



DREAL AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Le fleuve Rhône
du lac Léman jusqu'à la mer Méditerranée

Etude préalable à la réalisation du schéma directeur de gestion sédimentaire du Rhône

Rapport de Mission 5
Retour d'expérience sur les types de gestion mis en place sur
d'autres grands cours d'eau internationaux

Version novembre 2021

Réf : CEAUCE172551 / REAUCE04725-03



BURGEAP Agence Centre-Est • 19, rue de la Villette – 69425 Lyon CEDEX 03
Tél : 04.37.91.20.50 • Fax : 04.37.91.20.69 • burgeap.lyon@groupeginger.com



DREAL
AUVERGNE-RHONE-ALPES

Le fleuve Rhône
du lac Léman jusqu'à la mer Méditerranée

Etude préalable à la réalisation du schéma directeur de gestion sédimentaire du Rhône

Rapport de Mission 5

Retour d'expérience sur les types de gestion
mis en place sur d'autres grands cours d'eau internationaux

Ce rapport a été rédigé par le groupement de bureaux d'études composé de BURGEAP, GEOPEKA, ACTEON, ARALEP, MOSAIQUE ENVIRONNEMENT et DELTARES

Objet de l'indice	Date	Indice	Rédaction	Vérification		Validation	
			Nom	Nom	Signature	Nom	Signature
Pré-sélection de cours d'eau	2/12/2020	01	E. MOSSELMAN, F. LAVAL	E. MOSSELMAN, G.FANTINO, G.GILLES		F. LAVAL	
Rapport provisoire	25/02/2021	02	G.FANTINO, F. LAVAL	E. MOSSELMAN, G.GILLES		F. LAVAL	
Rapport final	15/11/2021	03	G.FANTINO, F. LAVAL	E. MOSSELMAN, G.GILLES		F. LAVAL	

Numéro de contrat / de rapport :	Réf : CEAUCE172551 / REAUCE04725-03
Numéro d'affaire :	A41860
Domaine technique :	BV04
Mots clé du thésaurus	SCHEMA DIRECTEUR D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX, TRANSPORT SOLIDE PAR CHARRIAGE, TRANSPORT SOLIDE PAR SUSPENSION, SEDIMENT, HYDRAULIQUE FLUVIALE, INONDATION, EAU A USAGE AGRICOLE, EAU A USAGE INDUSTRIEL, EAU A USAGE DOMESTIQUE, VOIE NAVIGABLE, ECLUSE, POISSON, QUALITE ECOLOGIQUE, HABITATS AQUATIQUES

INTRODUCTION

La DREAL Auvergne-Rhône-Alpes intervient comme maître d’ouvrage de l’élaboration du schéma directeur de gestion sédimentaire du Rhône entre le lac Léman et la mer Méditerranée, en partenariat avec CNR, EDF et l’Agence de l’Eau qui participent financièrement au dossier et composent le Secrétariat Technique (SECTECH).

Le Comité de pilotage du dossier (COPIL) est composé des membres précédents, ainsi que de l’Office Français de la Biodiversité (OFB), de Voies Navigables de France (VNF), de la Métropole de Lyon, de la Région Auvergne-Rhône-Alpes (AURA), de la Région Provence-Alpes-Côte d’Azur (PACA), de la Région Occitanie, et de l’Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR).

Cette étude est réalisée par le groupement de bureaux d’études composé de BURGEAP, en tant que mandataire, GeoPeka, ACTeon, ARALEP, MOSAÏQUE Environnement et Deltares.

L’étude comporte 2 phases et les 9 missions d’étapes suivantes :

- **PHASE 1 – Etat des lieux :**
 - Mission 1 – Recueil des données et des études existantes sur le périmètre de l’étude ;
 - Mission 2 – Synthèse du fonctionnement hydrosédimentaire du fleuve Rhône ;
 - Mission 3 – Identification des enjeux liés à la gestion sédimentaire sur le fleuve en termes d’écologie, de sûreté/sécurité et d’usages socio-économiques ;
 - Mission 4 – Inventaire et retour d’expérience des modes de gestion et des actions de restauration ;
 - Mission 5 – Retour d'expérience sur les types de gestion mis en place sur d'autres grands cours d'eau internationaux ;
- **PHASE 2 – Elaboration du schéma de gestion sédimentaire et mise à jour :**
 - Mission 6 – Définition des scénarios et des actions-clés permettant d’atteindre les objectifs ;
 - Mission 7 – Analyse de la faisabilité des actions-clé et des scénarios par grands secteurs ;
 - Mission 8 – Eléments méthodologiques pour la déclinaison opérationnelle de la stratégie de gestion et de restauration ;
 - Mission 9 – Proposition d’une méthodologie de mise à jour du schéma directeur.

Le présent rapport constitue le rapport de la Mission 5.

Cette mission a été initiée en mai 2019, puis a été suspendue au profit des Missions 2, 3 et 4, avant d’être relancée entre septembre 2020 et juillet 2021.

L’objectif de cette Mission 5 est de dresser un panorama des pratiques de gestion sédimentaire sur des grands fleuves et grands cours d’eau internationaux. Le périmètre européen a été défini comme prioritaire ; toutefois, il n’était pas écarté d’inclure des cours d’eau hors Europe en fonction des opportunités de collecte d’information. Il s’agit, à travers des retours d’expériences représentatifs, de disposer d’un panel de solutions de gestion et de restauration de façon à alimenter la réflexion de Phase 2 pour la construction du schéma directeur.

Ce travail a été réalisé en deux étapes :

- Étape 1 : Étude bibliographique pour identifier et sélectionner des cours d’eau similaires au Rhône ;
- Étape 2 : Étude détaillée des pratiques de gestion sur le panel de cours d’eau sélectionnés.

SOMMAIRE

1.	Étape 1 : sélection de cours d’eau	4
1.1	Méthodologie	4
1.2	Méthode 1 : Pré-sélection sur la base de critères géographiques objectifs	5
1.2.1	Liste des critères de sélection	5
1.2.2	Caractérisation des critères.....	5
1.2.3	Pré-sélection sur les critères 1, 2 et 3	7
1.3	Méthode 2 : Sélection sur la base de critères qualitatifs	8
1.3.1	Liste des critères de sélection	8
1.3.2	Liste de cours d’eau pré-sélectionnés	8
1.3.3	Caractérisation des critères.....	8
1.3.4	Résultats de sélection de cours d’eau.....	11
1.4	Cours d’eau hors Europe.....	12
1.5	Proposition de sélection de cours d’eau pour l’Etape 2	13
1.6	Bibliographique pour l’Etape 1	13
2.	Étape 2 : retour d’expérience de cours d’eau internationaux	14
2.1	Le Rhin entre Bâle (Suisse-France) à l’aval de Karlsruhe (France-Allemagne) ..	14
2.1.1	Contexte géographique	14
2.1.2	Enjeux hydrosédimentaires et hydromorphologiques.....	15
2.1.3	Opérations de gestion et de restauration hydromorphologique	16
2.1.4	Bilan du retour d’expérience.....	19
2.1.5	Collecte bibliographique pour le Rhin.....	20
2.2	La Meuse de Maastricht (Belgique-Pays-Bas) à Nimègue (Pays-Bas).....	21
2.2.1	Contexte géographique	21
2.2.2	Enjeux hydrosédimentaires et hydromorphologiques.....	22
2.2.3	Opérations de gestion et de restauration hydromorphologique	24
2.2.4	Bilan du retour d’expérience.....	27
2.2.5	Collecte bibliographique pour la Meuse	28
2.3	Le Danube de Passau (Allemagne-Autriche) à Komárno (Slovaquie-Hongrie)	28
2.3.1	Contexte géographique	28
2.3.2	Enjeux hydrosédimentaires et hydromorphologiques.....	30
2.3.3	Opérations de gestion et de restauration hydromorphologique	34
2.3.4	Bilan du retour d’expérience.....	38
2.3.5	Collecte bibliographique pour le Danube.....	39
2.4	Cours d’eau complémentaires	40
2.4.1	Columbia river : de North Bonneville à l’Océan Pacifique (Lower Columbia River)-	40
2.4.2	Durance : en aval du barrage de Serre-Ponçon.....	44
2.4.3	Isar : entre le barrage de Sylvenstein et la traversée de Munich.....	49
2.4.4	Pô : entre la confluence avec la Trebbia et la confluence avec le Taro	56

3.	Synthèse	61
-----------	-----------------------	-----------

Pour citer ce document :

Laval F., Fantino G., Gilles G., Mosselman E. (2021). Etude préalable au schéma directeur de gestion sédimentaire du fleuve Rhône du lac Léman jusqu’à la mer Méditerranée. Phase 1 – Etat des lieux. Rapport de Mission 5 – Retour d’expérience sur les types de gestion mis en place sur d’autres grands cours d’eau internationaux. Groupement de bureaux d’études BURGEAP-GEOPEKA-ACTEON-ARALEP-MOSAÏQUE Environnement-DELTARES. Secrétariat technique : DREAL, CNR, EDF, Agence de l’Eau.

1. Étape 1 : sélection de cours d'eau

1.1 Méthodologie

Dans cette première étape, une recherche bibliographique a été réalisée afin d'identifier des fleuves et des rivières présentant des caractéristiques relativement similaires au Rhône et dont le retour d'expérience des mesures de gestion et de restauration puisse être bénéfique à la réflexion dans le cadre de l'élaboration du schéma directeur.

Le volet restauration a été ajouté à la démarche initiale du cahier des charges de la mission qui ne portait que sur les actions de gestion sédimentaire. Compte tenu de cette évolution, le nombre de cours d'eau devant être analysés en détail en Étape 2 sera réduit par rapport aux 5 cours d'eau prévus initialement.

L'échelle de travail retenue est l'échelle européenne, sans s'interdire toutefois d'intégrer des cours d'eau d'autres continents en fonction des données bibliographiques collectées.

Dans un premier temps, une liste de critères de sélection a été établie avec le SECTECH (réunion du 28/05/2019). Ces critères étaient :

- Taille du cours d'eau, relativement similaire à celle du Rhône ;
- Degré d'aménagement pour l'hydroélectricité et la navigation ;
- Diversité granulométrique du transport solide, allant des grossiers aux fines en passant par les sables.

Cependant, les premières recherches bibliographiques ont montré que certains de ces critères (degré d'aménagement pour l'hydroélectricité, diversité granulométrique) ne sont pas connus à grande échelle, à l'échelle des cours d'eau européens notamment. Ces critères-là ne pouvaient donc être exploités dans un premier travail de sélection.

Aussi, deux méthodes de travail successives ont été retenues :

- **Méthode 1 : une pré-sélection est réalisée sur la base de critères géographiques objectifs**, facilement accessibles pour tous les cours d'eau européens : taille du cours d'eau, bassin versant principal, voies navigables.
- **Méthode 2 : une pré-sélection est réalisée sur la base de critères qualitatifs** : densité d'ouvrages en travers, configuration de canaux en dérivation, morphologie des bancs d'alluvions, présence d'affluents à charge grossière, connaissance de mesures de restauration, accessibilité de l'information. Ces critères ne pouvant être décrits pour tous les cours d'eau européens, l'analyse est menée sur une pré-sélection issue de la Méthode 1 et sur des cours d'eau ajoutés de par la connaissance qui en existe.

Cette sélection en deux temps a permis d'émettre une proposition de cours d'eau à analyser en Étape 2.

1.2 Méthode 1 : Pré-sélection sur la base de critères géographiques objectifs

1.2.1 Liste des critères de sélection

La Méthode 1 est réalisée sur la base de critères géographiques objectifs, facilement accessibles pour tous les cours d'eau européens : taille du cours d'eau, bassin versant principal, voies navigables. Ces critères sont résumés dans le Tableau 1. Un coefficient a été appliqué à chacun de ces critères. Compte tenu de l'importance de la navigation sur le niveau d'anthropisation et les enjeux de gestion sédimentaire qui en découlent sur le Rhône, l'élément « voies navigables » est affecté d'un coefficient 2.

Tableau 1 : Méthode 1 – Critères utilisés pour la pré-sélection

Critère	Critère	Coefficient	Description
Critère 1	Taille du cours d'eau	1	Taille similaire du cours d'eau en termes de superficie de bassin versant, hydrologie, taille du lit, etc.
Critère 2	Bassin versant principal	1	Cours d'eau constituant un fleuve avec d'éventuels enjeux liés au littoral
Critère 3	Voies navigables	2	Cours d'eau aménagé et actif pour la navigation marchande

1.2.2 Caractérisation des critères

► Critère 1 : Taille du cours d'eau

Le Rhône présente une superficie de bassin versant de l'ordre de 98 000 km². Sa longueur depuis sa source est de 812 km (539 km en aval de Genève). Son débit moyen est de 1 700 m³/s à son exutoire dans le delta de Camargue (cf. Mission 2).

Pour la comparaison des différents cours d'eau européens, les sources suivantes ont été utilisées :

- https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_rivers_of_Europe : caractéristiques des cours d'eau européens (longueur, superficie de bassin versant, débit moyen, pays, etc.) ;
- http://www.europa-planet.com/carte_europe_relief.htm : noms français des cours d'eau.

Au vu des données disponibles, les données sur les superficies des bassins versants apparaissent comme étant les plus fiables. Celles des longueurs et des débits moyens sont peu précises et parfois ambiguës ; par exemple : la longueur du Rhône est basée selon l'axe de la plus grande longueur hydraulique, incluant la Saône et le Doubs.

Pour ce critère, les bassins versants d'une superficie comprise entre 50 000 et 200 000 km² [-50% ; +100%] ont été retenus. Les cours d'eau correspondant sont listés dans le Tableau 2.

Le critère 1 prend la valeur 1 pour ces cours d'eau.

On notera que les cours d'eau écartés pour une superficie de bassin versant supérieure à 200 000 km² sont la Volga (RUS / 1 432 506 km²), le Danube (RO, UK, MD, BG, SRB, HR, H, SK, A, D / 801 463 km²), le Dniepr (UA, BY, RUS / 509 824 km²), le Don (RUS / 437 308 km²), la Dvina (RUS / 357 052 km²), la Pechora (RUS / 322 000 km²), la Neva (RUS / 281 000 km²) et l'Ural (RUS, KZ / 210 581 km²). Ces cours d'eau sont donc principalement situés au sein de la Russie et de ses pays limitrophes. Le Danube est le seul bassin versant de plus de 200 000 km² dont le parcours traverse les pays de l'Union Européenne.

De ces données, on peut en déduire que le Rhône est le 15^{ème} fleuve d'Europe en termes de superficie de bassin versant, et le 6^{ème} au sein de l'Union Européenne. En termes de débit moyen, le rôle du château d'eau alpin apparaît clairement puisque si le Rhône (1 700 m³/s) est classé 7^{ème} parmi tous les cours d'eau européens, il se trouve classé en 3^{ème} position au sein de l'Union Européenne derrière le Danube (6 450 m³/s) et le Rhin (2 315 m³/s).

Tableau 2 : Méthode 1 – Critère 1 – Cours d'eau retenus d'après le critère « taille du cours d'eau »

Fleuve	Pays	Bassin versant (km²)	Longueur (km)	Débit moyen (m³/s)
Vistule (Vistula)	PL, CZ	192 632	1 047	1 080
Koura (Kur)	AZ, GE	188 378	1 364	448
Rhin (Rhine)	PB, D, CH, A, FL	185 263	1 233	2 315
Tisza	H, SRB	154 073	966	863
Elbe	D, CZ	148 268	1 094	860
Belaïa (Belaya)	RUS	141 609	1 430	858
Vytchegda (Vycheгда)	RUS	121 000	1 130	1 160
Pripyat (Prypiat)	UA, BY	119 911	761	460
Oder	D, PL, CZ	118 791	854	574
Loire	F	117 356	1 006	889
Aras	AM, AZ, TR, IR,	102 000	1 072	141
Donets	UA, RUS	98 720	1 053	159
Rhône	F	98 131	812	1 700
Douro	P, E	97 290	897	650
Save (Sava)	SLO, HR, BIH, SRB	94 613	945	1 609
Ooussa (Usa)	RUS	93 600	565	1 310
Niémen (Neman)	LT, RUS, BY	92 523	914	634
Desna	UA, RUS	88 490	1 130	360
Svir	RUS	88 200	678	790
Daugava	LV, RUS, BY	85 613	1 020	640
Èbre (Ebro)	E	84 763	910	577
Volkhov	RUS	80 200	844	580
Mezen	RUS	78 000	966	890
Seine	F	75 374	777	560
Boug (Bugonarew)	PL, BY, UA	74 714	810	328
Pô (Po)	I	73 746	652	1 460
Dniestr	RO, UA	73 158	1 362	313
Tage (Tagus)	P, E	70 756	1 007	500
Vuoksi	FIN, RUS	68 501	806	584
Soura (Sura)	RUS	67 240	867	260
Guadiana	P, E	67 027	852	79
Boug méridional (Southern Bug)	UA	63 569	806	160
Khoper ou Khopior (Khopyor)	RUS	61 052	1 011	150
Guadalquivir	E	57 053	722	164
Onega	RUS	56 900	416	492
Narva	EST, RUS	56 229	77	400
Garonne	F	55 846	575	650
Warthe (Warta)	PL	55 538	808	195
Maritza (Maritsa)	GR, TR, BG	53 475	515	383
Oufa (Ufa)	RUS	52 747	918	388
Kouban (Kuban)	RUS	52 399	906	430
Kemijoki	FIN	51 127	552	553
Mokcha (Moksha)	RUS	50 379	660	95
Sukhona	RUS	50 300	941	438
Göta (Göta älv)	N, S	50 229	756	554

A-Autriche ; AM-Arménie ; AZ-Azerbadjian ; BIH-Bosnie-Herzégovine ; BY-Biélorussie ; CH-Suisse ; CZ-Tchéquie ; D-Allemagne ; EST-Estonie ; F-France ; FIN-Finlande ; E-Espagne ; FL-Liechtenstein ; GE-Géorgie ; H-Hongrie ; HR-Croatie ; IR-Iran ; KZ-Kazakhstan ; LT-Lituanie ; LV-Lettonie ; MD-Moldavie ; N-Norvège ; P-Portugal ; PB-Pays-Bas ; RO-Roumanie ; RUS-Russie ; S-Suède ; SLO-Slovénie ; SRB-Serbie, SK-Slovaquie ; TR-Turquie ; UA-Ukraine

► Critère 2 : Bassin versant principal

Ce critère correspond au fait que le cours d'eau analysé soit un fleuve au sens géographique du terme avec un exutoire en mer. Cela permettrait de prendre en compte des problématiques spécifiques aux exutoires en mer comme la géomorphologie propre à l'exutoire (delta, estuaire, etc.), la continuité sédimentaire et les enjeux d'érosion du littoral, l'interface écologique mer/fleuve, etc. Cependant, il ne faudrait pas que ce critère écarte des cours d'eau secondaires (affluents d'un grand fleuve) qui présenteraient d'autres caractéristiques intéressantes.

Ce critère est donc retenu tout en veillant à ne pas éliminer des cours d'eau intéressants qui ne seraient pas des fleuves.

Les cours d'eau répondant à ce critère sont : Rhône, Garonne, Loire, Seine, Rhin (Rhein), Meuse (Maas), Ems, Weser, Elbe, Pô (Po), Tibre (Tiber), Èbre (Ebro), Douro, Tage (Tejo), Guadiana, Guadalquivir, Ouse, Trent, Severn, Tamise (Thames), Glåma, Göta (Göta älv), Dal (Dal älv), Ljusnan, Ljungan, Indals (Indals älv), Ångerman (Ångerman älv), Vindel (Vindel älv), Skellefte (Skellefte älv), Lule (Lule älv), Pite (Pite älv), Torne (Torne älv), Kalix (Kalix älv), Kemijoki, Petchora (Petschora), Dvina (Dvina), Volga (Volga), Néva (Néva), Narva, Daugava (Daugava), Niémen (Nemunas, Memel), Vistule (Wisla, Weichsel), Oder, Don, Dniepr (Dnipro), Boug (Bug), Dniestr (Dniestr), Danube (Danube), Maritza (Maritza), Vardar.

Le critère 2 prend la valeur 1 pour ces cours d'eau.



Figure 1 : Méthode 1 – Critères 1 et 2 – bassins versants principaux des fleuves en Europe

Source : https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_rivers_of_Europe ; <http://www.danube-culture.org>

► Critère 3 : Voies navigables

Ce critère porte sur l'usage du cours d'eau comme voie navigable. Compte tenu des usages de navigation observés sur le Rhône, les cours d'eau répondent à ce critère s'ils sont utilisés pour la navigation marchande, et pas uniquement pour la navigation de plaisance.

Deux sources de données cartographiques ont été utilisées, et donnent lieu aux cartographies de la Figure 2 et de la Figure 3 :

- Données de l'UNECE (Commission économique pour l'Europe des Nations unies) : http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/sc3/AGN_map_2018.pdf ;
- Données de la Cour des Comptes Européenne (ECA : European Court of auditors) : <https://www.eca.europa.eu/fr/Pages/DocItem.aspx?did=31393>.

D'après les données UNECE, les cours d'eau répondant à ce critère sont : Rhin (Rhein), Meuse (Maas), Escaut (Schelde), Tay, Clyde, Forth, Trent, Tamise (Thames), Guadalquivir, Garonne, Seine, Loire, Rhône, Moselle (Mosel), Sarre (Saar), Main, Neckar, Weser, Elbe, Dvina septentrionale (Severnaja Dvina), Svir, Volga, Kama, Don, Dniepr (Dnepr), Daugava, Niémen (Nemunas), Vistule (Wisla), Oder, Boug (Bug), Pripyat (Prypjats'), Danube (Donau), Tisza (Tisa), Save (Sava), Pô (Po).

D'après les données ECA, les cours d'eau répondant à ce critère sont : Rhin (Rhein), Meuse (Maas), Escaut (Schelde), Guadalquivir, Seine, Moselle (Mosel), Sarre (Saar), Rhône, Main, Neckar, Weser, Elbe, Oder, Danube (Donau), Tisza (Tisa), Save (Sava), Pô (Po).

Les données ECA peuvent être privilégiées car les cours d'eau listés sont situés dans l'Union Européenne, et présentent une activité fluviale dynamique, ce qui exclut la Vistule (faible activité) ou des cours d'eau de plus faible taille avec une activité fluviale limitée à l'exutoire (Garonne, Loire, Tamise et autres cours d'eau anglais).

Le critère 3 prend la valeur 1 pour ces derniers cours d'eau.

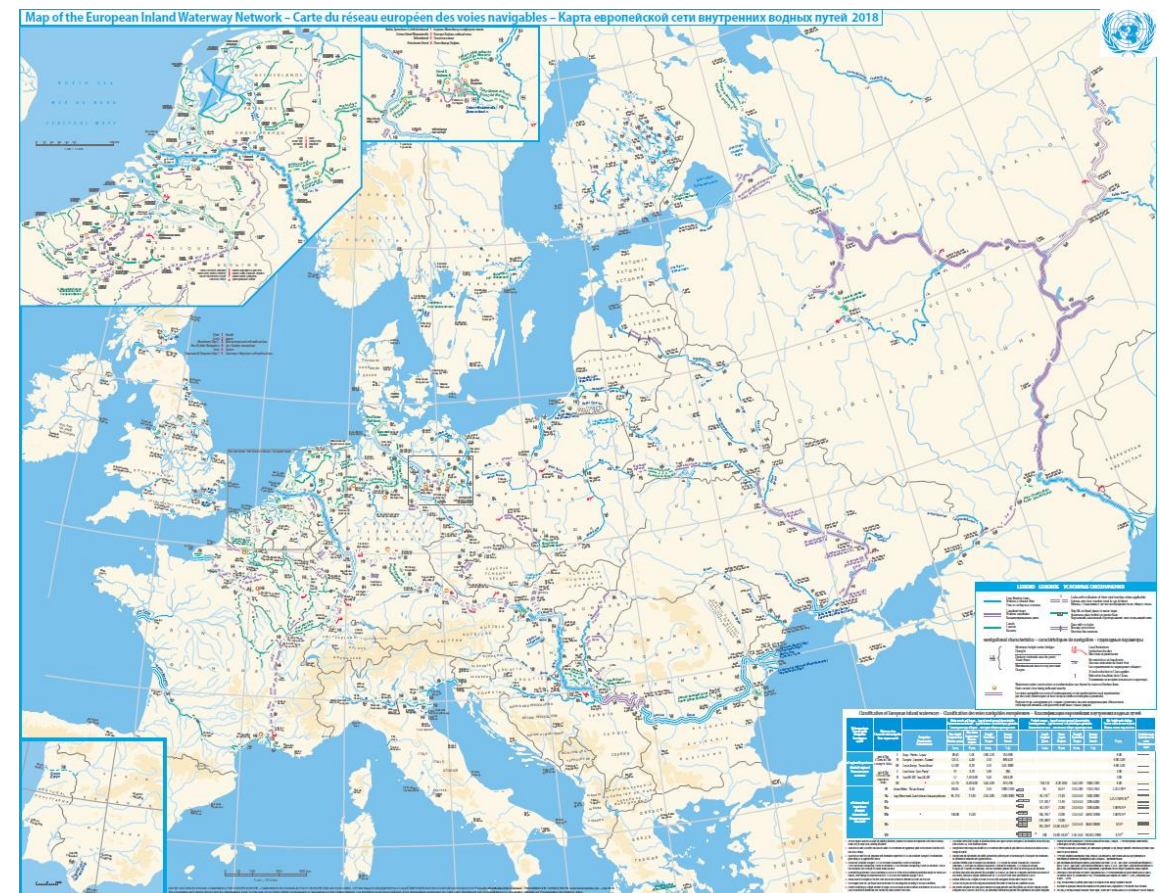


Figure 2 : Méthode 1 – Critère 3 – navigabilité des cours d'eau en Europe (donnée UNECE)

Source : http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/sc3/AGN_map_2018.pdf

Tableau 3 : Méthode 1 – Pré-sélection à partir des critères 1, 2 et 3

OUTIL DE SÉLECTION DE FLEUVES EUROPÉENS POUR RETOUR D'EXPÉRIENCE INTERNATIONALE
METHODE 1 - Pré-sélection

Coefficients de pondération :

Critère 1:	1	Taille du fleuve
Critère 2:	1	Bassin versant principal
Critère 3:	2	Principales voies navigables

Seuil de sélection

Seuil >=	3
	4

Évaluation de base :

Fleuve	Critère 1 : Taille	Critère 2 : Bassin versant principal	Critère 3 : Voie navigable UNECE	Critère 3 : Voie navigable ECA
Angerman		1		
Aras	1			
Belaia	1			
Boug	1	1		
Boug méridional	1			
Dal		1		
Danube		1	1	1
Daugava	1	1	1	
Desna	1			
Dniepr		1	1	
Dniestr	1	1		
Don		1	1	
Donets	1			
Douro	1	1	1	1
Dvina		1	1	
Èbre	1	1		
Elbe	1	1	1	1
Ems		1		
Escaut			1	1
Forth			1	
Garonne	1	1		
Gläma		1		
Göta	1	1	1	1
Guadalquivir	1	1	1	1
Guadiana	1	1		
Indals		1		
Inn			1	
Kalix		1		
Kama			1	
Kemijoki	1	1		
Khoper	1			
Kouban	1			
Koura	1			
Ljungan		1		
Ljusnan		1		
Loire	1	1		
Lule		1		
Main			1	1
Maritza	1	1		
Meuse		1	1	1
Mezen	1			
Mokcha	1			
Moselle			1	1
Narva	1	1		
Neckar			1	1
Néva		1		
Niemen	1	1	1	
Oder	1	1	1	1
Onega	1			
Oufa	1			
Ouse		1		
Oussa	1			
Petchora		1		
Pite		1		
Pô	1	1	1	1
Pripyat	1		1	
Rhin	1	1	1	1
Rhône	1	1	1	1
Sarre			1	1
Save	1		1	1
Seine	1	1	1	1
Severn		1		
Skellefte		1		
Soura	1			
Sukhona	1			
Svir	1		1	
Tage	1	1		
Tamise		1	1	
Tay			1	
Tibre		1		
Tisza	1		1	1
Torne		1		
Trent		1	1	
Vah			1	1
Vardar		1		
Vindel		1		
Vistule	1	1	1	
Volga		1	1	
Volkhov	1			
Vuoksi	1			
Vytchegda	1			
Warthe	1			
Weser		1	1	1

Évaluation pondérée :

Fleuve	Critère 1 : Taille	Critère 2 : Bassin versant principal	Critère 3 : Voie navigable ECA	Total	Dépassement du seuil
Angerman	0	1	0	1	0
Aras	1	0	0	1	0
Belaia	1	0	0	1	0
Boug	1	1	0	2	0
Boug méridional	1	0	0	1	0
Dal	0	1	0	1	0
Danube	0	1	2	3	Danube
Daugava	1	1	0	2	0
Desna	1	0	0	1	0
Dniepr	0	1	0	1	0
Dniestr	1	1	0	2	0
Don	0	1	0	1	0
Donets	1	0	0	1	0
Douro	1	1	2	4	Douro
Dvina	0	1	0	1	0
Èbre	1	1	0	2	0
Elbe	1	1	2	4	Elbe
Ems	0	1	0	1	0
Escaut	0	0	2	2	0
Forth	0	0	0	0	0
Garonne	1	1	0	2	0
Gläma	0	1	0	1	0
Göta	1	1	2	4	Göta
Guadalquivir	1	1	2	4	Guadalquivir
Guadiana	1	1	0	2	0
Indals	0	1	0	1	0
Inn	0	0	0	0	0
Kalix	0	1	0	1	0
Kama	0	0	0	0	0
Kemijoki	1	1	0	2	0
Khoper	1	0	0	1	0
Kouban	1	0	0	1	0
Koura	1	0	0	1	0
Ljungan	0	1	0	1	0
Ljusnan	0	1	0	1	0
Loire	1	1	0	2	0
Lule	0	1	0	1	0
Main	0	0	2	2	0
Maritza	1	1	0	2	0
Meuse	0	1	2	3	Meuse
Mezen	1	0	0	1	0
Mokcha	1	0	0	1	0
Moselle	0	0	2	2	0
Narva	1	1	0	2	0
Neckar	0	0	2	2	0
Néva	0	1	0	1	0
Niemen	1	1	0	2	0
Oder	1	1	2	4	Oder
Onega	1	0	0	1	0
Oufa	1	0	0	1	0
Ouse	0	1	0	1	0
Oussa	1	0	0	1	0
Petchora	0	1	0	1	0
Pite	0	1	0	1	0
Pô	1	1	2	4	Pô
Pripyat	1	0	0	1	0
Rhin	1	1	2	4	Rhin
Rhône	1	1	2	4	Rhône
Sarre	0	0	2	2	0
Save	1	0	2	3	Save
Seine	1	1	2	4	Seine
Severn	0	1	0	1	0
Skellefte	0	1	0	1	0
Soura	1	0	0	1	0
Sukhona	1	0	0	1	0
Svir	1	0	0	1	0
Tage	1	1	0	2	0
Tamise	0	1	0	1	0
Tay	0	0	0	0	0
Tibre	0	1	0	1	0
Tisza	1	0	2	3	Tisza
Torne	0	1	0	1	0
Trent	0	1	0	1	0
Vah	0	0	2	2	0
Vardar	0	1	0	1	0
Vindel	0	1	0	1	0
Vistule	1	1	0	2	0
Volga	0	1	0	1	0
Volkhov	1	0	0	1	0
Vuoksi	1	0	0	1	0
Vytchegda	1	0	0	1	0
Warthe	1	0	0	1	0
Weser	0	1	2	3	Weser

Figure 3 : Méthode 1 – Critère 3 – navigabilité des cours d'eau en Europe (donnée ECA) et pré-sélection sur les critères 1 à 3

Source : <https://www.eca.europa.eu/fr/Pages/DocItem.aspx?did=31393>

1.2.3 Pré-sélection sur les critères 1, 2 et 3

Le bilan de l'analyse sur les critères 1, 2 et 3 permet de faire émerger une sélection de 8 à 13 cours d'eau selon le seuil de notation retenu (cf. Tableau 3 ; Figure 3) :

- Avec une notation égale à 4, on obtient 8 cours d'eau en plus du Rhône : Douro, Elbe, Göta, Guadalquivir, Oder, Pô, Rhin, Seine ;
- Avec une notation supérieure ou égale à 3, on obtient 13 cours d'eau : les 8 cours d'eau précédents, auxquels sont ajoutés le Danube (taille de bassin versant supérieure à 200 000 km²), la Meuse (taille inférieure à 50 000 km²), la Save (affluent du Danube), la Tisza (affluent du Danube) et la Weser (taille inférieure à 50 000 km²).

On notera que certains cours d'eau sont conformes pour le critère « navigation » (2 points), mais n'obtiennent pas de points sur le Critère 1 « taille » (superficie inférieure à 50 000 km²) ni sur le Critère 2 « bassin versant principal » : Escaut, Main, Moselle, Neckar, Sarre, Vah.

1.3 Méthode 2 : Sélection sur la base de critères qualitatifs

1.3.1 Liste des critères de sélection

La **Méthode 2** est réalisée sur la base des critères qualitatifs suivants : densité d'ouvrages en travers, configuration avec canaux en dérivation, morphologie des bancs d'alluvions, présence d'affluents à charge grossière, connaissance de mesures de restauration, accessibilité de l'information. Par ailleurs, le critère 3 « voies navigables » de la Méthode 1 est repris.

Ces critères sont résumés dans le Tableau 4. Par souci de simplification, un coefficient 1 a été appliqué à chacun de ces critères.

Tableau 4 : Méthode 2 – Critères de sélection

Critère	Définition	Méthode de caractérisation
Critère 3	Voies navigables	Cours d'eau aménagé et actif pour la navigation marchande
Critère 4	Densité d'ouvrages en travers	Analyse de la densité d'ouvrages en travers à partir du coefficient CSI (connectivity status index) d'après la publication de Grill et al. (2019). Vérification de l'état des cours d'eau concernés sur Google Maps.
Critère 5	Configuration avec canaux en dérivation	Analyse de la configuration des cours d'eau sous Google Maps.
Critère 6	Morphologie des bancs d'alluvions	Analyse de la présence de macroformes alluviales structurantes dans le lit du cours d'eau et de leur état de surface (graviers, sables, végétation)
Critère 7	Présence d'affluents à charge grossière	Analyse de la présence d'affluents à charge grossière pouvant influencer sur le fonctionnement sédimentaire et la gestion du cours d'eau principal
Critère 8	Connaissance de mesures de restauration	Connaissance de mesures de restauration qui auraient été réalisées dans les années passées et pour lesquels des retours d'expérience existaient (d'après https://restorerivers.eu et d'après des informations glanées par le groupement de bureaux d'études)
Critère 9	Accessibilité de l'information	Connaissance de l'accessibilité de l'information d'après des informations glanées par le groupement de bureaux d'études

1.3.2 Liste de cours d'eau pré-sélectionnés

Les critères de caractérisation étant qualitatifs et nécessitant une analyse détaillée (notamment sous Google Earth), il est nécessaire de restreindre les cours d'eau concernés.

Ainsi, la Méthode 2 est menée sur une pré-sélection de cours d'eau, en utilisant les résultats de la Méthode 1 :

- Des cours d'eau pré-sélectionnés avec la Méthode 1 : Douro, Elbe, Göta, Guadalquivir, Oder, Pô, Rhin, Seine, Danube, Meuse, Save, Tisza, Weser ;
- Des cours d'eau navigables de la Méthode 1 qui ne sont pas conformes au Rhône pour le Critère 1 « taille » et pour le Critère 2 « bassin versant principal » : Escaut (France-Belgique), Main, Neckar, (Allemagne), Moselle, Sarre (France-Allemagne), Vah (Slovaquie). Ceci permet de ne pas s'interdire d'étudier des cours d'eau de plus petite taille ;
- Une liste de cours d'eau qui ne sont pas navigables mais qui sont connus pour des mesures de gestion ou de restauration représentatives. Cette liste pourrait être étendue si d'autres cours d'eau répondaient à ces caractéristiques :
 - l'Ebre (Espagne), la Loire, la Durance (France) ;
 - certaines affluents du Danube comme Isar, Inn, Salzbach (Autriche, Allemagne), Mur, Drave (Autriche, Slovénie, Croatie).

Ces cours d'eau peuvent apporter un retour d'expérience pour les actions de restauration de Vieux Rhône, notamment dans des secteurs à charriage avéré comme le canal de Miribel.

1.3.3 Caractérisation des critères

▶ Critère 3 : Voies navigables

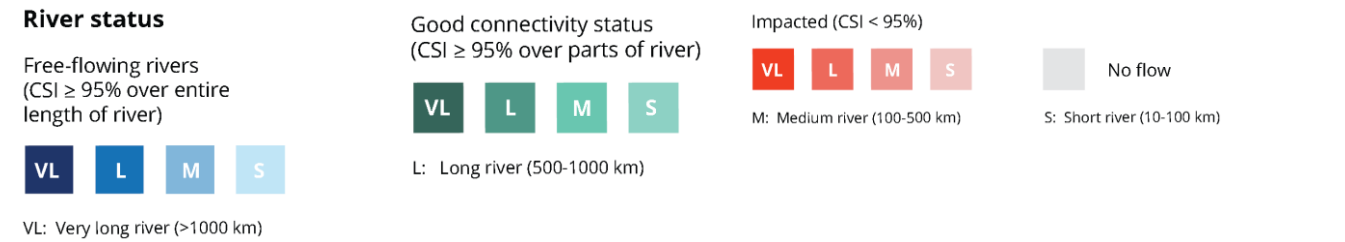
Cf. §.1.2.2.

▶ Critère 4 : Densité d'ouvrages en travers

La caractérisation du critère est obtenue à partir du coefficient CSI (connectivity status index) d'après la publication de Grill et al. (2019). Compte tenu d'incertitudes découlant de ces données (le Rhin apparaît comme un cours d'eau avec peu d'ouvrages), une vérification de l'état des cours d'eau concernés a été réalisée sur Google Maps.



Figure 4 : Méthode 2 – Critère 4 – carte de l'indice de connectivité (CSI) des cours d'eau européens (extrait de Grill et al., 2019)



► Critère 5: Configuration de canaux en dérivation

Les photographies ci-dessous illustrent les exemples relevés sur Google Earth pour la configuration avec canaux de dérivation, qui peut comprendre 3 types :

- Canal de navigation uniquement (exemple : Meuse) ;
- Canal hydroélectrique uniquement (exemple : Isar) ;
- Canal mixte navigation et hydroélectricité (exemples : Rhin, Danube).



Figure 5 : Méthode 2 – Critère 5 – exemple de configurations avec canal de dérivation (Meuse / en haut à gauche ; Isar / en haut à droite ; Rhin / en bas à gauche ; Danube / en bas à droite ; Google Earth)

► Critère 6 : Morphologie des bancs d'alluvions

Les photographies ci-dessous illustrent des exemples relevés sur Google Earth pour la morphologie des bancs d'alluvions.



Figure 6 : Méthode 2 – Critère 6 – exemple de charge sédimentaire (Meuse / à gauche ; Elbe / à droite ; Google Earth)

► Critère 7 : Présence d'affluents à charge grossière

Les photographies ci-dessous illustrent des exemples relevés sur Google Earth pour la présence d'affluents à charge grossière.

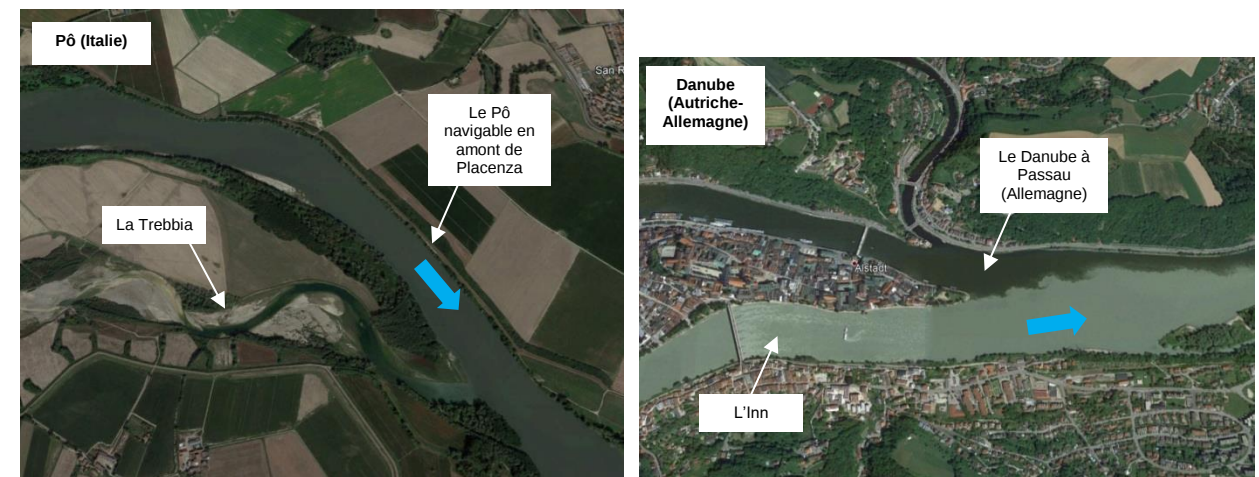


Figure 7 : Méthode 2 – Critère 7 – exemple d'affluent à charge grossière (Trebbia et Pô / à gauche ; Inn et Danube / à droite ; Google Earth)

► Critère 8 : Connaissance de mesures de restauration

A l'échelle européenne, les actions de restauration peuvent être connues par le site <https://restorerivers.eu> qui est le site le plus complet à ce jour ; cependant, ce site possède une information qui n'est pas exhaustive et inégale selon les pays. L'information a pu être complétée par des actions portées à la connaissance du groupement de bureaux d'études.

Tableau 5 : Méthode 2 – Critère 8 – Liste non exhaustive de grands cours d'eau avec actions de restauration

Cours d'eau	Pays	Secteur	Types d'actions réalisées
Rhin	France-Allemagne	Entre Bâle et Karlsruhe	réinjection de sédiments dans le Vieux Rhin (Kembs), réinjection de sédiments en aval d'Iffezheim avec transport depuis l'amont par barges, restauration d'annexes fluviales, etc.
Danube	Allemagne, Autriche, Slovaquie	Entre Passau et l'aval de Bratislava	restauration d'annexes, réinjections de sédiments, etc.
Elbe	Allemagne	Entre Torgau et Neu Darchau	réinjections sédimentaires, reconfiguration d'épis, etc.
Meuse	Belgique, Pays-Bas	Entre Maastricht et Nimègue	restauration d'un espace rivière (enlèvement de protections de berge, abaissement des berges), restauration d'annexes alluviales
Ebre	Espagne	Entre la confluence de l'Aragon et Alagon	restauration d'un espace rivière (digues), réinjection de sédiments
Isar	Allemagne	Traversée de Munich	Désendiguement, élargissement du lit actif, restauration de la continuité sédimentaire aux barrages, réinjection sédimentaire
Inn, Salzbach, Drave, Mur	Autriche, Allemagne, Slovénie, Croatie	Divers secteurs	réinjection de sédiments, restauration d'un espace rivière, etc
Durance	France	En aval du barrage de Serre-Ponçon	restauration d'un espace rivière (épis), lâchers de décolmatage, etc.
Loire	France	Entre les Ponts de Cé et Nantes	restauration d'un espace rivière (épis), reconnexion d'annexes,

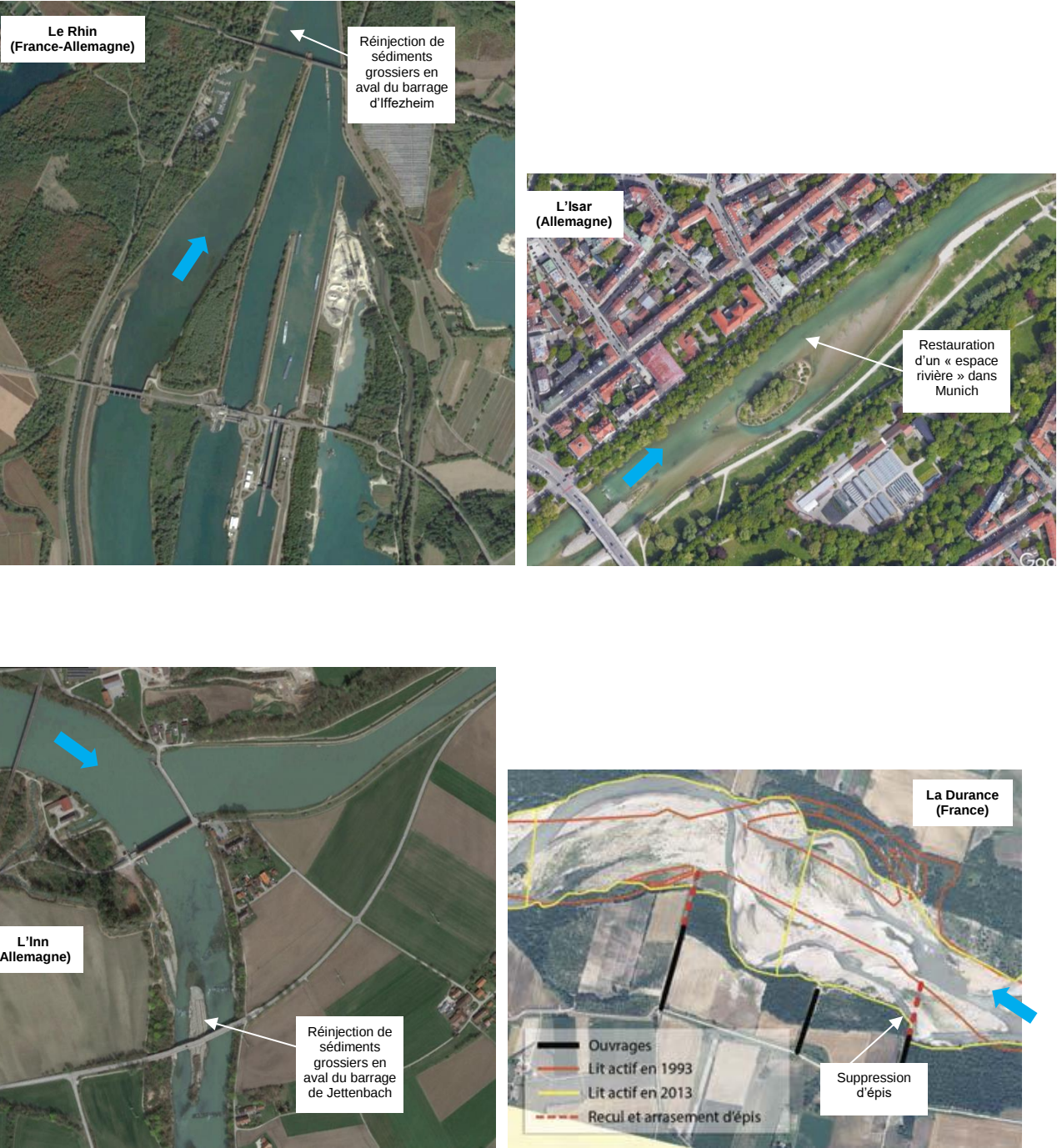


Figure 8 : Méthode 2 – Critère 8 – exemple de mesures de restauration (Rhin / en haut à gauche ; Isar / en haut à droite ; Inn / en bas à gauche ; Durance / en bas à droite / SMAVD ; Google Earth)

Critère 9 : Accessibilité de l'information

Une liste d'organismes et de contacts a été établie d'après les contacts établis par les auteurs de la présente étude. Cette liste ne peut être exhaustive et devra être complétée pour les cours d'eau retenus.

Tableau 6 : Méthode 2 – Critère 9 – Accessibilité de l'information

Pays	Experts et groupes d'expertise	Fleuves principaux
Allemagne	Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Roy Frings (Rhin, Rijkswaterstaat) Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Projets Interreg sur le Danube	Rhin, Main, Neckar, Moselle, Sarre, Ems, Weser, Elbe, Oder, Danube
Autriche (+ autres pays du Danube)	BOKU (Helmut Habersack)	Danube, Inn, Salzach, Drave, Mur
Belgique	Waterloopkundig Laboratorium Borgerhout Jean Berlamont (Escaut) Benjamin Dewals (Meuse)	Meuse, Escaut
Espagne	Juan Pedro Martín Vide pour la meilleure vue d'ensemble ; autres experts : Ramon Batalla, Damià Vericat	Èbre, Tage, Guadiana, Douro (Duero), Guadalquivir
France	Observatoire des Sédiments du Rhône Plan Rhin Vivant Universités, INRAE Electricité de France (EDF) Compagnie Nationale du Rhône (CNR) Voies Navigables de France (VNF) Structures de bassin versant (SMAVD Durance, etc.) Bureaux d'études	Rhône, Loire, Rhin, Garonne, Seine, Durance
Italie	Autorità di Bacino del fiume Po Agenzia Interregionale per il fiume Po Universités et autorités de bassin pour fleuves régionaux (Tagliamento, Adige, Arno, etc.)	Pô, Tagliamento, Adige, Arno
Pays-Bas	Rijkswaterstaat Erik Mosselman (Rhin) Hermjan Barneveld (Meuse)	Rhin, Meuse
Pologne	Réseau d'universités via International School of Hydraulics	Vistule
Russie	Andrei Alabyan (autres experts à définir pour d'autres fleuves russes)	Volga
Slovaquie	Katarína Holubová	Danube
Suisse	École Polytechnique Fédérale de Lausanne (troisième correction du Rhône) École Polytechnique Fédérale de Zurich (ETH, études sur transport solide) Internationale Rheinregulierung (projet Rhesi)	Rhône Rhin

1.3.4 Résultats de sélection de cours d'eau

Le bilan de l'analyse sur les critères 3 à 9 permet de faire émerger une sélection de 1 à 14 cours d'eau selon le seuil de notation retenu :

- Avec une notation supérieure ou égale à 7**, on obtient 1 seul cours d'eau en plus du Rhône qui cumule l'ensemble des critères : il s'agit du Danube, notamment dans le linéaire situé entre la confluence avec l'Inn (Passau) et le Danube court-circuité en aval de Bratislava ;
- Avec une notation supérieure ou égale à 6**, on obtient 5 cours d'eau supplémentaires : la Durance, l'Isar, la Meuse, le Pô, le Rhin.

Parmi ces cours d'eau, l'Isar et la Durance ne sont pas navigables ; la Meuse et le Rhin sont intéressants dans certains secteurs particuliers (Meuse entre Maastricht et Nimègue ; Rhin entre Bâle et l'aval de Karlsruhe) mais ne possèdent pas d'affluents à charge grossière ; le Pô possède une configuration en dérivation entre Piacenza (Plaisance) et Cremona (Crémone), mais n'est pas connu pour des mesures de restauration innovantes ;

- Avec une notation supérieure ou égale 5**, on obtient 7 cours d'eau supplémentaires :
 - le Douro, qui ne possède pas de canaux de dérivation et n'est pas connu pour avoir mis en œuvre des actions de gestion particulières ;
 - la Drave, l'Inn, la Salzbach et le Mur sont des cours d'eau connus pour des actions de restauration ;
 - l'Ebre n'est pas navigable et ne présente pas de canaux de dérivation ;
 - la Vah correspondrait bien à la configuration du Rhône mais l'existence de mesures de restauration n'est pas connue, ni les accès aux informations.

Tableau 7 : Méthode 2 – Sélection à partir des critères 3 à 9

OUTIL DE SÉLECTION DE FLEUVES EUROPÉENS POUR RETOUR D'EXPÉRIENCE INTERNATIONALE

METHODE 2 - Sélection

Coefficients de pondération :

Critère x : pour tous les critères

Seuil de sélection

Seuil >=

5
6
7

évaluation de base :

presence de formes alluviales mobiles
confluence

Fleuve	Critère 3 : Voie navigable ECA	Critère 4 : Densité d'ouvrages en travers	Critère 5 : Configuration avec canaux en dérivation	Critère 6 : Morphologie des bancs d'alluvions	Critère 7 : Présence affluents à charge grossière	Critère 8 : Connaissance de mesures de restauration	Critère 9 : Accessibilité de l'information	Total	Dépassement du seuil
Danube	1	1	1	1	1	1	1	7	Danube
Douro	1	1		1	1		1	5	Douro
Drave		1		1	1	1	1	5	Drave
Durance		1	1	1	1	1	1	6	Durance
Ebre		1		1	1	1	1	5	Ebre
Elbe	1			1		1	1	4	0
Escaut	1						1	2	0
Göta	1	1						2	0
Guadalquivir	1			1			1	3	0
Inn		1		1	1	1	1	5	Inn
Isar		1	1	1	1	1	1	6	Isar
Loire				1		1	1	3	0
Main	1	1					1	3	0
Meuse	1	1	1	1		1	1	6	Meuse
Moselle	1	1			1		1	4	0
Mur		1		1	1	1	1	5	Mur
Neckar	1	1			1		1	4	0
Oder			1				1	2	0
Pô	1	1	1	1	1		1	6	Pô
Rhin	1	1	1	1		1	1	6	Rhin
Rhône	1	1	1	1	1	1	1	7	Rhône
Salzbach		1		1	1	1	1	5	Salzbach
Sarre	1	1					1	3	0
Save				1	1			2	0
Seine	1	1					1	3	0
Tisza								0	0
Vah	1	1	1	1	1			5	Vah
Weser	1	1	1				1	4	0

1.4 Cours d’eau hors Europe

Plusieurs cours d’eau non européens ont été mentionnés comme pouvant être potentiellement intéressants :

- La Columbia (Oregon / Washington, USA ; Canada) :**
 - Il s’agit d’un fleuve de 2 000 km de longueur, de 670 000 km² de bassin versant, aménagé pour la navigation et la production hydroélectrique (barrages au fil de l’eau, retenues), mais également l’irrigation et le contrôle des inondations. Les affluents apportent une charge grossière qui se stockent dans les retenues ; le transit sédimentaire résiduel alimente un large estuaire à formes deltaïques. La tête de bassin versant est aménagée avec de grands barrages et de grands réservoirs (barrages de Grand Coulee et de Chef Joseph). Le cours d’eau est marqué par des enjeux de pollution et de continuité biologique (salmonidés) (Wikipedia).
 - Ce fleuve ne présente pas de canaux en dérivation. Les actions de restauration semblent essentiellement portées vers la continuité biologique et la restauration d’annexes dans l’estuaire, sous l’influence des marées. Toutefois, la réutilisation de matériaux sableux et graveleux dragués dans les projets de restauration semble intéressante (Columbia Estuary Ecosystem Restoration Program).
- Le Sacramento (Californie, USA) :**
 - Il s’agit d’un fleuve de 719 km de longueur, de 71 000 km² de bassin versant, qui se jette dans la baie de San Francisco avec le fleuve San Joaquin ; il a été aménagé pour la production hydroélectrique en tête de bassin versant (barrages-réservoirs de Shasta et Keswick), pour l’écoulement des crues (extractions, chenalisation), ainsi que pour l’irrigation ;
 - Les enjeux sédimentaires sont importants (privation des apports amont). Toutefois, il n’existe pas de barrage dans le linéaire de plaine (environ 300 km), ni de dérivation hydroélectrique, ni de navigation marchande. Des actions de restauration sont menées sur l’ensemble des fonctionnalités (charge sédimentaire, zones humides, zones inondables, etc.). Le cours d’eau est relativement similaire à la rivière d’Ain, affluent du Rhone, dont le fonctionnement hydrosédimentaire est perturbé par les retenues hydroélectriques amont.
- Le Tennessee (Tennessee, USA) :**
 - Il s’agit d’un affluent de l’Ohio, lui-même affluent du Mississippi, d’une longueur de 1 000 km environ ;
 - Ce cours d’eau a été pré-identifié car il aurait inspiré l’aménagement du Rhône par la CNR. En réalité, il a essentiellement servi d’exemple pour le montage de la concession du Rhône. D’un point de vue technique, le Tennessee est ouvert à la navigation, et présente une succession de barrages-réservoirs avec en apparence aucune forme alluviale liée à du charriage. La bibliographie mentionne la sédimentation accrue dans les rivières du fait des retenues et de l’érosion dans les bassins versants agricoles, sans qu’il ne soit mentionné d’opération particulière de restauration.

Les cours d’eau précédents peuvent être analysés selon les critères de la Méthode 2. Il ressort que seule la Columbia River se rapproche des caractéristiques et des enjeux du Rhône.

Tableau 8 : Méthode 2 – Sélection hors Europe sur 3 cours d’eau pré-identifiés

OUTIL DE SÉLECTION DE FLEUVES EUROPÉENS POUR RETOUR D'EXPÉRIENCE INTERNATIONALE
 METHODE 2 - Hors Europe

Coefficients de pondération :

Critère x : 1 pour tous les critères

Seuil de sélection

Seuil >=	5
	6
	7

Évaluation de base :

presence de formes alluviales mobiles
 confluence

Fleuve	Critère 3 : Voie navigable	Critère 4 : Densité d'ouvrages en travers	Critère 5 : Configuration avec canaux en dérivation	Critère 6 : Morphologie des bancs d'alluvions	Critère 7 : Présence affluents à charge grossière	Critère 8 : Connaissance de mesures de restauration	Critère 9 : Accessibilité de l'information	Total	Dépassement du seuil
Columbia	1	1		1	1	1	1	6	Columbia
Sacramento				1	1	1	1	4	0
Tennessee	1	1					1	3	0



Figure 9 : Méthode 2 – Hors Europe – Columbia River à North Bonneville / en haut ; Sacramento River entre Hamilton City et Glenn / au milieu ; Tennessee River entre Chattanooga et Kimball / en bas; Google Earth)

1.5 Proposition de sélection de cours d’eau pour l’Etape 2

Compte tenu des éléments précédents, il est proposé de retenir les cours d'eau suivants. Les cours d'eau prioritaires (Danube, Meuse, Rhin) sont étudiés dans une analyse détaillée. Les cours d'eau complémentaires feront l'objet d'une analyse plus sommaire dépendante des données collectées.

Tableau 9 : Méthode 2 – Proposition de sélection de cours d'eau à retenir

Cours d'eau prioritaires	Pays	Secteur	Principaux intérêts
Rhin	Allemagne, France	Entre Bâle et l'aval de Karlsruhe	Gestion des secteurs en sédimentation par dragages Réinjection sédimentaire ponctuelle dans le Vieux Rhin de Kembs. Réinjection sédimentaire régulière en aval du barrage d'Iffezheim Restauration du Vieux Rhin
Meuse	Belgique, Pays-Bas	Entre Maastricht et Nimègue	Gestion des secteurs en sédimentation par dragages Gestion de la charge sédimentaire dans des tronçons de Meuse compartimentés par des barrages Restauration ambitieuse de l'espace rivière de la Meuse
Danube	Autriche, Hongrie, Slovaquie	Entre la confluence avec l'Inn à Passau et la portion court-circuitée en aval de Bratislava (Komárno)	Confluence avec l'Inn (charge importante de 5 Mt/an). Chasses sur les barrages situés en aval Gestion de la charge grossière dans la traversée navigable de Vienne Gestion des déficits sédimentaires en aval de Vienne et en aval de Bratislava Restauration d'annexes et du Vieux Danube
Cours d'eau complémentaires		Secteur	Intérêts
Columbia	Etats-Unis	De North Bonneville à l'Océan Pacifique	Restauration de milieux naturels à partir de matériaux dragués dans l'estuaire
Durance	France	En aval du barrage de Serre-Ponçon	Affluents à charge grossière. Lâchers de décolmatage. Restauration de l'espace rivière
Isar	Allemagne	Entre le barrage de Sylvenstein et la traversée de Munich	Gestion des flux grossiers, notamment dans la traversée urbaine. Mise en transparence des barrages situés en aval. Restauration de l'Isar dans la traversée de Munich (zone urbaine, usages de loisirs)
Pô	Italie	Entre la confluence avec la Trebbia (amont Piacenza) et la confluence avec le Taro (aval Cremona)	Confluence avec la Trebbia (charge grossière importante). Mise en transparence sur le barrage situé en aval

1.6 Bibliographique pour l’Etape 1

Grill, G., B. Lehner, M. Thieme, B. Geenen, D. Tickner, F. Antonelli, S. Babu, P. Borrelli, L. Cheng, H. Crochetiere, H. Ehalt Macedo, R. Filgueiras, M. Goichot, J. Higgins, Z. Hogan, B. Lip, M.E. McClain, J. Meng, M. Mulligan, C. Nilsson, J.D. Olden, J.J. Opperman, P. Petry, C. Reidy Liermann, L. Sáenz, S. Salinas-Rodríguez, P. Schelle, R.J.P. Schmitt, J. Snider, F. Tan, K. Tockner, P.H. Valdujo, A. van Soesbergen & C. Zarfl (2019), *Mapping the world's free-flowing rivers*. Nature, Vol.569, pp.215-221

Webographie :

- https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_rivers_of_Europe : caractéristiques des cours d'eau européens (longueur, superficie de bassin versant, débit moyen, pays, etc.) ;
- http://www.europa-planet.com/carte_europe_relief.htm : noms français des cours d'eau.
- Données de l'UNECE (Commission économique pour l'Europe des Nations unies) : http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/sc3/AGN_map_2018.pdf ;
- Données de la Cour des Comptes Européenne (ECA : European Court of auditors) : <https://www.eca.europa.eu/fr/Pages/DocItem.aspx?did=31393>
- Projets de restauration : https://restorerivers.eu/wiki/index.php?title=Main_Page
- Google earth : <https://www.google.fr/intl/fr/earth/>

2. Étape 2 : retour d'expérience de cours d'eau internationaux

2.1 Le Rhin entre Bâle (Suisse-France) à l'aval de Karlsruhe (France-Allemagne)

2.1.1 Contexte géographique

► Hydrographie

Le bassin versant du Rhin couvre une superficie de 198 000 km² sur 9 pays. Le linéaire principal du fleuve traverse ou longe 6 pays (la Suisse, le Liechtenstein, l'Autriche, l'Allemagne, la France et les Pays-Bas) sur un parcours de 1 233 km. Il s'agit du plus long fleuve se déversant dans la mer du Nord et de l'une des voies navigables les plus fréquentées du monde. Avec un module de 2 315 m³/s, le Rhin présente un régime complexe, association de la diversité de ses affluents. C'est à Coblenche qu'il perd son régime nival pour un régime pluvio-nival à deux maximums grâce aux apports de la Moselle.

