



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 8
Eléments méthodologiques pour la déclinaison opérationnelle
de la stratégie de gestion et de restauration

Version finale – juin 2022

Réf : CEAUCE172551 / REAUCE05639-01



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 8

Eléments méthodologiques pour la déclinaison opérationnelle de la stratégie de gestion et de restauration

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
Rapport final	30/06/2022	01	BURGEAP : M. BERTRAND, G. GILLES, F. LAVAL GEOPEKA : G. FANTINO ACTEON : C. RIVIERE, Y. ZAITER, ARALEP : J.-P. MALLET MOSAIQUE ENVT : E. BOUCARD	G.GILLES P. STROSSER J.-F. FRUGET		F. LAVAL	

Numéro de contrat / de rapport :	Réf : CEAUCE172551 / REAUCE05639-01
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



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



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 8.

Cette mission s'est déroulée entre janvier 2021 et juin 2022, en parallèle des Missions 6, 7 et 9.

Le travail a été mené conjointement par les membres du groupement, à savoir BURGEAP, GEOPEKA, ACTEON, ARALEP, MOSAÏQUE Environnement et DELTARES, pour l'ensemble de la mission. La cohérence de l'ensemble est assurée par BURGEAP.

La Mission 8 succède à la Mission 6 dont l'objectif est de préparer le cadre des analyses de scénarios et à la Mission 7 qui décline les scénarios par grands secteurs et propose des stratégies de gestion et de restauration.

Les objectifs de la Mission 8 sont de globalement fournir des éléments méthodologiques pour la déclinaison opérationnelle, notamment avec les acteurs locaux, des actions issues de la stratégie de gestion et de restauration.

La Mission 8 se présente sous forme d'une série de questions-réponses, selon les principales parties suivantes :

- Quel est le cadre réglementaire des actions ?
- Quels sont les coûts unitaires à retenir pour les actions-clés ?
- Comment améliorer les actions de gestion courantes ?
- Comment imaginer des solutions innovantes de gestion ?
- Comment faire progresser les actions courantes de restauration ?
- Quelles nouvelles actions de restauration envisager ?
- Quels outils pratiques pour une réinjection sédimentaire
- Comment réaliser un choix d'action entre plusieurs solutions ?
- Quels autres sujets à traiter dans le futur ?

La Mission 8 inclut également un rapport annexe comprenant les fiches actions-clés retenues en Mission 6, testées en Mission 7 et confortées en Mission 8.

Pour citer ce document :

Laval F., Bertrand M., Fantino G., Strosser P., Rivière C., Zaiter Y., Mallet J.-P., Fruget J.-F., Boucard E., Gilles G., Mosselman E. (2022). Etude préalable au schéma directeur de gestion sédimentaire du fleuve Rhône du lac Léman jusqu'à la mer Méditerranée. Phase 2 – Elaboration du schéma de gestion sédimentaire et mise à jour. Rapport de Mission 8 – Eléments méthodologiques pour la déclinaison opérationnelle de la stratégie de gestion et de restauration. Groupement de bureaux d'études BURGEAP-GEOPEKA-ACTEON-ARALEP-MOSAÏQUE Environnement-DELTARES. Secrétariat technique : DREAL, CNR, EDF, Agence de l'Eau.

SOMMAIRE

1.	Quel est le cadre réglementaire des actions ?	5
1.1	Cadre réglementaire général	5
1.2	Opérations de restauration	5
1.3	Opérations de dragage	6
1.4	Opérations de chasses et accompagnements de chasse	6
1.5	Fiche d'incidence de dragage	7
1.6	Arrêté du 30 mai 2008	8
1.7	Gestion à terre des sédiments	8
1.7.1	Sortie du statut de déchet	8
1.7.2	Réglementation relative aux déchets	8
1.7.3	Recommandations relatives aux travaux et opérations impliquant des sédiments aquatiques potentiellement contaminés	10
1.8	Synthèse des zonages d'inventaire et de protection à prendre en compte... ..	11
1.9	Séquence Eviter-Réduire-Compenser (ERC).....	12
1.10	Emission de GES.....	12
2.	Quels sont les coûts unitaires à retenir pour les actions-clés ?	13
3.	Comment améliorer les actions de gestion courantes ?.....	15
3.1	Les dragages et restitutions de sédiments fins (G1, G2).....	15
3.2	Les dragages de sédiments grossiers (G3).....	16
3.3	Les restitutions de sédiments grossiers (G4)	19
3.4	Les chasses et mise en transparence (G5, G6)	19
3.4.1	Bilan APAVER 2021 et perspectives.....	19
3.4.2	Bilan de la chasse 2021 de la Basse Isère et perspectives	21
3.4.3	Existe-t-il un intérêt et une faisabilité pour réaliser des chasses ailleurs sur le Rhône ?	21
3.5	Le charruage (G12).....	22
3.6	L'essartage (G13)	23
4.	Comment imaginer des solutions innovantes de gestion ?	23
4.1	Amélioration d'infrastructures pour éviter/limiter les dépôts (G8)	23
4.2	Réduction de la vulnérabilité des enjeux exposés (G9, G10, G11)	24
5.	Comment faire progresser les actions courantes de restauration ?.....	25
5.1	Les réinjections de grossiers dans les RCC (R1)	25
5.2	Les réactivations de marges alluviales (R2).....	25
5.3	La restauration de la bande active (R3)	26
5.4	Les restaurations de îlônes et zones humides associées (R4)	29
6.	Quelles nouvelles actions de restauration envisager ?	30
6.1	Quel devenir pour les ouvrages transversaux non équipés (R5) ?	30
6.2	Quel intérêt de réinjecter du bois mort (R6) ?	30
6.3	Quelles actions pour l'amélioration des habitats en retenue et canaux (R7) ?	32
6.4	Peut-on redimensionner des systèmes d'endiguement avec le retour des sédiments (R8) ?	32
6.5	Quelles actions de restauration d'anciennes gravières (R9) ?	32
6.6	Faut-il relever les débits et régimes réservés (R10) ?	33
6.7	Quelle peut être l'utilité de débits morphogènes (R11) ?	33

7.	Quels outils pratiques pour une réinjection sédimentaire ?	35
7.1	Comment évoluent les pratiques de restitution des sédiments grossiers au fleuve ?	35
7.1.1	Evolution des actions de réinjection	35
7.1.2	Réinjections récentes de sédiments.....	35
7.2	Quels sont les gains attendus ?	37
7.2.1	Généralités.....	37
7.2.2	Gains écologiques.....	37
7.3	Quels indicateurs de dimensionnement ?	38
7.3.1	Quels outils de quantification des flux ?	38
7.3.2	Puissance spécifique.....	38
7.3.3	Diamètre maximal remobilisable (Dmax).....	38
7.3.4	Capacité de charriage en moyenne annuelle	39
7.3.5	Capacité de charriage en crue	39
7.4	Quelles modalités de réinjection ?	40
7.4.1	Modalités de réinjection par voie terrestre.....	40
7.4.2	Stockage intermédiaire.....	41
7.4.3	Clapage devant barrage.....	41
7.5	Comment chiffrer les actions, dont le transport ?	42
7.5.1	Détails sur les coûts de dragages et de transport des sédiments grossiers	42
7.5.2	Détails sur les coûts de dragages de sédiments fins.....	45
7.5.3	Quel surcoût acceptable pour les actions de réinjection sédimentaire ?	45
7.6	Quels gains et quels impacts ?	45
7.6.1	Quels impacts hydrauliques dans le cadre de réinjections sédimentaires ?.....	45
7.6.2	Quels impacts potentiels sur la production d'eau potable ?	47
7.6.3	Vers la définition de profils d'objectif ?	47
7.6.4	Impacts à la restitution en aval : temps de transfert des sédiments ?	47
7.6.5	D'autres impacts à analyser ?	48
7.6.6	Eléments pour un bilan GES	48
7.7	Comment choisir entre plusieurs sites de réinjection ?	49
8.	Comment réaliser un choix d'action entre plusieurs solutions ?.....	50
8.1	Analyse multicritère synthétique	50
8.1.1	Proposition de grille d'analyse.....	50
8.1.2	Exemple d'application à l'implantation d'un nouveau site de gestion N4 (G3)	50
8.1.3	Exemple d'application au choix d'un site de réinjection (R1).....	51
8.2	Analyse multicritère détaillée.....	52
8.2.1	Pré-sélection de sites.....	52
8.2.2	Proposition d'analyse multicritère détaillée	53
9.	Quels autres sujets à traiter dans le futur ?	54
9.1	Quelles préconisations pour les bassins versants affluents ?	54
9.2	Identifier la trajectoire future d'évolution du Rhône	55
9.3	En quoi la gestion sédimentaire et la filière de granulats sont liées ?	55
9.4	Faut-il engager des continuités sédimentaires en circuit fermé ?	55
9.5	Quelle stratégie mettre en place en travaux d'urgence post-crue ?	56
9.6	Les éclusées influencent-elles le fonctionnement hydrosédimentaire ?	56
9.7	Est-ce que la gouvernance et les moyens techniques et humains sont adaptés ?	56

1. Quel est le cadre réglementaire des actions ?

1.1 Cadre réglementaire général

Pour toute incidence négative importante sur l'état des eaux identifiée en vertu de l'article 5 et de l'annexe II de la DCE en particulier, des mesures destinées à faire en sorte que les conditions hydromorphologiques de la masse d'eau permettent d'atteindre l'état écologique requis ou un bon potentiel écologique pour les masses d'eau désignées comme artificielles ou fortement modifiées, font l'objet de contrôles.

Les contrôles effectués à cette fin peuvent prendre la forme d'une exigence d'autorisation préalable ou d'enregistrement fondée sur des règles générales contraignantes lorsqu'une telle exigence n'est pas prévue par ailleurs par la législation communautaire. Ces contrôles sont périodiquement revus et, le cas échéant, mis à jour.

Tableau 1 : Cadre réglementaire général (source : PDM SDAGE 2022-2027)

Mesures correspondantes	Référence dans la réglementation française
Régime d'autorisation et de déclaration pour les installations, ouvrages, travaux et activités relevant du titre 3 –« impact sur les milieux aquatiques ou la sécurité publique » de la nomenclature de l'article R. 214-1 du code de l'environnement	Articles L. 214-1 à L. 214-4 et R. 214-1 et suivants du code de l'environnement
Prescriptions générales relatives aux rubriques 2.2.3.0, 4.1.3.0, 3.1.3.0 (2°), 3.1.4.0 (2°), 3.2.1.0, 3.2.2.0 (2°), 3.2.3.0 (2°), 3.2.4.0 (2°), 4.1.2.0 (2°) et 4.1.3.0 (2°, a, II ; 2°, b, II et 3°, b) de la nomenclature	Arrêté du 9 août 2006 – rubriques 2.2.3.0, 4.1.3.0 et 3.2.1.0 Arrêté 13 février 2002 – rubrique 3.2.2.0 (2°) Arrêté 27 août 1999 –rubrique 3.2.4.0 (2°) Arrêté 23 février 2001 – rubrique 4.1.2.0 (2°)
Dispositions du SDAGE opposables aux programmes et décisions administratives dans le domaine de l'eau	Article L. 212-1 du code de l'environnement
Mesures de contrôle et de sanctions des installations, ouvrages, travaux et activités soumis au régime d'autorisation et de déclaration	Articles L. 216-3 à L. 216-13 et R. 216-1 à R. 216-17 du code de l'environnement
Obligation d'entretien régulier des cours d'eau	Article L. 215-14 et suivants du code de l'environnement
Régime des listes de cours d'eau, parties de cours d'eau ou canaux établies pour chaque bassin ou sous bassin. (liste 1 de cours d'eau sur lesquels aucune autorisation ou concession ne peut être accordée pour la construction de nouveaux ouvrages s'ils constituent un obstacle à la continuité écologique – liste de 2 de cours sur lesquels tout ouvrage doit y être géré d'assurer le transport suffisant des sédiments et la circulation des poissons migrateurs) Réglementation relative à l'étude, l'exécution et l'exploitation de tous travaux, actions, ouvrages ou installations présentant un caractère d'intérêt général ou d'urgence, et ayant une incidence sur l'état des eaux	Article L. 214-17 du code de l'environnement
Obligation de maintien d'un débit minimal au droit de chaque ouvrage	Article L. 214-18 du code de l'environnement
Dispositions relatives aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières	Arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières

1.2 Opérations de restauration

Comme pour toute opération d'aménagement de cours d'eau, les travaux de restauration d'un cours d'eau font partie des Installations, Ouvrages, Travaux et Activités (IOTA) auxquels correspond une nomenclature qui se définit comme un catalogue de projets, d'activités, de produits caractérisés par leurs impacts touchant au domaine de l'eau qui est annexé à l'article R. 214-1 du code de l'environnement.

Un projet de restauration (actions-clé R2, R3, R4, etc.) est classiquement soumis aux rubriques suivantes.

Tableau 2 : Rubrique Loi sur l'Eau régulièrement observées pour un projet de restauration

Rubrique	Description de la rubrique	Régime
3.1.1.0.	Installations, ouvrages, remblais et épis, dans le lit mineur d'un cours d'eau, constituant : 1° Un obstacle à l'écoulement des crues ; 2°a) Un obstacle à la continuité écologique entraînant une différence de niveau supérieure ou égale à 50 cm, pour le débit moyen annuel de la ligne d'eau entre l'amont et l'aval de l'ouvrage ou de l'installation ; 2°b) Un obstacle à la continuité écologique entraînant une différence de niveau supérieure à 20 cm mais inférieure à 50 cm pour le débit moyen annuel de la ligne d'eau entre l'amont et l'aval de l'ouvrage ou de l'installation ;	AUTORISATION DECLARATION
3.1.2.0.	Installations, ouvrages, travaux ou activités conduisant à modifier le profil en long ou le profil en travers du lit mineur d'un cours d'eau, à l'exclusion de ceux visés à la rubrique 3.1.4.0, ou conduisant à la dérivation d'un cours d'eau : 1° Sur une longueur de cours d'eau supérieure ou égale à 100 m ; 2° Sur une longueur de cours d'eau inférieure à 100 m.	AUTORISATION DECLARATION
3.1.4.0.	Consolidation ou protection des berges, à l'exclusion des canaux artificiels, par des techniques autres que végétales vivantes : 1° Sur une longueur supérieure ou égale à 200 m ; 2° Sur une longueur supérieure ou égale à 20 m mais inférieure à 200 m	AUTORISATION DECLARATION
3.1.5.0.	Installations, ouvrages, travaux ou activités, dans le lit mineur d'un cours d'eau, étant de nature à détruire les frayères, les zones de croissance ou les zones d'alimentation de la faune piscicole, des crustacés et des batraciens : 1° Destruction de plus de 200 m² de frayères ; 2° Dans les autres cas ;	AUTORISATION DECLARATION
3.2.2.0.	Installations, ouvrages, remblais dans le lit majeur d'un cours d'eau : 1° Surface soustraite supérieure ou égale à 10 000 m² ; 2° Surface soustraite supérieure ou égale à 400 m² et inférieure à 10 000 m².	AUTORISATION DECLARATION
3.2.6.0.	Digues : à l'exception de celles visées à la rubrique 3.2.5.0 : 1. De protection contre les inondations et submersions (A). 2. De canaux et de rivières canalisées (D).	AUTORISATION DECLARATION

1.3 Opérations de dragage

Ces travaux de dragages réalisés en milieu aquatique sont soumis à la loi sur l'eau (rubrique 3.2.1.0 de la nomenclature annexée à l'article R.214-1 du code de l'environnement). Les articles L.215-14 et L.215-15 du code de l'environnement prescrivent la réalisation de plans de gestion pour les opérations d'entretien groupées à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente (UHC).

3.2.1.0.	Entretien de cours d'eau ou de canaux, à l'exclusion de l'entretien visé à l'article L. 215-14 du code de l'environnement réalisé par le propriétaire riverain, du maintien et du rétablissement des caractéristiques des chenaux de navigation, des dragages visés à la rubrique 4.1.3.0 et de l'entretien des ouvrages visés à la rubrique 2.1.5.0, le volume des sédiments extraits étant au cours d'une année : 1° Supérieur à 2 000 m³ ; 2° Inférieur ou égal à 2 000 m³ dont la teneur des sédiments extraits est supérieure ou égale au niveau de référence S1 ; 3° Inférieur ou égal à 2 000 m³ dont la teneur des sédiments extraits est inférieure au niveau de référence S1 ; L'autorisation est valable pour une durée qui ne peut être supérieure à dix ans. L'autorisation prend également en compte les éventuels sous-produits et leur devenir.	AUTORISATION AUTORISATION DECLARATION
----------	---	--

L'article L215-15 du Code de l'environnement (loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006, article 8) précise les modalités d'obtention d'une autorisation pour l'entretien régulier des cours d'eau à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente.

« I. Les opérations groupées d'entretien régulier d'un cours d'eau, canal ou plan d'eau et celles qu'impose en montagne la sécurisation des torrents sont menées dans le cadre d'un plan de gestion établi à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente et compatible avec les objectifs du schéma d'aménagement et de gestion des eaux lorsqu'il existe. L'autorisation d'exécution de ce plan de gestion au titre des articles L214-1 à L214-6 a une validité pluriannuelle.

II. Le plan de gestion mentionné au paragraphe I peut comprendre une phase de restauration prévoyant des interventions ponctuelles telles que le curage, si l'entretien visé à l'article L215-14 n'a pas été réalisé ou si celle-ci est nécessaire pour assurer la sécurisation des cours d'eau de montagne. Le recours au curage doit alors être limité aux objectifs suivants :

- Remédier à un dysfonctionnement du transport naturel des sédiments de nature à remettre en cause les usages visés au II de l'article L211-1, à empêcher le libre écoulement des eaux ou à nuire au bon fonctionnement des milieux aquatiques ;
- Lutter contre l'eutrophisation ;
- Aménager une portion de cours d'eau, canal ou plan d'eau en vue de créer ou de rétablir un ouvrage ou de faire un aménagement ;
- Le dépôt ou l'épandage des produits de curage est subordonné à l'évaluation de leur innocuité vis-à-vis de la protection des sols et des eaux. »

Ainsi, les opérations d'entretien régulier doivent être programmées dans un plan de gestion pluriannuel des opérations de dragage à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente.

L'objet des opérations groupées et le contenu du plan de gestion sont détaillés dans le décret n° 2007-1760 du 14 décembre 2007.

Au niveau national, pour les plans de gestion par dragage, plusieurs dénominations sont régulièrement utilisées :

- Plan Global Pluriannuel des Opérations de Dragage (PGPOD) ;
- Plan de Gestion Pluriannuel des Opérations de Dragage (PGPOD) ;
- Plan de Gestion des Travaux d'Entretien Régulier (PGTER).

Sur le Rhône, le terme de PGPOD est régulièrement utilisé par CNR et VNF.

1.4 Opérations de chasses et accompagnements de chasse

Abaissement partiel de la retenue de Verbois (APAVER)

Pour l'ouvrage de Verbois, la législation en vigueur est celle du gouvernement fédéral suisse et de l'échelon cantonal. Pour l'ouvrage de Chancy-Pougny, qui est transfrontalier, les deux régimes s'appliquent.

La loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux ; RS 814.20) introduit en 1991 le principe de préservation de la faune et de la flore à l'aval des retenues lors des opérations de curage et de vidange. A son article 40, elle établit le principe général d'octroi d'une autorisation pour effectuer ces opérations et prévoit des conditions particulières si celles-ci sont nécessaires à la sécurité de l'exploitation. L'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux ; RS 814.201) précise à son article 42 que les autres moyens d'évacuation des sédiments doivent être évalués et privilégiés. Si le curage est inévitable, l'autorité doit dans tous les cas fixer le moment des chasses, la concentration maximum admissible en matière en suspension et si un rinçage du lit est nécessaire.

Les cantons sont compétents pour appliquer le droit fédéral sur leur territoire. A Genève, ces opérations font l'objet d'une autorisation pour entretien important des cours d'eau sur la base de l'article 19 de la loi cantonale sur les eaux (L 2 05) et de son règlement d'exécution. Les autorités instruisent le dossier selon cette procédure qui ne prévoit pas d'enquête publique. Les requêtes et les autorisations sont toutefois publiées dans la feuille d'avis officielle du canton de Genève. Depuis un avis de droit de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage du 12 novembre 2004, l'octroi d'une autorisation est nécessaire même si les chasses sont motivées par des raisons de sécurité

Accompagnement de l'APAVER par l'ouvrage de Chancy-Pougny

Le barrage de Chancy-Pougny étant transfrontalier, l'autorité concédante suisse est la Confédération par l'intermédiaire de l'office fédéral de l'énergie. Le dossier de demande pour ces opérations doit donc être approuvé par cet Office fédéral préalablement à la délivrance de l'autorisation cantonale.

L'accompagnement des opérations d'abaissement de la retenue de Verbois par le barrage de Chancy- Pougny doit également faire l'objet d'une autorisation des autorités françaises (arrêté préfectoral). Les aménagements hydroélectriques relèvent de l'application du code de l'énergie et notamment des dispositions du décret 94-894 du 13 octobre 1994 : les autorisations délivrées au titre du Code de l'Energie valent autorisation au titre de la Loi sur l'Eau.

Dans le cadre de la gestion sédimentaire sur la période 2016-2026, un dossier d'étude d'impact a été transmis aux autorités françaises (DREAL).

Cadre réglementaire de la demande de l'Etat français à son concessionnaire CNR visant à accompagner la gestion suisse (APAVER)

La DREAL Rhône-Alpes, service instructeur pour l'accompagnement de la gestion sédimentaire suisse sur les ouvrages français, a posé le cadre réglementaire de sa demande dans le Rapport de synthèse du COTECH sur la nouvelle gestion sédimentaire du Haut-Rhône :

« Concernant la gestion et la préservation de la ressource en eau, la directive européenne cadre sur l'eau 2000/60/CE est applicable ainsi que le SDAGE Rhône-Méditerranée qui a valeur de plan de gestion au titre de cette directive. Les aménagements hydroélectriques relèvent de l'application du code de l'énergie et notamment des dispositions du décret 94-894 du 13 octobre 1994 : les autorisations délivrées au titre du Code de l'Énergie valent autorisation au titre de la loi sur l'eau. Pour les modalités d'exploitation et d'entretien des ouvrages et retenues concédés [...], les concessionnaires ont à transmettre un dossier de demande d'autorisation de

travaux (ex : cas des dragages) ou de dérogation aux consignes courantes d'exploitation des ouvrages (ex : cas des abaissements de retenues pour la réalisation de chasses). Cette demande comprend une consigne particulière d'exploitation qui précise les conditions d'exploitation de ces ouvrages pendant la durée des chasses. [...]

Analyse des impacts

Avant d'approuver une décision individuelle de consigne, un dossier d'exécution de travaux [...] encadrant la réalisation d'opérations de gestion sédimentaire, le code de l'environnement prévoit un dossier qui analyse les incidences sur les milieux en :

- Indiquant les incidences directes et indirectes, temporaires et permanentes, du projet sur la ressource en eau et le milieu aquatique ;
- Comportant l'évaluation des incidences du projet sur un ou plusieurs sites Natura 2000, au regard des objectifs de conservation de ces sites ;
- Justifiant, le cas échéant, de la compatibilité du projet avec le schéma directeur ou le schéma d'aménagement et de gestion des eaux et avec les dispositions des plans de gestion des risques d'inondation ;
- Précisant s'il y a lieu les mesures correctives ou compensatoires envisagées.

