (débits liquides et solides) ;
- des changements morphologiques du chenal ;
- la rétroaction des changements morphologiques sur le fonctionnement écologique.

Ainsi, généralement en amont de ces barrages, les processus de sédimentation suivants sont systématiquement retrouvés (Agence de l'Eau Rhône méditerranée, 2013) :

- les éléments les plus lourds sont déposés à l'entrée du bassin, en raison de l'abaissement significatif de la vitesse ;
- les éléments plus fins sont entraînés plus loin dans le bassin, à proximité du barrage (zone proximale) où ils sédimentent ;
- le dépôt de sédiments grossiers se déplace de plus en plus loin dans le bassin (zone distale), notamment lors des crues.

Cependant, cela varie au sein des aménagements suivant leur superficie, leur largeur, leur longueur et leur profondeur, mais aussi en fonction du débit du cours d'eau et de la nature des sédiments.

De plus, dans le cas des barrages de dérivation, la modification des variables de contrôle du cours d'eau a pour effet de modifier la morphologie et la granulométrie. Cela se traduit par un déficit sédimentaire à l'aval, entraînant une incision progressive susceptible d'atténuer la pente du cours d'eau, qui lorsqu'on est sur une rivière de galets/graviers, est combiné à un pavage du lit. Cela est la conséquence d'une capacité de transport supérieure à la quantité de matériaux disponibles, le pouvoir érosif devient important et le cours d'eau tente de combler ce déficit en se rechargeant avec des matériaux du fond du lit mineur (Williams, 1984) (Parrot, 2015). Cela favorise ainsi un chenal unique avec exhaussement des marges alluviales.

Afin de déterminer si les aménagements hydroélectriques du fleuve jouent un rôle dans une possible accumulation des sédiments, il a été comparé des relevés bathymétriques de la CNR récents avec des relevés effectués peu de temps avant ou après la mise en service des aménagements.

Globalement, il a été constaté un bilan sédimentaire en diminution de 2,4 millions de mètres cubes, sauf au niveau de la retenue de Génissiat, présentant une haute chute, avec une augmentation de 12 millions de mètres cubes de sédiments fins (Bravard, 2008). Ainsi, les retenues de basses chutes présentent des déficits en sédiments, contrairement au fonctionnement type d'un barrage décrit ci-dessus (Agence de l'Eau Rhône méditerranée, 2013). Ces déficits sont majoritairement expliqués par les extractions importantes dans le lit mineur dans les années 1950 et 1980.

De plus, sur le Rhône, il y a de la sédimentation de fines dans les derniers mètres en amont des barrages, qui sont remobilisées et évacuées lors des crues. Sur le vieux Rhône, on note peu d'évolution, le lit s'étant déjà pavé lors de la mise en place des épis Girardon au 19^{ème} siècle, depuis seules les marges évoluent (Reynaud, 2017). Des exhaussements des niveaux des confluences peuvent apparaître et perturber le profil en long, lorsque les affluents apportent des quantités importantes de sédiments (Parrot, 2015). Cela a été constaté par la CNR sur le Rhône, lors de suivis bathymétriques, cependant ces dépôts ne sont pas acceptables par la CNR, c'est pourquoi afin d'éviter les risques de débordements et d'exhaussement des lignes d'eau, les zones de confluences sont régulièrement draguées par la CNR, et la majorité des sédiments sont restitués plus en aval sur le Rhône.

Ces modifications morphologiques du chenal ont aussi eu des répercussions sur le fonctionnement écologique du système. Cela a engendré des déconnexions latérales avec la plaine d'inondation, déconnecté les échanges verticaux nappe-rivière, modifié la température de l'eau et homogénéisé les habitats de la faune et flore aquatique, générant une perte conséquente de biodiversité (Parrot, 2015). Sur le Rhône, le principal de la déconnexion s'était déjà établi avec les épis Girardon.

A partir du milieu du 20^{ème} siècle, la création de dérivation d'eau vers le canal usinier des usines hydroélectriques a réduit les niveaux d'eau dans les bras du vieux Rhône et déconnecté certains milieux qui aujourd'hui évoluent lentement. Cela a aussi eu l'effet de réduire de manière conséquente la fréquence des débits morphogènes dans le Vieux Rhône, ainsi que le charriage, ce qui limite fortement le pouvoir érosif des crues sur le Vieux Rhône, comme présenté dans le tableau suivant (SOGREAH, 2000) :

Tableau 1 : Perturbations des régimes hydrologiques du Rhône, SOGREAH, 2000

Perturbation du régime des débits dans les Rhône court-circuités			
AMENAGEMENT	débit de début d'entraînement	fréquence naturelle jours/an	fréquence actuelle jours / an
CHAUTAGNE	392	139	1.1
BELLEY	406	153	2.2
BREGNIER CORDON	422	146	2.6
PIERRE BENITE	1880	47	2.2
PEAGE DE ROUSSILLON	1746	58	4.7
SAINT VALLIER	1639	66	4.7
BOURG LES VALENCE	1757	58	1.1
BEAUCHASTEL	1918	84	4.0
BAIX LOGIS NEUF	1830	95	4.7
MONTELIMAR	1747	110	11.0
DONZERE MONDRAGON	1566	135	11.0
CADEROUSSE	1365	183	14.6
VALLABREGUES	1297	200	15.7

Ainsi, comme présenté sur le tableau ci-dessus, la fréquence des débits engendrant le charriage des sédiments a considérablement diminué. Par exemple, à Chautagne le débit d'entraînement de 392m³/s, qui avait une fréquence naturelle d'apparition de 139 jours/an, est seulement de 1,1 jour/an actuellement.

Enfin, les apports en matériaux grossiers de type graviers par les principaux affluents Alpains ont quasiment disparus, en raison des extractions et des aménagements hydroélectriques sur l'Arve, le Fier, l'Isère et la Durance. Seuls les affluents intermédiaires semblent encore capables de charrier des graviers jusqu'au Rhône. Par contre, les apports en sédiments fins de type limons n'ont pas été modifiés de manière significative (SOGREAH, 2000).

Une synthèse des apports sédimentaires des affluents au Rhône par charriage des sédiments grossiers ou suspension des sédiments fins est disponible en **ANNEXE 2**.

3.2.4. Les extractions de sédiments dans le lit mineur

Autrefois, le lit mineur était une ressource importante en granulats car les apports provenant de l'amont semblaient inépuisables (SOGREAH, 2000). L'extraction des granulats est aujourd'hui interdite dans le lit mineur des cours d'eau, cela a donc été reporté dans le lit majeur et au-delà. De plus, le fleuve Rhône avait un lit principalement constitué de graviers, dont le déficit des sédiments extraits a causé le remplacement du substrat par des sédiments plus fins.

Depuis, les mouvements de matériaux sur le Rhône résultent de la gestion sédimentaire mise en œuvre sur le fleuve et ses affluents. Aujourd'hui, les sédiments fins sont remobilisés pour être déplacés dans un objectif d'entretien du lit et des usages qui lui sont associés, c'est-à-dire :

- Maintien d'un chenal navigable pour un gabarit donné
- Entretien des ouvrages et exploitation hydroélectrique
- Non aggravation du niveau des crues

La figure ci-dessous représente la moyenne annuelle des matériaux extraits et remobilisés sur le Rhône entre 1970 et 2000 (SOGREAH, 2000) :

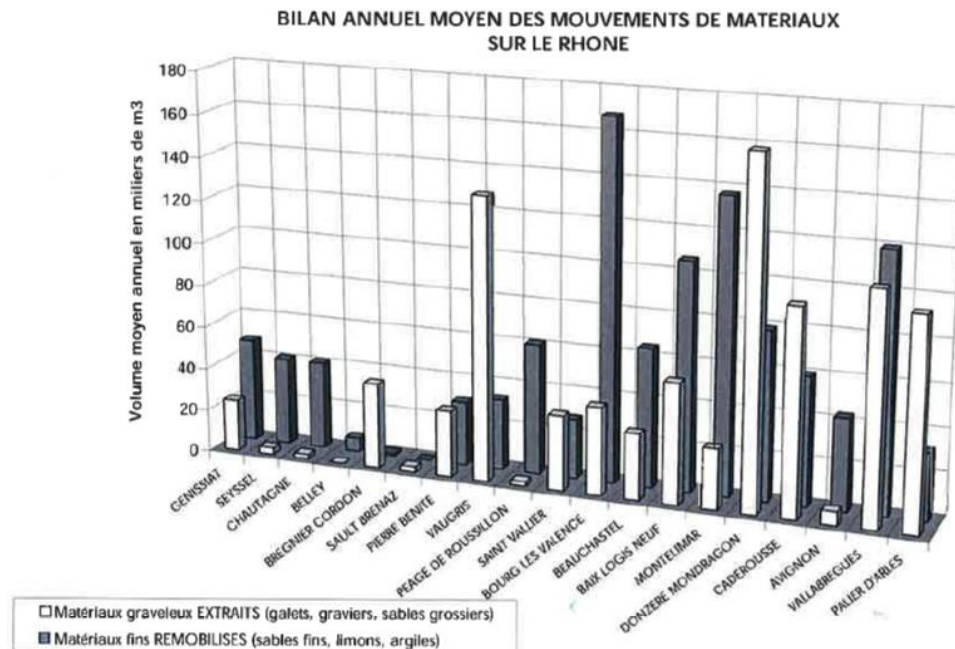


Figure 5 : Bilan annuel moyen des mouvements de matériaux sur le Rhône, SOGREAH, 2000

3.2.5. Pollutions par les polychloro biphényles (PCB)

Fortement urbanisé et industrialisé, le bassin versant du Rhône est touché par une forte pression polluante. Bien que des efforts aient été consentis et que les rejets polluants aient diminué, les substances toxiques sont toujours stockées dans les sédiments du fleuve et de ses affluents. La principale inquiétude est portée sur la présence des polychloro biphényles ou PCB (Richard-Schott, 2011). Cependant, le fleuve Rhône se situe dans la moyenne par rapport aux autres fleuves nationaux, et les concentrations restent 10 fois inférieure à la Seine (Reynaud, 2017).