En réalité, le long de son parcours, le Rhin présente différentes sections bien distinctes (Arnaud, 2012 ; Figure 10) :

- **Le Rhin Alpin (Alpenrhein)** en amont du lac de Constance : le Rhin prend sa source dans le massif du Saint-Gothard, à 2 344 m d'altitude. L'amont du fleuve est en réalité constitué de deux torrents (le Rhin antérieur et le Rhin postérieur qui se rejoignent et parcourent près de 170 km à une pente décroissante en aval de Bonaduz (2 à 0,6 ‰), avant de se jeter dans le lac de Constance (Bodensee) dont la superficie est de 542 km² et la longueur de 76 km. Ce lac reçoit 3 millions de m³ de sédiments par an, dont 40 000 m³ d'éléments grossiers ;
- **Le Haut Rhin (Hochrhein)** du lac de Constance à Bâle : sur cette portion 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. Le fleuve s'écoule avec une pente de 0,8-1,3 ‰. Après 140 km de lit régulier et encaissé, il parvient à Bâle après avoir reçu les apports de l'Aar. Il rentre alors dans la vaste plaine du fossé rhénan ;
- **Le Rhin Supérieur (Oberrhein)** en aval de Bâle jusqu'à Mayence (confluence avec le Main). Sur cette partie la pente est de l'ordre de 1 ‰ dans le secteur du Vieux Rhin. Le fleuve reçoit peu d'affluents hormis l'Ill côté alsacien ; puis, le Neckar conflue à Mannheim et le Main à Mayence. Entre Mayence et Bingen, la pente s'abaisse à 0,25 ‰ ;
- **Le Rhin Moyen (Mittelrhein)** de Bingen à Cologne : la pente du fleuve augmente sur cette section (0,40 ‰) qui traverse le massif schisteux rhénan menant à Coblenche. Le cours d'eau reçoit successivement les eaux de la Lahn et de la Moselle ;
- **Le Rhin Inférieur (Niederrhein)** : la pente diminue progressivement de 0,23 ‰ à 0,08 ‰. Ce tronçon reçoit les apports de plusieurs affluents : la Ruhr, l'Emscher, la Lippe ;
- **Le Delta du Rhin (Rheindelta en allemand / Rijndelta en néerlandais)** : peu après la frontière néerlandaise, le cours du fleuve se divise en trois branches formant ainsi un vaste delta qui se développe au sein des Pays-Bas.

► Aménagements : navigation et production électrique

Le Rhin est une voie fluviale majeure en Europe : il est navigable sur 850 km entre Rheinfelden en amont de Bâle et la mer du Nord. Ce fleuve est classé en catégorie VI, permettant le passage de convois compris entre 3 200 tonnes et 12 000 tonnes. D'autre part, le Rhin permet de relier la Mer Noire depuis 1992, suite à la mise en service de la liaison Main-Danube.

À l'écluse d'Iffezheim (dernière écluse sur le Rhin Supérieur dans le sens aval), 25,8 millions de tonnes de trafic ont été enregistrées en 2006. L'évolution de ce trafic depuis les années 1980 montre une relative stabilité autour des 26 à 27 millions de tonnes (DRE, 2008).

Si les premiers aménagements pour la navigation remontent au 19^{ème} siècle, la voie fluviale actuelle existe sur le Rhin Supérieur grâce à d'importants aménagements, qui comme sur le Rhône ont été faits en lien avec l'installation d'usines hydroélectriques. Sur l'ensemble du fleuve, pas moins de 16 centrales se répartissent entre la Suisse, la France et l'Allemagne, toutes installées, entre le lac de Constance, jusqu'à l'aval du Rhin Supérieur, où le profil en long prend la forme d'un « escalier » en raison de la densité d'ouvrages (Figure 11).

Enfin, il est possible de noter l'existence, le long du parcours du Rhin, de 5 centrales nucléaires. Toutefois, au regard des orientations politiques allemandes et de la vieillesse des installations, 4 d'entre elles ne sont plus en exploitation actuellement (à l'arrêt ou en cours de démantèlement).

Les aménagements du Rhin franco-allemand sont relativement similaires à ceux du Rhône : barrage de dérivation et canal usinier (Figure 12). Sur la partie supérieure du Rhin Supérieur, 4 usines EDF sont installées en série le long du Grand Canal d'Alsace (Kembs, Ottmarsheim, Fessenheim, Vogelgrun ; Figure 13).

Plus en aval, pour les 4 usines EDF de Markolsheim, Rhinau, Gerstheim et Strasbourg, les équipements hydroélectriques sont aménagés en feston comme pour la plupart des aménagements du Rhône. Les usines de Gamsheim et d'Iffezheim (EDF en co-gestion franco-allemande) sont, quant à elles, des ouvrages au fil de l'eau (comme Verbois ou Vaugris pour le Rhône).

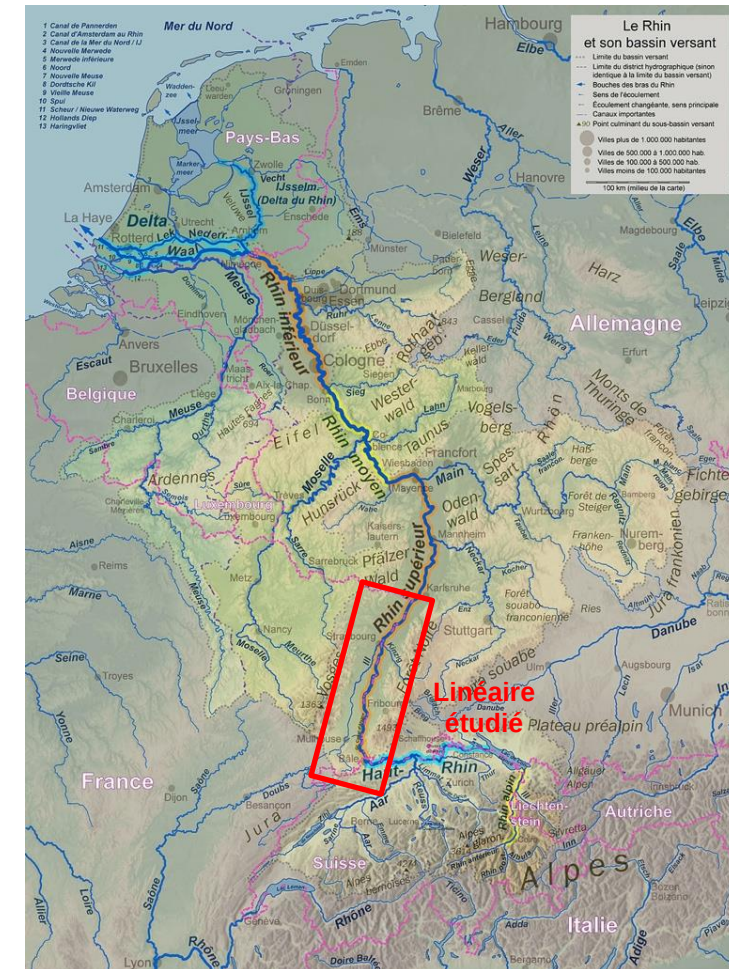


Figure 10 : Présentation du bassin versant du Rhin et secteur d'étude (Source : Wikipédia)

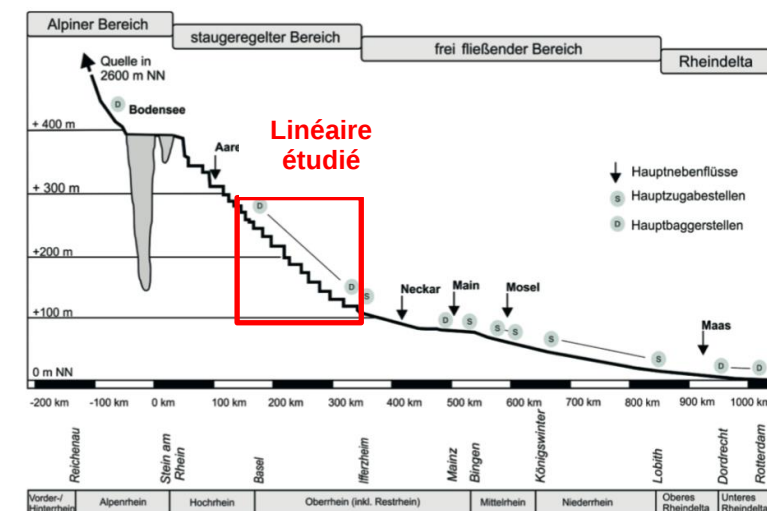


Figure 11 : Profil en long global du Rhin et secteur d'étude (Source : Hillebrand, G., Frings, 2017)

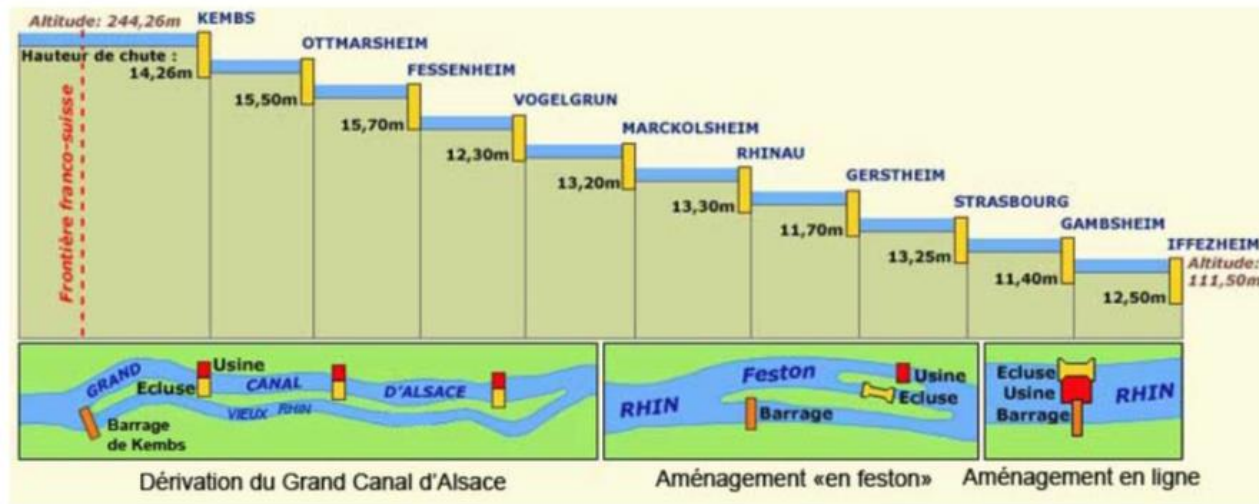


Figure 12 : Les aménagements hydroélectriques sur le Rhin Supérieur (source : Arnaud, 2012)



Figure 13 : Le Grand Canal d'Alsace et la centrale-écluse de Vogelgrun sur le Rhin (source Wikipédia)

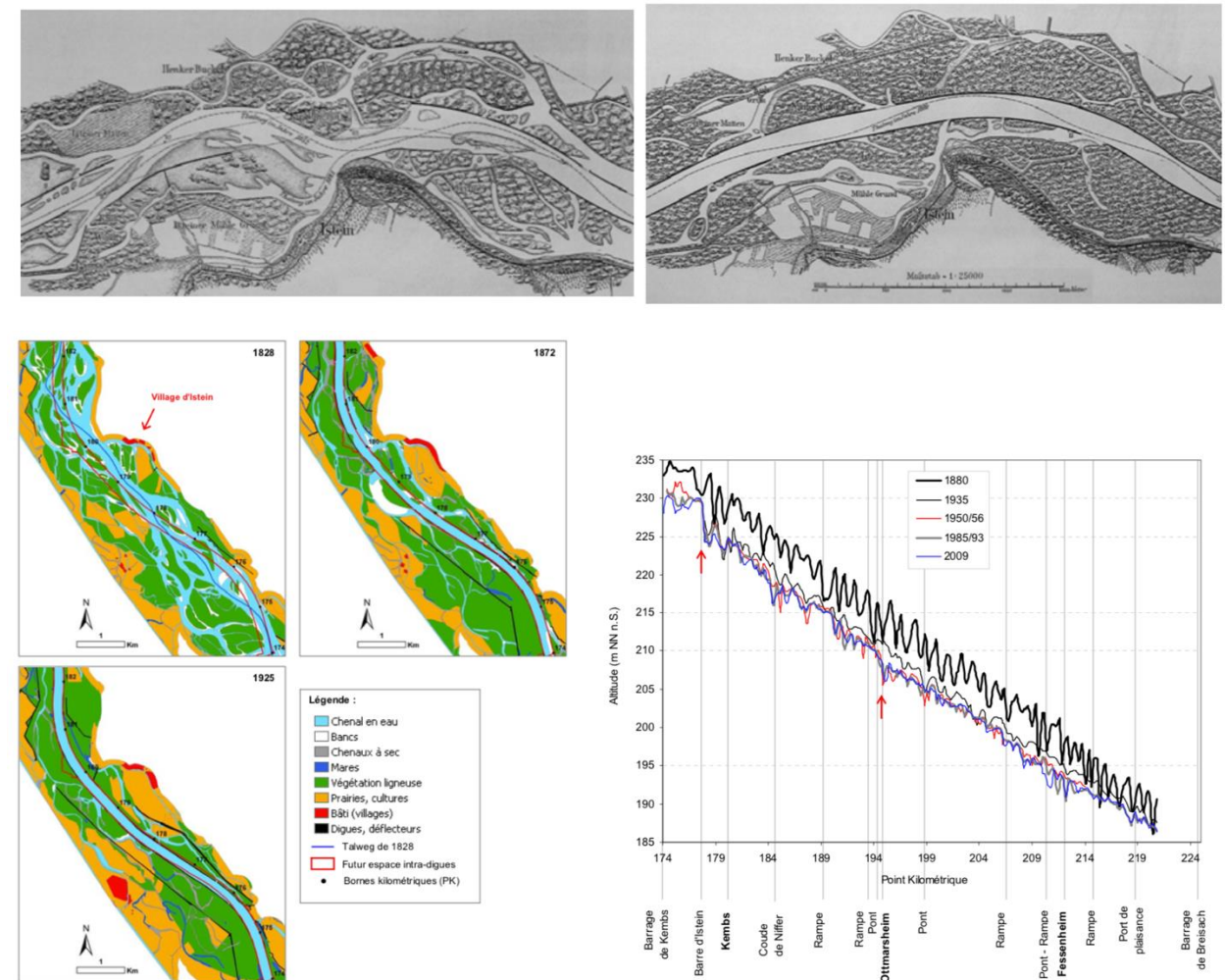


Figure 14 : Illustration des travaux de correction et de leur effet sur le tracé en plan et le profil en long du Rhin (source : Arnaud, 2012)

Fonctionnement hydrosédimentaire actuel

L'analyse des modalités de sédimentation (comparaison des profils en travers de 1950/60 et 2009, mesure des épaisseurs de sédiments fins sur les marges) dans le Vieux Rhin indique que les dépôts accumulés sur les marges depuis les années 1950 sont essentiellement constitués de sédiments fins. Ainsi les apports de grossiers sont très réduits, en raison notamment de la présence des ouvrages hydroélectriques en amont et sur les affluents (Hillebrand et Frings, 2017). Toutefois, l'analyse des structures granulométriques du lit montrent d'une part un gradient longitudinal (affinement amont/aval) et d'autre part que la taille des sédiments est variable en fonction de l'âge des bancs : le D50 varie entre 20 et 60 mm pour les surfaces les plus jeunes alors qu'il oscille entre 60 et 100 mm pour les bancs plus âgés. Ces résultats indiquent que des processus de transit de la charge de fond sont encore actifs. Cette charge proviendrait en partie de processus latéraux et du déstockage par incision (Figure 15 ; Arnaud, 2012).

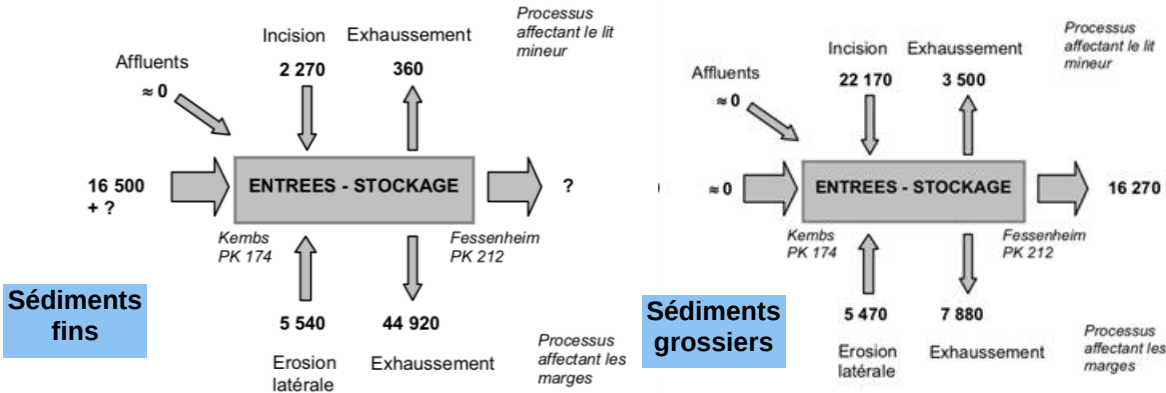


Figure 15 : Bilan des sédiments mobilisés du Rhin entre le barrage de Kembs et Fessenheim entre 1990 et 2010 en valeurs moyennes annuelles (m³/an) (source : Arnaud, 2012)

Au final, l'analyse des volumes de sédiments déplacés annuellement à l'échelle de l'ensemble du corridor du Rhin montre bien ce déficit de sédiments grossiers au niveau du tronçon d'étude. Comme le lac Léman, le lac de Constance fait office de piège à sédiment et induit une remise à zéro dans les processus de transport. La densité d'ouvrages hydroélectriques rend anecdotique le transport de sédiments grossiers. A Bâle, l'essentiel de la charge solide est composé de sables (0,2 Mt), dont les flux sont relativement bien connus par mesure ADCP, et de sédiments fins (1,25 Mt) (Hillebrand et Frings, 2017). La charge solide grossière réapparaît subitement à l'aval de la chute d'Iffezheim ; cette reprise du transport n'est pas liée à des conditions naturelles mais aux modalités de gestion sédimentaire.

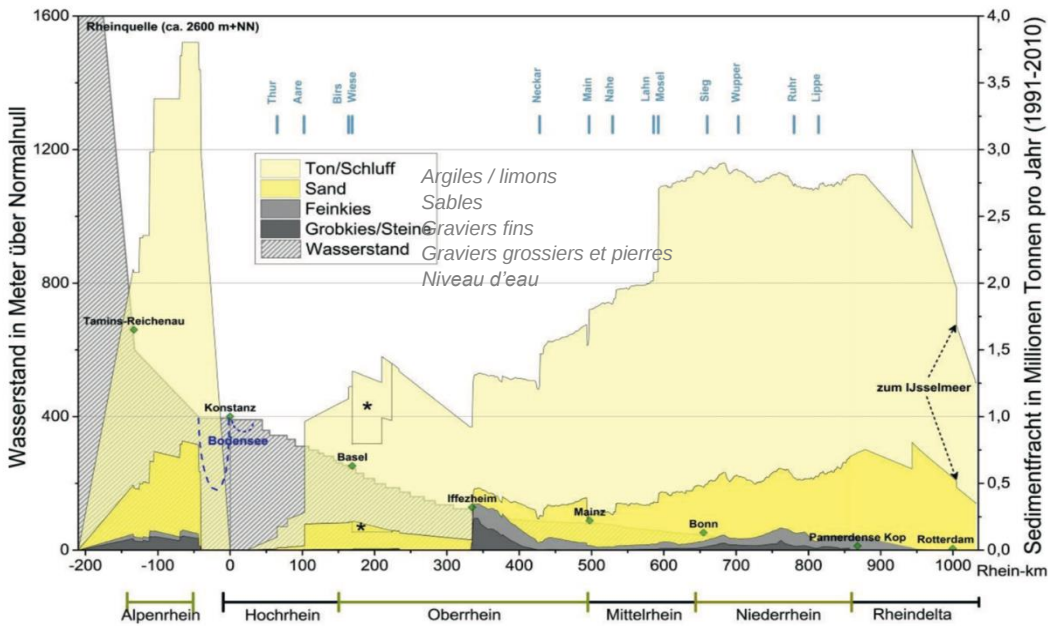


Figure 16 : Flux sédimentaires du Rhin moyen sur la période 1991-2000 (Hillebrand et Frings, 2017)

2.1.3 Opérations de gestion et de restauration hydromorphologique

La gestion des sédiments sur le Rhin est définie de manière concertée au niveau de la Commission Internationale pour la Protection du Rhin. Au niveau du tronçon d'étude, compte tenu des enjeux liés à la navigation, les sédiments fins présents en excédent au niveau des barrages et garages d'écluse font l'objet de dragages ; ailleurs, des opérations de réintroduction de charge alluviale grossière sont menées pour juguler des phénomènes d'incision du lit.

Dragage des sédiments fins

Les sédiments fins en transit sur le tronçon entre Bâle et Iffezheim sont estimés entre 1 et 2 Mt/an selon les années sur la période 1987-2002, avec une valeur moyenne de 1,5 Mt/an (CIPR, 2009). Ces valeurs sont confirmées par Hillebrand et Frings (2017), avec un flux en MES (argiles, limons) de 1 à 1,5 Mt entre Bâle et Iffezheim (Figure 16). Le suivi pluriannuel dans la station de Maxau, qui est située 25 km à l'aval du barrage d'Iffezheim et exploitée constamment depuis environ 40 ans (avant la mise en service des barrages de Gamsheim et Iffezheim), montre que la concentration et le flux de sédiments ont baissé d'environ 25% depuis la construction des barrages (CIPR, 2009).

Sur ce total, près de 20% se stocke dans les zones d'eaux calmes sur la chaîne de barrages du même linéaire. Les secteurs de décantation se concentrent pour l'essentiel en amont des barrages et aux extrémités des canaux de fuite (CIPR, 2009).

Environ 160 000 m³ de sédiments sont dragués en moyenne par année à Iffezheim et quelque 68 000 m³ à Gamsheim ; ces deux barrages représentent donc environ 85% de la quantité totale de sédiments dragués sur le Rhin Supérieur. Les techniques de dragages de sédiments fins sont similaires à celles du Rhône : drague aspiratrice et restitution plus en aval en vue d'une remobilisation.

Tableau 10 : Volumes moyens annuels des dragages en sédiments fins au niveau des 10 unités hydroélectriques du périmètre d'étude du Rhin (Source : CIPR, 2009 ; d'après Ritz, 2005)

Retenue	Volume annuel (m³/an) 1991-2004
Kembs	5 500
Ottmarsheim	2 000
Fessenheim	2 000
Vogelgrün	6 000
Markolsheim	6 500
Rhinau	5 500
Gerstheim	5 000
Strasbourg	7 300
Gamsheim	68 000
Iffezheim	160 000

L'ouvrage de Gamsheim nécessite des dragages sur un large panel de sédiments (fins, sables graviers) (communication VNF).

Cette gestion n'est pas sans poser de problèmes au regard des coûts récurrents des opérations et des niveaux de contamination des sédiments. Afin de réduire la sédimentation plusieurs pistes de réflexion ont été ouvertes :

- Des propositions ont été émises pour combiner des mesures d'aménagement (construction de murs déflecteurs) et de mesures opérationnelles (optimisation des manœuvres de barrages, modification des pratiques de dragages avec des interventions plus fréquentes mais moins lourdes) ;
- Sur la zone amont du tronçon, les volumes prélevés par le passé étaient nettement plus importants (> 100 000 m³) mais ils ont été réduits après l'acceptation de la réduction des capacités hydrauliques ;
- L'étude et la négociation des marges de manœuvre quant au niveau acceptable de sédimentation a aussi été revu pour la retenue d'Iffezheim en 2005 avec l'Office Fédéral du génie hydraulique (BAW) ;

- En ce qui concerne la gestion des sédiments pollués, il est préconisé de réussir à les stocker de manière sécurisée, soit sur place, soit à proximité des zones d'excavation, soit en mer (par exemple le site de gestion des sédiments pollués de « l'IJsseloog » aux Pays-Bas). Ainsi, en 2010/2011, environ 180 000 m³ de sédiments pollués, extraits de la retenue d'Iffezheim, ont été évacués sur ce site d'IJsseloog. En revanche, la modification des stratégies de curage et la mise en service de la 5^e turbine du barrage ont permis de repousser la nécessité de nouvelles opérations d'entretien (CIPR, 2020).



Figure 17 : Ile artificielle d'IJsseloog destinée à gérer les sédiments pollués

► Dragage des sédiments grossiers

D'après les informations collectées, il n'existe pas de dragage de sédiments grossiers pour excédent dans le linéaire d'étude. Le plan de gestion sédimentaire de la CIPR (2009) ne mentionne d'ailleurs pas cette granulométrie.

► Injection sédimentaire de stabilisation du profil en long

Le Rhin est probablement le fleuve au monde où la pratique d'injection artificielle de sédiments est menée à large échelle et dans des volumes qui ne connaissent pas d'équivalent. En effet, elle est développée à un point où aujourd'hui elle représente la part la plus importante des volumes de sédiments transportés ($\approx 44\%$) sur le Rhin Moyen.

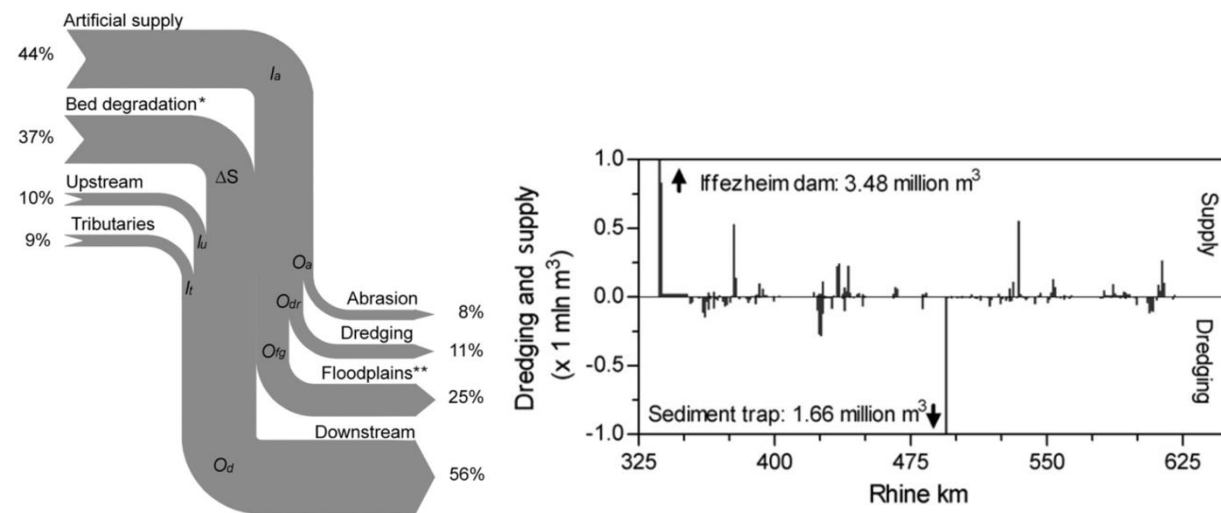


Figure 18 : Budget sédimentaire pour la période 1985-2006 par Frings et al. (2014) en aval d'Iffezheim

La principale zone de réinjection se localise à l'aval du barrage d'Iffezheim, dixième et dernier barrage de la chaîne hydro-électrique du Rhin Supérieur. Ce programme de recharge sédimentaire a pour objectif premier de limiter les effets de l'incision à l'aval du barrage : baisse des lignes d'eau et apparition de haut fond, baisse de la nappe d'accompagnement, déchaussement d'ouvrage, érosion progressive et dépôts de sédiments dans les ouvrages de navigation situés en aval (écluse, etc.), etc.

Depuis 1978, entre 170 000 et 180 000 m³ de graviers sont injectés annuellement, ce qui représentait en 2003 un volume total d'environ 4 510 000 m³ et un coût total de 99 M€ sur 25 ans (22 €/m³), soit un coût moyen de 3,96 M€/an (WSA, 2003, d'après Arnaud, 2012). Les sédiments sont déversés en bandes successives d'environ 10 m de large et 25 cm d'épaisseur sur le fond depuis des barges à clapets. L'opération est assistée par un bateau de sondages bathymétriques qui lève des profils en travers après chaque clapage afin de déterminer l'emplacement de la bande suivante.

La granulométrie injectée en aval du barrage d'Iffezheim est proche de celle du lit naturel (D50 = 15 à 30 mm sur environ 40 km à l'aval du barrage), allant du sable au galet (< 63 mm), avec la moitié de la granulométrie qui est composée de graviers. Malgré les grandes quantités de sédiments réinjectées, le lit de la rivière montre encore une dégradation ; on notera que moins de 20% des sédiments sont fournis de l'amont et des affluents (Emmanouil, 2017). La Figure 16 montre que les volumes réinjectés progressent en aval tout en faisant l'objet probablement d'un tri granulométrique. Les conséquences en aval de ces apports sédimentaires ne sont pas connues.

Les matériaux de réinjection viennent en particulier de stocks sédimentaires mobilisés pour les opérations de restauration de zones d'expansion de crues (cf. partie « Projets de restauration écologique »). En effet, les actions réalisées dans le land de Bade-Wurtemberg, comme par exemple à Weil-Breisach, et portées dans le cadre du programme intégré du Rhin prévoient de fournir 28 millions de tonnes d'alluvions qui seront transportées par barge à proximité d'Iffezheim, puis stockées en gravière avant d'être réinjectées progressivement. Ce stock devrait permettre de garantir environ 80 à 100 années de recharge dans le Rhin. (cf. https://www.wsa-oberrhein.wsv.de/Webs/WSA/Oberrhein/DE/1_Wasserstrasse/Projekte/Langfristige-Sicherung-der-Geschiebezugabe/std_node.html). Une partie de ces matériaux semble provenir d'exploitation de gravières intégrées dans des dispositifs de restauration de zones d'expansion de crue.



Figure 19 : Mélange granulométrique fourni en aval d'Iffezheim depuis 1991. Illustration d'une barge à clapet (Source : Emmanouil, 2017, et Arnaud, 2012)

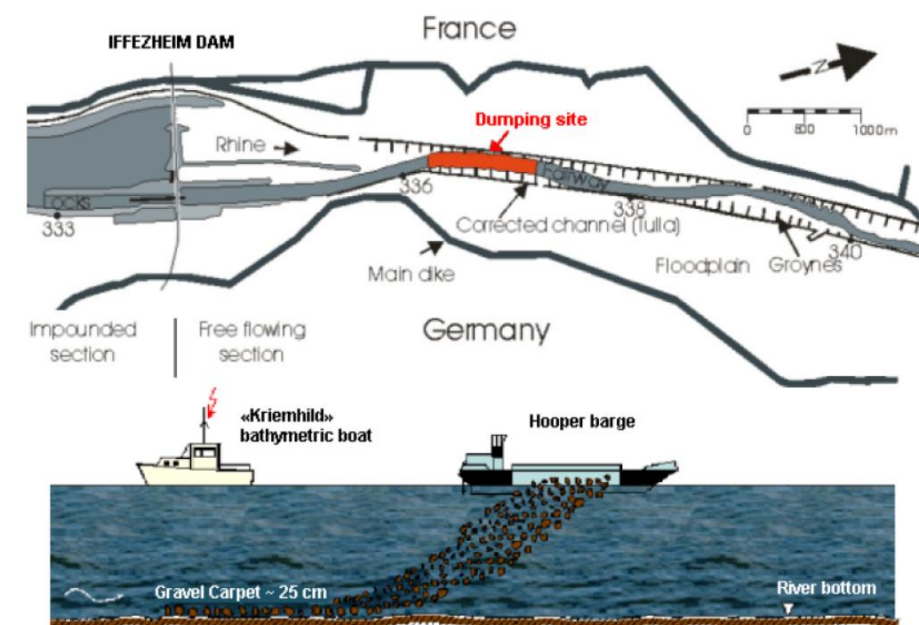


Figure 20 : Procédé de recharge sédimentaire en aval du barrage d'Iffezheim (Arnaud, 2012 ; d'après CHR, 2009)

► Projets de restauration écologique

Les projets de lutte contre les inondations sont très nombreux tout au long du Rhin. En plusieurs secteurs, de vastes zones sont réaménagées pour favoriser les débordements là où la vulnérabilité est faible voire nulle. C'est près de 140 km² de zones inondables qui ont été redynamisées entre 1995 et 2020, pour une capacité totale de 340 millions de m³. Ces actions sont portées aussi bien en Allemagne qu'en France.

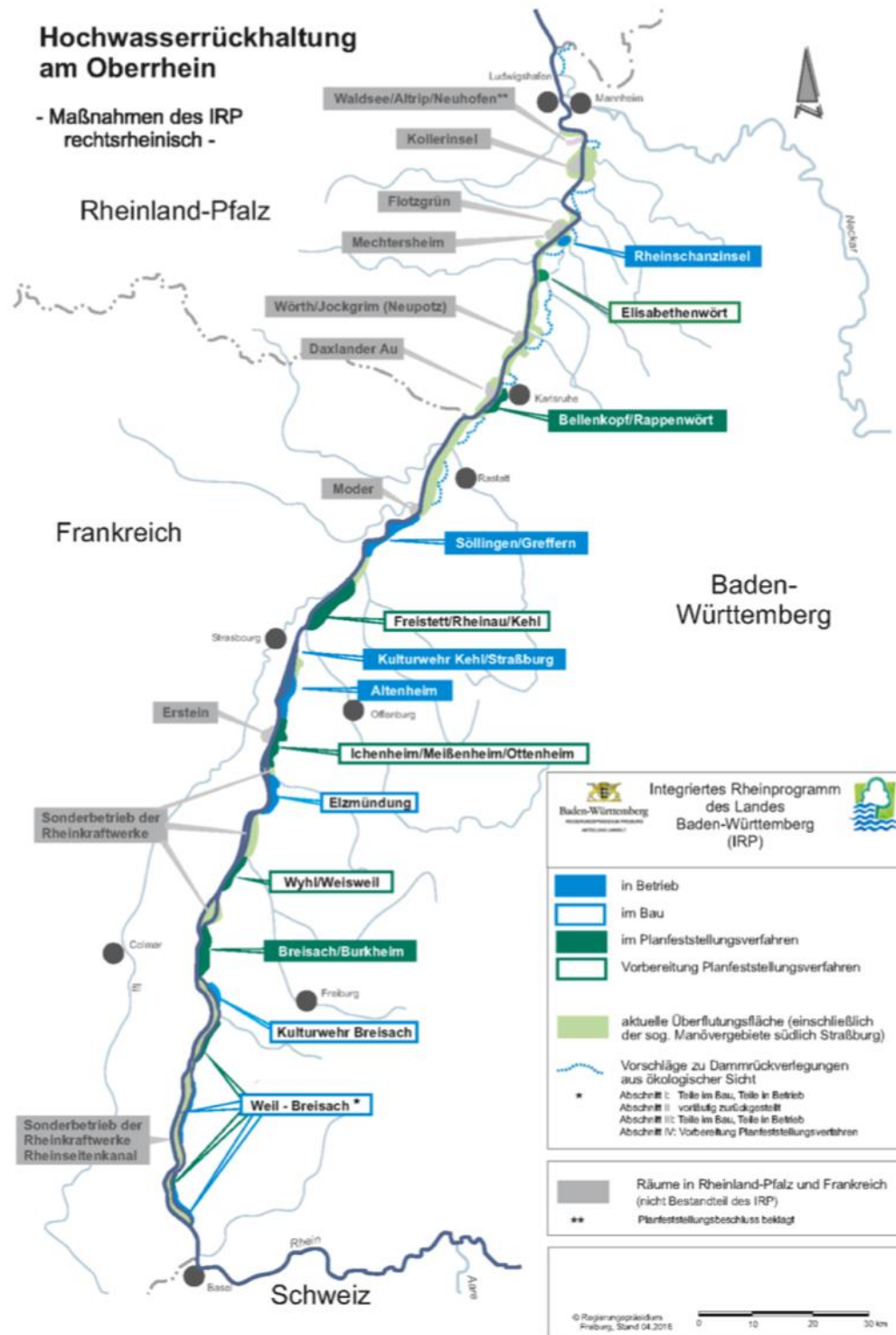


Figure 21 : État d'avancement 2018 des zones de rétention du Programme Intégré Rhin (RUF, 2019)

Cette politique passe par différents types de projet dont certains sont pensés en synergie avec des objectifs de restauration écologique. En France existe un vaste programme, le Plan Rhin Vivant, associant l'Etat, la Région Grand Est, l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et l'Agence française pour la biodiversité, qui a pour objectif de mobiliser tous les maîtres d'ouvrages et acteurs rhénans concernés grâce à des crédits financiers dédiés à des projets de restauration des fonctionnalités alluviales.

A ce titre, sur le tronçon d'étude, il est possible de citer le polder d'Erstein situé côté français. D'un point de vue hydraulique, ce casier d'inondation est géré afin de mimer des débordements « naturels », assez fréquents pour réintroduire les perturbations hydrauliques induites par un système de crue non perturbée (Schmitt et al., 2009). Toutefois, ce type d'aménagement n'interagit que faiblement (à la marge sur les matières en suspension) ou aucunement sur les dynamiques hydro-sédimentaires.

Le seul exemple qui peut ici être cité sont les travaux donnant lieu, avec les matériaux excavés des sites de travaux, à des réinjections de sédiment. Nous illustrerons ce type d'opération en prenant ceux réalisés dans le cadre du projet Interreg IV Rhin Supérieur « Redynamisation du Vieux Rhin », qui avait pour objectif de définir un plan de restauration des fonctionnalités hydromorphologiques et écologiques sur l'ensemble du Vieux Rhin et sur le long terme. La restauration d'un certain transport solide a été imaginé et rendue possible à l'aide de deux sources de matériaux :

- des introductions artificielles ;
- des recharges naturelles ou assistées par érosion latérale.

• Recharges artificielles

C'est ainsi que sur le Vieux Rhin, au droit du PK182,5 à l'aval du barrage de Kembs, 23 000 m³ de matériaux ont été injectés afin de restaurer les processus de transport sédimentaire. Les sédiments ont été prélevés dans la zone d'excavation du casier n°3, dont le chantier a démarré en 2010. Le matériel a été injecté sans tri préalable et le volume total correspondait à environ une année de transport solide théorique. Le merlon d'injection avait une forme trapézoïdale, de 620 m de long, 11 à 15 m de large, 2 à 3 m de haut, dont 1 m émergeant au-dessus de la ligne d'eau en débit réservé pour éviter la végétalisation si aucune crue n'était enregistrée avant la fin de la première période végétative. La rampe d'accès au dépôt a été retirée à la fin des travaux, de manière à déconnecter complètement le dépôt de la berge (Arnaud, 2012).



Figure 22 : Extrait du plan de récolement indiquant la position du dépôt injecté (novembre 2010) et vues du chantier (Arnaud, 2012)

• Retour d'expérience sur les réinjections sédimentaires

L'injection à l'aval du Kembs, comme celle réalisée à l'aval d'Iffezheim ont été étudiées dans le détail. La première à l'aide de transpondeurs RFID insérés sur des particules, la seconde par l'injection de 28 000 m³ de matériaux exogènes. Ces suivis ont permis, après plusieurs années de mise en œuvre, de connaître les dynamiques de déplacement de la charge grossière. Sur le Rhin Moyen en aval d'Iffezheim, six campagnes entre 1996 et 2001 de prélèvement dans le lit ont permis de retrouver le matériel de traçage et de démontrer des vitesses de déplacement de 2 à 6 km par an.

A l'aval de Kembs, au bout du 4^{ème} suivi, le déplacement sélectif en fonction de la granulométrie et la remise en place d'un transport solide partiel ont permis de mettre en évidence que de telles actions de recharge sédimentaires doivent se concevoir de manière répétée dans le temps si l'on souhaite maintenir durablement les habitats qui ont été restaurés (Piégay et al., 2016). De plus, l'analyse des suivis réalisés sur le Rhin permet de conclure sur l'intérêt de coupler les opérations de réinjection à des travaux d'élargissement, offrant ainsi des bénéfices écologiques plus importants et plus durable (Chardon et al. 2021). Cette manière de penser ce type de travaux de restauration est par ailleurs préconisé pour les futurs travaux de restauration sur le Rhône (GEOPEKA, 2021).

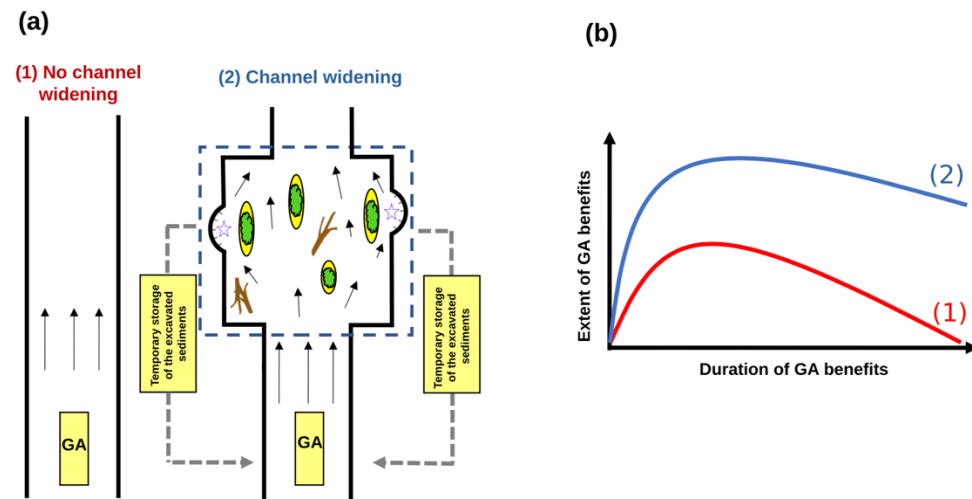


Figure 23 : Bénéfices écologiques des projets de recharge avec et sans couplage à des opérations de ré-élargissement (source Chardon, 2021)

Depuis, d'autres opérations de réinjection ont été réalisées sur le Vieux Rhin en aval de Kembs, notamment dans le cadre de la création de la centrale K. Ce projet a permis la renaturation de plus de 100 hectares sur l'île du Rhin à la place d'une ancienne parcelle agricole, incluant la restauration du « Petit Rhin », une rivière de 7 kilomètres (alimentée par la nouvelle centrale K). Les matériaux issus des travaux d'excavation, ont été eux aussi remis au fleuve à partir de 2015.



Figure 24 : Aménagement de la centrale K et restauration du Petit Rhin en aval du barrage de Kembs (2015 à gauche et état actuel à droite) (source EDF)

• Expérimentation d'érosion contrôlée

Depuis le lancement du projet « Redynamisation du Vieux Rhin », plusieurs sites ont fait l'objet de tests d'érosion contrôlée. Le but est ici de favoriser les dynamiques latérales du chenal et de permettre au Rhin de s'approvisionner « naturellement » en sédiment et de développer des formes et des habitats alluviaux plus variés.

Le premier site suivi est localisé sur le bief d'Ottmarsheim, sur une longueur de 300 m. Le site présentait un profil de berge raide de 9 m de haut. Les travaux ont été définis après des essais sur un modèle physique réduit. Il consistait à un enlèvement des aménagements existants (épis) et à leur remplacement dans une configuration plus favorable à l'érosion. Un suivi, notamment à l'aide de transpondeur RFID, de cette opération a permis de démontrer un départ d'environ 1000 m³ qui se sont redéposés dans le lit mineur du Vieux-Rhin. La distance moyenne de migration des matériaux remobilisés est de 23 m, avec un maximum de 205 m. Il a été également constaté une diversification du matériel alluvionnaire et un affinement moyen de l'ordre de 30 mm. Ces premiers tests ont été repris plus récemment, notamment dans le cadre de la création de nouvelle centrale K. Localement, la « digue de Tulla » a été démontée pour permettre au Rhin d'éroder à nouveau sa berge.



Figure 25 : Encoche d'érosion à l'amont du site et langue de dépôt en aval (Pinte, 2015)

2.1.4 Bilan du retour d'expérience

► Bilan des acteurs concernés

- Institution gestionnaire du Rhin dans sa globalité : CIPR (Commission Internationale pour la Protection du Rhin). La commission CIPR coordonne l'exécution individuelle par les états et régions riverains, de leurs obligations découlant de la Directive cadre européenne sur l'eau, encourage la production et l'application d'un plan de gestion unique du district hydrographique international du Rhin (conforme à la DCE), la prévention et la protection contre les pollutions chroniques ou accidentelles de l'eau, les crues et les effets des sécheresses (source : wikipedia). Pour la France, les représentants à la CIPR sont le Ministère des Affaires Etrangères, le Ministère de la Transition écologique et solidaire, et l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse ;
- Gestionnaire(s) des ouvrages hydroélectriques : EDF ;
- Gestionnaire de la navigation en France : Voies navigables de France (VNF Strasbourg) ;
- Gestionnaire de la navigation en Allemagne : Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA Freiburg) ;

► Synthèse comparative

- Principaux points de ressemblance :
 - des pentes similaires : 0,2 à 1 ‰ pour 0,2 à 0,8 ‰ pour le Rhône ;
 - des aménagements historiques et enjeux forts pour la navigation et l'hydroélectricité ;
 - des ouvrages en feston (barrages de dérivation, canaux usiniers) et hydrologie influencée ;
 - des sections de Rhin total (aval Iffezheim) ;
 - des flux grossiers diversifiés (fins, sables, grossiers), issus du piémont alpin, avec un grand lac faisant obstacle à la continuité (lac de Constance) ;
 - des enjeux écologiques forts : zones humides, bras secondaires, continuité écologique, etc. ;
- Principaux points de différence :
 - un canal de dérivation (Grand Canal d'Alsace) avec 4 ouvrages en série (long canal, long Vieux Rhin) ;
 - un linéaire de Rhin total et navigable en incision (aval Iffezheim) ;
 - une absence d'affluents à charge grossière et nécessitant des dragages.

► Actions pouvant être utiles à la réflexion sur la gestion sédimentaire du fleuve Rhône

- Enjeux de connaissance :
 - Bilan des flux de sables par mesures ADCP ;
 - Transfert de sédiments réinjectés dans une section incisée et chenalisée ;
- Gestion sédimentaire :
 - Gestion des sédiments pollués (site de IJsseloog) ;
 - Construction d'ouvrages (type murs déflecteurs) pour limiter le dépôt des sédiments ;
 - Optimisation des manœuvres de barrages, dragages plus fréquents mais moins lourds ;
- Actions de restauration :
 - Restauration de zones d'expansion de crues (cas du polder d'Erstein) ;
 - Bras secondaire en aval d'une petite centrale hydroélectrique turbinant le débit réservé (Kembs) ;
 - Suppression d'épis et de protections de berge ;
 - Réinjections sédimentaires :
 - fourniture en matériaux :
 - Par réutilisation des matériaux issus de travaux de restauration (berges, bras secondaires, etc.) (cas des travaux de restauration de Kembs) ;
 - Par réutilisation de matériaux issus de projet de restauration de zones d'expansion de crue en lit majeur (cas des matériaux réinjectés en aval d'Iffezheim) ;
 - transport des matériaux : transport sur barge (sur plusieurs dizaines de km) ;
 - modalités de recharge : par clapage en fond de lit à partir de barges à clapet ;
 - rythme de réinjection : volumes importants (180 000 m³/an aval Iffezheim), fréquence annuelle.

2.1.5 Collecte bibliographique pour le Rhin

► Principales sources de données pour la collecte bibliographique

- Contacts : Hervé PIEGAY, Fanny ARNAUD (CNRS), Erik MOSSELMAN (Deltares), Emmanuel BRAUN (Plan Rhin Vivant), Roy Frings (Rijkswaterstaat / PB) ;
- Webographie : <https://www.iksr.org/fr/>; <https://www.wsa-oberrhein.wsv.de/>; <https://www.edf.fr> ; https://www.wsa-oberrhein.wsv.de/Webs/WSA/Oberrhein/DE/1_Wasserstrasse/Projekte/Langfristige-Sicherung-der-Geschiebezugabe/std_node.html), etc.

► Références bibliographiques utilisées pour le Rhin

Arnaud, F. (2012). *Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon aménagé : le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne)*, 280 p.

Chardon, V., Schmitt, L., Arnaud, F., et al. (2021). *Efficiency and sustainability of gravel augmentation to restore large regulated rivers: Insights from three experiments on the Rhine River (France/Germany)*, *Geomorphology*, vol. 380.

Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin (CHR) (2009). *Erosion, transport et deposition of sediment – case study Rhine*. Rapport n°II-20, Lelystad, 222p.

Commission internationale pour la protection du Rhin (2020 (a)). *Mise en œuvre du Plan de gestion des sédiments*, Rapport n°269, 31 p.

Commission internationale pour la protection du Rhin (2020 (b)). *Bilan Rhin 2020*, Rapport de synthèse, 40 p.

Commission internationale pour la protection du Rhin (2009). *Plan de gestion des sédiments Rhin - Rapport final*, Rapport n°175,175 p.

Direction régionale de l'Équipement (2008) – *Alsace, Ports et trafic fluvial dans le Rhin Supérieur*, Rapport, Conférence du Rhin Supérieur (CRS), 89 p.

Emmanouil A. (2017). *Analysis of measured data of sediment nourishments in the Rhine river*, Mémoire de recherche, Delft University of Technology, 106 p.

Frings R. M., Gehres N., Promny M., Middelkoop H., Schuttrumpf H., and Vollmer S. (2014). *Today's sediment budget of the Rhine river channel, focusing on the upper Rhine graben and rhenish massif*, *Geomorphology*, 204:573–587.

GeoPeka (2021), *Définition d'une stratégie pour la réactivation de la dynamique des marges alluviales*, Rapport d'étude, Réserve Naturelle de l'Île de la Platière, 133p.

Hillebrand G., Frings R. M. (2017). *Von der Quelle zur Mündung : Die Sedimentbilanz Des Rheins Im Zietraum 1991 – 2000*. International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, 281 p.

Piégay H., Arnaud F., Cassel M. et al. (2016). *Suivi par RFID de la mobilité des galets: retour sur 10 ans d'expérience en grandes rivières*. BSGLG.

Pinte K. et al (2015). *Restauration d'un fleuve court-circuité (Vieux Rhin, France) par érosion latérale maîtrisée : premiers résultats concernant la bathymétrie, la topographie, le traçage de la charge de fond et la granulométrie*. IS Rivers.

Regier Ungspräsidium Freiburg (2019). *Zone de rétention de Wyhl/Weisweil, Rapport explicatif – Synthèse non technique*, 40 p.

Ritz, D. (2005). *Gestion des sédiments dans le Rhin Supérieur franco-allemand*. Unpublished paper presented at the Atelier de la Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR), 22 mai 2005, Bonn,

Allemagne Schmitt L., Lebeau M., Trémolières M. et al. (2009). « *Le Polder d'Erstein* » : *objectifs, aménagements et retour d'expérience sur cinq ans de fonctionnement et de suivi scientifique environnemental (Rhin, France)*. Ingénieries Eau-Agriculture-Territoires, p. 67-84.

2.2 La Meuse de Maastricht (Belgique-Pays-Bas) à Nimègue (Pays-Bas)

2.2.1 Contexte géographique

► Hydrographie

La Meuse est un fleuve de 950 km de long dont le bassin de 36 000 km², relativement étroit, est orienté sud-nord. La Meuse traverse 3 pays : la France, la Belgique et les Pays-Bas et se jette dans la mer du Nord ; elle prend sa source à 409 mètres d'altitude à Pouilly-en-Bassigny (Haute-Marne). Le bassin versant porte également sur le Luxembourg et l'Allemagne.

Le débit moyen de la Meuse à Borgharen (en aval de Maastricht, à la frontière belge et néerlandaise) est de 230 m³/s. L'étiage peut être sévère (20 m³/s en 1976) ; les crues annuelles sont de l'ordre de 1 300 m³/s et les crues exceptionnelles sont de l'ordre de 3 000 m³/s (3 175 m³/s en 1926) (Van Looy, 2012).

La géomorphologie de la vallée de la Meuse est issue de longues évolutions géologiques. Son cours amont dans le massif des Ardennes est étroit et encaissé, après que la Moselle soit devenue un affluent du Rhin il y a plusieurs millions d'années (ancienne confluence au niveau de Toul, 57-Meurthe-et-Moselle). Dans la région du Limbourg, à hauteur Liège (Luik) de Maastricht, la Meuse présente des successions de terrasses anciennes datées de 12 000 à 700 000 ans. Entre le Limbourg et Nimègue (Nijmegen), la vallée est marquée par des failles (Roerdalslenk et Venloslenk) qui ont entraîné l'accumulation de graviers et sables au sein de dépressions d'effondrement. En aval de Nimègue, la rivière aboutit dans une grande plaine ouverte puis rejoint le delta du Rhin où les différents bras pouvaient divaguer avant les premiers aménagements (Asselman et al. 2018).

Le secteur retenu entre Maastricht et Nimègue (cf. Figure 26) comporte des caractéristiques similaires au Rhône en termes de pente, de granulométrie (graviers, sables, fines), de configurations (canaux latéraux, barrages hydroélectriques), d'enjeux (navigation, risques d'inondation, écologie) et de travaux de restauration (travaux de la Meuse / Maaswerken depuis 2006). Par la suite, certaines parties sont centrées sur le secteur transfrontalier (Belgique / Pays-Bas) de Grensmaas, qui comporte une meilleure densité de données.

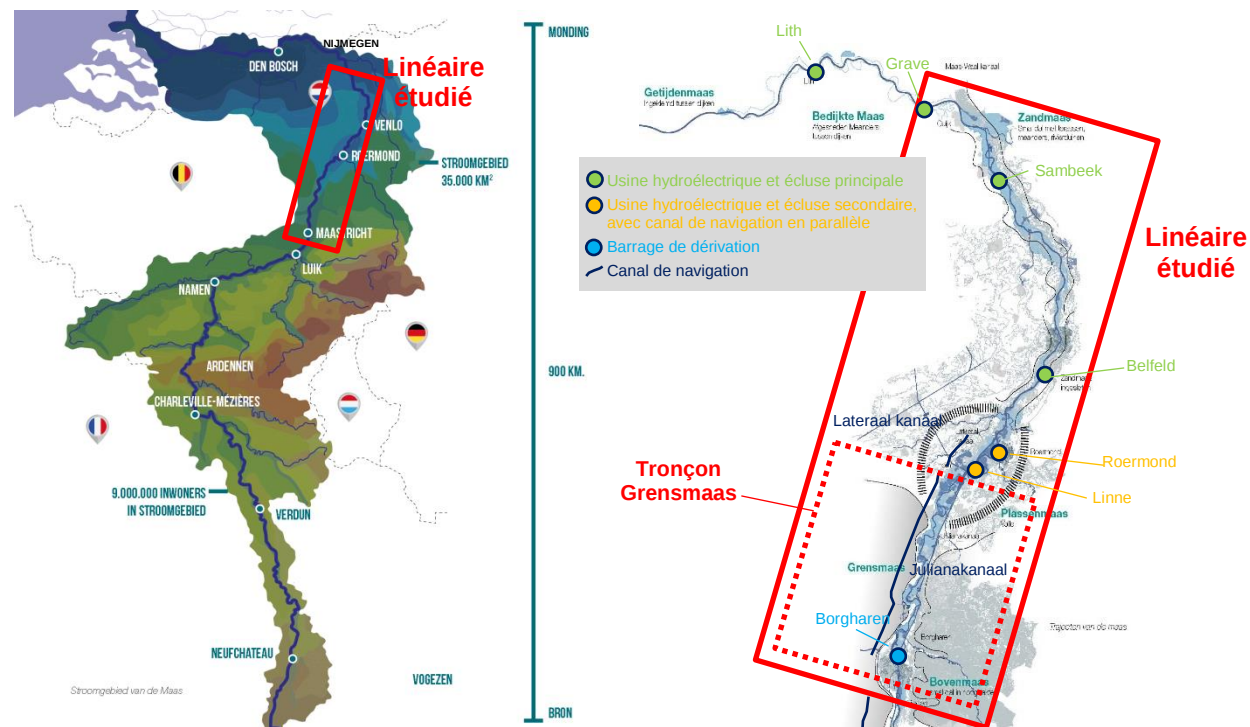


Figure 26 : Présentation du bassin versant de la Meuse et du secteur d'étude (Source : d'après Asselman et al., 2018, modifié)

Dans la partie néerlandaise de la Meuse qui inclut le périmètre d'étude, 6 grands tronçons peuvent être définis à partir de leur caractéristiques physiques (géologie, aménagement, fonctionnement sédimentaire) (d'après Asselman et al., 2018).

- **Bovenmaas (ou Meuse supérieure) (d'Eijsden à Borgharen).** Dans les collines du sud du Limbourg, la Meuse est profondément entrecoupée de terrasses pouvant s'élever 150 mètres au-dessus de son lit actuel. La rivière coule avec une pente de l'ordre de 0,5-0,6 ‰, sur un fond de marne dure qui est très résistant à l'érosion, et se trouve endiguée dans les traversées urbaines ;
- **Grensmaas (ou Meuse frontalière) (de Borgharen à Thorn-Wessem).** C'est la partie la plus naturelle de la Meuse, à la frontière de la Belgique et des Pays-Bas : la rivière s'écoule librement avec une pente moyenne de 0,4-0,5 ‰, sans ouvrage en travers, avec des faciès d'écoulement diversifiés, des granulométries variées (sable, graviers), des milieux naturels et de larges plaines inondables. La navigation suit le Canal Juliana aménagé en rive droite. Du côté flamand, la plaine inondable est entièrement endiguée ; elle l'est partiellement du côté néerlandais ;
- **Plassenmaas (ou Meuse humide) (de Thorn-Wessem à Roermond).** La Meuse devient totalement néerlandaise et atteint ici la plaine d'effondrement du Roerdalslenk, comblée de sables grossiers et de graviers ; sa pente naturelle commence à s'affaiblir (environ 0,3 ‰). La Meuse développe de grands méandres dans une large vallée. L'extraction de graviers a laissé de nombreuses gravières en eau dans lit majeur, dont le rôle amortissant pour les pics de crues a été caractérisé. En aval du carrefour fluvial de Thorn-Wessem, la navigation a lieu dans le canal Lateraal en rive gauche, et la Meuse est équipée de 2 usines hydroélectriques (Linne, Roermond). En aval de Roermond, la navigation se poursuit dans le lit principal de la Meuse, et ce jusque dans le delta. La rivière est endiguée autour des centres urbains, qui ont une forte valeur patrimoniale ;
- **Zandmaas (ou Meuse sableuse) (de Roermond à Cuijk).** Dans cette autre zone de failles tectoniques, la rivière s'écoule avec une faible pente (0,13 ‰ en moyenne pour la pente avant aménagement) dans des vallées soit étroites (Peelhorst), soit larges et comblées de graviers (Venloslenk), et surmontées de terrasses anciennes fluviales. Deux barrages hydroélectriques à écluses sont présents, près de Belfeld et Sambeek. Les espaces naturels sont remarquables : parc national de Maasduinen (dunes fluviales) et de Maasheggen (bocages anciens). La rivière est endiguée autour des centres urbains, également à forte valeur patrimoniale. Le périmètre d'étude s'arrête à Cuijk (Nimègue) ;
- **Bedijktemaas (ou Meuse endiguée) (de Cuijk à Lith).** Dans ce linéaire en aval du périmètre d'étude, la rivière change de configuration : la Meuse coule ici dans une plaine inondable commune avec le Rhin, dans un lit principalement sableux et avec une pente inférieure à 0,1 ‰. La rivière est entièrement endiguée des deux côtés. Deux barrages hydroélectriques à écluses sont présents, près de Grave et près de Lith. Quelques anciens méandres ont été restaurés pour le fonctionnement hydraulique en crue et les intérêts écologiques (Keent, Batenburg et Hemelrijkse Waard) ;
- **Getijdenmaas (ou Meuse maritime) (de Lith à Geertruidenberg).** Dans ce dernier tronçon, la rivière coule librement, sous l'influence des marées, et longe la Waal, bras principal du Rhin dans le delta. La partie aval du tronçon, Bergsche Maas, a été aménagée par la main de l'homme, abandonnant ainsi le tracé naturel (Afgedamde Maas). Derrière les digues, l'agriculture intensive façonne le paysage.