Par ailleurs, le code de l'environnement prévoit, pour certaines activités ou aménagements, une étude d'impact avec une définition réglementée du contenu de ce document. L'appréciation des impacts dans le cadre d'une étude d'impact se décline sur des rubriques définies par la réglementation. Le décret ministériel 94-894 concernant les concessions hydroélectriques rend tout à fait possible la demande de rédaction d'une étude d'impact.

Compte-tenu des enjeux écologiques présents et de l'impact potentiel d'opérations de gestion sédimentaires de grande ampleur, les autorités françaises retiennent le principe d'une étude d'impact pour formaliser l'évaluation de ces opérations.

Enquête publique

Le décret 94-894 prévoit que les règles de fond du code de l'environnement en matière d'association du public soient respectées. Une enquête publique globale sur l'ensemble des communes où les opérations ont une incidence notable est à prévoir lorsqu'une étude d'impact est requise.

Espèces protégées

En application de l'article L.411-1 du Code de l'environnement, le dossier d'un concessionnaire français doit démontrer l'absence de destruction d'espèces protégées. Dans le cas contraire, une demande de dérogation à l'interdiction de destruction d'espèces protégées doit être déposée auprès de la DREAL. »

Ainsi, en préparation des accompagnements des abaissements partiels suisses sur la période 2016-2026, CNR a établi, au titre de l'article L222-1 du Code de l'environnement, une étude d'impact environnemental :

- attendant à la notice technique de la consigne générale d'exploitation des ouvrages concédés par l'Etat à CNR dans le cadre de la demande d'autorisation décennale d'accompagnement de l'abaissement partiel de Verbois, cette consigne est à mettre en œuvre par CNR sous le contrôle de la DREAL Rhône-Alpes ;
- et couvrant également pour 10 ans la réalisation de dragages complémentaires à l'amont du barrage de Génissiat, ces dragages constituant un volet complémentaire au sein du scénario mixte de gestion sédimentaire. Il présente l'évaluation des impacts prévisibles sur la partie française du Haut-Rhône des différents volets de mesures d'accompagnement de la gestion sédimentaire de Verbois, conformément à l'article R. 122-5 du Code de l'Environnement qui prévoit le contenu d'une étude d'impact environnemental.

Chasses de la basse Isère

Afin de faire transiter ces flux importants de sédiments arrivant dans les retenues de la basse Isère, EDF réalise régulièrement des opérations de chasse. Elles sont encadrées par une consigne approuvée par arrêté inter préfectoral intégrant les améliorations successives issues des différents retours d'expérience passés.

1.5 Fiche d'incidence de dragage

Pour les plans d'entretien portés par CNR, VNF ou encore la Métropole de Lyon, les arrêtés d'autorisation demandent l'élaboration de fiches d'incidence de dragage (FID).

A l'occasion de l'élaboration de la fiche d'incidence sont définies les dispositions de chantier qui permettent d'éviter toute incidence environnementale.

La conclusion de l'absence d'incidence repose sur les principes développés dans le dossier et résumés ici :

- L'opération de dragage ou de curage doit respecter les principes posés par la « recommandation pour la manipulation des sédiments du Rhône dans le contexte de pollution par les PCB ». Ses prescriptions sont à ce jour :
 - A l'issue de l'opération de dragage les nouveaux fonds ne doivent pas être d'une qualité inférieure aux fonds antérieurs.
 - Pour pouvoir être restitués au Rhône, les sédiments ne doivent pas avoir une teneur en PCB indicateurs supérieure à 60 µg/kg et doivent être d'une qualité comparable à celle des sédiments qui transitent naturellement en suspension ou qui constituent les fonds du Rhône à l'aval du point de restitution des sédiments, ou être de meilleure qualité.
- Pour ce qui concerne les autres contaminants, les sédiments ne peuvent être restitués au Rhône que si la concentration de chacun des paramètres de la grille S1 (arrêté du 09/08/06) est inférieure au seuil de référence, ou si une analyse de lixiviation montre qu'il peut être qualifié de déchet non dangereux et qu'un test éco-toxicologique montre qu'il n'est pas écotoxique.
- La fiche prévoit la mise à terre des sédiments lorsque :
 - Leur qualité ne le permet pas selon les critères qui viennent d'être précisés.
 - Le projet peut être considéré comme non faisable technico-économiquement : lorsque la restitution des sédiments conduit compte tenu des dispositions techniques à mettre en œuvre à un surcoût de 25%. La fiche d'incidence présentera l'estimation de la solution « restitution » lorsque celle-ci aura été écartée pour ce motif.
 - Les sédiments remis dans le Rhône ne permettent pas de maintenir le lit dans son état d'équilibre. Cette situation peut se présenter lorsque le lit du Rhône présente un excédent sédimentaire dans le périmètre où la restitution serait faisable technico-économiquement. Dans ce cas la fiche incidence sur la base des données les plus récentes dont disposera la CNR rendra compte des situations bathymétriques.
- La fiche présente les conditions dans lesquelles les matériaux fins sont mis en dépôt à terre.
 - La destination retenue sera en priorité le stockage sur des terrains CNR. Dans le cas de sédiments dangereux ou écotoxique, une membrane imperméable isolera le dépôt du terrain. Les dispositions seront prises pour que les eaux de lagunage restituées au Rhône soit de même qualité que l'eau du Rhône en amont du chantier.
 - Si la CNR ne dispose pas de terrains, des solutions avec évacuation en centre stockage seront envisagées. Pour réduire le volume concerné il pourra être procédé à un tri granulométrique et valorisation de la fraction la plus grossière si sa qualité le permet.
- L'absence d'incidence est obtenue par la maîtrise de la qualité des sédiments restitués au fleuve et par la maîtrise des flux marginaux de matières en suspension générés par le chantier (appréciés à travers la turbidité) selon la consigne présentée en annexe 2. Cette maîtrise conduit à une distance de l'ordre de 3 km à l'aval du dragage à des situations quasi-naturelles (observées naturellement plusieurs semaines par an correspondant à des périodes de hautes eaux). Le dragage n'a donc pas d'incidence sur les milieux naturels ou usages (pompages par exemple) au-delà de cette distance. La localisation d'un enjeu particulier à proximité du chantier sera pris en compte en tant que de besoin, dans la détermination du point de restitution amont - aval, rive droite – rive gauche, profondeur, et/ou le report du point de consigne et de surveillance du chantier en amont du site à enjeu. La fiche incidence fera état des dispositions particulières tenant compte de la proximité d'un enjeu remarquable

1.6 Arrêté du 30 mai 2008

L'article 9 de l'arrêté du 30 mai 2008 fixant les prescriptions applicables aux opérations d'entretien de cours d'eau ou canaux précise que « les matériaux mobilisés dans une opération de curage doivent être remis dans le cours d'eau afin de ne pas remettre en cause le mécanisme de transport naturel des sédiments et le maintien du lit dans son équilibre ».

Ainsi les sédiments doivent prioritairement être restitués aux cours d'eau. Cependant, dans certains cas, la mise à terre des matériaux est obligatoire. Il s'agit principalement des cas où la remise au fleuve impose des conditions technico-économiques trop contraignantes, ou lorsque la remise des matériaux engendrerait des perturbations hydrauliques ou encore environnementales par exemple lorsque la qualité physico-chimique des matériaux s'avèrerait incompatible avec une remise au fleuve. Dans ce dernier cas, la mise à terre des matériaux implique un traitement sur site ou un envoi vers un centre de traitement adapté (dans ce cas uniquement, le sédiment est alors considéré comme un déchet).

Les résultats d'analyses sont interprétés au regard des valeurs guides définies dans l'arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surfaces ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux relevant respectivement des rubriques 2.2.3.0, 4.1.3.0 et 3.2.1.0 de la nomenclature annexée au décret n°93-743 du 29 mars 1993.

Pour être restitués au cours d'eau les sédiments doivent présenter des teneurs inférieures aux niveaux S1 définis dans l'arrêté du 9 août 2006 et doivent être non dangereux.

Tableau 3 : Valeurs guides d'interprétation pour les sédiments destinés à être restitués dans le cours d'eau

Paramètres	Niveau S1 en mg/kg ms
Arsenic	30
Cadmium	2
Chrome	150
Cuivre	100
Mercur	1
Nickel	50
Plomb	100
Zinc	300
PCB Totaux	0.68
HAP Totaux	22.8

A noter que l'article 2 de l'arrêté du 9 août 2006 précise que : « lors des analyses, afin d'évaluer la qualité des rejets et sédiments en fonction des niveaux de référence [...], la teneur à prendre en compte est la teneur maximale mesurée. Toutefois, il peut être toléré :

- 1 dépassement pour 6 échantillons analysés ;
- 2 dépassements pour 15 échantillons analysés ;
- 3 dépassements pour 30 échantillons analysés ;
- 1 dépassement par tranche de 10 échantillons supplémentaires analysés, sous réserve que les teneurs mesurées sur les échantillons en dépassement n'atteignent pas 1,5 fois les niveaux de référence considérés. ».

Pour ce qui concerne les autres contaminants que les PCB, les sédiments ne peuvent être restitués également que si une analyse de lixiviation montre qu'ils peuvent être qualifiés de déchets non dangereux et qu'un test éco-toxicologique montre qu'ils ne sont pas écotoxiques.

1.7 Gestion à terre des sédiments

Les activités de gestion des sédiments de dragage, dès lors que les sédiments ont un statut de déchets, c'est-à-dire lorsqu'ils sont gérés à terre, sont susceptibles d'entrer dans le champ de la législation des ICPE (cf. paragraphe qui suit). L'évaluation du caractère écotoxique des sédiments de dragage susceptibles d'être des déchets et destinés à une gestion à terre doit être réalisée de préférence selon le « protocole pour l'évaluation de l'écotoxicité de sédiments destinés à une gestion à terre » élaboré par le BRGM.

1.7.1 Sortie du statut de déchet

Les sédiments faisant l'objet d'une gestion à terre peuvent désormais être sorti du statut de déchet sous certaines conditions qui sont énoncées dans l'arrêté du 4 juin 2021.

Ainsi, l'entreposage temporaire des sédiments en amont d'un processus de valorisation ou d'élimination est alors encadré par la loi sur l'eau, au travers de la rubrique 2.2.3.0 « rejets dans les eaux de surfaces » sous réserve que :

- 1. Ne soient pas mises en œuvre au cours de cette gestion, des activités de traitement (seuls le ressuyage, la déshydratation des matériaux afin d'en limiter le volume pour en faciliter le transport, et la séparation granulométrique du sédiment peuvent être pratiqués) ;
- 2. Les sédiments soient caractérisés comme non dangereux ;
- 3. Dans le cas de sédiments non inertes, les sédiments soient entreposés dans un lieu approprié permettant de récupérer les eaux de ressuyage afin d'en contrôler le rejet ;
- 4. Le site d'entreposage se situe dans le site portuaire le plus proche du lieu de dragage pour les sédiments marins et à proximité du lieu de dragage dans les autres cas.

La durée d'entreposage de ces sédiments doit être mentionnée dans l'autorisation délivrée au titre de la loi sur l'eau pour chaque chantier ou chaque phase de chantier (concernant les autorisations de plusieurs années pour les dragages d'entretien). Elle doit rester limitée à 1 an quand les sédiments ont vocation à être éliminés et à 3 ans s'ils ont vocation à être valorisés.

Les différentes filières de gestion envisagées doivent permettre de réduire au maximum la durée d'entreposage. Les ouvrages et aménagements attachés à une opération de valorisation des sédiments de dragage ne relèvent pas non plus d'un classement ICPE.

1.7.2 Réglementation relative aux déchets

Le devenir des sédiments de dragage après extraction est confronté à la définition de la notion de déchet, à la classification des produits en fonction de leur dangerosité et à la multiplicité des filières d'élimination.

La notion de « déchet » est définie à l'article L541-1 du Code de l'Environnement : « est un déchet tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ».

Considérant que les sédiments sont des « résidus » d'une activité (le dragage) dont l'objectif est le rétablissement de la fonctionnalité hydraulique de la voie d'eau et non l'exploitation d'un matériau particulier en vue de l'utiliser, le sédiment de dragage rentre dans le champ d'application d'un bien meuble initialement destiné à l'abandon. Les sédiments extraits d'un cours d'eau ou d'un canal, dès lors qu'ils sont gérés à terre, sont donc considérés comme des déchets.

A contrario, les sédiments uniquement déplacés au sein des eaux de surface et par un même maître d'ouvrage ne sont pas considérés comme des déchets.

L'utilisation ultérieure des sédiments, quelle qu'elle soit, ne lui enlève pas leur statut de déchets, à l'exception des sédiments qui remplissent les conditions énoncées dans l'arrêté du 4 juin 2021 (cf. paragraphe précédent). Ce statut n'interdit pas une utilisation future ou même la vente à titre onéreux. La distinction entre déchets inertes et non inertes est donnée par l'article L151-1-III du Code de l'environnement : « sont considérés comme

déchets inertes les déchets qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine ».

La distinction entre déchets dangereux et non dangereux est donnée par l'article R541-8 du code de l'environnement dont l'annexe I donne les propriétés d'un déchet induisant sa dangerosité, et l'annexe II propose une classification des déchets en marquant ceux qui sont dangereux d'un astérisque :

- 17 05 Terres (y compris déblais provenant de sites contaminés), cailloux et boues de dragage :
 - 17 05 03* - terres et cailloux contenant des substances dangereuses
 - 17 05 04 - terres et cailloux autres que ceux visés à la rubrique 17 05 03
 - 17 05 05* - boues de dragage contenant des substances dangereuses
 - 17 05 06 - boues de dragage autres que celles visées à la rubrique 17 05 05
 - 17 05 07* - ballast de voie contenant des substances dangereuses
 - 17 05 08 – ballast de voie autres que ceux visés à la rubrique 17 05 07

Pour les sédiments, le seul critère probant retenu par les services de l'État concerne l'écotoxicité des matériaux (H14). Aucune méthode claire n'existe pour déterminer si un déchet est écotoxique ou non. Il est de la responsabilité du propriétaire de déchet d'en définir sa dangerosité pour l'homme et l'environnement.

Un protocole est actuellement en cours de validation (seuil provisoires définis), piloté par le MEEDDM et impliquant différents opérateurs (GEODE, Grand Ports Maritimes, VNF, Port de Paris...) et groupe scientifiques (BRGM, CEMAGREF, CETMEF, IFREMER, INERIS). La finalité du protocole est de définir le caractère dangereux ou non des sédiments en vue d'une gestion à terre. A ce jour, la qualité des sédiments a été évaluée sur la base du protocole d'essai contenu dans la circulaire technique VNF version 2008. L'appréciation du degré de contamination intrinsèque des sédiments est basée sur le calcul d'un indice de contamination polymétallique, le Qsm, en fonction des concentrations des polluants et des seuils S1 fixées dans l'arrêté 9 août 2006. Cet indice permet d'évaluer les effets de mélanges de polluants en les rapportant au nombre de contaminants.

► Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE)

Au-delà des opérations de dragage, la gestion des sédiments (en particulier les opérations d'élimination, c'est-à-dire de traitement, de transit, de stockage définitif ou de revalorisation) est encadrée par la réglementation des ICPE.

Les rubriques concernées de la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement sont :

- **Transit de déchets inertes :**
 - Rubrique 2517 : « Station de transit de produits minéraux ou de déchets non dangereux inertes autres que ceux visés par d'autres rubriques »
 - Régime d'enregistrement si l'aire de stockage est supérieure à 10 000 m² ;
 - Régime de déclaration si l'aire de stockage est supérieure à 5 000 m² mais inférieure à 10 000 m² ;
 - Remarques : au-delà de 3 ans, un dépôt n'est plus considéré comme provisoire, il s'apparente donc à du stockage.
- **Transit de déchets non dangereux non inertes :**
 - Rubrique 2716 : « Installation de transit, regroupement ou tri de déchets non dangereux non inertes l'exclusion des installations visées aux rubriques 2710, 2711, 2712, 2713, 2714, 2715 et 2719 » :
 - Régime d'enregistrement si volume supérieur ou égal à 1000 m³ ;
 - Régime de déclaration entre 100 et 1 000 m³.

• Transit de déchets dangereux :

- Rubrique 2718 (rubrique supprimée depuis le 9 juin 2018) : « Installation de transit, regroupement ou tri de déchets dangereux ou de déchets contenant les substances dangereuses ou préparations dangereuses mentionnées à l'article R. 511-10 du code de l'environnement, à l'exclusion des installations visées aux rubriques 2710, 2711, 2712, 2719 et 2793 » :
 - Demande d'autorisation si la quantité de déchets susceptible d'être présente dans l'installation est supérieure ou égale à 1 tonne ;
 - Déclaration si cette quantité est inférieure à 1 tonne.

• Traitement des déchets non dangereux

- Rubrique 2791 : « Installation de traitement de déchets non dangereux à l'exclusion des installations visées aux rubriques 2515, 2711, 2713, 2714, 2716, 2720, 2760, 2771, 2780, 2781, 2782, 2794, 2795 et 2971 » :
 - Demande d'autorisation si la quantité de déchets traités est supérieure ou égale à 10 t/j ;
 - Déclaration si cette quantité est inférieure à 10 t/j.

• Traitement de déchets dangereux :

- Rubrique 2790 : « Installation de traitement de déchets dangereux ou de déchets contenant des substances dangereuses ou préparations dangereuses mentionnées à l'article R. 511-10 du code de l'environnement, à l'exclusion des installations visées aux rubriques 2711, 2720, 2760, 2770, 2792, 2793 et 2795 » :
 - Demande d'autorisation.

• Stockage :

- Rubrique 2760 : « Installation de stockage de déchets autre que celles mentionnées à la rubrique 2720 et celles relevant des dispositions de l'article L. 541-30.1 du code de l'environnement ».
- Régime d'enregistrement pour les installations de stockage de déchets inertes ;
- Demande d'autorisation pour les installations de stockage de déchets dangereux, comme pour les installations de stockage de déchets non dangereux quelle que soit leur provenance (à l'exception des implantations isolée et non soumise à la rubrique 3540).

► Le cas des Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI)

La réglementation relative aux installations de stockage de déchets inertes répond aux textes suivants.

- Articles L. 541-30-1 et R. 541-80 à R. 541-82 du Code de l'Environnement : ces articles soumettent l'exploitation d'ISDI à autorisation préfectorale préalable.

Une installation de stockage de déchets inertes est destinée au dépôt régulier de déchets inertes en vue de leur élimination et sans intention de reprise ultérieure. Ainsi ne sont pas des installations de stockage de déchets inertes :

- les installations de stockage de déchets inertes dans lesquelles les déchets sont entreposés pour une durée inférieure à 3 ans en vue de leur valorisation sur un autre site ;
- les installations de stockage de déchets dans lesquelles les déchets sont entreposés pour une durée inférieure à 1 an en vue de leur transport sur un lieu de stockage définitif ;
- l'utilisation de déchets inertes pour la réalisation de travaux d'aménagement, de remblai, de réhabilitation ou à des fins de construction.

Une installation de stockage de déchets inertes est qualifiée en fonction des critères suivants :

- l'absence d'un réel projet d'aménagement, c'est-à-dire programmé dans le cadre d'une opération dont le maître d'ouvrage est identifié ;
- l'engagement d'une démarche commerciale par l'exploitant ;
- une période d'apport de nouveaux déchets supérieure à 2 ans ;
- une provenance variée de déchets.

Mais ces critères ne doivent pas être considérés comme isolés c'est avant tout l'intention d'éliminer des déchets inertes par stockage qui doit être retenue.

- Arrêté ministériel du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes : cet arrêté précise notamment la liste des déchets susceptibles d'être acceptés en ISDI :

« Installation de stockage de déchet inertes : installation d'élimination de déchets inertes par dépôt ou enfouissement sur ou dans la terre, y compris un site utilisé pour stocker temporairement des déchets inertes, à l'exclusion de ceux où les déchets sont entreposés pour une durée inférieure à trois ans afin de permettre leur préparation à un transport en vue d'une valorisation dans un endroit différent, ou entreposés pour une durée inférieure à un an avant leur transport sur un lieu de stockage définitif. La mise en décharge est réservée depuis le 1^{er} juillet 2002 aux déchets ultimes (Code de l'environnement, articles L.541-1 et L.541-24).

1.7.3 Recommandations relatives aux travaux et opérations impliquant des sédiments aquatiques potentiellement contaminés

Le choix de la destination des matériaux dragués est fonction de leur nature physico-chimique, de leur capacité de relargage en micropolluants et de leur écotoxicité.

Cette capacité de relargage se mesure au travers du test de lixiviation (norme NF EN 12457-2) et permet le classement des sédiments en trois catégories (inertes, non inertes et non dangereux, dangereux). Lorsque les sédiments sont inertes ou non inertes et non dangereux, un test éco-toxicologique Brachionus Calyciflorus est réalisé (norme NF T90-377).

La mise à terre des sédiments doit être envisagée :

- Lorsque les produits issus de dragage ne sont pas inertes. Ceux-ci ne sont considérés comme inertes que si :
 - ils respectent les valeurs seuils indiquées dans le tableau ci-dessous

Tableau 4 : Valeurs réglementaires en contenu total de mise en décharge en ISDI (arrêté du 12 décembre 2014) et en ISDND (arrêté du 12 mars 2012)

Paramètres	Critères d'admission déchets inertes En mg / kg ms	Critères d'admission déchets non inertes non dangereux En mg / kg ms
COT	30 000	50 000
BTEX	6	30
HAP (16)	50	100
HCT C10-C40	500	5000
PCB (7)	1	50

A noter que, concernant les COT, une valeur limite plus élevée peut être admise, à condition que la valeur limite de 500 mg/kg de matière sèche soit respectée pour le carbone organique total sur éluat. Il existe actuellement des seuils spécifiques au Bassin Versant du Rhône (seuils BVR), comme par exemple le projet de recommandation pour la somme des PCB indicateurs.

- ils respectent les valeurs réglementaires seuils suivantes :

Tableau 5 : Valeurs réglementaires lors du test de lixiviation pour la mise en décharge en ISDI (arrêté du 12/12/2014), en ISDND (arrêté du 12/03/2012) et en ISDD (arrêté du 30/12/2002)

Paramètres	Valeur guide en mg/kg MS		
	Déchets inertes	Déchets non dangereux	Déchets dangereux
Antimoine	0.06	0.7	5
Arsenic	0.5	2	25
Baryum	20	100	300
Cadmium	0.04	1	5
Chrome	0.5	10	70
Cuivre	2	50	100
Mercure	0.01	0.2	2
Molybdène	0.5	10	30
Nickel	0.4	10	40
Plomb	0.5	10	50
Sélénium	0.1	0.5	7
Zinc	4	50	200
Fluorures	10	150	500
Indices phénol	1	-	-
COT	500	800	1000
Fraction soluble	4000	60000	100000
Chlorures	800	15000	25000
Sulfates	1000	20000	50000

- Lorsque la réinjection au milieu naturel est considérée comme non faisable technico économiquement c'est-à-dire lorsque la restitution des sédiments conduit, compte tenu des dispositions techniques à mettre en œuvre, à un surcoût de 25%.
- Lorsque les sédiments remis dans le Rhône ne permettent pas de maintenir le lit dans son état d'équilibre. Cette situation peut se présenter lorsque le lit du Rhône présente un excédent sédimentaire dans le périmètre où la restitution serait faisable technico économiquement.

Deux autres finalités sont possibles en cas de sédiments trop contaminés pour une restitution au fleuve :

- la mise en dépôt ;
- la mise Centre de Stockage des Déchets (CSD).