Dans ce cadre, des recommandations ont été émises pour toute manipulation de sédiments. La zone d'intervention devra être analysée afin de déterminer la qualité du matériau déplacé ou extrait, et les conséquences éventuelles devront être évaluées. De plus, la concentration admissible des PCB dans les sédiments a été défini de la façon suivante (Gouisset, 2008):

- si inférieure à $10\mu\text{g/kg}$, il n'est pas nécessaire de prendre des précautions spécifiques ;
- si inférieure à $60\mu\text{g/kg}$, l'extraction ou déplacement de sédiments ne doit pas dégrader la qualité du fond du lit ;
- si supérieure à $60\mu\text{g/kg}$, les sédiments ne doivent pas être restitués au fleuve ;
- dans tous les cas, le nouveau fond du site d'extraction doit présenter une concentration en PCB inférieure ou égale à celle d'origine.

Ces recommandations visent à éviter d'aggraver la contamination du fleuve Rhône par les PCB. De plus, les travaux ayant pour effet la remobilisation ou extraction de sédiments font généralement l'objet de dossier de déclaration ou d'autorisation.

3.3. Objectifs et moyens de gestion sédimentaire actuels

La modification du système fluvial engendré par la création de barrages, de bras de dérivation ou encore de la chenalisation, rend nécessaire une gestion sédimentaire afin de ne pas aggraver les niveaux de crues, d'assurer la navigation commerciale sur le fleuve et d'exploiter les ouvrages le long du fleuve.

3.3.1. Les chasses

Afin d'éviter une trop forte accumulation des sédiments dans les retenues des barrages, il peut être effectué une vidange de fond du barrage lors d'une crue, comme c'est le cas tous les 3 ans sur le Rhône Suisse à Verbois. Cette opération est bien moins coûteuse qu'un dragage, cependant cela entraîne une augmentation brutale de la turbidité de l'eau, ainsi qu'un abaissement de la concentration en oxygène de l'eau, pouvant causer la mortalité de la faune aval par asphyxie. De plus, à long terme cela peut entraîner le colmatage superficiel des fonds et le recouvrement des habitats benthiques (Agence de l'Eau Rhône méditerranée, 2013).

Cependant, aucune chasse n'est réalisée sur le Rhône par la CNR (mais seulement sur l'Isère) et celles réalisées à Verbois en Suisse ont des impacts limités en raison du respect des seuils maximums autorisés en concentration de matières en suspension (Reynaud, 2017).

3.3.2. Le curage/dragage d'entretien

Le terme dragage est utilisé pour l'emploi de matériel fluvial tels que des dragues aspiratrices ou à godets, tandis que le terme curage est utilisé pour le matériel de terrassement comme des pelles hydrauliques (Compagnie Nationale du Rhône, 2017).

Dans les canaux d'amenée, le Vieux-Rhône et les affluents, le mode de gestion sédimentaire de la CNR est principalement basé sur les dragages (Graner, 2017). Le principe de l'opération consiste à extraire les matériaux situés au fond du lit du cours d'eau à partir de bateaux spécialisés, pour ensuite être aspirés dans des conduites et être restitués dans une zone où le courant est suffisamment élevé afin de permettre leur transport vers l'aval. Ces opérations sont nécessaires à la CNR pour répondre au cahier des charges de l'état concernant la non aggravation du niveau de la ligne d'eau et des crues, ainsi que le maintien de la navigation. De plus, des chômages sont régulièrement réalisés sur les bancs de galets du vieux Rhône. Il s'agit de décompacter ces milieux et les systèmes racinaires de la végétation afin de faciliter le mouvement des sédiments en période de crues du Rhône (Reynaud, 2017).

Lors d'un curage, il peut survenir des pollutions accidentelles directement liées au chantier. Cela peut être des fuites d'hydrocarbures depuis l'engin de curage, ou encore des pertes de sédiments dans le cas de sédiments contaminés qui ne devraient pas être remobilisés dans le milieu naturel (Agence de l'Eau Rhône méditerranée, 2013). Cependant sur le Rhône, lors des travaux de curage, un suivi du chantier est effectué régulièrement, avec des mesures de sécurité afin d'éviter toutes pollutions accidentelles.

De plus, les sédiments remobilisés ont pour effet une augmentation des matières en suspension (MES) dans le cours d'eau et peuvent avoir un impact sur les différents compartiments des milieux aquatiques. Lors d'une augmentation brusque de la concentration en MES dans le milieu, cela peut générer une diminution de l'oxygène dissous disponible et augmentation de la teneur en ammoniac

de l'eau si les sédiments ont une forte teneur en matière organique (Agence de l'Eau Rhône méditerranée, 2013). Le Rhône réagi moins violemment car les sédiments sont pauvres en matière organique <5% et les eaux très oxygénée (6 à 10mgO₂/l) (Reynaud, 2017).

De plus, lorsque les MES viennent à se déposer au fond du cours d'eau, cela peut former une couche superficielle faiblement cohésive appelée néphéloïde (Agence de l'Eau Rhône méditerranée, 2013). Cependant, si les sédiments sont restitués en quantité trop importante au milieu aquatique, les dépôts de MES formeront cette fois une couche épaisse avec pour conséquence la destruction des habitats aquatiques. De plus, les invertébrés étant des bio accumulateurs, ils sont affectés à moyen termes par les contaminants adsorbés sur les MES. Les dragages conduisent à des dépôts provisoires dans des zones profondes à proximité de la restitution de la drague, soit moins de 3 kilomètres, mais ces dépôts sont rapidement remobilisés dès que les débits augmentent. De plus, les sédiments dragués sont récents (entre 3 et 5 ans en moyenne), et ont donc une qualité physico-chimique similaire aux sédiments déplacés pendant les crues (Reynaud, 2017).

Les végétaux présents sur les berges, les herbiers aquatiques et les zones de roselières sont eux aussi affectés par les curages. En effet, l'augmentation de la turbidité de l'eau peut diminuer temporairement leur capacité photosynthétique, et l'envasement risque d'affecter leur croissance (Agence de l'Eau Rhône méditerranée, 2013). Leur importance est pourtant cruciale car ils constituent des zones d'alimentation et de reproduction pour de nombreuses espèces. Sur le Rhône, la restitution des sédiments se faisant au milieu du fleuve, cela permet de limiter les dépôts en bordures, qui est l'endroit où l'on trouve généralement la plupart des végétaux (Reynaud, 2017).

3.4. Actions de restauration et renaturation sur le Rhône

Depuis une vingtaine d'années, l'ingénierie écologique tente de restaurer le Rhône, en redonnant un débit suffisant aux anciens bras morts, en restaurant les continuités piscicoles et en remobilisant les sédiments accumulés. Depuis 1995, 120 millions d'euros ont été investis pour la restauration écologique du Rhône, avec la CNR comme principal maître d'ouvrage et financeur des opérations, et l'aide des établissements publics Français et Européens (Madoui, 2015).

Par le biais de ces restaurations, la géomorphologie du fleuve évolue. En 2000 à Pierre-Bénite, situé au sud de Lyon, le débit réservé en aval de l'usine a été le premier à être augmenté, passant ainsi de 10 à 100 m³ par seconde. Cela a permis la remise en eaux courantes de 3 anciens îlots. Cette action a été financée par la CNR, l'agence de l'eau et le syndicat mixte du Rhône. Par la suite, d'autres tronçons ont été restaurés de la même manière, en s'adaptant aux spécificités de chaque secteur, pour atteindre une quarantaine de tronçons court-circuités restaurés en 2015. D'ici 2020, la remise en état d'une vingtaine de îlots supplémentaires est prévue (Madoui, 2015).

Des travaux ont été entrepris avec le soutien de l'agence de l'eau, permettant de restaurer la continuité piscicole sur 221 obstacles au franchissement sur l'ensemble du bassin versant, notamment pour les poissons migrateurs tels que l'anguille, l'alose et la lamproie étant particulièrement sensibles. Cela représente un budget de 50 millions d'euros entre 1995 et 2014, avec une prévision de 25 millions d'euros supplémentaires pour effectuer des travaux de restauration de continuité écologique sur une quinzaine de sites supplémentaires sur le Rhône (Madoui, 2015).

De plus, des travaux visant le démantèlement des ouvrages Girardon sont en cours, afin de redonner un espace de mobilité au lit du fleuve. Ces ouvrages ont piégé des matériaux essentiels à la vie aquatique, et sont aujourd'hui parfois enfouis sous plus de 5 mètres de dépôts. Une fois les ouvrages démantelés, un chenal de mise en eau peut être creusé afin de recréer une nouvelle dynamique fluviale et de permettre une évacuation naturelle des sédiments lors des crues. Ces travaux ont été effectués sur le Vieux Rhône depuis 2014, avec de nombreux autres projets similaires en cours comme le présente la carte suivante (GRAIE, 2016) :

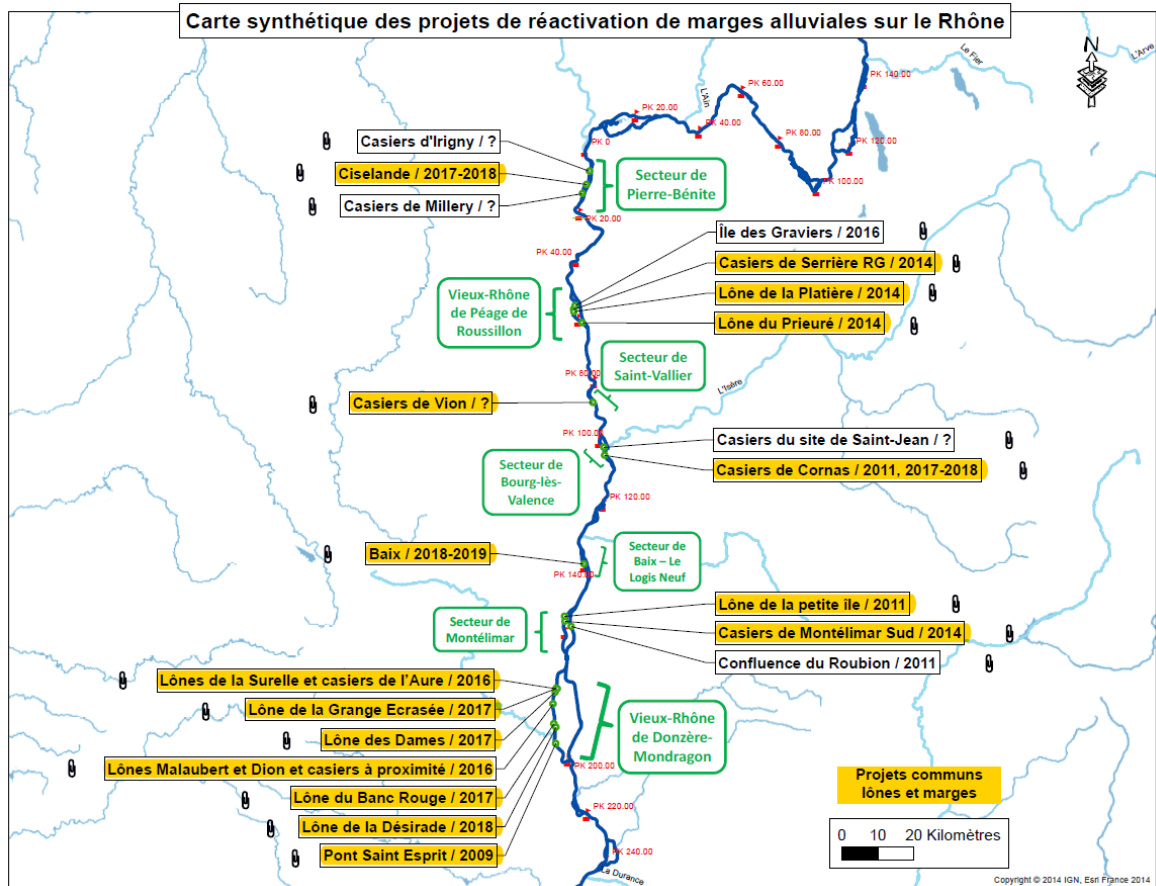


Figure 6 : Projets de réactivation des marges alluviales sur le Rhône, GRAIE, 2016