► Aménagements : navigation, production électrique et extractions

La Meuse a fait l'objet d'aménagements de digues dès le Moyen Age en aval de Cuijk (Bedijktemaas et Getijdenmaas), dont l'essentiel avait été réalisé dès le 14^{ème} siècle (Asselman et al., 2018). En 1760, des conflits liés aux crues sont rapportés dans le Limbourg transfrontalier (Van Looy, 2012). Les inondations restant fréquentes, le cours de la rivière a été adapté, avec de grands aménagements entre 1850 et 1890 (chenalisation, rescindement de méandres, etc.) ; le bras de la Bergsche Maas (1904) a été construit en 1904. Ces derniers travaux ont raccourci la rivière de 20 km et porté sa capacité hydraulique à 3 200 m³/s (Asselman et al., 2018).

La navigabilité sur la Meuse était difficile jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle du fait d'un tirant d'eau insuffisant en étiage. Au début du 20^{ème} siècle, la production de charbon dans le sud du Limbourg a accéléré l'amélioration de la navigabilité, ce qui a été obtenu par la création de 7 barrages et 11 écluses entre Borgharen et Lith (de 1915 à 1942). Dans le secteur Grensmaas, la création d'un canal de navigation latéral, équipé d'écluses, a été préférée à des barrages sur le cours principal : canal Juliana en 1935. Dans le secteur Plassenmaas, le canal Lateraal est venu suppléer en 1972 la navigation rendue difficile sur le cours principal de la Meuse. Ces aménagements ont raccourci la longueur totale à naviguer de près de 100 km.

Par ailleurs, au cours des dernières décennies, la vallée de la Meuse a été radicalement reconfigurée du fait des extractions de sables et de graviers en lit majeur, à l'image du secteur Plassenmaas et de ses gravières en eau, ainsi que dans le lit mineur (plusieurs centaines de milliers de m³ par an). Les secteurs de Grensmaas (sur la période 1940-2000) et Bedijkte Maas (à la fin du 20^{ème} siècle) sont également concernés.

Ces dernières années, des travaux de modernisation ont été menés pour augmenter la capacité de la voie fluviale : mouillage, capacité des écluses, élargissement de méandres, élargissement de canaux, amélioration de la gestion du trafic. Depuis le port autonome de Liège (Belgique) jusqu'à Rotterdam (Pays-Bas), la Meuse est équipée pour admettre des bateaux de type rhénan (2 500 tonnes) et des barges 2×4 500 tonnes (source : Wikipédia). En France, la navigabilité est limitée au gabarit Freycinet (250 tonnes à 1,80 mètre de mouillage). À partir de Givet à la frontière belge, la Meuse devient navigable pour les péniches de 1 350 tonnes.

Après les inondations de 1993 et 1995, de la frontière belge à Cuijk (Grensmaas, Plassenmaas, Zandmaas), différentes mesures, menées de front avec l'extraction de sable et de gravier, ont été adoptées pour diminuer les risques d'inondation : amélioration des digues, abaissement du lit majeur, construction des chenaux de crue et de zones de rétention, etc. (cf. §. 2.2.3 / travaux de la Meuse ou Maaswerken) (Asselman et al., 2018).

2.2.2 Enjeux hydrosédimentaires et hydromorphologiques

► Evolution du milieu alluvial

Les nombreuses interventions humaines ont conduit à un déséquilibre morphologique de la Meuse. L'espace rivière a été relativement préservé, mais les zones inondables ont tout de même été réduites de 50% du fait des endiguements successifs. Par ailleurs, l'hydrologie est modifiée par les ouvrages amont sous forme d'éclusées et de débits réservés, et une partie du débit sert à alimenter les canaux (en aval de Liège : canal Albert, Zuid-Willemsvaart et canal Juliana).

Globalement, le déséquilibre sédimentaire est marqué. En effet, le profil en long s'est abaissé de 1 à 3 m en moyenne, et jusqu'à 5 m dans certains secteurs (Figure 28), et en particulier entre 1940 et 1970 dans les secteurs Grensmaas et Plassenmaas. Les principales causes historiques sont la chenalisation du lit (plus étroit, plus rectiligne) qui a favorisé l'incision, les protections de berges qui ont bloqué la recharge latérale, les barrages qui retiennent ou ralentissent les flux de sédiments, les extractions de sables et de graviers dans le lit mineur. Ces incisions se sont parfois aggravées brutalement du fait de la présence de couches sableuses sous les graviers, découvertes lors des crues. La navigation, sur les sections où la Meuse est navigable, est également une cause d'érosion des berges du fait du batillage (Asselman et al., 2018).

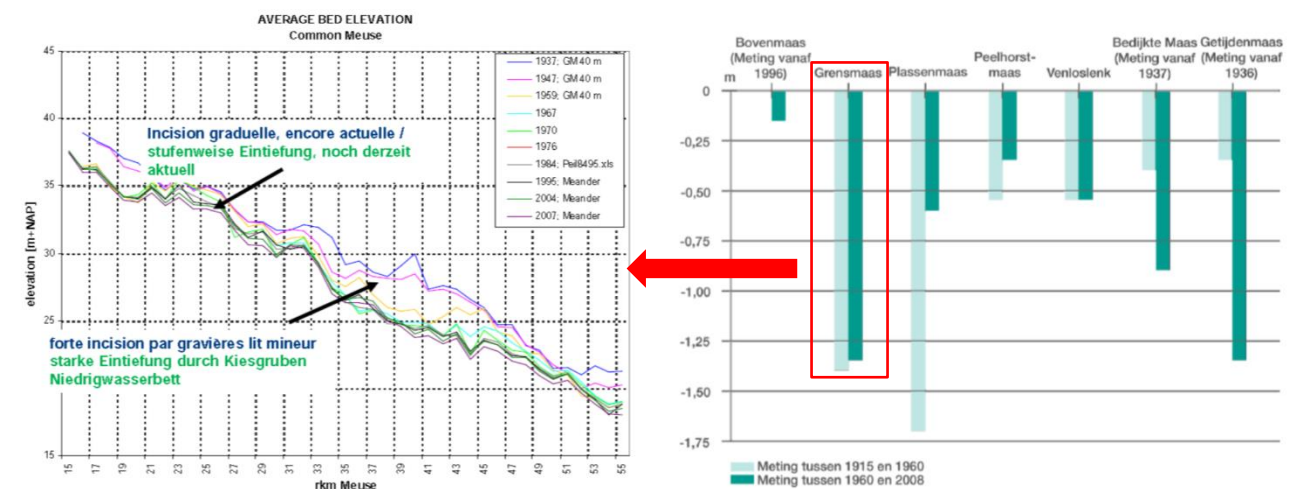


Figure 28 : Incisions moyennes par tronçons (à droite, Asselman et al., 2018) et détail d'évolution du profil en long de la Meuse dans le secteur Grensmaas (à gauche ; Van Looy, 2012)

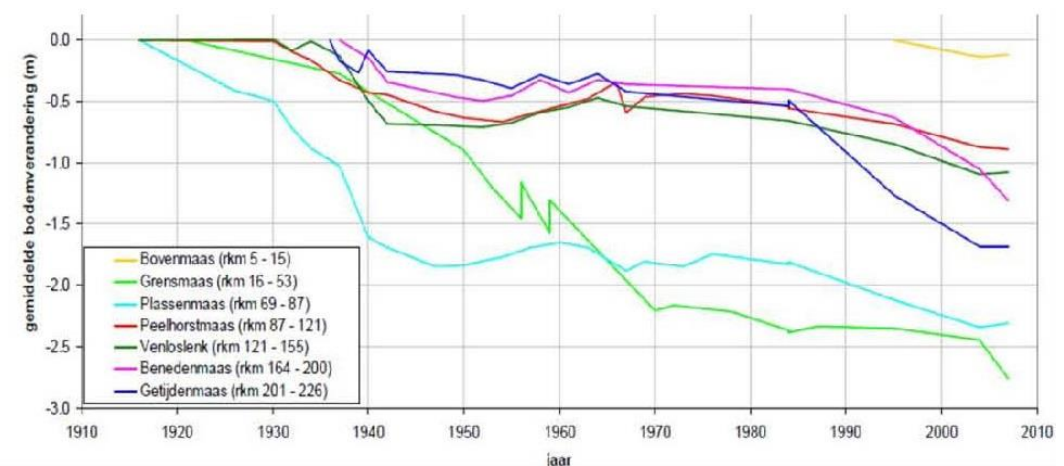


Figure 29 : Chronique des incisions du lit de la Meuse, par grands secteurs (Barneveld et al., 2019)



Figure 27 : Evolution du lit de la Meuse à hauteur de Grevenbicht (Grensmaas, PK45) lors des travaux de chenalisation (1850-1897) et après les travaux Maaswerken (2005-2019) (d'après Van Looy, 2012 et Google Earth)

Enfin, les enjeux écologiques liés à l'incision se sont développés : abaissement de la nappe alluviale (1 m en moyenne dans la plaine), appauvrissement des faciès d'écoulement et/ou des milieux pionniers, déconnexion des milieux terrestres ; ces enjeux venaient s'ajouter à une hydrologie déficitaire, influencée par les éclusées en amont, et une qualité de l'eau qui a longtemps été dégradée. Toutes ces conditions ont conduit à un appauvrissement de la biodiversité et de la biomasse.

Fonctionnement hydrosédimentaire actuel

Le fonctionnement hydrologique de la Meuse en crue est relativement peu influencé : il n'existe pas de grand barrage à réservoir en amont ; les canaux de navigation n'entonnent que les débits nécessaires aux écluses. Ainsi, le lit de la Meuse reçoit des débits de crue qui sont très peu modifiés par rapport aux conditions naturelles. Toutefois, il existe deux types de comportements hydrauliques :

- **La Meuse navigable** présente des pentes d'écoulement sous l'influence des barrages aval (Linne ; Roermond ; Belfeld ; Sambeek) ; ces barrages passent en transparence environ 5-10 jours par an, à partir d'un débit de 900-1 600 m³/s ; les vitesses dans la retenue sont d'environ 1,5 m/s (Asselman et al., 2018). De tels tronçons s'apparentent aux linéaires de retenue sur le Rhône ;
- **La Meuse non navigable** (Grensmaas) présente des écoulements courants. La vitesse en crue peut atteindre 3 m/s (Asselman et al., 2018). Ces tronçons s'apparentent aux Vieux Rhône, avec toutefois une hydrologie non influencée puisque les canaux de dérivation n'ont pas de fonction hydroélectrique.

D'un point de vue sédimentaire, la Meuse se présente comme une rivière à lit de gravier en amont du PK90 (Belfeld) et comme une rivière à lit de sable en aval du PK105 (retenue de Sambeek). Ainsi, une transition gravier-sable se produit entre les PK90 et PK105 où le D50 du matériau du lit passe de 16 à 2,6 mm. Il existe aussi une transition prononcée et assez nette dans la pente du lit : cette pente passe d'environ 0,5 ‰ (Grensmaas) à environ 0,1 ‰ (Zandmaas), avec un pivot autour du PK70 (Plassenmaas) (Murillo et al., 2006).

Les processus de transport sédimentaire dans la Meuse néerlandaise sont assez complexes et difficiles à comprendre en raison de : 1) la présence de couches de pavage dans les secteurs graveleux comme Grensmaas ; 2) l'effet mal compris des crues sur cette couche de pavage ; 3) l'existence de la transition gravier-sable à hauteur de Belfeld ; 4) les effets des interférences humaines (chenalisation, extractions, dragages pour la navigation) qui ont induit des phénomènes transitoires et 5) la disponibilité limitée des données de terrain sur le matériau du lit et le transport des sédiments (Asselman et al., 2018).

Toutefois, les processus peuvent être approchés dans leur globalité. Il est généralement considéré une absence de flux grossiers provenant de l'amont ou par les affluents ; le seul affluent significatif de la zone d'étude, la Roer, n'apporte que des sédiments fins. Les flux grossiers sur la Meuse s'initient en aval du barrage de dérivation de Limmel-Borgharen (PK15), et se traduisent par une érosion progressive qui a pu être quantifiée par des bilans sédimentaires sur la période 1978-1995 (cf. Figure 32), et dont une grandeur caractéristique serait de l'ordre de 30 000 m³/an (communication K. Van Looy).

Depuis 2006 et les travaux de la Meuse (cf. partie §. 2.2.3), les données expérimentales sur le fonctionnement sédimentaire méritent d'être actualisées. C'est l'objet de la thèse en cours de H. Barneveld (HKV Consultants / Univ. Wageningen) : "morphodynamics of supply limited rivers with weirs : case study of the River Meuse".

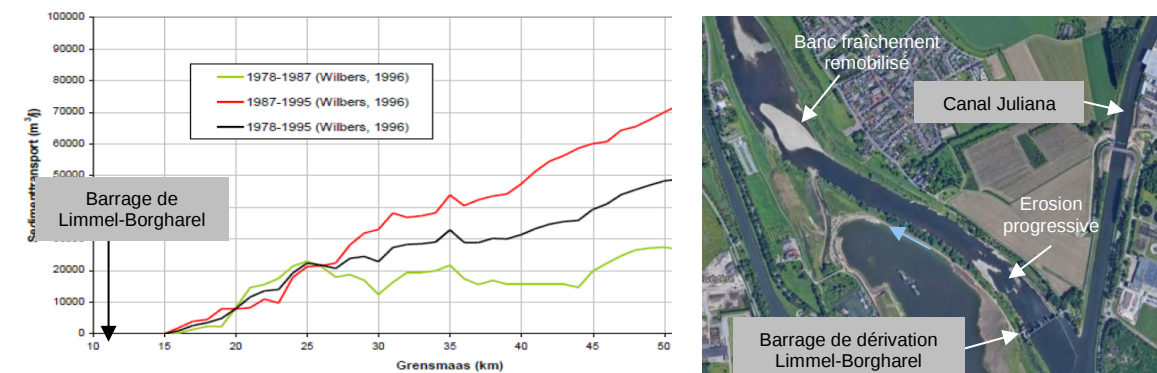


Figure 32 : Profil en long du transit sédimentaire calculé à partir de bilans sédimentaires dans le linéaire de Grensmaas (à droite ; Asselman et al., 2018 ; d'après Wilbers, 1996) et figures d'érosion progressive sous le barrage de Limmel-Borgharen (Google Earth, 2020)

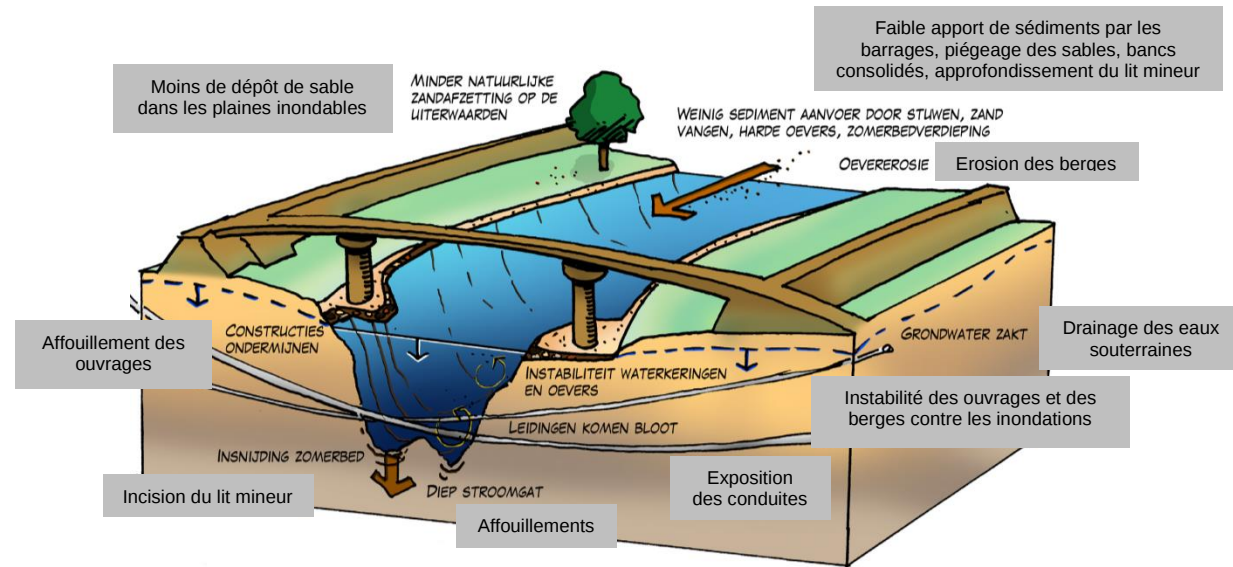


Figure 30 : Conséquences de l'incision du lit et de l'érosion des berges (Asselman et al., 2018)

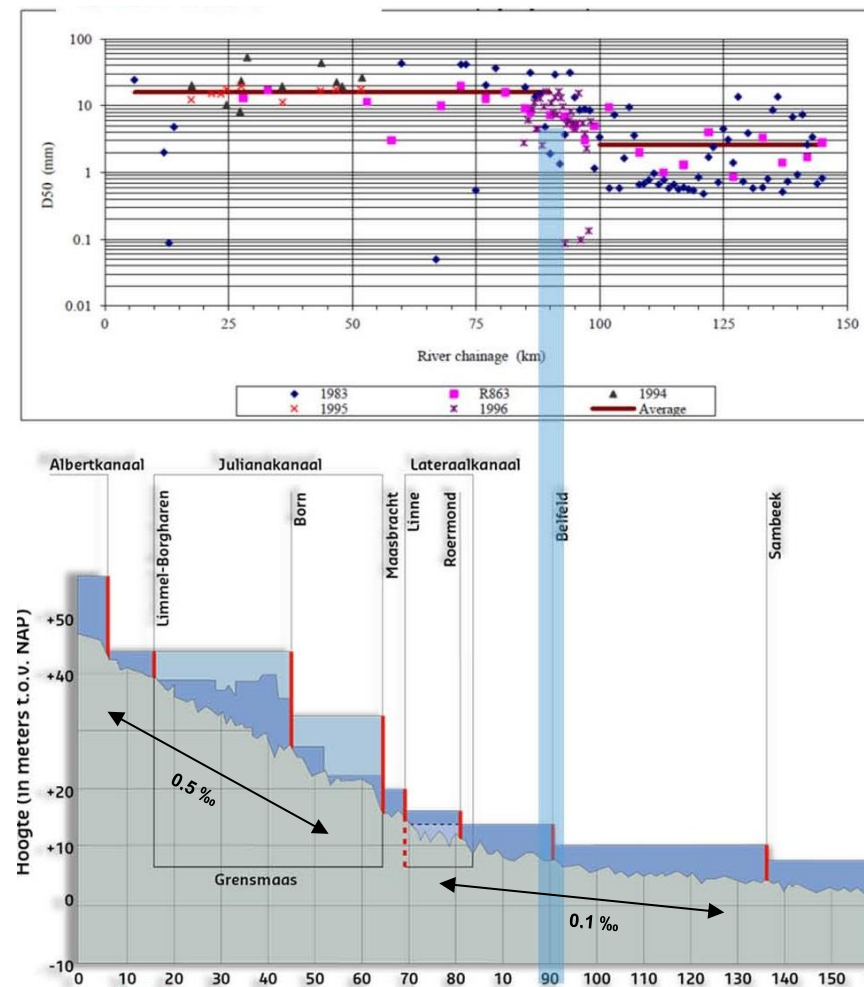


Figure 31 : Profils en long topographique et granulométrique de la Meuse (Barneveld et al., 2019)

Sous l'influence des processus morphologiques précédents, des enjeux de stabilité de berges ou d'ouvrages sont apparus : sur les digues, sur les ouvrages de navigation, sur les câbles et conduites sous fluviaux exposés à l'érosion, etc. Les conditions de navigation en terme de profondeur de mouillage se sont dégradées également.

2.2.3 Opérations de gestion et de restauration hydromorphologique

La gestion de la Meuse est guidée par des grands principes développés dans le Tableau 11 (d'après Asselman et al., 2018) acquis par le retour d'expérience des actions menées par le passé, et permettant de contribuer à l'objectif de la directive-cadre européenne sur l'eau, ainsi qu'aux objectifs de biodiversité et de valorisation sociale. Ces principes, dans un contexte de déficit sédimentaire, visent notamment à restaurer la dynamique et la continuité sédimentaire afin de mieux maîtriser les enjeux inondation, navigation et écologie.

Actuellement les discussions portent sur le fait de réinjecter des sédiments dans le secteur Grensmaas pour suppléer à l'absence des apports amont et au déstockage par érosion progressive (communication K. Van Looy). Les matériaux à réinjecter pourraient provenir des opérations de dragage en amont en Wallonie.

Tableau 11 : Principes de gestion de la Meuse (Asselman et al., 2018)

Principes de gestion	Conséquences sur les aspects sédimentaires
Principe 1 : Maintenir et augmenter l'espace pour l'expansion des crues et l'amortissement de l'onde de crue	
Principe 2 : Rétablir l'équilibre des sédiments et assurer la continuité sédimentaire	- Quantification de la faiblesse des apports de sédiments provenant de l'amont - Arrêt des extractions en lit mineur, faciliter la remobilisation des graviers, favoriser les érosions de berge en supprimant les protections de berge, réinjecter des sédiments issus de dragages, favoriser la navigation par les canaux et la limiter dans les parties naturelles de la Meuse
Principe 3 : Garantir des débits d'étiage suffisant et limiter les éclusées	Rechercher des alternatives aux seuils de stabilisation du profil en long et de la nappe
Principe 4 : Séparer les vocations écologiques et de navigation, et créer une valeur ajoutée pour ces enjeux	- Envisager l'extension des canaux jusqu'à Venlo en aval - Supprimer la navigation sur la Meuse dans le secteur Plassenmaas - Envisager la suppression du barrage de Roermond - Dans les tronçons de Meuse totale, séparer la navigation des milieux naturels en créant des canaux secondaires qui traversent les retenues et en utilisant les anciens lits - Envisager le remplacement des barrages et des canaux à l'horizon 2030-2050
Principe 5 : Laisser la place aux successions naturelles et au rajeunissement cyclique	
Principe 6 : Utiliser, préserver et mettre en valeur les formes et les valeurs caractéristiques du paysage de la Meuse	- Restaurer des habitats dynamiques grâce à l'activité sédimentaire, à la réinjection de sédiments et de bois mort - Réhabiliter les anciennes gravières avec une plus forte vocation écologique

Dragage des sédiments fins et grossiers

Les dragages de sédiments fins et sableux sont opérés dans les points de rupture de la continuité : retenue de barrage, garages d'écluse, sur-largeurs ou courbures navigables. Dans le périmètre étudié, en aval de Grensmaas, les points de dragage réguliers sont situés aux PK81 (écluse de Roermond) PK137 (écluse de Sambeek). Les données ne sont pas connues précisément sauf par grands secteurs (cf. Figure 33). Compte tenu des contextes excédentaires et des enjeux de navigation, les acteurs néerlandais promeuvent une gestion pragmatique basée sur l'export et la valorisation à terre des sédiments. La logique de réinjection sédimentaire commence seulement à émerger entre partenaires wallons et néerlandais, notamment pour faire bénéficier à la Meuse restaurée du secteur Grensmaas des excédents de sables/graviers qui seraient retenus en amont de Maastricht (communication K.Van Looy).

Dans le secteur de Grensmaas, il n'existe pas de dragage dans le linéaire courant de la Meuse, celle-ci n'étant pas navigable (sauf à son extrémité aval) et ayant une vocation écologique forte depuis le projet Maaswerken. Toutefois, en limite aval à Wessem, la Meuse traverse un nœud hydrographique (cf. Figure 34) : restitution du canal Juliana, connexion avec le canal Wessem-Nederweert, difffluence vers le canal Lateraal et l'usine hydroélectrique de Linne (52 GWh / 4 m de chute) (limite amont du secteur Plassenmaas) ; avec de nombreux enjeux humains (ports de plaisance et industriels, centrale thermique au gaz).

Ce dernier site est sensible à la sédimentation : des dragages ont eu lieu pour 195 000 m³ entre 2002-2008, soit environ 30 000 m³/an, pour un mélange de graviers, fines et sables. Depuis 2008, aucun dragage n'a dû être mené ; l'aménagement de la Meuse (Maaswerken) en amont depuis 2006 (élargissement du lit) semble avoir ralenti les flux, par diminution de la capacité de charriage et ce, malgré les volumes réinjectés. Toutefois, la dynamique sédimentaire est en cours dans la Meuse restaurée et un retour des flux grossiers est attendu à terme ; il sera géré par dragage. Jusqu'à présent, les matériaux étaient exportés et revendus ; il existe actuellement un début de réflexion pour envisager de les restituer tout ou partiellement à la Meuse.

Dans le périmètre d'étude, il n'existe pas d'affluent présentant du charriage et nécessitant des actions de dragage.

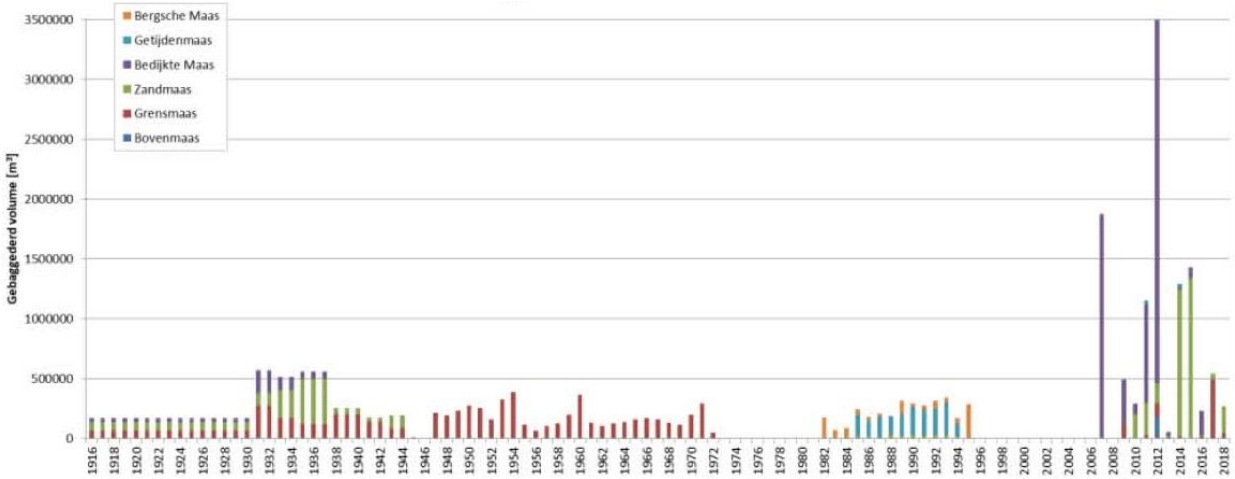


Figure 33 : Bilan chronologique des dragages par grands secteurs sur la Meuse néerlandaise (Barneveld et al., 2021)

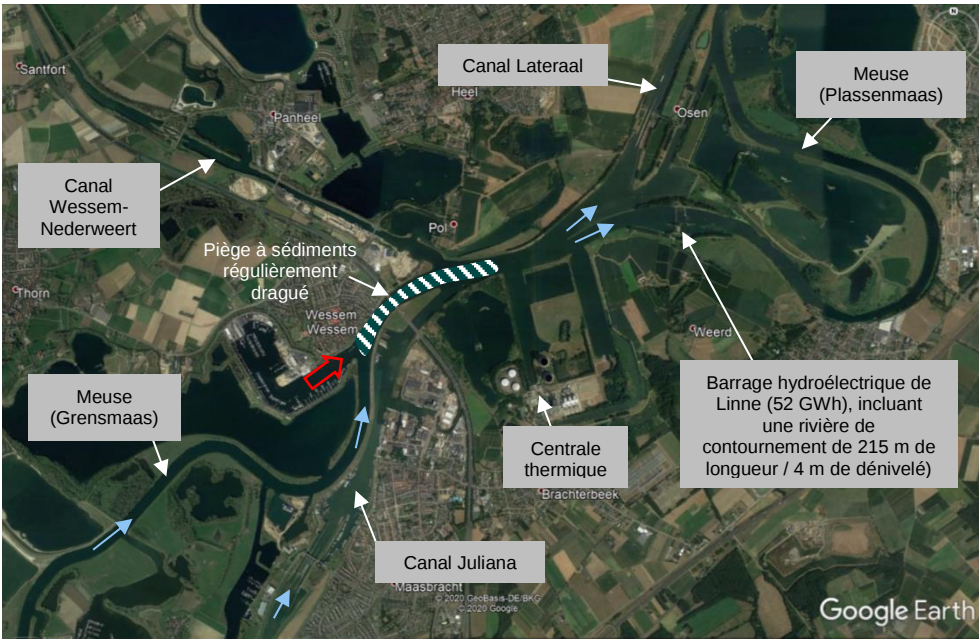


Figure 34 : Localisation des dragages au nœud hydrographique de Wessem en limite aval du secteur Grensmaas (Google Earth, 2020)



Figure 35 : Vue sud-ouest du nœud de Wessem (<https://www.youtube.com/watch?v=IH95YZ-kh7k>)

► Les travaux de la Meuse (Maaswerken)

Les travaux de la Meuse (Maaswerken en néerlandais) trouvent leur origine dans les crues de 1993 et 1995 (200 000 personnes évacuées, plusieurs dizaines de millions d'euros de dégâts). Le projet a été lancé en 1997 en associant les instances néerlandaises et belges : les services néerlandais de Rijkswaterstaat (www.rijkswaterstaat.nl / ministère des infrastructures et de la gestion de l'eau) et les services belges de Vlaamse Waterweg (<https://www.vlaamsewaterweg.be/>). De nombreuses études ont été menées pour concevoir les projets, notamment sur modèle physique. Les tronçons plus aval de la Meuse (Getijdenmaas, Bergsche Maas) ont été traités jusqu'en 2017 dans le cadre du projet « Room for the river » (« de l'espace pour la rivière »), qui a porté également sur le Rhin aval.

Les travaux de la Meuse sont menés depuis 2006 sur le linéaire entre Maastricht et Nimègue (environ 140 km). Ils devraient être achevés en 2027 en vue de l'atteinte du bon état écologique ; en 2017, l'objectif de protection contre les inondations a été atteint ; en 2018, les aménagements des milieux naturels étaient terminés, et en 2035, les effets sur ces milieux naturels devraient être pleinement visibles.

Ces travaux répondent à 4 objectifs :

- Protection contre les inondations à hauteur de Q250 (3 275 m³/s), grâce à une capacité hydraulique augmentée et des espaces d'expansion de crue, le renforcement des digues, d'infrastructures portuaires, la création de ponts émergés en hautes eaux ;
- Améliorations écologiques avec la recharge du lit en sédiments grossiers, et la restauration de 1 500 ha de milieux naturels ;
- Amélioration des infrastructures de navigation pour les plus grosses embarcations ;
- Reconfiguration du lit mineur par déblais de sables et graviers sur les marges (150 millions de m³ au total) permettant de répondre aux objectifs précédents et de financer les aménagements. A ce titre, les travaux sont menés par des consortiums d'entreprises qui gèrent la totalité de leur projet de terrassement et s'autofinancent.

Plus particulièrement, dans le secteur amont de Grensmaas (50 km), le bilan des actions est le suivant :

- Projet appelé côté flamand « Living River » et côté néerlandais « projet Grensmaas » ;
- Linéaire concerné : 40 kilomètres entre Maastricht (PB) et Roosteren (PB) / Maaseik (B) ;
- Travaux réalisés à partir de 2006 sur le site de Roosteren (premier projet réalisé par Rijkswaterstaat) et prévus d'être achevés en 2024. L'aménagement a été réparti sur 12 sites, dont 11 réalisés à partir de 2008 par le Consortium Grensmaas par auto-réalisation. Les extractions ont porté sur 54 millions de tonnes de graviers et 10 millions de tonnes de sables ;
- Suppression de protections de berges et création d'un lit moyen par : 1) élargissement du lit ; 2) abaissement des berges par déblai latéral (en moyenne de 6 à 7 m de hauteur de déblai) ; 3) recharge du lit et élévation de radiers en éléments grossiers pour soutenir la nappe alluviale. Environ 400 000 m³ de matériaux graveleux ont été réinjectés dans le lit (en moyenne 10 m³ par mètre de rivière), essentiellement en rive gauche côté belge ; 9 seuils-radiers naturels ont été aménagés pour maintenir le profil en long et soutenir le niveau de la nappe (cf. Figure 39 ; Figure 40) ;
- Pour les crues, au-delà de l'augmentation de la capacité du lit mineur, d'anciennes gravières ont été connectées par abaissement des berges afin d'admettre des débordements en crue (par exemple lacs de Kerkeweerd et de Negenoord). Des chenaux de crues aménagés en déblai permettent d'augmenter les phénomènes de stockage (cas du méandre d'Itteren) ;
- Améliorations pour la navigation : élargissement du canal Juliana, amélioration d'écluses à Born, aménagement du complexe d'écluses de Maasbracht ;
- Recréation de 1 000 ha de nature faisant partie du parc transfrontalier de Maasvallei. Il n'y a pas eu de plantations d'arbres ou arbustes, il est attendu que la nature se développe spontanément ; les espaces ont été regagnés essentiellement sur des terres d'agriculture intensives (peu de forêt alluviale ou de zones humides d'intérêt) ;
- Gestion par les organisations Staatsbosbeheer (foresterie et la gestion des réserves naturelles) et Natuurmonumenten (gestion du patrimoine naturel) ; ces associations gèrent les nouvelles réserves naturelles avec les troupeaux sauvages et en liberté de chevaux Konik et de bovins Galloway ;
- Coûts de mise en œuvre s'élevant à environ 700 M€, en grande partie financés avec les extractions.

Les conséquences du projet sur le fonctionnement sédimentaire ne sont pas caractérisées à ce stade. C'est notamment l'objet de la thèse en cours de H. Barneveld (HKV Consultants / University of Wageningen). Il est attendu de diagnostiquer plusieurs aspects, dont notamment : les flux entrants dans Grensmaas, les phénomènes de mobilité et d'érosion latérale dans le secteur renaturé, les flux de charriage dans le linéaire, l'équilibre du profil en long, l'éventuel état de pavage du lit, les dynamiques sédimentaires autour des seuils naturels (dont dépôt de fines en amont).

Sur le volet écologique, de nombreux suivis établis dans tous les compartiments (Van Looy, 2012 ; Kurstjens & Van Looy, 2020) permettent d'apprécier l'évolution des habitats et des cortèges :

- Poissons : dans les années 1980 à 1995, les peuplements piscicoles dans le lit canalisé étaient dominés par les poissons d'eaux stagnantes. Les espèces rhéophiles ont profité des travaux et de la reconstitution d'habitats lotiques : le nombre d'espèces rhéophiles est passé de 4 à 16 (ablette, barbeau, truite, anguille, lotte, ide, etc.). Les espèces d'écoulement lentique telles que la loche, la bouvière et le brochet sont également bien représentées dans les anciens bras de la Meuse et les anciennes gravières. Après un développement d'espèces exotiques comme les gobies, les espèces indigènes reprennent progressivement leur place ;
- Invertébrés aquatiques : la végétation sous-marine très étendue dans le lit de la Meuse peut être un habitat très favorable pour certaines espèces cibles. Cependant, les peuplements sont encore dominés par des espèces exotiques, influencées par la qualité de l'eau qui peut encore s'améliorer, et la présence de fines dominant les habitats en période estivale.
- Autres cortèges : batraciens (crapaud calamite, rainette), lépidoptères (33 espèces), orthoptères (5 nouvelles espèces de criquets depuis 2015), odonates (qui subissent une stagnation due à des étiages sévères). Des espèces emblématiques comme le balbuzard pêcheur ou la loutre s'installent grâce aux grandes surfaces restaurées. On note toutefois une influence des espèces exotiques dans tous les compartiments, notamment pour les espèces aquatiques depuis la connexion du système Rhin-Meuse avec le Danube (1992).



Figure 36 : Avant-après travaux dans le secteur de Meers (Kurstjens & Van Looy, 2020)



Figure 37 : Différents types d'habitats restaurés (Kurstjens & Van Looy, 2020)





2.2.4 Bilan du retour d'expérience

► Bilan des acteurs concernés

- Les porteurs du projet sont les services néerlandais de Rijkswaterstaat (www.rijkswaterstaat.nl) / ministère des infrastructures et de la gestion de l'eau) et les services belges de Vlaamse Waterweg (<http://www.vlaamsewaterweg.be/>) ;
- Les entreprises en charge des missions de conception / réalisation / autofinancements sont des consortiums tels que Consortium Grensmaas BV (<https://www.grensmaas.nl/>) ;
- Gestionnaire(s) des ouvrages hydroélectriques : barrage de Linne (MEGA Limburg) ;
- Gestionnaire de la navigation : Rijkswaterstaat (www.rijkswaterstaat.nl), Vlaamse Waterweg (<http://www.vlaamsewaterweg.be/>).

► Synthèse comparative

- Principaux points de ressemblance :
 - des pentes similaires : 0,3 à 0,6 ‰ pour 0,2 à 0,8 ‰ pour le Rhône ;
 - des aménagements historiques et enjeux forts pour la navigation et l'hydroélectricité ;
 - des ouvrages en feston : barrages de dérivation, canaux de navigation ;
 - des flux grossiers diversifiés (fins, sables, grossiers), issus de remplissages anciens dans des fossés d'effondrement tectonique ;
 - des enjeux écologiques forts : zones humides, bras secondaires, continuité écologique, etc. ;
- Principaux points de différence :
 - des canaux de dérivation ne servant que pour la navigation. La Meuse garde une hydrologie en crue non influencée, et les ouvrages hydroélectriques sont installés sur la Meuse en parallèle des canaux ou sur la Meuse totale navigable ;
 - une absence d'affluents à charge grossière et/ou nécessitant des interventions lourdes de dragage.

► Actions pouvant être utiles à la réflexion sur la gestion sédimentaire du fleuve Rhône

- Enjeux de connaissance :
 - Suivi des habitats aquatiques, terrestres, amphibies, et faune et flore associées. Thèse en cours sur le fonctionnement hydrosédimentaire actuel ;
- Gestion sédimentaire :
 - Mise en transparence d'ouvrages hydroélectriques pour des flux de fines et sables ;
 - Dragages de fines et sables (voire grossiers) au niveau des points bloquants (Wessem).
- Actions de restauration :
 - Restauration basée sur une reconfiguration topographique complète de l'espace rivière (3 000 ha en 2027, 5 000-6 000 ha à plus long terme), intégrant des objectifs de protection contre les crues ambitieux (Q250) ; suppression de protections de berge ;
 - Réinjections sédimentaires dans le cadre de la reconfiguration topographique du lit, permettant de favoriser une dynamique alluviale source de diversité d'habitats ;
 - fourniture en matériaux : réutilisation des matériaux issus des déblais en berge pour augmenter la capacité hydraulique du lit ;
 - transport des matériaux : transport par engins de chantier ;
 - modalités de recharge : par nappage en fond de lit restauré et en berge ;
 - rythme de réinjection : volumes importants à partir des déblais en berge (400 000 m³ sur 40 km ; en moyenne 10 m³/m de rivière, sur une période de 10 ans). Réflexion en cours pour définir comment réinjecter 30 000 m³/an qui correspondent au déstockage annuel ;

Figure 40 : Illustrations des travaux Maaswerken (Van Looy, 2012 ; Kurstjens & Peters, 2017)

- incidences en aval : le remodelage du lit semble avoir diminué le transit des sédiments en aval (pas de dragage depuis 2008) par diminution de la capacité de charriage. Le retour des sédiments est cependant attendu à terme du fait de la dynamique sédimentaire observée. Ce type de situation est très similaire à celle de Vieux Rhône qui ferait l'objet de recharge sédimentaire avec une retenue hydroélectrique en aval et des risques pour la navigation.
- Intégration d'anciennes gravières dans le fonctionnement hydraulique et les connexions écologiques ; créations d'annexes à vocation hydraulique (chenal de crue) et écologique ;
- Revégétalisation spontanée, mise en pâturage extensif, volonté de laisser se développer une forêt alluviale ; injection de bois morts ; valorisation paysagère ; gestion des espèces invasives et des plastiques ; création d'un parc naturel touristique (Maasvallei), à terme, définition d'un espace Natura 2000 se concentrant davantage sur les processus naturels que sur les espèces ;
- Volonté de séparer dans la mesure du possible les linéaires à vocation de navigation et les linéaires à vocation écologique ; exemple envisagé dans la Meuse en Plassenmaas : suppression de la navigation dans la Meuse (report sur le canal Lateraal) et du barrage hydroélectrique de Roermond ;
- Financement des opérations par les entreprises de travaux et la valorisation des matériaux.

2.2.5 Collecte bibliographique pour la Meuse

► Principales sources de données pour la collecte bibliographique

- Contacts : Hermjan BERNEVELD (HKV Consultants / University of Wageningen, PhD research project : « Morphodynamics of supply limited rivers with weirs: case study of the River Meuse »), Erik MOSSELMAN (Deltares), Kris VAN LOOY (Coordinator European and international projects, OVAM) ; les gestionnaires de barrages n'ont pas pu être contactés.
- Webographie : <https://www.maasinbeeld.nl>, <https://www.rijkswaterstaat.nl>, <https://www.grensmaas.nl/>.

► Références bibliographiques utilisées pour la Meuse

Asselman N., Barneveld H., Klijn F., van Winden A (2018). *Het verhaal van de Maas. De Maas uit balans ?*

Barneveld H., Asselman N., Klijn F., van Winden (2019). A. *Story of the Meuse*. Liege, 6th Symposium on the hydrological modelling of the Meuse basin. 13 September 2019.

Barneveld H., Boersema M., Schuurman F., de Vriend H (2021). *Het Verhaal van het Sediment*.

Duizendstra, H.D. (2011). *Determination of the sediment transport in an armoured gravel-bed river*. Earth surface Processes and Landforms 26.1381-1393.

Klaassen, G.J., J. Lambeek, E. Mosselman, H.D. Duizendstra & M.E. Nieuwenhuijzen (1998). Re-naturalization of the Meuse River in the Netherlands. In: Gravel-bed rivers in the environment, Eds. P.C. Klingeman, R.L. Beschta, P.D. Komar & J.B. Bradley, Water Resources Publ., LLC, Highlands Ranch, Colorado, USA, pp. 655-674.

Kurstjens G. & Peters B (2016). *Maas in Beeld. Grensmaas – Locatie Borgharen. Gebiedsrapportage*.

Kurstjens G. & Van Looy K (2020). *Maas in Beeld. De ecologische resultaten van 30 jaar natuurontwikkeling langs de Grensmaas, de levensader van het RivierPark Maasvallei*.

Lejeune, M. ; Limpens, H. ; van der Veen, J. (2002). *The border Meuse nature development project : where water meets gravel meets nature*.

Meijer D.G (1996). *Nature Rehabilitation Project Grensmaas Environmental Impact Assessment Study. Hydraulic and Morphological Investigation. Design and Construction of the Scale Model*. Delft Hydraulics.

Murillo-Munoz, R. E. (1998). *Downstream fining of sediments in the Meuse river*. Thesis, International Institute for Infrastructural Hydraulic and Environmental Engineering. Hydraulic Engineering Department.

Rijkswaterstaat (2018). Factsheet de Maaswerken Grensmaas.

Van Looy K. & Gielen H. (2012). *Images d'un projet de restauration sur la Meuse Mitoyenne. Bilder eines Renaturierungsvorhabens am Grenzfluss Maas*.

Wilbers, A. (1996). *The Border Meuse over the years. A study into the morphological changes of the bed of the Meuse River in the period 1978 through*. Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische Geografie, Universiteit Utrecht.

2.3 Le Danube de Passau (Allemagne-Autriche) à Komárno (Slovaquie-Hongrie)

2.3.1 Contexte géographique

► Hydrographie

Le bassin du Danube, avec une superficie de l'ordre de 817 000 km², est le deuxième plus grand bassin fluvial européen après celui de la Volga (environ 1 400 000 km²) (cf. Figure 41). Il s'étend aujourd'hui sur 19 pays, pour seulement 8 pays en 1970 compte tenu de l'évolution du contexte international. Quant au cours du Danube, d'une longueur totale de 2 845 km, il traverse 10 pays et baigne plusieurs capitales (Vienne, Bratislava, Budapest, Belgrade), avant de former un delta de plus de 3 000 km² dans la mer Noire où le débit moyen est de 6 500 m³/s. La forme du bassin versant est plutôt asymétrique, influencée par le massif alpin : seulement 44 % de la superficie du bassin versant provient d'affluents alpin de rive droite (et 56 % de rive gauche), mais ces affluents alpins fournissent 66 % des débits (contre seulement 33 % pour la rive gauche). Parmi les puissants affluents alpins, on recense l'Isar (292 km ; cf. §.2.4.3), l'Inn (518 km), l'Enns (349 km), la Mur (464 km), la Drave (707 km), la Save (944 km). En rive gauche, de grands cours d'eau descendent des Carpates et drainent les grandes plaines hongroises et roumaines : Vah (406 km), Tisza (966 km), Olt (615 km), Siret (706 km), Pruth (953 km) (<http://www.danube-culture.org> ; <https://fr.wikipedia.org>).

Le Danube peut être décrit selon 3 grands secteurs (danubecommission.org ; WRI, 2019) :

- **Le Haut Danube, de Kelheim en Allemagne jusqu'à Komárno en Slovaquie, à la confluence avec la Vah (992 km entre les km 2783 et 1791).** Le Haut-Danube traverse des régions de moyenne montagne entre les forêts de Bavière et de Bohême, et les Préalpes des Alpes Orientales. Le Haut-Danube possède un caractère de fleuve de montagne, accentué par ses affluents alpins, et s'écoule dans une vallée étroite et profonde, entrecoupée de secteurs plus larges d'accumulations alluviales. En vue d'améliorer les conditions de navigation, des digues longitudinales, des ouvrages fermant les bras secondaires et des épis ont été construits dès le début du 19^{ème} siècle, et surtout de 1850 à 1955. Les retenues de barrages hydro-électriques ont permis de rendre des hauts fonds (bancs de sables, seuils rocheux) plus facilement franchissables pour la navigation. La largeur du lit varie de 40-100 m en amont à 130-420 m en aval. La pente évolue de 1 à 0,25 ‰ (0,45 ‰ en moyenne entre la confluence de l'Inn à Passau et Vienne) ;
- **Le Moyen Danube, de Komárno en Slovaquie à Drobeta-Turnu Severin en Roumanie (860 km entre les km 1791 et 931).** Le Danube Moyen coule principalement dans la grande plaine Pannonique qui s'étend sur la Hongrie et la Serbie, avec une vallée large de 5 à 20 km et une pente qui s'abaisse brutalement à 0,08 puis 0,04 ‰ (Figure 42). Le lit est sinueux, avec des berges basses en pente douce, et le fond est sablonneux, avec de nombreuses ramifications, bancs de sables et radiers. Afin d'améliorer les conditions de la navigation, des digues longitudinales, des rescindements de méandres et des épis de concentration du courant ont été construits dans le lit dès le 19^{ème} siècle ; ces aménagements ont réduit la largeur du lit à 300-420 m, tandis que dans les secteurs non aménagés, la largeur du lit actif varie de 400 à 2 200m. Sur la partie aval du linéaire, le Danube traverse la pointe sud du massif montagneux des Carpates (secteur des Portes de Fer) ; sa vallée se rétrécit (0,6 à 2,5 km), ainsi que le lit (210 m au minimum), les versants sont raides, le fond du lit est pierreux et rocheux, et la pente augmente à 0,2 ‰ ;
- **Le Bas Danube, de Drobeta-Turnu Severin en Roumanie jusqu'à l'embouchure (931 km entre les km 931 et 0).** Le Bas-Danube s'écoule dans une large plaine entre le massif des Carpates en Roumanie au nord et le massif du Balkan en Bulgarie au sud, avec une pente de 0,06 à 0,04 ‰. La vallée est très large, de 7 à 10 km en amont, jusqu'à 20 km à l'approche du delta. Tout le long de son parcours, le lit se ramifie en un grand nombre de bras secondaires formant de nombreuses îles, notamment entre Silistra (km 376) et de Brăila (km 170). A cause de la sinuosité, la largeur du lit est instable et à l'origine de hauts fonds contraignant la navigation. Le delta commence au km 80, il est formé d'un réseau dense de bras et de lacs, entrecoupant des marécages et dunes de sables. Le Danube se divise en deux bras principaux : Chilia et Tulcea, ce dernier donnant naissance au bras de St-Georges et au Sulina. Le bras de Sulina, initialement le plus faible des 3 bras, a été aménagé pour la navigation depuis/vers la Mer Noire ; il doit faire l'objet de fréquents dragages pour maintenir la profondeur de mouillage.

Le secteur retenu, de la confluence avec l'Inn (Passau ; frontière germano-autrichienne) à la confluence avec la Vah (Komárno ; frontière hongro-slovaque) est situé dans la partie aval du Haut Danube, avec des caractéristiques similaires au Rhône à hauteur de Vienne : bassin versant de 101 700 km², module de 2 200 m³/s, pente moyenne de 0,45 ‰.



Figure 41 : Présentation du bassin versant du Danube et secteur d'étude
(Source : danube-culture.org)

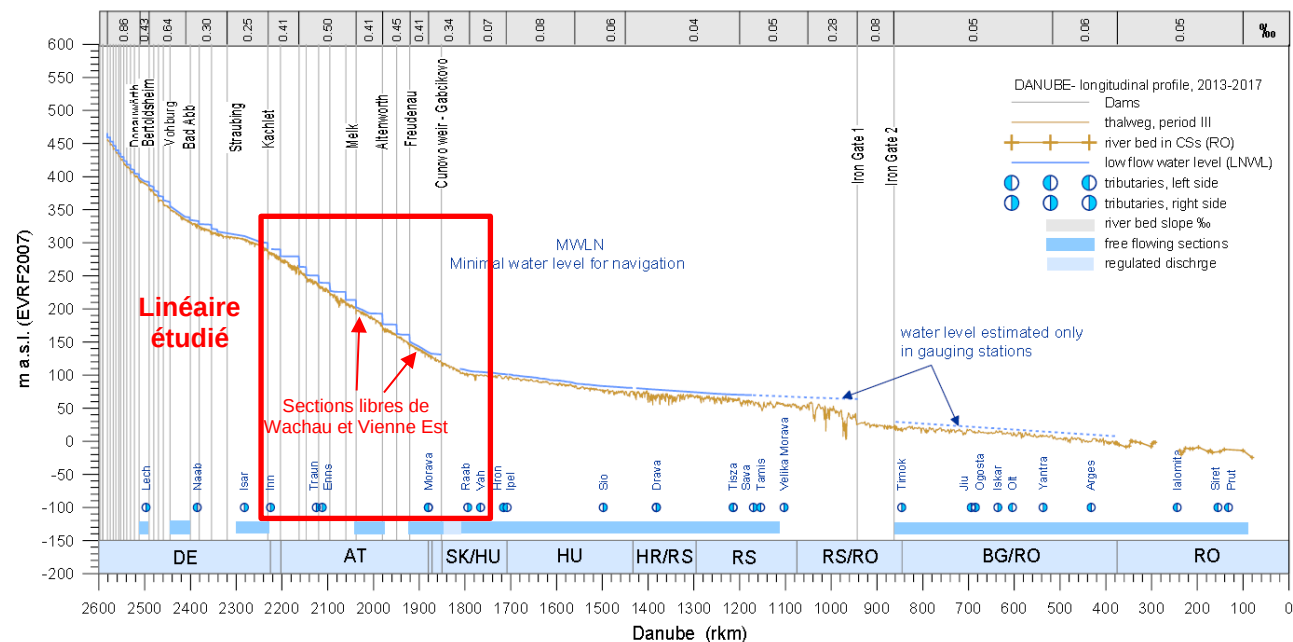


Figure 42 : Profil en long global du thalweg et du niveau d'étiage du Danube (WRI, 2019)

► Aménagements : navigation et production électrique

La navigation est un usage très développé dans le bassin versant du Danube : en effet, le Danube est navigable sur l'essentiel de son linéaire (2 415 km), entre son embouchure en Mer Noire et à Kelheim, où est situé l'embranchement du canal Rhin-Main-Danube (171 km, 23 écluses ; mis en service en 1992) qui permet une jonction avec le Rhin. Sur les 120 grands et moyens affluents du Danube, 34 sont navigables. (danube-culture.org ; wikipedia.org). En 2016, selon la Commission du Danube, 59 Mt de marchandises ont été transportées sur le Danube (soit 10 fois le trafic rhodanien). Les principales marchandises transportées sont : minerais, tourbe et autres produits d'extraction ; produits de l'agriculture, de la chasse, de la forêt et de la pêche ; coke et produits pétroliers raffinés. Par ailleurs, le Danube a connu une croissance exponentielle de la navigation de croisière depuis les années 1990 (2 millions de passagers par an ; 170 bateaux en 2015, 70 de plus qu'en 2010), notamment sur les lignes courte distance, par exemple Passau-Vienne-Bratislava-Budapest et dans le Delta du Danube (<http://www.initiativesfleuves.org>).

Les profondeurs de mouillage sont variables selon les secteurs. Dans le Haut Danube, 2 m sans écluse, 2,70 à 2,80 m sur les secteurs de retenue. Dans le Danube Moyen, respectivement 1,9 à 2,10 m, et 3,50 m. Dans le Bas Danube, en l'absence de barrage, les profondeurs peuvent s'abaisser à 1,50 m sur les bancs de sables (<https://www.danubecommission.org>).

Le Danube présente enfin une particularité : il peut être pris par les glaces. La probabilité annuelle de tels événements qui réduisent la navigabilité est de 5-30 % dans le Haut Danube (345 jours sans glace en moyenne), 25-50% sur le Danube Moyen (345 jours), et 40%-75% sur le Bas Danube (330 jours).

Le Danube est une importante source d'énergie, en particulier dans le périmètre d'étude en aval de l'Inn, aménagé entre 1955 et 1984 (1997 pour Freudenau) :

- 1 ouvrage germano-autrichien (Jochenstein / 132 MW) ;
- 9 ouvrages autrichiens (Aschach / 324 MW ; Ottensheim-Wilhering / 179 MW ; Abwinden-Asten / 168 MW ; Wallsee-Mitterkirchen / 210 MW ; Ybbs-Persenbeug / 236 MW ; Melk / 187 MW ; Altenwörth / 328 MW ; Greifenstein / 293 MW ; Freudenau / 172 MW avec des chutes de 8,60 à 15,30 m) ;
- 1 ouvrage hongro-slovaque (Gabčíkovo / chute 15 m / 5 040 m³/s / 720 MW / 2 600 GWh).

Plus en aval, sont présents en Serbie et Roumanie les deux seuls ouvrages du reste du linéaire : Portes de Fer I (2 280 MW) et Portes de Fer II (550 MW). Par ailleurs, le linéaire allemand est très équipé depuis la fin du 19^{ème} siècle. Au total, avec les ouvrages en amont de l'Inn, on dénombre 80 barrages sur cours principal du Danube.

En Autriche, les ouvrages sur le Danube assurent plus de 20% de la production totale d'énergie du pays. La situation est similaire en Slovaquie (10%) qui profite de l'énergie produite par la centrale de Gabčíkovo située en limite aval du périmètre d'étude au km 1819 (la dérivation étant située au km 1853 et la restitution au km 1811). Cet ouvrage gigantesque, qui constitue la limite aval du secteur d'étude, est issu d'un traité de 1977 entre Tchécoslovaquie et Hongrie ; il a été mis en service en 1992 et fait depuis l'objet d'un litige concernant sa construction et son exploitation entre Slovaquie et Hongrie, et porté devant la Cour internationale de justice de La Haye. Plusieurs projets, notamment en Autriche (Hainburg en aval de Vienne et de l'ouvrage de Freudenau) ou en Hongrie (Bös-Nagymaros), ont été abandonnés pour des considérations environnementales (<http://www.danube-culture.org> ; <https://fr.wikipedia.org>).

Enfin, le Danube a été, et est encore localement, une ressource importante en granulats. Dans le passé, le dragage dans le Danube était effectué à des fins commerciales, pour la navigation, pour la protection contre les inondations, la construction de routes, la remise en état des terres et pour la productivité des centrales hydroélectriques (sur des linéaires de 5 à 10 km dans les queues de retenues situées en aval). Les travaux de dragage les plus importants ont eu lieu dans le Danube Moyen, en particulier en Slovaquie en aval de Bratislava (0,8 hm³/an sur 1972-82) et en Serbie pendant la période 1971-1990 (10 hm³/an). Dans le Haut Danube, les ratios sont de 1,75 hm³/an sur 1971-1990 et 0,77 hm³/an sur 1991-2016, et sont proches de ceux du Rhône (0,85 hm³/an sur 1995-2018) (WRI, 2019).

À l'heure actuelle, le dragage est principalement entrepris pour la navigation et la protection contre les inondations ainsi que pour dans certains cas la vidange des retenues des centrales hydroélectriques et pour les projets de restauration des rivières. D'autres travaux de dragage sont effectués à l'embouchure des affluents dans les tronçons de retenue, ainsi que dans les ports et les entrées des ports. Dans le Haut Danube (Allemagne et Autriche) et Moyen Danube (Hongrie), le dragage commercial n'est plus pratiqué ni autorisé. En aval, notamment en Serbie, il existe encore des extractions à but commercial sur le Danube ou certains affluents à fort charriage (Morava serbe).