Les matériaux trop contaminés pour être restitués au fleuve sont gérés selon les critères de la réglementation sur les déchets. Plusieurs cas de figure peuvent se présenter :

- les sédiments sont assimilables à des déchets inertes (Article 10 et annexe 2 de l'Arrêté du 15 mars 2006 fixant la liste des types de déchets inertes admissibles dans des installations de stockage de déchets inertes). Les concentrations en polluants peuvent en effet exclure une remise au fleuve mais rester compatibles avec une mise en dépôt à terre.
- les sédiments présentent des taux de contamination incompatibles avec une restitution au fleuve et à une mise en dépôts sous forme de remblais. Selon les niveaux de contamination et les volumes en jeu, la CNR a identifié 3 modes de gestion :
 - Stockage sur terrains CNR ou valorisation directe (BTP)
 - Transfert direct en centre de stockage de déchets CSD 2 (déchets non dangereux) ou CSD 1 (déchets dangereux) : si les volumes à évacuer et la structure des matériaux sont compatibles avec les conditions d'acceptabilité des Centres de Stockage de Déchets de classe 2 ou 1 (selon niveau de contamination), les matériaux sont transférés vers les centres adaptés les plus proches.
 - Traitement avant transfert en centre de stockage de déchets CSD 2 (déchets non dangereux) ou CSD 1 (déchets dangereux) de la fraction contaminée : si les matériaux ne sont pas orientables sur un centre de stockage de déchets, le traitement, la valorisation et/ou l'élimination devront être réalisés selon les règles de l'art et le respect de la réglementation sur les déchets. Le traitement pourra se faire soit dans un centre de traitement (petits volumes) soit sur site. Une des techniques envisageables correspond à la mise en œuvre d'unité fixe temporaire ou mobile de traitement physique de type « Criblage / hydrocyclonage - Dessiccation – Compactage » visant à séparer l'eau, la fraction fine contaminée et la fraction grossière (eau, fines et grossiers analysés séparément pour mesurer leur niveau de contamination). L'ensemble des eaux du process de traitement et d'égouttage seront récupérées, analysées et si nécessaire traitées avant rejet au fleuve. La fraction grossière non contaminée est restituée au fleuve ou valorisée en fonction des critères morphologiques du site et de la faisabilité technico-économiques de la remise au fleuve (critère des 25%). La fraction fine et la part grossière contaminées sont orientées vers les centres de stockage de déchets adaptés. Le traitement est effectué « à flux tendus », limitant les nécessités de stockage provisoire.

Le déroulement du process est le suivant :

- Dégrillage (Matériaux grossiers) ;
- Dessablage (Petits graviers et des sables grossiers) ;
- Hydrocyclonage (sable fins) ;
- Clarification des eaux de rejet ;
- Déshydratation de la fraction résiduelle après hydrocyclonage pour obtenir un matériau cohésif et compactage.

Selon le prestataire en charge de l'exécution, l'opération peut recouvrir plusieurs formes ou variantes. Cependant, les étapes de mise en place du dispositif de traitement répondront aux exigences suivantes :

- Unité fixe temporaire : Aménagement « à bord de voie d'eau » d'une plateforme étanche d'une surface inférieure ou égale à 1 000 m² (ne permettant aucun rejet dans le milieu par percolation). L'étanchéité de la zone de traitement et de stockage provisoire des produits issus du traitement est assurée par la mise en place d'un revêtement étanche. La plateforme est mise en œuvre avec des pentes d'écoulement permettant la récupération des eaux de pluie et des eaux de ressuyage contenues dans les sédiments et des eaux de process puis de les orienter dans des puisards. Ces eaux résiduelles sont pompées et renvoyées en tête de station de traitement. Elles sont donc intégrées aux eaux de process.
- Unités mobiles de traitement : ces dispositifs mobiles, sur engins terrestres ou flottants sont destinés à des dragages de rendements faibles ou moyens et fonctionnent en total autonomie.

1.8 Synthèse des zonages d'inventaire et de protection à prendre en compte

Les différents zonages d'inventaire et de protection développés dans le rapport de Mission 3 ne sont pas rappelés en détail dans le présent rapport. Sont rappelés toutefois la liste des différents zonages à considérer et présents sur le corridor rhodanien :

- Périmètres de protection règlementaire : Réserves de Biosphère, Réserves Naturelles Nationales, Réserves Naturelles Régionales, Arrêtés de protection de biotope, Zones humides protégées par la convention de Ramsar ;
- Périmètres de protection contractuelle : Parcs naturels régionaux, Parcs naturels nationaux, Réseau Natura 2000, Sites du Conservatoire du Littoral.
- Périmètres d'inventaires : inventaire ZNIEFF, inventaire des zones humides, Inventaire des frayères, Réservoirs biologiques.

Parmi tous ces éléments à prendre en compte lors de l'élaboration et l'instruction d'une mesure de gestion ou de restauration, les réservoirs biologiques sont parmi les plus importants à considérer. Ils sont rappelés sur la Figure 1

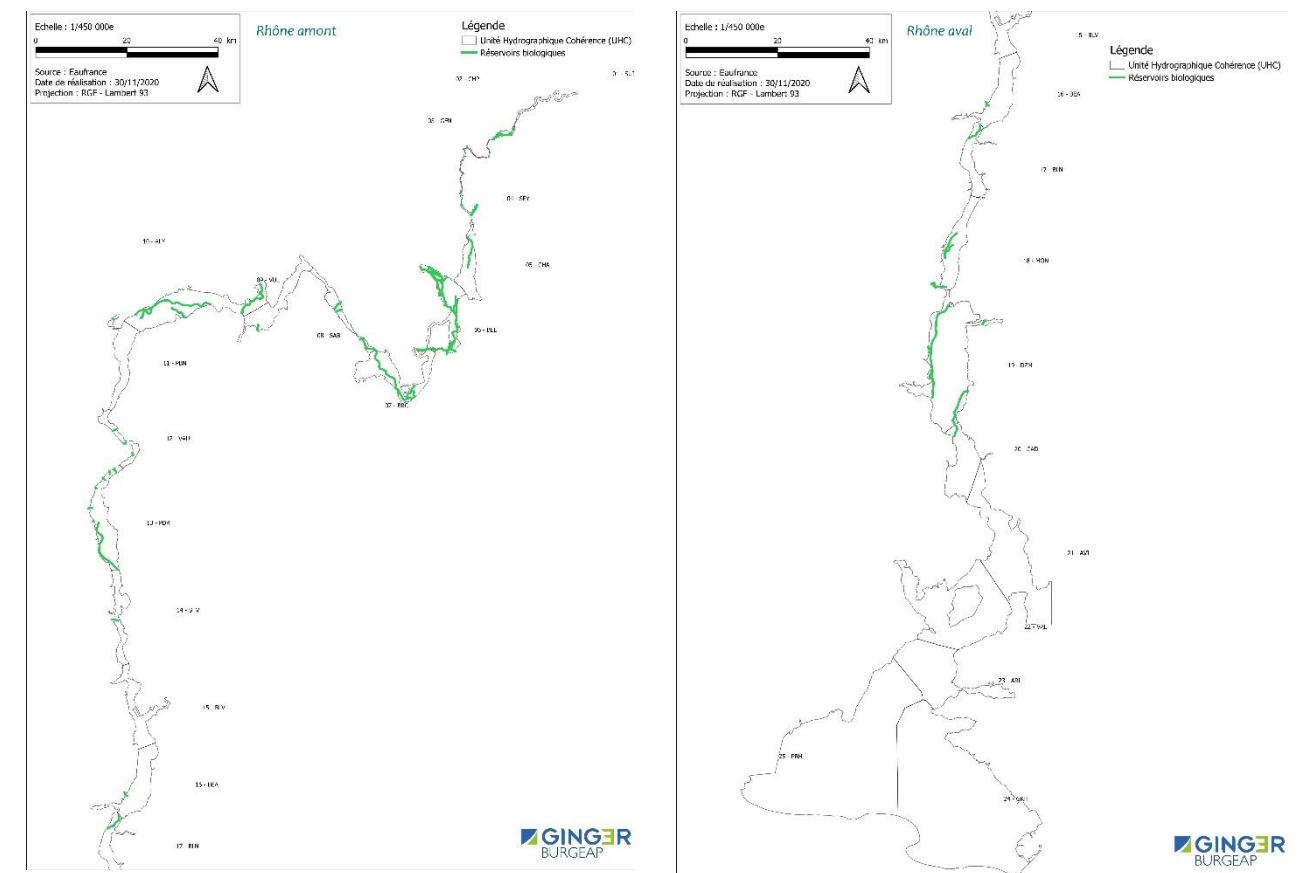


Figure 1 : Linéaires de réservoirs biologiques

1.9 Séquence Eviter-Réduire-Compenser (ERC)

La séquence « éviter, réduire, compenser » (ERC) est inscrite dans la réglementation depuis la loi du 10 juillet 1976 sur la protection de la nature (article 2) ... et les mesures envisagées pour supprimer, réduire et, si possible, compenser les conséquences dommageables pour l'environnement ».

Cette séquence se met en œuvre lors de la réalisation de projets ou de plans/programmes et s'applique à l'ensemble des composantes de l'environnement (article L.122-3 du code de l'environnement). Concernant les milieux naturels, elle a été confortée par la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages du 08 août 2016. Cette loi complète l'article L.110-1 du code de l'environnement fixant les principes généraux sur le sujet du principe d'action préventive et de correction, par priorité à la source, des atteintes à l'environnement : « Ce principe implique d'éviter les atteintes à la biodiversité et aux services qu'elle fournit ; à défaut, d'en réduire la portée ; enfin, en dernier lieu, de compenser les atteintes qui n'ont pu être évitées ni réduites, en tenant compte des espèces, des habitats naturels et des fonctions écologiques affectées. Ce principe doit viser un objectif d'absence de perte nette de biodiversité, voire tendre vers un gain de biodiversité » CGDD & CEREMA, 2018.

Au cours des quarante dernières années, la séquence ERC a progressivement été intégrée à notre réglementation (directives européennes de 1985 et de 2001, Charte de l'environnement de 2004, lois dites « Grenelle » de 2009 et 2010, etc.) et appliquée de façon transversale aux procédures environnementales (au titre de la loi sur l'eau, de la dérogation à la protection stricte des espèces, des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), des études d'impact, des évaluations des incidences Natura 2000, des évaluations environnementales des plans et programmes, des autorisations environnementales, des permis de construire, des défrichements, etc.). CGDD & CEREMA, 2018.

Une doctrine nationale (publiée en 2012) et des lignes directrices nationales (publiées en 2013) concernant les milieux naturels ont permis de produire des éléments méthodologiques permettant de mieux définir ce que peuvent recouvrir les différentes phases de la séquence ERC. Une classification des mesures de ces dernières a également été réalisée dans un document : le Guide d'aide à la définition des mesures ERC (CGDD & CEREMA, 2018).

Ce principe ERC repose sur 3 étapes consécutives (CGDD & CEREMA, 2018):

- Évitement des impacts en amont des projets ;
- Réduction des impacts durant le projet ;
- Compensation des impacts résiduels.

Les mesures de compensation sont réfléchies après avoir étudié et proposé des mesures d'évitement et de réduction dans le cas d'impact sur la faune et la flore lors du projet.

1.10 Emission de GES

► Obligations actuelles

La Stratégie Nationale Bas Carbone, adoptée par décret du 21 avril 2020, instaurée par la loi de transition énergétique pour la croissance verte, définit la marche à suivre pour réduire les émissions de gaz à effet de serre de la France, et fixe un objectif pour la mise en œuvre de la transition vers une économie bas-carbone. Elle définit en particulier des orientations transversales et sectorielles (voir Figure ci-dessous), et décline annuellement les objectifs quinquennaux (budgets carbone) pour différentes périodes : 2019-2023, 2024-2028 et 2029-2033. Elle vise *in fine* l'atteinte de la neutralité carbone en 2050.

La neutralité carbone implique de diviser nos émissions de GES au moins par 6 d'ici 2050, par rapport à 1990, c'est-à-dire trouver un équilibre entre les émissions de GES sur le territoire national et l'absorption de carbone que ce soit par les écosystèmes gérés par l'être humain (forêts, sols agricoles, zones humides...) ou par les procédés industriels (capture et stockage ou réutilisation du carbone).

Actuellement, les obligations de maîtrise des GES sont limitées en périmètre. En effet, les bilans d'émissions de gaz à effet de serre (Bilan GES) ont été rendus obligatoires seulement pour les entreprises de plus de 500 salariés, les établissements publics de plus de 250 agents et les collectivités de plus de 50 000 habitants (article L. 229-25 du code de l'environnement).

Un projet de gestion ou de restauration sédimentaire n'est donc pas soumis à des obligations de maîtrise de ses GES, à moins qu'il soit inscrit dans l'un des deux documents décrits par la suite (PCAET et SRADDET). Toutefois, il est nécessaire d'intégrer l'approche « Bilan GES » en amont des projets afin que ce critère puisse peser dans l'analyse des variantes d'aménagement et le choix de la solution retenue.

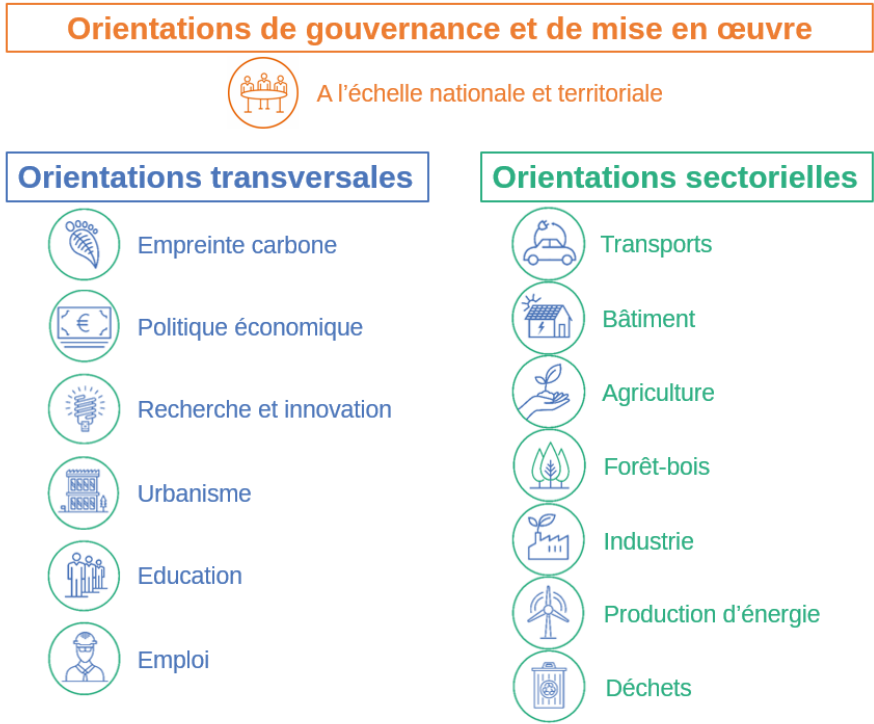


Figure 2 : Orientations transversales et sectorielles de la Stratégie Nationale Bas Carbone

► Réduction des émissions de GES et stockage carbone ?

Certaines orientations fondamentales du SDAGE vont dans le sens d'une réduction des gaz à effets de serre et d'un piégeage du carbone, donc en cohérence avec la SNBC, notamment dans les dispositions qui concernent la préservation des forêts alluviales et des zones humides ou leur restauration car elles contribuent à la lutte contre le changement climatique, notamment en favorisant le stockage du carbone.

D'autres stratégies, plans et programmes s'articulent avec la SNBC sur la question de la maîtrise des GES. Deux documents territorialisés, en particulier, visent notamment à caractériser les émissions de GES et à fixer des objectifs de réduction :

- le PCAET, obligatoire pour les intercommunalités de plus de 20 000 habitants, visant à établir un diagnostic, une stratégie territoriale, un plan d'actions et un dispositif de suivi et d'évaluation des mesures initiées ;
- le SRADDET, dont les objectifs doivent être compatibles (sens juridique du terme) avec ceux des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) et avec les plans de gestion des risques d'inondation (PGRI).

Ces outils de planification territorialisés ne s'appliquent donc pas à l'échelle de gestion du Rhône et de ses sédiments. Cependant, les mesures de gestion prescrites dans le cadre du schéma directeur de gestion sédimentaire pourraient faire l'objet d'une évaluation de leurs effets sur les émissions de GES et le stockage de carbone à l'échelle des territoires disposant d'un PCAET et de la compétence de gestion des sédiments (la métropole de Lyon par exemple).

L'évaluation des émissions de GES peut, à l'échelle d'une action de gestion, et selon l'échelle temporelle considérée (par exemple juste après une action, question de la résilience du milieu) présenter un bilan GES négatif. Cependant, il est possible que cette même action bénéficie à d'autres services écosystémiques (exemples : amélioration de l'état écologique, amélioration des conditions de navigation, etc.).

2. Quels sont les coûts unitaires à retenir pour les actions-clés ?

Cette partie se contente de rappeler les coûts unitaires des actions-clés établis en Mission 6.

Tableau 6 : Coûts unitaires des actions de gestion

Actions de gestion	Coût unitaire min	Coût unitaire moyen	Coût unitaire max	Facteurs affectant la variabilité des coûts
Dragage de sédiments fins (G1-G2)	3 €/m³	6 €/m³	50 €/m³	Volume, distance, provenance de l'entreprise, équipements et autres aspects techniques propre à l'entreprise en charge. Ils dépendent aussi des conditions d'accès, des contraintes des travaux, du devenir des sédiments et du lieu de restitution.
Dragage de sédiments grossiers (G3-G4)	2 €/m³	13 €/m³	50 €/m³	Volume, distance, provenance de l'entreprise, équipements et autres aspects techniques propre à l'entreprise en charge. Ils dépendent aussi des conditions d'accès, des contraintes des travaux, du devenir des sédiments et du lieu de restitution.
Chasse de retenue (G5)		6,2 M€ (APAVR Verbois et Chancy-Pouigny) 270 000 €/jour (pertes d'exploitation)		Les pertes d'exploitation varient en fonction du nombre d'aménagements hydroélectriques mis à l'arrêt et de la durée de mise à l'arrêt.
Mise en transparence de barrage (G6)	6 M€ (APAVR CNR 2016) 167 000 €/jour (perte d'exploitation)	8 M€ (APAVR CNR)	10 M€ (APAVR CNR 2021) 430 000 €/ jour (perte d'exploitation)	Les pertes d'exploitation varient en fonction du nombre d'aménagements hydroélectriques mis à l'arrêt et de la durée de mise à l'arrêt.
Optimisation de la gestion des ouvrages pour réduire la sédimentation (G7)	ND	ND	ND	Fréquence et durée des opérations de gestion avec perte de production plus ou moins importantes.
Optimisation des infrastructures pour réduire la sédimentation (G8)	100 000 €/ouvrage	500 000 €/ouvrage	1 00 000 €/ouvrage	Dimension des infrastructures.
Aménagement favorisant le dépôt des sédiments en amont des zones à enjeux (G9) – aménagement initial	500 000 €/site	750 000 €/site	1 000 000 €/site	
Aménagement favorisant le dépôt des sédiments en amont des zones à enjeux (G9) – gestion courante (dragage-réinjection)		30 €/m³		
Réduction ou déplacement du chenal navigable (G10)	ND	ND	ND	Dépose-repose de balise, association et information batellerie
Redimensionnement des systèmes d'endiguement en fonction du retour des sédiments (G11)	1 000 €/m linéaire	1 500 €/m linéaire	2 500 €/m linéaire	Longueur de digue, nécessité d'un confortement amont/aval et nécessité d'ou ouvrage de sécurité
Charruage-essartage (G12-G13)	600 €/ha.an	1 600 €/ha.an	6 200 €/ha.an	

ND : non déterminé

Tableau 7 : Coûts unitaires des actions de restauration

Actions de restauration	Coût unitaire min	Coût unitaire moyen	Coût unitaire max	Facteurs affectant la variabilité des coûts
Réinjection de sédiments grossiers en RCC (R1)	10 €/m³	30 €/m³	50 €/m³	Coût de réinjection à partir du site de stockage, le dragage ayant été réalisé par ailleurs (G3). Volume, distance, mode de transport entre lieu de stockage et de réinjection, type de voirie
Réactivation des marges alluviales (R2)	910 €/ml de berge	1 400 €/ml de berge	1 750 €/ml de berge	Volume de terrassement, nature, devenir et volume de sédiment
Restauration morphologique de la bande active (R3)	1000 €/ml de berge 500 000 € par confluence	1 200 à 1 500 €/ml de berge	2000 €/ml de berge 3 000 000 € par confluence	Ampleur des travaux, conditions d'accès au site
Restauration des îlônes et zones humides associées (R4)	400 000 €/îlône	1 000 000 €/îlône	2 000 000 €/îlône	Ampleur des travaux, longueur de la îlône, conditions d'accès au site
Restauration de la continuité sédimentaire des ouvrages transversaux (R5)	500 000 €/ouvrage	200 000 à 400 000 €/m de chute	1 000 000 €/ouvrage	Volume de matériaux, linéaire, hauteur de berge, matériaux principal, distance d'exportation
Réinjection de bois mort (R6)		100 000 € par RCC		
Restauration morphologique dans les retenues ou canaux usiniers (R7)	500 000 €/retenue	750 000 €/retenue	1 000 000 €/retenue	Longueur du linéaire à protéger, technique utilisée, origine des matériaux et des plants
Mise en transparence ou recul de digues (R8)		10 000 000 € par masse d'eau concernée (projets SYMADREM)		
Restauration d'anciennes gravières (R9)	7 €/ m³ 15 €/ m²	12 €/ m³ 27 €/ m²	18 €/ m³ 55 €/ m²	Surface et volume, dimensions de la gravière
Relèvement des débits et régimes réservés (R10)	2% de perte de productible	5,6% de perte de productible	10,5% de perte de productible	Importance de l'écart des débits retenus par rapport à la situation initiale
Augmentation de la fréquence des débits morphogènes (R11)	67 000 €/jour (Haut-Rhône) 92 000 €/jour (Rhône aval)	90 000 €/jour (Haut-Rhône) 120 000 €/jour (Rhône aval)	107 000 €/jour (Haut-Rhône) 146 000 €/jour (Rhône aval)	Volume d'eau destinés aux lâchers, coût supplémentaire si réinjections sédimentaires, potentielle pertes d'usage

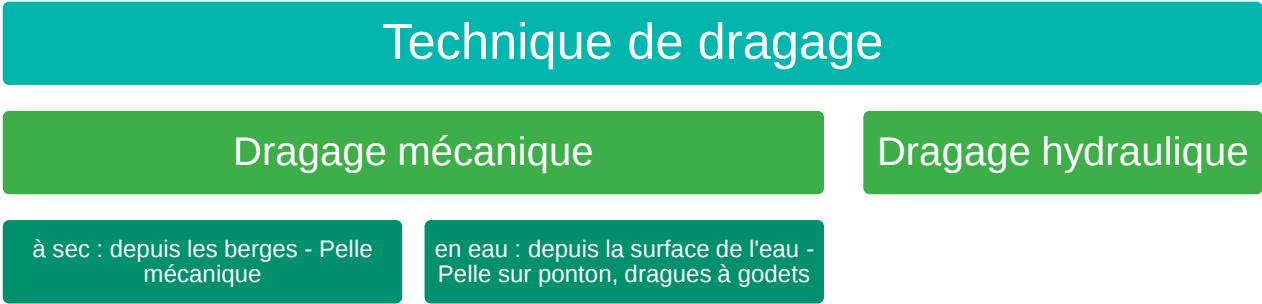
3. Comment améliorer les actions de gestion courantes ?