Sur les secteurs ayant été restaurés comme présenté ci-dessus, il a été constaté une augmentation de la biodiversité aquatique avec une augmentation des poissons de grands fleuves et une plus grande présence de poissons d'eaux courantes avec l'augmentation des débits réservés. De plus, la même tendance est constatée pour les invertébrés aquatiques et des traces de loutres pourtant disparue de Rhône-Alpes depuis les années 90, ont été observées. Cependant, il n'y a pas été constaté d'amélioration dans les secteurs n'ayant pas fait l'objet de travaux de restauration ou renaturation.

Les cartes ci-dessous de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée, représentent l'état des masses d'eaux superficielles du Rhône en 1998 et en 2015 :

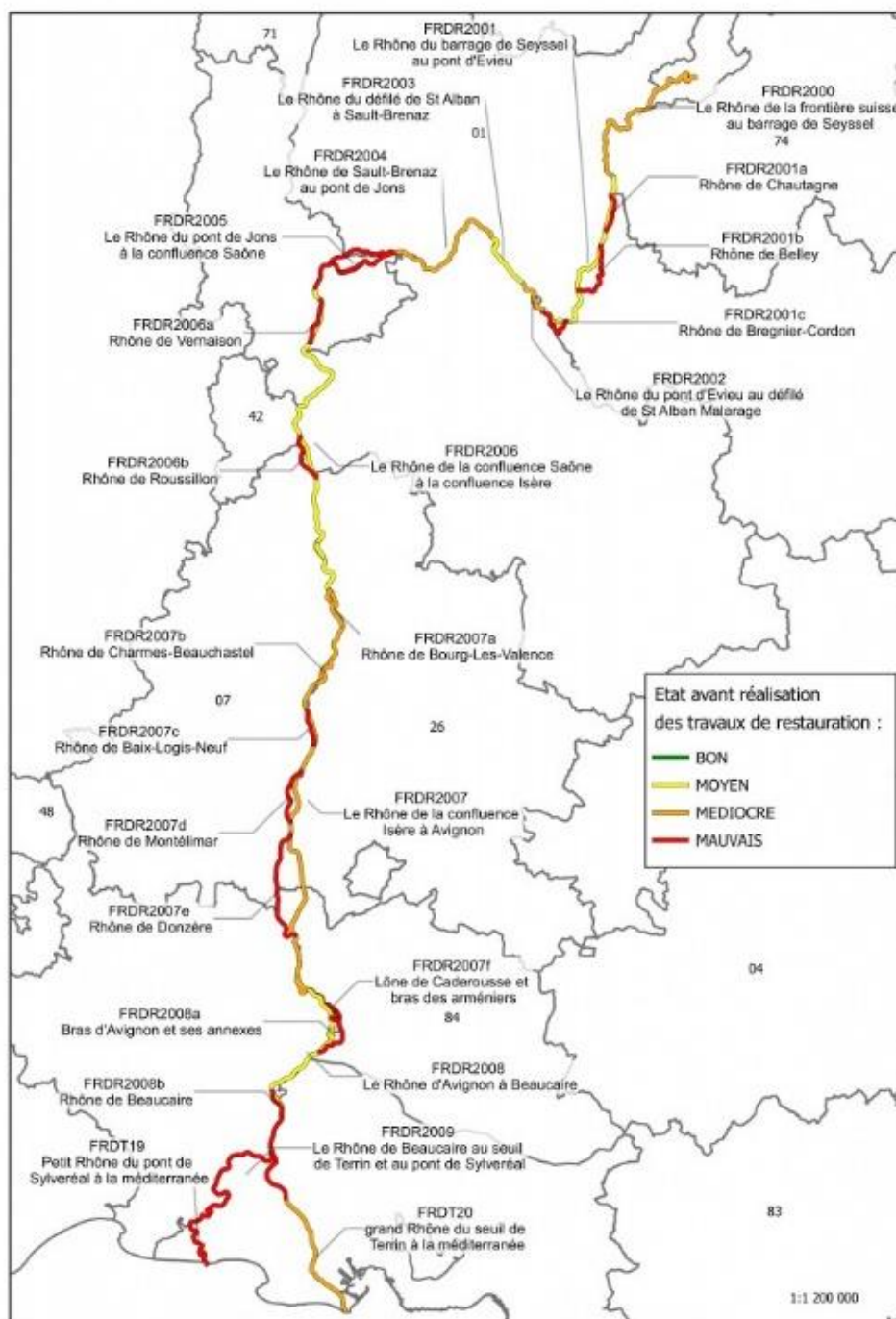
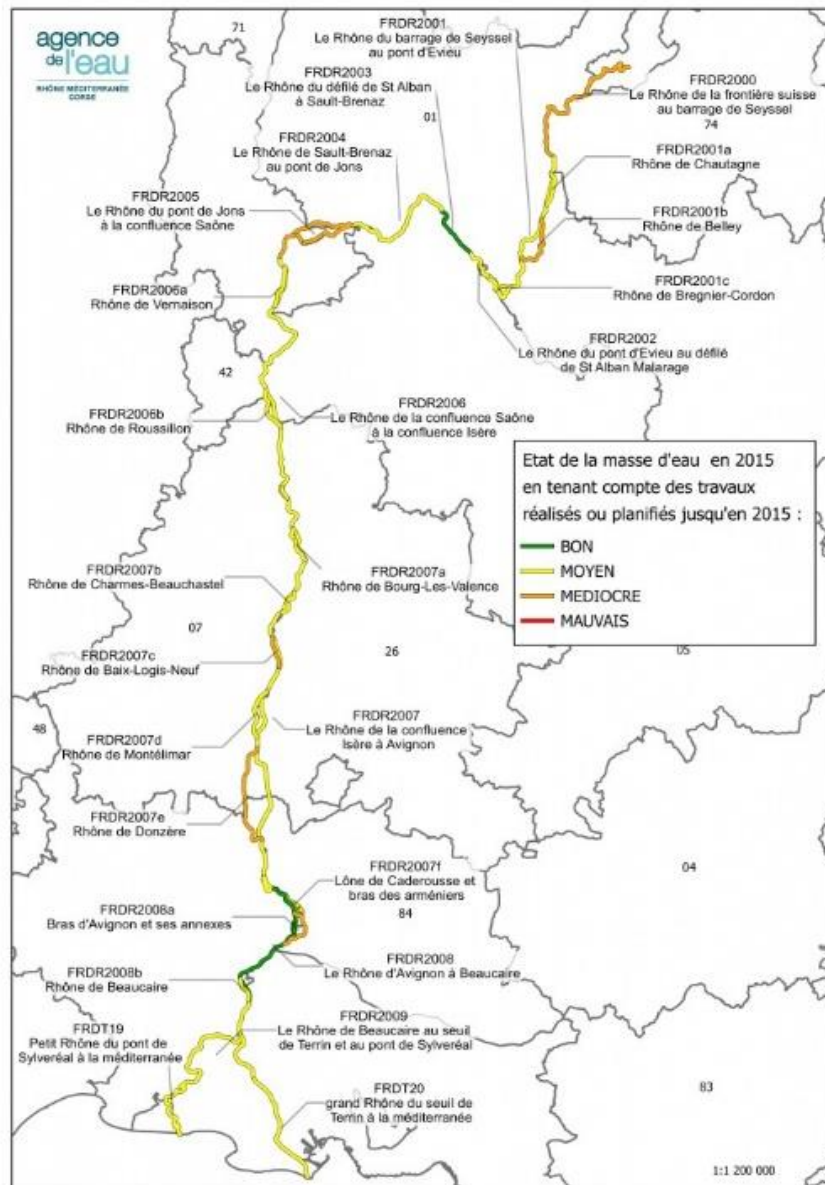


Figure 7 : Etat des eaux superficielles du Rhône en 1998



Nous pouvons donc constater une amélioration nette de l'état écologique des eaux superficielles du Rhône entre 1998 et 2015. Ainsi en 1998, aucune masse d'eau n'était en bon état, et 46% en mauvais état. Tandis qu'en 2015, la catégorie « mauvais état » a disparu, l'état médiocre représente 24% du linéaire et 68% est en état moyen. Bien que les objectifs de bon état écologique de la DCE n'est pas atteint en 2015, il est à noter que 8% du linéaire est classé en bon, ce qui est un progrès à souligner et qui est encourageant pour atteindre les reports d'objectifs fixés à 2021 et 2027. De plus, cela montre la forte influence de la morphologie fluviale sur l'état écologique des eaux. En effet, la redynamisation des anciens bras du Rhône par l'augmentation des débits réservés, la remobilisation des sédiments et le fait de redonner au fleuve un véritable espace de mobilité a eu un impact très positif sur la biodiversité aquatique. C'est donc en redonnant une dynamique naturelle au fleuve qu'on permet le retour d'une vraie diversité d'habitats et de la faune et flore associée.