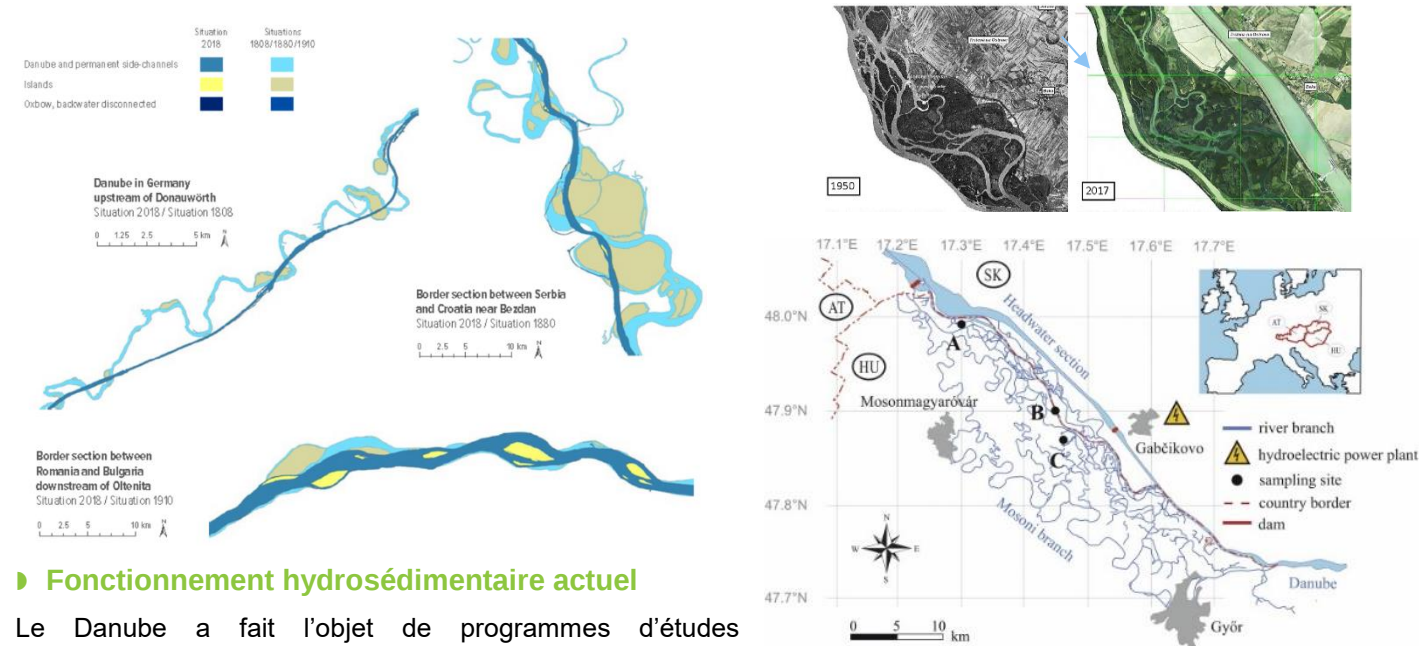
2.3.2 Enjeux hydrosédimentaires et hydromorphologiques

► Evolution du milieu alluvial

Du fait des travaux menés dès le 19^{ème} siècle pour améliorer la navigation (endiguements, épis, rescindements de méandres), la longueur du cours principal a été réduite de 11 % sur le Haut Danube (réduction de la longueur de 100 km) et de 4 % sur le Danube Moyen (30 km). La pente a été accentuée, ce qui a conduit à une augmentation de la capacité de transport des sédiments dans les sections à écoulement libre. De plus, les échanges latéraux de sédiments sont entravés par les endiguements, les protections des berges, les rescindements de méandres (aménagés et résultant de l'incision). Les plaines inondables ont été réduites de 81%.

En conséquence de ces changements, diverses formes de dégradation du lit du Danube se produisent et les bancs de sédiments, les îles, les chenaux latéraux et les bras morts formés naturellement ont été considérablement réduits. Les effets de la chenalisation sont plus marquées dans le cas du Moyen Danube et surtout du Haut Danube, le Bas Danube étant encore relativement préservé (cf. Figure 43). Les anciens styles fluviaux complexes à plusieurs lits sont devenus un style fluvial à chenal unique ; il reste encore 745 km de lits anastomosés à bras multiples sur 1 685 km recensés au 19^{ème} siècle, mais les secteurs en tresses à forte énergie ont disparu (Habersack et al., 2019a et 2019b).

Figure 43 : Evolutions du tracé de secteurs représentatifs du Haut, Moyen et Bas Danube (à droite aménagement de Gabčíkovo (Habersack et al., 2019b)



► Fonctionnement hydrosédimentaire actuel

Le Danube a fait l'objet de programmes d'études particulièrement bien fournis, notamment dans le cadre du projet Interreg Danube Transnational Programme (2014-2020 ; 274 M€) impliquant 15 pays. Ce programme finançait des projets d'élaboration et de mise en œuvre pratique de cadres politiques, d'outils et de services et d'investissements pilotes. Les domaines concernés sont très larges (société, environnement, culture, énergie, gouvernance, etc.) et se traduisent par plus d'une centaine de projets approuvés.

Aussi, le volet sédimentaire du Danube a-t-il été bien étudié dans le cadre du projet « Danube Sediment Management - Restoration of the Sediment Balance in the Danube River » (3,5 M€ ; WRI, 2019 ; Habersack et al., 2019b). Bien qu'hétérogènes à l'échelle de l'ensemble du bassin versant, les travaux scientifiques portent notamment sur la granulométrie, l'évolution des profils en long, sur les flux sédimentaires (fines, grossiers), avec un regard sur 3 périodes caractéristiques : période I (1925-1950), période II (1950-1990), période III (1991-2015).

Pour les flux de MES, le schéma de la Figure 44 résume l'évolution des flux dans le temps et leur répartition géographique. En limite amont du périmètre étude, l'Inn est encore le principal contributaire en MES du Danube avec 4,1 Mt/an (contre 5 Mt/an avant barrages). Les apports en MES des affluents ont réduit entre 20% à 70% proportionnellement à leurs équipements en grands réservoirs. Par ailleurs, les retenues sur le Danube même défavorisent également la continuité des sédiments : la retenue de Gabčíkovo piège en effet 60% des apports amont. A l'exutoire en Mer Noire, les apports du Danube sont passés de 40-60 Mt/an à 15-20 Mt/an (soit - 65%). L'érosion côtière est marquée sur le littoral du delta (24 m/an ; WRI, 2019).

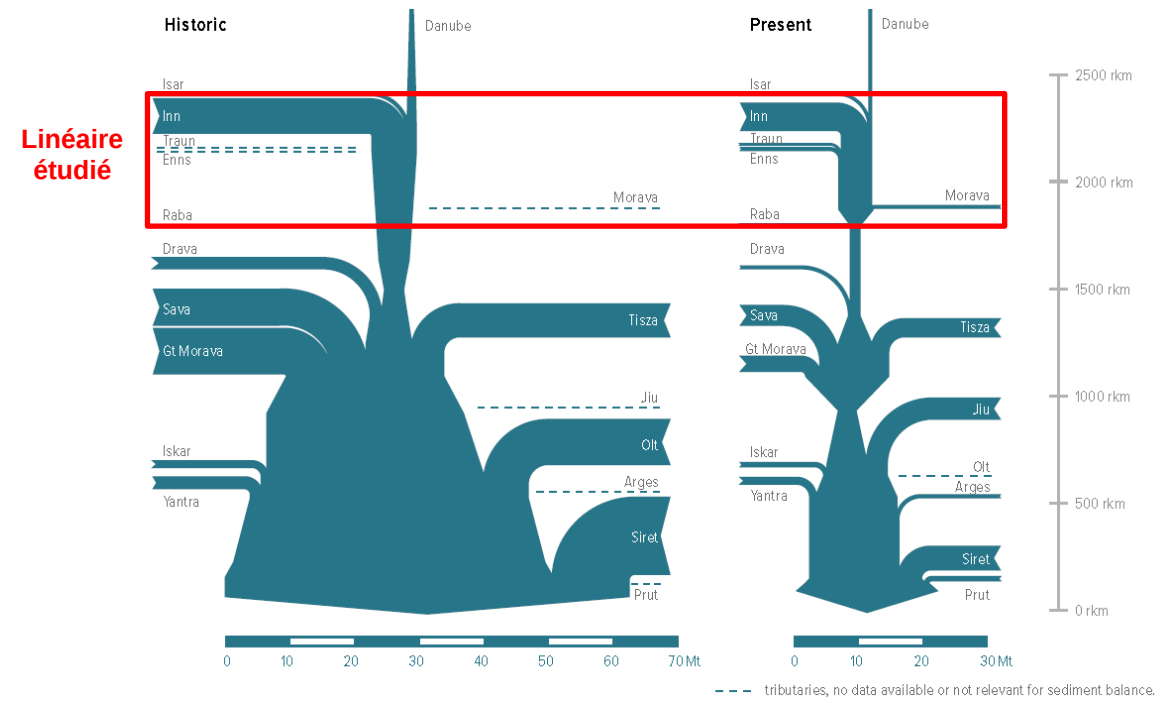


Figure 44 : Flux des MES le long du Danube et ses principaux affluents avant (à gauche) et après (à droite) la construction de barrages (Habersack et al, 2019b)

Pour la charge de fond, les données ne permettent pas d'établir un bilan précis sur l'ensemble du Danube. Toutefois, dans le tronçon étudié, on peut estimer que le transport par charriage avant les barrages marquait une très forte augmentation entre l'amont de l'Inn (seulement 10 000 m³/an) et la traversée de Vienne (de l'ordre de 600 000 m³/an, dont 330 000 m³/an d'apports de l'Inn et 150 000 m³/an de l'Enns) ; les flux étaient très sensibles aux variations de la géomorphologie locale : zones naturellement encaissées (favorables au transit) et zones alluviales à plusieurs chenaux (qui favorisaient la respiration du lit).

Tous ces flux ont été drastiquement réduits avec la création des barrages sur le Danube et ses affluents, mais aussi du fait des extractions qui ont abaissé les pentes d'écoulement dans les retenues. Les apports de l'Inn par exemple sont réduits à seulement 10 000 m³/an (3% des apports initiaux) depuis 1965, du fait du stockage de 80 hm³ de matériaux dans les 5 retenues de sa basse vallée. En amont de Vienne, les flux de charriage seraient maintenant de 260 000 m³/an (43% des apports initiaux). En aval de la centrale de Freudenu à Vienne, le lit s'incise et se fournit par érosion progressive pour retrouver une valeur de 240 000 m³/an à Bratislava. En aval de l'ouvrage de Gabčíkovo, il a été montré que la capacité de charriage avait augmenté de 110 000 m³/an à 330 000 m³/an du fait de la chenalisation du lit.

Les études montrent ainsi la nette dominance des sédiments en suspension le long du Danube (90 à 95%) mais rappellent que c'est la charge de fond qui détermine la morphologie de la rivière, en particulier dans les sections à écoulement libre.

Concernant la granulométrie, le Haut Danube est caractéristique d'une rivière à gravier, avec une forte influence de ses affluents alpin l'Isar et l'Inn (cf. Figure 45 ; à Passau, D50=30 mm et D90=65 mm ; à Vienne, D50=11 mm et D90=40 mm). Dans les retenues, le lit de la rivière est généralement constitué de graviers, puis évolue vers du sable fin et des limons sous l'influence croissante du remous aval. Les fractions de graviers restent présentes dans les sections à écoulement libre, comme en aval de Freudenu et Gabčíkovo. Dans le Danube Moyen hongro-slovaque, le lit passe « brusquement » de graveleux (km 1790) à sableux (km 1520). Plus en aval, et jusque dans le delta, le lit est majoritairement composé de sable fin et grossier, parfois alimenté en graviers par des affluents.

Dans le secteur d'étude, 2 grands secteurs peuvent être distingués et décrits dans les paragraphes suivants :

- **Secteur 1** : en Autriche, en amont et aval (Est) de Vienne : succession de barrages avec retenues, quelques linéaires courants dont celui à l'Est de Vienne (Autriche) jusqu'à Bratislava (Slovaquie) ;
- **Secteur 2** : en Slovaquie / Hongrie, entre Bratislava et Komárno, avec l'ouvrage de Gabčíkovo.

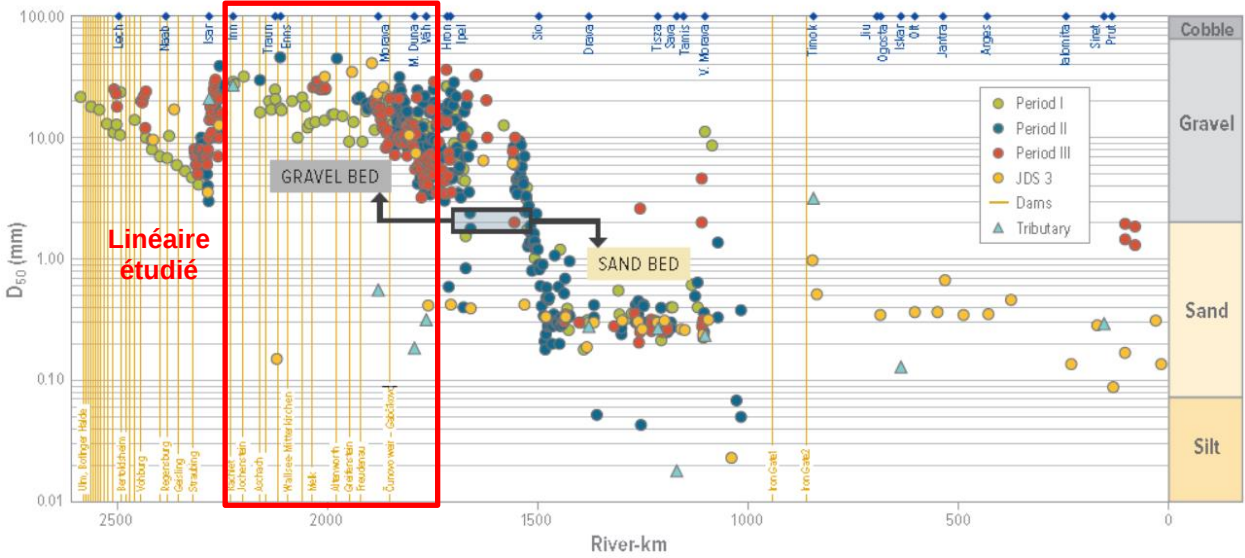


Figure 45 : Profil en long de la granulométrie de surface au fond du lit (Habersack et al, 2019b)



Figure 46 : Le barrage-usine de Freudenau sur le Danube en aval de Vienne (wikipedia)

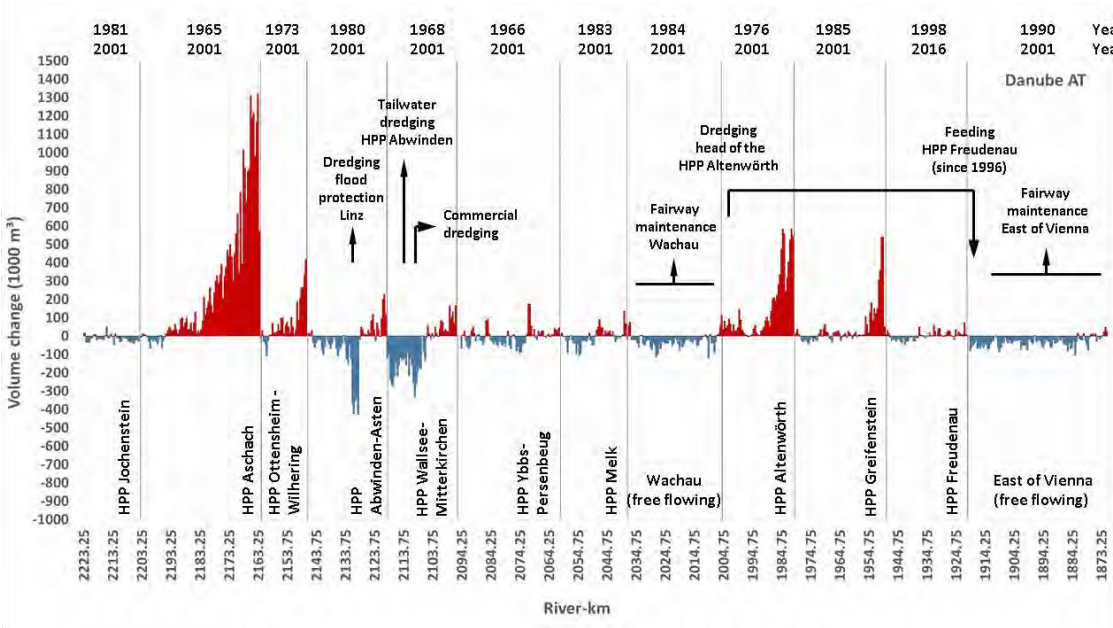
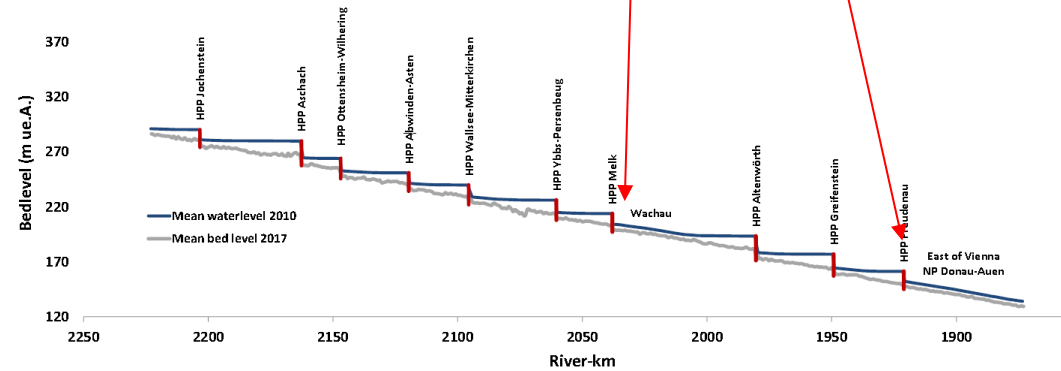
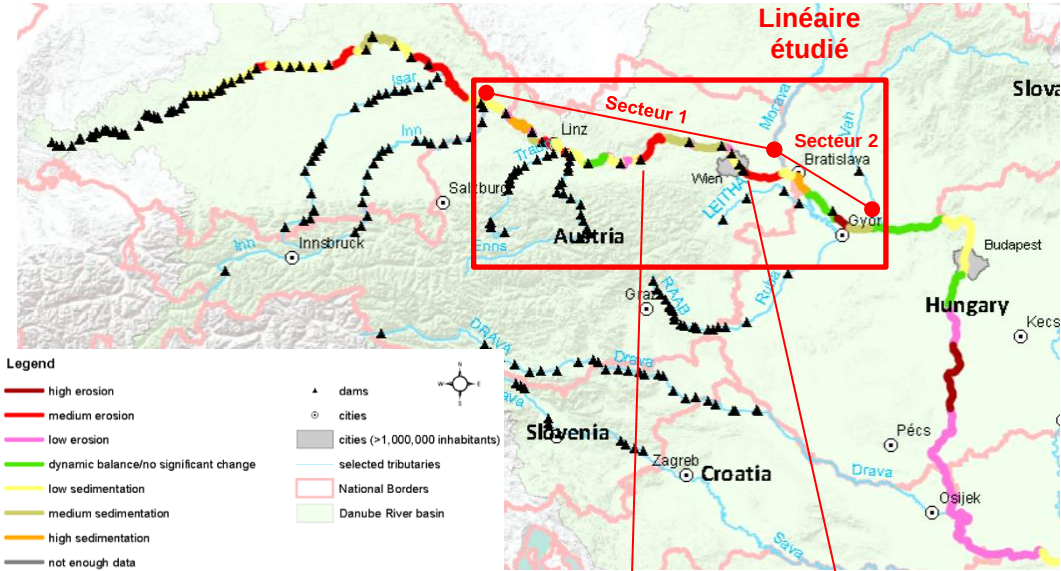


Figure 47 : Dynamique d'érosion et sédimentation en Autriche (WRI, 2019 ; Habersack et al., 2019b)

Secteur 1 : secteur en amont et aval (Est) de Vienne

A partir des éléments de la Figure 47, plusieurs phénomènes sont illustrés :

- 2 linéaires sont en écoulement libre et en incision : Wachau en amont de la retenue d'Altenwörth (pente de 0,33 contre 0,41 ‰ en 1902 ; incision du thalweg de 2 m en moyenne), le linéaire à l'Est de Vienne (0,38 / 0,41 ‰ ; incision du thalweg de 3 m en moyenne, 8 m au maximum ; rythme d'incision de 1 m en 50 ans, 2 cm/an sur 1996-2015, en baisse à 1 cm/an environ sur 2009-2016) ;
- Les différentes retenues sont marquées par des phénomènes de sédimentation, de façon hétérogène selon les ouvrages : le barrage d'Aschach, le plus important en hauteur (15,30 m) et en longueur de remous, est sous l'influence des apports sableux et fins de l'Inn ; le barrage d'Altenwörth, présentant la deuxième chute (15 m), bénéficie des apports des matériaux érodés par érosion progressive dans le secteur de Wachau ;
- l'impact des extractions est bien visibles dans les queues de retenues, notamment celles d'Abwinden-Asten (agglomération de Linz) et Wallsee-Mitterkirchen (confluence de l'Enns et port d'Ennsdorf) où l'on observe des incisions de 2 à 5 m par rapport au profil historique de 1902, et un abaissement de la pente du thalweg (0,27 à 33 ‰ au lieu de 0,45 ‰)

Ces différentes retenues, comme celles du Rhône, ont tendance à sédimenter pour les débits courants et les petites crues, et les crues plus conséquentes favorisent le déstockage.

Par exemple, comme le montre la Figure 49, la retenue d'Aschach a stocké 23 hm³ entre sa mise en eau en 1965 et la crue de 2002 (10 500 m³/s à Vienne), celle-ci ayant déstocké 7 hm³ grâce à une mise en transparence partielle (abaissment de 5 m). Ce déstockage a expliqué 71% des flux de fines en aval du barrage en 2002. La crue de 2013 (11 000 m³/s ≈ Q₁₀₀ / Blöschl et al. 2013) a eu des effets similaires. En complément, dans les années qui ont suivi 2013, il a fallu draguer des dépôts accumulés pendant la crue dans la queue de retenue (km 2190 à 2185 ; Figure 48) afin de rétablir les lignes d'eau et limiter les risques d'inondation. Les sédiments, plutôt grossiers, ont été transférés dans la partie amont de la retenue pour reconstituer des bancs de graviers et des îlots.

Inversement, la retenue d'Ottensheim-Wilhering, située en aval de celle d'Aschach, a subi d'importants dépôts lors des mêmes crues (3,7 hm³ en 2002), qui ont été repris dans les quatre années suivantes (déstockage en aval du barrage de 4,6 hm³).



Figure 48 : Fonds de la retenue d'Aschach suite à la crue de 2002 (WRI, 2019)

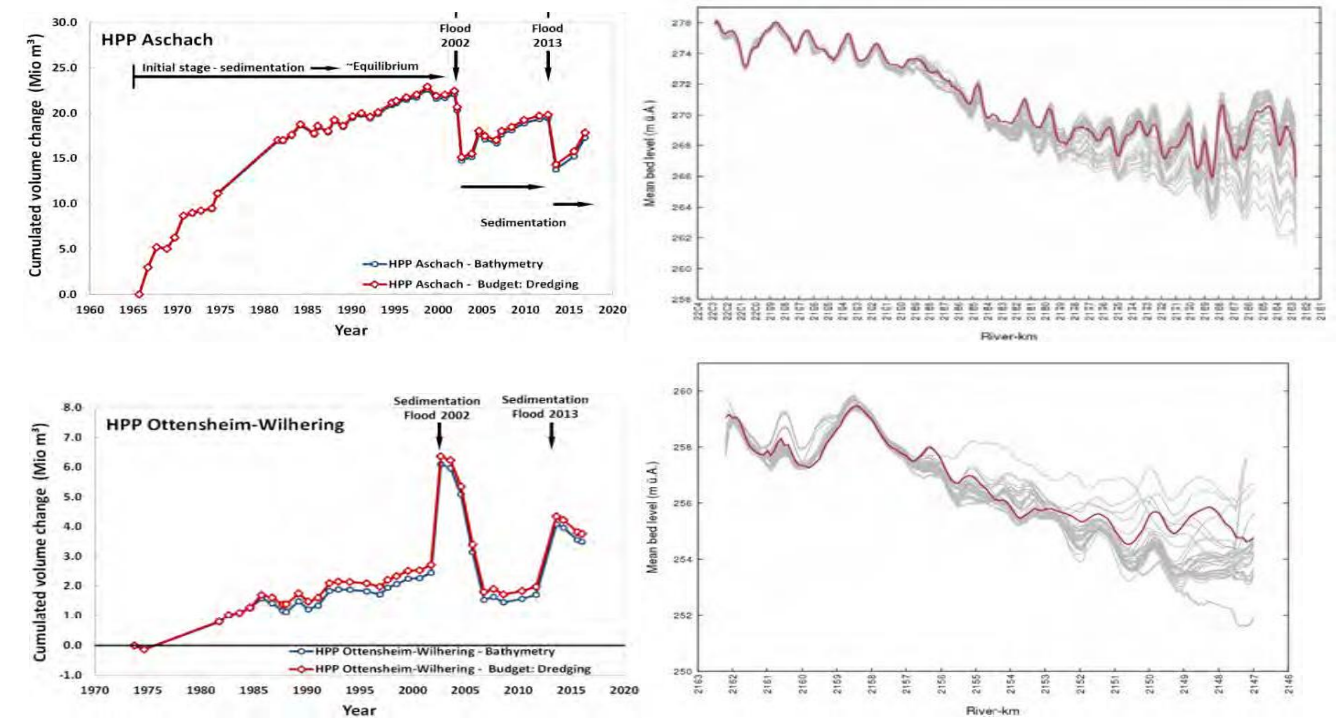


Figure 49 : Bilan de la sédimentation dans les retenues d'Aschach (en haut) et d'Ottensheim-Wilhering (en bas) entre 1965 et 2016. Volumes accumulés (à gauche) et superposition des profils en long du fond (à droite ; en rouge situation actuelle) (Database: VHP and Viadonau ; in WRI, 2019)

Globalement, comme le montre la Figure 50 pour la retenue d'Altenwörth, les accumulations sédimentaires dans les retenues sont avant tout limoneuse (silt) et sableuses (sand). Les graviers sont présents uniquement dans les queues de retenue, avec une tendance globale au grossissement entre les retenues amont et les retenues aval du linéaire autrichien ; les rares flux grossiers se trouvent souvent piégés dans des zones de dragages qui constituent des fosses. Ainsi, globalement, il peut être affirmé qu'il n'y a plus de continuité des sédiments grossiers sur Haut Danube autrichien.

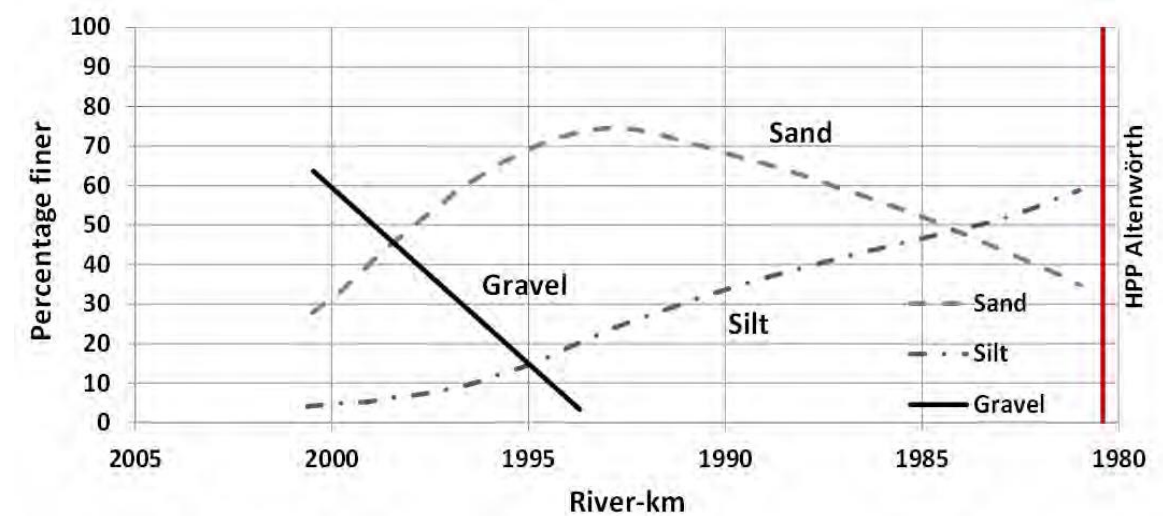


Figure 50 : Composition granulométrique de la retenue d'Altenwörth (Summer and Nachtnebel, 1989 ; in WRI, 2019)

• **Secteur 2 : secteur de Bratislava à Komárno, intégrant l'ouvrage de Gabčíkovo**

Historiquement, ce secteur, à la transition entre le Haut-Danube sub-alpin et le Moyen Danube des plaines, avait développé un hydrosystème unique très dynamique, combinant tresses et chenaux anastomosés, basé sur des flux sédimentaires très importants en fines, sables et graviers (600 000 m³/an en charriage) et une importante capacité de divagation latérale (largeur de 5 km pour le lit en tresse, et jusqu'à 30 km pour les lits anastomosés). Il s'agissait finalement d'un « delta intérieur » du Danube (cf. Figure 43) résultant du remplissage alluvial d'une dépression intra-européenne.

Avec l'aménagement de l'ouvrage de Gabčíkovo entre 1977 et 1992 (Gabčíkovo River Barrage System, GRBS), le fonctionnement actuel peut être distingué selon 5 grands secteurs, avec des évolutions sur 1992-2013 (WRI, 2019) (cf. Figure 51) :

- **Un tronçon à écoulement libre en amont de Bratislava**, avec un charriage actif, alimenté par les réinjections en aval de Freudenu (cf. §. Secteur 1) et les apports de la Morava slovaque (graviers fins et sable).
- **La retenue de l'aménagement de Gabčíkovo** (réservoir de Hrušov), qui favorise la sédimentation : sédiments grossiers dans le bassin supérieur (km 1 873-1 758) et sédiments fins dans le réservoir (km 1 758-1 752) et le canal de dérivation. Le volume total déposé dans la retenue est annoncé à 20 hm³ sur 1992-2013 (950 000 m³/an) ;
- **Le tronçon à écoulement libre du Vieux Danube**, entre le déversoir de Čunovo et la restitution (km 1 810), qui fonctionne en régime réservé (250-600 m³/s) et subit le piégeage des sédiments en amont. Actuellement, le charriage est considéré comme négligeable, et la charge en suspension a été fortement réduite ; en effet, le débit d'équipement de la centrale 5 040 m³/s est très supérieur au module du Danube (2 000 m³/s) ; le débit déclenchant une surverse dans le Vieux Danube (environ 6 000 m³/s) a lieu seulement 3 jours par an (d'après Bačík et al., 2005) ; Le lit principal est incisé de 3 à 5 m (déstockage de 6 hm³ sur 1992-1993, soit près de 300 000 m³/an), a réduit sa pente (0,26 ‰ au lieu de 0,39 ‰) et s'est progressivement déconnecté de ses annexes, et sa faible activité morphodynamique ne produit plus d'évolution sur les périodes récentes ;
- **Le double tronçon à écoulement libre en aval de la restitution** (Haut puis Moyen Danube), qui présente une incision de 2 à 5 m sur 40 km (dont 6 m en moyenne sur les 4 premiers km), un abaissement du niveau d'eau de 2 m, un abaissement de pente de 0,13 ‰ au lieu de 0,30 ‰. En aval, le lit présente une tendance à l'exhaussement, avec basculement de pente, du fait des matériaux déstockés et des apports d'affluents (Vah, Hron, Ipeľ).

Avant aménagements, dans ce secteur à la transition entre le Haut et le Moyen Danube, la granulométrie évoluait naturellement à la baisse entre la confluence avec la Morava (D50=16 mm), l'aval de la restitution (D50=12 mm) et la confluence de la Vah (D50 = 4 à 6 mm).

Avec les aménagements, la granulométrie amont a tendance à augmenter par érosion progressive (D50=28 mm), alors que celles en aval ont tendance à s'affiner (aval restitution D50 = 6 mm). Dans la retenue de Gabčíkovo (réservoir de Hrušov), la sédimentation de fines est majeure (D50=0,04 mm au lieu de 20 mm). Dans le Vieux Danube, la granulométrie d'affine également (D50=9 mm au lieu de 18 mm) et les fonds se colmatent.

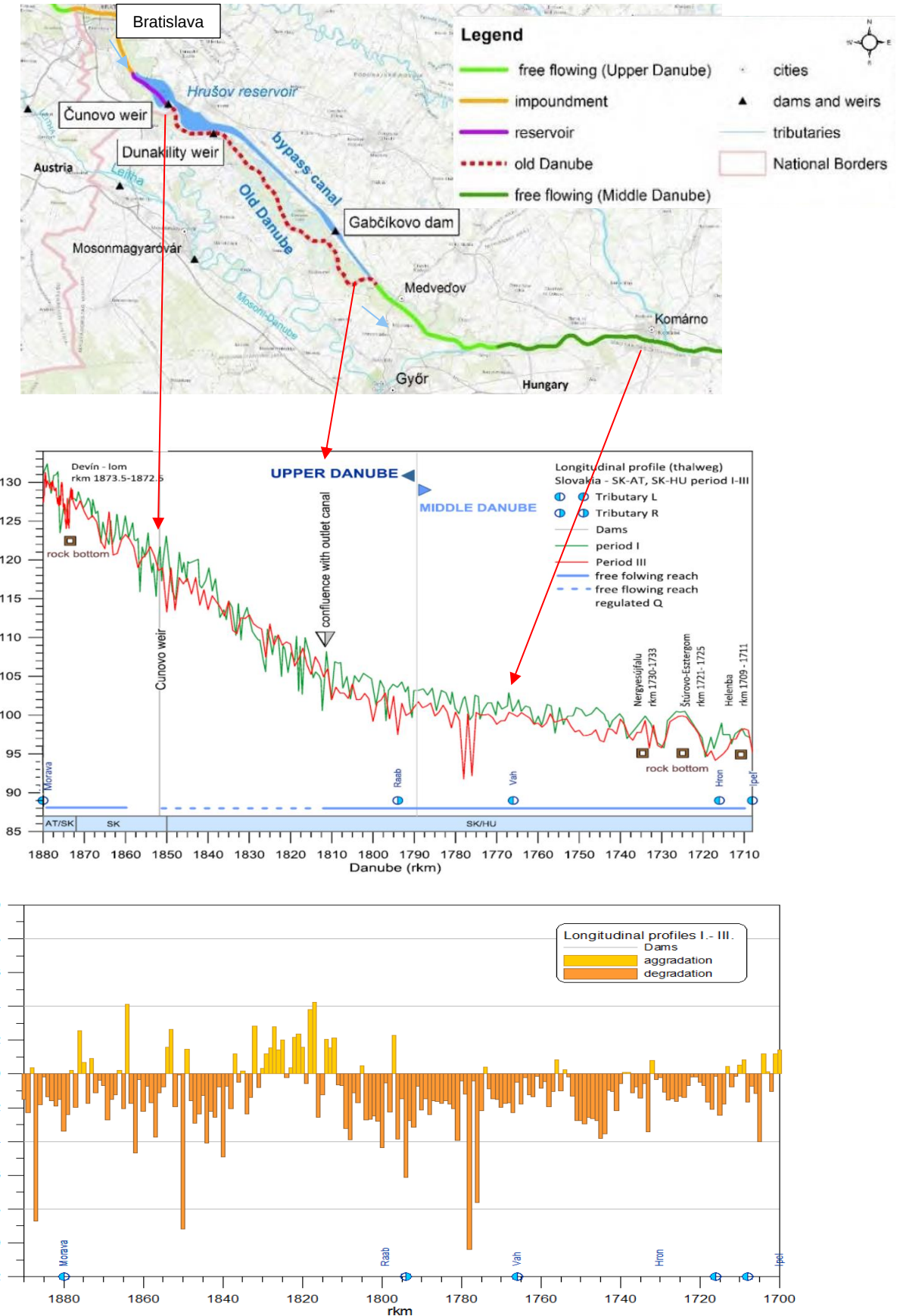


Figure 51 : Dynamique d'érosion et de sédimentation entre Bratislava (km 1870) et Komárno (km 1766) (WRI, 2019 ; Habersack et al., 2019b)

2.3.3 Opérations de gestion et de restauration hydromorphologique

Les opérations de gestion hydrosédimentaire et écomorphologique sur le Danube s'inscrivent dans le Danube River Basin Management Plan (DRBM Plan). Les derniers travaux scientifiques du projet « Danube Sediment Management (DSM) - Restoration of the Sediment Balance in the Danube River » (WRI, 2019 ; Habersack et al., 2019b) fournissent des grandes orientations ainsi que des principes opérationnels qui vont alimenter la mise à jour 2021 du DRBM Plan (équivalent au SDAGE).

Le rapport sur les conseils de gestion (Habersack et al, 2019b) fournit les principales orientations :

- Gouvernance, réglementation, politique de bassin versant :
 - Développement d'un concept de gestion des sédiments à l'échelle du bassin versant,
 - Implication des parties prenantes et planification interdisciplinaire,
 - Amélioration de la réglementation et de la gouvernance,
 - Mesures liées aux bassins versants,
- Amélioration de l'équilibre et de la continuité sédimentaire :
 - Préservation, restauration et amélioration de la continuité sédimentaire et de la morphologie,
 - Développement et mise en œuvre de mesures liées aux sédiments concernant la navigation, l'hydroélectricité et la gestion des risques d'inondation,
 - Réduction des tronçons en excès et en déficit, réinjection dans les secteurs déficitaires
- Réseau de mesures, impacts, suivi :
 - Mise en place d'un réseau harmonisé de surveillance des sédiments et de gestion des données,
 - Prise en compte de la qualité des sédiments et des risques liés aux sédiments,
 - Mise en œuvre adaptative des mesures et suivi d'accompagnement.

En termes de mesures opérationnelles, les rapports du Danube Sediment Management proposent des actions types calibrées pour répondre aux enjeux d'érosion d'une part, et de sédimentation d'autre part. Ces mesures sont résumées par les deux diagrammes ci-dessous (les mesures conformes à la DCE sont mises en évidence par un trait bleu). Ces mesures s'appliquent à 3 échelles : bassin, tronçon, site de gestion.

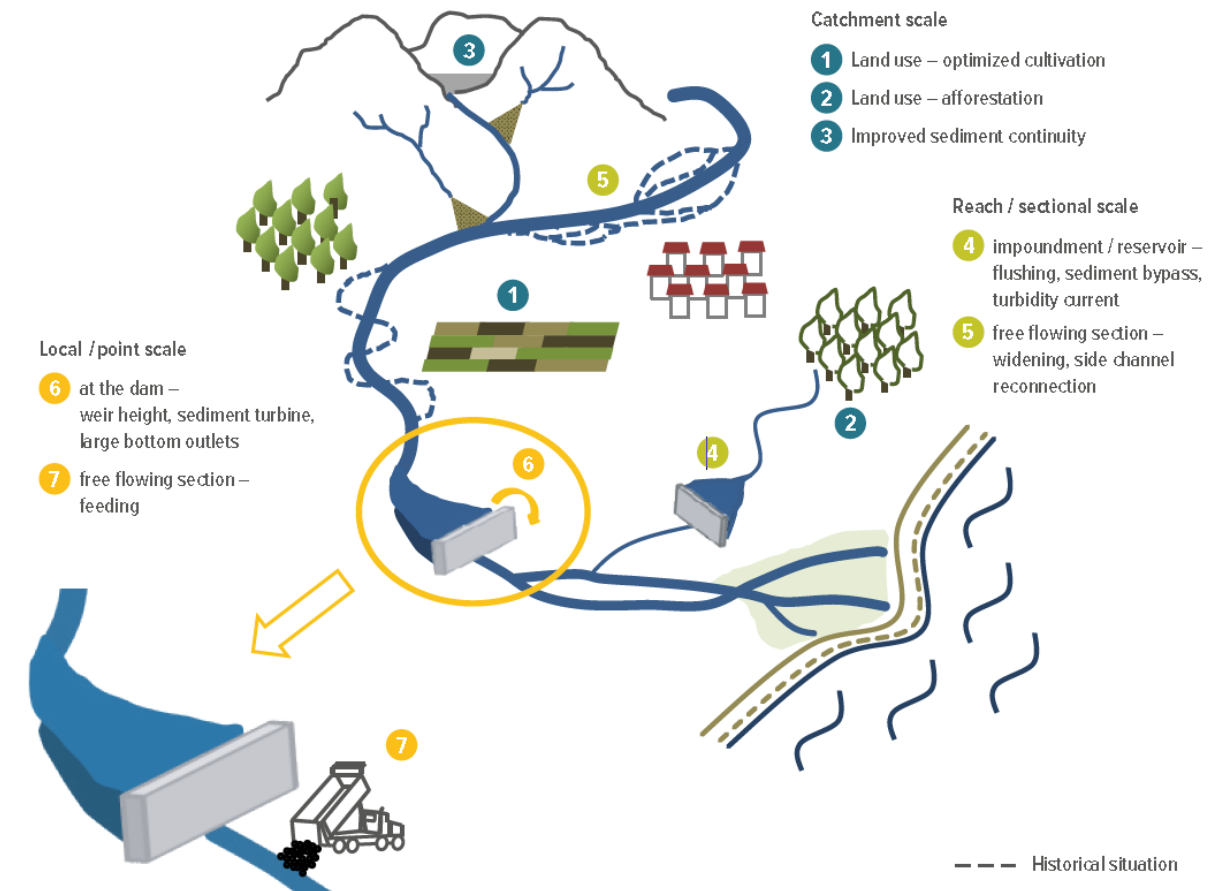
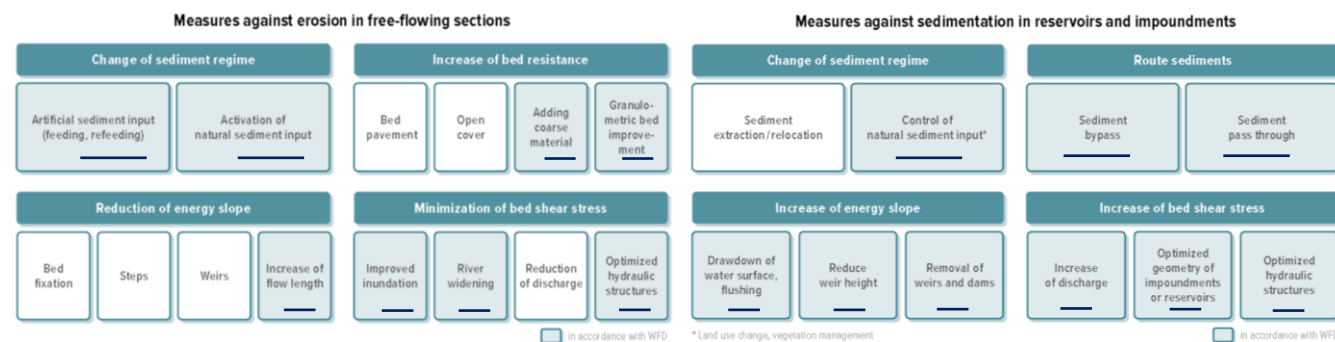


Figure 52 : Mesures opérationnelles types pour les enjeux d'érosion et de sédimentation, et localisation (bassin, tronçon, site de gestion) (Habersack et al., 2019b)

Dragage des sédiments fins et mise en transparence des barrages

Les données du Danube Sediment Management ne sont pas détaillées sur les volumes et la localisation des dragages en sédiments fins, ni sur l'optimisation des mises en transparence lors des crues ou des chasses de barrages.

Dans le linéaire autrichien (secteur 1), au vu de résultats tels que présentés sur la Figure 49, il semble qu'un certain niveau de sédimentation ait été accepté dans les retenues et que celles-ci aient bénéficié de déstockages lors des crues de 2002 et 2013 grâce à des procédures de mise en transparence ; ces mesures semblent rester toutefois partielles puisqu'en 2002, le barrage d'Aschach était abaissé de 5 m (pour une hauteur de chute nominale de 15 m). L'absence de crue majeure dans le futur pourrait favoriser la sédimentation dans la retenue et remettre en exergue ces enjeux.

Dans le linéaire hongro-slovaque (secteur 2), les dragages de sédiments fins, sauf peut-être localement dans le chenal de navigation, ne semblent pas être une priorité à ce jour, et la sédimentation fine se poursuit dans la retenue de l'aménagement de Gabčíkovo (réservoir de Hrušov) (cf. Figure 53).

Depuis 2006, tous les sédiments, quelle que soit leur nature, sont remis au fleuve. Les mesures proposées dans le manuel de gestion sédimentaire (Habersack et al, 2019c) recommandent pour les sédiments fins un transfert en aval d'un barrage (cf. Figure 54) ou dans le chenal principal, afin d'être repris par l'écoulement principal.

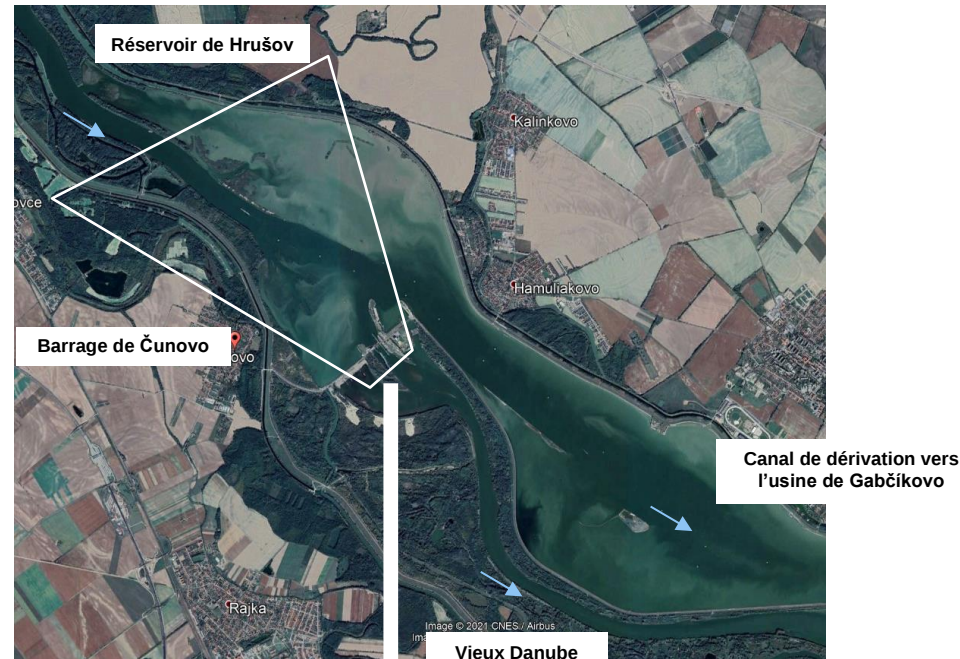
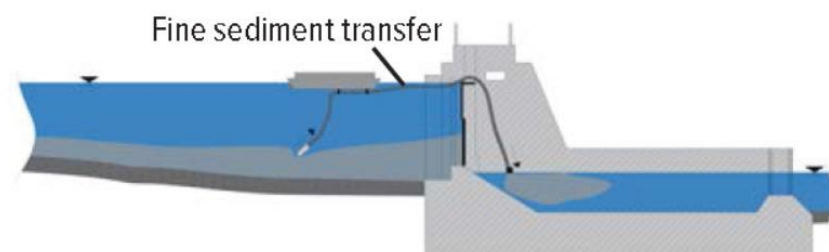


Figure 53 : Sédimentation dans la retenue et le canal de dérivation de l'aménagement de Gabčíkovo (Google Earth, 2021 / haut ; Sebestova, 2018 / bas)



Wet dredging (hydrosuction) and transferring fine sediments to the downstream reach

Figure 54 : Transfert de sédiments fins à la drague aspiratrice en aval d'un barrage (Habersack et al., 2019c)

► Dragage des sédiments grossiers

Comme mentionné précédemment, les extractions de sédiments grossiers ont été nombreuses par le passé. Dans le linéaire autrichien en amont de Vienne, les actions actuelles restent motivées par l'entretien du chenal navigable et la protection contre les inondations. Les volumes de dragages ont progressivement diminué, puis à partir des années 1995-2000, au lieu d'être exportés, ils ont été réutilisés pour construire des structures alluviales (Figure 55, en haut ; cf. §. « Actions de réinjection sédimentaire »). Dans la queue de retenue d'Altenwörth, qui reçoit les apports de la section libre de Wachau, les matériaux dragués (3,8 hm³ dragués entre 1998 et 2016, soit 210 000 m³/an) ne sont plus exportés mais transférés par barge en aval de Freudenu (à 80 km en aval), afin d'alimenter la section courante à l'Est de Vienne (Figure 55, en bas).

Dans ce linéaire en aval de Vienne, concerné essentiellement par l'entretien du chenal de navigation, une évolution des pratiques est également mise en évidence : de 1996 à 2005, environ 50% des sédiments dragués étaient réinjectés dans le fleuve, 30% étaient extraits et 20% étaient utilisés pour la construction de structures naturelles en gravier (Figure 55, au milieu ; d'après Simoner, 2018 ; in WRI, 2019). À partir de 2006, tous les matériaux de dragage, estimés entre 290 000 à 330 000 m³/an pour la période postérieure à 2001, ont été réinjectés dans le fleuve (Figure 55, en bas) ; cf. §. « Actions de réinjection sédimentaire »). En 2017, une plage de dépôt a été aménagée au km 1 888 pour stopper les matériaux grossiers avant qu'ils n'entrent dans le remous de la retenue de Gabčíkovo.

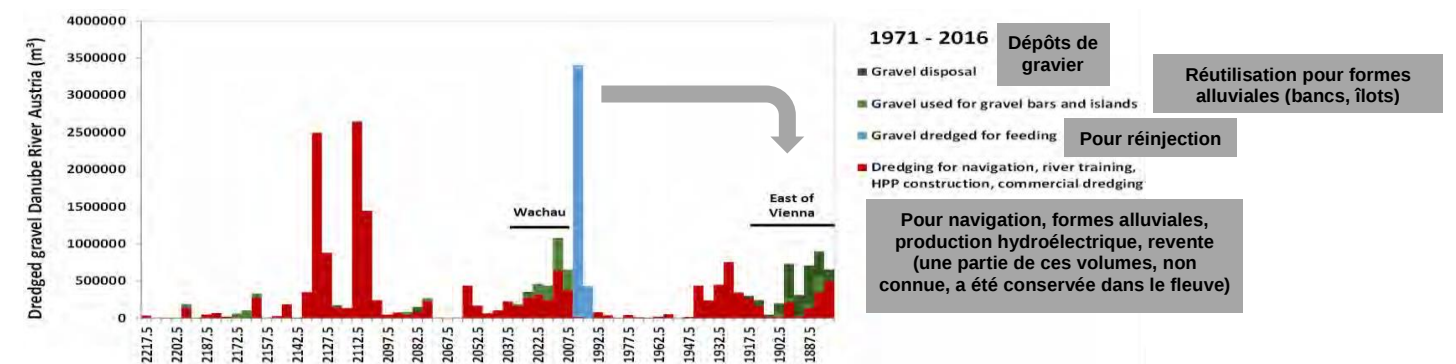
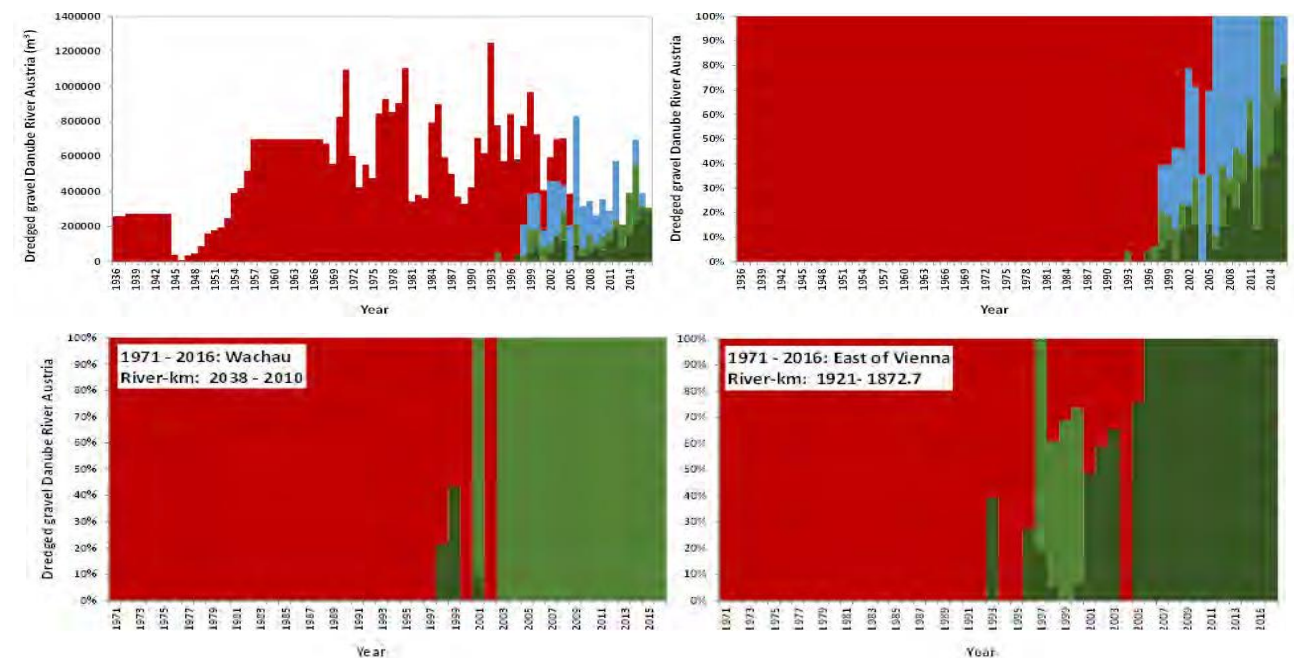


Figure 55 : Chroniques et profil en long des volumes de dragages de graviers dans le Danube autrichien, classés en fonction de la destination des sédiments : en haut, chronique pour l'ensemble des sites (1936-2016) ; au milieu, chronique pour les sections libres de Wachau et Est Vienne (1971-2016) ; en bas, profil en long pour l'ensemble des sites (1971-2016) (WRI, 2019)

► Actions de réinjection sédimentaire

Ces actions de réinjection ont lieu sur deux types de sites décrits précédemment :

- Dans les retenues situées en amont de Vienne**, les volumes de dragage sont allés en décroissant au cours du temps. Depuis que les sédiments ne sont plus exportés, les matériaux ont été réutilisés pour constituer des formes alluviales (bancs, îles) sur les marges de la retenue, avec un double objectif : 1) amélioration du transfert des sédiments en queue de retenue par réduction de la largeur du lit et augmentation des forces tractrices ; 2) amélioration de la valeur écologique du fleuve par la restauration d'annexes (d'après WRI, 2019 ; Habersack et al, 2019c ; cf. exemple retenue d'Aschach / cf. Figure 56).

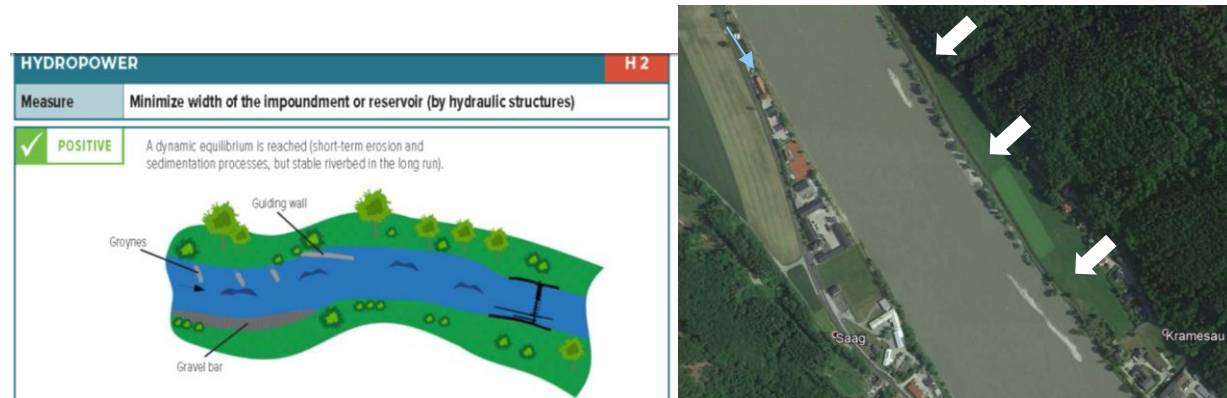


Figure 56 : Exemples de formes alluviales aménagées en queue de retenue à partir de matériaux graveleux dragués (fiche action Habersack et al., 2019c ; Google Earth, 2021)

- Dans le linéaire en aval de la centrale de Freudenu (Est de Vienne)**, les actions de réinjection (« gravel feeding » ou « gravel nourishment ») sont réalisées en permanence par la société hydroélectrique VERBUND depuis 1996 (la centrale a été mise en service en 1997) du fait du déficit sédimentaire dans ce linéaire courant et de l'incision qui en découle. Les matériaux de réinjection proviennent de deux sources (cf. Figure 47) :
 - Des matériaux issus des travaux de dragage en queue de retenue d'Altenwörth (km 2 003 à km 1 999,5)** ; ceux-ci sont dragués puis réinjectés sous l'ouvrage de Freudenu, plus de 80 km en aval (km 1 921 rkm à 1 910) après transport par barge. Les volumes étaient d'environ 186 000 m³/an entre 1996 et 2017 ; ce montant a été récemment porté à 235 000 m³/an (WRI, 2019). Remarque : cette source de matériaux sera probablement amenée à se tarir à mesure que l'érosion dans la section de Wachau diminuera (par effet de pavage) ;
 - Des matériaux issus du même linéaire sous la centrale de Freudenu (km 1 921) jusqu'à la confluence avec la Morava (km 1 880)**. En effet, malgré l'incision, les formes alluviales qui se développent dans le lit sont contraignantes pour la navigation et nécessitent des dragages d'entretien de la profondeur de mouillage (2 m dans ce secteur). Depuis 2006, tous les matériaux de dragage ont été remis au fleuve, d'abord vers l'aval, puis à partir de 2009 vers l'amont du site de dragage ; en 2015, les sédiments étaient réinjectés 11 km en amont pour maintenir les sédiments plus longtemps dans le système (cf. Figure 57). Avec l'aménagement de la plage de dépôt au km 1888 en 2017 en amont du remous de Gabčíkovo, les sédiments dragués sont désormais transportés à environ 20 km en amont, sous l'ouvrage de Freudenu (km 1908). Le système fonctionne donc globalement en boucle fermée (hors sédiments fins du matériel initial ou issus de l'abrasion) ; un tel fonctionnement permettra une adaptation au tarissement de la source issue de la queue de retenue d'Altenwörth.

La réalimentation en gravier en aval de Freudenu a des effets bénéfiques : au cours de la période 1996-2010, les apports de 193 000 m³/an ont réduit le taux d'érosion d'environ 1,9 cm/an sur les 40 km en aval de la centrale. De même, de 2009 à 2017, les données sont respectivement de 175 000 m³/an et 1,5 cm/an sur 47 km. La différence entre les deux valeurs provient principalement des différentes quantités de gravier alimentées par an et des différentes longueurs du cours d'eau à l'étude (BMNT, 2018 ; in WRI, 2019).

Aucune action de réinjection sédimentaire ne semble envisagée dans le Vieux Danube de Gabčíkovo en aval du barrage de Cunovo. La pertinence de telle réinjection serait à préciser compte tenu du débit d'équipement de la centrale qui ne permet en moyenne que 3 jours de déversés par an.