3.1 Les dragages et restitutions de sédiments fins (G1, G2)

Les dragages et restitution de sédiments fins font l'objet des fiches actions G1 et G2. Les deux actions sont liées dans la mesure où les sédiments dragués sont directement restitués dans l'écoulement principal du fleuve. Ces types d'actions sont bien rôdés après plusieurs années de pratique. Le Tableau 9 récapitulent les sites à plus de 150 000 m³ sur 1995-2018 (soit 6 250 m³/an).

Nous suggérons ici des points potentiels d'amélioration à envisager au cas par cas :

- Remplacement de l'action :
 - Une action G1 peut être remplacée par une action de chasse (G5), qui reste toutefois plus complexe à programmer et potentiellement plus impactante. Cependant, la solution peut s'envisager si les retenues accumulent des volumes de façon continue, notamment des volumes sableux (cas des ouvrages du Haut-Rhône soumis aux apports sableux des accompagnements d'APAVÉR) ;
- Evolution de l'action en termes de fréquence d'intervention et de volumes :
 - Une action G1 peut être réduite en fréquence ou en volume par une opération d'optimisation de la gestion des ouvrages (G7). Sur la vanne de fond de Génissiat, des manœuvres plus fréquentes ont permis d'éviter des dragages en préparation des accompagnements d'APAVÉR ;
 - Une action G1 peut être réduite en fréquence ou en volume par une opération d'optimisation des infrastructures (G8). Ces infrastructures peuvent être des ouvrages (épis, déflecteurs, etc.) qui modifient les conditions d'écoulement pour limiter les dépôts ou favoriser la reprise des sédiments. Les garages d'écluse peuvent être une cible pour limiter la sédimentation, notamment pour les sites en aval de la confluence avec l'Isère très sensibles à la sédimentation (15-BLV, 16-BEA, 17-BLN, 18-MON). La conception des infrastructures est à étudier sur le principe, puis avec une modélisation 3D des écoulements avec de vérifier les effets sur la sédimentation. La compatibilité des aménagements avec les usages de navigation est à vérifier. Ce type d'aménagement serait à envisager sur les garages d'écluse qui présentent actuellement les coûts d'entretien les plus importants : par exemple, le garage d'écluse amont de Bourg-lès-Valence a conduit à une dépense totale de 3,8 M€ depuis 1995 (soit 160 000 €/an) ; un aménagement ne serait donc pertinent qu'avec un ratio coût / bénéfice plus favorable ;
 Dans le même esprit, l'action de restauration de hauts fonds (R7) qui présente un intérêt écologique peut également participer à limiter des interventions de dragage de sédiments fins : en effet, en contractant la zone d'écoulement principale (sans toutefois menacer la sûreté des ouvrages), une zone de hauts fonds favorise la remise en suspension des sédiments et leur transfert en aval.
 - Au niveau d'une confluence, une action G1 pourrait être réduite en fréquence ou en volume par une opération de redimensionnement des systèmes d'endiguement (ou création d'un système d'endiguement) (G11). En effet, la sédimentation de matériaux fins à une confluence est généralement due à l'effet de remous d'une retenue. En rehaussant, les berges ou le système d'endiguement existant, un dépôt plus important pourrait être admis avant de déclencher un dragage. Ce dépôt augmenterait la pente de transit et pourrait être en mesure de faire transiter les sédiments de plus en plus vers l'aval, directement au Rhône. Ce type d'action pourrait être combiné avec la reprise d'une berge ou d'un système d'endiguement (cf. Mission 5 / Durance).
- Autres points de réflexion à affiner au cas par cas :
 - Critères de déclenchements de l'intervention de dragage (ligne d'eau en crue, section mouillée, profondeur du chenal navigable, etc.) ;
 - Suggestion d'approfondissement de la zone de dragage (sous le plancher alluvial, dans les sédiments grossiers), de façon à augmenter la capacité de stockage et intervenir moins fréquemment ;
 - Techniques d'intervention, selon les diagrammes suivants (d'après IXSANE, 2017)



	Dragage mécanique		Dragage hydraulique
	à sec : depuis les berges (pelle mécanique)	en eau : depuis la surface de l'eau (pelle sur pontons, dragues à godets, etc.)	
- Granulométries étendues	X		
- Préservation des matériaux	X	X	X
- Installations pour le transport, le dépôt des matériaux	X	X	X
- Profondeur de dragage étendue		X	X
- Précision dans l'étendue et la profondeur de dragage		X	
- Possibilité de dragage près d'ouvrages fixes	X	X	
- Excavation de sédiments pollués	X	X	
- Limitations liées à la présence de débris			X
- Limitations liées à la cohésion des matériaux			X
- Coûts de mise en œuvre limités			X
- Coûts avantageux pour de faible volumes			X
- Turbidité générée	X	X	
- Remise en suspension des sédiments			X
- Contrainte pour la navigation	X	X	X
- Taux de production élevé		X	(X)
- Manipulations additionnelles requises (dépôt à terre)		(X)	X
- Transport sur de longue distance facilité			
- Limitations liées aux vitesses de courant / houle			
- Concentration en eau des volumes excavés très élevées		X	X
- Limitations liées à la présence de gaz dans les sédiments			X

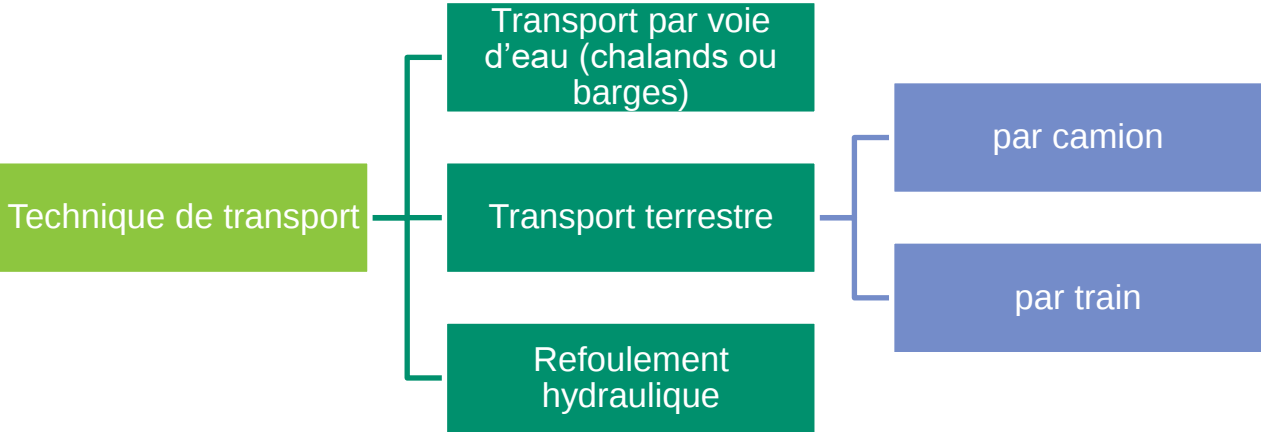


Tableau 8 : Conditions de mise en œuvre de différentes techniques de dragages

	Transport par voie d'eau (chalands ou barges)	Refoulement hydraulique	Transport terrestre par camions	Transport terrestre par voies ferrées
Coûts de transport faibles sur les courtes distances	X	X		
Coûts de transport faibles sur les longues distances		X		X
Limite le nombre d'opérations de transfert (et leurs conséquences : mise en place de zones de dépôts, pertes de sédiments lors des transferts, coûts, bilan carbone, etc.)		X		
Bennes étanches nécessaires	X	X	X	X
Tirant d'eau minimum	X	X		
Conditions météorologiques favorables pour la navigation	X	X		
Opérations de dragage ininterrompues		X		
Equipement spécifique nécessaire pour le transport sur de longues distances et / ou fortes dénivellation		X		
Limitations liées à la présence de débris		X		
Contrainte pour la navigation		X		
Autorisation municipale préalable ainsi qu'un plan de circulation détaillé			X	

3.2 Les dragages de sédiments grossiers (G3)

Recommandations générales

Les dragages de sédiments grossiers font l'objet de la fiche action G3.

Ce type d'action est bien rôdé après plusieurs années de pratique. Le Tableau 9 récapitulent les sites à plus de 50 000 m³ sur 1995-2018 (soit 2 100 m³/an).

Les actions G3 présentent moins de situations de pouvoir évoluer, contrairement aux actions G1.

- **Remplacement de l'action :**
 - **En théorie, une action G3 pourrait être remplacée par une action de chasse au sein d'une retenue (G5).** Cependant, comme démontré à travers le Scénario 3, les impacts d'une telle action sur la navigation, l'hydroélectricité ou d'autres usages (CNPE, AEP, irrigation) sont rédhibitoires du fait des durées d'ouverture de barrage nécessaires et des temps de transfert des matériaux grossiers au sein des retenues ;
- **Evolution de l'action en termes de fréquence d'intervention et de volumes :**
 - **Une action G3** ne peut évoluer grâce à une opération d'optimisation de la gestion des ouvrages (G7) car les matériaux grossiers ne sont pas suffisamment près des ouvrages de retenues pour que leur remobilisation soit améliorée. L'action G7 n'est réellement efficace que sur les sédiments fins.
 - **Une action G3 peut être réduite en fréquence ou en volume par une opération d'optimisation des infrastructures (G8).** Ces infrastructures peuvent être des ouvrages (épis, déflecteurs, déversoirs, etc.) qui modifient les conditions d'écoulement pour limiter les dépôts ou favoriser la reprise des sédiments. Un site est concerné particulièrement par ce type d'aménagement : la brèche de Neyron (10-ALY) dont la reconfiguration est envisagée de façon à mener le charriage vers le canal de Miribel aval et à éviter que trop de matériaux grossiers n'atteignent le Vieux Rhône de Neyron et le champ captant d'eau potable de la Métropole de Lyon.
 - **Au niveau d'une confluence, une action G3 pourrait être réduite en fréquence ou en volume par une opération de redimensionnement des systèmes d'endiguement (ou création d'un système d'endiguement) (G11).** En rehaussant, les berges ou le système d'endiguement existant, un dépôt plus important pourrait être admis avant de déclencher un dragage. Ce dépôt augmenterait la pente de transit et pourrait être en mesure de faire transiter les sédiments de plus en plus vers l'aval, directement au Rhône. Ce type d'action pourrait être combiné avec la reprise d'une berge ou d'un système d'endiguement (cf. Mission 5 / Durance).
- **Autres points de réflexion à affiner au cas par cas :**
 - Critères de déclenchements de l'intervention de dragage (ligne d'eau en crue, section mouillée, profondeur du chenal navigable, etc.) ;
 - Suggestion d'approfondissement de la zone de dragage (sous le plancher alluvial, dans les sédiments grossiers), de façon à augmenter la capacité de stockage et intervenir moins fréquemment ;
 - Techniques d'intervention (cf. tableaux précédents pour action-clé G1).

Tableau 9 : Classement par ordre décroissant de volume des sites de gestion en sédiments fins (G1)

Sites à plus de 150 000 m³ sur 1995-2018 (soit plus de 6 250 m³/an)

UHC	Secteur	Masse d'eau	ID	UHC	Code PGPOD CNR	TH	Localisati on_Pkaval	Année min	Année max	Motif SDGS	Localisation SDGS	Mode	Devenir des matériaux	MOA	Nombre d'opérations 1995-2018	Période de retour SDGS	Granulo- ûétrie	Niveau d'action N1, N2, N3, N4	VOLUME GROSSIERS réalisé (m³) Cumul 1995- 2018	VOLUME LIMONS réalisé (m³) Cumul 1995- 2018	VOLUME TOTAL réalisé (m³) Cumul 1995- 2018
22	VI	FRDR2008	G1-G3 DURANCE	VALLABREGUES	126	R	248,0	1995	2017	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	DA + PCL	RH	CNR	5	4-10 ans	M	3	142 900	1 199 800	1 342 700
15	IV	FRDR2007	G1_ECLUSE_GARAGE_AMONT	BOURG LES VALENCE	55	CU	105,3	1995	2015	Navigation (N)	Garage d'écluse, barrage-usine-écluse	DA	RH	CNR	11	1-3 ans	LS	2	0	1 121 995	1 121 995
5	II	FRDR2001	G1-G3 RETENUE FIER	CHAUTAGNE	5	R	-148,1	1995	2009	Sûreté ouvrages classés (S)	Retenue, queue de retenue	PCL + DA	RH	CNR	6	4-10 ans	M	2	178 855	628 201	807 056
17	V	FRDR2007	G1-G3 DROME	BAIX LE LOGIS NEUF	69	R	131,4	1995	2017	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	DA	RH	CNR	9	1-3 ans	M	3	146 350	615 970	762 320
18	V	FRDR2007	G1_ECLUSE_GARAGE_AMONT	MONTELMAR	84	CU	163,5	1996	2015	Navigation (N)	Garage d'écluse, barrage-usine-écluse	DA	RH	CNR	5	4-10 ans	LS	2	0	587 735	587 735
18	V	FRDR2007	G1-G3 ROUBION AVAL	MONTELMAR	83	CU	157,0	1995	2012	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	DA	RH	CNR	4	4-10 ans	M	1	90 400	524 643	615 043
24	VI	FRDT19	G1 EMBOUQUEMENT BARCARIN	GRAND RHONE	142	RT	316,5	1995	2017	Navigation (N)	Garage d'écluse, barrage-usine-écluse	DA	RH	CNR	12	1-3 ans	LS	2	0	419 140	419 140
20	VI	FRDR2007	G1-G3_PORT_ARDOISE	CADEROUSSE	107	RCC-L	214,0	1997	2018	Navigation (N)	Port, darse, quai, etc.	DA	RH	CNR	17	1-3 ans	M	2	23 685	379 228	402 913
17	V	FRDR2007	G1_ECLUSE_GARAGE_AMONT	BAIX LE LOGIS NEUF	76	CU	142,0	1995	2015	Navigation (N)	Garage d'écluse, barrage-usine-écluse	DA	RH	CNR	5	4-10 ans	LS	2	0	375 320	375 320
15	IV	FRDR2007	G1 ISERE	BOURG LES VALENCE	53	CU	101,5	1998	1998	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	-	-	CNR	1	> 10 ans	LS	2	0	373 550	373 550
19	V	FRDR2007	G1_ECLUSE_GARAGE_AMONT	ONZERE MONDRAGO	96	CU	186,5	1995	2016	Navigation (N)	Garage d'écluse, barrage-usine-écluse	DA	RH	CNR	12	1-3 ans	LS	2	0	363 218	363 218
22	VI	FRDR2008	G1_ECLUSE_GARAGE_AMONT	VALLABREGUES	132	CU	264,9	1995	2017	Navigation (N)	Garage d'écluse, barrage-usine-écluse	DA	RH	CNR	9	1-3 ans	LS	2	0	282 447	282 447
16	V	FRDR2007	G1_ECLUSE_GARAGE_AMONT	BEAUCHASTEL	65	CU	123,4	1996	2011	Navigation (N)	Garage d'écluse, barrage-usine-écluse	DA	RH	CNR	5	4-10 ans	LS	2	0	277 293	277 293
19	V	FRDR2007	G1_ECLUSE_GARAGE_AVAL	ONZERE MONDRAGO	98	CU	187,0	1995	2016	Navigation (N)	Garage d'écluse, barrage-usine-écluse	DA	RH	CNR	8	1-3 ans	LS	2	0	247 702	247 702
3	I	FRDR2000	G1 RETENUE BARRAGE AMONT	GENISSIAT	-	R	-162,4	1996	2006	Energie Hydroélectricité (H)	Barrage de retenue (ou de dérivation)	PCL	RH	CNR	5	4-10 ans	LS	2	0	241 845	241 845
15	IV	FRDR2007	G1-G3_ECLUSE_GARAGE_AVAL	BOURG LES VALENCE	56	CU	106,4	1995	2015	Navigation (N)	Garage d'écluse, barrage-usine-écluse	DA	RH	CNR	10	1-3 ans	M	2	28 670	229 462	258 132
14	IV	FRDR2006	G1-G3_GALAURE	SAINT VALLIER	43	R	76,4	1996	2017	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	DA + PCL + PCA	RH	CNR	12	1-3 ans	M	3	97 648	205 050	302 698
17	V	FRDR2007	G1-G3_ECLUSE_GARAGE_AVAL	BAIX LE LOGIS NEUF	77	CU	142,7	1995	2018	Navigation (N)	Garage d'écluse, barrage-usine-écluse	DA	RH	CNR	11	1-3 ans	M	2	14 719	199 516	214 235
15	IV	FRDR2007	G1 RETENUE BARRAGE ISERE	BOURG LES VALENCE	54	CU	102,6	1995	2015	Navigation (N)	Chenal navigable	DA	RH	CNR	3	4-10 ans	LS	2	0	199 456	199 456
22	VI	FRDR2008	G1-G3_ECLUSE_GARAGE_AVAL	VALLABREGUES	133	CU	265,6	1995	2017	Navigation (N)	Garage d'écluse, barrage-usine-écluse	DA	RH	CNR	12	1-3 ans	M	2	50	198 552	198 602
18	V	FRDR2007	G1-G3_CNPE_CRUAS	MONTELMAR	79	R	147,3	1995	2017	Sûreté des CNPE (U)	Prise d'eau (CNPE, AEP, irrigation, etc.)	DACL	RH	EDF	10	1-3 ans	M	2	24 860	183 359	208 219
25	VI	FRDR2009	G1 CHENAL NAVIGABLE PK293	PETIT RHONE	-	RT	283,7	1995	2011	Navigation (N)	Chenal navigable	DA	?	VNF	5	4-10 ans	LS	1	0	178 350	178 350
19	V	FRDR2007	G1 CHENAL NAVIGABLE_CNPE_TRICASTIN	ONZERE MONDRAGO	-	CU	184,3	1995	2017	Sûreté des CNPE (U)	Prise d'eau (CNPE, AEP, irrigation, etc.)	DA + PCA	RH	EDF	12	1-3 ans	LS	1	0	171 014	171 014
15	IV	FRDR2007	G1_ECLUSE_PRISE_EAU	BOURG LES VALENCE	-	CU	105,4	1996	2015	Navigation (N)	Garage d'écluse, barrage-usine-écluse	DA	RH	CNR	4	4-10 ans	LS	2	0	159 483	159 483
21	VI	FRDR2008	G1 RETENUE SAUVETERRE	AVIGNON	112	R	230,2	1995	1995	Navigation (N)	Chenal navigable	-	-	CNR	1	> 10 ans	LS	1	0	155 700	155 700
22	VI	FRDR2008B	G1-G3_GARDON	VALLABREGUES	130	RCC-L	261,3	1995	2015	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	DA	RH	CNR	4	4-10 ans	M	4	48 500	152 000	200 500

Tableau 10 : Classement par ordre décroissant de volume des sites de gestion en sédiments fins (G3)

Sites à plus de 50 000 m³ sur 1995-2018 (soit plus de 2 100 m³/an)

UHC	Secteur	Masse d'eau	ID	UHC	Code PGPOD CNR	TH	Localisati on_Pkaval	Année min	Année max	Motif SDGS	Localisation SDGS	Mode	Devenir des matériaux	MOA	Nombre d'opérations 1995-2018	Période de retour SDGS	Granulo- ûétrie	Niveau d'action N1, N2, N3, N4	VOLUME GROSSIERS réalisé (m³) Cumul 1995- 2018	VOLUME LIMONS réalisé (m³) Cumul 1995- 2018	VOLUME TOTAL réalisé (m³) Cumul 1995- 2018
23	VI	FRDR2009	G1-G3 CHENAL_NAVIGABLE_DEFLUENT	PALIER D'ARLES	136	RT	278,6	1995	2018	Navigation (N)	Chenal navigable	PCL	RH	CNR	38	1-3 ans	M	3	1 178 640	18 612	1 197 252
10	III	FRDR2005	G3_FOSSE_FEYSSINE	LYON	-	RT	-8,6	1995	1995	Sécurité inondation (I)	Retenue, queue de retenue	PMS	DE	COURLY	1	> 10 ans	G	4	800 000	0	800 000
16	V	FRDR2007B	G1-G3 VIEUX RHONE	BEAUCHASTEL	64	RCC-L	122,0	1997	2000	Sécurité inondation (I)	Bande active de Vieux Rhône	-	-	CNR	3	4-10 ans	M	1	327 055	109 400	436 455
17	V	FRDR2007	G1-G3_PIEGE_GRAVIER_DROME	BAIX LE LOGIS NEUF	-	R	131,0	1996	2016	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	PCA	DE-RE	CNR	3	4-10 ans	M	3	325 450	37 950	363 400
10	III	FRDR2005A	G3_STATION_ALERTE_AEP	LYON	-	RCC-L	-12,6	2013	2018	Sûreté AEP (A)	Prise d'eau (CNPE, AEP, irrigation, etc.)	PMS	DE	GDLYON	3	4-10 ans	G	3	255 000	0	255 000
16	V	FRDR2007	G1-G3 EYRIEUX	BEAUCHASTEL	67	R	126,4	1995	2008	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	PCL	DE	CNR	8	1-3 ans	M	3	219 539	17 290	236 829
5	II	FRDR2001	G1-G3 RETENUE FIER	CHAUTAGNE	5	R	-148,1	1995	2009	Sûreté ouvrages classés (S)	Retenue, queue de retenue	PCL + DA	RH	CNR	6	4-10 ans	M	2	178 855	628 201	807 056
18	V	FRDR2007D	G1-G3 VIEUX RHONE	MONTELMAR	-	RCC-C	158,8	1996	1996	Sécurité inondation (I)	Bande active de Vieux Rhône	-	-	CNR	1	> 10 ans	M	1	161 685	114 582	276 267
17	V	FRDR2007	G1-G3 DROME	BAIX LE LOGIS NEUF	69	R	131,4	1995	2017	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	DA	RH	CNR	9	1-3 ans	M	3	146 350	615 970	762 320
22	VI	FRDR2008	G1-G3 DURANCE	VALLABREGUES	126	R	248,0	1995	2017	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	DA + PCL	RH	CNR	5	4-10 ans	M	3	142 900	1 199 800	1 342 700
18	V	FRDR2007D	G1-G3 CHENAL NAVIGABLE LAFARGE	MONTELMAR	85	RCC-L	164,2	1996	2016	Navigation (N)	Chenal navigable	PCL	RH	CNR	11	1-3 ans	M	3	141 229	27 123	168 352
19	V	FRDR2007E	G3_PONT_SAINT_ESPRIT	ONZERE MONDRAGO	101	RCC-C	193,5	1995	2007	Sécurité inondation (I)	Bande active de Vieux Rhône	PCL	RH	CNR	6	4-10 ans	G	3	138 680	0	138 680
5	II	FRDR2001A	G3_STABILISATION_VIEUX_RHONE	CHAUTAGNE	-	RCC-C	-142,3	1997	1997	Sécurité inondation (I)	Bande active de Vieux Rhône	-	-	CNR	1	> 10 ans	G	1	133 600	0	133 600
23	VI	FRDR2009	G3_QUAI_ARLES	PALIER D'ARLES	138	RT	279,8	1998	2013	Navigation (N)	Port, darse, quai, etc.	PCL	DE	CNR	11	1-3 ans	G	3	117 889	0	117 889
14	IV	FRDR2006	G1-G3 RETENUE LAVEYRON	SAINT VALLIER	39	R	72,0	2018	2018	Sûreté ouvrages classés (S)	Retenue, queue de retenue	-	-	CNR	1	> 10 ans	M	1	111 885	148 313	260 198
20	VI	FRDR2007	G1-G3 CEZE	CADEROUSSE	105	RCC-C	213,5	1999	2018	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	DA	RH	CNR	3	4-10 ans	M	3	103 346	125 852	229 198
14	IV	FRDR2006	G3_CHENAL_NAVIGABLE_LA-CROIX-DES-MAI	SAINT VALLIER	-	R	73,0	1995	2008	Navigation (N)	Chenal navigable	PCL	RH	CNR	3	4-10 ans	G	1	102 200	0	102 200
14	IV	FRDR2006	G1-G3_GALAURE	SAINT VALLIER	43	R	76,4	1996	2017	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	DA + PCL + PCA	RH	CNR	12	1-3 ans	M	3	97 648	205 050	302 698
14	IV	FRDR2006	G1-G3_CANCE	SAINT VALLIER	40	R	73,1	1995	2016	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	DA	RH	CNR	8	1-3 ans	M	3	95 595	42 880	138 475
21	VI	FRDR2008	G1-G3_PORT_VEDETTE	AVIGNON	120	RCC-L	239,3	1997	2018	Navigation (N)	Port, darse, quai, etc.	DA-PCL	RH	CNR	12	1-3 ans	M	2	92 164	32 770	124 934
18	V	FRDR2007	G1-G3 ROUBION AVAL	MONTELMAR	83	CU	157,0	1995	2012	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	DA	RH	CNR	4	4-10 ans	M	1	90 400	524 643	615 043
4	I	FRDR2000	G1-G3_USSES	SEYSSSEL	2	R	-152,0	1997	2011	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	DA+PCA	RH	CNR	8	1-3 ans	M	3	85 300	114 500	199 800
15	IV	FRDR2006	G1-G3 DOUX	BOURG LES VALENCE	50	R	90,3	1999	2012	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	PCL	RH	CNR	5	4-10 ans	M	3	65 997	65 262	131 259
12	III	FRDR2006	G1-G3_GIER	VAUGRIS	11	R	18,3	2003	2015	Navigation (N)	Confluence, diffluence	PCL	RH	CNR	5	4-10 ans	M	3	64 500	3 500	68 000
22	VI	FRDR2008	G1-G3_DEVERSOIR_BEAUCAIRE	VALLABREGUES	134	RCC-L	266,3	1995	2004	Sûreté ouvrages classés (S)	Ouvrages annexes (contre-canal, siphon,	PCL	RH	CNR	2	> 10 ans	M	1	54 175	9 460	63 635
18	V	FRDR2007	G3 ROUBION AMONT	MONTELMAR	-	CU	157,0	1998	2014	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	AM	RH	CNR	3	4-10 ans	G	3	51 561	0	51 561
12	III	FRDR2006	G1-G3_GERE	VAUGRIS	16	R	28,6	1997	2018	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	DA + PCL	RH	CNR	11	1-3 ans	M	3	50 184	28 991	79 175

Cas particulier des confluences (cf. Mission 4)

Au niveau des confluences, on note depuis quelques années une adaptation des pratiques de dragage aux enjeux écologiques. Cette évolution est liée au renforcement des mesures d'évitement, de réduction et de compensation (séquence ERC) particulièrement sensibles dans les confluences à enjeux écologiques en termes de flux sédimentaires grossiers, d'habitat et d'espèces protégées (notamment : Doux, Eyrieux, Drôme, Roubion, Cèze, Durance).