De plus, un test de restitution de 10 000 m³ de sédiments grossiers est conduit depuis l'automne 2016, en tête du Vieux-Rhône de Chautagne. Un suivi de 3 ans a été mis en place avec un comité de pilotage constitué de l'Agence de l'Eau, de l'Agence Française pour la Biodiversité et la Compagnie Nationale du Rhône, et devrait permettre de suivre l'évolution de ces sédiments grossiers et leur impact en termes d'habitats pour les macro-invertébrés et les espèces piscicoles (Reynaud, 2017).

4. Comparaison avec d'autres grands fleuves Européens

4.1. Le Rhin

4.1.1. Contexte du fleuve et de son bassin versant

Le fleuve Rhin prend sa source dans le massif du St Gothard, pour aller se jeter dans la Mer du Nord après un parcours de 1320 kilomètres. Il forme la frontière entre la France et l'Allemagne (Larousse, 2017). Son régime hydrologique est de type nivo-glaciaire sur l'amont, pour ensuite acquérir un climat plus océanique vers l'aval caractérisé par un pic de crues en hiver.

Historiquement, le Rhin était marqué par d'importantes crues dévastatrices et un lit très mobile lors de ces épisodes. Cependant, le fleuve a été fortement anthropisé par des endiguements, coupures de méandres ou encore par suppression des champs d'inondations au 19^{ème} siècle. Cela a eu pour effet d'accélérer la vitesse de l'écoulement, diminuant les temps de propagation de crues, en les transférant sur le bassin inférieur (Encyclopédie, 2017).

Ainsi, l'étude du Rhin d'un point de vue de la gestion sédimentaire peut être très intéressante, car bien que certains paramètres comme le régime hydrologique ne soient pas comparables à celui du Rhône, le Rhin reste un fleuve avec une problématique proche : c'est un fleuve très anthropisé et pollué, avec une gestion sédimentaire nécessaire dans le but de gérer les quantités et la qualité des sédiments transitant dans le fleuve.

4.1.2. Problématiques rencontrées

Le Rhin est un fleuve dont le lit mineur et le milieu alluvial ont été fortement anthropisés, générant de fortes modifications de son régime sédimentaire. De plus, de nombreuses substances toxiques se sont accumulées dans ses sédiments, à cause des rejets polluants en grandes quantités par le passé, et sont remis en suspension lors de crues importantes ou d'opérations de dragage (IKSPR, CIPR, ICBR, 2009). Cela a pour effet de dégrader la qualité des écosystèmes aquatiques.

Ainsi, il a été établi une forte volonté de mettre en place un plan de gestion sédimentaire sur le fleuve Rhin afin de lutter contre les PCB, et par la suite un test de réinjection de matériaux alluviaux a été effectué sur un secteur court-circuité.

4.1.3. Plan de gestion des sédiments pollués par les PCB

Les objectifs de la mise en place d'un plan de gestion sédimentaire sont (IKSPR, CIPR, ICBR, 2009):

- Obtenir un régime sédimentaire équilibré
- D'assurer durablement la qualité des sédiments, et que les sédiments dragués soient remobilisés sans créer un impact négatif sur l'environnement

Un groupe d'experts a été mis en place, afin de localiser dans un premier temps les zones de sédimentation présentant un risque plus élevé de non atteinte du bon état écologique des eaux. De plus, il a fallu réaliser un inventaire de toutes les informations existantes sur le bassin du Rhin.

Ainsi, ils ont procédé à l'identification de polluants significatifs présents dans ces zones, pour ensuite déterminer en quelle quantité ces sédiments étaient-ils présents.

Les polluants significatifs retenus sont ceux qui ont été désignés comme prioritaires par le Programme d'Action Rhin 2000 de la CIPR, soient : les métaux lourds, le plomb, le cadmium, le cuivre, le nickel, le mercure, le zinc, les micropolluants organiques hexachlorobenzène et benzo(a)pyrène et les polychlorobiphényles (IKSPR, CIPR, ICBR, 2009). Ainsi, la contamination des sédiments a été évaluée à l'aide de cette référence de la CIPR et la limite qui a été fixée pour déterminer une contamination significative des sédiments est un dépassement au quadruple en quantité par rapport à l'objectif de référence.

Par la suite, les experts ont défini différentes zones à risques en fonction du taux de contamination quantitative des sédiments et leur risque de remise en suspension, comme le résume la figure ci-dessous (IKSPR, CIPR, ICBR, 2009) :

- Classement en « Area of concern » : contamination significative des sédiments si on est en présence d'une quantité de sédiments contaminés supérieure à 1000 m³, sans risque de remise en suspension naturelle ou anthropique des sédiments
 - Classement en zone à risque : contamination significative des sédiments en grande quantité, avec risque de remise en suspension, et donc d'altération du bon état de la masse d'eau
- Les éléments pris en compte pour le risque de remise en suspension des sédiments sont : l'impact des crues, l'effet du vent ou des forces de propulsion des bateaux et les opérations de dragages et d'entretien

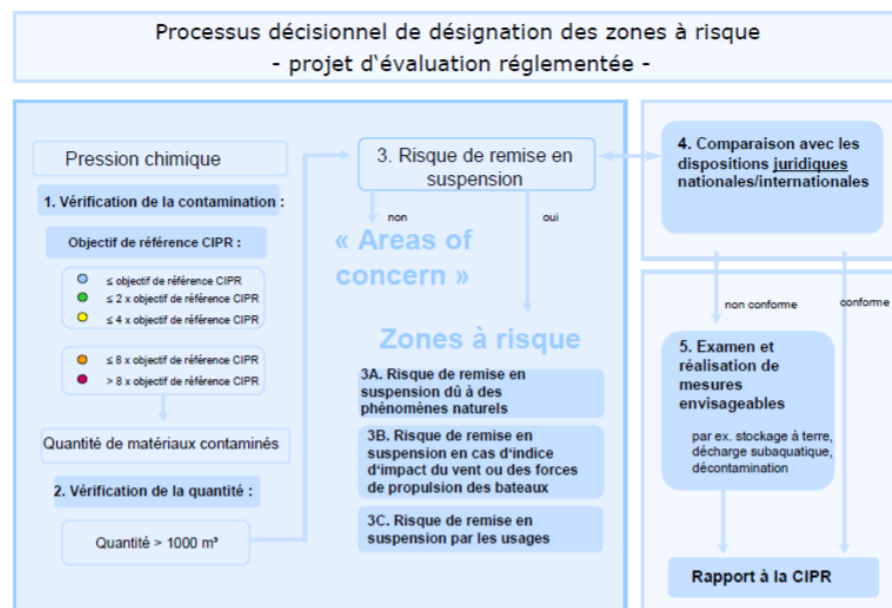


Figure 9 : Méthode de classification des zones contaminées sur le Rhin, IKSPR, CIPR, ICBR, 2009

A partir de la classification de ces différentes zones, les experts ont établis des cartes afin de déterminer les sites d'intervention prioritaire.

Afin d'atteindre les objectifs évoqués ci-dessus, des mesures intégrant une gestion durable des sédiments et à l'échelle du bassin versant ont été mises en place. Dans les zones où se trouvaient des sédiments fortement contaminés et pouvant être facilement remis en suspension, une dépollution a été préconisée. Ainsi, l'élimination de la source de pollution, devrait à terme améliorer la qualité de l'eau à l'aval. Un programme de suivi est prévu afin de documenter l'efficacité ou non de ces mesures de dépollution.

De plus, afin de limiter le coût de dépollution, il a été mis en place une analyse sédimentaire précise afin de délimiter les horizons de sédiments fortement contaminés. Pour cela, il a été réalisé une prospection par quadrillage à l'aide d'outils de forage professionnels et de carottes de sédiments. La dépollution prendrait ensuite la forme d'un stockage subaquatique.

Dans les zones peu contaminées mais nécessitant des dragages d'entretiens réguliers, il a été proposer de prélever des échantillons de sédiments avant d'effectuer les dragages. Cela doit permettre d'identifier la transition entre les sédiments peu contaminés et ceux fortement contaminés, afin d'effectuer les dragages en prenant soin de ne pas remettre en suspension les sédiments fortement contaminés, et ainsi limiter l'impact des travaux sur les milieux aquatiques. De plus, des mesures de surveillance ont été préconisées, avec des analyses régulières des sédiments contaminés afin d'estimer l'évolution de leur quantité et des prélèvements lors des crues afin d'évaluer s'il y a un risque de remise en suspension des sédiments contaminés.

Enfin, pour éviter ou au moins atténuer la sédimentation en amont des barrages, il a été proposé d'utiliser le génie hydraulique en construisant des môles de séparation ou des murs déflecteurs, en le combinant avec des mesures opérationnelles comme l'optimisation des manœuvres des barrages, des techniques de déplacement ou encore améliorer la stratégie des dragages. Cela doit permettre de se rapprocher au mieux des processus de transport sédimentaires naturels sur un cours d'eau.

Les mesures de dépollutions devront bien sûr être réalisées au préalable, afin de ne pas accélérer les processus de transport des sédiments contaminés (IKSPR, CIPR, ICBR, 2009).

4.1.4. Test de réinjection de sédiments et érosion latérale

Dans le cadre du projet INTERREG en collaboration Franco-Allemande, l'enjeu est d'évaluer différentes options de redynamisation du vieux Rhin par injection de sédiments, recharge naturelle ou assistée par érosion latérale. Le tronçon d'étude est d'une longueur de 45 kilomètres entre les barrages de Kembs et de Breisach, présentant des problèmes d'incision et de pavage du lit, avec des écoulements atténués, une bande active réduite et de nombreuses altérations écologiques. L'objectif final du projet est d'être en capacité d'établir des scénarii d'évolution possibles du fleuve et de ses habitats, afin d'orienter les futurs travaux de restauration afin qu'ils permettent de favoriser une diversité de faciès morphologiques (barres sédimentaires, îles...) et les nombreux habitats nécessaires à la biodiversité aquatique qui leurs sont associés. De plus, cela doit aussi permettre d'appréhender les modifications du compartiment physique afin de prévenir les risques potentiels de protection des ouvrages, de sécurité des biens et personnes, ainsi que la satisfaction des usages actuels.