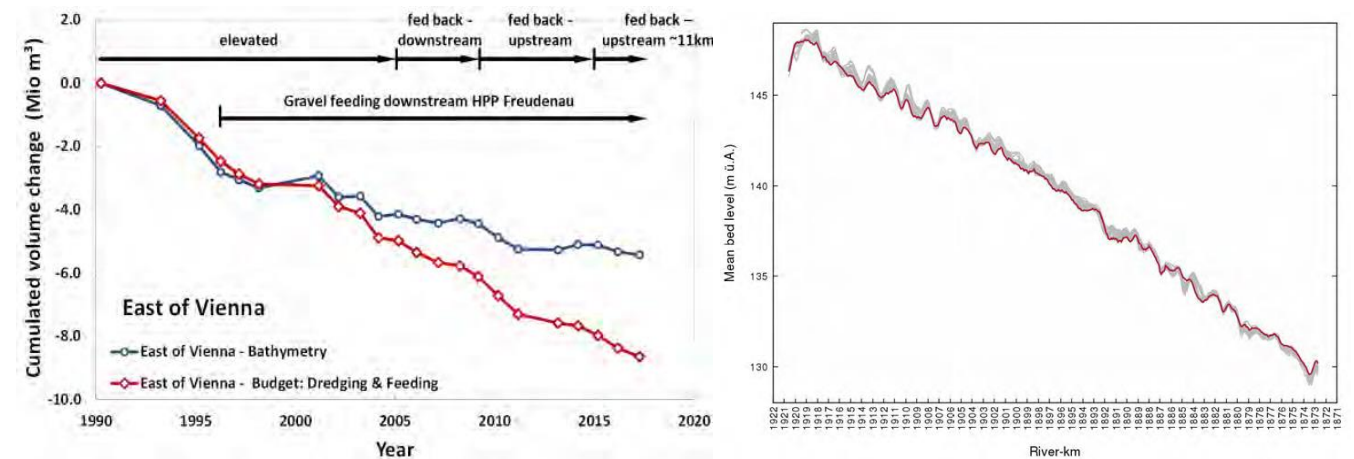


Figure 57 : Gauche : déficit cumulé du Danube à l'est de Vienne entre 1990 et 2017. Droite: Evolution des fonds moyens entre 1990 et 2017 (en rouge : situation actuelle) (source Viadonau ; in WRI, 2019)

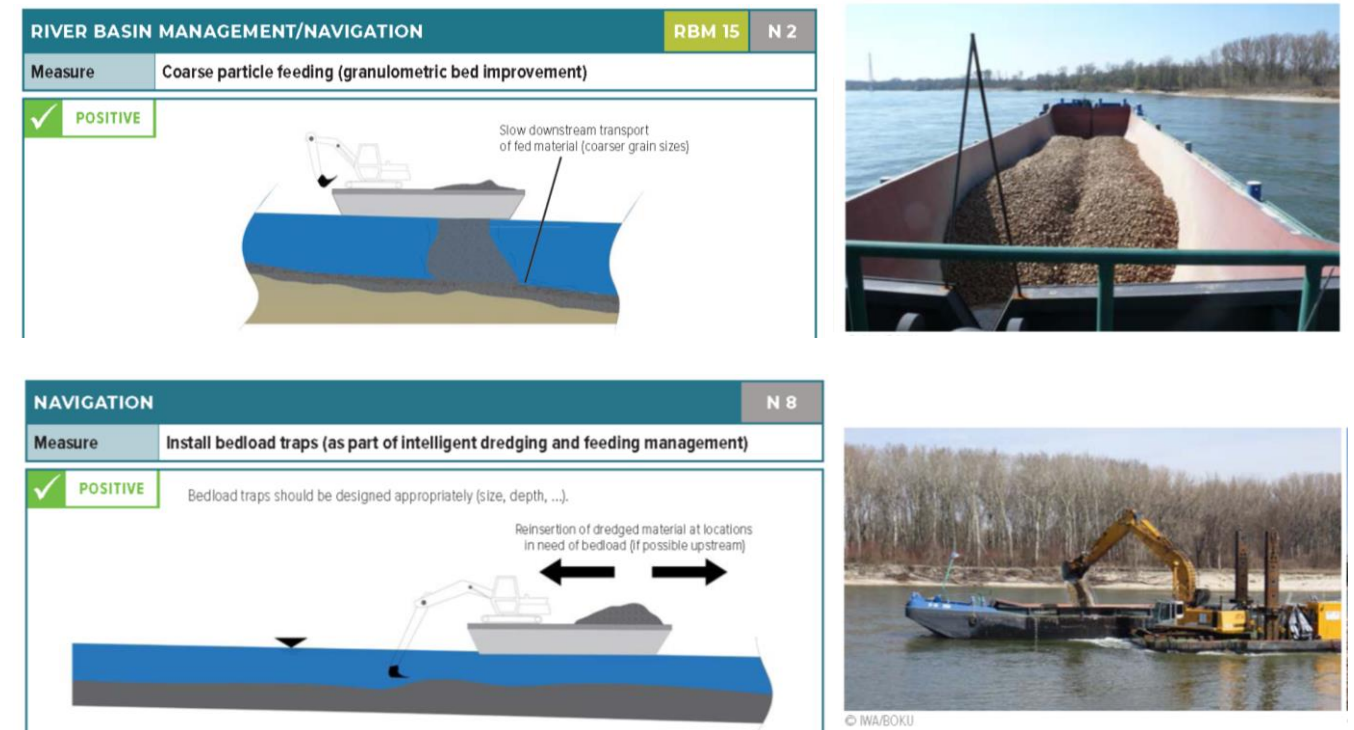


Figure 58 : Exemples d'actions de réinjection sédimentaire par clapage (haut) et de plage de dépôt pour dragage et réinjection plus en amont (bas) (fiche action Habersack et al., 2019c)

► Actions intégrées de restauration hydroécomorphologique en aval de Vienne

Au-delà des actions de réinjection vues précédemment, le linéaire en aval de Vienne, qui correspond au « Danube Floodplain National Park », fait l'objet d'un programme de gestion globale et intégrée (« Integrated River Engineering Project Danube East of Vienna »), identifié comme prioritaire au niveau de la Commission Européenne (Trans-European Transport Network, PP18) (Toegel, 2011). Ce programme, qui comprend plusieurs mesures complémentaires, avec une forte composante écologique, a été déclenché car la stabilité du lit de la rivière ne pouvait être obtenue par la seule mesure de réinjection sédimentaire initiée en 1996.

Ainsi, le programme est conçu pour répondre aux principaux objectifs suivants :

- 1) stabiliser les niveaux des eaux de surface et souterraines,
- 2) maintenir et améliorer les habitats dans les plaines inondables et milieux annexes,
- 3) améliorer l'infrastructure des voies navigables et minimiser les coûts d'entretien.

Les mesures mises en œuvre sont basées sur : la gestion intégrée des sédiments, l'aménagement de formes alluviales optimisées pour la rivière, la reconnexion de chenaux latéraux, l'élimination de la protection des berges et la protection contre les affouillements. Au final, toutes ces mesures visent à empêcher un approfondissement irréversible du lit, à réduire la capacité de transport du chenal principal (objectif visé de 30 000-50 000 m³/an au lieu de 300 000-400 000 m³/an), à maintenir les sédiments le plus longtemps possible dans le système, et à améliorer l'état écologique du milieu alluvial (Jungwirth, 2008 ; Toegel, 2011 ; Viadonau, 2018, in WRI, 2019).

Plusieurs projets pilotes ont été mis en œuvre par Viadonau (société autrichienne des voies navigables), au cours des 20 dernières années (cf. Figure 59) (Jungwirth, 2008 ; Toegl, 2011 ; Ragingen, 2018) :

- Restauration des berges** à Thurnhausen (2006), où la protection des berges a été supprimée sur une longueur de 2,85 km et où le Danube a été autorisé à éroder et à s'élargir à nouveau ;
- Reconfiguration et optimisation du champ d'épis** (forme modifiée, espacement plus grand et hauteur réduite) près de Witzelsdorf (à environ km 1 892,5), combinée à la réduction de la hauteur de l'épi de guidage amont et au retrait de la protection des berges (2009-2015) ;
- Reconnexion de chenaux latéraux**, par exemple : les bras latéraux de Haslau-Regelsbrunn (1998), Orth (2002), Schönau (2004), Johler (2014), Spittelauer (2020).
- Reconfiguration et optimisation du champ d'épis** (forme modifiée, espacement plus grand et hauteur réduite) près de Bad Deutsch-Altenburg (entre km 1 887,5 et 1 884,5), combinée à la suppression de la protection des berges (commencé en 2009, finalisé en 2017). **Une partie de ce projet était un test dit « d'amélioration granulométrique du lit »,** sur la base duquel des graviers plus grossiers (mais toujours dans le spectre granulométrique naturel) ont été placés sur le lit de la rivière pour réduire la capacité de transport de la charge de lit de la rivière (cf. Figure 60). Ces graviers triés et grossiers (Dm=52 mm, variant de 40 à 70 mm, soit de l'ordre de D90) ont été posés par clapage en nappe d'une épaisseur moyenne 0,25 m. La composition granulométrique du lit s'est probablement adaptée après mélange ; les résultats de suivi sont en attente.

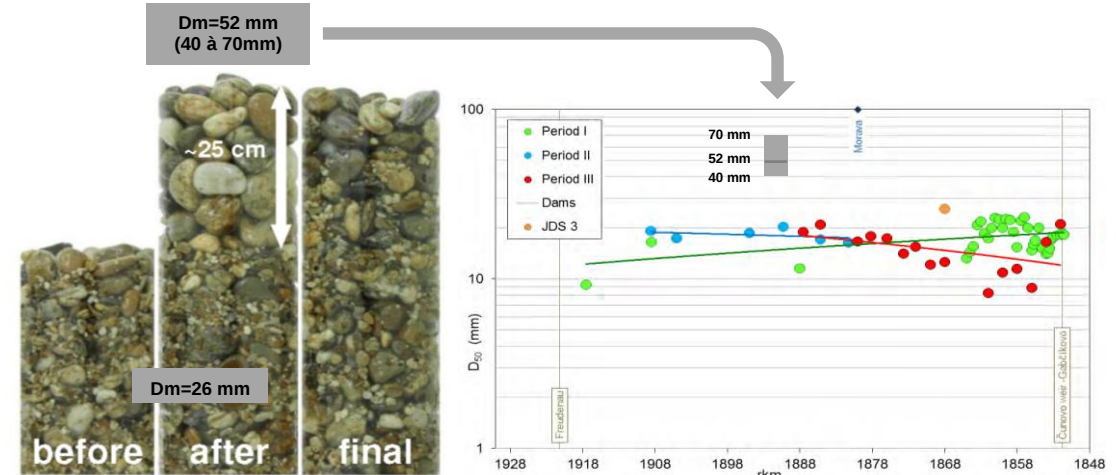


Figure 60 : Droite : principe de nappage du lit avec une couche de 0,25 m d'éléments grossiers (Toegl, 2011) ; gauche : granulométrie réinjectée comparée avec celle en place (d'après WRI, 2019)

L'influence des deux projets pilotes de modification des champs d'épis a été évaluée par Pessenlehner (2016). Pour le projet pilote de Bad Deutsch-Altenburg (PP BDA), mis en œuvre à partir de 2009, un exhaussement du lit a été observé entre 2001 et 2015, le rehaussement du lit a été de 2,2 cm/an alors que le reste du lit s'incisait de 0,6 cm/an (cf. Figure 61 ; droite). Dans le tronçon de Witzelsdorf, des variations du niveau de lit plus élevées peuvent être observées (cf. Figure 61 ; gauche). A noter que l'influence du remous de Gabčíkovo se fait sentir en aval du km 1 880. Il a ainsi été conclu que les mesures de restauration étaient efficaces et complémentaires aux actions de réinjection menées en début de linéaire.

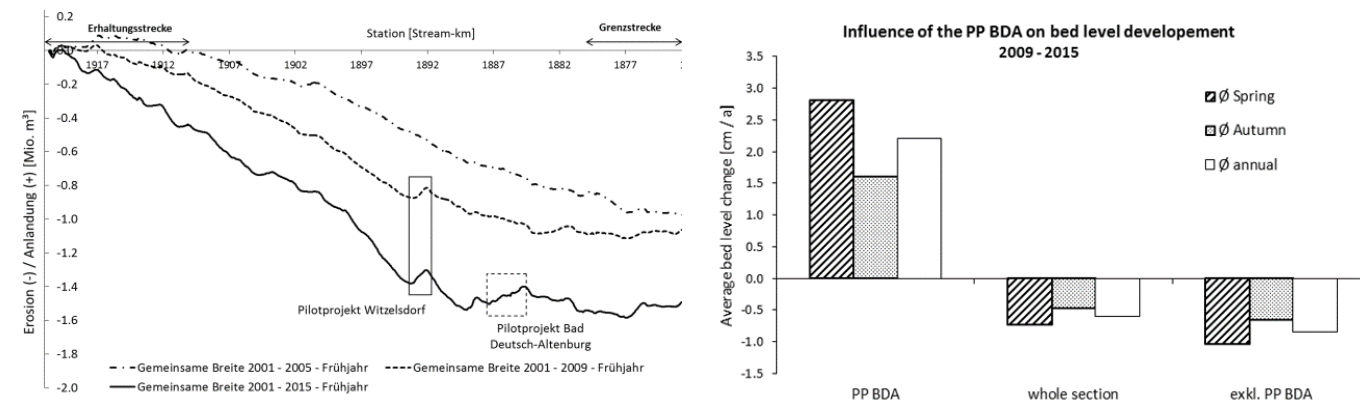


Figure 61 : Gauche : évolution cumulée du lit en aval de Freudenau entre 2001 et 2015 (Habersack et al., 2017) ; droite : influence du projet pilote Bad Deutsch-Altenburg sur l'altimétrie du lit (Pessenlehner et al., 2016) (in WRI, 2019)



Figure 59 : Localisation des mesures complémentaires à la réinjection de sédiment dans le linéaire Est de Vienne (Radinger, 2018)

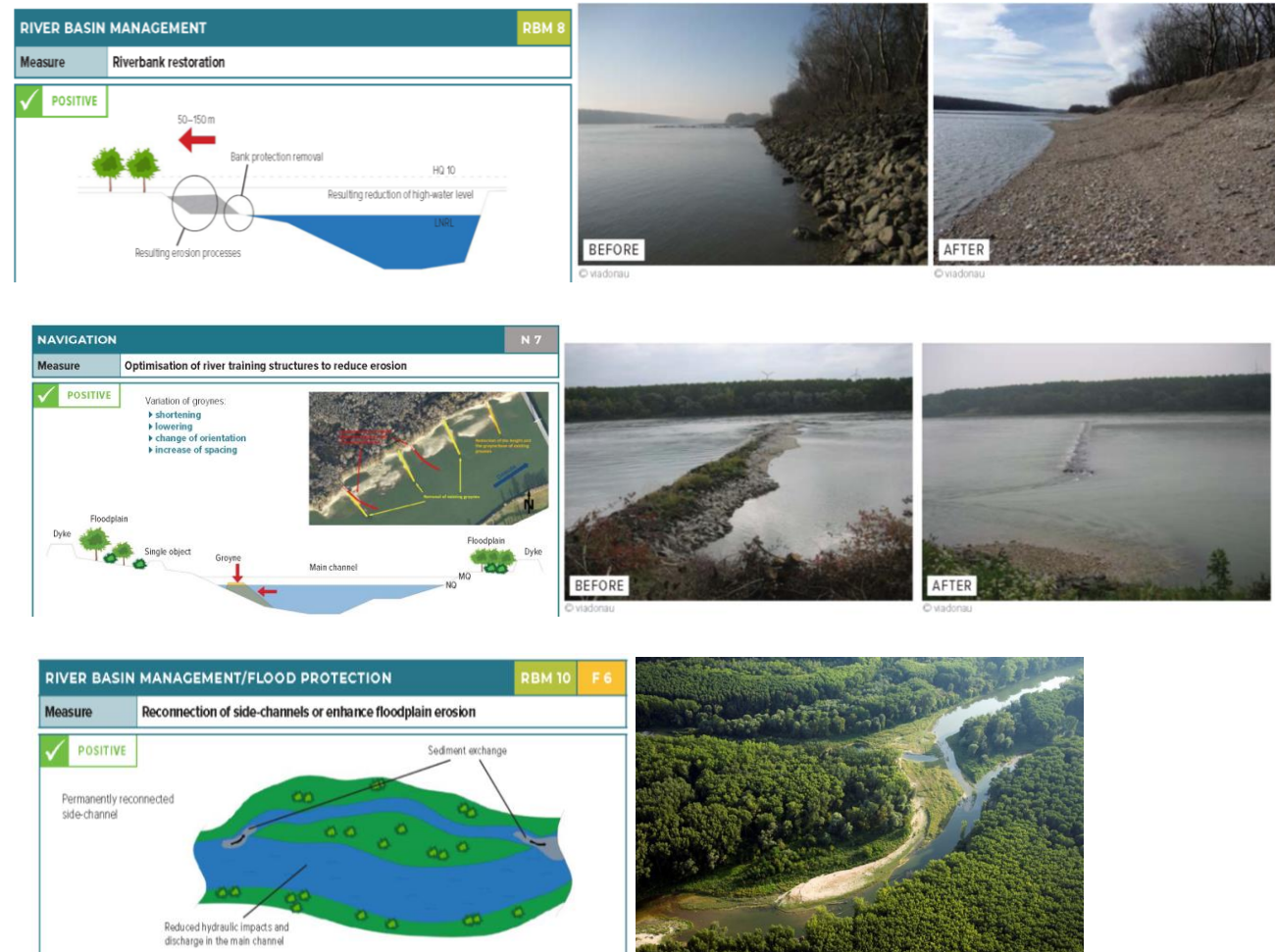


Figure 62 : Exemples de suppression de protection de berge (haut), de reconfiguration d'épis (milieu) et de restauration de bras secondaire (bas) (fiches action Habersack et al., 2019c ; Radinger, 2018)

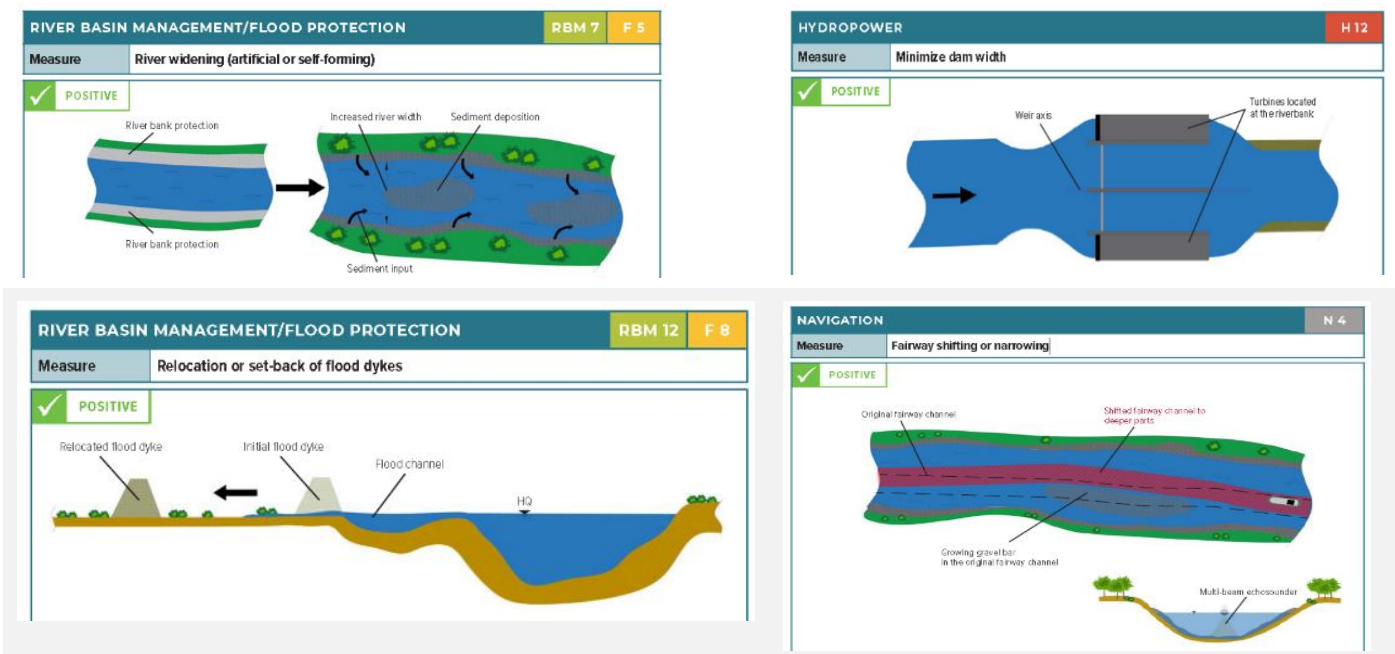


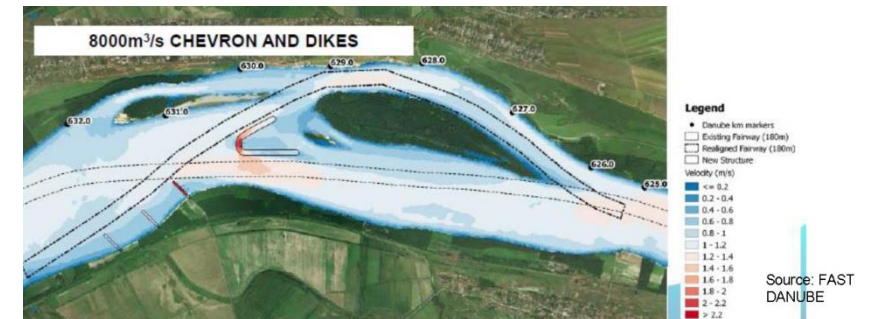
Figure 63 : Exemples d'autres mesures contre l'érosion (à gauche) et contre la sédimentation (à droite) (fiches action Habersack et al., 2019c ; Radinger, 2018)

L'ensemble du programme intégré de restauration du Danube à l'Est de Vienne a été initié dans les années 2000 pour être réalisé dans les années 2010 (Toegl, 2011 ; complété avec Radinger, 2018).

- 1996 : Premières réinjections sédimentaires ;
- 2002 : Création d'un comité de pilotage interdisciplinaire ;
- 2002-2004 : Examen des solutions alternatives et variantes ;
- 2003-2004 : Procédure de modération pour assurer la participation du public ;
- 2004-2008 : Essais sur modèle ;
- 1998-2017 : Projets pilotes : 6 projets à l'est de Vienne finalisés en 2017 ;
- 2006 : Évaluation de l'impact sur l'environnement (autorisation générale EIE) ;
- 2008 : Concertation publique de l'EIE ; 2009 : Instruction réglementaire ;
- 2009-2020 : période de travaux.

On notera également d'autres types de mesures qu'il n'est pas possible de décrire en détail dans ce rapport (Habersack et al, 2019c) :

- Mesures contre l'érosion (à gauche) : élargissement du lit, recul de digues, restauration de zones d'expansion de crues, etc. ;
- Mesures contre la sédimentation (Figure 63 ; à droite et ci-contre) : réduction de la largeur d'un barrage, réduction du chenal de navigation, déplacement du chenal de navigation.



2.3.4 Bilan du retour d'expérience

Bilan des acteurs concernés

- Commission du Danube : la Commission du Danube est une organisation internationale intergouvernementale instituée par la Convention relative au régime de la navigation sur le Danube signée à Belgrade le 18 août 1948. Les objectifs fondamentaux de l'activité de la Commission du Danube sont d'assurer et de développer la libre navigation sur le Danube pour les bateaux marchands battant pavillon de tous les Etats en conformité avec les intérêts et les droits souverains des Etats parties à la Convention de Belgrade, ainsi que de resserrer et de développer les liens économiques et culturels de ces Etats entre eux et avec les autres pays (<https://www.danubecommission.org>) ;
- International Commission for the Protection of the Danube River (ICPDR). En 1991, les pays du bassin créent le Programme Environnement du Bassin versant du Danube (EPDRB), et en 1994 est signée la Convention pour la Protection du Danube, qui crée l'ICPDR, soutenue par l'Union Européenne, la Banque Mondiale et le Fonds pour l'Environnement Mondial, avec 3 objectifs principaux : assurer une gestion durable et équitable de la ressource ; permettre le contrôle des risques d'inondation et de pollution accidentelle ; réduire la charge polluante débouchant sur la Mer Noire ;
- Pour le projet de restauration intégrée en Autriche, en aval de Vienne :
 - Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) : Ministère Fédéral du Transport, de l'Innovation et de la Technologie ;
 - Via Donau : société autrichienne des voies navigables, qui assure la mise en œuvre des dragages et des actions de restauration ;
- Gestionnaire(s) des principaux ouvrages hydroélectriques :
 - Usines d'Aschach, Altenwörth, Freudenau, etc. : VERBUND-Austrian Hydropower AG ;
 - Usine de Gabčíkovo : compagnie publique Slovenske Elektrarne à l'actionnaire privé majoritaire, la société italienne Enel SpA.

► Synthèse comparative

- Principaux points de ressemblance :
 - des pentes similaires : 0,3 à 0,5 ‰ pour 0,2 à 0,8 ‰ pour le Rhône ;
 - des aménagements historiques et enjeux forts pour la navigation et l'hydroélectricité ;
 - des ouvrages au fil de l'eau (amont Vienne) similaires à la série Verbois / Chancy-Pougny, Génissiat, Seyssel ;
 - un ouvrage en feston (Gabčíkovo) avec barrage de dérivation, canal usinier, et hydrologie influencée ;
 - des sections de Danube total en écoulement libre (Wachau, Est Vienne) ;
 - des flux grossiers diversifiés (fins, sables, grossiers), issus du piémont alpin ;
 - des affluents avec forte charge grossière historique, limitée aux fines et au sable ;
 - des enjeux écologiques forts : zones humides, bras secondaires, continuité écologique, etc. ;
- Principaux points de différence :
 - de grands linéaires en débit total et présentant une incision active, y compris en linéaire navigable (Est Vienne) ;
 - une longue série de 10 ouvrages au fil de l'eau en amont de Vienne.

► Actions pouvant être utiles à la réflexion sur la gestion sédimentaire du fleuve Rhône

- Enjeux de connaissance :
 - Programme de recherche et suivi (Interreg, JDS, etc.),
 - Panel complet de données sédimentaires ;
 - Bathymétrie complète et précise ;
 - Données granulométriques à plusieurs périodes ;
 - Schéma directeur sur l'ensemble du bassin versant ;
- Gestion sédimentaire :
 - Flux de sédiments fins gérés par chasse et par l'effet des crues (2002, 2013) ;
 - Sédiments grossiers dragués pour les enjeux de navigation et d'inondabilité, et réinjectés en amont dans la même retenue (boucle en circuit fermé) ;
- Actions de restauration :
 - Gestion globale et intégrée dans le linéaire en déficit à l'Est de Vienne (environ 48 km), intégrant : équilibre et continuité sédimentaire, nappe alluviale, milieux naturels aquatiques, humides et terrestres, connectivités latérales, risques d'inondation, navigation, hydroélectricité, etc. ;
 - Mesures contre l'érosion : réélargissement du lit, suppression d'épis ou de digues submersibles, réorientation/modification d'épis, de protections de berge, réouverture de bras secondaires restaurés, recul de digues, restauration de zones d'expansion de crues, etc. ;
 - Mesures contre la sédimentation : réduction de la largeur du lit (en queue de retenue notamment), réduction de la largeur d'un barrage, réduction du chenal de navigation, déplacement du chenal de navigation ;
 - Réinjections sédimentaires :
 - Principe général de « gestion optimisée et intelligente » des stocks de sédiments grossiers ;
 - fourniture en matériaux : par réutilisation de matériaux dragués dans des zones excédentaires (en queue de retenue : Altenwörth, Est Vienne) ;
 - transport des matériaux : transport sur barge (jusqu'à 80 km), vers l'aval ou vers l'amont (en boucle fermée, au sein de la même retenue – exemple : Ashasch – ou d'un linéaire de Danube courant – exemple : aval Vienne) ;

- modalités de recharge : par clapage et nappage en fond de lit à partir de barges à clapet ;
- rythme de réinjection : volumes importants (235 000 m³/an sur le site Est Vienne) et fréquence annuelle.

2.3.5 Collecte bibliographique pour le Danube

► Principales sources de données pour la collecte bibliographique

- Contacts : Helmut HABERSACK (University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna) ;
- Webographie : <http://www.viadonau.org> ; www.initiativesfleuves.org, <http://www.danube-culture.org> ; <https://fr.wikipedia.org>, <http://www.interreg-danube.eu/approved-projects/danubersediment>, etc.

► Références bibliographiques utilisées pour le Danube

Bačík M., Borodajkevychová M., Capeková Z., Holubová K., Martinka M., Škoda P., Turbek J. (2005). Hydrological and morphological changes in the Danube). Danube Monitoring Scientific Conference Publication, Slovak Section.

Blöschl G., Nester T., Komma J., Parajka J., and Perdigão R. A. P. (2013). *The June 2013 flood in the Upper Danube Basin, and comparisons with the 2002, 1954 and 1899 floods*. Hydrology and Earth System Sciences.

Habersack H., Baranya S., Holubová K., Vartolomei F., Bakonyi P. (2019). *The importance of sediments for a sustainable Danube river basin management*. 2019a. DanubeSediment - Danube Sediment Management – Restoration of the Sediment Balance in the Danube River. April 2019, Vienna

Habersack H., Baranya S., Holubová K., Vartolomei F., Skiba H., Babic-Mladenovic M., Cibilic A., Schwarz U., Krapesch M., Gmeiner Ph., Haimann M. (2019b). *Danube Sediment Management Guidance*. Output 6.1 of the Interreg Danube Transnational Project DanubeSediment co-funded by the European Commission, Vienna.

Habersack H., Baranya S., Holubová K., Vartolomei F., Skiba H., Schwarz U., Krapesch M., Gmeiner Ph., Haimann M. (2019c). *Sediment Manual for Stakeholders*. Output 6.2 of the Interreg Danube Transnational Project DanubeSediment co-funded by the European Commission, Vienna.

ICPDR (2013). *Floods in June 2013 in the Danube River Basins. Brief overview of key events and lessons learned*. Hydrology and Earth System Sciences

ICPDR (2015). *The Danube River Basin District Management Plan. Part A – Basin-wide overview / Annex / Maps*. Hydrology and Earth System Sciences

Initiatives pour l'avenir des grands fleuves. *Fiches synoptiques. Fleuves du monde. Le Danube*.

Jungwirth M. J. (2008). *The “Integrated River Engineering Project for the Danube East of Vienna” and its effects on the ecology of the river-floodplain system*.

Radlinger M. (2018). *Wasserbautechnische Maßnahmen an der Donau zwischen Wien und Bratislava*.

Sebestova, Z. (2018). DaReM project – Danube Rehabilitation Measures. NETLIPSE Meeting. Bratislava,

Toegl, R. (2011). *Integrated River Engineering Project Danube East of Vienna*. Via Donau

Water Research Institute (WRI) & project partners (BME, BOKU, OVF, NARW, NIHW, LfU, NIMH, EAEMDR, HRVODE, IzVRS, TUM, JCI, Plovput) (2019). *Long-term Morphological Development of the Danube in Relation to the Sediment Balance*. DanubeSediment. Restoration of the Sediment Balance in the Danube River

2.4 Cours d'eau complémentaires

2.4.1 Columbia river : de North Bonneville à l'Océan Pacifique (Lower Columbia River)-

► Présentation générale de la Columbia River

La Columbia River est un fleuve nord-américain dont le bassin versant couvre près de 670 000 km² sur deux états : les États-Unis et le Canada. Son cours principal s'étend sur plus de 2 000 km, des Montagnes Rocheuses jusqu'à l'océan Pacifique. Parmi ces affluents, la Snake River est le plus important et draine près de 40 % du bassin versant de la Columbia.

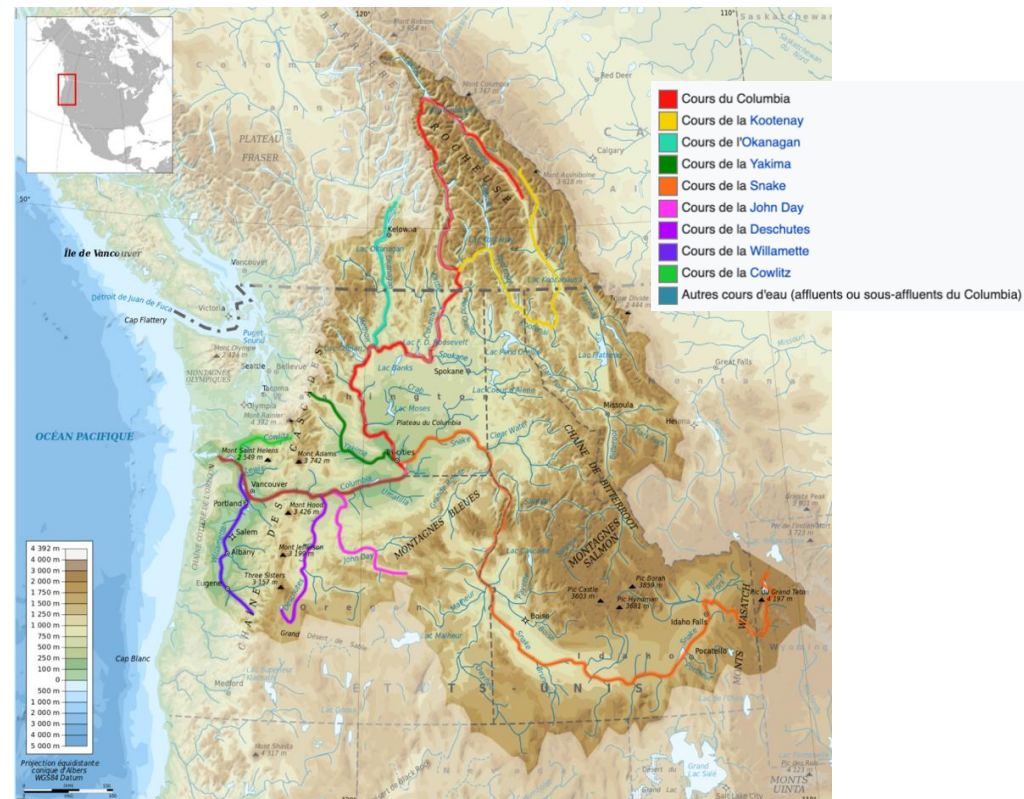


Figure 64 : Bassin versant de la Columbia River (Bourrichon/Wikipédia, 2010)

La Columbia river présente un régime nival avec un maximum hydrologique centré sur mai-juin. Ses débits sont, avec un module de 7 500 m³/s (max = 12 000 m³/s en juin ; min = 2 945 m³/s en octobre) au nord de Portland (station de The Dalles soit 91 % du bassin), sans commune mesure avec ceux du Rhône.

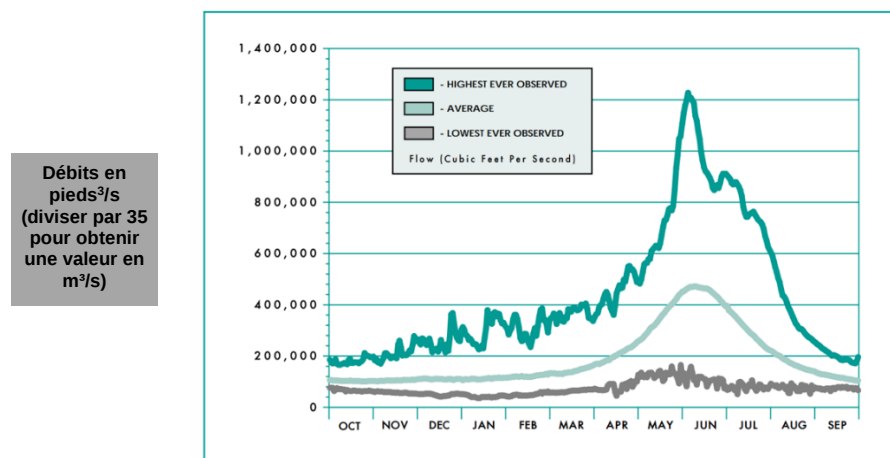


Figure 65 : Débits mensuels moyen, maximum et minimum à la station de Dalles, Oregon (BPA, 2001)



Figure 66 : Principaux barrages dans le bassin de la Columbia River (BPA, 2001)

Comme pour le Rhône, certains aménagements hydroélectriques ont été pensés de pair avec l'irrigation : c'est le cas, par exemple, du barrage de Grand Coulee qui a permis, dans le cadre du Columbia Basin Project, la mise en valeur d'environ 2 700 km² de terres rendues ainsi arables. Sur l'ensemble du bassin, 2,95 millions d'ha sont irrigués. L'hydroélectricité et le bas coût de l'énergie ainsi produite a aussi permis l'émergence d'une puissante industrie d'aluminium (40 % de production états-unienne et jusqu'à 17 % de la production mondiale). Enfin, le fleuve traverse sur près de 80 km le site du laboratoire national de Hanford, immense complexe nucléaire où était produit du plutonium, et où, à son apogée, ont fonctionné jusqu'à 9 réacteurs nucléaires.

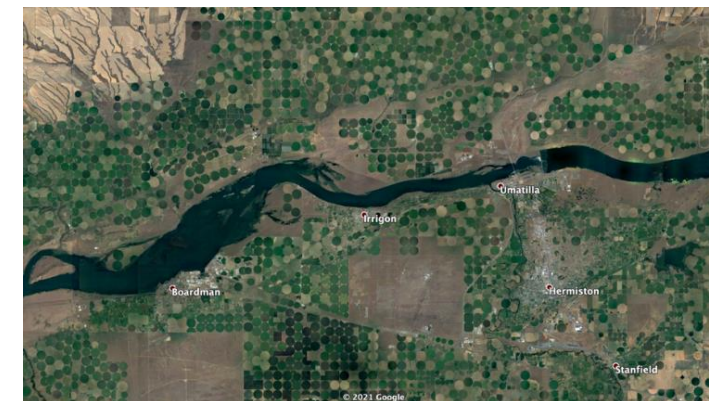


Figure 67 : Irrigation en amont des gorges de la Columbia River (GoogleEarth, 2016)

Certains de ces aménagements ont permis la navigation sur le fleuve jusqu'à Portland pour les cargos océaniques et Lewiston pour les barges fluviales. En revanche, l'absence d'écluse sur les parties hautes du bassin rend le fleuve non navigable. La navigation a été très tôt un enjeu sur la Columbia River et la voie fluviale revêt aujourd'hui une importance nationale. A titre d'exemple, elle représente 40 % des exportations de blé de États-Unis, 40 000 emplois lui sont directement liées, et 12 000 navires passent annuellement par l'embouchure de la Columbia River.

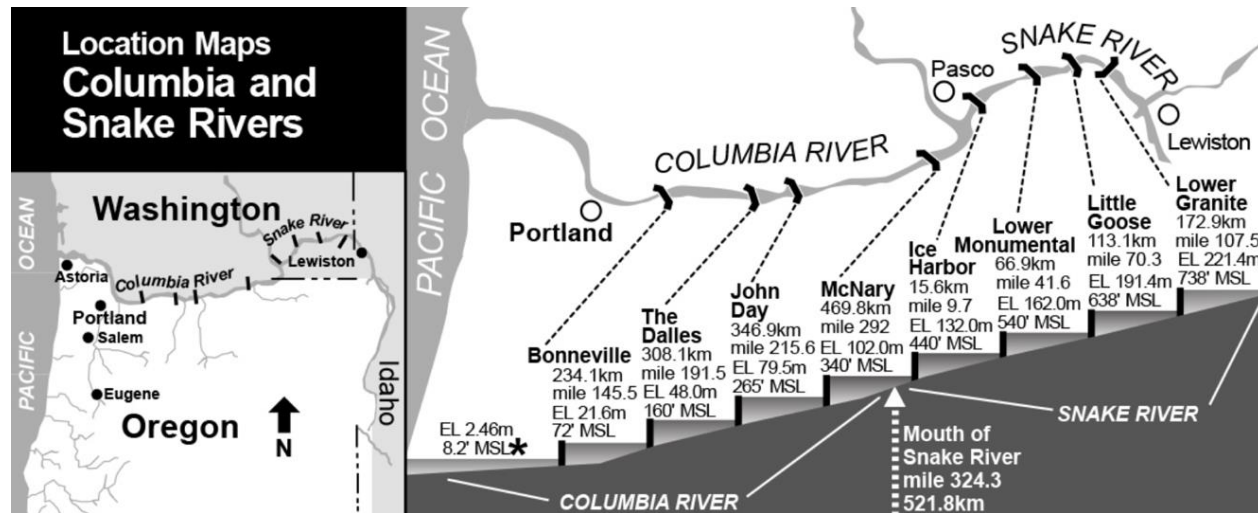


Figure 68 : La voie navigable de la Columbia et Snake Rivers du Pacifique à Lewison (US Army Corps of Engineers)

Ainsi, aucun tronçon de la Columbia ne regroupe l'ensemble des éléments caractéristiques du Rhône retenus pour notre sélection (hydrographie, navigation commerciale, exploitation hydroélectrique, transport solide grossière, ...). Toutefois, bien que présentant des proportions bien plus importantes que le Rhône, le cours aval (à l'aval de North Bonneville, appelé également la Lower Columbia River) présente des similitudes intéressantes quant à certaines problématiques rhodaniennes, notamment celles relatives aux dragages, aux pollutions et à mise en place d'opération de restauration.

► Fonctionnement hydrosédimentaire général du tronçon d'étude

La Lower Columbia River transporte des sédiments fins par suspension et une charge sableuse par charriage. La relation entre débits liquides et débits solides a été déterminée sur la base de plusieurs jaugeages solides réalisés par l'USGS dans les années 1960 au niveau de la ville de Vancouver (Sherwood, 1990).

Sur le tronçon d'étude, l'hydrologie naturelle a été largement modifiée en raison des grands réservoirs localisés sur les tronçons amont. Ces changements portent aussi bien que le débit annuel moyen, qui a diminué de 16,5 % entre la période 1879-1899 et 1945-2004 (passant de 6 320 m³/s à 5 370 m³/s à la station de The Dalles), que sur le changement des caractéristiques (Q moyen, Q max) des crues printanières. Une analyse fine de ces évolutions (Naik et Jay, 2011) montre que les facteurs anthropiques (prélèvement pour l'irrigation) sont responsables pour moitié de ces changements. L'autre facteur explicatif de ces évolutions étant les changements climatiques (avec notamment une forte influence d'El Niño / Southern Oscillation (ENSO)).

Sur la base de ces données hydrologiques et de la relation débits liquides/solides, il est possible d'affirmer qu'historiquement (1879-1899), la Columbia River transportait annuellement 14 Mt (Sherwood, 1990) à 20 Mt (Naik et Jay, 2011) de matériel sédimentaire. Ce volume a été divisé par deux pour la période couvrant la seconde moitié du 20^{ème} siècle, avec, dans cette diminution, une large influence des évolutions climatiques. Les apports moyens calculés entre 1970 et 2004 sont de 7,6 Mt/an. La non-linéarité de la relation entre débits liquides et solides implique une très forte réduction des apports sédimentaires : une baisse de 7 à 9 % des apports liquides naturel (sans aménagement) implique une réduction de 24 à 31% des flux sableux.

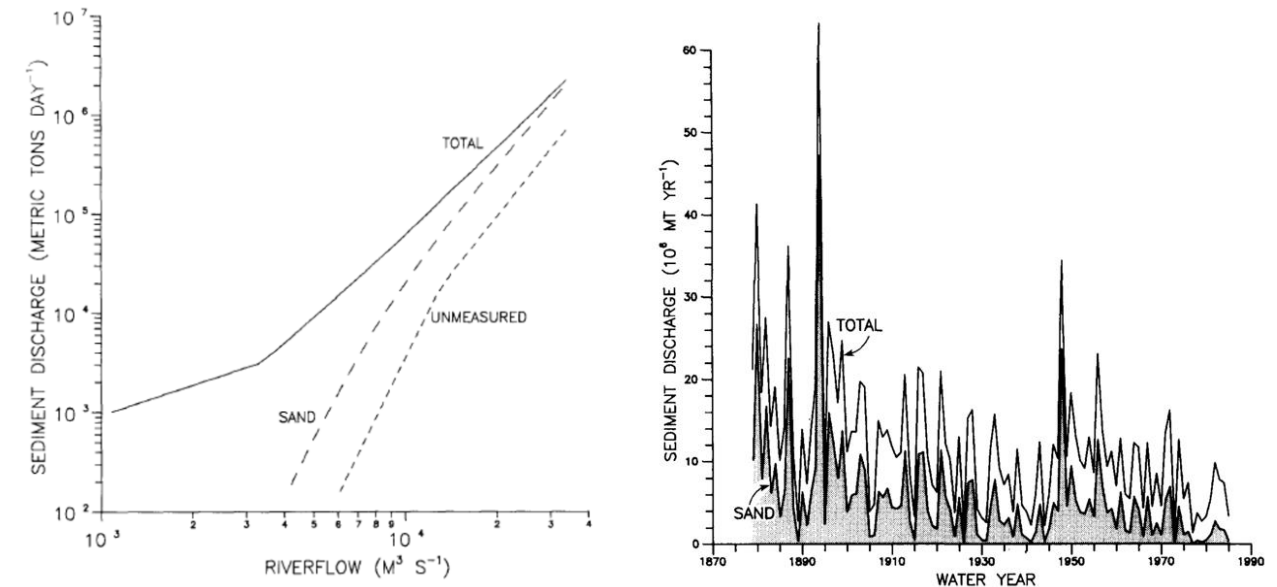


Figure 69 : Relation entre Q liquide et Q solide et chronique des Q solides (Sherwood, 1990)

La zone estuarienne de la Columbia River connaît donc une diminution importante de ces apports solides. Si les évolutions des conditions naturelles expliquent une partie de cette réduction, le piégeage de la charge solide par dans des réservoirs n'est toujours pas clairement évalué.

► Opérations de gestion et de restauration hydromorphologique

• Aménagement et entretien de la voie fluviale

Les premiers travaux visant aménager la voie fluviale ont porté à la fois sur le passage des rapides, où les premières écluses ont été installées dès la fin du 19^e s., à Cascades Rapids par exemple (1896) en amont du barrage de Bonneville. La zone estuarienne a aussi très tôt été aménagée par un système de jetées. La jetée Sud a été construite entre 1885 et 1895 pour ces 7 premiers kilomètres, puis a été prolongé de 3,4 km supplémentaires en 1903. La jetée Nord, quant à elle, a été construite à partir de 1913. L'embouchure de la Columbia a ainsi été réduite en largeur de 9,6 à 3,2 kilomètres. Le système visant à améliorer les conditions de mouillage a été complété en 1939 par la construction d'une troisième jetée (appelée « jetée A »).



Figure 70 : Rapides localisées au niveau de Bridge of Gods en amont du barrage de Bonneville (US Army Corps & Engineers 1928, in O'Connors et Burns, 2011)

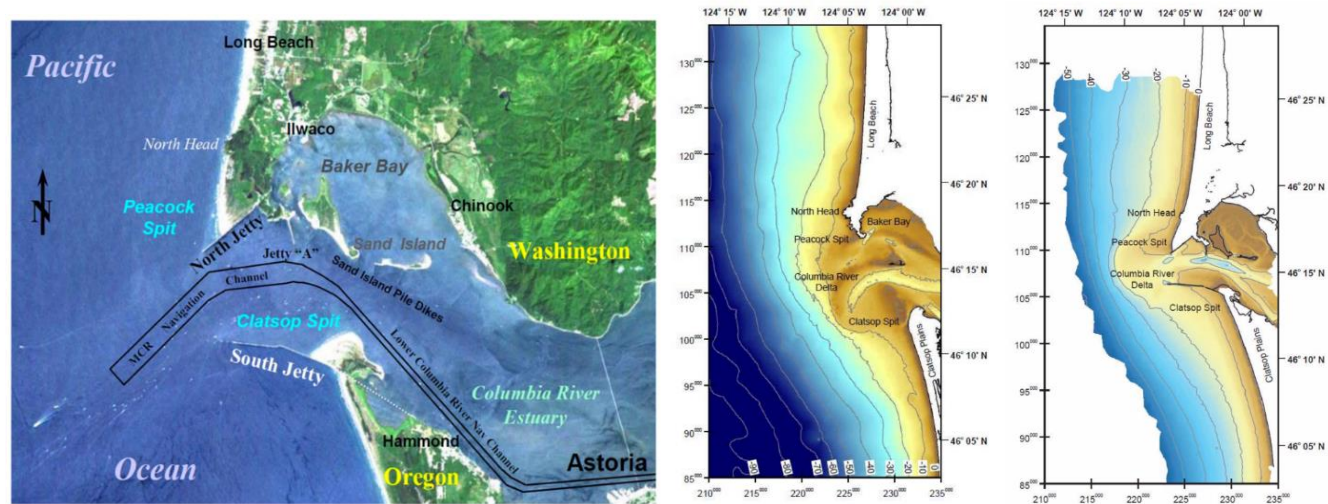


Figure 71 : Aménagement de l'estuaire (gauche) et leur effets morphologiques (1868 au milieu ; 1958 à droite (Stark, 2012)

• Entretien de la voie fluviale

Ces aménagements n'ont pas permis un auto-curage efficace de la zone d'embouchure, qui est reconnue pour être le secteur de navigation le plus dangereux des États-Unis. Aussi, la zone est en permanence draguée, avec des volumes de l'ordre de 3 à 5 Mt/an, qui sont réinjectés à proximité (OREGON SOLUTION, 2011). Une partie de ces volumes correspond à des apports marins.

En revanche, l'entretien du chenal de navigation sur l'ensemble du tronçon d'étude implique également des dragages extrêmement importants sur des sédiments d'origine fluviale. Dès la fin du 19^{ème} siècle des travaux de dragage sont entrepris pour établir un chenal offrant un mouillage de 7m. Très rapidement la volonté de créer un chenal de 12 m de profondeur émerge mais les travaux ne seront achevés qu'à la fin des années 1970. Plus tard, au début des années 2000, l'objectif d'approfondir encore le chenal à 44 pieds (13,4 m, ce qui correspond au gabarit Panamax pour un mouillage de 12 m) rencontre de fortes oppositions, les travaux seront finalement achevés en 2010 après plusieurs séries de dragages et même le dynamitage des sections présentant des affleurements rocheux (USACE, 2011). Au total, les volumes dragués sur le 20^{ème} siècle sont estimés entre 620 et 900 Mt (Templeton, 2013). Après une forte activité de dragages dans les années 1920-1930, l'éruption de Mont Saint-Helens (1980) a provoqué des apports de boues considérables dont l'extraction a duré plusieurs années. Les volumes extraits annuellement ont ensuite été à nouveau à la hausse à partir 1995 (1 à 2 Mt/an depuis 1992) en raison de la création du gabarit à 44 pieds (travaux largement achevé en 2008). L'importance de ces dragages est à nuancer, par rapport à l'effet des aménagements (perturbation du régime) car la Columbia River serait en déficit sédimentaire même en l'absence d'extraction.

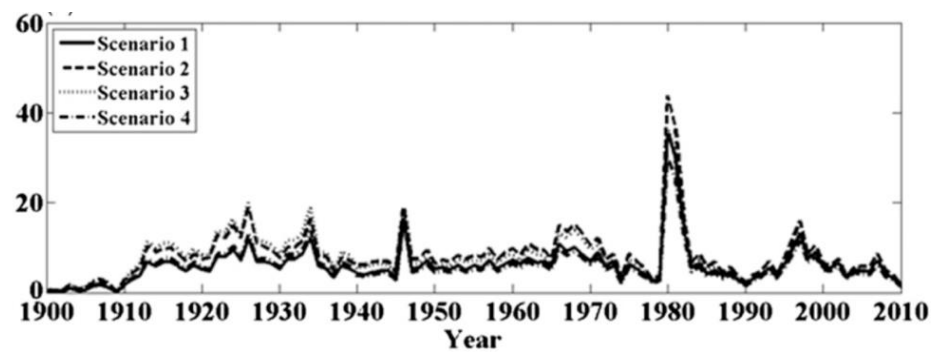


Figure 72 : Bilan des extractions entre 1900 et 2010 sur la basse Columbia River (Templeton, 2013)

• Opérations de restauration écologique

La Bonneville Power Administration, en plus de la gestion de la production d'hydroélectricité, gère également les actions de préservation et de restauration des écosystèmes fluviaux et tidaux.

Son action s'oriente essentiellement sur des actions piscicoles (espèces cibles principales : saumon et truite fario) de type restauration de la continuité, préservation des zones de frayères, alevinage, etc. Mais certaines opérations portent également sur la morphologie et les dynamiques sédimentaires. Ainsi par exemple, son action se décline dans deux grands programmes actions : le premier portant sur la restauration des écosystèmes tidaux (BPA, 2016), le second sur les affluents (BPA, 2020).

- Dans le premier cas, les actions de remédiation portent essentiellement sur la restauration des chenaux secondaires : re-créusement de chenaux, arasement de levées, comblement de fossés de drainage, etc. ;
- Dans le deuxième cas, les actions de restauration sont très diverses : restauration du lit mineur, et re-création d'annexes fluviales et des zones humides, diversification des habitats, démantèlement d'ouvrages, suppression de résidus miniers, etc. L'utilisation du bois mort dans les projets de restauration est notamment recommandée. L'objectif est d'introduire des embâcles artificiels afin de diversifier les formes, forcer les dépôts de sédiments et de créer des habitats supplémentaires pour la faune aquatique et amphibie.

Plus que les actions elles-mêmes, la volonté d'une action globale, à l'échelle du bassin et de manière coordonnée, est particulièrement intéressante, car rare sur les grands systèmes où la gestion se focalise généralement au corridor fluvial, en raison notamment de la multiplicité des acteurs.

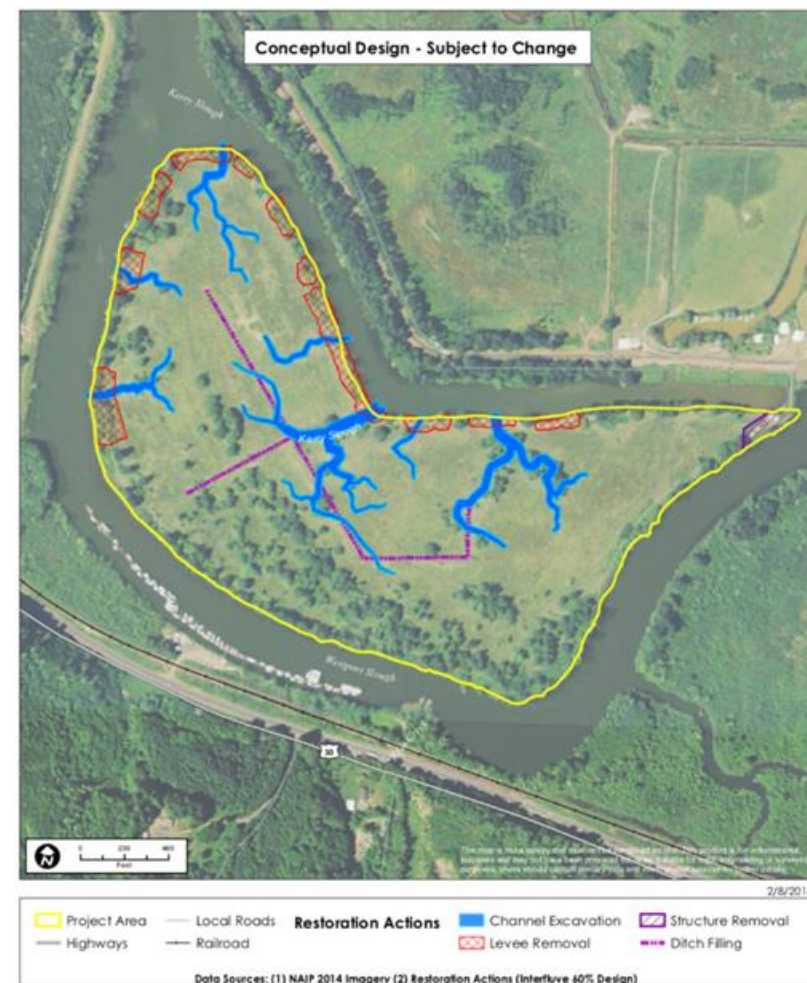


Figure 73 : Exemples d'action de restauration proposées sur des bras secondaires dans l'estuaire de la Columbia River (BPA 2016)

► Bilan du retour d'expérience

• Bilan des acteurs concernés

- Bonneville Power Administration,
- US Army Corps of Engineers.

• Synthèse comparative

- Principaux points de ressemblance :
 - Importance de la voie fluviale et dragage d'entretien,
 - Barrages hydroélectriques au fil de l'eau,
 - Flux sableux.
- Principaux points de différence :
 - Caractéristiques hydrologiques (taille de bassin, module),
 - Embouchure type estuaire,
 - Absence de barrage en feston sur le tronçon d'étude,
 - Navigation de gabarit Panamax (44 pieds, soit 12 m de mouillage).

• Actions pouvant être utiles à la réflexion sur la gestion sédimentaire du fleuve Rhône

- Enjeux de connaissance :
 - Bilan historique des extractions et des flux de sables ;
 - Programme de gestion des sédiments dragués au niveau de l'estuaire en lien avec les circulations littorales ;
- Actions de restauration :
 - Une volonté d'agir à l'échelle globale, sur l'ensemble du bassin,
 - Restauration d'annexes fluviales, comblement de fossés de drainage avec matériaux dragués,
 - Utilisation du bois mort dans les actions de restauration.

Références bibliographiques Columbia River:

Bonneville Power Administration (BPA), U.S. Bureau of Reclamation, U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2001). *The Columbia River System Inside Story*, second edition, 80 p

Bonneville Power Administration (BAP) (2016). *Columbia Estuary Ecosystem Restoration Program, Final Environmental Assessment*, Rapport d'étude, 226 p.

Bonneville Power Administration (BPA) (2020), *Columbia River Bassin Tributary Habitat Restoratio, Progammatic Environmental Assessment*, Rapport d'étude, 307 p.

Cannon, C M. (2015) *Landforms along the Lower Columbia River and the Influence of Humans*, Mémoire de recherche, Portland State University, 134 p.

Naik, P.K., Jay, D.A. (2011). *Distinguishing human and climate influences on the Columbia River: Changes in mean flow and sediment transport*, Journal of Hydrology-404, pp 259-277.

O'Connors J. E, Burns, S. F, (2009). *Cataclysms and controversy--Aspects of the geomorphology of the Columbia River Gorge*, The Geological Society of America, Field Guides 15, p. 237-251.

Oregon Solutions, Cogan Owens Cogan, Institute for Natural Resources (2011). *Mouth of the Columbia River*, Regional Sediment Management Plan, 46 p.

Sherwood, C., et al. (1990). *Historical changes in the Columbia River Estuary*, Prog Oceanog, Vol. 25, p. 199-352.

Stark, J. (2012). *The influence of dredging activities on the morphological development of the Columbia River mouth*. Mémoire de recherche, 145 p.

Templeton W. J, Jay D A., (2013). *Lower Columbia River Sand Supply and Removal : Estimates of Two Sand Budget Coponents*, Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering- 139, p. 383-392.

US Army Corps & Engineers (USACE) (2011). *Compliance Monitoring of underwater Blasting for Rock Removal at Warrior Point, Columbia River Channel Improvement Project 2009/2010*, Rapport d'étude, 110p.



Figure 74 : Exemples d'action de restauration proposées sur des affluents de la Columbia River (BPA, 2020)

2.4.2 Durance : en aval du barrage de Serre-Ponçon

► Présentation générale de la Durance

La Durance est le dernier affluent majeur en rive gauche du Rhône. Elle draine une large partie des Alpes et Pré-Alpes du Sud. Elle présente a priori de grandes différences avec le Rhône. Premièrement, en tant qu'affluent de ce dernier, la taille de son bassin versant est plus modeste (14 280 km²), impliquant aussi des niveaux de débits plus faibles (module « naturel » à Mirabeau = 180 m³/s). De plus, de par sa localisation géographique, son régime hydrologique est nettement marqué par un caractère méditerranéen. Le lit de la Durance n'est pas non plus aménagé pour la navigation fluviale, et la pente est supérieure à celle du Rhône (de 3 ‰ en aval de Serre-Ponçon à 1 ‰ vers la confluence avec le Rhône).

Le tronçon retenu pour notre analyse est celui localisé à l'aval du barrage de Serre-Ponçon, plus important barrage poids d'Europe. Sur cette section et au-delà des différences listées ci-dessous, cette partie de la Durance propose des ressemblances avec le Rhône, dont :

- Une charge de fond grossière : qui a été réduit drastiquement du fait de la diminution des débits, passant de 400 000 m³/an à 40 000 m³/an ;
- Des aménagements divers (irrigation, fixation du lit) et très anciens (pluriséculaire) qui ont profondément modifié le fonctionnement morphologique de la rivière. Ces aménagements étaient des « casier de sédimentation sardes » (mis en œuvre également sur l'Isère, le Var) et des champs d'épis ;
- Des aménagements hydroélectriques court-circuitant de longs tronçons de Durance. L'aménagement EDF ressemble à celui du Rhin, avec un canal latéral avec plusieurs usines en série (en moyenne une usine tous les 20 km). L'ensemble de l'équipement correspond à deux tranches nucléaires ;
- Des extractions massives (environ 60 millions de m³) qui ont obligé la construction de plusieurs seuils pour tenir le profil en long. Ces années d'exploitation ont laissé des traces profondes dans le paysage des plaines alluviales, et de nombreuses extractions en lit majeur sont encore présentes à l'heure actuelle.



Figure 76 : Aménagement hydroélectrique de la Durance (SMAVD, 2020)

► Fonctionnement hydro-sédimentaire général du tronçon d'étude

Au début du 20^{ème} siècle, la Durance est la plus grande rivière en tresses de France, voire d'Europe. Comme la plupart des rivières présentant ce style fluvial si particulier, la Durance a connu depuis de profondes modifications en raison des effets croisés des changements climatiques et de l'occupation du sol de son bassin versant ainsi que des nombreux aménagements. D'une part, la rivière a été contrainte pour réduire son « espace de liberté » mais le cours d'eau a aussi été dompté pour en exploiter ses eaux, richesse particulièrement stratégique de cet environnement méditerranéen. La concurrence autour de cette ressource a pris la forme d'une véritable crise, dont la résolution a été pensée à l'époque par des projets d'aménagement qui trouveront leur matérialisation dans la loi d'aménagement du 5 janvier 1955, origine de la construction du barrage EDF de Serre-Ponçon et de la basse Durance.