Ainsi, les mesures d'évitement conduisent par définition à limiter l'emprise à draguer et les volumes dragués au sein du piège à sédiments par rapport à une opération réalisée auparavant sans précaution écologique ; à l'opération suivante, les évitements portent généralement à la fois sur la zone évitée précédemment ainsi que sur de nouvelles zones à enjeux écologiques qui sont apparues suite au développement des atterrissements et à leur végétalisation. Ceci conduit progressivement à réduire l'emprise de dragage effective et peut nécessiter d'intervenir plus fréquemment pour gérer les volumes excédentaires.

Le recul n'est actuellement pas suffisant pour anticiper la tendance à long terme de ce type de situation ; cependant, deux tendances défavorables pourraient apparaître dans la durée : les milieux naturels pourraient se refermer et perdre en diversité ; dans le même temps, la gestion de la sûreté dans l'espace endigué se retrouverait pénalisée car la capacité de stockage effective du piège à sédiment se trouverait réduite par rapport à son état initial. Toutefois, les effets de crues sur l'affluent ne sont pas intégrés dans cette analyse : si un remaniement morphologique de la confluence consécutif à une crue pourrait favoriser le retour de milieux pionniers, il serait probablement une condition favorable pour réaliser un dragage permettant de restaurer la capacité de stockage, avec un moindre impact écologique.

La poursuite de l'amélioration des pratiques est à réaliser en s'appuyant sur des cotes / profils de dragage, des profils en long objectifs, et la prise en compte des enjeux écologiques.

Du point de vue CNR, les sites de confluence qui présentent le plus d'enjeux pour les sédiments grossiers sont les suivants : Les Usses, Cance, Galaure, Doux, Eyrieux, Drôme, Ouvèze ardéchoise, Roubion, Escoutay, Cèze.

Le tableau ci-dessous récapitule les sites de Niveau 3 qui sont en grande partie des sites de confluence.

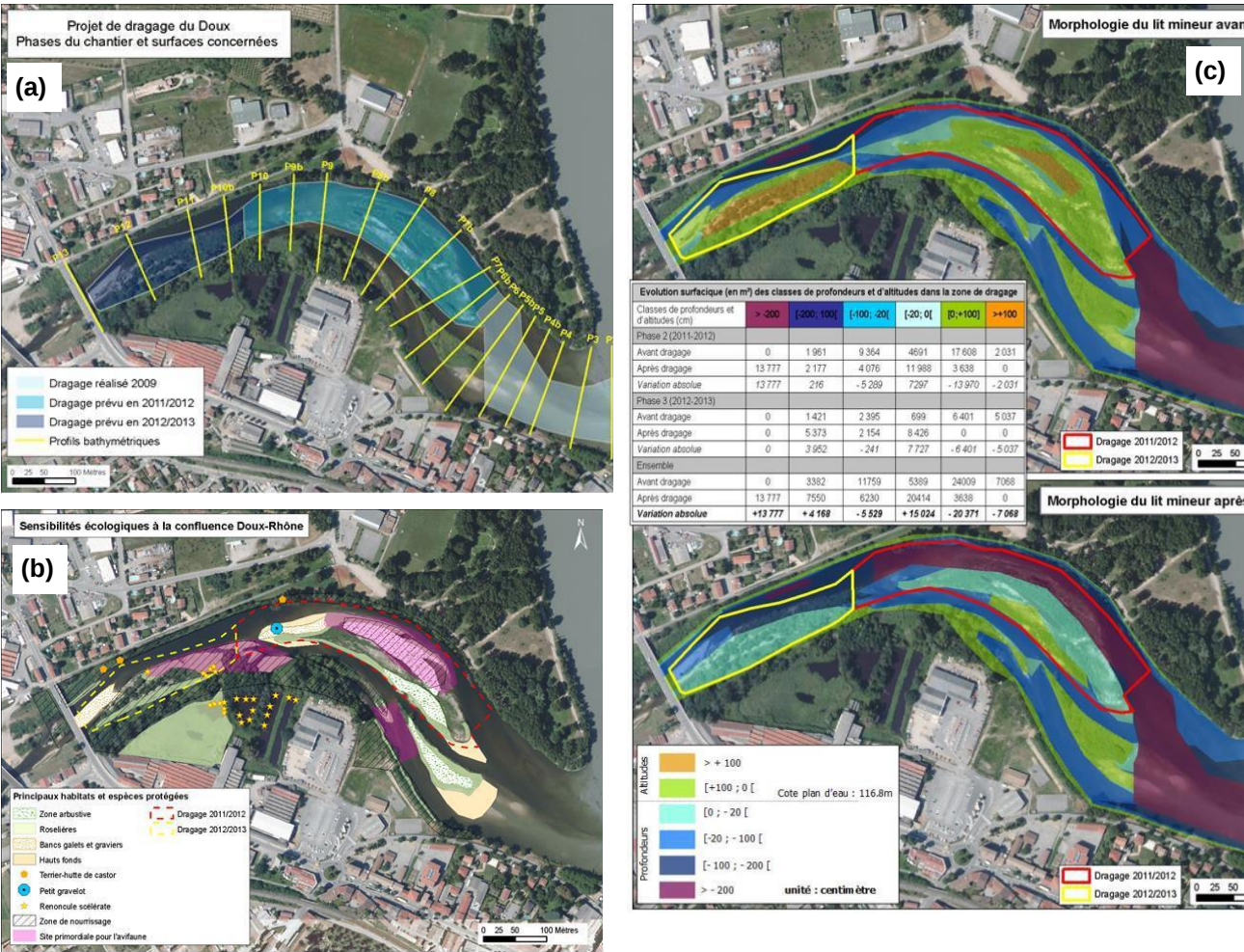


Figure 3 : (a) Projet de dragage 2011-2013, (b) sensibilités écologiques, (c) évolutions bathymétriques du lit mineur avant et après dragage à la confluence du Doux (CNR, 2016, conférence SHF)

UHC	Secteur	Masse d'eau	ID	UHC	Code PGOD CNR	TH	Localisati on_Pkaval	Année min	Année max	Motif SDGS	Localisation SDGS	Mode	Devenir des matériaux	MOA	Nombre d'opérations 1995-2018	Période de retour SDGS	Granulo- uétrie	Niveau d'action N1, N2, N3, N4	VOLUME GROSSIERS réalisé (m³) Cumul 1995- 2018	VOLUME LIMONS réalisé (m³) Cumul 1995- 2018	VOLUME TOTAL réalisé (m³) Cumul 1995- 2018
4	I	FRDR2000	G1-G3_USSES	SEYSEL	2	R	-152,0	1997	2011	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	DA+PCA	RH	CNR	8	1-3 ans	M	3	85 300	114 500	199 800
5	II	FRDR2001	G3_CHENAL_NAVIGABLE_LOI	CHAUTAGNE	-	RT	-136,7	2011	2011	Navigation (N)	Chenal navigable	DA	RE	CNR	1	> 10 ans	G	3	14 900	0	14 900
6	II	FRDR2001	G3_CHENAL_NAVIGABLE_VIONS	BELLEY	-	R	-133,8	2011	2018	Navigation (N)	Chenal navigable	DA	RH	CNR	3	4-10 ans	G	3	43 729	0	43 729
7	II	FRDR2001	G3_RETENUE_PEYRIEU	BREGNIER CORDON	-	R	-109,8	2011	2017	Navigation (N)	Retenue, queue de retenue	PCL	RH	CNR	2	> 10 ans	G	3	26 190	0	26 190
11	III	FRDR2006	G1-G3_YZERON	PIERRE BENITE	3	R	1,4	1997	2018	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	DA + PCA + PCL	RH	CNR	11	1-3 ans	M	3	5 825	90 360	96 184
12	III	FRDR2006	G1-G3_GARON	VAUGRIS	10	R	17,8	1995	2008	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	DA+PCL	RH	CNR	4	4-10 ans	M	3	2 360	9 772	12 132
12	III	FRDR2006	G1-G3_GIER	VAUGRIS	11	R	18,3	2003	2015	Navigation (N)	Confluence, diffluence	PCL	RH	CNR	5	4-10 ans	M	3	64 500	3 500	68 000
12	III	FRDR2006	G1-G3_SEVENNE	VAUGRIS	14	R	27,6	1996	2015	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	PCL	RH	CNR	10	1-3 ans	M	3	14 885	24 422	39 307
12	III	FRDR2006	G1-G3_GERE	VAUGRIS	16	R	28,6	1997	2018	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	DA + PCL	RH	CNR	11	1-3 ans	M	3	50 184	28 991	79 175
13	IV	FRDR2006	G1-G3_VAREZE	EAGE DE ROUSSILLO	26	R	46,0	2001	2005	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	DA	RH	CNR	2	> 10 ans	M	3	17 400	17 800	35 200
14	IV	FRDR2006	G1-G3_BANCEL	SAINT VALLIER	37	R	69,5	1998	2014	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	DA + PCL	RH	CNR	6	4-10 ans	M	3	24 383	53 476	77 859
14	IV	FRDR2006	G1-G3_CANCE	SAINT VALLIER	40	R	73,1	1995	2016	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	DA	RH	CNR	8	1-3 ans	M	3	95 595	42 880	138 475
14	IV	FRDR2006	G1-G3_GALAURE	SAINT VALLIER	43	R	76,4	1996	2017	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	DA + PCL + PC	RH	CNR	12	1-3 ans	M	3	97 648	205 050	302 698
15	IV	FRDR2006	G1-G3_DOUX	BOURG LES VALENCE	50	R	90,3	1999	2012	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	PCL	RH	CNR	5	4-10 ans	M	3	65 997	65 262	131 259
15	IV	FRDR2007A	G1-G3_MIALAN	BOURG LES VALENCE	57	RCC-L	108,0	1995	2016	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	PCL	RH	CNR	7	1-3 ans	M	3	39 174	12 337	51 511
16	V	FRDR2007	G1-G3_EYRIEUX	BEAUCHASTEL	67	R	126,4	1995	2008	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	PCL	DE	CNR	8	1-3 ans	M	3	219 539	17 290	236 829
17	V	FRDR2007	G1-G3_PIEGE_GRAVIER_DROME	BAIX LE LOGIS NEUF	-	R	131,0	1996	2016	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	PCA	DE-RE	CNR	3	4-10 ans	M	3	325 450	37 950	363 400
17	V	FRDR2007	G1-G3_DROME	BAIX LE LOGIS NEUF	69	R	131,4	1995	2017	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	DA	RH	CNR	9	1-3 ans	M	3	146 350	615 970	762 320
17	V	FRDR2007	G1-G3_OUVEZE	BAIX LE LOGIS NEUF	70	R	133,7	1996	2015	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	DA	RH	CNR	7	1-3 ans	M	3	28 862	128 772	157 634
18	V	FRDR2007	G3_ROUBION_AMONT	MONTELMAR	-	CU	157,0	1998	2014	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	AM	RH	CNR	3	4-10 ans	G	3	51 561	0	51 561
18	V	FRDR2007D	G1-G3_CHENAL_NAVIGABLE_LAFARGE	MONTELMAR	85	RCC-L	164,2	1996	2016	Navigation (N)	Chenal navigable	PCL	RH	CNR	11	1-3 ans	M	3	141 229	27 123	168 352
18	V	FRDR2007D	G3_ESCOUTAY	MONTELMAR	88	RCC-L	165,5	1995	1999	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	-	-	CNR	3	4-10 ans	G	3	44 600	0	44 600
19	V	FRDR2007E	G3_PONT_SAINT_ESPRIT	ONZERE MONDRAGO	101	RCC-C	193,5	1995	2007	Sécurité inondation (I)	Bande active de Vieux Rhône	PCL	RH	CNR	6	4-10 ans	G	3	138 680	0	138 680
20	VI	FRDR2007	G1-G3_CEZE	CADEROUSSE	105	RCC-C	213,5	1999	2018	Sécurité inondation (I)	Confluence, diffluence	DA	RH	CNR	3	4-10 ans	M	3	103 346	125 852	229 198
22	VI	FRDR2008	G1-G3_DURANCE	VALLABREGUES	126	R	248,0	1995	2017	Sûreté ouvrages classés (S)	Confluence, diffluence	DA + PCL	RH	CNR	5	4-10 ans	M	3	142 900	1 199 800	1 342 700
23	VI	FRDR2009	G1-G3_CHENAL_NAVIGABLE_DEFLUENT	PALIER D'ARLES	136	RT	278,6	1995	2018	Navigation (N)	Chenal navigable	PCL	RH	CNR	38	1-3 ans	M	3	1 178 640	18 612	1 197 252

3.3 Les restitutions de sédiments grossiers (G4)

Les restitutions de sédiments grossiers en retenue font l’objet d’une fiche action G4.

Ces restitutions répondent à la réglementation de remise au fleuve de sédiments dragués. Les gains écologiques ne sont cependant pas optimisés puisque des sédiments grossiers clapés en fond de retenue seront rapidement recouverts de sédiments fins et ne pourront offrir une diversité de substrat.

Les matériaux utilisés dans les actions G4 ont vocation à être réinjectés en RCC (R1) ou à être utilisés pour la restauration de hauts fonds (R7).

3.4 Les chasses et mise en transparence (G5, G6)

Les chasses et mise en transparence font l’objet des fiches actions G5 et G6.

La définition de ces termes a été développées en Mission 6. Les principales distinctions sont données dans le tableau ci-dessous

Tableau 11 : Distinction entre les actions-clés de chasse (G5) et de mise en transparence (G6)

Action-clé	Chasse de retenue (G5)	Mise en transparence de barrage (G6)
Terme anglophone	Environmentally friendly flushing (Verbois) ou flow-conditioned flushing (Basse Isère)	Sluicing (sédiments fins) Bed drift (sédiments grossiers) ¹
Exemples sur le Rhône	Verbois, Basse Isère Pour Verbois, avant 2016, le terme strict « flushing » pouvait être utilisé du fait d'un abaissement complet de la retenue. Depuis 2016, les APAVER produisent un abaissement partiel de la retenue et conduisent plutôt à réaliser un « environmentally friendly flushing »	Chancy-Pougny, Génissiat, Seyssel tel que pratiqué depuis les années 1980 et conforté depuis 2016 dans le cadre des APAVER
Principaux objectifs	Déstockage de sédiments accumulés dans la retenue. La concentration en sédiments aval est supérieure à la concentration en sédiments amont Cs aval >> Cs amont	Les flux de sédiments provenant sont transités vers l'aval. La concentration en sédiments aval est équivalente à la concentration en sédiments amont Cs aval ≈ Cs amont
Conditions nécessaires	Opération qui doit coïncider avec des hautes eaux pour que le déstockage de l'ouvrage amont soit effectif, mais qui doit éviter des apports sédimentaires liées à une crue pendant l'événement de chasse	L'abaissement de la ligne d'eau doit être suffisant pour générer une pente de transit et une mobilité des sédiments
Granulométrie considérée sur le Rhône	Verbois : sables grossiers, fines Basse Isère : sables	Chancy-Pougny : sables grossiers, voire graviers (Allondon, Laire) Génissiat : sables fins Seyssel : sables fins pour les apports de Génissiat ; graviers des Usses dont la confluence est située à proximité du barrage L'action « bed drift » pour sédiments grossiers n'est pas réalisée sur le Rhône. Elle est cependant envisagée dans le Scénario 3 qui suit

3.4.1 Bilan APAVER 2021 et perspectives

Le bilan de l'APAVER 2021 et de son accompagnement sur le Haut-Rhône français a été fourni dans un diaporama de fin d’année 2021 dans l’attente d'un bilan plus complet à mi 2022.

- Les principales conclusions sont les suivantes :
- Les équipements de mesure de MES (et autres paramètres) en continu sont fiables (FR et CH) ;
 - Le déstockage de Verbois est considéré satisfaisant (1.2 hm³ < 1.5 hm³) :
 - Le débit de dimensionnement à la frontière CH/F de 550 m³/s est trop optimiste et doit être revu à la baisse pour les opérations futures ;
 - La limite d'abaissement à -12 mètres ne permet vraisemblablement pas de pouvoir déstocker des quantités plus importantes (résultat très similaire à celui de 2016) ;
 - Le niveau de comblement de la retenue de Verbois, estimé provisoirement à 3,13 hm³, permet de disposer d'une marge suffisante jusqu'à la prochaine opération (2024 ou 2025).
 - La concentration moyenne de MES pendant l'opération est de 3,47 g/l à Pougny et 3,65 g/l à Seyssel, soit bien inférieure au seuil de 5 g/l ;
 - Le seuil de 15 g/l a été dépassé pendant 43 minutes à Pougny, soit 13 minutes de plus que le protocole prévu ;
 - Le bilan environnemental est en cours d'analyse. On peut déjà noter :
 - SIG-SFMCP : résultats suivis très similaires à 2016, quelques améliorations en cours, résultats définitifs au prochain CSE ;
 - SIG-SFMCP et CNR : Une bonne réalisation des pêches de sauvetage ;
 - CNR : Des conditions de maintien de la vie aquatique dans les 3 vieux Rhône pendant l'opération ;
 - CNR : Un impact sanitaire nul sur la qualité de l'eau potable ;
 - CNR : MAIS des impacts possibles post-APAVER sur les populations piscicoles : effets conjugués APAVER et crue de juillet 2021.

Les orientations envisagées en tirant les enseignements du REX de 2021, pour le secteur en aval de Génissiat, sont les suivants :

- Optimisation de la gestion des Vieux-Rhône :
 - Chercher à maintenir une alimentation permanente du Vieux-Rhône de Chautagne pendant toute la durée de l'APAVER sous la supervision du Comité Décisionnel Environnemental ;
 - Chercher à optimiser la gestion des apports naturels du Lac du Bourget pendant l'opération pour maximiser le débit d'alimentation du Vieux-Rhône de Belley (en veillant aux activités sur le canal) ;
- Maintenir une forte réactivité en cas de piégeage et de mise en danger de poissons, et étendre la surveillance et la possibilité d'intervenir sur la retenue de Sault-Brénaz au moment de l'abaissement
- Confirmation de l'automatisation partielle des suivis :
 - Concentrations en MES avec les appareils Coriolis ;
 - Suivis environnementaux avec des sondes physico-chimiques ;
- Intégration de l'événement APAVER dans une vision de la trajectoire du fonctionnement écologique du Rhône en remplaçant les données des suivis des différentes opérations dans une chronique de suivis long terme ;
- Mieux relativiser les effets des opérations de gestion sédimentaire et ceux d'autres événements avec une variabilité hydro-climatique.

¹ Terminologie d’après Habersack et al. (2019)

Les conclusions en termes de gestion apportées sont les suivantes

- Les procédures de gestion environnementale au cours de l'APAVR s'enrichissent au fil des expériences :
 - conduisant à une réduction importante des risques lors des opérations ;
 - guidées par les observations de terrain ;
- Les effets des événements exceptionnels, en particulier les crues à des périodes « critiques » pour le fonctionnement écologique du fleuve, ne peuvent évidemment pas faire l'objet de procédures de gestion particulières et doivent être considérés comme des perturbations aléatoires et imprévisibles :
 - dont les effets, conjugués aux impacts des opérations APAVER, sont mis en évidence par les suivis ;
 - seule une analyse de la variabilité de paramètres physiques et écologiques du fleuve sur le long terme peut permettre d'évaluer l'impact de tels événements et la résilience du fleuve ;
- Dans le cadre de l'article 23 de l'AIP de 2016 prévoyant une amélioration en continu des mesures d'impact et de suivi, CNR et SFMCP porteront des demandes d'adaptations en vue des prochaines opérations :
 - dont pour CNR le relèvement du seuil de taux de MES en amont du barrage de Motz et le renforcement des suivis sur site, suite au REX 2021.