Le schéma ci-dessous résume les enjeux et risques potentiels à prendre en compte lors du projet, suivant les différentes options de restauration (Piégay, 2010) :

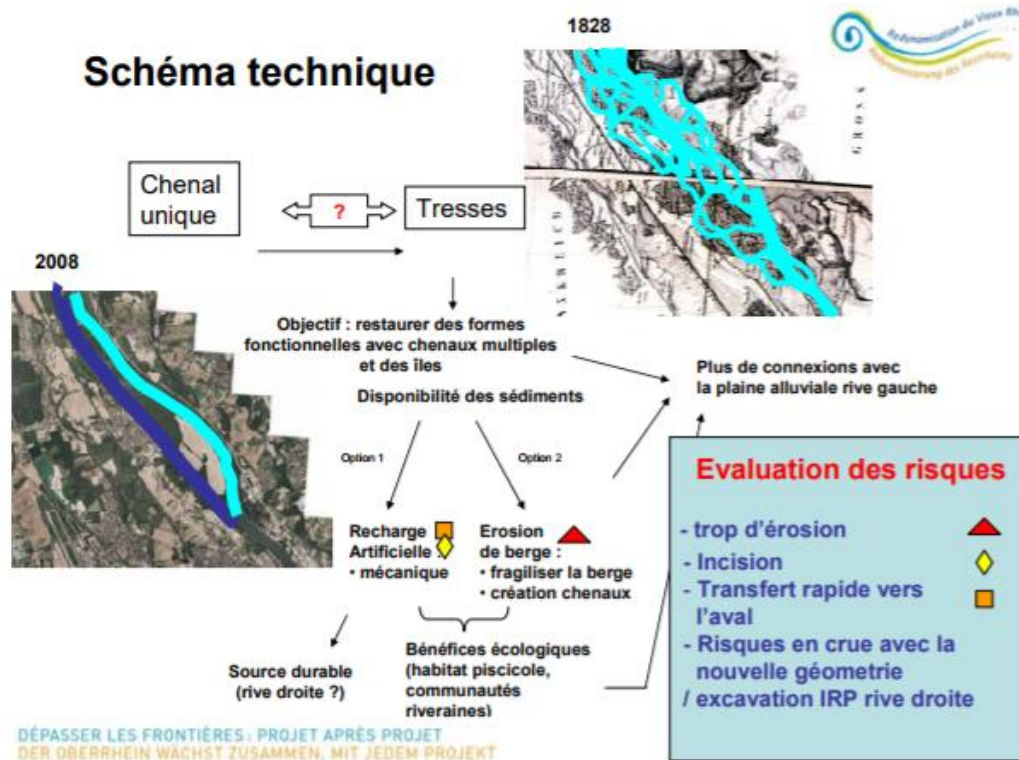


Figure 10 : Scénario de redynamisation du Rhin, Piégay, 2010

Ainsi, 22 000 m³ de sédiments ont été injectés dans un tronçon court-circuité fin 2010. Le dépôt, d'une forme trapézoïdale de 600 mètres de long, 12 mètres de large, 3 mètres de large et déconnecté de la berge, a fait l'objet d'un suivi géomorphologique afin d'étudier son comportement et la capacité de transport du cours d'eau (Béal, 201). Après l'injection des matériaux, un suivi a été effectué avant et après crues à l'aide des outils suivants :

- Suivi par radio-fréquence du déplacement de 1500 galets équipés de traceurs
- Etude de la granulométrie du tri effectué sur les sédiments injectés
- Levés bathymétriques pour suivre l'évolution de la géométrie du chenal
- Suivi par image aérienne pour suivre le front de dispersion des sédiments

La figure ci-dessous représente l'évolution spatiale des matériaux injectés dans le vieux Rhin. L'image de gauche définit la localisation du banc expérimental avant crue en novembre 2010 illustré par la position des 1500 traceurs. Au milieu, l'image représente l'état après la crue de janvier 2011 illustré par la position des 400 traceurs retrouvés, et l'image de droite met en évidence l'étirement du banc sédimentaire.

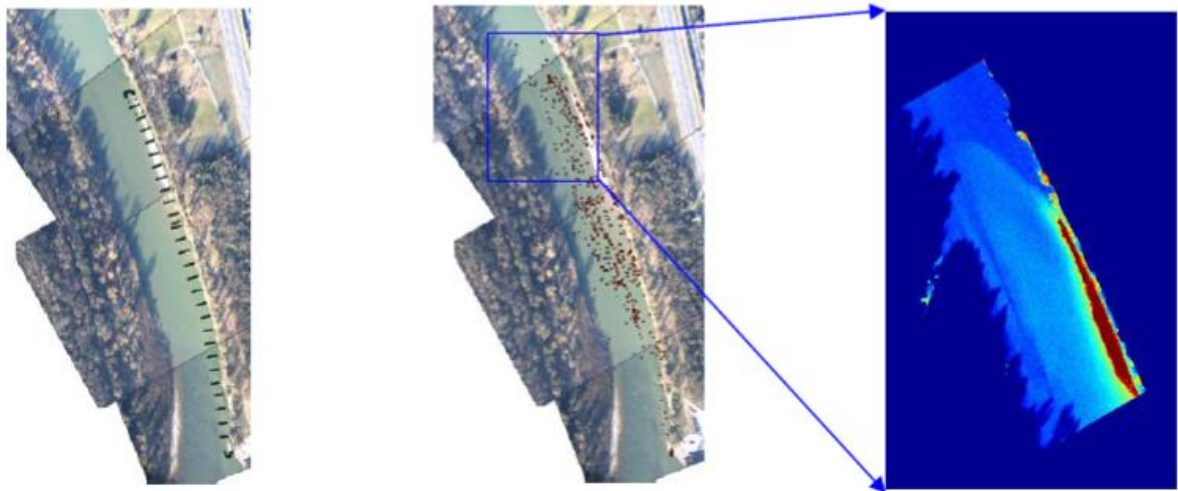


Figure 11 : Evolution spatiale des sédiments injectés dans le vieux Rhin, Béal D et Al., 2011

Le résultat du suivi a mis en évidence le déplacement des sédiments, avec élongation de la forme initiale du dépôt et une redistribution progressive de la charge sur l'ensemble du lit. De plus, le test montre que l'injection a peu affecté la ligne d'eau et n'a pas favorisé les débordements. Cela a donc confirmé les estimations de la capacité de transport du vieux Rhin, permettant d'écarter les risques de végétalisation de la recharge car le banc est mobile. De plus, d'un point de vue écologique le nouveau banc permet d'accroître le potentiel de colonisation par la végétation riveraine et le frai des espèces piscicoles. Enfin, ce test grandeur nature permet un retour d'expérience utile pour de prochaines opérations de restauration par réinjection de matériaux alluviaux (Béal, 2012).

De manière complémentaire à ce projet, le projet d'érosion « maîtrisée » piloté par EDF a été mis en place sur le même tronçon en aval du barrage de Kembs. Cette érosion doit viser la berge en rive gauche, ainsi que l'augmentation des débits réservés du vieux Rhin. Par érosion, les porteurs du projet entendent « la possibilité d'amorcer, via une action mécanique initiale de fragilisation des berges, un processus d'érosion qui sera ensuite entretenu par les crues, par maîtrisée, cela impose de concevoir un processus de restauration contenu dans une limite spatiale permettant de garantir la sûreté des ouvrages ou équipements annexes sur le fleuve » (Piégay H., 2010). Ainsi, l'érosion latérale et la restauration des apports sédimentaires doit compléter l'opération d'augmentation des débits réservés et permettre une amélioration de la dynamique fluviale et des habitats.

Tout d'abord, les processus ont été étudiés sur un modèle réduit au Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement (LHHE) d'EDF. Cela a permis de définir comment déclencher des processus d'érosion efficaces à l'aide de travaux de remodelage de la berge et d'épis, puis d'évaluer l'ampleur du transport solide et son évolution en cas de crues extrêmes (Clutier A., 2012).

Au total, 153 essais ont été réalisés, permettant de mettre en évidence une érosion de berge amorcée lorsque le revêtement de berge est retiré, ainsi que l'épi intermédiaire supprimé et la forme des épis extrêmes du tronçon modifiée. Une fois ces travaux effectués, l'érosion de berge devrait être observée à partir d'un débit de 600 à 800 m³/s, accompagnée d'un tri granulométrique, sans qu'une érosion excessive ne soit observée pour la crue centennale. De plus, les modélisations à long terme (5-10 ans) démontrent un phénomène d'auto stabilisation de la berge avec atténuation des processus érosifs. Pour conclure, ce projet devrait donc répondre aux objectifs tout en assurant une maîtrise des processus physiques, cependant par mesure de sécurité, EDF contrôlera l'évolution de l'érosion après tout épisode hydrologique significatif après les travaux réalisés à l'hiver 2012 (Clutier, 2012).

4.2. Le Danube

4.2.1. Contexte du fleuve et de son bassin versant

Le Danube a un bassin versant d'une superficie de 871 000 km², incluant des régions très variées de type montagnes moyennes ou encore de plaines. Le fleuve traverse ou longe 10 pays, et son bassin versant s'étend sur 9 pays supplémentaires. Sa source se situe en Allemagne, à l'union entre deux ruisseaux de montagne sur le versant Est de la Forêt-Noire, qui prennent leur source à 1078 et 940 mètres d'altitude. La longueur totale du Danube est de 2783,4 kilomètres, dont 2414 kilomètres, ce qui en fait le plus long fleuve d'Europe Centrale. Son exutoire est situé dans la Mer Noire en Roumanie et prend la forme d'un delta (Danube culture, 2016).

4.2.2. Problématiques rencontrées

Le Danube est un fleuve fortement anthropisé avec des barrages hydroélectriques, qui a aussi été canalisé avec la construction de digues, entraînant la perte de 80% des plaines inondables et des zones humides associées. De plus, afin de permettre la navigation, il a subi de nombreux dragages.

Aujourd'hui les esturgeons sont en voie d'extinction, bien que l'espèce soit considérée comme emblématique du bassin versant du Danube, et leur présence est indicatrice de la qualité et de la santé des écosystèmes. Leur disparition est causée par la surexploitation et la perturbation des habitats (Rodrigues, 2014).

4.2.3. Le projet HABSTURSED

La majorité des espèces d'esturgeons fraient sur des substrats de type graviers, hivernent dans les fosses profondes et les juvéniles affectionnent les zones de sédimentation active pour s'alimenter. Cependant, ils sont sensibles aux changements d'habitats et cela a un impact direct sur leur frai, leur lieu d'hivernation et le succès de leur alimentation (Rodrigues, 2014).

Dans ce contexte, le projet HABSTURSED vise à contribuer à la conservation des habitats de l'esturgeon dans le cours inférieur du bassin du Danube, dans le cadre d'une meilleure gestion sédimentaire. De plus, une gestion correcte des sédiments devrait permettre dans le même temps de réduire l'incision continue du lit mineur et améliorer la connectivité latérale avec les annexes hydrauliques, ce qui devrait avoir une influence positive sur d'autres espèces piscicoles. Ainsi, les mesures préconisées par le projet HABSTURSED devraient avoir un impact positif sur la totalité du fleuve et ses écosystèmes, et pas seulement sur les espèces d'esturgeons.