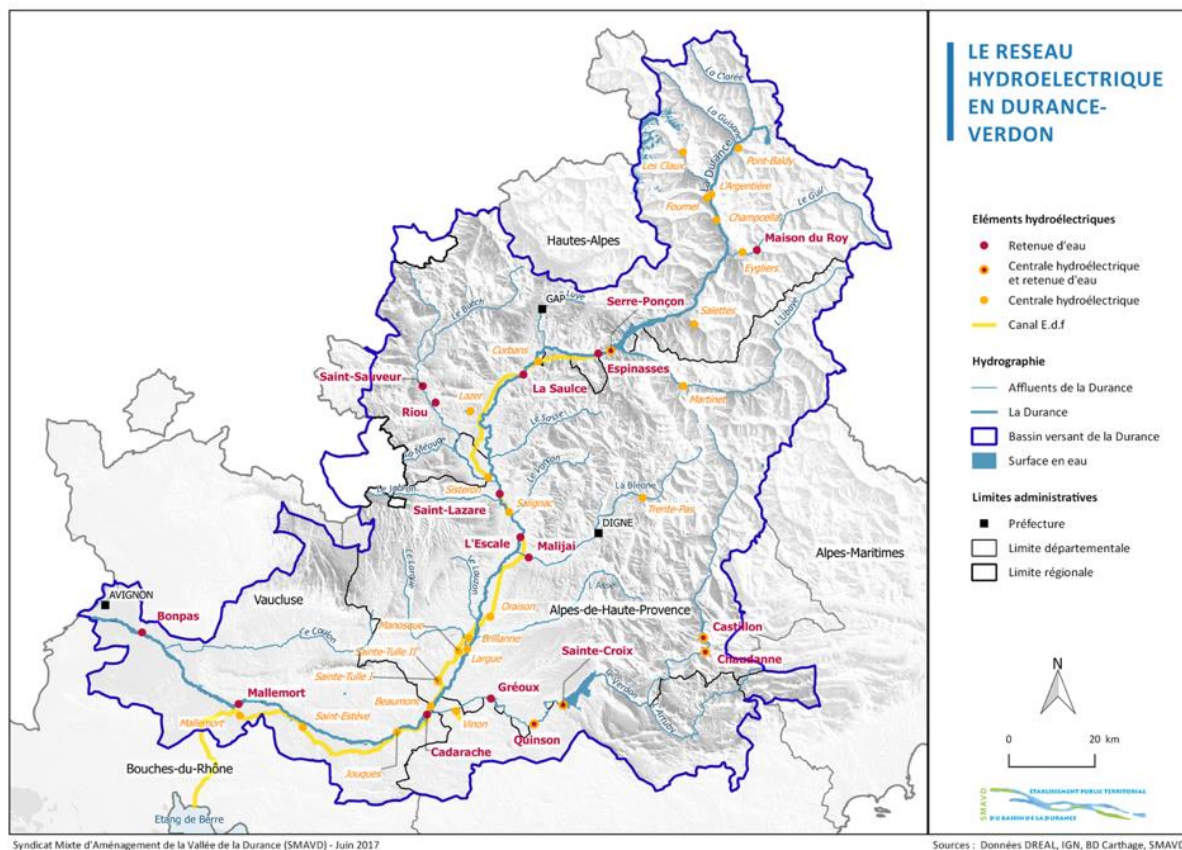


Figure 75 : Bassin versant de la Durance et principaux aménagements (SMAVD, 2017)



Figure 77 : Tresses duranciennes en 1958 (IGN, 1958)

Ces travaux sont donc à l'origine des évolutions morphologiques du lit : une réduction nette de son emprise avec un diminution de 50 % de la largeur moyenne du lit vif et une augmentation de 30 % de surface boisée. Le barrage de Serre-Ponçon est un obstacle quasi-total au transport solide entraînant un important déficit sédimentaire. Si à l'aval de cet ouvrage de puissants affluents apportent à la Durance des quantités importantes de sédiments, la gestion de la chaîne hydroélectrique nécessite de limiter la circulation de ces flux solides, souvent captés avant leur arrivée dans le système durancien. De plus, les extractions ont été particulièrement importantes, également sur certains affluents comme la Bléone.

Ces différentes pressions ont induit un tarissement sédimentaire et une incision généralisée du lit compris entre 1 à 1,5 m (EGR, 2000 ; rapport V3D1A5 ; Lefort, 2007 ; SMAVD, 2020), particulièrement marqué en amont et en aval du barrage de Cadarache. L'arrêt des extractions en 1998 a permis localement des réajustements. Ces derniers

se traduisent, ces dernières années, par des problématiques d'exhaussement de certaines confluences (entre l'Espinasse et Saint Lazare) ainsi que par un retour des faciès de tresses. Toutefois, les marques du déficit sédimentaire sont encore bien présentes avec la dominance d'un style méandriforme, qui d'ailleurs n'est pas sans poser des problèmes en terme de gestion : érosions latérales marquées qui peuvent venir toucher des usages riverains, comme cela a été le cas, avec la crue de 1994, avec la capture d'une ancienne gravière sur la commune de la Roque d'Anthéron, qui a induit un réajustement morphologique du lit à l'aval sur plusieurs décennies. Plus récemment encore, des menaces sur d'anciennes décharges (sur la commune de Charleval par exemple) montrent comment le tarissement sédimentaire et le changement de style associé peuvent être problématiques en terme de gestion.

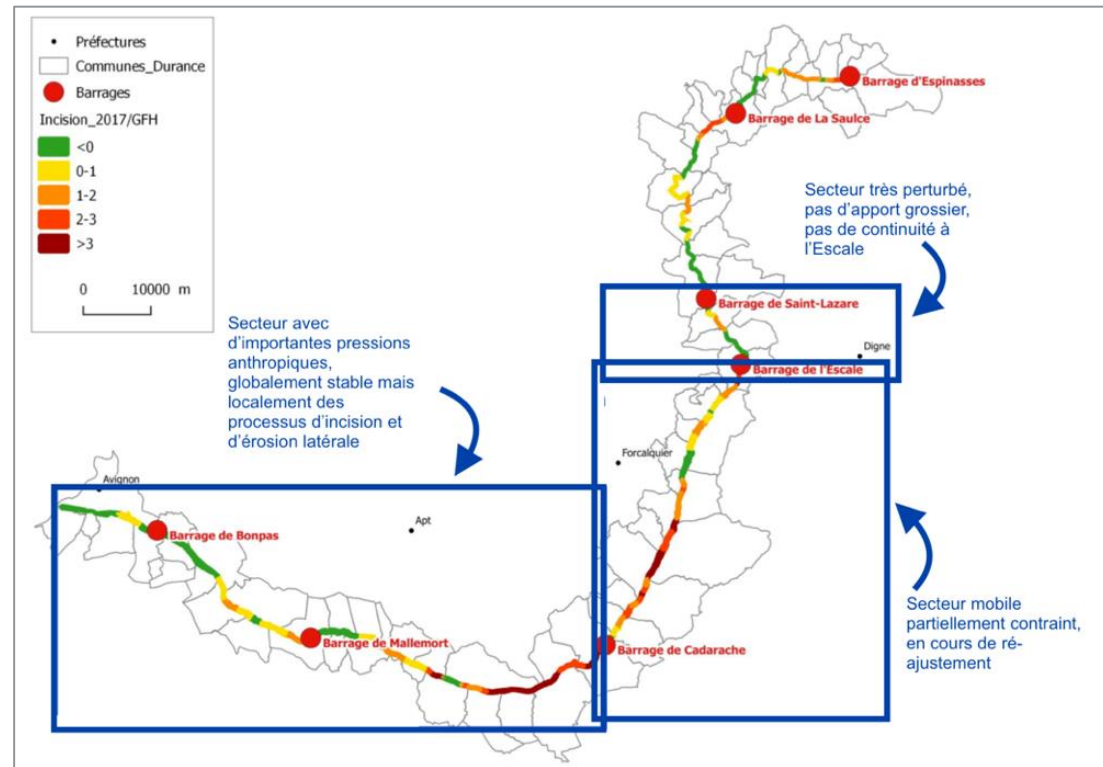


Figure 78 : Incision historique et tendance morphologique actuelle (SMAVD, 2020)



Figure 80 : Exemple d'accentuation des sinuosités sous l'effet du déficit sédimentaire (SMAVD, 2021)

► Opérations de gestion et de restauration hydromorphologique

- Opération de gestion des sédiments
 - Dragage des sédiments grossiers

Les apports en sédiments grossiers dans le lit de la Durance sont particulièrement importants et plusieurs affluents font l'objet de dragage. En effet, certains apports sont incompatibles avec les équipements hydroélectriques. Les sédiments sont alors soit piégés avant d'arriver dans le système durancien, soit enlevés du lit dans les secteurs de remous des retenues. Le Buëch, par exemple, sur sa section terminale, est équipé d'un piège à gravier régulièrement curé afin de limiter les dépôts dans la retenue de Saint-Lazare et les débordements dans certains quartiers de la ville de Sisteron. Les apports du Vançon et du Jabron sont, quant à eux, curés en amont de la retenue de l'Escale (sur la commune de Salignac).



Figure 81 : Confluence du Jabron et du Vançon (IGN, 2018)

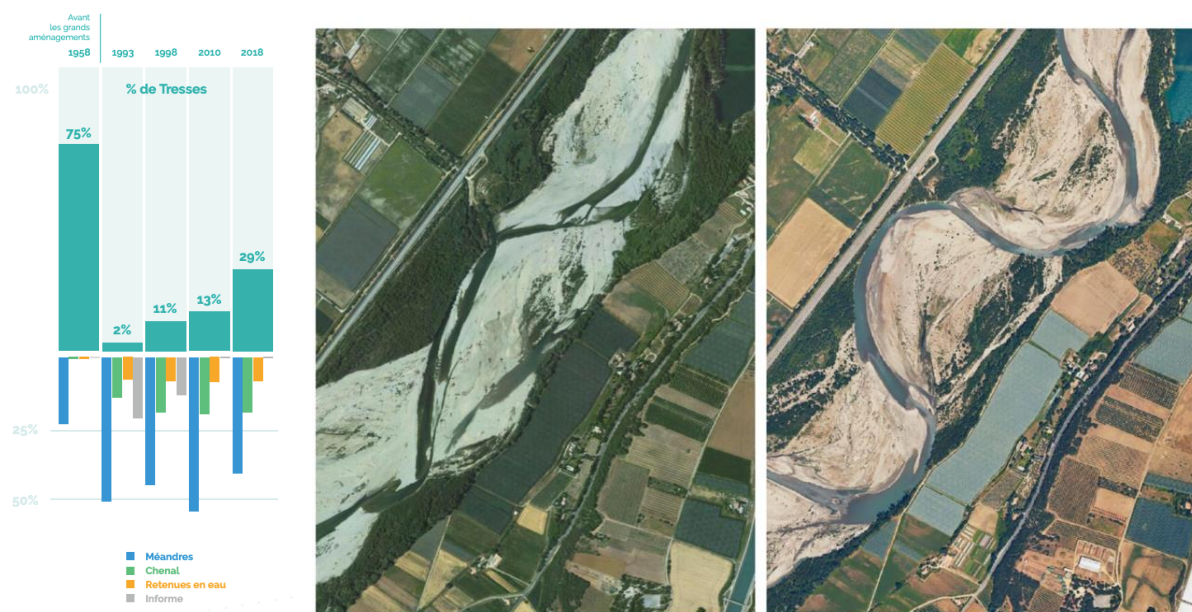


Figure 79 : Évolution du style fluvial en Durance (SMAVD, 2019 et 2020)

• Dragage des sédiments fins

La Durance transporte des volumes importants de sédiments fins. Dans le lit en aval de Serre-Ponçon, cette gamme granulométrique est gérée par des manœuvres de barrages (voir ci-après les chasses de dé-colmatage). Comme pour les débits liquides, une gestion par quota a été mise en place pour les MES au niveau du barrage de Mallemort afin de limiter les rejets dans l'étang de Berre. Plus aval, des dépôts importants sont enregistrés au niveau de la confluence avec le Rhône. Entre 1970 et 2015, le volume de sédiments déposés dans le tronçon terminal de la Durance est estimé à environ 4 200 000 m³, dont 90% de sédiments fins (soit ≈ 84 000 m³/an) (Rapport de Mission 2 / fiche UHC#22-VAL). Avec la mise en place des aménagements de Vallabrègues, c'est un véritable piège à sédiments (volume affiché de 1 250 000 m³) qui a été créé dans le domaine concédé afin de faire sédimer le débit solide de fond de la Durance et empêcher qu'il ne transite jusqu'au Rhône (fiche UHC#22-VAL, d'après EGR 2000, V2D1A19). Le seuil CNR (ou seuil de Courtine) en aval du viaduc SNCF, à 2,6 km de la confluence, marque la limite entre les dépôts sédimentaires exclusivement fins (en aval), et les dépôts comportant une part de grossier (en amont). La gestion de ces sédiments est assurée par la CNR au sein du domaine concédé.

• Protection des gravières contre la divagation latérale

Face aux ajustements du lit, qui se traduisent parfois par une évolution du style fluvial et une tendance accrue au méandrage, des travaux de renforcement des berges, là où cela s'avérerait nécessaire, ont été réalisés (Rochebrune, Monterier, Oraison, Vinon) ou sont en cours d'étude (Mallemort).

• Opérations de restauration

Le SMAVD mène depuis plusieurs années déjà un ambitieux programme d'actions visant à améliorer et restaurer le fonctionnement hydromorphologique de la Durance. Cette politique a émergé avec la mise en place, dans le cadre d'un premier contrat de rivière (2008-2016), d'un observatoire de la Durance. Aujourd'hui le SMAVD vient de signer son accord cadre de partenariat avec l'Agence de l'Eau (2020/2022 - 1,2 millions d'€) pour poursuivre son action qui se traduit opérationnellement par une série de mesures complémentaires portant aussi bien sur la gestion des débits que sur la maîtrise foncière ou encore des travaux de recharge en sédiments.

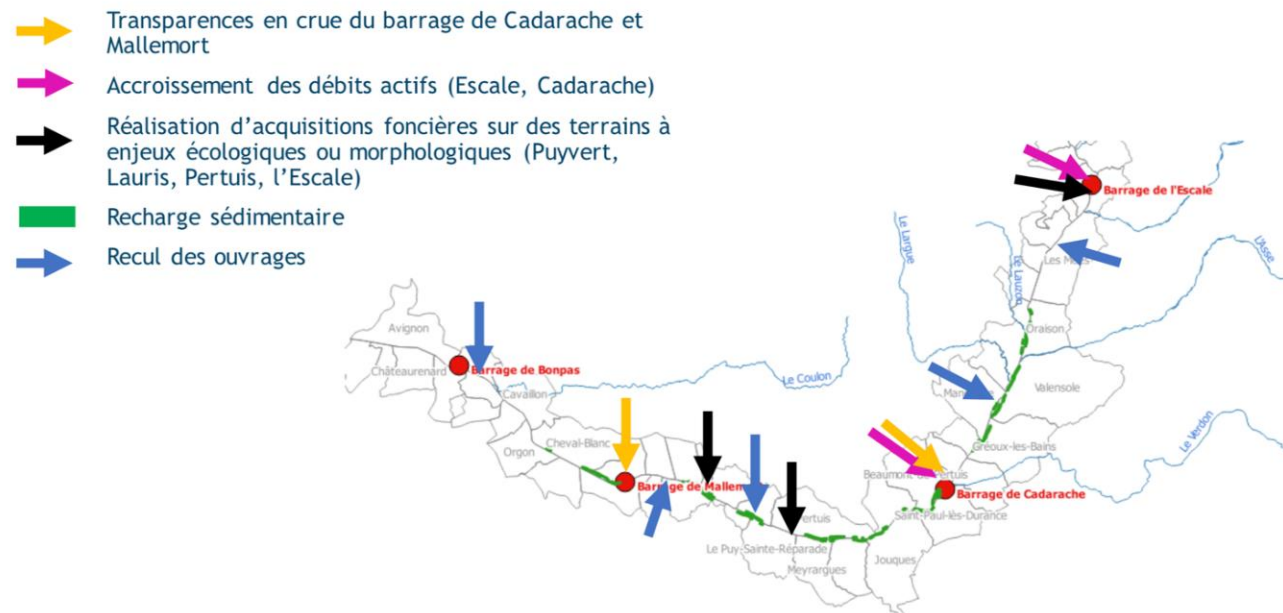


Figure 82 : Programme d'action de restauration de la Durance (SMAVD, 2020)

• Démantèlement d'ouvrages latéraux

Comme sur le Rhône avec les épis Girardon, le SMAVD mène des opérations de démantèlement d'ouvrages latéraux. Dans le cas de la Durance il s'agit d'épis latéraux qui visaient à contenir l'extension latérale du lit. Plusieurs ouvrages ont ainsi été démontés (recul des têtes d'épis de 100 à 200 m) sur les communes de Mallemort et la Roque d'Anthéron afin de redonner à la Durance l'espace nécessaire à l'expression de ses dynamiques morpho-sédimentaires. Cette opération s'est révélée être un succès dans la mesure où elle a eu pour conséquence un ajustement rapide de la bande active qui s'est nettement ré-élargie (sur un linéaire de 4 km, augmentation de 45 %, soit +50 ha).

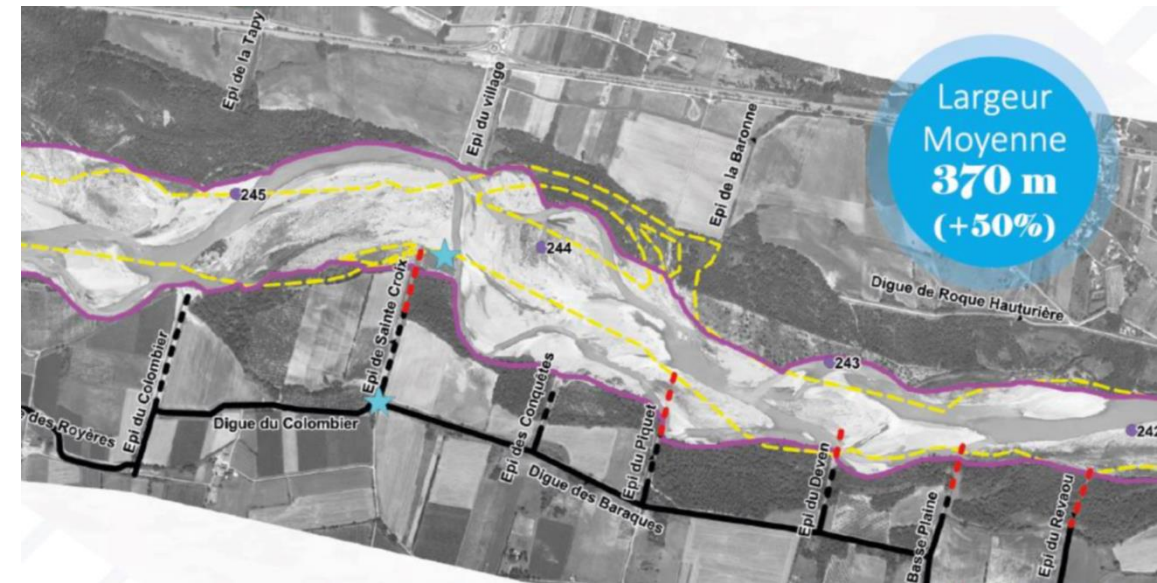


Figure 83 : Suppression des épis sur les communes de la Roque d'Anthéron et de Mallemort : tracé du lit en 1993 (en jaune) et en 2013 (en violet) après la démolition des ouvrages (SMAVD, 2020)

• Rétablissement de l'équilibre sédimentaire : mesures d'évitement des curages et action de recharge sédimentaire

Afin de promouvoir le rétablissement de l'équilibre sédimentaire, le SMAVD s'est engagé dans une politique qui vise aussi bien à réduire les pressions (mesures d'évitement de curages) que dans un ambitieux programme de recharge sédimentaire.

Les mesures d'évitement consistent à entreprendre des travaux de renforcement d'ouvrages de protection hydraulique (confortement ou recul de digue, redimensionnement de déversoir). Ce type de réflexion est déployé par exemple dans le secteur des Mées. La logique qui prévaut est de prévoir et d'anticiper le retour à un équilibre sédimentaire et de dimensionner les systèmes d'endiguement en fonction, plutôt que de curer de manière récurrente au droit d'ouvrages sous-dimensionnés.

Le SMAVD est également en train de se lancer dans un vaste programme de recharge sédimentaire. Ce dernier consiste à réaliser des réinjections locales par arasement des surfaces d'atterrissement déconnecté du fonctionnement hydro-sédimentaire actuel. Les crues récentes (2019) ont permis d'affiner l'identification des secteurs d'intervention qui se répartissent sur l'ensemble du tronçon compris entre Oraison et Mallemort. Ainsi, 8 secteurs ont été définis ; 3 d'entre eux feront office de sites pilote. Les volumes réinjectés devraient atteindre environ 100 000 m³/an, par site, pour un transport annuel moyen estimé à 25 000 m³/an. Les travaux de ce programme devraient commencer en 2021 par les sites de Charleval et Puyvert (cf. Figure 86).

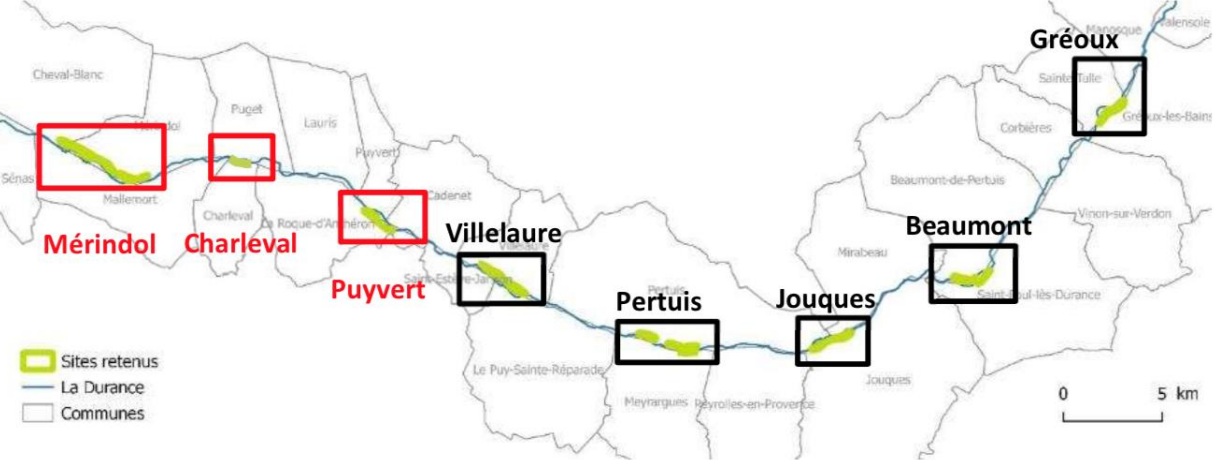


Figure 84 : Sites sélectionnés pour les opérations de recharge sédimentaire ; en rouge les trois sites pilotes (SMAVD, 2021)

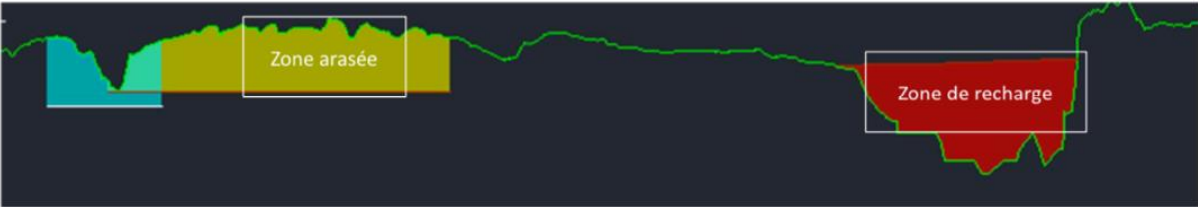
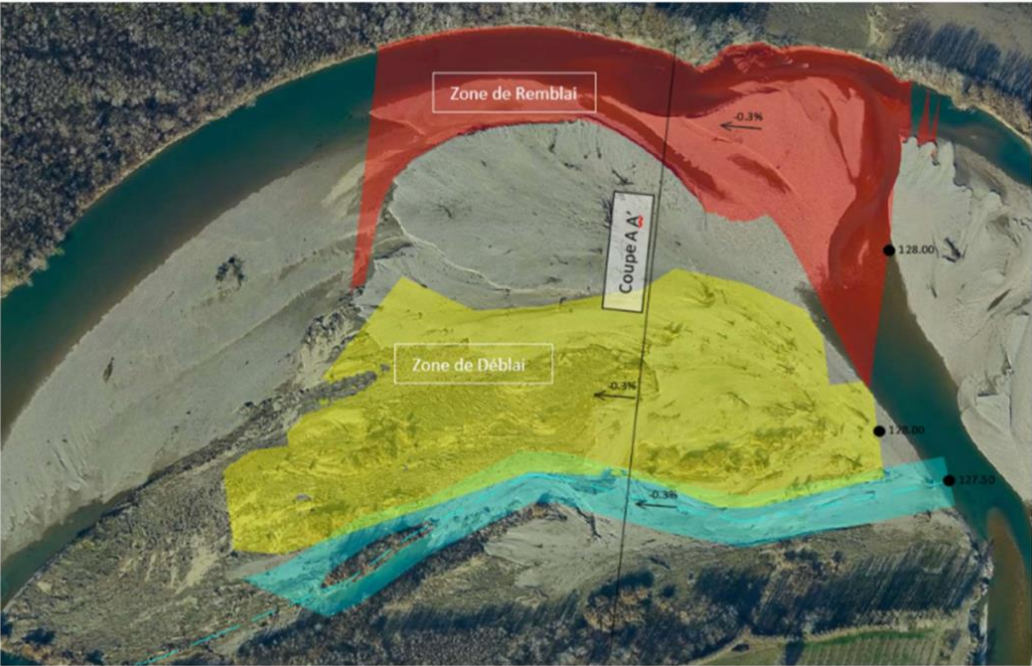


Figure 86 : Exemple des travaux prévisionnels de recharge sur le site de Charléval (SMAVD, 2021)

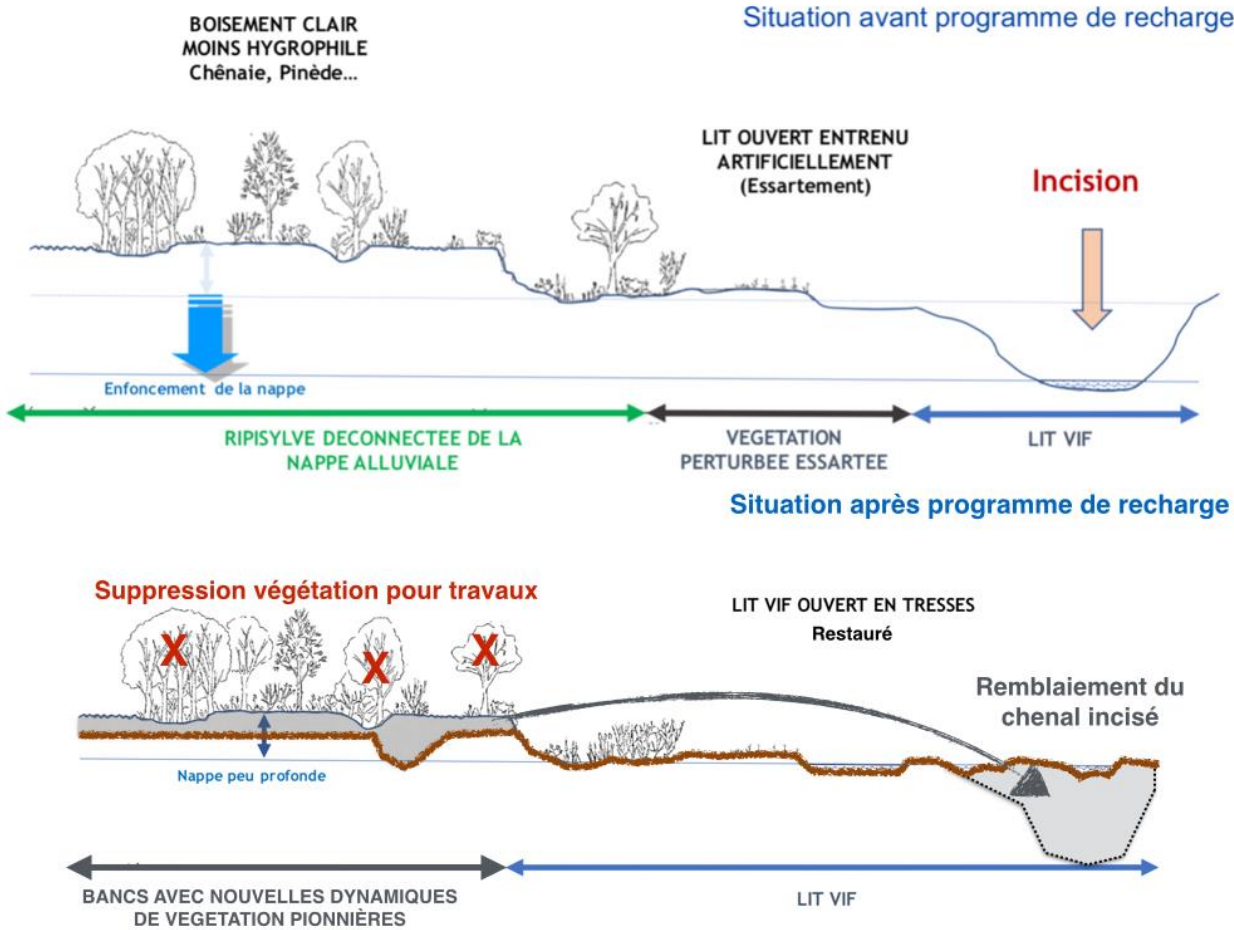


Figure 85 : Principes de restauration de l'espace alluvial après recharge sédimentaire (GeoPeka, adapté d'après SMAVD, 2020)

• Amélioration du fonctionnement sédimentaire et gestion hydraulique des ouvrages : transparence sédimentaire et chasses de dé-colmatage

Sur le tronçon d'étude, plusieurs modulations des consignes de gestion des ouvrages ont été réalisées afin d'améliorer le fonctionnement hydro-sédimentaire.

Transparence sédimentaire

La gestion hydraulique des barrages de Cadarache et de Mallemort est telle qu'elle permet aujourd'hui la transparence des sédiments grossiers. Un suivi réalisé depuis 2017 (GeoPeka, 2020) à l'aval du barrage de Mallemort montre bien les évolutions morphologiques induites par le franchissement de la charge grossière au cours des différentes ouvertures du barrage. En revanche, une telle gestion hydraulique n'est pas possible sur tous les ouvrages, notamment du fait des risques d'inondation qui pourraient se déclarer avant que la pente nécessaire au transit sédimentaire ne soit atteinte (par exemple retenue de Saint Lazare à Sisteron).

Toutefois, la transparence peut être visée et rendue efficace pour les matériaux fins et sableux. Le barrage de St Lazare est dorénavant totalement effacé pour les crues dépassant 500 m³/s afin d'éviter des dépôts de limons trop importants dans la retenue et pour évacuer les matériaux graveleux déposés en aval du pont de la Beaume (SMAVD, 2020).

Chasses de décolmatage

Une seconde série de mesures concerne l'organisation de chasses de décolmatage. Il s'agit de lâchers d'eau annuels, 40 à 70 m³/s sur près de 10 h, organisés à partir du barrage de Serre-Ponçon. L'objectif de ces mesures est de remobiliser les dépôts de limons, pour d'une part éviter la fixation et la végétalisation accélérée du lit vif, et d'autre part et surtout améliorer les habitats piscicoles (espèce cibles : Truite Fario, Apron, Barbeau Fluvial, Hotu). Ces types de lâchers ont été suivis sur plusieurs années (de 2014 à 2017) par une analyse des surfaces colmatées (Loire et al., 2019). Les résultats de ces études indiquent qu'ils sont plus efficaces sur les tronçons amont (T1 et T2, correspondant aux tronçons Espinasse - La Saulce et La Saulce – Saint-Lazare) qu'à l'aval (T3 / Saint-Lazare - Mallemort), où le lit était dès le départ moins colmaté, et où les crues des affluents permettent de « nettoyer » naturellement et régulièrement le lit de la Durance.

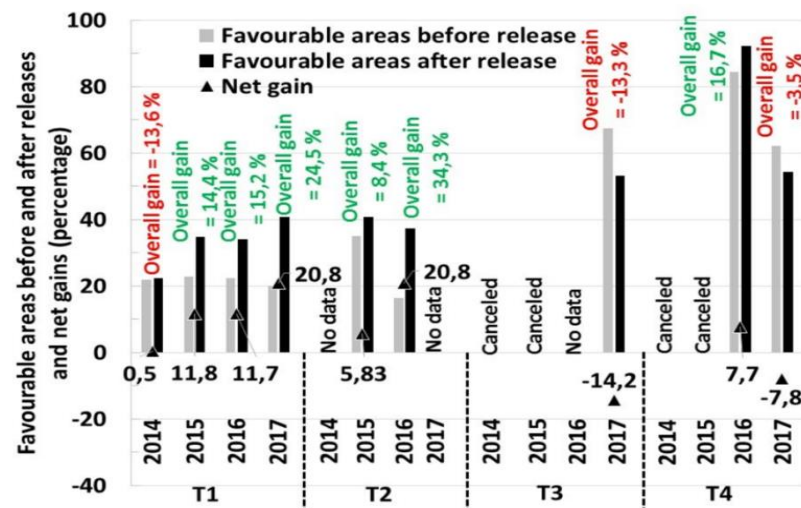


Figure 87 : Résultats des suivis des lâchers de décolmatage (Loire et al., 2019)

► Bilan du retour d'expérience

• Bilan des acteurs concernés

- SMAVD (Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance) ;
- Gestionnaire(s) des ouvrages hydroélectriques : EDF ;

• Synthèse comparative

- Principaux points de ressemblance :
 - des aménagements historiques et enjeux forts pour l'hydroélectricité ;
 - des ouvrages en feston (barrage de dérivation, canal usinier) et hydrologie influencée ;

- des flux grossiers diversifiés (fins, sables, grossiers), issus du piémont alpin, avec un grand lac faisant obstacle à la continuité (Serre-Ponçon) ;
- des affluents à forte charge alluvionnaire ;
- une évolution d'un style fluvial en tresses vers un style fluvial méandriforme à lit unique ;
- des enjeux écologiques : zones humides, bras secondaires, continuité écologique, etc. ;

• Principaux points de différence :

- des pentes supérieures : 1 à 3 ‰ contre 0,2 à 0,8 ‰ pour le Rhône ;
- le canal de la Durance avec 15 centrales en série (de Serre-Ponçon à Saint-Chamas) ;
- l'absence de navigation commerciale.

• Actions pouvant être utiles à la réflexion sur la gestion sédimentaire du fleuve Rhône

• Enjeux de connaissance :

- Schéma de recharge sédimentaire ;
- Modalités de réinjection sédimentaire ;

• Gestion sédimentaire :

- Dragages sédimentaires aux confluences des affluents (avec réutilisation dans le cadre du programme de réinjection sédimentaire) ;
- Transparence sédimentaire accrue pour les sédiments fins et pour partie pour les sédiments grossiers ;
- Protections de berge dans les secteurs soumis à érosion suite à l'évolution du style fluvial (lit méandriforme), utile pour un secteur comme Chautagne par exemple ;

• Actions de restauration :

- Logique et mesures d'évitement des curages : détermination de l'état d'équilibre et redimensionnement des systèmes d'endiguement en fonction du retour des sédiments ;
- Démantèlement d'ouvrages latéraux afin de restaurer l'espace de bon fonctionnement et la dynamique hydrosédimentaire ;
- Chasses de décolmatage des fines accumulées dans le lit mineur ;
- Programme de réinjections sédimentaires, visant environ 100 000 m³/an :
 - fourniture en matériaux :
 - Par arasement des bancs actuellement perchés ;
 - modalités de recharge : par régalaie des matériaux dans le lit
 - rythme de réinjection : volumes de 100 000 m³/an.

Références bibliographiques Durance :

Lefort, P. (2007). *Évolution du lit de la Durance entre le barrage de l'Escale et Avignon*, Rapport d'étude, SMAVD, 30 p.

SMAVD (2019). *Rapport d'activité*, Rapport d'activité, 37p.

SMAVD (2021), *Recharge sédimentaire sur les secteurs de Puyvert et Charleval* ; Note d'accompagnement de la demande d'examen au cas par cas, 79p.

SMAVD (2020), *Séminaire sur l'éco-morphologie en Durance*, Présentation orale.

Chapuis, M. (2012). *Mobilité des sédiments fluviaux grossiers dans les systèmes fortement anthropisés : éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance*, Thèse, 244 p.

GeoPeka (2020), *Caractérisation du lit de la Durance et de son évolution au droit de la restitution de Mallemort*, Rapport d'étude, EDF, 104 p.

Loire, R., Piégay, H., Malavoi, J.R., et al. (2019). *Unclogging improvement based on interdate and interreach comparison of water release monitoring (Durance, France)*. River Research and Applications, vol. 35, no 8, p. 1107-1118.

2.4.3 Isar : entre le barrage de Sylvenstein et la traversée de Munich

Présentation générale de l'Isar

La rivière Isar prend sa source dans les Alpes tyroliennes et se jette dans le Danube après un parcours de plus de 270 km. Son bassin versant couvre une superficie d'environ 9 000 km², avec une population de 2,5 millions d'habitants, dont 1,5 dans l'agglomération de Munich. Le débit moyen annuel dans la ville de Munich est d'environ 85 m³/s ; un débit de 200 m³/s équivaut à Q5-Q10 environ, et la crue centennale est estimée à environ 1 100 m³/s (Guide rivières en tresses, Terrier & Piégay, 2019 ; Mahida, 2013 ; Heckmann et al, 2017).

Jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle, la rivière Isar était une rivière très peu aménagée avec des tronçons en tresses, une large plaine alluviale et des forêts alluviales denses. En période de crue, la rivière inondait de vastes secteurs boisés, et transportait graviers, sables, souches d'arbres et d'autres débris de bois. Dans ces conditions naturelles, la rivière Isar offrait un large éventail d'habitats pour la faune et la flore caractéristiques des rivières en tresses (cf. Figure 89).

Au milieu du 19^{ème} siècle d'importants aménagements ont été entrepris afin de mieux contrôler les inondations, d'améliorer le transport du bois par flottage et l'exploitation des terres le long de l'Isar. Ensuite, dans la première moitié du 20^{ème} siècle, de nombreuses sections du cours moyen et inférieur de l'Isar ont été chenalisées, notamment dans la traversée et en amont de Munich entre 1923 et 1927. En parallèle, les premiers aménagements hydroélectriques ont été construits dans le cours supérieur et médian de la rivière.

En 1959, le barrage réservoir de Sylvenstein a été construit avec pour objectif principal la protection contre les inondations de la vallée de l'Isar et de la ville de Munich. Sa capacité est de plus de 120 millions de m³. Il piège l'intégralité du transport solide grossier ce qui a conduit à une transformation du style fluvial de l'Isar en aval du barrage (cf. secteur de Geretsried ; (cf. Figure 89). En aval, les petits ouvrages hydroélectriques se sont multipliés avec des canaux de dérivation. La rivière Isar est aujourd'hui l'une des rivières les plus intensivement utilisées pour la production d'hydroélectricité en Bavière : on dénombre ainsi 24 usines hydroélectriques entre le barrage de Sylvenstein et l'agglomération de Munich (difffluence du canal Mittlerer Isarkanal) (cf. Figure 90).

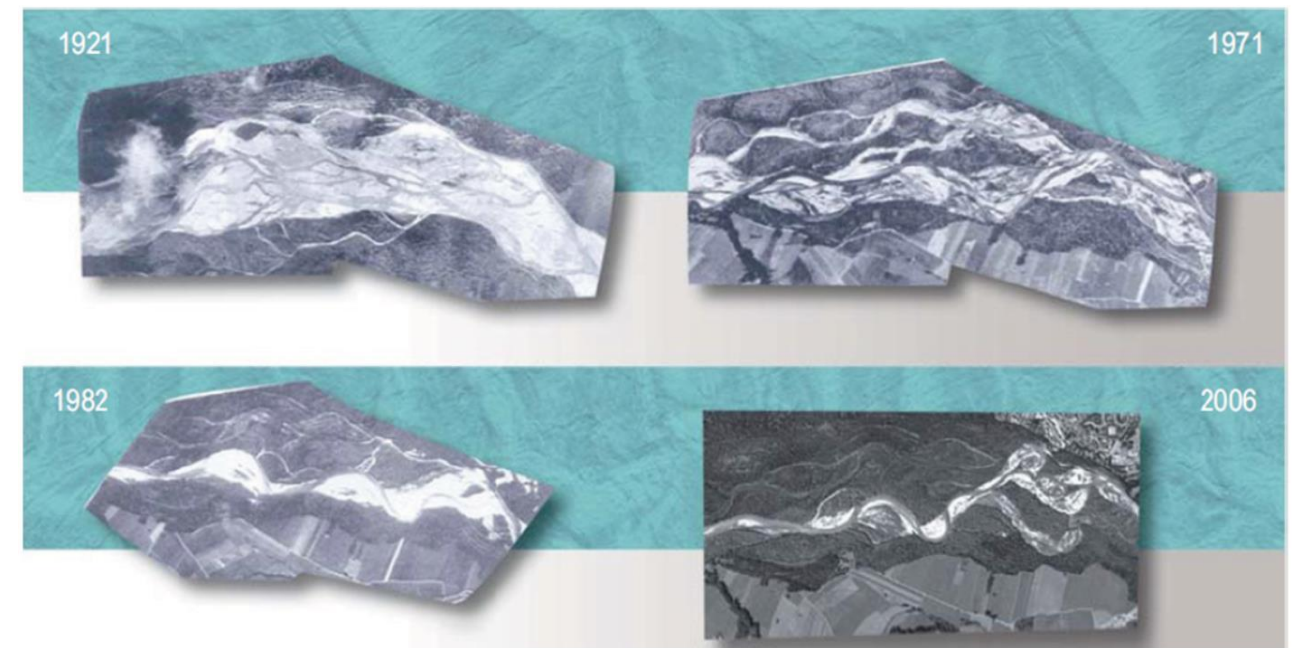
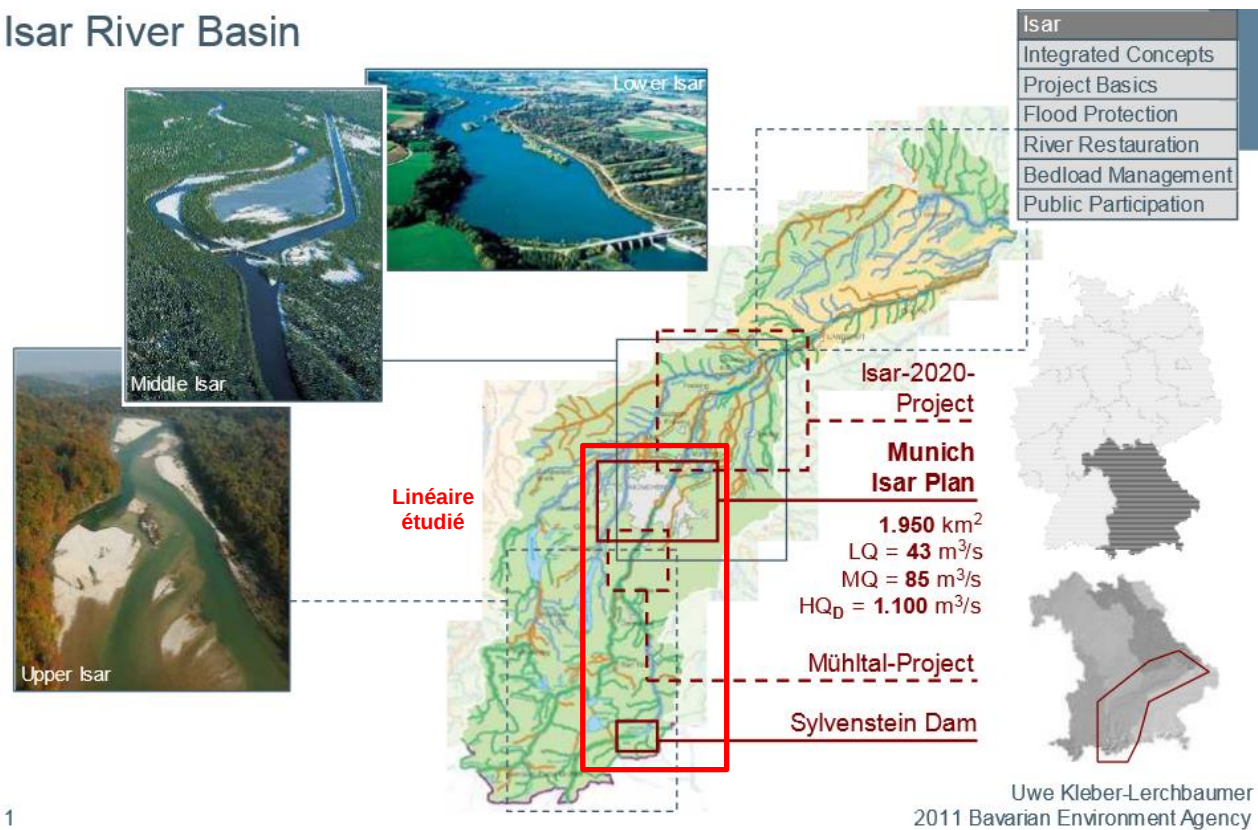


Figure 89 : Evolution du style fluvial de l'Isar à Geretsried suite à la construction des barrages hydroélectriques en amont (Terrier & Piégay, 2019)

Isar River Basin



1

Figure 88 : Bassin versant de l'Isar et localisation du secteur d'étude (Kleber-Lerchbaumer, 2011)

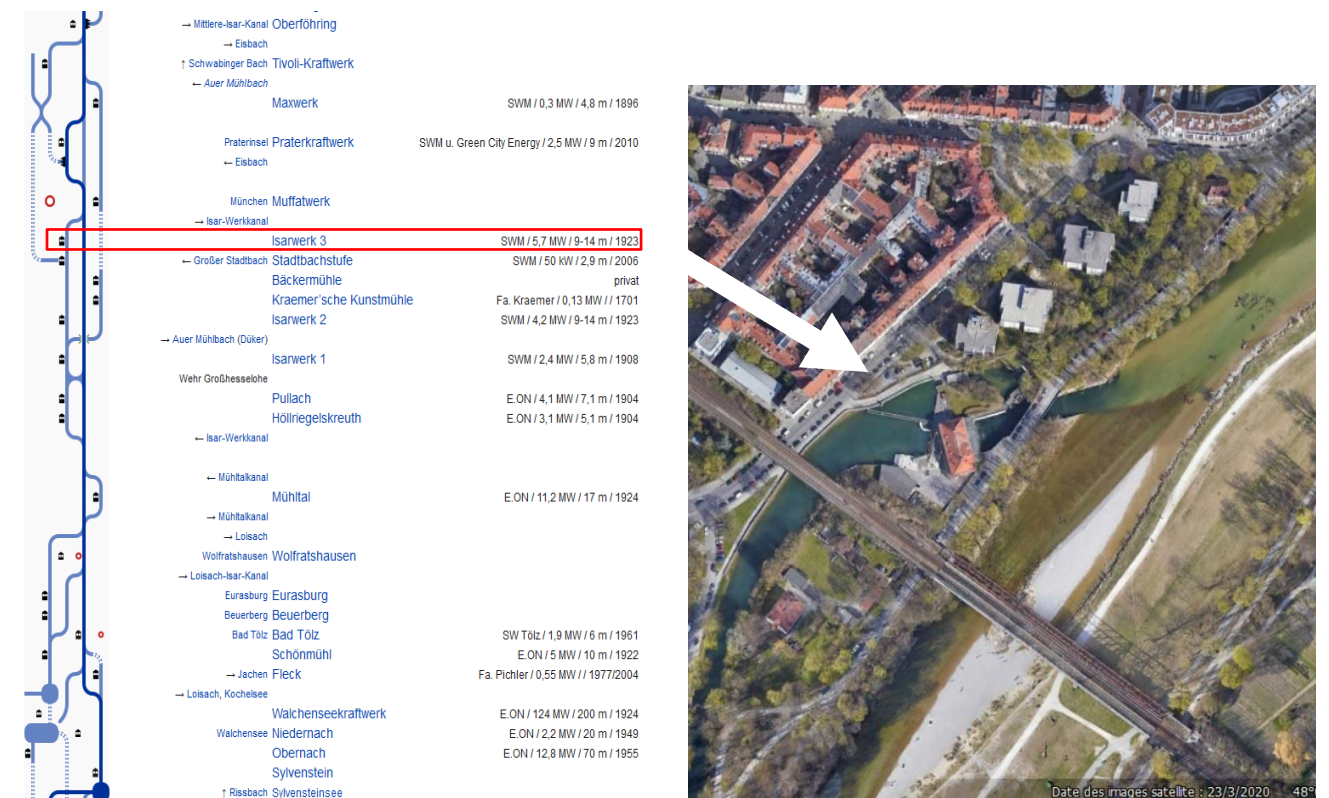


Figure 90 : Synoptique des ouvrages hydroélectriques entre le barrage de Sylvenstein et Munich (<https://de.wikipedia.org>) et usine Isarwerk 3

► Fonctionnement hydrosédimentaire général du tronçon d'étude

• L'Isar en amont Munich

En amont de Munich, l'Isar coule dans sa plaine inondable et ses forêts alluviales au sein desquelles elle s'est incisée depuis les années 1960. Le débit de l'Isar est prélevé dans des canaux de dérivation pour produire de l'électricité. Avec ce régime modifié et la chenalisation du lit opérée les impacts négatifs sur l'hydromorphologie se cumulent : la plupart des processus comme la mobilité latérale, l'érosion et la sédimentation se sont éteints (Binder, 2008).

En termes de transport solide, les données existantes font mention d'un transport en MES de 108 000 t/an d'après Weiss (1996) ; ces flux de MES sont en net déclin depuis le début du 20^{ème} siècle (cf. Figure 91). Le transport solide par charriage est évalué à 53 600 m³/an en amont de Sylvenstein (1958-1983) et 57 000 m³/an sur 1988-89 à Plattling (confluence Danube). Plus récemment, le déficit d'apport en aval du barrage de Sylvenstein a été estimé à 78 951 m³/an en moyenne (Heckmann et al, 2017). On constate par ailleurs que 60 000 m³ de matériaux grossiers charriés sont extraits annuellement à l'exutoire de l'Isar dans le lac de Sylvenstein.

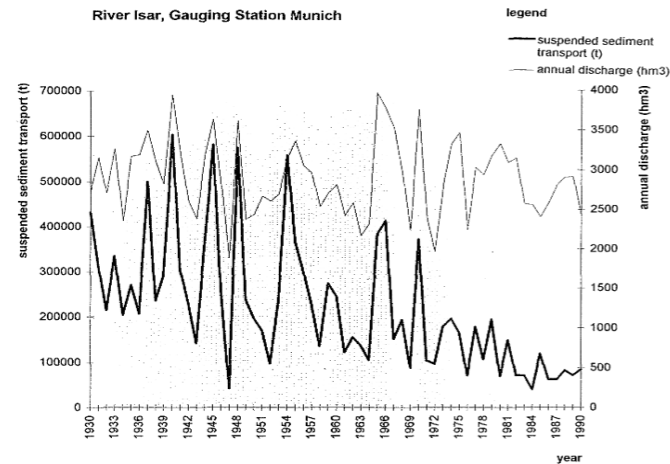


Fig. 2 Long-term records of mean annual suspended sediment transport by the River Isar.

Figure 91 : Chronique de flux en MES à Munich entre 1930 et 1990 (Weiss, 1996)

• L'Isar dans la traversée de Munich

L'Isar à Munich a été canalisé au début du 20^{ème} siècle dans un profil à double trapèze, avec le lit de la rivière et une plaine inondable. La plaine inondable est limitée par des murs et des digues. Les bancs de gravier n'étaient plus présents suite aux extractions. Les berges escarpées ont été protégées par des enrochements et du béton. L'accès à la rivière était dangereux pour les enfants et les personnes âgées. De petits seuils avaient été installés pour empêcher l'incision dans le lit de la rivière ; ils interrompaient la connectivité longitudinale pour les bateaux et la vie aquatique.

Une grande partie de l'Isar à Munich est en tronçon court-circuité (plus de 6 km sur 8 km du linéaire du projet). Le débit réservé initial était de 5 m³/s, il a été passé à 15 m³/s (environ 17% du module) dans le cadre des renouvellements de concession et du projet de restauration présenté dans la suite du texte.



Figure 92 : L'Isar dans la traversée de Munich avant les travaux de restauration

Il existe peu d'information sur les flux de charriage et l'état du lit dans la traversée de l'agglomération de Munich. Il est probable que les extractions passées, le blocage des sédiments dans les retenues amont, et la modification de l'hydrologie aient contribué à créer un pavage du lit et un net déficit sédimentaire que les anciennes photographies dans l'agglomération illustrent (cf. Figure 92).

► Opérations de gestion et de restauration hydromorphologique

• Programme de restauration en amont Munich

La concession de l'ouvrage hydroélectrique d'Icking a expiré en 1997. Pour obtenir une nouvelle concession, il a été demandé à la société d'hydroélectricité d'augmenter le débit minimum (de 5 à 15 m³/s), de restaurer la rivière et de contribuer à 50 % à la restauration des coûts, sur la base de grands principes de restauration de rivière : suppression des protections de berge (pour 2,5 M€, avec concassage et réinjection dans le lit), aménagement de la continuité biologique (pour 0,2 M€), amélioration des loisirs de plein air, aménagement d'accès, etc. (Binder, 2008).

En parallèle, compte tenu du déficit sédimentaire sous le barrage de Sylvenstein, des opérations de réinjection ont été menées pour un total de 49 500 m³ en 5 opérations entre 1995 et 2013. Ces volumes sont relativement limités par rapport à la capacité de charriage qui est de l'ordre de 50 000 m³/an. Leur remobilisation avec des effets locaux a été étudiée par Heckmann et al (2017).

Au niveau des ouvrages hydroélectriques en amont de Munich, afin de rétablir la continuité sédimentaire sur l'Isar, des prélèvements de sédiments grossiers sont effectués chaque année dans la retenue de plusieurs aménagements et réinjectés directement à l'aval. Cela permet de restaurer le transit sédimentaire et de limiter l'enfoncement du lit, qui était devenu critique et menaçait d'importantes infrastructures, notamment dans l'agglomération de Munich (Terrier & Piégay, 2019).

• Programme de restauration dans la traversée de Munich

Le projet Isarplan a conduit à restaurer l'Isar dans la traversée urbaine de Munich sur une longueur de 8 km. Le secteur de référence devant servir d'exemple à la restauration était celui de Flaucher, au milieu du linéaire (cf. Figure 93). La ville de Munich et l'Office Bavarois pour la gestion de l'eau (Bayerisches Landesamt für Wasserversorgung) ont mis en place ce plan pour améliorer la lutte contre les inondations, les fonctions écologiques et les loisirs. A l'émergence du projet en 1995, un groupe de travail intégrant des ingénieurs hydrauliques, des architectes paysagistes, des urbanistes et des biologistes a été installé. Les étapes de planification comprenaient des réunions de concertation avec des groupes de citoyens, des membres d'associations, des groupes de pêcheurs et de kayakistes, etc.



Figure 93 : Secteur de Flaucher pris pour référence avant travaux de restauration (Wulf, 2013)

Les travaux ont commencé en 2000 et se sont achevés en 2011. Les travaux de protection contre les crues ont d'abord eu lieu entre 2001 et 2005 ; les travaux de restauration ont été menés en 3 tranches (2002-2004 ; 2003-2007 ; 2010-2011) ; le dernier tronçon a fait l'objet d'un modèle physique à l'échelle 1/20 afin de caler le dimensionnement des ouvrages (seuils, déversoirs, canaux, ouvrages de régulation). Le projet a coûté 35 M€ dont 7 M€ d'élimination de déchets militaires de la Seconde Guerre Mondiale. Ces budgets ont été pris en charge à 55% par l'Etat de Bavière et 45% par la Ville de Munich, avec un co-financement de l'Union Européenne.

Globalement, le projet de restauration d'Isar est un projet équilibré entre 3 objectifs (Binder, 2008 ; Mahida, 2013, Wulf, 2013) :

- protéger contre les inondations centennales (Q100) : rehaussement et/ou confortement de digues, élargissement de la largeur d'écoulement (lit de 50 m élargi en moyenne de 30%, jusqu'à 90 m), recul de digues, rétention en crue, pavage du lit. Les portions de digues couvertes d'arbres ont été renforcées par la mise en place de parois moulées ;
- **restaurer l'écologie en s'inspirant des processus naturels** : suppression de protections de berge en enrochements, restauration des processus morphologiques, continuité longitudinale des seuils aménagés sous forme de rampes, continuité latérale avec abaissements de berges, développement d'habitats naturels, amélioration de la qualité de l'eau. L'élargissement du lit de la rivière a amélioré les dépôts d'alluvions, de sorte que les berges de gravier, qui constituent un état naturel des systèmes fluviaux alpins, sont de retour dans la ville même, changeant de position à chaque inondation ;
- **améliorer les possibilités de loisirs** : accès à l'eau, paysage et environnement attractifs. Le remodelage du canal fluvial et de la plaine inondable ouvre l'accès des populations au bord de l'eau. L'ouverture du fleuve, la création d'îles et de bancs de graviers, ont permis de reconstituer des conditions favorables pour les activités de loisirs le long de la rivière, au sein de l'agglomération de Munich. Une vague de surf stationnaire a été aménagée sur l'un des seuils. Les espaces riverains, accessibles à pied ou à vélo, sont entretenus et servent de parc public durant la saison estivale. Les tronçons plus naturels de rivière en amont ou en aval restent préservés sur sur-fréquentation.

Par ailleurs, la qualité de l'eau s'est améliorée grâce à des programmes de gestion des eaux pluviales et d'amélioration des traitements de stations d'épuration (Binder, 2008 ; Mahida, 2013).

Techniquement, le projet a porté sur 710 000 m³ de déblais. En parallèle, 290 000 m³ de sédiments ont été réinjectés. Les enrochements réintégrés au projet se montent à 385 000 tonnes. Au-delà, la plus grande partie de la restauration de la rivière Isar est faite par la rivière elle-même : lorsque les protections de berges ont été retirées le long de la rivière, sur les secteurs de forêts alluviales, la rivière s'est élargie au grès des crues et des processus naturels d'érosion et de dépôt qui ont été réactivés.

Le fonctionnement hydrosédimentaire après restauration n'est pas décrit dans les publications collectées. Il semble que l'arrêt des extractions et la continuité sédimentaire opérée en amont au niveau des barrages conduisent à un retour des sédiments. Binder (2008) signale que le transport solide généré par la crue de 2005 a pu transiter sur le linéaire partiellement restauré. Les vues aériennes montrent que l'Isar présente peu de formes alluviales en aval de Munich, ce qui tend à démontrer que les flux grossiers sont en train de se reconstituer par l'amont, sans toutefois qu'ils présentent d'enjeu significatif dans l'état actuel. En comparaison avec des affluents du Rhône, les flux charriés en moyenne annuelle dans la traversée de Munich pourraient être de l'ordre de 5 000 à 20 000 m³/an, avec un gradient décroissant d'amont en aval.

Les équipes techniques ont pris en compte les événements, les processus et les aléas au cours de la longue mise en œuvre (11 ans pour les travaux de construction avec 5 ans de travaux préliminaires). Cela a conduit à définir une gestion adaptative pour la mise en œuvre des travaux. Par exemple, la grande crue de 2005, avec un débit proche du débit centennal (1 050 m³/s), a eu un impact majeur à la fois sur la zone et sur la mise en œuvre finale de la solution. L'inondation a révélé que les zones sans gazon ont subi des dommages dus à l'érosion. La meilleure protection se trouvait là où les mesures techniques de protection des berges étaient complétées par la plantation de saules ou d'herbacées. En particulier, les fines tiges de saule qui se développent après une coupe tous les deux ou trois ans offrent une tenue exceptionnellement bonne. En outre, bon nombre des nouvelles structures alluviales qui se sont développées en raison des « dommages » des inondations telles que des mouilles, des fosses, des radiers, etc. sont désormais partie intégrante de la rivière Isar et, en fonction du débit, fournissent des habitats pour les poissons et les macroinvertébrés. Dans le même temps, le caractère de biotope de ces zones est renforcé en permettant au bois mort de rester après l'inondation. Ces petits biotopes étaient entretenus et protégés par des pelouses et des saules. Sur les surfaces exposées par les inondations, des communautés d'herbes fines mais richement fleuries de haute valeur écologique se sont développées l'année suivante.