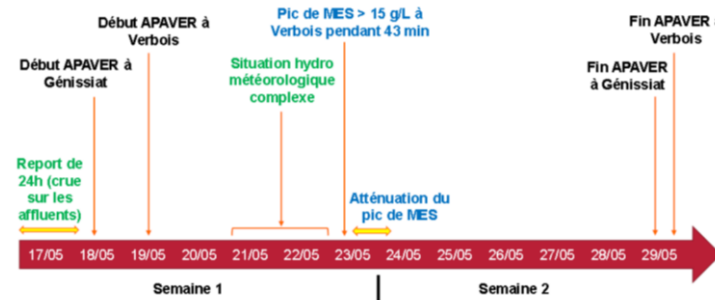


Figure 4 : Frise chronologique de l'APAVR 2021

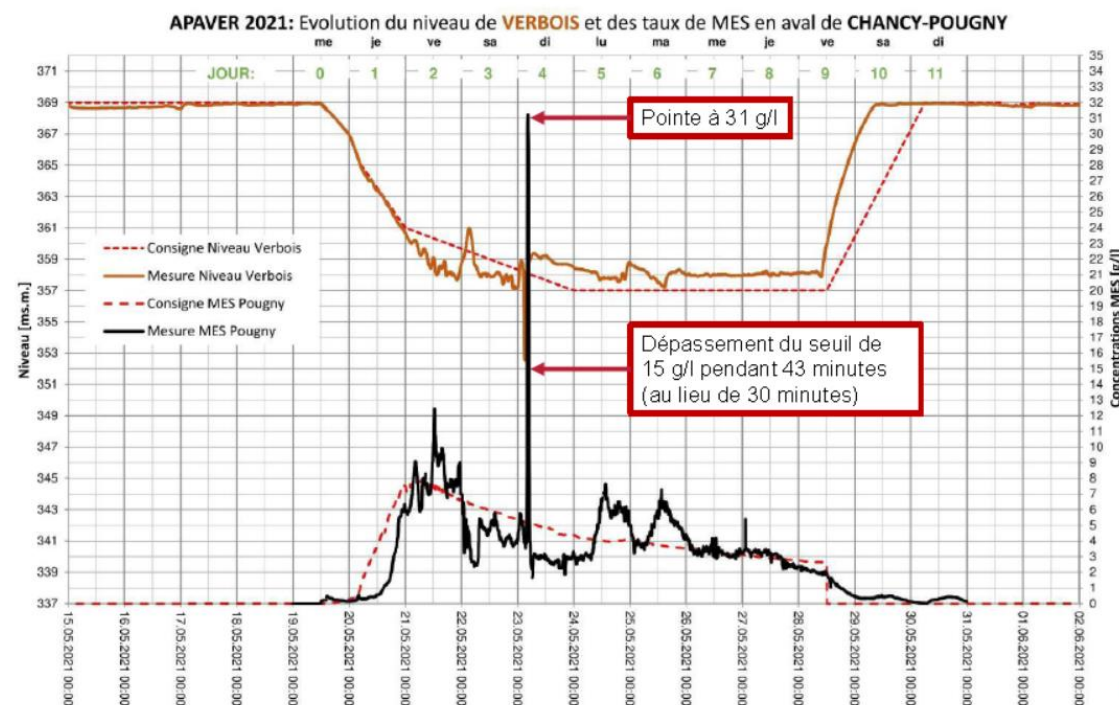


Figure 5 : Evolution du niveau de Verbois et des taux de MES en aval de Chancy-Pougny

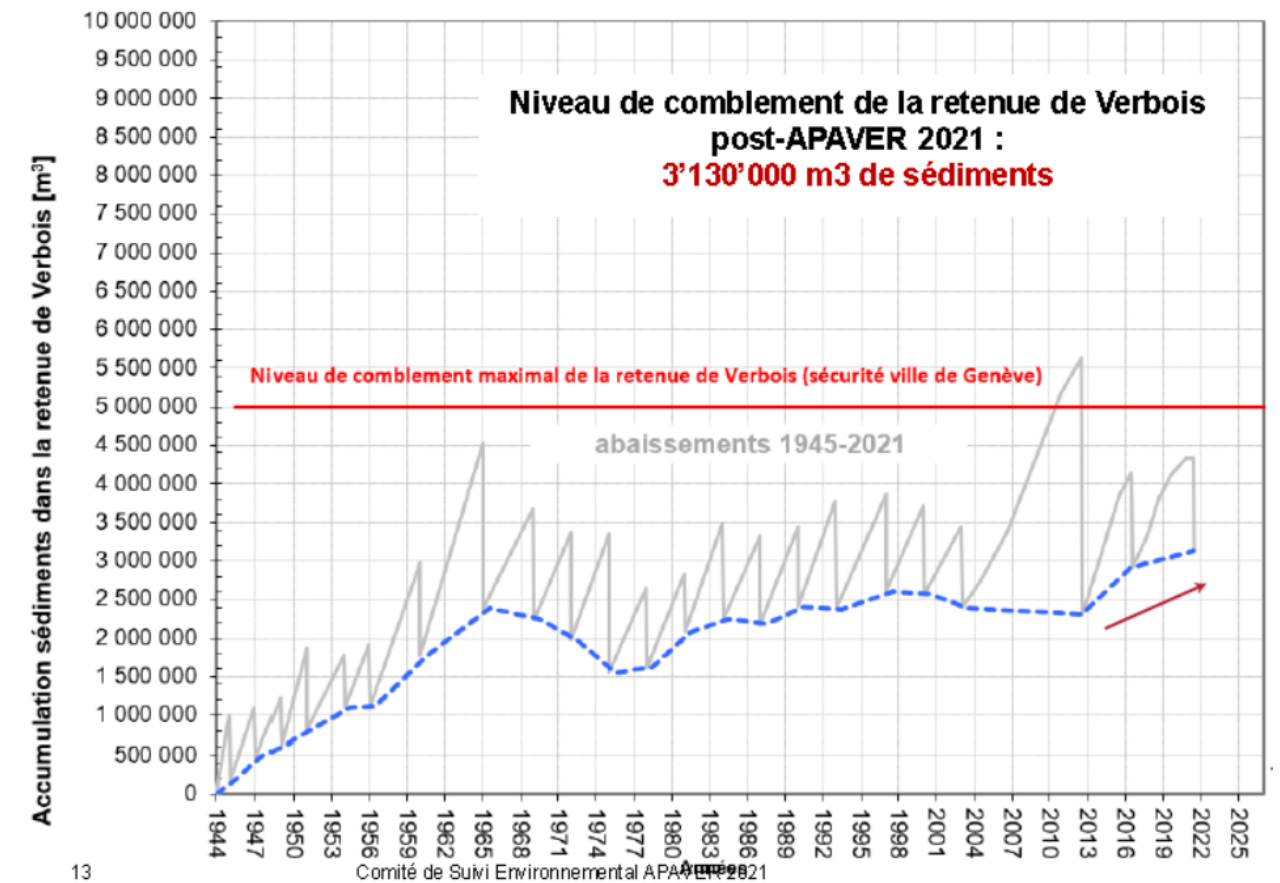


Figure 6 : Bilan du comblement de la retenue de Verbois, stabilisé à 3,1 hm³ après l'APAVR 2021

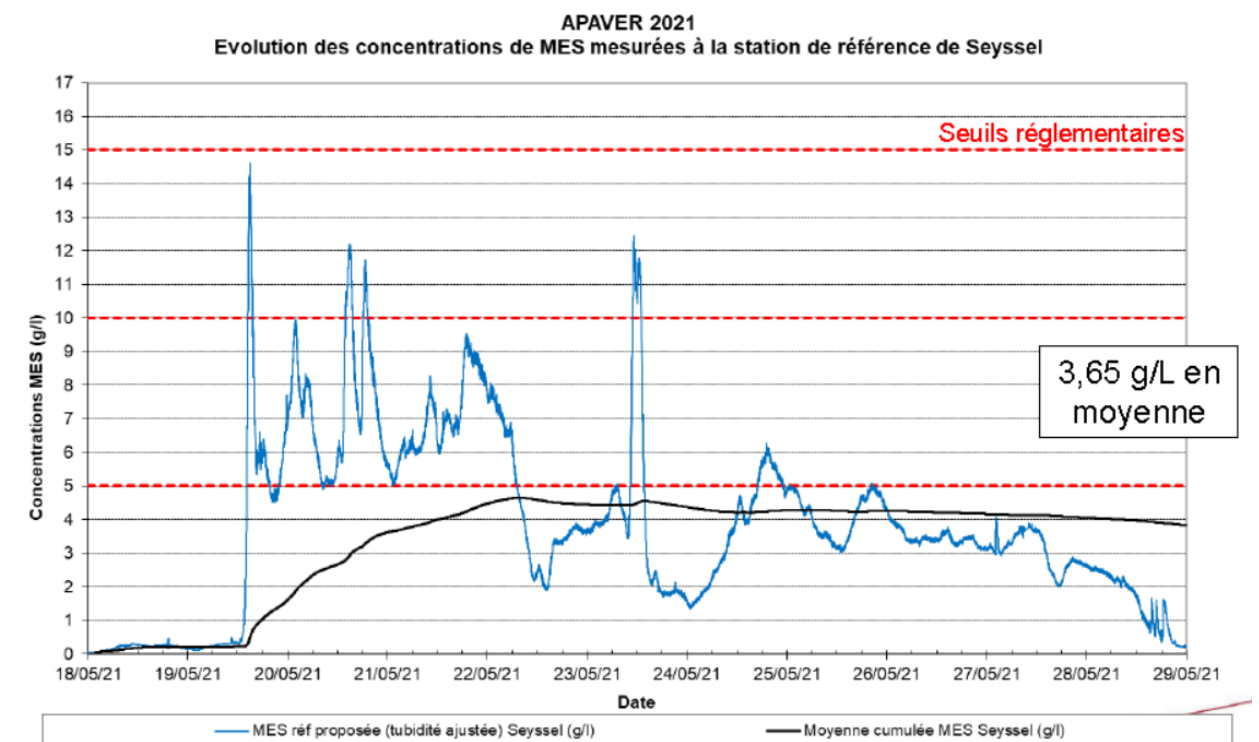


Figure 7 : Evolution des concentrations de MES mesurées à la station de référence de Seyssel

3.4.2 Bilan de la chasse 2021 de la Basse Isère et perspectives

EDF et CNR ont établi en 2018 un document conjoint faisant état des pratiques historiques et des pistes d'améliorations à apporter (cf. rapport de Mission 4 et fiche UHC#15-BLV).

Depuis des étapes d'analyse, avec modélisation hydrosédimentaire, ont été menées sur les possibilités d'accompagnement des ouvrages CNR, notamment en termes d'abaissement des lignes d'eau en aval de la confluence. Par ailleurs, une chasse a été menée en 2018 et une autre en janvier 2021.

► REX de la chasse de 2021

Le dernier livrable technique en vigueur reste celui de 2018 (CNR-EDF). L'objectif principal du protocole consiste à détendre les conditions d'entrée en chasse, notamment en autorisant le démarrage des chasses lors des montée de crue et non plus seulement lors des décrues (qui visaient à ne pas créer de sur-débit).

En 2018, la chasse n'a pas porté sur Beauvoir.

En temps normal, les flux sont composés de limons et d'argiles, en temps de chasse, les flux sont composés de limons et de sables (200 à 500 µm).

Avant 2021, l'état des retenues montrait que 50% des volumes étaient stockés dans Beauvoir et que 50% des volumes étaient globalement sableux.

La chasse de 2021 a eu lieu du 30/01 au 3/02. L'Isère a toujours été supérieure à 400 m³/s, avec une entrée à 700 m³/s. Le débit max a été de 902 m³/s (proche de Q2). L'ordre d'ouverture des barrages a été Lavalette, Pizançon, Beaumont-Monteux, St-Hilaire, Beauvoir. L'ouverture de Beauvoir a été limitée en temps.

Les flux transités sont estimés à 2,872 Mt de MES, ce qui en fait la troisième chasse historique. Dans le détail, on quantifie 1,7 Mt de sables et 1,9 Mt de fines (la différence s'explique par les sables qui ne sont pas mesurés dans les MES).

► Les perspectives à retenir pour l'avenir

La chasse de 2021 a permis de confirmer la faisabilité du nouveau protocole. Les perspectives de poursuite des améliorations des chasses de la Basse Isère tiennent essentiellement en deux points :

- Augmenter la fréquence des chasses sur les ouvrages de la Basse Isère (EDF) ;
 - Jusqu'à présent, une entrée en chasse était contrainte par une condition de débit (900 m³/s en pointe) et une condition de réalisation en phase de décrue, de façon à éviter tout risque de sur-débit ;
 - Maintenant, le débit minimal est de 700 m³/s et permet d'offrir plusieurs jours de visibilité
- Améliorer l'accompagnement des chasses par CNR ;
 - Du débit dans le Rhône (2000 m³/s au minimum) au PK102 (Isère + Rhône), sachant que le débit turbinable maximal est de 2300 m³/s à l'usine de Bourg les Valence.
 - Nécessité d'affiner avec modèle 3D et scénarios de gestion des ouvrages. Plusieurs scénarios ont été étudiés et comprennent : abaissement du plan d'eau, ouverture du barrage Isère, combinaison, etc.

Un arrêté en cours de validation (version 9). L'accompagnement CNR reste à définir ; il dépend d'analyses à mener sur efficacité, impacts, coûts, notamment sur navigation dans le canal et hydroélectricité. L'arrêté prévoit des mesures de suivi d'évolution des fonds en temps réel, avec des critères d'arrêt des chasses en cas de non-respect des sections d'écoulement sur différents profils

Par la suite un protocole d'accord entre EDF et CNR (seuils, organisation, etc.) sera établi. Dans l'attente de l'arrêté, la consigne existante s'applique, avec un protocole annuel entre EDF et CNR. Lors de la chasse de 2021, c'est un régime juridique d'urgence qui a été mis en œuvre et qui a permis de tester les nouvelles modalités.

3.4.3 Existe-t-il un intérêt et une faisabilité pour réaliser des chasses ailleurs sur le Rhône ?

En 2014, Kondolf écrivait :

« Un exemple notable de gestion de barrages en série est l'exploitation de 19 barrages sur le Rhône depuis le Frontière suisse vers la mer Méditerranée, dont l'exploitation est coordonnée par la Compagnie Nationale du Rhône avec deux barrages en amont en Suisse. A l'exception du barrage de Genissiat sur le Haut Rhône, tous sont des barrages au fil de l'eau qui fonctionnent en court-circuitant « l'ancienne rivière » avec un canal rectiligne, laissant méandres abandonnés aux débits fortement réduits, dont certains ont été le siège de efforts de restauration. Avec la disponibilité de stockage dans le lac Léman, les sédiments sont gérés dans les réservoirs et canaux du Haut Rhône par chasse, de sorte que l'ouverture des vannes soit coordonnée de barrage en barrage au fur et à mesure qu'une impulsion se déplace vers l'aval. Cependant, sur le Bas-Rhône, le stockage fait défaut, et alors qu'il serait théoriquement possible de coordonner les chasses avec des apports élevés d'affluents, les perturbations de la navigation doivent être organisées un an à l'avance, de sorte que les chasses n'est pas tenté, et à la place, les sédiments sont enlevés mécaniquement. »

En 2020, CNR répondait à une demande des services d'Etat dans le cadre d'un complément à une fiche d'incidences de dragage

« Les services de l'état s'interrogent sur la faisabilité de déposer les sédiments dragués en amont d'un barrage évacuateur de crue d'une retenue et de réaliser des chasses hydrauliques qui permettraient le transit en aval du barrage. La chasse hydraulique consiste à abaisser le niveau de la retenue en ouvrant les vannes du barrage évacuateur de crue ou la vanne de fond. Ces pratiques sont mises en place sur le Rhône à Verbois par les Services Industriel de Genève (CNR accompagne ces Abaissements PARTiels de VERbois sur le haut Rhône français) et sur la basse Isère par EDF. Les APAVER sont programmés 10 mois à l'avance, à une date fixe grâce au lac Lemman qui constitue une réserve en eau disponible permettant de maintenir un débit suffisant pendant les 10 jours que durent ces opérations. Sur l'Isère, EDF profite des crues de l'Isère pour obtenir les débits suffisants à la réalisation de ses chasses.

Compte tenu de l'absence de réservoir en eau pour soutenir un débit suffisant sur le Rhône en aval de Lyon, la réalisation de chasses sur les retenues du Rhône devrait se faire pendant une petite crue du Rhône. Comme pour l'Isère, il serait nécessaire que la crue du Rhône reste modérée (pour limiter les dépôts sédimentaires dans les champs d'inondation) et qu'elle se maintienne suffisamment longtemps (plusieurs jours) pour qu'elle soit efficace. De tels événements hydrologiques sont anticipables une semaine à l'avance environ par les services de prévision météorologiques de CNR.

L'abaissement du plan d'eau de la retenue doit être de plusieurs mètres en amont du barrage évacuateur de crue. Seul l'amont de la retenue conserverait un mouillage suffisant pour permettre la navigation. La navigation devrait être arrêtée ainsi que tous les usages liés à une cote de plan d'eau normal, comme par exemple les prélèvements d'eau (industriels, centrales nucléaires, agricoles, etc.).

Le délai d'anticipation d'une semaine maximum est très faible pour organiser une adaptation des usages du Rhône. Par exemple, concernant l'usage navigation, des arrêts annuels sont programmés plus d'un an et demi à l'avance avec les acteurs de cette activité (administration, marins, industriels se fournissant depuis la voie d'eau). »

Ainsi, il est globalement complexe d'envisager des chasses sur d'autres barrages. Cependant, la question peut se poser sur des retenues qui accumulent systématiquement des matériaux, et sont dans l'impossibilité de les évacuer gravitairement lors des manœuvres habituelles du barrage de retenue. Sont notamment ciblées les retenues du Haut-Rhône (Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon, Sault-Brénaz) qui présentent une tendance forte à la sédimentation pendant ou après les APAVER, ainsi que certaines retenues du bas Rhône comme Beauchastel ou Caderousse.

La stratégie proposée en Mission 7 suggère que soit analysée la faisabilité, en comparatif avec des dragages, de la réalisation de chasses ou mises en transparence lors de crue sur des retenues sensibles à la sédimentation. A ce stade, sont bien considérés les sédiments fins et sableux. Pour le transit des matériaux grossiers, éventuellement après clapage en amont du barrage de retenue, il s'agit d'un autre sujet qui doit être étudié également pour optimiser les conditions de restitutions de sédiments grossiers dans les RCC (R1).

3.5 Le charruage (G12)

Le charruage fait l'objet d'une fiche action G12.

Pour rappel, le charruage (ou scarification) consiste à passer une herse sur des bancs alluviaux peu végétalisés de façon à limiter le développement de la végétation ligneuse et permettre la remobilisation des fines en surface du banc, voire des sédiments grossiers si ceux-ci sont également en accumulation. Cette opération vise à mimer les effets naturels des crues morphogènes qui permettent d'entretenir ces milieux.

Le charruage peut avoir des effets bénéfiques importants pour les communautés végétales car il ramène la succession végétale au stade le plus pionnier, stade qui s'avère le plus rare sur le Rhône du fait de la faible fréquence des crues morphogènes (Vautier, Perry & Girel, 2002 ; Janssen 2019, Janssen et al. 2021). Il permet de restaurer la dynamique géomorphologique (processus d'érosion et de dépôt), favorise un auto entretien du chenal, augmente la diversité écologique par rajeunissement des communautés végétales et permet ainsi le départ de nouvelles séquences de succession typiques des milieux alluviaux (Vautier, Perry & Girel, 2002).

Le charruage peut également avoir des effets néfastes dès lors qu'il n'est pas fait dans de bonnes conditions : période d'intervention inappropriée car il peut détruire des espèces patrimoniales (faune-flore) ou faciliter et favoriser la propagation d'espèces exotiques envahissantes par éparpillement de ces dernières. Là encore, un diagnostic écologique initial habitats faune flore est toujours nécessaire avant intervention.

A noter, qu'en privilégiant le charruage uniquement, on risque de voir sur certains secteurs des milieux pionniers côtoyer des milieux boisés (forêts alluviales) sans stade de transition arbustifs ou herbacés. Or, à chaque stade de végétation, une communauté végétale peut avoir un intérêt écologique plus ou moins marqué et peut abriter des espèces végétales et animales patrimoniales. Certaines communautés végétales pouvant être considérées comme plus patrimoniales que d'autres essentiellement parce qu'elles sont plus rares, elles peuvent abriter aussi des espèces d'intérêt ce qui est le cas des milieux pionniers. Outre favoriser les milieux d'intérêt tels que les milieux pionniers, ce qui est important c'est la mosaïque spatiale et temporelle d'habitats considérés à l'échelle d'un tronçon. Il peut donc être intéressant en procédant à des actions de charruage de travailler sur des surfaces différentes dans le temps (gestion différenciée) de manière à laisser évoluer un peu plus longtemps les secteurs les moins proches du lit mineur que les autres de manière à avoir une gradation des strates et des communautés végétales.

Lorsqu'il n'y a pas d'apport de sédiments amont, le bénéfice du charruage est limité au niveau des processus d'érosion-dépôt. Cependant, il possède une action régénératrice tout de même sur les communautés végétales surtout si les bancs sont inondés une partie de l'année car le milieu (le banc) bien que non renouvelé dans sa forme le sera au niveau des communautés végétales par l'apport de semences et plantules et le développement d'une végétation pionnière. Il s'agit ici d'une gestion de la végétation dans un but hydraulique et écologique pour ces communautés végétales même si la remobilisation des sédiments est limitée.

Le charruage est donc une action qui peut s'avérer utile dans certaines conditions et sous certaines conditions. Deux objectifs principaux sont associés :

- remobilisation des sédiments des bancs, des communautés végétales et limitation du risque inondation ;
- rajeunissement des communautés végétales et limitation du risque inondation sans mobilisation des sédiments ;

Les conditions nécessaires pour une bonne mise en œuvre du charruage sont les suivantes :

- nécessité d'un diagnostic écologique des bancs a minima, d'un plan de gestion pluriannuel idéalement ;
- nécessité d'intervenir en dehors des périodes de reproduction de la faune ;
- nécessité dans les RCC déficitaires en sédiments d'accompagner le charruage d'une réinjection sédimentaire ;

Dans le cadre de la mise en œuvre d'actions de restauration structurantes, comme les actions de réinjection sédimentaire (R1), éventuellement couplées avec des débits morphogènes (R11), ou comme la restauration de la bande active (R3) qui amène à remodeler les formes alluviales (et à abaisser les bancs actuellement perchés), les actions de charruage ont vocation à être abandonnées pour plus d'autonomie de la rivière.

Ainsi, la gestion future des bancs de sédiments sera à adapter aux actions de restauration qui auront été menées et aux processus de dynamiques fluviales restaurés.

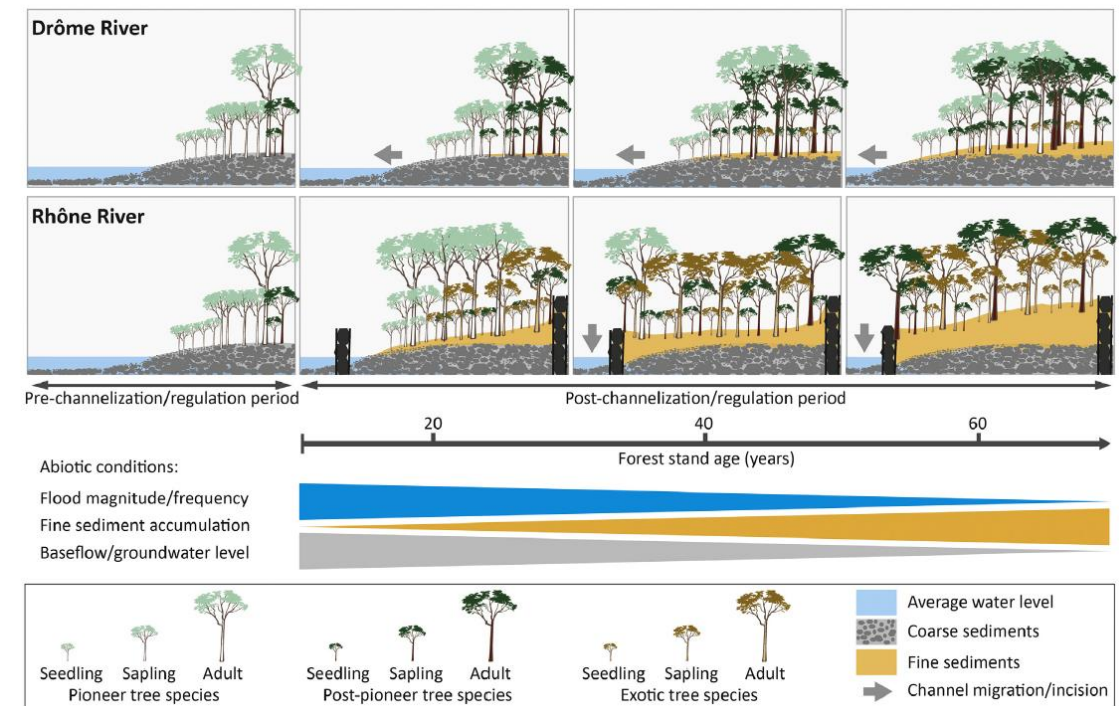


Figure 8 : Evolution de la végétation des bancs en fonction des conditions pédologiques et historiques (Janssen, 2020)



Engin TP avec cover-crop



Cover-crop utilisé pour Chautagne



Figure 9 : Engins utilisés et exemple de banc perché charrué (RCC de Montélimar ; ARALEP)

3.6 L'essartage (G13)

L'essartage fait l'objet d'une fiche action G13.