Concrètement, les objectifs du projet sont les suivants (Rodrigues, 2014):

- Identifier les habitats vitaux de référence des esturgeons dans le cours inférieur du Danube (frai, alimentation et hivernage)
- Déterminer le contexte morphologique et les caractéristiques de ces habitats (substrat, vitesse d'écoulement, profondeur, mais aussi morphologie de la rivière et hydraulique)
- Identifier et évaluer des principales activités anthropiques ayant une influence sur la dynamique des sédiments et leurs conséquences sur les habitats de l'esturgeon
- Comprendre la dynamique des sédiments dans les zones d'habitats des esturgeons par des mesures de flux hydrauliques et de flux de sédiments
- Concevoir une méthodologie pour identifier d'autres habitats essentiels de l'esturgeon

- Modéliser l'impact des différents scénarios de transport sédimentaire sur les habitats de l'esturgeon, et les mesures de gestion pour les préserver. Les scénarios envisagés sont d'évacuer les sédiments retenus dans les barrages, améliorer les techniques de dragage ou encore restaurer les processus d'érosion latérale
- Diffuser les résultats du projet pour une gestion globale et durable

Cependant, ce projet est resté à l'étape de pré-projet, mais d'autres initiatives ont vu le jour, comme nous allons le voir par la suite.

4.2.4. Programme de gestion des sédiments du Danube

La Commission internationale pour la protection du Danube (ICPDR) a reconnu un manque de gestion des sédiments dans les plans de gestion du bassin du Danube de 2009 et 2015. Cependant, cette gestion est difficile car le fleuve traverse 10 pays de sa source à son exutoire dans la Mer Noire, d'où la nécessité d'une gestion globale à l'échelle du bassin versant. C'est pourquoi le projet « Interreg - DanubeSediment » a été mis en place en 2017, réunissant 14 partenaires dans 9 pays. L'objectif est d'améliorer la gestion de l'eau et des sédiments, ainsi que la morphologie du Danube, afin de publier un « Guide de gestion des sédiments du Danube » d'ici juin 2019 (Interreg - Danube Transnational Programme, 2017).

L'objectif du projet est :

- D'établir le bilan sédimentaire pour le bassin du Danube
- Assurer le continuum des sédiments en améliorant le transit sur les barrières existantes et en évitant des interruptions supplémentaires
- Effectuer des investigations supplémentaires sur l'importance du transport sédimentaire à l'échelle du bassin versant du Danube

Afin de mener à bien le projet il faudra tout d'abord combler les lacunes dans les connaissances en recueillant des données sur le transport des sédiments dans le fleuve Danube et ses affluents, mais aussi sur les causes des perturbations actuelles, leurs impacts et les risques associés notamment en termes d'inondations. Par la suite, un guide de gestion des sédiments devra voir le jour, afin d'émettre des recommandations dans le but de réduire les perturbations de l'équilibre sédimentaire naturel du fleuve. Des ateliers de formation internationaux assureront le transfert de connaissances à des acteurs clés tels que l'hydroélectricité, la navigation, la gestion du risque inondation et la gestion globale du bassin versant qui inclut l'écologie, avec des exemples concrets pour la mise en œuvre des bonnes pratiques (Interreg - Danube Transnational Programme, 2017).

5. Préconisations pour l'évolution de la gestion sédimentaire du Rhône

En France, l'hydroélectricité est la première source d'électricité renouvelable avec 10% de l'électricité consommée, et 12 à 14% de la production totale d'électricité. Cela représente 1/3 de l'énergie renouvelable française (France Hydroélectricité, 2017).

Le parlement a adopté le 22 juillet 2015 la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte. En 2016, la part des énergies renouvelables était de 16%, l'objectif est d'atteindre 32% d'énergies renouvelables d'ici 2030 (Syndicat des énergies renouvelables, 2016). Le tableau ci-dessous fait la synthèse des objectifs de production en énergie renouvelable pour les différentes filières, dans le but d'atteindre les 32% d'électricité renouvelable d'ici 2030. Nous pouvons donc constater que la politique actuelle consiste en l'accroissement de la puissance hydroélectrique en France (Syndicat des énergies renouvelables, 2016) :

Tableau 2 : Objectifs de production fixés aux filières d'énergies renouvelables en France, Syndicat des énergies renouvelables, 2016

OBJECTIFS FIXÉS AUX DIFFÉRENTES FILIÈRES EN FRANCE MÉTROPOLITAINE

Les DOM et la Corse sont tenus de programmer leurs propres PPE

ÉLECTRICITÉ (en MW)			
Energie	Puissance installée au 31/12/2014	Puissance installée au 31/12/2018	Puissance installée au 31/12/2023
Eolien terrestre	9 313	15 000	De 21 800 à 26 000
Solaire	5 297	10 000	De 18 200 à 20 200
Hydroélectricité	25 000	25 300	De 25 800 à 26 050
Eolien en mer posé	0	500	3 000 (plus 6 000 attribués)
Energies marines	0	0	100 (entre 200 et 2 000 attribués)
Géothermie	1,5	8	53
Bois énergie	Moins de 300	540	De 790 à 1 040
Méthanisation	93*	137	De 237 à 300

* Il s'agit de méthanisation issue des déchets agricoles, de ceux de l'industrie agro-alimentaire, des collectivités, autre que les stations d'épuration et les décharges.

Ainsi, dans le contexte actuel de la transition énergétique, la production hydroélectrique en France est incontournable afin d'atteindre les objectifs fixés, car cela représente la plus grande part d'énergies renouvelables produites. La conservation des barrages sur le Rhône présente donc des enjeux économiques immédiats mais aussi à long terme, bien que cela contribue à certains dysfonctionnements du fleuve. La gestion sédimentaire doit donc prendre en compte cette variable afin de réduire au minimum leurs effets sur la dynamique fluviale et les écosystèmes associés.

Cependant, bien que la suppression des barrages soit une solution inenvisageable à l'heure actuelle sur le Rhône en raison des énormes enjeux socio-économiques associés, il n'en est pas moins possible d'agir sur leur gestion afin de permettre un fonctionnement du fleuve le plus optimum possible. Cette gestion doit prendre en compte les obligations de la CNR fixées par l'état dans le cahier des charges lors de la concession :

- Non aggravation du niveau des crues dans le Rhône et ses affluents par rapport à l'état avant aménagements
- Maintenir un gabarit de navigation
- Assurer le bon fonctionnement des différents ouvrages
- La non-submersion des digues « insubmersibles »

Dans ce cadre, les opérations de dragages réalisées régulièrement dans les tronçons présentant des problématiques de dépôt de sédiments et d'élévation de la ligne d'eau, comme par exemple les confluences avec le Rhône, sont indispensables. C'est pourquoi des fiches d'incidence dragage sont réalisées avant toute opération afin de prendre en compte tous les enjeux de sécurité et de dégradation potentielle des écosystèmes aquatiques (Compagnie Nationale du Rhône, 2017). L'avantage du Rhône est que c'est un fleuve puissant, permettant un transport optimum des matières en suspension ce qui minimise ainsi les impacts sur la biodiversité aquatique. De plus, le risque de pollution par les PCB est pris en compte lors de tous travaux entraînant la remobilisation ou l'extraction de sédiments dans le fleuve.

Des programmes de restauration du vieux Rhône ont été entrepris depuis une vingtaine d'année entre la CNR et l'agence de l'eau, afin de redynamiser le fleuve et recréer une diversité d'habitats aquatiques. Ces différents programmes ayant augmenté les débits réservés, reconnecté des bras morts et des îles, ont eu un impact très positif sur la dynamique fluviale et la diversification des habitats. Il est donc prévu de continuer ces actions sur de nombreux tronçons.

Il pourrait être intéressant de combiner ces programmes avec des test de réinjection de sédiments comme cela a été fait sur le Rhin, ou encore de permettre au Rhône une érosion latérale afin de lui redonner un plus grand espace de mobilité dans des secteurs ne présentant pas d'enjeux socio-économiques ou de sécurité des biens et des personnes.

Enfin, dans le cadre de la mise en place du nouveau plan de gestion des sédiments du Rhône, un guide des bonnes pratiques pourrait être réalisé comme cela a été proposé sur le Danube, afin de sensibiliser tous les acteurs de l'eau à ces problématiques sédimentaires, et leur donner des exemples concrets de bonnes pratiques.

6. Conclusion

Aujourd'hui, la prise en compte de la gestion sédimentaire des cours d'eau est devenue un enjeu majeur, que ce soit socio-économique ou écologique. Cela s'est traduit à l'échelle Européenne par la Directive Cadre Européenne sur l'Eau de 2000, visant un bon état écologique des masses d'eaux.

En étudiant le Rhône, le Rhin et le Danube dans ce rapport, qui sont des fleuves comparables par leur forte anthropisation et les usages associés, j'ai pu observer une prise de conscience croissante de l'importance du transport solide et des impacts potentiels lorsque celui est altéré. Ainsi, les grands fleuves Européens ont une réelle volonté d'améliorer les connaissances sur le transport solide, afin de proposer des plans de gestion sédimentaire dans une approche globale et durable sur les bassins versants concernés. De plus, les différentes équipes d'ingénieurs et de chercheurs partagent leurs résultats de recherche et retours d'expérience, afin de progresser conjointement, et cela se ressent car les méthodes de gestion ou de restauration des écosystèmes des fleuves Rhône, Rhin et Danube que j'ai étudié, sont assez similaires.

Concernant le fleuve Rhône, les travaux de restauration et de gestion du fleuve, ont permis d'améliorer de manière incontestable la continuité sédimentaire et la biodiversité aquatique. Cependant, il reste encore du chemin à faire sur ce fleuve très anthropisé. En effet, bien que les travaux de restauration des îlots et l'augmentation des débits réservés sur le vieux Rhône, aient eu un impact positif sur le bon état écologique, les restaurations n'ont été réalisées que sur certains secteurs et il en reste encore beaucoup à restaurer. Surtout, si l'on prend en compte le fait que les gains écologiques observés ne concernent que les secteurs restaurés.