Au final, les bénéfices du projet sont nombreux : protection/restauration écologique et suivi scientifique, loisirs et attraction touristique, hydroélectricité, évacuation des eaux pluviales, rétention des crues, gains sociaux, amélioration du microclimat, etc. (Mahida, 2013).

Inversement, des enjeux inattendus sont apparus avec le projet : objectifs contradictoires de diverses parties prenantes, difficultés de la concertation avec le public, question de la responsabilité pour la vague de surf stationnaire, propriété des terres et de l'eau, biens gratuits et publics qui ne sont pas valorisés, application des règles, passe à poissons qui deviennent des aires de jeu pour enfants, manque de sensibilisation (ex. : gestion des déchets), activités culturelles et commerciales populaires, ce qui affecte potentiellement la biodiversité.

Le recul d'expérience sur le projet montre combien il y a un décalage important entre l'aménagement technique (le « ce que c'est ») et les usages qui se sont implantés (« ce à quoi ça sert ») (Wulf, 2013) :

- « Ce que c'est » : un axe fluvial, une plaine inondable, des habitats naturels, du gazon de protection, des digues pour la protection contre les inondations, des berges à entretenir ;
- « Ce à quoi ça sert » : se déplacer en canoë ou kayak, faire de la natation, se baigner, prendre un bain de soleil, marcher, faire de l'équitation, faire des barbecues, en hiver, faire du ski de fond ou de la luge, faire la fête, faire du vélo, promener son chien, etc.

La Ville de Munich est responsable de l'entretien du lit de l'Isar. Le coût d'entretien du couloir d'inondation, comparable à celui d'un parc public, est légèrement plus élevé qu'auparavant, mais ce nouvel espace public de l'Isar et sa zone de baignade attirent tout au long de l'année de nombreux visiteurs qui participent à l'attractivité touristique de l'agglomération (Binder, 2008).

Le projet a fait l'objet d'un très important programme de communication : plateforme internet, brochures, excursions, médiation, ateliers de travail, concertation publique, médias, conférences, tables rondes, points infos.

En parallèle, il y a eu une réelle implication de la population dans la définition du projet (comme par exemple Isar Allianz, <http://www.isar-allianz.de>), avec prise en compte des préoccupations du public vers une solution finale appréciée par beaucoup.

Il est considéré que l'Isarplan a révolutionné la stratégie de gestion des risques d'inondation du fleuve en restaurant 8 km de la rivière tout en impliquant la communauté dans le processus de conception (Binder, 2008 ; Mahida, 2013, Wulf, 2013 ; Terrier & Piégay, 2019).

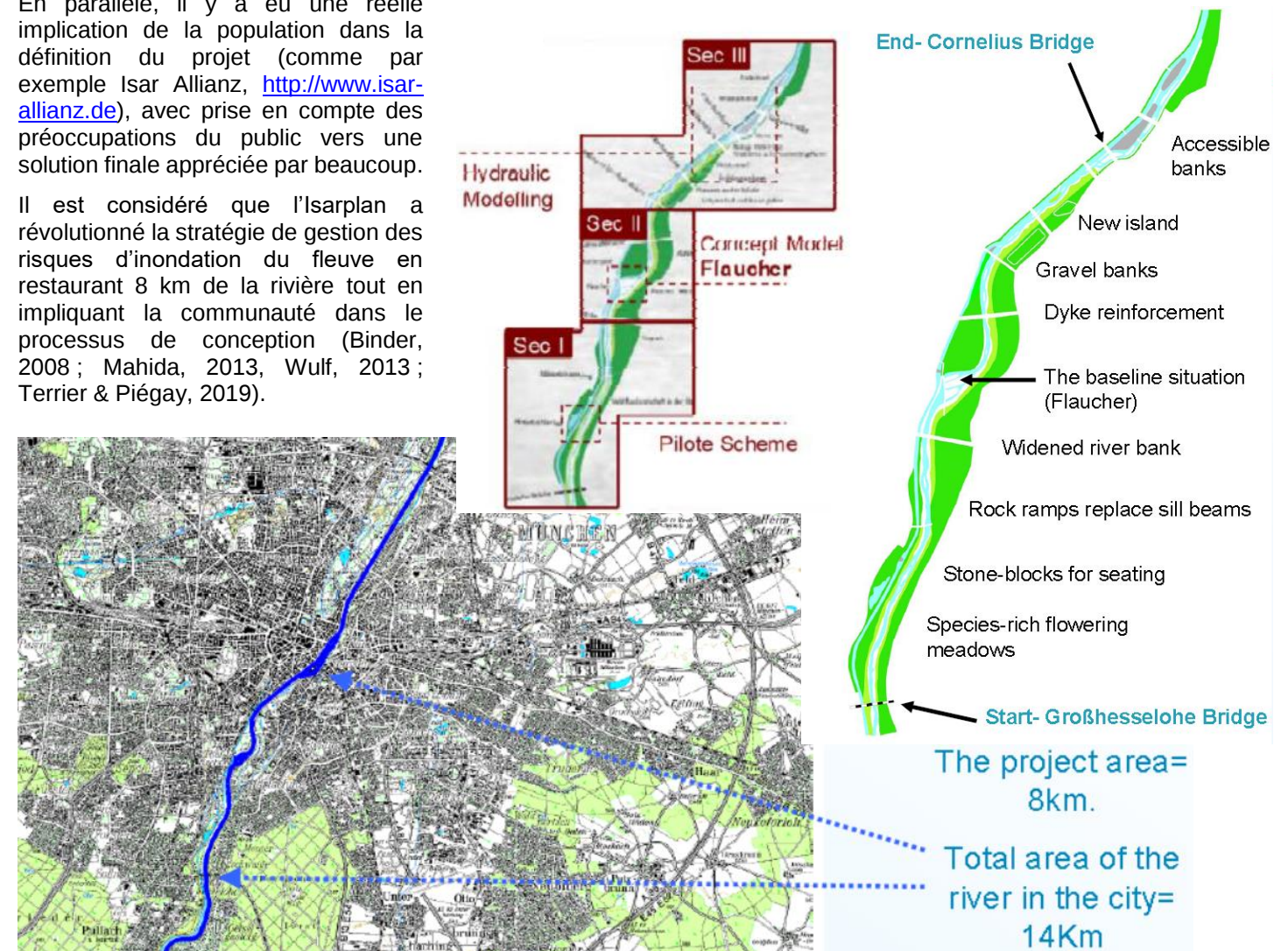


Figure 94 : Localisation du projet de restauration de l'Isar à Munich (Mahida, 2013 ; Kleber-Lerchbaumer, 2011)



Figure 95 : Eléments de conception du projet de restauration de l'Isar : a) section élargie et rehaussement de digues, b) confortement de digue, c) protection enterrée en arrière, d) ancienne protection de berge, e) projet de protection de berge, f) nouvelle protection de berge enrochée et végétalisée ; g) modèle physique en amont du pont de Cornélius (Arzet et Joven, 2008 ; Mahida, 2013 ; Wulf, 2013)

Gestion de la fréquentation dans le lit de l'Isar

La restauration de l'Isar a conduit à redonner un usage de loisirs à la rivière, renforcé par la demande de la population de l'agglomération. La fréquentation dans le lit de l'Isar n'est pas sans poser des questions de sécurité.



Figure 96 : Fréquentation du public sur l'Isar restaurée dans la traversée de Munich (baignade, bronzage, surf, etc.) (Mahida, 2013 ; Wulf, 2013)

Il n'a pas été trouvé d'article scientifique sur le sujet, mais il est possible d'extraire des éléments d'état des lieux et de gestion à partir de quelques sites internet, comme celui de la Ville de Munich qui met en avant les atouts touristiques et récréatifs de l'Isar dans la ville, tout en avertissant sur les autorisations et dangers auxquels les usagers s'exposent (<https://www.muenchen.de/freizeit/orte/119332.html>).

Un des points importants rappelés ci-dessous est que les activités nautiques sont autorisées sur certains linéaires « aux risques et périls des usagers ». Des patrouilles de sécurité, dont certaines sont bénévoles, parcourent à pied le linéaire, expliquent les risques et font évacuer les personnes qui ne sont pas dans les sites autorisés.



Des niveaux de sécurité sont définies à l'échelle hydrométrique de Munich en fonction desquels sont définis les autorisations d'accès au lit de l'Isar : Niveau 1 (240 cm), Niveau 2 (300 cm), Niveau 3 (380 cm), Niveau 4 (520 cm). Les autorisations de pratique de la baignade ou de la navigation peuvent être données bien après que le niveau d'eau soit revenu au niveau 1 afin d'attendre que les conditions de sécurité soient satisfaisantes.

Le site internet de la Ville de Munich présente les extraits suivants :

« L'Isar - Le paradis de Munich pour nager, se détendre et bien plus encore
Les lieux de baignade sur l'Isar. Rafraîchissez-vous au milieu de la ville ! Nous vous présentons les grands lieux de baignade sur l'Isar : entre le site de Flaucher et le nord de Munich.
Dans les zones de baignade de l'Isar, que ce soit au sud ou au nord de Munich, vous trouverez de belles possibilités de baignade et quelques options de restauration :

- Au sud de Munich : du pont de Großhesseloher au Marienklausensteg, vous pouvez vous détendre sans trop d'agitation ;
- Sendling : Les familles aiment particulièrement se promener au pont de Thalkirchner Brücke et à Flaucher.
- Au Glockenbachviertel : Au Wittelsbacher et Reichenbachbrücke, vous rencontrerez des étudiants et des jeunes de Munich ;
- Au nord de Munich : Du pont Max-Joseph au barrage d'Oberföhring, l'Isar est calme et adapté aux enfants. »

Le site donne également accès à plusieurs informations : carte des zones de baignade, informations sur la baignade en toute sécurité, naturisme, qualité de l'eau, etc. (<https://www.muenchen.de/freizeit/orte/119332/wachstationen-isarrettung-wasserqualitaet-hinweise.html>) :

- Une cartographie et une description des zones de baignade explicitement autorisées (<https://www.muenchen.de/media/th/sommer/baden-isar.pdf> ; Figure 97) :

- « Au sud de l'Isar, vous pouvez nager du pont Großhesseloher au pont ferroviaire de Braunau des deux côtés de la rivière ;
- De là, la baignade est autorisée jusqu'au pont de Reichenbach côté est. La baignade autour du pont de Wittelsbach entre les deux est interdite en raison des endroits dangereux ;
- La baignade est alors à nouveau autorisée 200 mètres après le Max-Joseph-Brücke et 200 mètres avant le déversoir Oberföhringer. Dans le canal de l'Isar, vous pouvez nager du Marienklause au pont Thalkirchner. Les panneaux d'avertissement doivent être strictement observés. »

- Baignade, navigation de plaisance et surf : Informations du ministère de la Santé et de l'Environnement :

- « La baignade et la navigation de plaisance dans l'Isar, ainsi que le surf, ne sont autorisés que dans certaines zones - toujours à vos risques et périls »

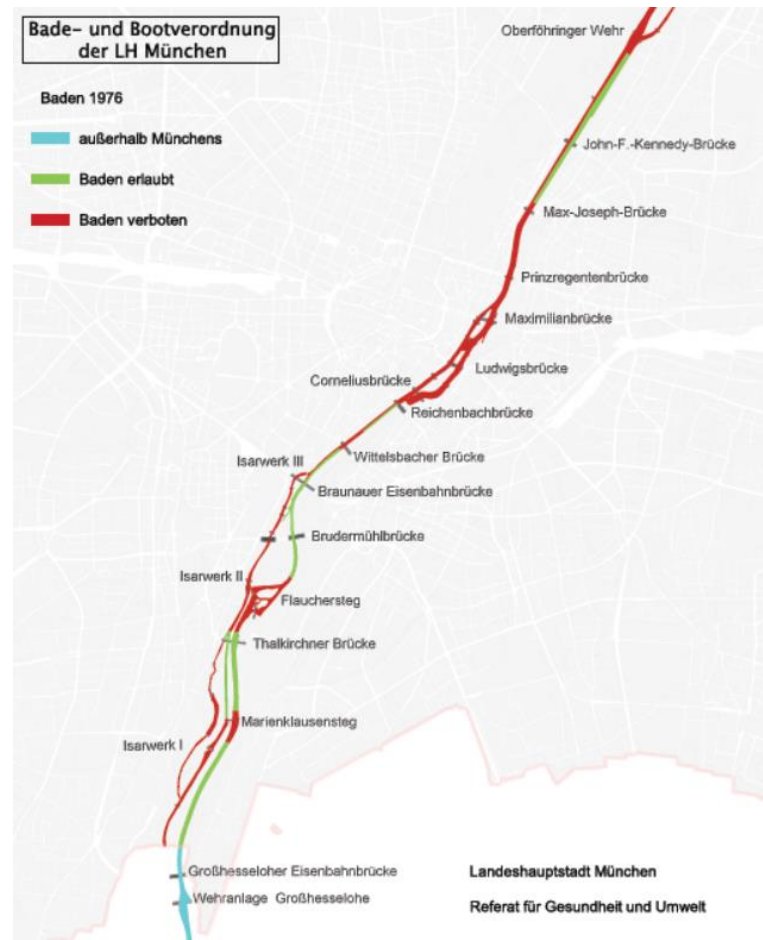


Figure 97 : Secteurs autorisés (vert) et interdit (rouge) pour la baignade (<https://www.muenchen.de>)

- La température actuelle de l'eau ;

- Conseils pour se baigner en toute sécurité dans les eaux naturelles de l'Office d'État bavarois pour la santé :

- Où vous baigner en toute sécurité ?
- Qu'est-ce qu'une eau de baignade européenne ?
- Conseils pour se baigner en toute sécurité (nota : le terme « sécurité » porte essentiellement sur la qualité de l'eau) :
 - « En Bavière, il existe un grand nombre de lacs, de plus en plus petits, parfaits pour la baignade. Sur environ 300 de ces lacs, plus de 375 zones de baignade sont actuellement désignées conformément à la directive sur les eaux de baignade de l'Union européenne (UE). Les habitants et les vacanciers ont amplement l'occasion de s'adonner à leur plaisir humide.
 - La condition préalable à un plaisir de baignade pur est que l'eau du bain ne présente aucun risque pour la santé. Les lacs de baignade ne sont pas des piscines dans lesquelles a lieu un traitement chimique des eaux de baignade. Les eaux naturelles sont soumises à une multitude d'influences qui peuvent affecter leur qualité d'eau ».

En cas d'inondation, des messages sont communiqués par les différents médias. Des panneaux sont installés sur les berges, des équipes de sécurité se déplacent sur site.

Exemple de message diffusé en cas de crue :

« Inondation : Baignade et navigation de plaisance sont interdites sur l'Isar !

Actuellement, la navigation sur l'Isar et la baignade dans l'Isar dans la ville de Munich depuis les limites sud de la ville, du pont Großhesseloher jusqu'au pont Leinthal au nord, sont interdites sans exception.

Même après que le niveau soit tombé en dessous du niveau 1, il y a toujours un fort courant dans l'Isar, des tourbillons dangereux et des rouleaux d'eau peuvent se former, l'Isar est turbide et les débris flottants ne sont pas visibles sous la surface de l'eau. Il existe toujours un risque considérable pour la vie et l'intégrité physique des personnes si des personnes se baignent dans l'Isar ou naviguent sur l'Isar avec des bateaux et autres corps flottants de toute sorte. »



Figure 98 : Panneautage en cas de crue et équipes de sécurité (<https://www.abendzeitung-muenchen.de>)

Autre message à la suite d'une crue :

La navigation dans la Floßgasse sur Marienklausensteg est interdite à partir du 3 avril 2020 jusqu'à nouvel ordre !

La crue de l'Isar en février 2020 a causé des dommages au Schussboden de la Floßgasse, ce qui présente un risque d'accident considérable, notamment pour les plaisanciers. Il y a actuellement des planches à contre-courant et il y a un risque que des canots pneumatiques soient lacérés dessus, des plaisanciers se renversent et chavirent. La signalisation actuelle sur le site sera ajustée par le service du bâtiment. Il existe une interdiction générale de baignade à proximité immédiate en raison du risque de noyade dans le rouleau d'eau qui se forme sous l'eau.

Malgré ces mesures, des accidents ont lieu lorsque les usagers bravent les interdits. Les dangers sont présents dès qu'il existe des infrastructures de génie civil (barrage, canal, etc.). En effet, lorsque le niveau d'eau est plus élevé, celles-ci conduisent à modifier les écoulements, et à générer par exemple de dangereux rouleaux d'eau. La restauration de la rivière a également conduit à augmenter la fréquentation. L'Isar est devenu un lieu de loisirs particulièrement populaire. (<https://www.sueddeutsche.de/muenchen/isar-unfaelle-man-wird-immer-wieder-hinuntergezogen-1.3631289>).



Figure 99 : Evolution morphologique de l'Isar en aval du pont de Großhesseloher entre 1905 et 2011

(1905, 1930 : Mahida, 2013 ; 1992 : Wulf, 2013 et Kleber-Lerchbaumer, 2011 ;
2000, 2003 : Kleber-Lerchbaumer, 2011)



Figure 100 : Evolution morphologique de l'Isar en aval du pont de Brudermühl avant et après travaux (Arzet et Joven, 2008)



Figure 101 : Evolution morphologique de l'Isar en amont du pont de Cornelius (Wulf, 2013)



Figure 102 : Travaux de pavage et d'enherbement d'un déversoir en lit moyen (Wulf, 2013)

► Bilan du retour d'expérience

• Bilan des acteurs concernés

- La Ville de Munich ;
- l'Office Bavarois pour la gestion de l'eau (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft / BLW) ;
- les gestionnaires des barrages hydroélectriques ;
- la société civile, dont Isar Allianz (<http://www.isar-allianz.de>)

• Synthèse comparative

- Principaux points de ressemblance :
 - des aménagements historiques pour l'hydroélectricité, avec un grand barrage en amont bloquant le charriage ;
 - des ouvrages en feston (barrage de dérivation, canal usinier) et hydrologie influencée ;
 - des flux grossiers diversifiés (fins, sables, grossiers), issus du piémont alpin, estimé à 50 000 m³/an avant aménagements, et similaires à certains secteurs du Rhône actuel (Secteur Ain-Lyon / UHC#10-ALY) ;
 - une évolution d'un style fluvial en tresses vers un style fluvial méandriforme à lit unique ;
 - des enjeux écologiques similaires (continuité biologique, forêt alluviale, anciens bras, espèces emblématiques telles que le castor, etc.) ;
 - des enjeux de restauration, de sûreté-sécurité et de fréquentation similaire au Canal de Miribel (UHC#10-ALY) en milieu urbain à péri-urbain ;
- Principaux points de différence :
 - taille de bassin versant : 9 000 km² au total, moins de 2 000 km² à Munich. L'Isar s'apparente plutôt à un affluent du Rhône, comme l'Ain ;
 - hydrologie : module de 85 m³/s, débit réservé de 15 m³/s ;
 - des pentes plus élevées sur l'Isar : 2 à 3 ‰ pour l'Isar dans la traversée de Munich, contre 0,2-0,8 ‰ pour Rhône (0,6 ‰ pour le Canal de Miribel) ;
 - des flux grossiers actuels relativement peu perturbés, très supérieurs à ceux du Rhône ;
- Actions pouvant être utiles à la réflexion sur la gestion sédimentaire du fleuve Rhône
 - Enjeux de connaissance :
 - Utilisation d'un modèle physique pour le dimensionnement des actions de restauration ;
 - Gestion sédimentaire :
 - Dragage dans les retenues et transfert en aval des barrages de façon à assurer la continuité sédimentaire ;
 - Réinjection en aval du barrage de Sylvenstein (volumes limités par rapport à la capacité de charriage) ;
 - Actions de restauration :
 - Projet de restauration hydromorphologique d'un tronçon courant, à transport solide par charriage, en milieu urbain à péri-urbain, avec des enjeux de fréquentation par le public et une volonté de diminuer les risques d'inondation (similaire aux projets en cours sur le Canal de Miribel) ;
 - Construction de projets associant la société civile avec une large part de concertation, et une implication ultérieure des citoyens (brigade de sécurité bénévoles) ;
 - Techniques d'aménagement particulières : recul de digues, protections de berge enterrées ou végétalisées, etc. ;
 - Gestion adaptative pour la mise en œuvre des travaux, par tranches, et en tenant compte des effets des crues ;
 - Gestion de la sécurité des usagers dans le lit de la rivière.

Références bibliographiques Isar :

Arzet, K. et Joven, S. (2008). *The Isar Experience* – Urban River Restoration in Munich.

Binder, W. (2008). *Case studies : Isar, Germany*. Bavarian Environment Agency, Munich, Germany.

Heckmann, T., Haas F., Abel, J., Rimböck, A., Becht M. (2017). *Feeding the hungry river: Fluvial morphodynamics and the entrainment of artificially inserted sediment at the dammed river Isar*, Eastern Alps, Germany. 2017.

Kleber-Lerchbaumer, U. (2011). *The Isar Experience. River Restoration in Middle Isar Reaches*. Bavarian Environment Agency. Project Sud'Eau, 2011/03/18 Bloc 4. Archivo General de Navarra C/Dos de Mayo, Pamplona, Navarra.

Mahida, N. (2013). *The Isar-Plan Project in Munich Great (Un)expectations*. European River Restoration Conference Session 5- Enhancement of Multi-Use Landscapes. 11-13 September 2013

Weiss, F.-H. (1996). *Sediment monitoring, long-term loads, balances and management strategies in southern Bavaria*.

Wulf R., Schaufuß, D. (2013). *The Isar-Plan Munich. A New Lease of Life for the Isar River*.

Terrier, B. & Piégay, H. (2019). *Les rivières en tresses. Eléments de connaissance*. Eau & connaissance.

Vidéo : The Isar Restoration – A participatory climate change adaptation measure
<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=7ED6FpCT2AE>

2.4.4 Pô : entre la confluence avec la Trebbia et la confluence avec le Taro

► Présentation générale du Pô

Le Pô s'écoule sur 652 km entre le Mont Viso où il prend sa source et son delta en mer Adriatique, drainant les Alpes en amont et sur sa rive gauche, et les Apennins sur sa rive droite (bassin versant de plus de 73 000 km² au total). Le fleuve Pô est largement exploité, surtout comme source d'irrigation dans sa vallée à forte dominante agricole, mais aussi comme voie navigable importante : il est navigable sur 350 km entre la confluence du Tessin et le delta, pour un dénivelé total de 50 m nécessitant une seule écluse (Isola Serafini).



Figure 103 : Bassin versant du Pô et localisation du secteur d'étude (Source : UNESCO)

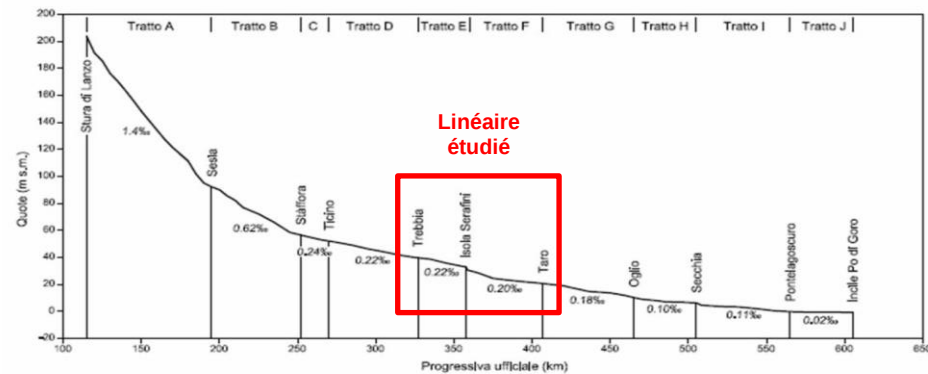


Figure 104 : Profil en long du Pô et localisation du secteur d'étude (Scarabello, 2013)

Au cours du 20^{ème} siècle, le cours moyen-inférieur du fleuve Pô a connu une incision importante de son lit, d'abord du fait du reboisement des versants et des endiguements pour la navigation (années 1940), puis essentiellement du fait des extractions de granulats. En effet, l'exploitation du sable et du gravier a été très intense de 1950 à 1980 à mesure que les régions se développaient. Entre la confluence du Tessin et le delta, les volumes d'extraction annuels sont passés de 2 millions de m³ (hm³) en 1920 à plus de 4 hm³ en 1974, puis 7 hm³ en 1979 (Parrinello et al, 2020), voire 12 hm³ (d'après ADB Po, 2006 et Bizzi et al., 2015). Ces volumes étaient bien supérieurs à la charge de fond du Pô (graviers et sables), ces extractions ont provoqué une chute drastique du niveau du lit. Sur la période 1982-2005, les extractions ont été limitées à 0,7 hm³/an, soit de l'ordre des apports naturels en charriage. Pour mémoire, les flux de MES du Pô dans son delta sont estimés à 19,6 Mt/an d'après Besset et al. (2017), ce qui fait du Pô le premier contributeur en MES parmi les fleuves méditerranéens, devant le Medjerda (Tunisie / 9,4 Mt/an), loin devant le Rhône (5,2 Mt/an ; valeur actualisée à 6 Mt/an en Mission 2 pour Petit et Grand Rhône) et même le Danube (4,7 Mt/an).

Après 1980, et devant les conséquences importantes sur les infrastructures (effondrements de ponts, de protections de berge), la réglementation a été plus stricte et a abaissé le rythme d'extraction à environ 4 hm³/an. Malgré tout, plusieurs structures de navigation et d'irrigation sont devenues inutilisables pendant les périodes de

faible débit ; par exemple, le port de Crémone, où les niveaux d'eau d'étiage ont diminué de plus de 4 m entre 1950 et 2000, a dû reconstruire ses écluses pour un coût de 40 M€. Les autres impacts comprennent l'instabilité des protections et des infrastructures contre les inondations, et les altérations écologiques du milieu aquatique, pour lesquelles les évaluations économiques font défaut (Bizzi et al., 2015).

Les pressions sur l'espace alluvial ont eu pour conséquence de réduire la largeur du lit, de réduire sa longueur, d'inciser le fond du lit, et de faire évoluer le style fluvial vers un chenal unique sinueux et profond (ADB Po, 2006). Les incisions les plus importantes ont eu lieu sur la période 1969-1979, en conséquence des extractions, alors que depuis 1991, un exhaussement du lit est observé en aval de Pontelagoscuro, à 50 km de l'embouchure du delta (ADB Po, 2006), ce qui traduit un basculement de la pente (incision en amont et exhaussement en aval) caractéristique d'un déséquilibre morphologique. Dans le secteur d'Isola Serafini (Ile Serafini), les processus se sont accélérés après la construction de l'usine hydroélectrique, qui a modifié le régime d'écoulement et créé une déconnexion du transport des sédiments (Bizzi et al., 2015).

► Fonctionnement hydrosédimentaire général du tronçon d'étude

Le tronçon analysé se situe entre la confluence de la Trebbia en amont de l'agglomération de Piacenza (région Emilie-Romagne) et la confluence avec le Taro en aval de Crémone (Lombardie) ; il inclut l'île Serafini, qui est le seul site où le fleuve est 1) directement exploité pour l'hydroélectricité et 2) équipé d'une écluse pour la navigation (modernisée et agrandie par des travaux en 2012-2016).

Dans ce linéaire, la production sédimentaire est estimée de 5 à 6 hm³/an et le charriage peut être évaluée à environ 10% de ces volumes, soit environ 0,5 à 0,6 hm³/an (Parrinello et al., 2020). D'autres estimations fournies par l'autorité de bassin (ADB Po, 2006) à partir de bilans sédimentaires sur 1982-2002 donnent un flux sédimentaire total de l'ordre de 4 à 5 hm³/an (cf. Figure 107 ; les flux considérés sont les flux totaux et non le charriage de fond – « al fondo » – comme indiqué sur l'axe du graphique). Les apports des affluents ne sont pas connus, mais ils sont souvent significatifs ; par exemple, la Trebbia qui conflue à l'amont du secteur d'étude, a fait l'objet d'un rythme d'extraction de 35 000 m³/an entre 1992 et 2003 (Blom et al., 2004).

En aval de l'île Serafini, l'incision du lit du Pô est parmi les plus importantes de son linéaire, avec 5 m entre 1954 et 1991. Entre 1991 et 2005, période qui inclut deux crues exceptionnelles en 1994 et 2000, le lit est resté stable entre la confluence de la Trebbia et le barrage de l'île Serafini, alors qu'en aval l'incision s'est prolongée de 2,5 m jusqu'au niveau de la confluence avec le Taro.

Le barrage de dérivation et une usine hydroélectrique de l'île Serafini ont été mis en service en 1963 de façon à exploiter le dénivelé du Pô dans le méandre de l'île Serafini. L'usine est équipée de 4 turbines Kaplan verticales pour un débit de 1 000 m³/s (dépassé 40% du temps) et une puissance de 80 MW, et fonctionne avec un marnage limité (0,50 m de variation maximale autour de la cote nominale de 41 m (absence de réservoir, similaire au Rhône). Le canal de dérivation, qui résultait initialement d'une coupure de méandre lors de la crue de 1951, sert également de canal de navigation sur 12 km (Bizzi et al, 2015). Cet aménagement en feston est donc très similaire aux aménagements de la vallée du Rhône dans un contexte historique de charge grossière (barrage de Jons en aval de l'Ain, barrage du Pouzin en aval de la Drôme).

A la conception, les ingénieurs étaient préoccupés par la sédimentation dans la retenue et les risques de débordement ou d'avulsion. La réponse apportée et traduite dans les obligations réglementaires de l'ouvrage a été la mise en place de chasses régulières, sur la base d'une manœuvre des 11 vannes, dont 2 présentent un radier abaissé pour faire transiter les sédiments grossiers. Aucune autre obligation n'a été demandée à l'exploitant vis-à-vis des risques de déséquilibre sédimentaire en aval (Parrinello et al, 2020). Ce barrage a coupé le chenal de la rivière en deux, créant une discontinuité majeure entre le haut et la section inférieure du fleuve, avec des conséquences sur la connectivité écologique et les flux sédimentaires (Bizzi et al. 2015).

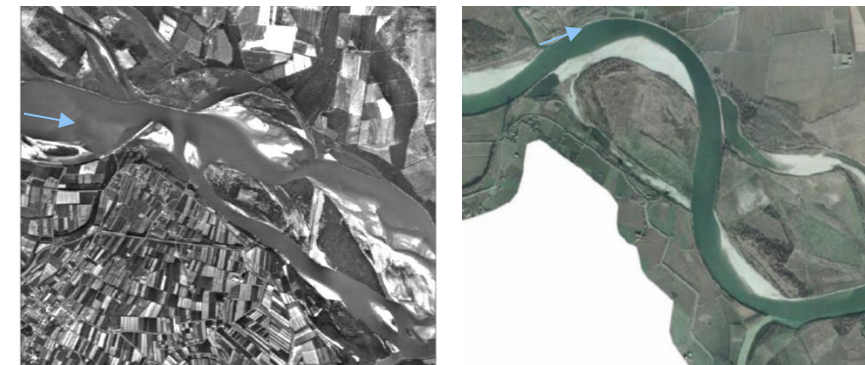


Figure 105 : Evolution caractéristique du style fluvial du Pô à l'embouchure du Taro (en bas à droite) entre 1955 (gauche) et 2005 (droite) (ADB Po, 2006)

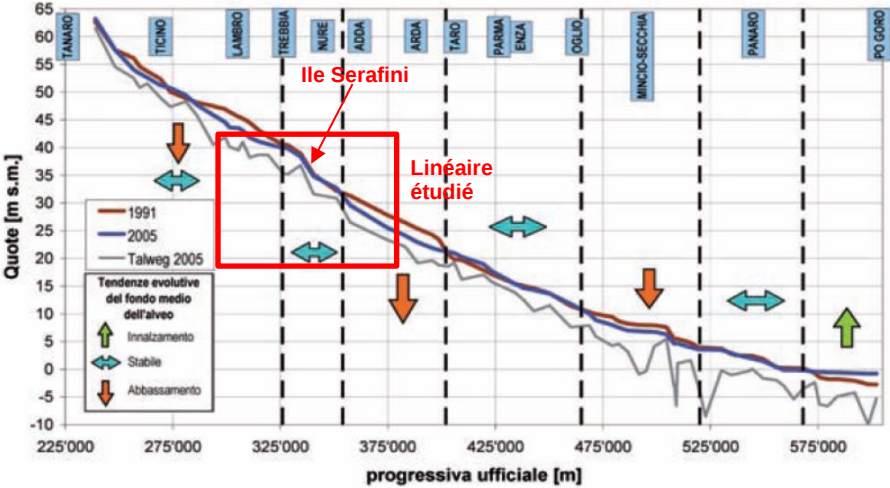


Figure 106 : Evolution du fond moyen du lit du Pô entre 1991 et 2005 (ADB Po, 2006)

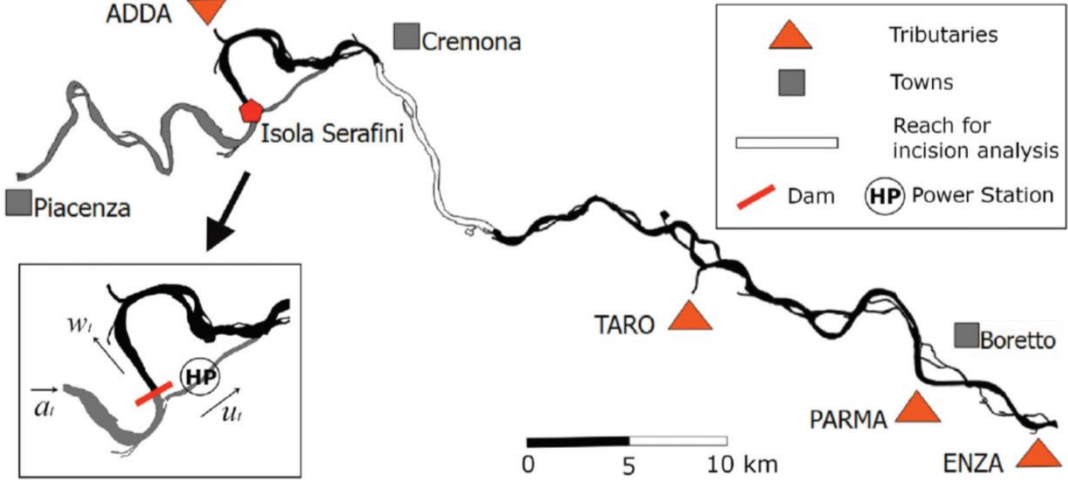


Figure 109 : Localisation de l'aménagement hydroélectrique et de navigation de l'Ile Serafini, et tronçons étudiés (Bizzi et al., 2015)

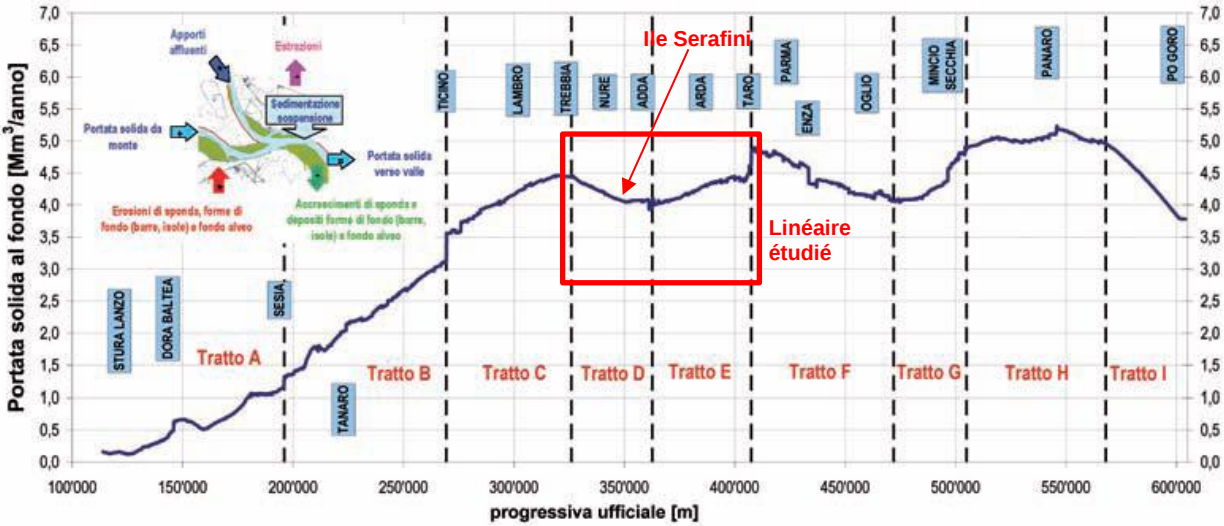


Figure 107 : Profil en long de la charge de fond d'après des bilans sédimentaires sur la période 1982-2002 (ADB Po, 2006)

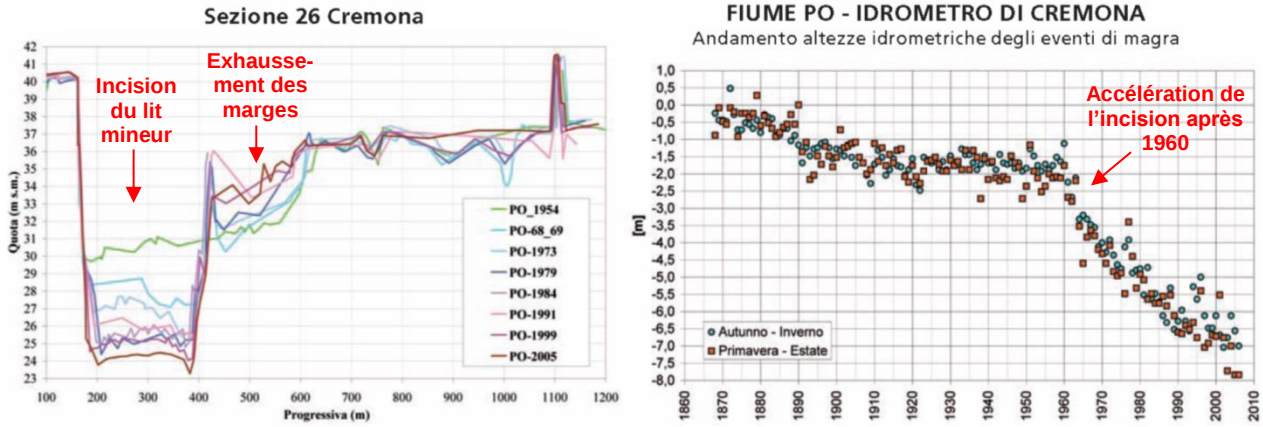


Figure 108 : Exemple d'incision du lit à hauteur de Cremona (gauche) et tendance à l'incision des étiages à la station hydrométrique de Cremona (droite) (ADB Po, 2006)



Figure 110 : Barrage, écluse et canal de l'Isola Serafini (sources : Google ; Binini partners, 2018)

L'intervention proposée dans la traversée de la ville de Plaisance vise notamment à réduire les contraintes dynamiques des crues de la rive droite. Pour atteindre ces objectifs, il est prévu de restaurer un lit fluvial à deux bras à partir des débits ordinaires, en réactivant le chenal de rive gauche et en supprimant les protections de berge en amont sur la rive gauche qui sont à l'origine du remplissage du chenal lui-même.

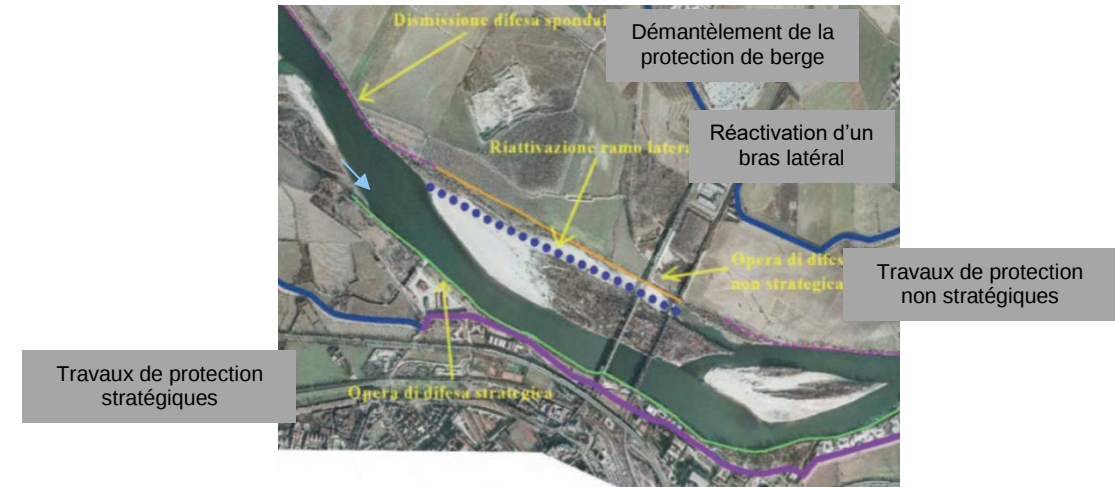


Figure 111 : Exemple de mesures de restauration envisagées dans la traversée de Plaisance

L'intervention à la confluence avec le Taro consiste à abaisser les épis de navigation pour qu'ils puissent déborder à partir de débits d'environ 800-1000 m³/s (débits équivalents au module), permettant ainsi aux zones de plaine inondable en arrière d'être inondées plusieurs fois par an, rétablissant cette continuité latérale qui fait actuellement défaut.

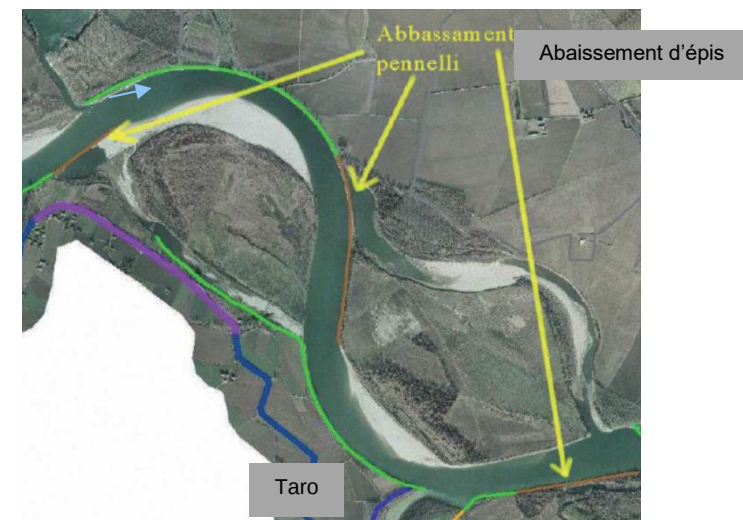


Figure 112 : Exemple de mesures de restauration envisagées à la confluence avec le Taro



Figure 113 : Exemple de réalisation à Casalmaggiore : suppression d'épi et restauration d'un bras secondaire (AIPO, 2011 ; in Bussetini, 2019)

► Opérations de gestion et de restauration hydromorphologique

• Programme général de gestion sédimentaire et de restauration

Les propositions d'intervention du programme général de gestion des sédiments émises par l'ADB Po en 2006 se concentrent sur des objectifs visant globalement à limiter l'incision du lit et la déconnexion des annexes fluviales, tout en préservant les usages et les risques :

- préserver les processus naturels là où ils sont encore présents et actifs ; à ce titre l'espace de mobilité du Pô a été cartographié en 2008 (ADB Po) ;
- réduire les effets et les contraintes des aménagements sur le système naturel pour réactiver la dynamique du fleuve et sa valeur écologique ;
- améliorer les conditions de sécurité hydraulique en réduisant les contraintes hydrodynamiques sur les digues et en garantissant les usages en place (points de jonction, ports, quais, navigation).

Par ailleurs, l'AIPO (2007) estime que le chenal de navigation peut transiter un débit de 3 000 m³/s, ce qui est surdimensionné pour l'usage de navigation, et qu'il est possible de restaurer des zones inondables et des bras secondaires. Pour ce faire, le programme identifie les lignes d'action stratégique suivantes:

- sauvegarde de toutes les formes et processus fluviaux et surveillance et suivi opérationnel,
- restauration des processus d'érosion, de transport solide et de dépôt de sédiments par le démantèlement ou l'adaptation d'ouvrages dans le lit de la rivière qui ne sont plus efficaces,
- restauration des formes par réouverture et re-fonctionnalisation des bras secondaires.

Le programme classe les interventions en deux catégories distinctes, les qualifiant d'« extraordinaires » et d'« ordinaires ». Les travaux « extraordinaires » sont des travaux de restauration qui servent à éliminer les pressions externes les plus contraignantes et permettent à la rivière d'initier des processus de restauration autonome. Les travaux « ordinaires » sont des interventions de gestion active visant à pallier à l'impossibilité de restaurer totalement les processus naturels. Par exemple, au niveau du barrage d'Isola Serafini qui limite le transit par charriage de l'amont vers l'aval : ce blocage ne peut être résolu qu'en transférant artificiellement vers l'aval les flux bloqués en amont.

Les interventions structurelles proposées peuvent être regroupées dans les types suivants :

- déclassement des protections de berge incompatibles avec les objectifs du projet ;
- construction de nouveaux ouvrages pour la protection de digues ;
- création et adaptation d'épis pour diriger le courant dans le respect des processus évolutifs du fleuve ;
- réouverture de lits secondaires et marges déconnectées ou en voie d'être complètement désactivées ;
- correction du tracé de certains méandres dont l'évolution naturelle a été perturbée en raison de la présence d'ouvrages et dans l'état actuel induit des conditions de risque sur les digues.

Le programme recommande des mises en œuvre globales et intégrées de l'ensemble des objectifs afin d'initier une restauration vertueuse des processus. D'après les informations collectées, le nombre d'actions réalisées depuis 2006 est relativement limité (adaptation de l'épi de Casalmaggiore et restauration morphologique du bras secondaire en arrière / AIPO, 2011 ; d'après Bussetini, 2019). Il n'existe pas de retour d'expérience documenté sur ces actions. Les illustrations suivantes montrent les types de travaux qui ont été définis en 2006 au stade pré-faisabilité (ADB Po, 2006) ou réalisés (Bussetini, 2019).

• Exemples d'actions envisagées dans le périmètre d'étude

En aval de la confluence avec le Tessin, il existe des situations de forte pression anthropique, avec des usages stratégiques, comme dans la traversée de la ville de Piacenza et au niveau du barrage Isola Serafini. Les impacts de ces systèmes, en particulier les effets d'interruption de la continuité de transport solide générée par la traversée d'Isola Serafini, doivent être atténués. En dehors d'actions de confortement de digues et protections de berge, les interventions suivantes sont prévues dans le secteur de l'Isola Serafini :

- la construction d'environ 7 km de nouveaux épis dans le lit du Pô en amont du barrage d'Isola Serafini de façon à concentrer les écoulements et favoriser le transit des sédiments dans la retenue ;
- l'adaptation d'environ 7 km d'épis et de protections de berges dans le tronçon situé en aval du barrage d'Isola Serafini ;
- la réouverture de 9 bras latéraux pour une longueur totale estimée d'environ 22 km.

Opération de gestion des sédiments

Dragages

Le Pô ne semble faire l'objet de dragages dans son lit. Il a existé toutefois un projet de calibration du lit pour les navires de classe V (CEMT), qui identifie 39 sites (points d'inflexion de méandres) avec un mouillage inférieur à 2 m en étiage (entre 12 et 61 jours par an), notamment en aval du Taro (AIPO, 2007). Les confluences des affluents ne sont pas draguées.

Amélioration de la mise en transparence d'un barrage de dérivation

Dans une étude menée en 2015, Bizzi et al. ont analysé, avec une projection à 10 ans, les règles d'exploitation du barrage de l'Île Serafini qui pourraient permettre d'optimiser le couple « production hydroélectrique » vs « atténuation de l'incision de la rivière ». L'incision est considérée en aval de l'usine, à hauteur de Cremona, dans le secteur le plus sensible au déséquilibre sédimentaire (incision de 6 cm/an en moyenne en état initial). Les tests ont été menés en faisant varier les conditions de répartition de débit au droit du barrage.

La Figure 114 (gauche) illustre la loi de répartition de débit initiale au niveau du barrage : « a » est le débit entrant du Pô ; « u » est le débit turbiné. Le débit réservé dans le tronçon court-circuité – que nous appellerons Vieux Pô – est de 100 m³/s. Les groupes ne fonctionnent pas en-dessous de 200 m³/s ce qui implique que si le débit entrant « a » est inférieur à 300 m³/s, les groupes sont à l'arrêt ; un débit minimal est alors probablement conservé pour la navigation dans le canal (donnée non fournie). La capacité maximale des groupes est de 1 000 m³/s ; au-delà de ce débit, les vannes du barrage s'ouvrent progressivement pour laisser transiter les surplus de débit dans le Vieux Pô. Lorsque le débit total du Pô en crue atteint 4 000 m³/s (débit dépassé 5 jours par an en moyenne), la centrale s'arrête pour des questions de sûreté et les vannes sont totalement ouvertes.

La Figure 114 (droite) illustre les possibilités de répartition de débits testées dans le but de favoriser les flux sédimentaires vers l'aval et limiter l'incision de la rivière. Les paramètres θ_1 à θ_4 sont des variables à ajuster dans la zone grise pour les différentes itérations des simulations : θ_1 donne le débit total du Pô, compris entre 900 et 4 000 m³/s, pour lequel une partie des groupes sera arrêtée (débit des groupes : θ_2) ; θ_3 donne la pente de croissance du débit au-delà de θ_1 ; et θ_4 définit le débit maximal au-delà duquel la centrale s'arrête (4 000 m³/s dans l'état actuel). Pour délimiter la zone grise du graphique, il est tenu compte dans les seuils que le transport solide dans le Vieux Pô est significatif à partir de 700 m³/s (ou 1700 m³/s en débit total lorsque les groupes tournent avec 1 000 m³/s).

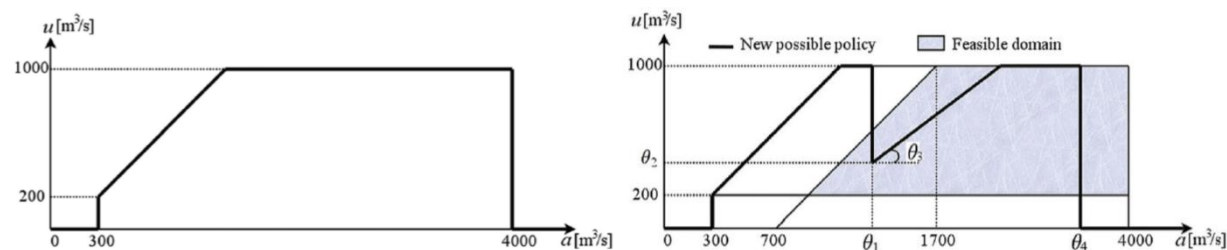


Figure 114 : Loi de répartition de débit au barrage de l'Île Serafini : actuelle (à gauche) et testée (à droite)

A partir de ces hypothèses de répartition de débit, 2 schémas de pilotage du barrage ont été simulés :

- Schéma A (cf. Figure 115 / gauche) :** dans ce schéma de « contrôle par anticipation », la variable de contrôle est uniquement le débit entrant total du Pô ; cette valeur détermine le débit dans la centrale et le Vieux Pô à partir d'une règle de fonctionnement définies par les paramètres θ_1 à θ_4 . Le revenu de la production hydroélectrique est donné par J^{hp} . Le taux d'incision en aval (J^{inc}) pourrait être limité par deux mécanismes différents : 1) l'augmentation de l'apport de sédiments vers le tronçon aval par une meilleure transparence de l'ouvrage ; 2) augmentation de la capacité de transit vers l'aval de sédiments précédemment déposés. Ce Schéma A affecte à la fois l'approvisionnement en sédiments et la capacité de transport dans le Vieux Pô ;
- Schéma B (cf. Figure 115 / droite) :** sur la base des résultats du schéma A, le schéma B combine à la fois des schémas de « contrôle par anticipation » et de « contrôle par rétroaction ». Lors de la première année, le système débute avec le schéma A ; cependant, à la fin de l'année et les années suivantes, une règle de rétroaction modifie la valeur de θ_4 pour l'année suivante de façon à minimiser l'incision annuelle en aval (i_y). Les autres valeurs de θ_1 à θ_3 restent des variables de simulation.

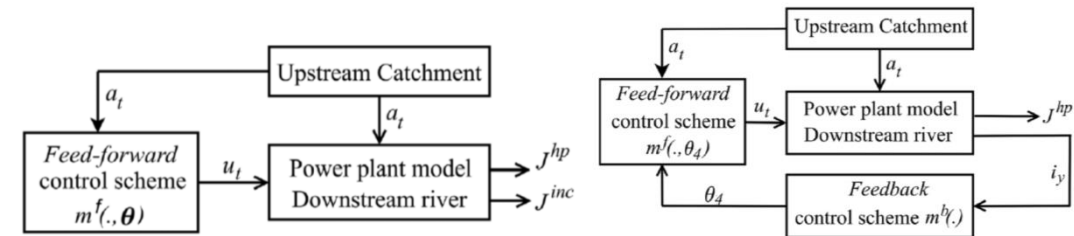


Figure 5. Scheme A—Feedforward control.

Figure 7. Scheme B—Mixed feedforward and feedback control.

Figure 115 : Principes des lois de contrôle de débit : Schéma A (à gauche) et Schéma B (à droite)

Les résultats des différentes simulations sont illustrés par la Figure 116, après traitement par RSM (Response Surface Methodology). Les conclusions suivantes peuvent en être tirées :

- Avec le Schéma A, l'arrêt de l'incision (retour à un taux d'incision J^{inc} nul ; flèche verte) coûterait 2,5 M€ par an du fait de l'impact sur la production hydroélectrique (baisse de 7,3 % de la production annuelle actuelle) ; avec le Schéma B, ce coût serait limité à 0,8 M€/an (-2,6% ; flèche bleue). Un objectif de réduction de moitié du taux actuel d'incision (3 cm/an) porterait les résultats respectivement à 0,5 M€/an (-1,5%) et 0,2 M€/an (-0,6%) ;
- Le Schéma A permet au mieux d'annuler l'incision, et ne permet pas de réaliser une recharge du lit du Pô en aval. A contrario, un exhaussement du lit est possible avec le schéma B : par exemple, un exhaussement de 2 cm/an (cf. Figure 116 / flèche grise) coûterait 1,5 M€/an (34,3 – 32,8 M€) (soit environ 5% de la production annuelle actuelle).
- Les performances du schéma A dépendent fortement des séries hydrologiques utilisées pour exécuter l'optimisation. Le contrôle de rétroaction du schéma B est plus résilient à cet égard puisque la règle de fonctionnement s'adapte chaque année aux nouvelles entrées hydrologiques.

Ces schémas de pilotage de l'ouvrage de dérivation restent théoriques et n'ont pas été mis en application sur l'ouvrage de l'Île Serafini. Néanmoins, l'approche montre qu'il serait possible de concevoir des règles de fonctionnement pour réduire le taux d'incision du lit en aval de l'usine tout en limitant l'impact sur la production d'énergie. D'après Bizzi et al., il s'agit de la première tentative de définition de règle de pilotage d'un ouvrage hydroélectrique afin de modifier les processus hydromorphologiques et répondre à des objectifs multiples, en l'occurrence « production hydroélectrique » et « équilibre sédimentaire du lit ».

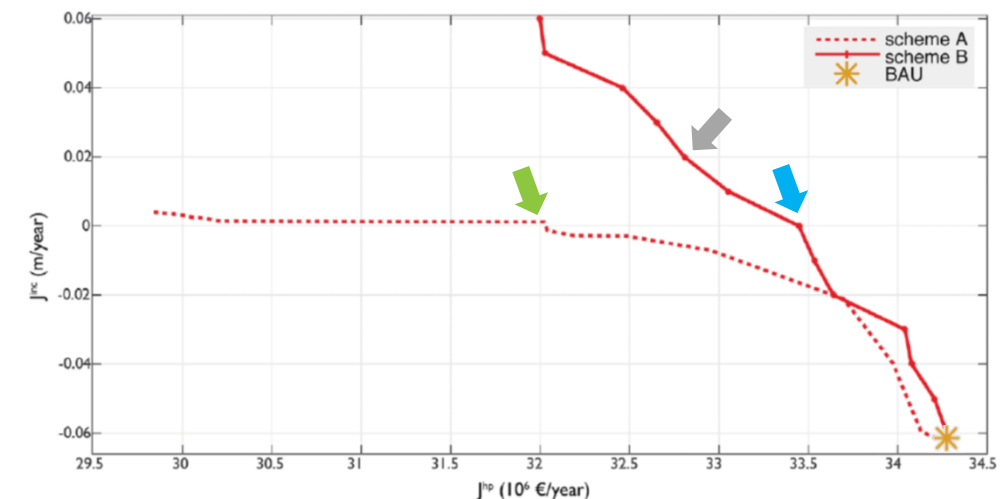


Figure 116 : Comparaison des résultats des schémas A et B sur la production hydroélectrique (abscisses) et l'évolution du lit (ordonnées)

La situation actuelle est caractérisée par le point BAU (business as usual) qui correspond à 34,3 M€ de revenus annuels pour l'hydroélectricité et conduit à une incision de 6 cm/an en moyenne

Bilan du retour d'expérience

Bilan des acteurs concernés

- ADB Po : Autorità distrettuale di Bacino del Fiume Po est l'une des autorités établies par le décret du ministère de l'Environnement et de la Protection des terres et de la mer du 25 octobre 2016. Le décret divise le territoire italien en sept districts hydrographiques ;
- AIPO : L'Agence interrégionale du Pô (AIPO) est un organisme dont les principaux objectifs sont la sécurité hydraulique du territoire du bassin du Pô, y compris un service de prévision, et la construction et la gestion des ouvrages de navigation fluviale ;
- Gestionnaire du barrage Isole Serafini : ENEL Company.

Synthèse comparative

- Principaux points de ressemblance :
 - des pentes similaires : 0,22 ‰ pour le Pô dans le linéaire étudié (0,1 à 0,6 ‰ sur le linéaire total) ; 0,2-0,8 ‰ pour Rhône ;
 - des aménagements historiques pour la navigation, et enjeu local pour l'hydroélectricité ;
 - un ouvrage en feston (barrage de dérivation, canal usinier) et hydrologie influencée ;
 - des flux grossiers diversifiés (fins, sables, grossiers), issus du piémont alpin et similaires au Rhône avant aménagement : 500 000 à 600 000 m³/an pour le Pô, jusqu'à 350 000 m³/an pour le Rhône en aval de l'Isère ;
 - des affluents à forte charge alluvionnaire ;
 - une évolution d'un style fluvial en tresses vers un style fluvial méandrique à lit unique ;
- Principaux points de différence :
 - des flux grossiers actuels relativement peu perturbés, très supérieurs à ceux du Rhône ;
 - des enjeux écologiques peu traités : zones humides, continuité écologique, etc.

Actions pouvant être utiles à la réflexion sur la gestion sédimentaire du fleuve Rhône

- Enjeux de connaissance :
 - Existence d'un programme général de gestion sédimentaire et de restauration ;
- Gestion sédimentaire :
 - Analyse économique de l'optimisation de la transparence sédimentaire et de la production hydroélectrique (barrage de l'Ile Serafini) ;
 - Protections de berge dans les secteurs soumis à érosion suite à l'évolution du style fluvial (lit méandrique), utile pour un secteur comme Chautagne par exemple ;
- Actions de restauration :
 - Démantèlement d'ouvrages latéraux afin de restaurer l'espace de bon fonctionnement et la dynamique hydrosédimentaire ;
 - Restauration d'annexes en configuration de fort charriage (bras secondaires, zones d'expansion de crues).

Références bibliographiques Pô :

Autorità di bacino del fiume Po (ADB Po) (2006). *Il recupero morfologico ed ambientale del fiume Po. Il contributo del Programma generale di gestione dei sedimenti del fiume Po.*

AIPO (≈2007). *Progetto preliminare degli interventi relativi alla sistemazione a corrente libera del fiume Po nella tratta compresa tra isola Serafini e foce Mincio per consentire il transito di una unità di navigazione della V_a classe CEMT.*

Bussetini M. (2019). *Sediment management in Italy.* Workshop of the WFD CIS Working Group on Ecological Status. Dubrovnik, Croatia/

Besset M., Anthony E.J., Sabatier F. (2017). *River delta shoreline reworking and erosion in the Mediterranean and Black Seas - the potential roles of fluvial sediment starvation and other factors,* Science of the Anthropocene, University of California Press, 2017, 5, 10.1525.