L'essartage vise à intervenir sur la végétation des bancs pour conserver une strate herbacée et limiter le développement arbustif et arborescent qui conduirait à diminuer la capacité hydraulique.

Il a été démontré que ces actions d'essartage peuvent être bénéfiques pour les communautés végétales notamment dans le ralentissement de l'évolution naturelle des communautés végétales. Pour rappel, l'évolution naturelle des communautés végétales suit une trajectoire d'évolution dénommée « dynamique végétale ». Cette action est souvent limitée dans le temps (2-3 ans) car elle n'a aucune conséquence sur la stabilité des bancs latéraux boisés. Les processus d'érosion sont négligeables, les berges étant protégées par le système racinaire et les souches des arbres demeurées en place ; la végétation ligneuse se réinstalle très rapidement par de vigoureux rejets de souche et, en moins de deux ans, une brousse épaisse et haute de plus de 3 mètres peut recouvrir à nouveau l'intégralité de la surface des bancs. La colonisation est d'autant plus marquée que la végétation se densifie fortement par bouturage naturel à partir des résidus de broyage ; les processus de sédimentation fine en période de crue en sont accélérés. Ce fort dynamisme enlève tout caractère durable aux travaux d'entretien (Vautier, Perry & Girel, 2002) et limite l'intérêt de ce type de gestion.

Certains casiers s'assèchent ou s'atterrissent par aggradation de sédiments fins. Ceci est propice à la maturation des boisements de berges ainsi qu'à la propagation d'espèces ligneuse non- endémiques. Ces conditions sont également favorables, à terme, au développement des Acer Negundo. Inversement, en cas d'une intervention, des espèces comme le robinier faux-acacia (*Robinia pseudoacacia*), pourraient potentiellement coloniser rapidement de nouveaux espaces. Etant plutôt sur le déclin dans les conditions actuelles vers des stades post-pionniers, ils pourraient se rétablir, en particulier si, dans le même temps les conditions défavorisent des espèces pionnières endogènes (Räpple, 2018).

L'essartage peut également avoir des effets néfastes dès lors qu'il n'est pas fait dans de bonnes conditions : période d'intervention inappropriée car il peut détruire des espèces patrimoniales ou faciliter et favoriser la propagation d'espèces exotiques envahissantes soit par éparpillement de ces dernières dans la mesure ou leurs propagules peuvent être transportées d'un banc à l'autre par des engins de chantier et peuvent coloniser rapidement les espaces sableux ouverts peu inondables, soit en facilitant les espèces rejetant facilement à partir des souches ou de racines traçantes (en particulier *Robinia pseudoacacia*) (Vautier, Perry & Girel, 2002). Un diagnostic écologique initial habitats faune flore est toujours nécessaire avant intervention.

En conclusion, l'essartement simple se traduit par la fixation des processus géomorphologiques et le développement rapide de la végétation. Celle-ci tend également à se densifier avec pour conséquence l'augmentation des processus de sédimentation fine et l'exhaussement des bancs. Une perte de diversité biologique s'en suit de même que l'installation d'espèces exotiques (Vautier, Perry & Girel, 2002) et dès lors, il est difficile de proposer cette action sans la réalisation d'un charriage complémentaire.

Comme pour le charriage, les actions d'essartage devraient pouvoir être limitée à l'avenir grâce à des actions de restauration permettant plus de résilience au système alluvial : suite à actions de réinjection sédimentaire (R1), éventuellement couplées avec des débits morphogènes (R11), ou suite à la restauration de la bande active (R3) qui amène à remodeler les formes alluviales (et à abaisser les bancs actuellement perchés).



Figure 10 : Exemples d'engin utilisé pour l'essartage (tracteur forestier avec broyeur à l'avant)

4. Comment imaginer des solutions innovantes de gestion ?

4.1 Amélioration d'infrastructures pour éviter/limiter les dépôts (G8)

Les dragages sont menés dans des zones où les sédiments s'accumulent (garage d'écluse, queue de retenue, etc.). Dans certaines conditions, il peut exister des moyens pour éviter les dépôts, ou tout au moins réduire leur importance et la fréquence des interventions.

Pour qu'une solution soit satisfaisante, il faut toutefois que l'analyse coût / bénéfice soit favorable, c'est-à-dire que l'investissement d'infrastructure à réaliser ne soit pas disproportionné par rapport aux coûts d'entretien actuels. Cela peut conduire ainsi à viser des sites pour lesquels les coûts d'entretien sont élevés. Par exemple, le garage d'écluse amont de Bourg-lès-Valence a conduit entre 1995 et 2018 à environ 3,5 M€ de frais d'entretien soit 150 000 €/an. Pour un tel site, sous réserve de la position de l'exploitant, on pourrait imaginer qu'un investissement de 1 à 1,5 M€ (amortissement sur moins de 10 ans) soit satisfaisant.

La proposition d'action-clé G8 invite à ce que sur chaque site de dragage, ou tout au moins que les sites les plus récurrents et aux volumes les plus importants, soit menée une approche simplifiée afin d'envisager une modification d'infrastructure qui permettrait de limiter les phénomènes de sédimentation.

Il peut s'agir également d'une combinaison de solutions, favorisant globalement la continuité sédimentaire :

- épis déflecteurs, reprise d'ouvrage, création d'un môle, etc. (action-clé G8) ;
- rehaussement de digues à une confluence (action-clé G11) ;
- manœuvre de vanne de fond (Génissiat) (action-clé G7), etc.

Le tableau ci-après expose une série de pistes, non exhaustives, pour différentes situations.

Par exemple, sur le Rhin à Gamsheim, un môle (ou remblai stabilisé) a été créé entre les différents canaux pour limiter les phénomènes de sédimentation et favoriser leur transit en aval. Il a été construit en réutilisant des matériaux de dragage. Sur le Rhin, la quantité de sédiments fins dragués est environ 10 à 20 fois moindre que sur le Rhône (communication EDF) ; ce n'est probablement pas la seule raison, car contrairement au Rhône, le Rhin alsacien a très peu d'affluents qui confluent et apportent des sédiments fins et sableux, mais ces types d'aménagement peuvent contribuer à limiter les opérations de dragage.

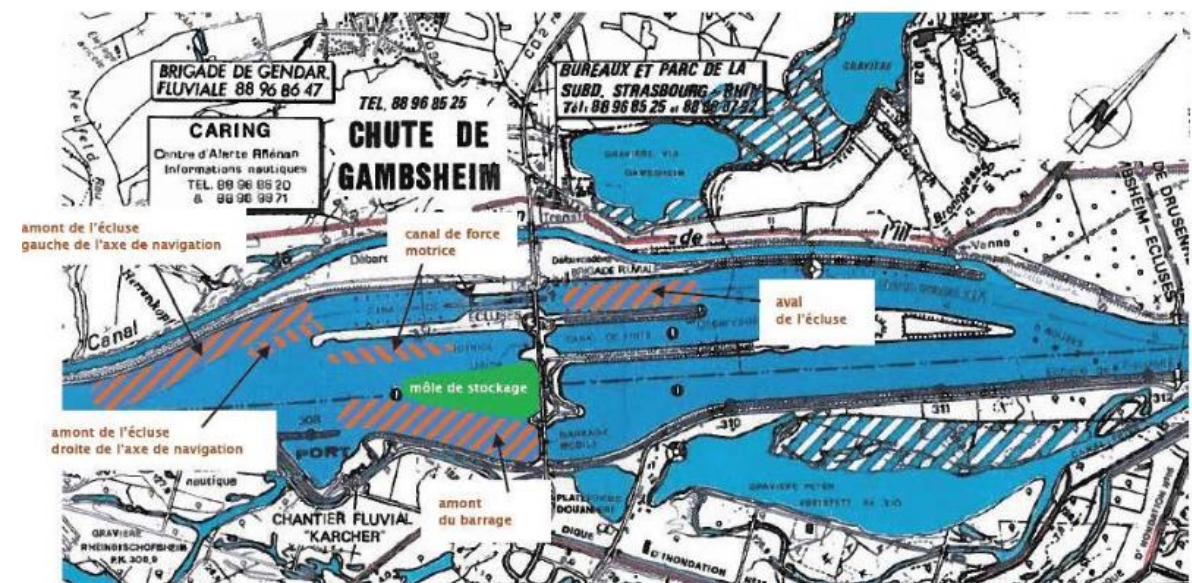


Figure 11 : Exemple de « môle » créé sur le Rhin (en vert) à partir de matériaux de dragage et permettant de diminuer la sédimentation

Tableau 12 : Pistes non exhaustives pour éviter ou diminuer l’importance d’un dragage

Lieu	Constat	Piste d’aménagement pour éviter un dragage	Piste d’aménagement pour réduire l’importance ou la fréquence d’un dragage	REX éventuel
Garage d’écluse	Les garages d’écluse sont des pièges à sédiments	Fermer l’entrée du garage avec une porte qui est fermée lors des RNPC	Aménager un épi déflecteur en amont du garage	La CNR a envisagé des solutions par le passé, sans mise en oeuvre
Port, darse, quai	Les port, darse, sont des pièces à sédiments	Fermer l’entrée du garage avec une porte qui est fermée lors des RNPC	Aménager un épi déflecteur en amont du garage	
Halte fluviale	Accumulation de sables fines dans les haltes	Déplacer une halte sur un lieu moins sensible à la sédimentation		VNF l’envisage si besoin (plus facile que draguer)
Chenal navigable	Les chenaux de navigation passent par un site qui accumule les sédiments (cas de Pont de Loi intersection de banc	Déplacer le chenal de navigation Jouer sur la dynamique sédimentaire pour modifier le lieu de dépôt		La CNR l’a eu fait, mais compliqué à cause des navigants Cas récent de Pont de la Loi
Amont barrage de dérivation	La configuration locale peut favoriser les dépôts en amont du barrage, par exemple à la prise d’eau d’une PCH	Aménager un ouvrage de génie civil pour modifier les écoulements et favoriser la reprise des sédiments Faire des ouvertures de vannes plus fréquentes		Exemple de Génissiat où la manœuvre plus fréquente évite le dragage
Confluence	Les affluents apportent des fins ou grossiers qui ne peuvent franchir les qq centaines de m jusqu’au Rhône	Favoriser le transit jusqu’au Rhône (pente à rehausser) : rehausser les digues		Petits affluents de la retenue de Péage de Roussillon
Queue de retenue	Les queues de retenues accumulent des sédiments (apport amont, apport d’affluent) qui menacent le chenal de navigation ou les enjeux sûreté	Resserrer la section (aménager des hauts fonds latéraux) pour mieux faire transiter les sédiments. Pb : on risque de mener les sédiments grossiers un peu plus loin sans qu’ils atteignent le barrage. Quid du chenal navigable ?		
Retenue	Les retenues ccumulent des sédiments d’affluents, sans ou après dragages	Abaissér la retenue en crue (cf. Scénario 3))		
Difffluence (type brèche de Neyron)	La configuration de la brèche peut favoriser les apports en sédiments	Réaménager la brèche pour qu’elle laisse transiter un transport solide plus faible, voire nul		
Difffluence (type Petit Rhône Grand Rhône)	La configuration de la difffluence favorise les dépôts en sédiments (surlargeur)	Réaménager la difffluence pour qu’elle laisse transiter un transport solide plus faible, voire nul		Travaux au coût disproportionné

Lieu	Constat	Piste d’aménagement pour éviter un dragage	Piste d’aménagement pour réduire l’importance ou la fréquence d’un dragage	REX éventuel
Prise d’eau (irrigation, CNPE)	Les prises d’eau peuvent être le lieu de sédimentation, selon configuration	Reconfigurer la prise d’eau Aménager un épi déflecteur en amont de la prise d’eau		Pas possible pour CNPE pour des questions de débit d’entrée A voir
Petits équipements : rampes à bateau, base de loisirs, bassin de joute				Probablement pas pertinent

4.2 Réduction de la vulnérabilité des enjeux exposés (G9, G10, G11)

La réduction de la vulnérabilité des enjeux exposés est également une piste de travail pour faire évoluer les pratiques de gestion.

Tableau 13 : Pistes non exhaustives pour diminuer la vulnérabilité des enjeux exposés dans le cadre d’un site de dragage

Lieu	Constat	Piste pour réduire la vulnérabilité	REX
Garage d’écluse	Les garages d’écluse sont des pièges à sédiments	Réduire la profondeur de mouillage Retarder le seuil déclenchement du dragage	A priori pas acceptable au vu du CC Ne fait que repousser le problème
Port, darse	Les port, darse, sont des pièces à sédiments	Réduire la profondeur de mouillage Retarder le seuil déclenchement du dragage	A priori pas acceptable au vu du CC Ne fait que repousser le problème
Chenal navigable	Les chenaux de navigation passent par un site qui accumule les sédiments	Réduire la profondeur du chenal navigable Retarder le seuil déclenchement du dragage	A priori pas acceptable au vu du CC Ne fait que repousser le problème
Halte fluviale	Accumulation de sables fines dans les haltes	Accepter l’envasement des péniches stationnaires	Voir VNF
Prise d’eau (irrigation, CNPE)	Les prises d’eau peuvent être le lieu de sédimentation, selon configuration	Adapter le débit de prélèvement	Probablement pas possible
Petits équipements : rampes à bateau, base de loisirs, bassin de joute		A déplacer si trop problématique	
Captage AEP	Station d’alerte et prise d’eau exposés aux sédiments	A déplacer si trop problématique	A étudier au cas par cas (Crépieux Charmy)

5. Comment faire progresser les actions courantes de restauration ?

5.1 Les réinjections de grossiers dans les RCC (R1)

La réinjection de sédiments grossiers (R1) fait l'objet d'une partie spécifique (cf. Chapitre 7).

5.2 Les réactivations de marges alluviales (R2)

La réactivation des marges alluviales (R4) consiste à intervenir sur les ouvrages Girardon par démantèlement partiel ou total des digues longitudinales, des tenons ou des épis afin de favoriser les érosions latérales lors des épisodes de crues. Ces actions ont tendance, par élargissement du lit, à diminuer les forces érosives et puissances spécifiques ; toutefois, elles jouent un rôle important dans un cadre plus large de restauration de la dynamique sédimentaire, en combinaison avec des actions de réinjections (R1) et des actions de restauration de la bande active (R3). Le résultat attendu est globalement une tendance à l'amortissement, à la respiration des flux sédimentaire, ce qui peut faire augmenter les durées d'efficacité des opérations.

La réactivation des marges alluviales peut avoir des effets bénéfiques comme exposés dans le rapport de Mission 4. Toutefois, il est important de noter que les effets peuvent être limités si on se limite à des érosions de berges. Il pourrait donc être opportun et nécessaire d'augmenter les emprises des marges pour la restauration et ne pas considérer uniquement l'érosion latérale pour mobiliser ces espaces. Des travaux de terrassement en déblai permettraient de restaurer une connectivité latérale plus fréquente. Ces opérations pourraient et devraient être complétées également par des actions sédimentaires de réinjection sédimentaire et/ou de débits morphogènes. En effet, le lit contraint par les bancs et aménagements Girardon végétalisés joue un effet tuyau qui fait transiter les sédiments rapidement en aval. En revanche, si on procède à des actions intégrées dans lesquelles on restaure en même temps les marges alluviales, on ralentit les flux sédimentaires et on augmente la durée de vie des actions.

Räpple (2018) ajoute que le choix des casiers à démanteler éclairé par l'analyse de la dynamique d'atterrissement. Pour que les actions de réactivation des marges fluviales soit pérenne, il faut que la dynamique morphologique soit suffisante : le processus de sédimentation dans les anciennes marges doit être limité (conserver partiellement les aménagements pour « orienter » les dépôts sédimentaires ?) ; renouvellement des stocks alluvionnaires ; pour que persistent des formations végétales pionnières. Il est donc nécessaire de bien évaluer les capacités de charriage et les érosions de berges : cela conditionne la nécessité d'essarter la ripisylve pour initier les processus d'érosion de berge.

Cette restauration de type R2 se heurte potentiellement à des effets possibles sur les forêts alluviales présentes sur ces marges, habitat écologique d'intérêt abritant également des espèces patrimoniales et souvent classées au titre d'inventaires et/ou de protection des milieux naturels. Il est important de rappeler que ces forêts alluviales résultent d'un processus d'évolution des communautés végétales jusqu'au stade ultime de boisements rivulaires par exhaussement du lit. Cette évolution « naturelle », qui peut être limitée dans le temps et rajeunie dans des cours d'eau à dynamique alluviale plus importante (Loire, Allier, Ain), est très limitée sur le Rhône. Elle a considérablement été accélérée du fait des aménagements et de nombreuses forêts alluviales en s'exhaussant finissent par se dégrader, perdre leur caractère humide ou du moins une diversité et une richesse spécifique élevée.

Aussi, il peut être opportun sur certains secteurs pour augmenter de manière importante l'efficacité de la restauration de supprimer de la forêt alluviale à des fins de rajeunissement comme le ferait une crue active. Il y a donc là, nécessité de procéder à une réflexion approfondie pour choisir les secteurs et limiter les impacts en suivant la séquence ERC.

Tout d'abord, il sera nécessaire de disposer de diagnostics écologiques récents et précis sur les différents secteurs de forêts alluviales potentiellement à restaurer pour limiter et réduire les impacts en évitant les secteurs les plus sensibles (espèces patrimoniales, espaces protégés) et en privilégiant les habitats les plus dégradés (présence d'EEE, habitat très exhaussé, perte du caractère humide, etc.). On pourra aussi limiter les impacts en choisissant des secteurs de grande surface pour conserver une grande partie de la forêt alluviale existante en ne réduisant que les marges de façon à ce que les espèces présentes puissent se reporter sur les habitats forestiers conservés. L'idée est de se rapprocher des processus naturels que peuvent être les crues pour choisir les secteurs de forêt à restaurer.

La phase de réduction est nécessaire ensuite pour limiter les impacts lors des travaux, comme ce qui est fait classiquement en la matière (travaux hors période de reproduction de la faune, limitation des risques de pollution, évitement de la dissémination des EEE, etc.)

Enfin, s'il y a impacts sur des espèces protégées même communes qui ne peuvent être évités, il y a aura peut-être nécessité de compenser. Sachant que l'objectif général ici de l'opération est bien la restauration écologique de tronçon du Rhône en restaurant des processus écologiques naturels d'une part en en favorisant des habitats et espèces plus pionnières et donc souvent plus patrimoniaux de l'autre, cette compensation devrait être limitée en temps et en moyen.

Les travaux récents de Seignemartin (2022) mettent en évidence 5 catégories de casiers qui présentent des tendances de sédimentation différentes :

- des casiers aquatiques qui montrent une faible tendance à la sédimentation ;
- des casiers qui présentent une sédimentation latérale ;
- des casiers qui montrent une sédimentation concentrique ;
- des casiers qui présentent une sédimentation uniforme post mise en place de la dérivation ;
- des casiers qui ont une tendance à la sédimentation plus complexe.

Les actions de restauration sont à considérer également en fonction de cette typologie, en conservant ou améliorant des casiers présentant une bonne biodiversité (et probablement une reconnaissance par les acteurs locaux), et en restaurant de façon ambitieuse des casiers ayant perdu leur caractère aquatique.

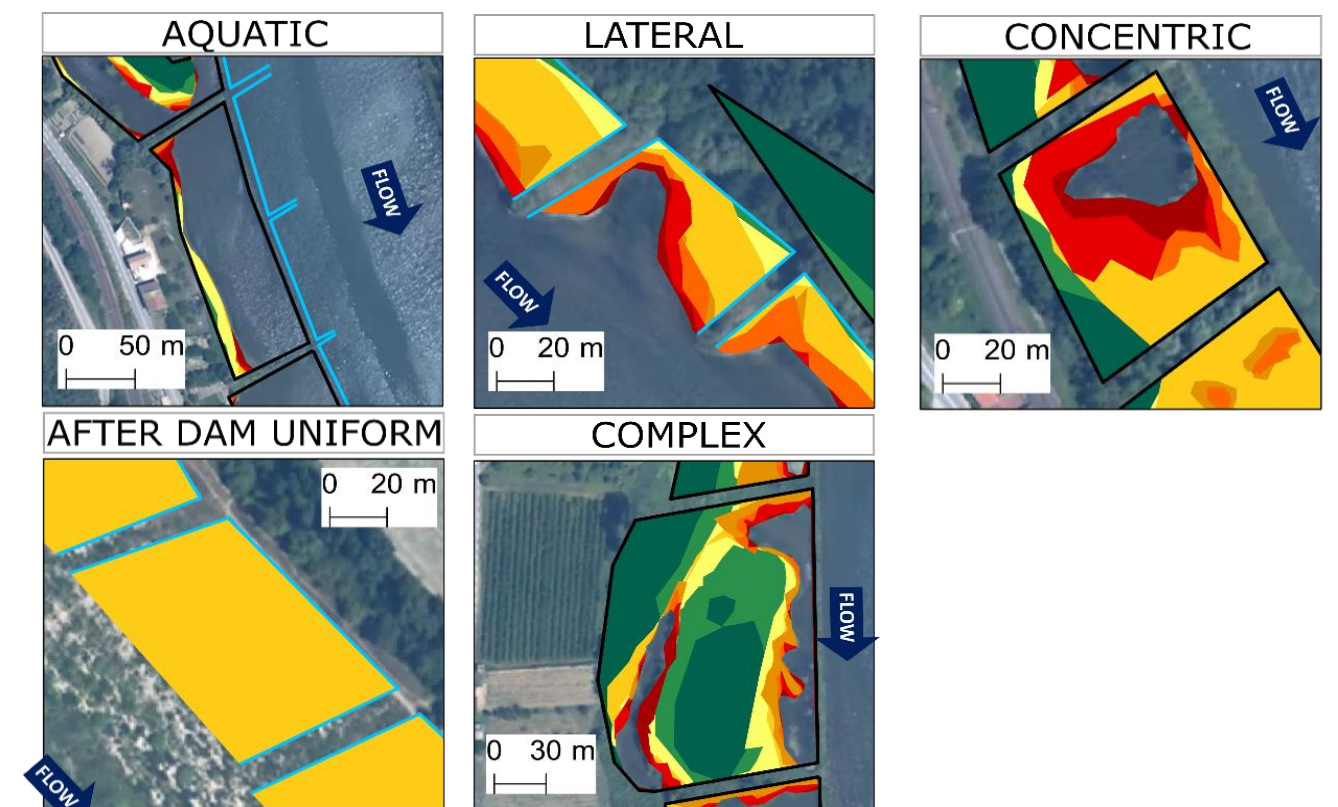


Figure 12 : Typologie de l'atterrissement des casiers, illustration pour le RCC de Péage-de-Roussillon (Seignemartin et al., 2022)

5.3 La restauration de la bande active (R3)

La restauration hydromorphologique de la bande active (R3) a pour objectif l'amélioration de la qualité des milieux. Ce type d'action doit être esquissé en orientant les objectifs de la restauration vers un rétablissement de processus, et non uniquement des formes alluviales. Ainsi, la dynamique morphologique du tronçon restauré doit présenter des caractéristiques suffisantes pour la remobilisation des sédiments, soit parce que la dynamique sédimentaire est présente, soit parce qu'elle est soutenue par des actions adaptées : matériaux réinjectés (R1) ; débits morphogènes (R11).