De plus, bien que les problèmes d'incision du lit mineur et de déconnexion des annexes hydrauliques aient été provoqués en premier lieu par la création des ouvrages de navigation, leur suppression n'aura pour effet que de réduire le problème. En effet, les barrages toujours présents le long du fleuve entretiennent ces phénomènes de perturbations morphologiques, bien que les nombreuses mesures mises en place sur le Rhône permettent de minimiser leurs impacts. Tant que le fleuve restera anthropisé dans le but de répondre aux usages socio-économiques associés, la gestion sédimentaire du fleuve sera nécessaire car les aménagements empêchent le cours d'eau de retrouver un morpho dynamisme naturel et de revenir un à état « d'équilibre ».

Enfin, il aurait été intéressant que je puisse étudier plus particulièrement un tronçon représentatif du Rhône, afin d'apporter un aspect un peu plus concret et technique à ce rapport, cependant cela semblait peu réalisable en raison de la difficulté d'accès à des données en étant actuellement en cours. Cependant, j'aurais l'occasion de continuer cette réflexion quant à l'orientation à donner au futur plan de gestion des sédiments du Rhône dans le cadre de mon contrat de professionnalisation à la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). En effet, je vais organiser un symposium interne ayant pour thème la gestion sédimentaire du Rhône, qui se tiendra en mars 201

Bibliographie

Agence de l'Eau Rhône Méditerranée. 2017. L'eau dans le bassin Rhône-Méditerranée. *Les poissons migrants amphihalins*. [En ligne] 2017. [Citation : 28 Novembre 2017.] <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/milieux-aquatiques/poissons/poissons-migrants.php>.

Agence de l'Eau Rhône méditerranée. 2013. *Recommandations relatives aux travaux et opérations impliquant des sédiments aquatiques potentiellement contaminés*. 2013. p. 38, SDAGE Rhône Méditerranée 2010-2015. Version 2.

Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée. 2017. L'eau dans le bassin Rhône-Méditerranée. *Eaux souterraines, un contexte hydrogéologique complexe*. [En ligne] 2017. [Citation : 29 Novembre 2017.] <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/milieux-aquatiques/eaux-souterraines/formations-geologiques/index.php>.

Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée. 2017. L'eau dans le bassin Rhône-Méditerranée. *Les poissons d'eau douce*. [En ligne] 2017. [Citation : 28 Novembre 2017.] <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/milieux-aquatiques/poissons/poissons-eau-douce.php>.

Béal D., et al. 2012. *Suivi géomorphologique d'une expérience de recharge sédimentaire : le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne)*. Université de Lyon, de Caen et de Strasbourg. 2012. p. 3.

Bravard J.P., Clemens A. 2008. *Le Rhône en 100 questions*. Villeurbanne : s.n., 2008. p. 295. ZABR, GRAIE.

Clutier A., et al. 2012. *Restauration du transport sédimentaire dans le Vieux Rhin par érosion maîtrisée des berges*. 2012. p. 3.

Commune de Sablons. 2017. Commune de Sablons - Isère Rhodanienne. *Digues et épis Girardon*. [En ligne] 2017. [Citation : 4 Décembre 2017.] <http://www.commune-sablons.fr/girardon.aspx>.

Compagnie Nationale du Rhône. 2017. CNR. *Fiches d'incidence des dragages*. [En ligne] 2017. [Citation : 15 Novembre 2017.] www.cnr.tm.f.

Danube culture. 2016. Site d'informations liées au fleuve Danube. *Géographie du Danube*. [En ligne] 2016. [Citation : 6 Décembre 2017.] <http://www.danube-culture.org/geographie-du-danube/>.

Delahaye, Emmanuelle. 2009. *Les espaces fluvio-urbains rhodaniens à l'aval de Lyon, Vienne, Valence, Avignon, Tarascon, Beaucaire et Arles ; des territoires à la dérive ?* Université Lumière Lyon 2. 2009. p. 293, Thèse de doctorat.

Encyclopédie B&S. 2017. Encyclopédie. *Le Rhin*. [En ligne] 2017. [Citation : 23 Novembre 2017.] <http://www.encyclopedie.bsditions.fr/article.php?pArticleId=11&pChapitreId=36132&pArticleLib=Introduction+%5BLe+Rhin%5D>.

France Hydroélectricité. 2017. L'énergie hydraulique. *Chiffres clés*. [En ligne] 2017. [Citation : 4 Décembre 2017.] <http://www.france-hydro-electricite.fr/lenergie-hydraulique/chiffres-cles>.

Gouisset, Yves. Bourles, Eric. 2008. *Recommandation pour la manipulation des sédiments du Rhône dans le contexte de pollution par les PCB*. SNRS, DIREN Rhône Alpes, Service de Navigation Rhône Saône. 2008. p. 5.

Graner, Sylver. 2017. *Etude de l'hydromorphologie des confluences du Rhône*. ENSE3 de Grenoble. 2017. p. 41, Rapport de stage effectué à la CNR.

IKSPR, CIPR, ICBR. 2009. *Plan de gestion des sédiments du Rhin - Résumé*. s.l. : Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR), 2009. p. 175.

Interreg - Danube Transnational Programme. 2017. DANUBESediment. *Danube Sediment Management - Restoration of the Sediment Balance in the Danube River*. [En ligne] 2017. [Citation : 10 Décembre 2017.] <http://www.interreg-danube.eu/approved-projects/danubesediment>.

IRD, Institut de Recherche pour le Développement. 2015. *Des fleuves, des climats et des hommes : Le Rhône, fleuve aménagé*. IRD, Aix-Marseille Université, IRSTEA, Zone Atelier Bassin du Rhône. 2015. p. 5.

Klingeman P., et al. 1994. Les impacts morphodynamiques sur un cours d'eau soumis à un aménagement hydroélectrique à dérivation : le Rhône en Chautagne (France). *Revue de géographie de Lyon*. 1994, Vol. 69, 1, p. 15.

Larousse. 2017. Dictionnaire de Français. *Le Rhin*. [En ligne] 2017. [Citation : 23 Novembre 2017.] <http://www.larousse.fr/encyclopedie/riviere-lac/Rhin/140815>.

Madoui, Laurence. 2015. Techni.cités. *Comment le Rhône aura reconquis son "bon potentiel écologique" en 40 ans*. [En ligne] 12 Janvier 2015. [Citation : 5 Décembre 2017.] <http://www.lagazettedescommunes.com/310688/comment-le-rhone-aura-reconquis-son-bon-potentiel-ecologique-en-40-ans/>.

Malavoi J.R, et al. 2011. *Elements de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière*. s.l. : ONEMA, 2011. p. 216.

Parrot, Elsa. 2015. *Analyse spatio-temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la méditerranée*. ENS. Lyon : s.n., 2015. p. 435, Thèse de doctorat en géomorphologie fluviale.

Petts, E. 1980. *Long-term consequences of upstream impoundment*. 1980. p. 332. Vol. 7.

Piégay H., et al. 2010. *Restauration morpho-dynamique et redynamisation de la section court-circuitée du Rhin en aval du barrage de Kembs (projet INTERREG/EDF)*. Lyon : s.n., 2010. p. 8, Congrès SHF : Environnement et Hydro-électricité. hal-00615456.

Reynaud, Sylvain. 2017. Conseils pour mon PFE de la part de mon tuteur professionnel via e-mail. 2017.

Richard-Schott, Florence. 2011. Géoconfluences ENS de Lyon. *La gestion durable des ressources en eau dans le bassin du Rhône, de la théorie à la pratique*. [En ligne] 10 Mai 2011. [Citation : 28 Novembre 2017.] <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/doc/transv/DevDur/DevdurScient11.htm>.

Rodrigues, Stéphane. 2014. *Danube River sustainable sediment management for the conservation of vital sturgeon habitats as species of community interest.* 2014. p. 5. Document non publié.

SOGREAH. 2000. *Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dûs aux crues du Rhône - Etude du transport solide.* 2000. p. 62, Rapport de synthèse, 1ère étape.

Syndicat des énergies renouvelables. 2016. Les enjeux pour la France. *Une situation géographique privilégiée.* [En ligne] 2016. [Citation : 4 Décembre 2017.] <http://www.enr.fr/editorial/65/Les-enjeux-pour-la-France>.

Williams G., Wolman M. 1984. *Downstream effects of dams on alluvial rivers.* United States department of the interior. 1984. p. 94, Geological survey professional paper.

Table des figures et tableaux

<i>Figure 1 : Les 5 unités hydrographiques du bassin du Rhône, Richard-Schott, 2011</i>	<i>5</i>
<i>Figure 2 : Evolution de la morphologie du Rhône et de l'occupation du sol à péage de Roussillon, OSR, 2013</i>	<i>9</i>
<i>Figure 3 : Les principaux aménagements CNR sur le Rhône, Le Rhône en 100 questions, 2008</i>	<i>10</i>
<i>Figure 5 : Bilan annuel moyen des mouvements de matériaux sur le Rhône, SOGREAH, 2000</i>	<i>13</i>
<i>Figure 6 : Projets de réactivation des marges alluviales sur le Rhône, GRAIE, 2016</i>	<i>17</i>
<i>Figure 7 : Etat des eaux superficielles du Rhône en 1998.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 8 : Etat des eaux superficielles du Rhône en 2015.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 9 : Méthode de classification des zones contaminées sur le Rhin, IKSPR, CIPR, ICBR, 2009</i>	<i>21</i>
<i>Figure 10 : Scénario de redynamisation du Rhin, Piégay, 2010</i>	<i>23</i>
<i>Figure 11 : Evolution spatiale des sédiments injectés dans le vieux Rhin, Béal D et Al., 2011</i>	<i>24</i>
 <i>Tableau 1 : Perturbations des régimes hydrologiques du Rhône, SOGREAH, 2000.....</i>	 <i>12</i>
<i>Tableau 2 : Objectifs de production fixés aux filières d'énergies renouvelables en France, Syndicat des énergies renouvelables, 2016.....</i>	<i>27</i>

Annexes

ANNEXE 1 – Liste des espèces répertoriées sur le Rhône

ANNEXE 2 – Synthèse des apports sédimentaires des affluents au Rhône

ANNEXE 1 – Liste des espèces piscicoles répertoriées sur le Rhône, Le Rhône en 100 questions, Bravard et Clemens 2008