Bizzi S., Dinh Q., Bernardi D., Denaro S., Schippa L., Soncini-Sessa R (2015). *On the control of riverbed incision induced by run-of-river power plant.* Water Resource Research. 10.1002/2014WR016237.

Blom, A., Sloff, C.J., Mosselman, E. (2004). *Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Trebbia nel tratto da Perino alla confluenza in Po.* Autorità di Bacino del Fiume Po

Parrinello G., Bizzi S., Surian N (2020). *How to Sink a Delta: A Geomorphological History of the Po Watershed over the Twentieth Century.* Manuscrit.

Scarabello G. (2014). *Analisi morfodinamica del tratto di fiume Po dalla confluenza con il fiume Secchia fino a Pontelagoscuro.* Università degli Studi di Padova. Dipartimento ICEA. Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile. Tesi di laurea magistrale.

3. Synthèse

La Mission 5 consiste à dresser un panorama des pratiques de gestion sédimentaire sur des grands fleuves. A travers des retours d'expériences représentatifs, l'étude réalisée permet de disposer d'un panel de solutions de gestion et de restauration de façon à alimenter la réflexion de Phase 2 pour la construction du schéma directeur.

Le périmètre des cours d'eau européens a été défini comme prioritaire, notamment pour l'accès aux données, sans exclure toutefois les cours d'eau nord-américains. Ce travail a été réalisé en deux étapes :

- Étape 1 : Étude bibliographique pour identifier et sélectionner des cours d'eau similaires au Rhône ;
- Étape 2 : Étude détaillée des pratiques de gestion sur le panel de cours d'eau sélectionnés.

L'étape 1 a permis de sélectionner 3 cours d'eau avec de fortes similarités globales avec le Rhône : le Rhin (France-Allemagne), la Meuse (Belgique-Pays-Bas), le Danube (Autriche, Slovaquie, Hongrie). Par ailleurs, 4 autres cours d'eau complémentaires, peut-être moins similaires mais remarquables sur certains aspects, ont été retenus pour compléter l'analyse. Il s'agit de la Columbia River (USA), de la Durance, de l'Isar (Allemagne), et du Pô (Italie).

L'étape 2 porte une analyse des cours d'eau sélectionnés. Globalement, les analyses suivent le même fil directeur : 1) contexte géographique, 2) Enjeux hydrosédimentaires, 3) Opérations de gestion et de restauration hydromorphologique, 4) Bilan du retour d'expérience, 5) Collecte bibliographique.

La partie 4) Bilan du retour d'expérience comprend les parties suivantes :

- Bilan des acteurs concernés ;
- Synthèse comparative des caractéristiques de cours d'eau :
 - Points communs ;
 - Points de différence ;
- Actions pouvant être utiles à la réflexion sur la gestion sédimentaire du fleuve Rhône :
 - Enjeux de connaissance ;
 - Gestion sédimentaire ;
 - Actions de restauration.

Le Tableau 12 et le Tableau 13 en page suivante synthétisent les éléments de comparaison à retenir de la Mission 5 et qui pourront être utiles pour la Phase 2 du dossier.

Enfin, le Tableau 14 reprend la typologie des actions établie en Mission 4 et positionne les expériences internationales qui peuvent être utiles pour la gestion sédimentaire du Rhône. Il est ainsi précisé : les types d'actions qui ne sont pas appliqués actuellement sur le Rhône (NON APPLIQUÉ), ce qui permet d'ajouter 6 types d'actions potentielles à la liste (RSE, RCN, RLE, RBM, RQM, RCS) ; ceux qui sont réalisés de façon similaire à ce qui est pratiqué sur le Rhône (SIMILAIRE) ; et ceux qui sont réalisés avec des différences ou des éléments novateurs.

Globalement, on retiendra les apports suivants du travail de Mission 5 :

- **Les cours d'eau sélectionnés**, bien que différents du Rhône dont la particularité du contexte et des aménagements se confirme, s'avèrent pertinents et permettent d'approcher des pratiques et des retours d'expérience utiles pour sa gestion sédimentaire, et notamment pour le travail de Phase 2. Même si les tailles de cours d'eau différent, le Rhin et le Danube sont les cours d'eau qui sont les plus proches du Rhône en termes de contexte, d'aménagements et d'usages actuels ;
- **Alors que le Rhône présente essentiellement des situations excédentaires en sédiments** (hormis dans les RCC), les cours internationaux étudiés – dont notamment le Rhin et le Danube – subissent à la fois des excédents et des déficits marqués. La présence de grands secteurs en déficit vient du fait qu'il existe dans ces cours d'eau de grands linéaires courants sans dérivation de débit, localisés entre des secteurs aménagés et segmentés par des retenues. Ces secteurs courants présentent donc une activité sédimentaire importante, ce qui entraîne une incision par érosion progressive sous les barrages amont et des excédents dans les retenues situées en aval (cas du Rhin en aval d'Iffezheim, du Danube en aval de Vienne, etc.). Les secteurs courants sur le Rhône sont rares (amont Génissiat / 03-GEN, aval Sault-Brénaz / 09-VUL, Palier d'Arles / 23-ARL) et ne présentent pas – à ce stade – d'enjeu important de déficit sédimentaire ;

- **Dans les secteurs en déficit précédents, la navigation est souvent un enjeu majeur.** Les voies navigables du Rhin et du Danube, présentent en effet un trafic fluvial d'un tout ordre de grandeur : environ 300 Mt sur le Rhin (soit 2/3 environ du trafic fluvial de l'Europe Occidentale), 40 Mt sur le Danube, pour environ 5 Mt sur le Rhône. Aussi, les phénomènes d'incision ne peuvent être laissés sans intervention sous peine de dégrader les conditions de navigation et d'inciser les accès aux écluses, ce qui aurait des répercussions majeures sur le transport fluvial. Aussi, les gestionnaires se trouvent dans l'obligation de réaliser d'importantes opérations de réinjection sédimentaire (180 000 m³/an en aval d'Iffezheim sur le Rhin, 235 000 m³/an en aval de Vienne sur le Danube) en transférant des volumes sédimentaires depuis des zones excédentaires. Les tendances futures évoluent même vers des réinjections sédimentaires en boucles fermées : les sédiments sont dragués en aval du linéaire actuel et réinjectés dans la partie amont du linéaire courant après transport sur barge et clapage (cas du linéaire entre Vienne et Bratislava). De telles actions sont intéressantes en retour d'expérience (transport de sédiments, modalités de réinjection, etc.) mais n'ont pas lieu d'être menées sur le Rhône, sauf à l'avenir si des évolutions des secteurs courants devaient être défavorables (Palier d'Arles notamment).
- **Bien que l'analyse n'ait pas quantifié la totalité des actions réalisées** pour chaque cours d'eau international, le Rhône apparaît comparativement comme un cours d'eau qui a fait l'objet de nombreuses opérations de restauration (débits réservés, îlons, marges alluviales, réinjections, zones humides, etc.), et sur une longue période (depuis les années 1990).
- **Pour la plupart des cours d'eau étudiés**, on remarque la volonté de maintenir les sédiments dans le système alluvial, quitte « à faire remonter » les sédiments par la voie navigable (cas de la retenue d'Aschach ou du linéaire en aval de Vienne sur le Danube). Inversement, pour certains projets en lien avec l'usage navigation ou protection contre les crues, le pragmatisme l'emporte. C'est le cas de la Meuse a fait l'objet d'un projet global de restauration très ambitieux (linéaire de plus de 50 km, 150 millions de m³ terrassés) qui n'a pas d'égal ailleurs en Europe, et qui a pu être financé à moindre coût grâce à la valorisation dans les BTP des sédiments issus des déblais nécessaires à la restauration de son espace de bon fonctionnement. Pour l'alimentation des réinjections en aval d'Iffezheim sur le Rhin, il semble qu'une partie des matériaux proviennent d'exploitation de gravières aménagées en zones d'expansion de crue.
- **Les connaissances scientifiques sur le Rhône**, notamment sur le fonctionnement sédimentaire et écologique, sont également d'un très bon niveau, similaires à ce qui est fourni sur le Rhin ou le Danube pour l'aspect sédimentaire, ou sur la Meuse sur le plan écologique. Dans les pistes de progrès pour le Rhône, on peut mentionner les mesures de flux de sables plus complètes sur le Rhin, les mesures granulométriques répétées dans le temps sur le Danube, l'utilisation de modèle physique pour dimensionner les actions de restauration, et l'établissement d'un schéma directeur de gestion sédimentaire (ce qui est l'objet de la présente mission). A ce titre, on notera que le schéma directeur du Danube (Sediment Manual for Stakeholders, Habersack, 2019c) devrait pouvoir inspirer le travail de Phase 2.
- **Contrairement au Rhône, la question de l'atteinte du bon état ou du bon potentiel** n'est pas ou très peu citée pour les cours d'eau étudiés, ce qui explique l'absence de rubrique sur ce sujet. Le schéma directeur du Danube mentionne que les liens entre gestion sédimentaire et objectifs de la DCE, notamment par le fait que les sédiments sont le support de la biologie, mais il ne fait pas de l'atteinte du bon état un objectif du plan de gestion sédimentaire. Au contraire, le volet de la gestion sédimentaire est traité séparément du volet biologique. Le schéma répond avant tout aux préoccupations des gestionnaires pour l'hydroélectricité, la navigation et la protection contre les inondations. Les actions pour l'écologie viennent en complément et s'appuient sur les premières actions afin de composer des projets globaux et intégrés (cas de la restauration du Danube entre Vienne et Bratislava).
- **Enfin, le temps impartis à la Mission 5** a nécessité de laisser de côté certains aspects complémentaires :
 - Les aspects de gouvernance ou réglementaires propres à chaque cours d'eau ;
 - Un regard critique sur les actions qui ne peut être possible qu'à travers une réelle appropriation des études réalisées et des enquêtes menées auprès des acteurs locaux.

Il serait utile de compléter le travail et d'analyser le cadre de gouvernance, la motivation des interventions, les contraintes, le financement des actions, les aspects réglementaires et les éventuelles logiques ERC mises en œuvre.

Tableau 12 : Synthèse des éléments de comparaison pour les 3 principaux cours d'eau (Rhin, Meuse, Danube)

		Cours d'eau prioritaires		
Cours d'eau		Rhin	Meuse	Danube
Pays		Allemagne, France	Belgique, Pays-Bas	Autriche, Hongrie, Slovaquie
Secteur		Entre Bâle et l'aval de Karlsruhe	Entre Maastricht et Nimègue	Entre la confluence avec l'Inn à Passau et la portion court-circuitée en aval de Bratislava (Komárno)
Bilan des acteurs concernés		CIPR, EDF, VNF, WSA	Rijkswaterstaat, Consortium Grensmaas BV, gestionnaires de barrages, Vlaamse Waterweg	Commission du Danube, ICPDR, BMVIT, Via Donau, gestionnaires de barrages
Synthèse comparative des caractéristiques de cours d'eau	Points communs	- des pentes similaires : 0,2 à 1 ‰ pour 0,2 à 0,8 ‰ pour le Rhône ; - des aménagements historiques et enjeux forts pour la navigation et l'hydroélectricité ; - des ouvrages en feston (barrages de dérivation, canaux usiniers) et hydrologie influencée ; - des sections de Rhin total (aval Ilfzheim) ; - des flux grossiers diversifiés (fins, sables, grossiers), issus du piémont alpin, avec un grand lac faisant obstacle à la continuité (lac de Constance) ; - des enjeux écologiques forts : zones humides, bras secondaires, continuité écologique, etc. ;	- des pentes similaires : 0,3 à 0,6 ‰ pour 0,2 à 0,8 ‰ pour le Rhône ; - des aménagements historiques et enjeux forts pour la navigation et l'hydroélectricité ; - des ouvrages en feston : barrages de dérivation, canaux de navigation ; - des flux grossiers diversifiés (fins, sables, grossiers), issus de remplissages anciens dans des fossés d'effondrement tectonique ; - des enjeux écologiques forts : zones humides, bras secondaires, continuité écologique, etc. ;	- des pentes similaires : 0,3 à 0,5 ‰ pour 0,2 à 0,8 ‰ pour le Rhône ; - des aménagements historiques et enjeux forts pour la navigation et l'hydroélectricité ; - des ouvrages au fil de l'eau (amont Vienne) similaires à la série Verbois / Chancy-Pougny, Génissiat, Seyssel ; - un ouvrage en feston (Gabčíkovo) avec barrage de dérivation, canal usinier, et hydrologie influencée ; - des sections de Danube total en écoulement libre (Wachau, Est Vienne) ; - des flux grossiers diversifiés (fins, sables, grossiers), issus du piémont alpin ; - des affluents avec forte charge grossière historique, limitée aux fines et au sable ; - des enjeux écologiques forts : zones humides, bras secondaires, continuité écologique, etc. ;
	Points de différence	- un canal de dérivation (Grand Canal d'Alsace) avec 4 ouvrages en série (long canal, long Vieux Rhin) ; - un linéaire de Rhin total et navigable en incision (aval Ilfzheim) ; - l'absence d'affluents à charge grossière et/ou nécessitant des interventions lourdes de dragage.	- des canaux de dérivation ne servant que pour la navigation. La Meuse garde une hydrologie en crue non influencée, et les ouvrages hydroélectriques sont installés sur la Meuse en parallèle des canaux ou sur la Meuse totale navigable ; - une absence d'affluents à charge grossière et/ou nécessitant des interventions lourdes de dragage.	- de grands linéaires en débit total et présentant une incision active, y compris en linéaire navigable (Est Vienne) ; - une longue série de 10 ouvrages au fil de l'eau en amont de Vienne.
Actions pouvant être utiles à la réflexion sur la gestion sédimentaire du fleuve Rhône	Enjeux de connaissance	- Bilan des flux de sables par mesures ADCP ; - Transfert de sédiments réinjectés dans une section incisée et chenalisée ;	- Suivi des habitats aquatiques, terrestres, amphibiens, et faune et flore associées. Thèse en cours sur le fonctionnement hydrosédimentaire actuel ;	- Programme de recherche et suivi (Interreg, JDS, etc.), - Panel complet de données sédimentaires ; - Bathymétrie complète et précise ; - Données granulométriques à plusieurs périodes ; - Schéma directeur sur l'ensemble du bassin versant ;
	Gestion sédimentaire	- Gestion des sédiments pollués (site de Ljsselloog) ; - Construction d'ouvrages (type murs déflecteurs) pour limiter le dépôt des sédiments ;	- Mise en transparence d'ouvrages hydroélectriques pour des flux de fines et sables ; - Dragages de fines et sables (voire grossiers) au niveau des points bloquants (Vessem).	- Flux de sédiments fins gérés par chasse et par l'effet des crues (2002, 2013) ; - Sédiments grossiers dragués pour les enjeux de navigation et d'inondabilité, et réinjectés en amont dans la même retenue
	Actions de restauration	- Restauration de zones d'expansion de crues (cas du polder d'Erstein) ; - Bras secondaire en aval d'une petite centrale hydroélectrique turbinant le débit réservé (Kembs) ; - Suppression d'épis et de protections de berge ; - Réinjections sédimentaires : - fourniture en matériaux : - Par réutilisation des matériaux issus de travaux de restauration (berges, bras secondaires, etc.) (cas des travaux de restauration de Kembs) ; - Par transfert de matériaux issus de gravières situées en lit majeur ; - transport des matériaux : transport sur barge (sur plusieurs dizaines de km) ; - modalités de recharge : par clapage en fond de lit à partir de barges à clapet ; - rythme de réinjection : volumes importants (170-180 000 m³/an en aval Ilfzheim) et fréquence annuelle.	- Restauration basée sur une reconfiguration topographique complète de l'espace rivière (3 000 ha en 2027, 5 000-6 000 ha à plus long terme), intégrant des objectifs de protection contre les crues ambitieux (Q250) ; suppression de protections de berge ; - Réinjections sédimentaires dans le cadre de la reconfiguration topographique du lit, permettant de favoriser une dynamique alluviale source de diversité d'habitats ; - fourniture en matériaux : réutilisation des matériaux issus des déblais en berge pour augmenter la capacité hydraulique du lit ; - transport des matériaux : transport par engins de chantier ; - modalités de recharge : par rappage en fond de lit restauré et en berge ; - rythme de réinjection : volumes importants à partir des déblais en berge (400 000 m³ sur 40 km ; en moyenne 10 m³/ml de rivière, sur une période de 10 ans). Réflexion en cours pour définir comment réinjecter 30 000 m³/an qui correspondent au déstockage annuel ; - incidences en aval : le remodelage du lit semble avoir diminué le transit des sédiments en aval (pas de dragage depuis 2008) par diminution de la capacité de charriage. Le retour des sédiments est cependant attendu à terme du fait de la dynamique sédimentaire observée. Ce type de situation est très similaire à celle de Vieux Rhône qui ferait l'objet de recharge sédimentaire avec une retenue hydroélectrique en aval et des risques pour la navigation. - Intégration d'anciennes gravières dans le fonctionnement hydraulique et les connexions écologiques ; créations d'annexes à vocation hydraulique (chenal de crue) et écologique ; - Revégétalisation spontanée, mise en pâturage extensif, volonté de laisser se développer une forêt alluviale ; injection de bois morts ; valorisation paysagère ; gestion des espèces invasives et des plastiques ; création d'un parc naturel touristique (Maasvallei), à terme, définition d'un espace Natura 2000 se concentrant davantage sur les processus naturels que sur les espèces ; •Volonté de séparer dans la mesure du possible les linéaires à vocation de navigation et les linéaires à vocation écologique ; exemple envisagé dans la Meuse en Plassenmaas : suppression de la navigation dans la Meuse (report sur le canal Lateraal) et du barrage hydroélectrique de Roermond ; •Financement des opérations par les entreprises de travaux et la valorisation des matériaux	- Gestion globale et intégrée dans le linéaire en déficit à l'Est de Vienne (environ 48 km), intégrant : équilibre et continuité sédimentaire, nappe alluviale, milieux naturels aquatiques, humides et terrestres, connectivités latérales, risques d'inondation, navigation, hydroélectricité, etc. ; - Mesures contre l'érosion : réajustement du lit, suppression d'épis ou de digues submersibles, réorientation/modification d'épis, de protections de berge, réouverture de bras secondaires restaurés, recul de digues, restauration de zones d'expansion de crues, etc. ; - Mesures contre la sédimentation : réduction de la largeur du lit (en queue de retenue notamment), réduction de la largeur d'un barrage, réduction du chenal de navigation, déplacement du chenal de navigation ; - Réinjections sédimentaires : - Principe général de « gestion optimisée et intelligente » des stocks de sédiments grossiers ; - fourniture en matériaux : par réutilisation de matériaux dragués dans des zones excédentaires (en queue de retenue : Altenwörth, Est Vienne) ; - transport des matériaux : transport sur barge (jusqu'à 80 km), vers l'aval ou vers l'amont (en boucle fermée, au sein de la même retenue – exemple : Ashasch – ou d'un linéaire de Danube courant – exemple : aval Vienne) ; - modalités de recharge : par clapage et rappage en fond de lit à partir de barges à clapet ; - rythme de réinjection : volumes importants (235 000 m³/an sur le site Est Vienne) et fréquence annuelle.

Tableau 13 : Synthèse des éléments de comparaison pour les cours d'eau complémentaires (Columbia, Durance, Isar, Pô)

		Cours d'eau complémentaires			
Cours d'eau		Columbia	Durance	Isar	Pô
Pays		Etats-Unis	France	Allemagne	Italie
Secteur		De North Bonneville à l'Océan Pacifique	En aval du barrage de Serre-Ponçon	Entre le barrage de Sylvenstein et la traversée de Munich	Entre la confluence avec la Trebbia (amont Piacenza) et la confluence avec le Taro (aval Cramos)
Bilan des acteurs concernés		Bonneville Power Administration, US Army Corps of Engineers	SMAVD, EDF	Ville de Munich, BLW, gestionnaires de barrages, société civile	ADB Po, AIPO, ENEL Company
Synthèse comparative des caractéristiques de cours d'eau	Points communs	- Importance de la voie fluviale et dragage d'entretien. - Barrages hydroélectriques au fil de l'eau, - Flux sableux.	- des aménagements historiques et enjeux forts pour l'hydroélectricité ; - des ouvrages en feston (barrage de dérivation, canal usinier) et hydrologie influencée ; - des flux grossiers diversifiés (fins, sables, grossiers), issus du piémont alpin, avec un grand lac faisant obstacle à la continuité (Serre-Ponçon) ; - des affluents à forte charge alluvionnaire ; - une évolution d'un style fluvial en tresses vers un style fluvial méandriforme à lit unique ; - des enjeux écologiques similaires (continuité biologique, forêt alluviale, anciens bras, espèces emblématiques telles que le castor, etc.) ; - des enjeux écologiques : zones humides, bras secondaires, continuité écologique, etc. ;	- des aménagements historiques pour l'hydroélectricité, avec un grand barrage en amont bloquant le charriage ; - des ouvrages en feston (barrage de dérivation, canal usinier) et hydrologie influencée ; - des flux grossiers diversifiés (fins, sables, grossiers), issus du piémont alpin, estimé à 50 000 m³/an avant aménagements, et similaires à certains secteurs du Rhône actuel (Secteur Ain-Lyon / UHC#10-ALY) ; - une évolution d'un style fluvial en tresses vers un style fluvial méandriforme à lit unique ; - des enjeux écologiques similaires (continuité biologique, forêt alluviale, anciens bras, espèces emblématiques telles que le castor, etc.) ; - des enjeux de restauration, de sûreté-sécurité et de fréquentation similaire au Canal de Miribel (UHC#10-ALY) en milieu urbain à péri-urbain	- des pentes similaires : 0,22 ‰ pour le Pô dans le linéaire étudié (0,1 à 0,6 ‰ sur le linéaire total) ; 0,2-0,8 ‰ pour Rhône ; - des aménagements historiques pour la navigation, et enjeu local pour l'hydroélectricité ; - un ouvrage en feston (barrage de dérivation, canal usinier) et hydrologie influencée ; - des flux grossiers diversifiés (fins, sables, grossiers), issus du piémont alpin et similaires au Rhône avant aménagement : 500 000 à 600 000 m³/an pour le Pô, jusqu'à 350 000 m³/an pour le Rhône en aval de l'Isère ; - des affluents à forte charge alluvionnaire ; - une évolution d'un style fluvial en tresses vers un style fluvial méandriforme à lit unique ;
	Points de différence	- Caractéristiques hydrologiques (taille de bassin, module), - Embouchure type estuaire, - Absence de barrage en feston sur le tronçon d'étude, - Navigation de gabarit Panamax (44 pieds, soit 12 m de mouillage).	- des pentes supérieures : 1 à 3 ‰ contre 0,2 à 0,8 ‰ pour le Rhône ; - le canal de la Durance avec 15 centrales en série (de Serre-Ponçon à Saint-Chamas) ; - l'absence de navigation commerciale.	- taille de bassin versant : 9 000 km² au total, moins de 2 000 km² à Munich. L'Isar s'apparente plutôt à un affluent du Rhône, comme l'Ain ; - hydrologie : module de 85 m³/s, débit réservé de 15 m³/s ; - des pentes plus élevées sur l'Isar : 2 à 3 ‰ pour l'Isar dans la traversée de Munich, contre 0,2, 0,8 ‰ pour Rhône (0,6 ‰ pour le Canal de Miribel) ; - des flux grossiers actuels relativement peu perturbés, très supérieurs à ceux du Rhône ;	- des flux grossiers actuels relativement peu perturbés, très supérieurs à ceux du Rhône ; - des enjeux écologiques peu traités : zones humides, continuité écologique, etc.
Actions pouvant être utiles à la réflexion sur la gestion sédimentaire du fleuve Rhône	Enjeux de connaissance	- Bilan historique des extractions et des flux de sables ; - Programme de gestion des sédiments dragués au niveau de l'estuaire en lien avec les circulations littorales ;	- Schéma de recharge sédimentaire ; Modalités de réinjection sédimentaire	- Utilisation d'un modèle physique pour le dimensionnement des actions de restauration	- Existence d'un programme général de gestion sédimentaire et de restauration
	Gestion sédimentaire		- Dragages sédimentaires aux confluences des affluents (avec réutilisation dans le cadre du programme de réinjection sédimentaire) ; - Transparence sédimentaire accrue pour les sédiments fins et pour partie pour les sédiments grossiers ; - Protections de berge dans les secteurs soumis à érosion suite à l'évolution du style fluvial (lit méandriforme), utile pour un secteur comme Chautagne par exemple ;	- Dragage dans les retenues et transfert en aval des barrages de façon à assurer la continuité sédimentaire ; - Réinjection en aval du barrage de Sylvenstein (volumes limités par rapport à la capacité de charriage) ;	- Analyse économique de l'optimisation de la transparence sédimentaire et de la production hydroélectrique (barrage de l'île Serafin) ; - Protections de berge dans les secteurs soumis à érosion suite à l'évolution du style fluvial (lit méandriforme), utile pour un secteur comme Chautagne par exemple
	Actions de restauration	- Une volonté de d'agir à l'échelle globale, sur l'ensemble du bassin, - Utilisation du bois mort dans les actions de restauration	- Logique et mesures d'évitement des curages : détermination de l'état d'équilibre et redimensionnement des systèmes d'endiguement en fonction du retour des sédiments ; - Démantèlement d'ouvrages latéraux afin de restaurer l'espace de bon fonctionnement et la dynamique hydrosédimentaire ; - Chasses de décolmatage des fines accumulées dans le lit mineur ; - Programme de réinjections sédimentaires, visant environ 100 000 m³/an : - fourniture en matériaux : par arasement des bancs actuellement perchés ; - modalités de recharge : par régalaie des matériaux dans le lit - rythme de réinjection : volumes de 100 000 m³/an.	- Projet de restauration hydromorphologique d'un tronçon courant, à transport solide par charriage, en milieu urbain à péri-urbain, avec des enjeux de fréquentation par le public et une volonté de diminuer les risques d'inondation (similaire aux projets en cours sur le Canal de Miribel) ; - Construction de projets associant la société civile avec une large part de concertation, et une implication ultérieure des citoyens (brigade de sécurité bénévoles) ; - Techniques d'aménagement particulières : recul de digues, protections de berge enterrées ou végétalisées, etc. ; - Gestion adaptative pour la mise en œuvre des travaux, par tranches, et en tenant compte des effets des crues ; - Gestion de la sécurité des usagers dans le lit de la rivière.	- Démantèlement d'ouvrages latéraux afin de restaurer l'espace de bon fonctionnement et la dynamique hydrosédimentaire ; - Restauration d'annexes en configuration de fort charriage (bras secondaires, zones d'expansion de crues).

Tableau 14 : Synthèse des types d’actions recensés en Mission 4, complétés et appliqués au retour d’expérience international

	Problématiques relatives à la gestion sédimentaire	Motifs / enjeux	Objectifs	Action	Code	Code BPE	Lieu	Sédiments	Technique	Devenir des sédiments	Exemple sur le Rhône	Exemples internationaux	Similarités et applicabilité au Rhône	Terme anglais correspondant
Actions de gestion	Dépôts sédimentaires	navigation exploitation sûreté hydraulique sûreté nucléaire loisirs	Transit sédimentaire amont/aval	Dragage de sédiments fins	DSF	P6	Chenal navigable, écluse / garage d'écluse, retenue, confluence, autre ouvrage (prise d'eau, darse, bassin joute, halte fluviale, passe à poissons, etc.), RCC	Fins et sables	Drague aspiratrice	Gestion à terre si pollutions Restitution sinon	Nombreux exemples Dragage Valencize, Sévenne, etc. Canal d'aménée prise d'eau CNPE St-Alban	- 1/ Rhin : stockage de sédiments pollués sur une île artificielle (Ijsselog) - 1/ Rhin : piste de réflexion : dragages plus fréquents et moins lourds - 2/ Meuse : dragage de sédiments fins et sableux au niveau des oints bloquants (Wessem) - 3/ Danube : flux de sédiments fins gérés par chasse et effets des crues - 4/ Columbia : dragage dans l'estuaire pour la navigation, et réinjection coordonnée avec le fonctionnement du littoral	→NON APPLIQUÉ. Pas de cas similaire compte tenu des volumes de sédiments pollués peu remobilisés sur le Rhône →NON APPLIQUÉ. Intérêts pour le Rhône à réfléchir →SIMILAIRE à ce qui est pratiqué sur le Rhône →SIMILAIRE à ce qui est pratiqué sur le Rhône →NON APPLIQUÉ. Pas d'excédent à l'embouchure ou sur le littoral	Dredging of fine material
		navigation exploitation sûreté hydraulique sûreté nucléaire loisirs		Restitution de fines	RSF	P6	Chenal navigable, écluse / garage d'écluse, retenue, confluence, autre ouvrage (prise d'eau, darse, bassin joute, halte fluviale, passe à poissons, etc.), RCC	Fins et sables	Drague aspiratrice ou clapage	Restitution	Nombreux exemples Dragage Valencize, Sévenne, etc. Canal d'aménée prise d'eau CNPE St-Alban	- les techniques de restitution sont similaires à celles du Rhône et ne sont pas décrites	→ SIMILAIRE à ce qui est pratiqué sur le Rhône	Reinsection of fine dredged material
		navigation exploitation sûreté hydraulique sûreté nucléaire sûreté AEP		Dragage de sédiments grossiers	DSG	P6	Chenal navigable, retenue, confluence, autre ouvrage, RCC	Sables, grossiers	Pelle mécanique	Export et gestion à terre ou restitution	Nombreux exemples Vieux Rhône de Crépieux-Charmy Confluence Drôme Pont de la Loi	- 3/ Danube : dragage de sédiments grossiers en retenue (enjeux navigation et inondabilité) avant réinjection en amont dans la même retenue (boucle en circuit fermé) - 5/ Durance : dragage aux confluences avant réutilisation dans le cadre du programme de recharge sédimentaire - 7/ Pô : Analyse économique de l'optimisation de la transparence sédimentaire et de la production hydroélectrique afin de limiter les dragages (barrage de l'île Serafini)	→ SIMILAIRE à ce qui est pratiqué sur le Rhône (cf. G4 pour réinjection) →SIMILAIRE à ce qui a commencé à être pratiqués à CNR (2017, îles de la Platière) →NON APPLIQUÉ. Intérêt à réfléchir pour le Rhône	Dredging of coarse material
		navigation exploitation sûreté hydraulique sûreté nucléaire sûreté AEP		Restitution de sédiments grossiers	RSG	P6	Chenal navigable, retenue, confluence	Sables, grossiers	Clapage par barge	Réinjection	Nombreux exemples Dragage du Doux, de la Gère, du Gier, etc.	- 1/ Rhin : réinjection régulière en aval de la chaîne hydroélectrique pour le chenal de navigation (Iffezheim / 180000 m³/an) - 3/ Danube : réinjection régulière en aval de Vienne (Freudenau) dans un Danube total et courant à hauteur de 235 000 m³/an - 3/ Danube : réinjection régulière dans une retenue, éventuellement à partir d'un dragage en aval dans la même retenue (ex : Aschach)	→NON APPLIQUÉ : réfléchir au besoin dans les tronçons de Rhône total (cas du Palier d'Arles) →NON APPLIQUÉ : idem. →SIMILAIRE aux réinjections dans des fosses de retenue à partir de confluences (Doux, Cance, etc.). NON APPLIQUÉ pour ce qui concerne le fait de remonter les sédiments plus en amont	Gravel feeding or gravel nourishment (R, RT)
		exploitation sûreté hydraulique		Chasse de retenue	CHS	-	Barrage avec retenue/réservoir	Fins, sables (grossiers)	Force hydraulique	Déstockage dans la retenue	APAVÉR Haut-Rhône	- 1/ Rhin : optimisation des manœuvres de barrages	→SIMILAIRE à ce qui est déjà réalisé sur certains ouvrages (Verbois, Basse-Isère), éventuellement possible sur de nouveaux ouvrages	Environmental-friendly flushing
		exploitation sûreté hydraulique		Mise en transparence de barrage	MET	-	Barrage avec retenue/réservoir	Fins, sables, grossiers	Force hydraulique	Transit vers l'aval	Basse vallée de l'Isère	- 2/ Meuse : mise en transparence d'ouvrages hydroélectriques pour les flux de fines et sables	→SIMILAIRE à ce qui est déjà pratiqué sur le Rhône en accompagnement des APAVER	Sluicing
		navigation exploitation sûreté hydraulique sûreté nucléaire loisirs	Réduction de la sédimentation	Optimisation des structures pour réduire la sédimentation	OSS		Chenal navigable, écluse / garage d'écluse, retenue, confluence, autre ouvrage	Fins, sables, grossiers	Aménagements	Transit aval amélioré	-	- 1/ Rhin : piste de réflexion : murs déflecteurs pour limiter les dépôts de sédiments fins - 3/ Danube : réduction de la largeur du lit (en queue de retenue notamment), réduction de la largeur d'un barrage, reconfiguration d'épis	→NON APPLIQUÉ sauf sur le Petit Rhône. Intérêts pour le Rhône à réfléchir →NON APPLIQUÉ. Intérêts pour le Rhône à réfléchir	Optimization of structures to reduce deposition
		navigation		Réduction ou déplacement du chenal navigable	RCN	-	Chenal navigable, écluse / garage d'écluse	Fins, sables, grossiers	Déplacement balises	-	-	- 3/ Danube : réduction du chenal de navigation, déplacement du chenal de navigation	→NON APPLIQUÉ. Intérêts pour le Rhône à réfléchir	Fairway shifting or narrowing
		sûreté hydraulique écologie	Remobilisation des stocks	Charruage	CHG	C8	Bancs alluviaux du RCC	Sables, grossiers	Charruage dans bancs	Laisse sur place	Nombreux bancs charrués dans les RCC	- absence d'information collectée	→ SIMILAIRE à ce qui est pratiqué sur le Rhône	Ploughing
	Végétalisation des atterrissements	sûreté hydraulique	Maîtrise de la végétalisation des bancs alluviaux	Essartage	ESS	C7	Bancs alluviaux du RCC et marges alluviales	-	Essartage mécanique	-	Nombreux bancs essartés dans les RCC	- absence d'information collectée	→ SIMILAIRE à ce qui est pratiqué sur le Rhône	Bar vegetation clearing
Actions de restauration	Endiguement du lit	écologie sûreté hydraulique	Remobilisation latérale de sédiments	Redimensionnement des systèmes d'endiguement en fonction du retour des sédiments	RSE	B2	RCC, Rhône total, retenue	Fins, sables, grossiers	Pelle mécanique	-	Recul des digues du Petit Rhône	- 5/ Durance : Redimensionnement des systèmes d'endiguement en fonction du retour des sédiments	→NON APPLIQUÉ. Intérêt pour le Rhône à réfléchir, notamment pour le Petit Rhône	Dyke redimensioning according to sediment return
	Chenalisation du lit	écologie sûreté hydraulique	Restaurer un espace de bon fonctionnement (inclut gestion passive : dégradation des ouvrages)	Réactivation des marges alluviales	RMA	C1, C2, C3, B1, B2, B3, B4, P1, P3	RCC (épis, digues submersibles, tenons, enrochements, protections de berge)	Fins, sables, grossiers	Pelle mécanique	Laisse sur place Reinjection (RJP)	Réactivation des marges alluviales des Vieux Rhône (inondations, biodiversité) Projets réalisés : PDR, DZM, etc.	- 1/ Rhin : suppression d'épis et de protections de berge - 2/ Meuse : restauration complète du lit de la Meuse dans un objectif hydraulique (Q250) et écologique, suppression de protections de berge - 3/ Danube : restauration de marges alluviales combinée avec la recharge sédimentaire du chenal navigable - 6/ Isar : restauration de l'espace de bon fonctionnement en agglomération, avec des enjeux de sécurité	→SIMILAIRE à toute action de restauration des marges alluviales dans un RCC →SIMILAIRE aux actions de restauration des marges alluviales dans un RCC avec une composante hydraulique plus forte (réduction des risques) →NON APPLIQUÉ en parallèle d'un chenal navigable : à réfléchir pour les tronçons de Rhône total →NON APPLIQUÉ en zone péri-urbaine. A réfléchir pour canal de Miribel	Riverbank and riverspace restoration
	Déficit sédimentaire	écologie sûreté hydraulique	Restauration du lit (fond, couche active)	Réinjection passive de sédiments grossiers externes	RJP	C6	RCC	Sables, grossiers	Pelle mécanique	Réinjection	Plusieurs actions réalisées (CHA, PDR, DZM)	- 1/ Rhin : réinjection de sédiments grossiers dans le TCC de Kembs (qui nécessitent d'être renouvelée pour être bénéfique dans la durée) - 2/ Meuse : réflexion en cours pour définir comment réinjecter régulièrement 30 000 m³/an qui correspondent au déstockage annuel - 3/ Danube : réinjection en amont d'une retenue suite à un dragage dans la partie aval de la retenue (ex. Aschach) - 6/ Isar : réinjection en aval d'un barrage après dragage en amont du même barrage	→SIMILAIRE aux réinjections de Chautagne et Péage-de-Roussillon →NON APPLIQUÉ : à réfléchir pour les RCC en déstockage (Chautagne, Belley, Péage de Roussillon, etc.) →NON APPLIQUÉ vers l'amont : à réfléchir dans le cadre de scénarios sur le devenir de sédiments grossiers dragués →SIMILAIRE aux réinjections de Chautagne et Péage-de-Roussillon	Gravel feeding or gravel nourishment (RCC)
	Homogénéité des formes fluviales	écologie sûreté AEP	Restauration des conditions hydrologiques d'étiage	Relèvement des débits et régimes réservés	RQR	C13, C14	RCC	Fins, sables, graviers	Ouvrage spécifique au barrage	-	Nombreux RCC	- 6/ Isar : relèvement des débits réservés Qr	→SIMILAIRE à l'augmentation des Qr entre 1999 et 2014	Minimum flow increase
		écologie	Restauration de milieux aquatiques et humides	Restauration morphologique du lit d'étiage	RLE	C1, C3, P1	Retenue (queue), RCC	Sables, graviers	Pelle mécanique	Réinjection, remodelage du lit d'étiage	-	- 2/ Meuse : restauration complète du lit de la Meuse dans un objectif hydraulique (Q250), hydrogéologique et écologique : rehaussement du plancher alluvial par réinjection sédimentaire - 3/ Danube : réinjection soignée dans une queue de retenue conduisant à contraindre la section d'écoulement (habitats et transit sédimentaire) - 5/ Durance : modalités de réinjection sédimentaire	→NON APPLIQUÉ : à réfléchir dans un objectif de rehaussement du plancher alluvial suite à une forte incision et sans aggravation des risques (cas du canal de Miribel) →SIMILAIRE aux restaurations des marges récentes (Péage-de-Roussillon) →NON APPLIQUÉ : à réfléchir afin d'optimiser les gains écologiques	Aquatic and wet habitat restoration
		écologie	Recréation/restauration de milieux annexes	Restauration des îlons et zones humides associées	RLO	C4, C10, P2, P4, P5, P7, P8, P9	Îlons, anciennes gravières	Fins, sables, grossiers	Pelle mécanique	Réinjection	Nombreux projets réalisés : CHA, BEL, BRC, PBN, PDR, BLN, MON, DZM, etc.	- 4/ Columbia : restauration d'annexes en lit majeur - 4/ Columbia : comblement de fossés de drainage avec matériaux dragués - 3/ Danube : restauration d'annexes fluviales associée à la recharge sédimentaire du lit	→SIMILAIRE aux actions de restauration de îlons ou de zones humides du Rhône →SIMILAIRE aux actions de restauration de zones humides (Chautagne, etc.). A réfléchir en réutilisation de matériaux dragués →NON APPLIQUÉ : à réfléchir afin d'optimiser les gains écologiques	Reconnection of side-channels and wetlands
		écologie	Restauration de milieux humides et terrestres	Réinjection de bois mort	RBM	C7	RCC	-	Pelle mécanique	-	-	- 4/ Columbia : restauration d'annexes avec du bois mort enfoui	→NON APPLIQUÉ : à réfléchir dans le cadre des projets de restauration de îlons et réactivation des marges alluviales (effets sur les formes alluviales)	Habitat restoration with coarse wood debris
	Activité sédimentaire limitée en fréquence	écologie	Restauration de la dynamique fluviale	Augmentation de la fréquence des débits morphogènes	RQM	C11	RCC	Fins, sables, grossiers	Lâchers plus fréquents au barrage de dérivation	-	Mis en œuvre indirectement sur certaines UHC comme CHA	- 5/ Durance : mise en œuvre de chasse de décolmatage des fines accumulées dans le lit mineur sous le barrage de Serre-Ponçon	→NON APPLIQUÉ strictement sur le Rhône, mais mis en œuvre indirectement lorsque les groupes sont en maintenance (notamment sur le aut-Rhône)	Enhancement of morphogenic flows occurrence
	Blocage du transit des matériaux au droit d'un ouvrage transversal	écologie	Restauration de la continuité sédimentaire du Rhône et/ou des affluents	Restauration de la continuité sédimentaire des ouvrages transversaux	RCS	C5	RCC, affluent	Sables, grossiers	Démantèlement d'ouvrage	Erosion régressive ou terrassement	seuil Crépieux-Charmy ALY	- absence d'information collectée	→SIMILAIRE probablement à ce qui est pratiqué sur le Rhône	Restoration of weir sediment continuity
													→SIMILAIRE	
													→SIMILAIRE, avec des différences dans la réalisation	
													→NON APPLIQUÉ sur le Rhône	

TABLEAUX

Tableau 1 : Méthode 1 – Critères utilisés pour la pré-sélection	5
Tableau 2 : Méthode 1 – Critère 1 – Cours d'eau retenus d'après le critère « taille du cours d'eau »	5
Tableau 3 : Méthode 1 – Pré-sélection à partir des critères 1, 2 et 3.....	7
Tableau 4 : Méthode 2 – Critères de sélection.....	8
Tableau 5 : Méthode 2 – Critère 8 – Liste non exhaustive de grands cours d'eau avec actions de restauration	10
Tableau 6 : Méthode 2 – Critère 9 – Accessibilité de l'information	11
Tableau 7 : Méthode 2 – Sélection à partir des critères 3 à 9.....	11
Tableau 8 : Méthode 2 – Sélection hors Europe sur 3 cours d'eau pré-identifiés.....	12
Tableau 9 : Méthode 2 – Proposition de sélection de cours d'eau à retenir	13
Tableau 10 : Volumes moyens annuels des dragages en sédiments fins au niveau des 10 unités hydroélectriques du périmètre d'étude du Rhin (Source : CIPR, 2009 ; d'après Ritz, 2005).....	16
Tableau 11 : Principes de gestion de la Meuse (Asselman et al., 2018)	24
Tableau 12 : Synthèse des éléments de comparaison pour les 3 principaux cours d'eau (Rhin, Meuse, Danube)	62
Tableau 13 : Synthèse des éléments de comparaison pour les cours d'eau complémentaires (Columbia, Durance, Isar, Pô).....	62
Tableau 14 : Synthèse des éléments de comparaison pour les cours d'eau complémentaires (Columbia, Durance, Isar, Pô).....	63

FIGURES

Figure 1 : Méthode 1 – Critères 1 et 2 – bassins versants principaux des fleuves en Europe	6
Figure 2 : Méthode 1 – Critère 3 – navigabilité des cours d'eau en Europe (donnée UNECE)	6
Figure 3 : Méthode 1 – Critère 3 – navigabilité des cours d'eau en Europe (donnée ECA) et pré-sélection sur les critères 1 à 3	7
Figure 4 : Méthode 2 – Critère 4 – carte de l'indice de connectivité (CSI) des cours d'eau européens (extrait de Grill et al., 2019)	8
Figure 5 : Méthode 2 – Critère 5 – exemple de configurations avec canal de dérivation (Meuse / en haut à gauche ; Isar / en haut à droite ; Rhin / en bas à gauche ; Danube / en bas à droite ; Google Earth)	9
Figure 6 : Méthode 2 – Critère 6 – exemple de charge sédimentaire (Meuse / à gauche ; Elbe / à droite ; Google Earth).....	9
Figure 7 : Méthode 2 – Critère 7 – exemple d'affluent à charge grossière (Trebbia et Pô / à gauche ; Inn et Danube / à droite ; Google Earth).....	9
Figure 8 : Méthode 2 – Critère 8 – exemple de mesures de restauration (Rhin / en haut à gauche ; Isar / en haut à droite ; Inn / en bas à gauche ; Durance / en bas à droite / SMAVD ; Google Earth).....	10
Figure 9 : Méthode 2 – Hors Europe – Columbia River à North Bonneville / en haut ; Sacramento River entre Hamilton City et Glenn / au milieu ; Tennessee River entre Chattanooga et Kimball / en bas; Google Earth).....	12
Figure 10 : Présentation du bassin versant du Rhin et secteur d'étude (Source : Wikipédia)	14
Figure 11 : Profil en long global du Rhin et secteur d'étude (Source : Hillebrang, G., Frings, 2017)	14
Figure 12 : Les aménagements hydroélectriques sur le Rhin Supérieur (source : Arnaud, 2012)	15
Figure 13 : Le Grand Canal d'Alsace et la centrale-écluse de Vogelgrun sur le Rhin (source Wikipédia)	15
Figure 14 : Illustration des travaux de correction et de leur effet sur le tracé en plan et le profil en long du Rhin (source : Arnaud, 2012).....	15
Figure 15 : Bilan des sédiments mobilisés du Rhin entre le barrage de Kembs et Fessenheim entre 1990 et 2010 en valeurs moyennes annuelles (m³/an) (source : Arnaud, 2012)	16
Figure 16 : Flux sédimentaires du Rhin moyens sur la période 1991-2000 (Hillebrang et Frings, 2017)	16
Figure 17 : Ile artificielle d'IJsseloog des destinée à gérer les sédiments pollués	17
Figure 18 : Budget sédimentaire pour la période 1985-2006 par Frings et al. (2014) en aval d'Iffezheim	17
Figure 19 : Mélange granulométrique fourni en aval d'Iffezheim depuis 1991. Illustration d'une barge à clapet (Source : Emmanouil, 2017, et Arnaud, 2012).....	17

Figure 20 : Procédé de recharge sédimentaire e aval du barrage d'Iffezheim (Arnaud, 2012 ; d'après CHR, 2009).....	17
Figure 21 : État d'avancement 2018 des zones de rétention du Programme Intégré Rhin (RUF, 2019)	18
Figure 22 : Extrait du plan de récolement indiquant la position du dépôt injecté (novembre 2010) et vues du chantier (Arnaud, 2012).....	18
Figure 23 : Bénéfices écologique des projets de recharge avec et sans couplage à des opérations de ré-élargissement (source Chardon, 2021)	19
Figure 24 : Aménagement de la centrale K et restauration du Petit Rhin en aval du barrage de Kembs (2015 à gauche et état actuel à droite) (source EDF).....	19
Figure 25 : Encoche d'érosion à l'amont du site et langue de dépôt en aval (Pinte, 2015).....	19
Figure 26 : Présentation du bassin versant de la Meuse et du secteur d'étude (Source : d'après Asselman et al., 2018, modifié)	21
Figure 27 : Evolution du lit de la Meuse à hauteur de Grevenbicht (Grensmaas, PK45) lors des travaux de chenalisation (1850-1897) et après les travaux Maaswerken (2005-2019) (d'après Van Looy, 2012 et Google Earth)	22
Figure 28 : Incisions moyennes par tronçons (à droite, Asselman et al., 2018) et détail d'évolution du profil en long de la Meuse dans le secteur Grensmaas (à gauche ; Van Looy, 2012)	22
Figure 29 : Chronique des incisions du lit de la Meuse, par grands secteurs (Barneveld et al., 2019)	22
Figure 30 : Conséquences de l'incision du lit et de l'érosion des berges (Asselman et al., 2018)	23
Figure 31 : Profils en long topographique et granulométrique de la Meuse (Barneveld et al., 2019).....	23
Figure 32 : Profil en long du transit sédimentaire calculé à partir de bilans sédimentaires dans le linéaire de Grensmaas (à droite ; Barneveld et al., 2019 ; d'après Wilbers, 1996) et figures d'érosion progressive sous le barrage de Limmel-Borgharen (Google Earth, 2020)	23
Figure 33 : Bilan chronologique des dragages par grands secteurs sur la Meuse néerlandaise (Barneveld et al., 2021)	24
Figure 34 : Localisation des dragages au nœud hydrographique de Wessem en limite aval du secteur Grensmaas (Google Earth, 2020)	24
Figure 35 : Vue sud-ouest du nœud de Wessem (https://www.youtube.com/watch?v=IH95YZ-kh7k).....	24
Figure 36 : Avant-après travaux dans le secteur de Meers (Kurstjens & Van Looy, 2020)	25
Figure 37 : Différents types d'habitats restaurés (Kurstjens & Van Looy, 2020)	25
Figure 38 : Localisation des actions du projet Maaswerken 2006-2027 entre Maastricht et Nimègue (Rijkswaterstaat, 2018).....	26
Figure 39 : Plan d'aménagement du secteur Grensmaas et zones étudiées pour le suivi écologique (Kurstjens & Van Looy, 2020)	26
Figure 40 : Illustrations des travaux Maaswerken (Van Looy, 2012 ; Kurstjens & Peters, 2017)	27
Figure 41 : Présentation du bassin versant du Danube et secteur d'étude (Source : danube-culture.org).....	29
Figure 42 : Profil en long global du thalweg et du niveau d'étiage du Danube (WRI, 2019)	29
Figure 43 : Evolutions du tracé de secteurs représentatifs du Haut, Moyen et Bas Danube (à droite aménagement de Gabčíkovo (Habersack et al., 2019b).....	30
Figure 44 : Flux des MES le long du Danube et ses principaux affluents avant (à gauche) et après (à droite) la construction de barrages (Habersack et al, 2019b)	30
Figure 45 : Profil en long de la granulométrie de surface au fond du lit (Habersack et al, 2019b)	31
Figure 46 : Le barrage-usine de Freudenu au sur le Danube en aval de Vienne (wikipedia)	31
Figure 47 : Dynamique d'érosion et sédimentation en Autriche (WRI, 2019 ; Habersack et al., 2019b).....	31
Figure 48 : Fonds de la retenue d'Aschach suite à la crue de 2002 (WRI, 2019)	32
Figure 49 : Bilan de la sédimentation dans les retenues d'Aschach (en haut) et d'Ottensheim-Wilhering (en bas) entre 1965 et 2016. Volumes accumulés (à gauche) et superposition des profils en long du fond (à droite ; en rouge situation actuelle) (Database: VHP and Viadonau ; in WRI, 2019)	32
Figure 50 : Composition granulométrique de la retenue d'Aftenwörth (Summer and Nachtnebel, 1989 ; in WRI, 2019).....	32
Figure 51 : Dynamique d'érosion et de sédimentation entre Bratislava (km 1870) et Komárno (km 1766) (WRI, 2019 ; Habersack et al., 2019b).....	33
Figure 52 : Mesures opérationnelles types pour les enjeux d'érosion et de sédimentation, et localisation (bassin, tronçon, site de gestion) (Habersack et al., 2019b).....	34
Figure 53 : Sédimentation dans la retenue et le canal de dérivation de l'aménagement de Gabčíkovo (Google Earth, 2021 / haut ; Sebestova, 2018 / bas).....	35
Figure 54 : Transfert de sédiments fins à la drague aspiratrice en aval d'un barrage (Habersack et al., 2019c).....	35

Figure 55 : Chroniques et profil en long des volumes de dragages de graviers dans le Danube autrichien, classés en fonction de la destination des sédiments : en haut, chronique pour l'ensemble des sites (1936-2016) ; au milieu, chronique pour les sections libres de Wachau et Est Vienne (1971-2016) ; en bas, profil en long pour l'ensemble des sites (1971-2016) (WRI, 2019)	35
Figure 56 : Exemples de formes alluviales aménagées en queue de retenue à partir de matériaux graveleux dragués (fiche action Habersack et al., 2019c ; Google Earth, 2021)	36
Figure 57 : Gauche : déficit cumulé du Danube à l'est de Vienne entre 1990 et 2017. Droite: Evolution des fonds moyens entre 1990 et 2017 (en rouge : situation actuelle) (source Viadonau ; in WRI, 2019)	36
Figure 58 : Exemples d'actions de réinjection sédimentaire par clapage (haut) et de plage de dépôt pour dragage et réinjection plus en amont (bas) (fiche action Habersack et al., 2019c)	36
Figure 59 : Localisation des mesures complémentaire à la réinjection de sédiment dans le linéaire Est de Vienne (Radinger, 2018).....	37
Figure 60 : Droite : principe de nappage du lit avec une couche de 0,25 m d'éléments grossiers (Toegl, 2011) ; gauche : granulométrie réinjectée comparée avec celle en place (d'après WRI, 2019).....	37
Figure 61 : Gauche : évolution cumulée du lit en aval de Freudenu entre 2001 et 2015 (Habersack et al., 2017) ; droite : influence du projet pilote Bad Deutsch-Altenburg sur l'altimétrie du lit (Pessenlehner et al., 2016) (in WRI, 2019).....	37
Figure 62 : Exemples de suppression de protection de berge (haut), de reconfiguration d'épis (milieu) et de restauration de bras secondaire (bas) (fiches action Habersack et al., 2019c ; Radinger, 2018)	38
Figure 63 : Exemples d'autres mesures contre l'érosion (à gauche) et contre la sédimentation (à droite) (fiches action Habersack et al., 2019c ; Radinger, 2018).....	38
Figure 64 : Bassin versant de la Columbia River (Bourrichon/Wikipédia, 2010).....	40
Figure 65 : Débits mensuels moyen, maximum et minimum à la station de Dalles, Oregon (BPA, 2001)	40
Figure 66 : Principaux barrages dans le bassin de la Columbia River (BPA, 2001)	40
Figure 67 : Irrigation en amont des gorges de la Columbia River (GoogleEarth, 2016)	40
Figure 68 : La voie navigable de la Columbia et Snake Rivers du Pacifique à Lewison (US Army Corps of Engineers).....	41
Figure 69 : Relation entre Q liquide et Q solide et chronique des Q solides (Sherwood, 1990).....	41
Figure 70 : Rapides localisées au niveau de Bridge of Gods en amont du barrage de Bonneville (US Army Corps & Engineers 1928, in dans O'Connors et Burns, 2011)	41
Figure 71 : Aménagement de l'estuaire (gauche) et leur effets morphologiques (1868 au milieu ; 1958 à droite (Stark, 2012)	42
Figure 72 : Bilan des extractions entre 1900 et 2010 sur la basse Columbia River (Templeton, 2013)	42
Figure 73 : Exemples d'action de restauration proposées sur des bras secondaires dans l'estuaire de la Columbia River (BPA 2016).....	42
Figure 74 : Exemples d'action de restauration proposées sur des affluents de la Columbia River (BPA, 2020).....	43
Figure 75 : Bassin versant de la Durance et principaux aménagements (SMAVD, 2017).....	44
Figure 76 : Aménagement hydroélectrique de la Durance (SMAVD, 2020)	44
Figure 77 : Tresses durancienne en 1958 (IGN, 1958)	44
Figure 78 : Incision historique et tendance morphologique actuelle (SMAVD, 2020)	45
Figure 79 : Évolution du style fluvial en Durance (SMAVD, 2019 et 2020)	45
Figure 80 : Exemple d'accentuation des sinuosités sous l'effet du déficit sédimentaire (SMAVD, 2021)	45
Figure 81 : Confluence du Jabron et du Vançon (IGN, 2018)	45
Figure 82 : Programme d'action de restauration de la Durance (SMAVD, 2020)	46
Figure 83 : Suppression des épis sur les communes de la Roque d'Anthéron et de Mallemort : tracé du lit en 1993 (en jaune) et en 2013 (en violet) après la démolition des ouvrages (SMAVD, 2020)	46
Figure 84 : Sites sélectionnés pour les opérations de recharge sédimentaire ; en rouge les trois sites pilotes (SMAVD, 2021)	47
Figure 85 : Principes de restauration de l'espace alluvial après recharge sédimentaire (GeoPeka, adapté d'après SMAVD, 2020)	47
Figure 86 : Exemple des travaux prévisionnels de recharge sur le site de Charleval (SMAVD, 2021)	47
Figure 87 : Résultats des suivis des lâchers de décolmatage (Loire, 2019)	48
Figure 88 : Bassin versant de l'Isar et localisation du secteur d'étude (Kleber-Lerchbaumer, 2011)	49
Figure 89 : Evolution u style fluvial de l'Isar à Geretsried suite à la construction des barrages hydroélectriques en amont (Terrier & Piégay, 2019).....	49
Figure 90 : Synoptique des ouvrages hydroélectriques entre le barrage de Sylvenstein et Munich (https://de.wikipedia.org) et usine Isarwerk 3	49
Figure 91 : Chronique de flux en MES à Munich entre 1930 et 1990 (Weiss, 1996)	50

Figure 92 : L'Isar dans la traversée de Munich avant les travaux de restauration	50
Figure 93 : Secteur de Flaucher pris pour référence avant travaux de restauration (Wulf, 2013).....	50
Figure 94 : Localisation du projet de restauration de l'Isar à Munich (Mahida, 2013 ; Kleber-Lerchbaumer, 2011)	51
Figure 95 : Eléments de conception du projet de restauration de l'Isar : a) section élargie et rehaussement de digues, b) confortement de digue, c) protection enterrée en arrière, d) protection de berge végétalisées après enlèvement des perrés enrochés ; e) modèle physique en amont du pont de Cornélius (Arzet et Joven, 2008 ; Mahida, 2013 ; Wulf, 2013)	52
Figure 96 : Fréquentation du public sur l'Isar restaurée dans la traversée de Munich (baignade, bronzage, surf, etc.) (Mahida, 2013 ; Wulf, 2013).....	52
Figure 97 : Secteurs autorisés (vert) et interdit (rouge) pour la baignade (https://www.muenchen.de)	53
Figure 98 : Panneautage en cas de crue et équipes de sécurité (https://www.abendzeitung-muenchen.de)	53
Figure 99 : Evolution morphologique de l'Isar en aval du pont de Großhesseloher entre 1905 et 2011.....	54
Figure 100 : Evolution morphologique de l'Isar en aval du pont de Brudermühl avant et après travaux (Arzet et Joven, 2008)	54
Figure 101 : Evolution morphologique de l'Isar en amont du pont de Cornelius (Wulf, 2013)	54
Figure 102 : Travaux de pavage et d'enherbement d'un déversoir en lit moyen (Wulf, 2013)	54
Figure 103 : Bassin versant du Pô et localisation du secteur d'étude (Source : UNESCO).....	56
Figure 104 : Profil en long du Pô et localisation du secteur d'étude (Scarabello, 2013)	56
Figure 105 : Evolution caractéristique du style fluvial du Pô à l'embouchure du Taro (en bas à droite) entre 1955 (gauche) et 2005 (droite) (ADB Po, 2006)	56
Figure 106 : Evolution du fond moyen du lit du Pô entre 1991 et 2005 (ADB Po, 2006).....	57
Figure 107 : Profil en long de la charge de fond d'après des bilans sédimentaires sur la période 1982-2002 (ADB Po, 2006)	57
Figure 108 : Exemple d'incision du lit à hauteur de Cremona (gauche) et tendance à l'incision des étiages à la station hydrométrique de Cremona (droite) (ADB Po, 2006)	57
Figure 109 : Localisation de l'aménagement hydroélectrique et de navigation de l'Ile Serafini, et tronçons étudiés (Bizzi et al., 2015)	57
Figure 110 : Barrage, écluse et canal de l'Isola Serafini (sources : Google ; Binini partners, 2018).....	57
Figure 111 : Exemple de mesures de restauration envisagées dans la traversée de Plaisance	58
Figure 112 : Exemple de mesures de restauration envisagées à la confluence avec le Taro	58
Figure 113 : Exemple de réalisation à Casalmaggiore : suppression d'épi et restauration d'un bras secondaire (AIPO, 2011 ; in Bussetini, 2019)	58
Figure 114 : Loi de répartition de débit au barrage de l'Ile Serafini : actuelle (à gauche) et testée (à droite)	59
Figure 115 : Principes des lois de contrôle de débit : Schéma A (à gauche) et Schéma B (à droite)	59
Figure 116 : Comparaison des résultats des schémas A et B sur la production hydroélectrique (abscisses) et l'évolution du lit (ordonnées)	59