Nom commun	Nom latin	Familles
Esturgeon	<i>Acipenser sturio</i>	Acipenseridae
Anguille	<i>Anguilla anguilla</i>	Anguillidae
Joel	<i>Atherina boyeri</i>	Atherinidae
Loche franche	<i>Barbatula barbatula</i>	Balitoridae
Blennie fluviatile	<i>Salaria fluviatilis</i>	Blenniidae
Perche-soleil	<i>Lepomis gibbosus</i>	Centrarchidae
Achigan à grande bouche	<i>Micropterus salmoides</i>	Centrarchidae
Alose	<i>Alosa fallax rhodanensis</i>	Clupeidae
Loche d'étang	<i>Misgurnus fossilis</i>	Cobitidae
Chabot	<i>Cottus gobio</i>	Cottidae
Brème commune	<i>Abramis brama</i>	Cyprinidae
Brème bordelière	<i>Abramis bjoerkna</i>	Cyprinidae
Spirlin	<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Cyprinidae
Ablette	<i>Alburnus alburnus</i>	Cyprinidae
Barbeau fluviatile	<i>Barbus barbus</i>	Cyprinidae
Carassin doré	<i>Carassius auratus</i>	Cyprinidae
Carassin	<i>Carassius carassius</i>	Cyprinidae
Carassin argenté	<i>Carassius gibelio</i>	Cyprinidae
Hotu	<i>Chondrostoma nasus</i>	Cyprinidae
Toxostome	<i>Chondrostoma toxostoma</i>	Cyprinidae
Carpe commune	<i>Cyprinus carpio</i>	Cyprinidae
Goujon	<i>Gobio gobio</i>	Cyprinidae
Able de Heckel	<i>Leucaspis delineatus</i>	Cyprinidae
Chevaine	<i>Leuciscus cephalus</i>	Cyprinidae
Vandoise	<i>Leuciscus leuciscus</i>	Cyprinidae
Blageon	<i>Leuciscus souffia</i>	Cyprinidae
Vairon	<i>Phoxinus phoxinus</i>	Cyprinidae
Pseudorasbora	<i>Pseudorasbora parva</i>	Cyprinidae
Bouvière	<i>Rhodeus amarus</i>	Cyprinidae
Gardon	<i>Rutilus rutilus</i>	Cyprinidae
Rotengle	<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Cyprinidae
Tanche	<i>Tinca tinca</i>	Cyprinidae
Brochet	<i>Esox lucius</i>	Esocidae
Lote	<i>Lota lota</i>	Gadidae
Epinoche	<i>Gasterosteus aculeatus</i>	Gasterosteidae
Gobie noir	<i>Gobius niger</i>	Gobiidae
Gobie tacheté	<i>Pomatoschistus microps</i>	Gobiidae
Poisson-chat	<i>Ameiurus melas</i>	Ictaluridae
Loup	<i>Dicentrarchus labrax</i>	Moronidae
Mulet lippu	<i>Chelon labrosus</i>	Mugilidae
Mulet doré	<i>Liza aurata</i>	Mugilidae
Mulet-porc	<i>Liza ramada</i>	Mugilidae
Mulet sauteur	<i>Liza saliens</i>	Mugilidae
Mulet à grosse tête	<i>Mugil cephalus</i>	Mugilidae
Grémille	<i>Gymnocephalus cernuus</i>	Percidae
Perche commune	<i>Perca fluviatilis</i>	Percidae
Sandre	<i>Sander lucioperca</i>	Percidae
Apron	<i>Zingel asper</i>	Percidae
Lamproie fluviatile	<i>Lampetra fluviatilis</i>	Petromyzontidae
Lamproie de Planer	<i>Lampetra planeri</i>	Petromyzontidae
Lamproie marine	<i>Petromyzon marinus</i>	Petromyzontidae
Flet	<i>Platichthys flesus</i>	Pleuronectidae
Gambusie	<i>Gambusia affinis</i>	Poeciliidae
Lavaret	<i>Coregonus lavaretus</i>	Salmonidae
Truite arc-en-ciel	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Salmonidae
Truite fario	<i>Salmo trutta</i>	Salmonidae
Omble chevalier	<i>Salvelinus alpinus</i>	Salmonidae
Ombre commun	<i>Thymallus thymallus</i>	Salmonidae
Silure glane	<i>Silurus glanis</i>	Siluridae
Syngnathe de lagune	<i>Syngnathus abaster</i>	Syngnathidae

ANNEXE 2 - Synthèse des apports sédimentaires des affluents au Rhône, Etude SOGREAH, 2000

<i>Affluent</i>	<i>Sup BV km2</i>	<i>Caractéristiques</i>	<i>Apports au Rhône par charriage m³/an (hors prélèvements dans l'emprise CNR)</i>	<i>Apports au Rhône en suspension Mt/an</i>
Arve	1980	Transit des graviers fortement perturbé par d'importantes extractions sur tout le cours aval. Les apports restent excédentaires dans le bassin de Chamonix, mais le barrage des Houches réduit fortement le transit des graviers à l'entrée de la plaine de Sallanches. Les abaissements du lit ont atteint des valeurs exceptionnelles (supérieures à 10m localement). Un rétablissement du transit des graviers n'est guère envisageable à moyen terme.	<10 000	1 à 3.6
Usses	310	Transit des graviers peu perturbé	20 000	0.1
Valserine Séran	370	Transit des graviers peu perturbé, mais naturellement faible.		
Fier	1340	Abaissements du lit localement très importants (de 7 à 10 m). Transit des graviers interrompu par le barrage du Val de Fier.	0	0.5
Guiers	600	Transit des graviers peu perturbé, mais naturellement assez faible.	10 000 à 20 000	0.1

<i>Affluent</i>	<i>Sup BV km²</i>	<i>Caractéristiques</i>	<i>Apports au Rhône par charriage m³/an (hors prélèvements dans l'emprise CNR)</i>	<i>Apports au Rhône en suspension Mt/an</i>
Bourbre	700	Pas d'apports naturels de graviers	0	0.1
Ain	3672	Interruption du transit en amont de Pont d'Ain par plusieurs barrages successifs. Forte recharge sédimentaire potentielle dans la partie aval.	60 000	0.1 ?
Saône	30060	Transit des sables probablement fortement perturbé par les fosses de dragage du lit (5m de profondeur fréquemment).	0	1.5 à 3
Galaure	260	Transit des graviers peu perturbé	10 000	
Doux	378	Extractions notables dans la partie médiane.	8 000	0.02
Eyrieux	850	Transit des graviers perturbé par d'importantes extractions accompagnées d'un abaissement du lit localement important (jusqu'à 5m)	8 000	0.04
Isère	11800	Transit des graviers totalement interrompu aujourd'hui (dérivation hydroélectrique et extractions en amont de Grenoble, aménagement hydroélectrique du Drac, extractions avec basculement de la pente à l'aval de Grenoble. Apports de limon du bassin du Drac à peu près supprimés (sédimentation dans les grandes retenues). Pas de perturbation quantifiable sur le bassin de l'Isère.	0	3.5
Drôme	1640	Perturbations du transit par d'importantes extractions, mais sans point d'interruption totale. Apports au Rhône soutenus par un recharge sédimentaire sur la partie aval. Apports de graviers piégés au confluent dans le seuil CNR.	30 000	0.2
Roubion	600	Plus de continuité du transit jusqu'au Rhône (traversée en siphon de la dérivation de Montélimar).	0	0.05
Lèz	310	Apports au Rhône naturellement très faibles.	2 000	0.02
Ardèche	2240	Transit des graviers perturbé par des extractions, notamment à l'entrée de la plaine terminale (Bordonnies).	10 000	0.1 à 0.2
Aygues	1150	Transit naturellement interrompu à l'entrée de la plaine terminale. Abaissement généralisé du lit par extractions.	0	0.1 / 0.2
Cèze	1310	Réduction naturelle du transit dans la plaine terminale.	10 000	0.1
Ouvèze de Vaison		Interruption naturelle de la continuité du transit à l'arrivée dans la plaine terminale du Rhône (rupture de pente). Extractions dans la partie active du cours.	0	0.1 / 0.2

<i>Affluent</i>	<i>Sup BV km²</i>	<i>Caractéristiques</i>	<i>Apports au Rhône par charriage m³/an (hors prélèvements dans l'emprise CNR)</i>	<i>Apports au Rhône en suspension Mt/an</i>
Durance	14000	Transit des graviers fortement perturbé par la modification du régime hydrologique (dérivation hydro-électrique) et par des extractions généralisées. Apports au Rhône interrompu par les souilles d'extraction d'Avignon. Pas de rétablissement envisageable avant plusieurs décennies. Transit des limons jusqu'au Rhône quasiment interrompu jusque dans les années 1980 (sédimentation dans les grands réservoirs de Serre-Ponçon et du Verdon, colmatage à 80% des retenues de moyenne Durance, rejets de limons dans l'étang de Berre). Rétablissement actuel des apports du bassin intermédiaire (1.8 Mt/an) : plus de dépôt dans les retenues colmatées de Moyenne Durance, voire relargage partiel, plan de reconquête de l'Etang de Berre limitant les apports par restitution de débits dérivés en Durance à Mallemort.	0	0,1 jusque vers 1980. Vers 1.8 actuellement
Garonne	2036	Transit des graviers naturellement réduit dans la plaine terminale. Transit aujourd'hui interrompu par des souilles d'extraction.	0	0.1 à 0.2

CITERES

*UMR 7324
Cités, Territoires,
Environnement et
Sociétés*

*Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
D'Aménagement,
Paysage,
Environnement*



35 allée Ferdinand de Lesseps
BP 30553
37205 TOURS cedex 3

Tuteur pédagogique : Stéphane RODRIGUES
Tuteur professionnel : Sylvain REYNAUD

CHEREIL DE LA RIVIERE Caroline
Projet de Fin d'Etudes
DAE 5
2017-2018

Quelle gestion sédimentaire pour le Rhône et ses affluents ?

Résumé : Le Rhône est un fleuve dont la dynamique sédimentaire a été fortement modifiée en raison des aménagements réalisés afin de satisfaire des usages socio-économiques. De nos jours, la gestion de ces sédiments et leur impact sur le bon état des écosystèmes fluviaux est devenu un enjeu majeur, notamment pour le bon état écologique des masses d'eau exigé par la DCE. Ce rapport présente le bassin versant du Rhône et ses problématiques, ainsi que sa gestion actuelle, avant de comparer cela aux actions de restauration entreprises sur le Rhin et le Danube, afin de préconiser des actions pour le futur plan de gestion des sédiments du Rhône.

Mots clés : Rhône, morphologie, plan de gestion, sédiments, Directive Cadre Européenne, restauration, Compagnie Nationale du Rhône