La restauration de la continuité sédimentaire depuis l'amont est donc un facteur indispensable pour assurer une pérennité des bénéfices. Des études de faisabilité et d'incidence sont des prérequis indispensables afin de dimensionner les travaux et minimiser leurs impacts notamment sur la faune et la flore. Pour évaluer ces impacts, mais également les bénéfices de ces actions, des suivis biologiques doivent être mis en place avant et après travaux.

La figure ci-dessous illustre le principe d'une restauration de la bande active pour un Vieux Rhône comme celui de Péage de Roussillon, étudié dans le cadre de la stratégie de réactivation de la dynamique fluviale au droit de la RNN de l'Ile de la Platière.

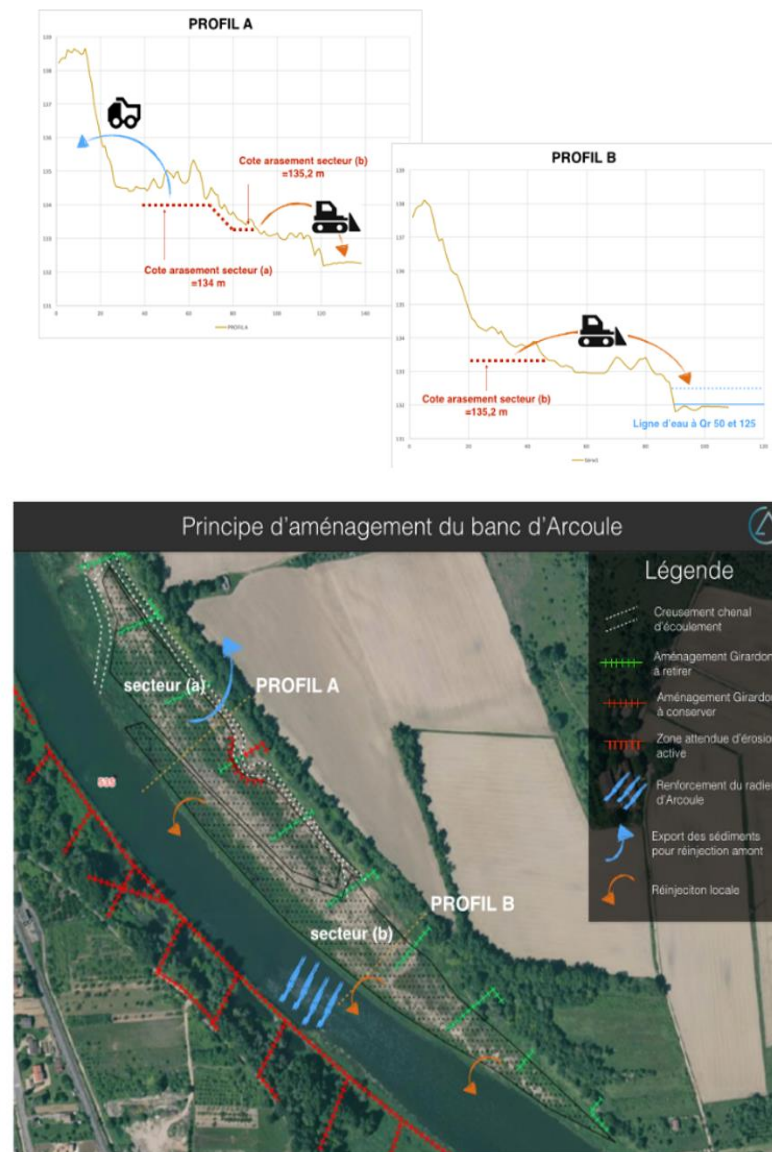


Figure 13 : Exemple de restauration de la bande active étudiée pour le RCC de Péage-de-Roussillon

L'action-clé R3 vise à établir une nouvelle configuration morphologique durable et fonctionnelle pour le Vieux Rhône, adaptée à son hydrologie modifiée et favorisant son adaptation au changement climatique, et ne cherchant pas à reproduire un éventuel état de référence antérieur. L'action est à privilégier sur les atterrissements des bancs et trains de casier en convexité.

L'action-clé R3 elle-même peut être source de matériaux à réinjecter dans le cours principal, par remodelage du lit : les bancs perchés sont arasés, et les matériaux les plus grossiers sont réinjectés dans le lit d'étiage, de façon à restaurer les formes alluviales et initier les processus. Ce principe peut être utile pour les secteurs déficitaires en matériaux de recharge, comme c'est le cas du RCC de Chautagne, et d'une manière générale du Secteur II.

Enfin, un des principaux intérêts de l'action dans l'immédiateté et la durée est qu'elle est compatible avec des enjeux d'inondation : les travaux ont lieu à section équivalente ce qui permet de garantir que les impacts hydrauliques seront faibles malgré des opérations ambitieuses de recharge du lit et de rehaussement des fonds. Dans la durée, l'action permet d'admettre plus facilement des volumes de réinjection, toujours par limitation des impacts hydrauliques.

Les impacts écologiques de mise en œuvre peuvent être forts, et il est nécessaire d'adapter l'ampleur des travaux à ces enjeux, notamment vis-à-vis des espèces exotiques envahissantes.

Les principes d'actions sont valables quelle que soit la dynamique pluviale propre. Si la dynamique alluviale est potentiellement forte, comme pour le RCC de Chautagne, on parlera de « restauration de la bande active ». Si la dynamique est plus faible, l'action répond aussi à l'objet de restauration d'un espace de bon fonctionnement, avec l'ensemble des fonctionnalités du cours d'eau concernées (nappes, connectivité latérale, etc.).

Dans cet esprit, Ciotti et al. (2021) proposent des principes complémentaires basés sur les processus, illustrés par la Figure 15 (a contrario, la Figure 16 montre un exemple de restauration basé sur le travail des formes alluviales). Ce principe de « processed-based restoration » a été établi par Powers et al. (2018 ;), sur la base de la typologie « Stage 0 » établie par Cluer & Thorne (2014). Un tel principe d'action serait ambitieux pour le Rhône, mais sa faisabilité doit être réfléchie car il s'agit d'un moyen de minimiser le bilan GES des opérations.

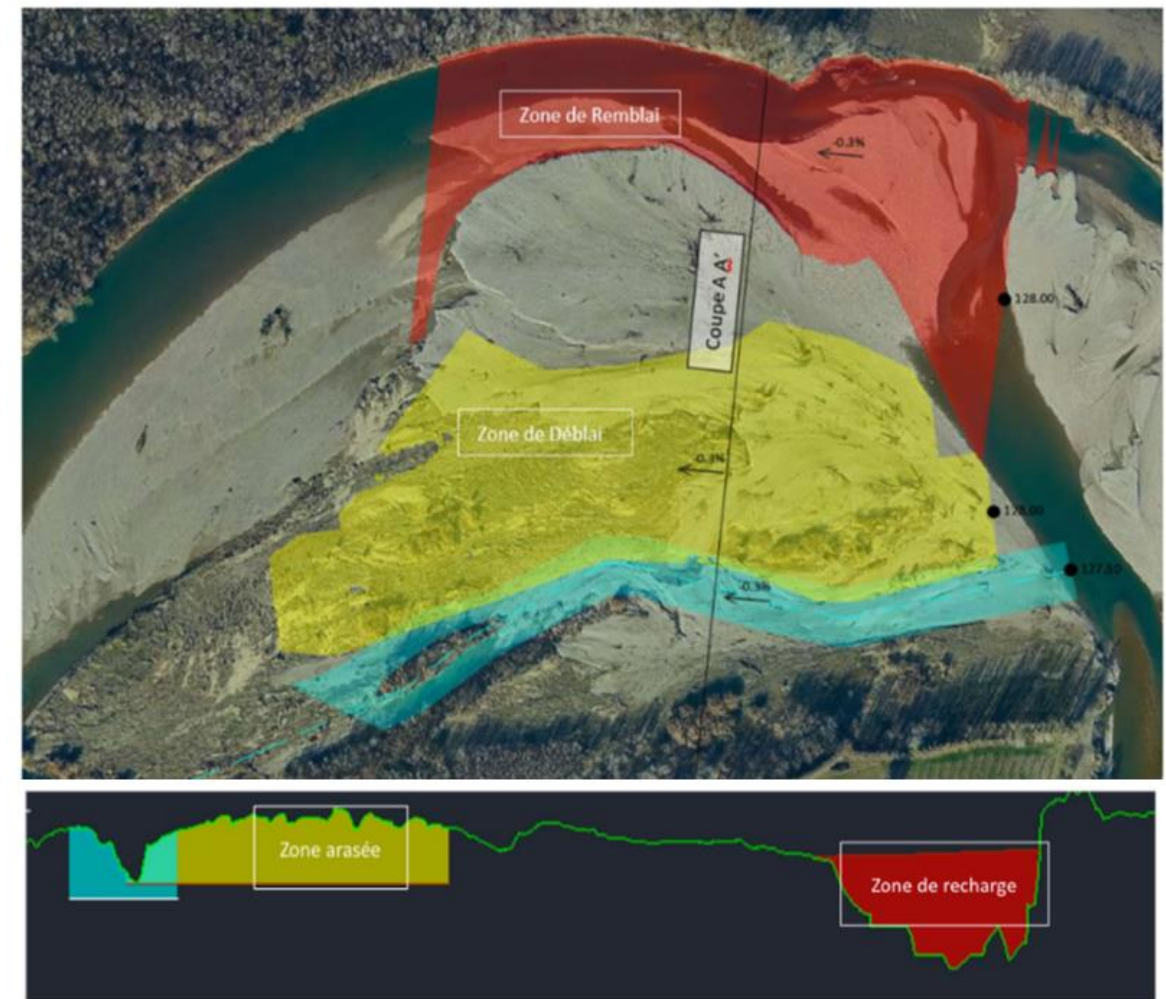


Figure 14 : Exemple de restauration de la bande active envisagé sur la Durance (cf. Mission 5)

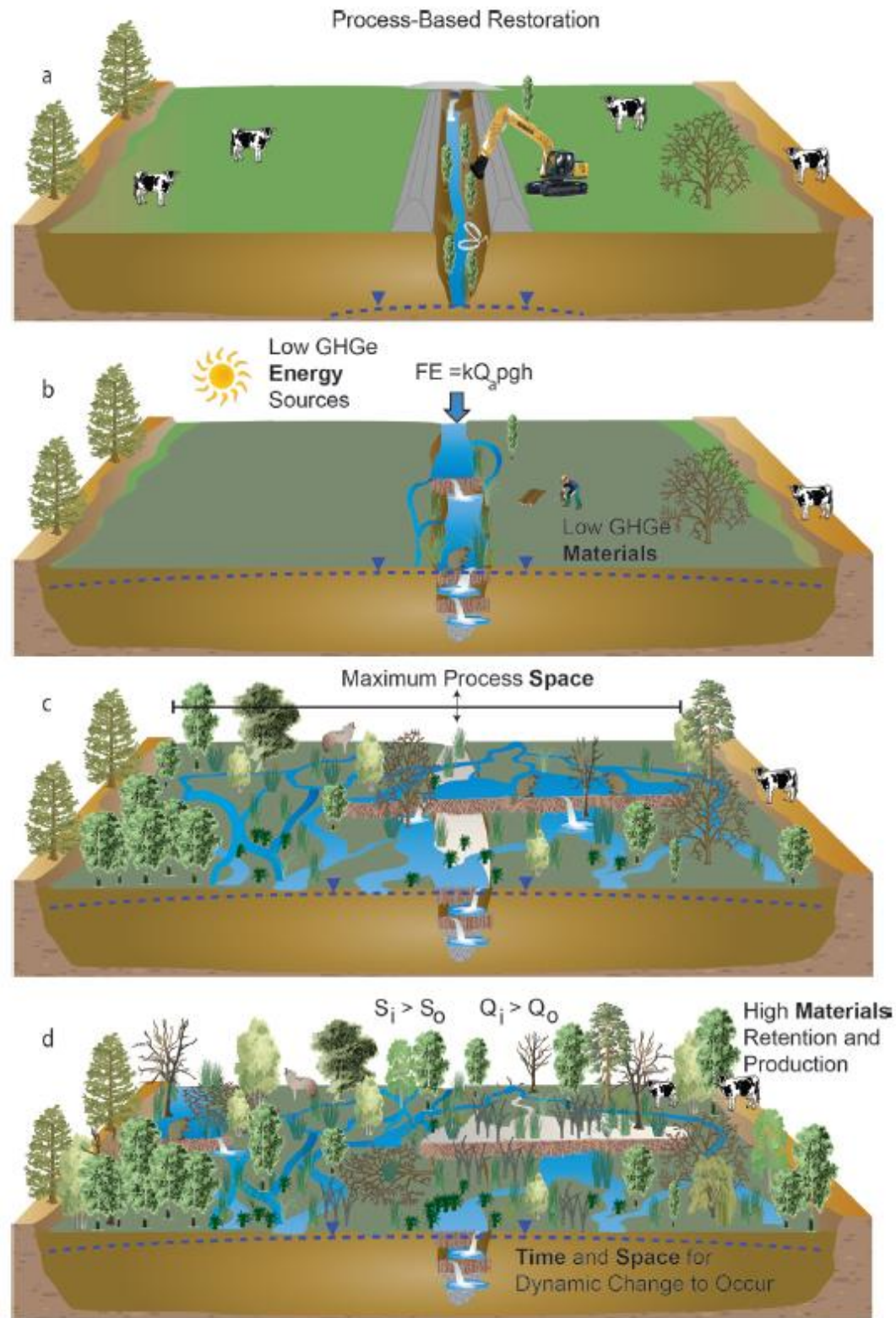


Figure 15 : Principes de restauration de l'espace alluvial basé sur les processus (Ciotti et al, 2021)

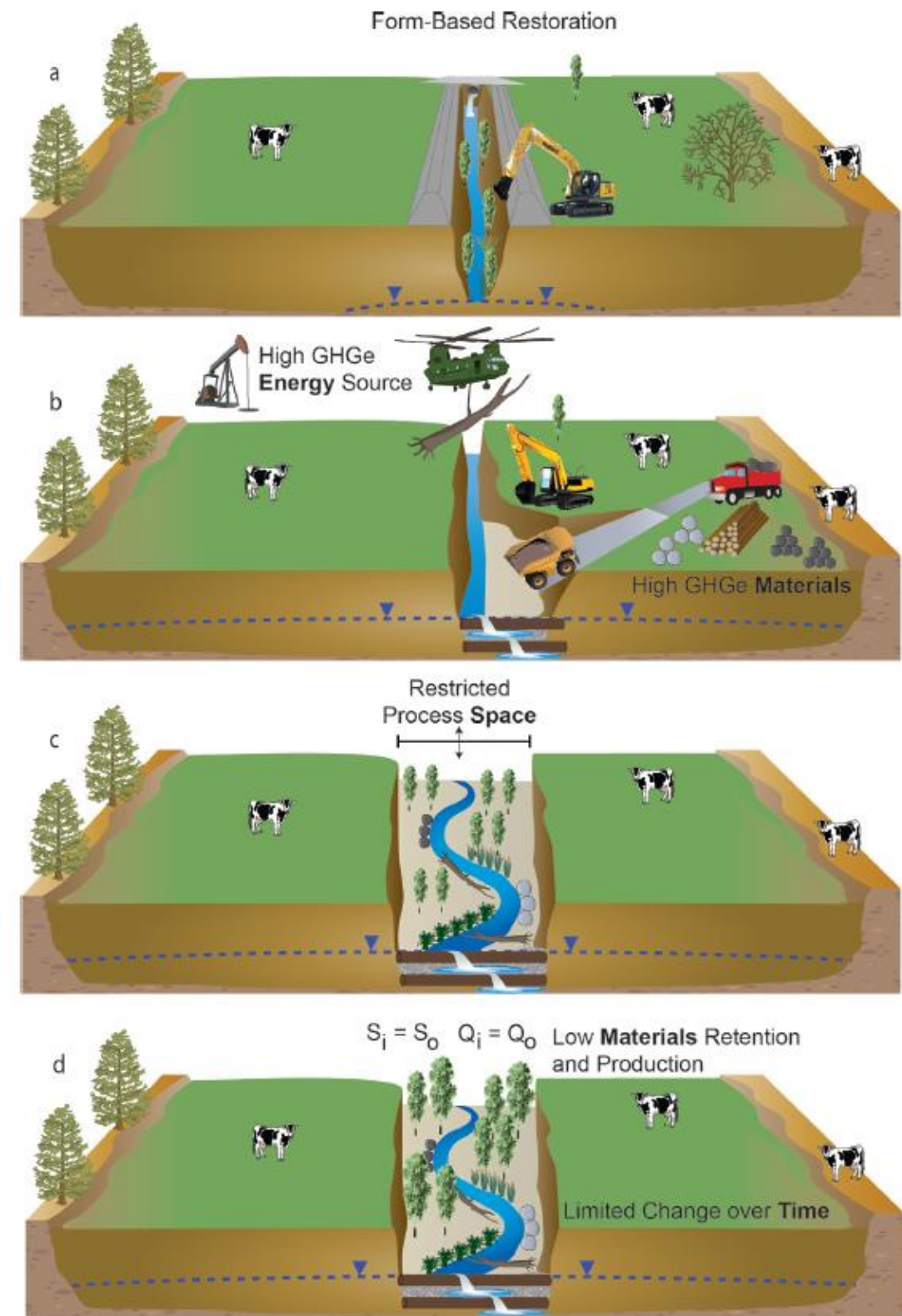


Figure 16 : Principes de restauration de l'espace alluvial basé sur les formes (Ciotti et al, 2021)

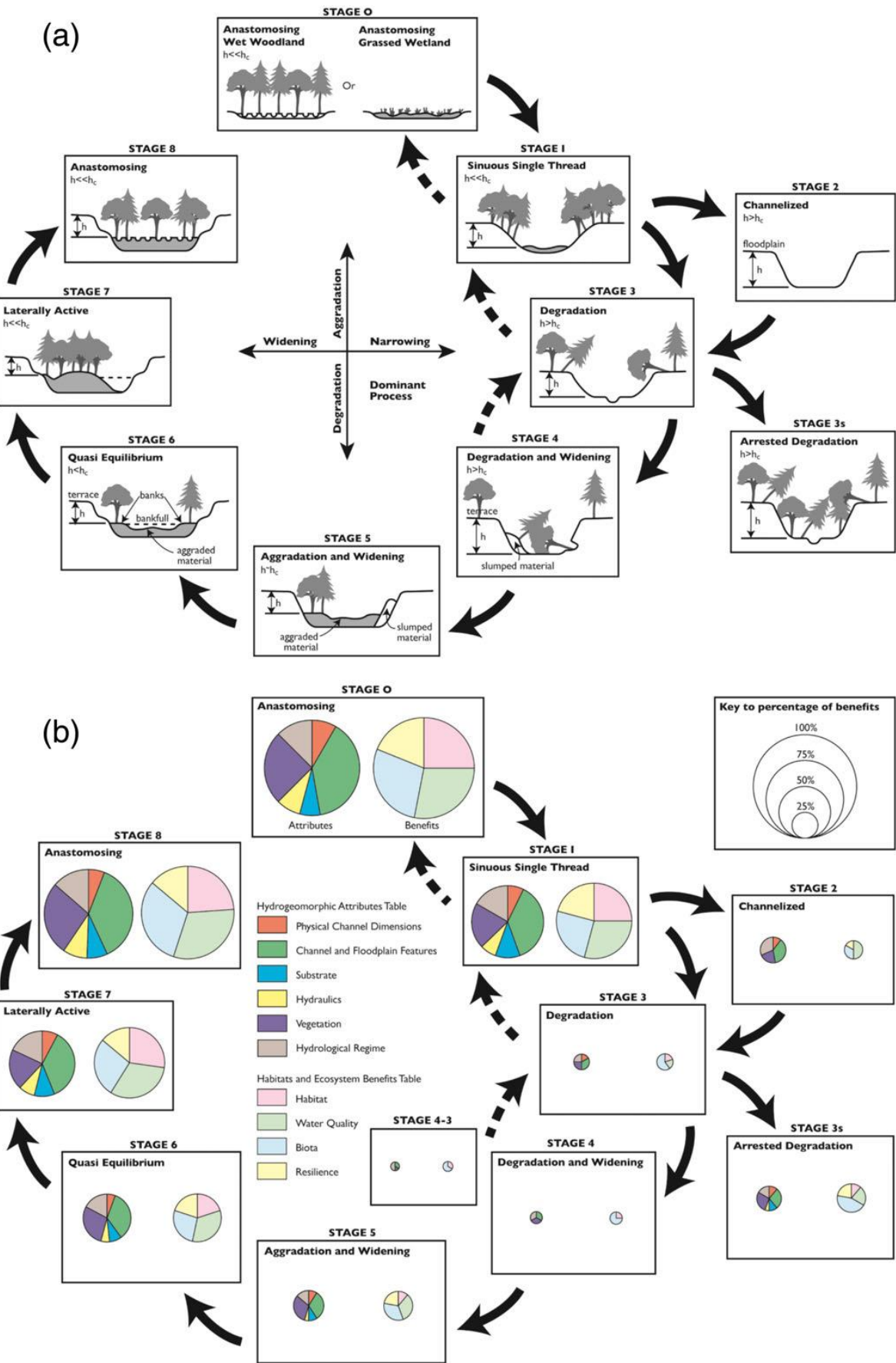


Figure 17 : (a) Modèle d'évolution morphologique d'après Cluer & Thorne (2014) (b) bénéfices physiques et écologiques fournis par chaque stade d'évolution morphologique

Figure 18 : Restauration au stade « Stage 0 » et évolution sur la période 2015-2021 sur le Whychus Creek (Oregon, USA) (Flitcroft et al, 2022)

5.4 Les restaurations de lînes et zones humides associées (R4)

Les travaux de restauration de lîne de type R4 bénéficient maintenant de plusieurs décennies de retour d'expérience. Il est ainsi possible de catégoriser les lînes et d'estimer la durée de vie de travaux de restauration. Ainsi, les travaux de Riquier et al. (2019) ont montré que l'on pouvait distinguer 4 types de conditions granulométriques moyennes des chenaux des lînes :

- les chenaux de type 1 sont des bras à lit graveleux pouvant présenter des plaques sporadiques de sables, voire parfois de limons ;
- les bras de types 2 et 3 constituent des cas intermédiaires présentant des taux de recouvrement de leur fond par des dépôts de sédiments fins similaires ;
 - les bras de type 2 enregistrent des dépôts plutôt sablo-limoneux,
 - alors que ceux de type 3 s'inscrivent dans une gamme plutôt limono-sableuse.
- les bras de type 4 sont, quant à eux, totalement recouverts par des dépôts limoneux.

La plupart des bras étudiés dans Riquier et al. (2019) présentent des conditions granulométriques après travaux très proches de celles observées avant restauration : les travaux ont ainsi permis de rajeunir les formes sans pour autant modifier les processus contrôlant les modalités de sédimentation des bras.

Les bras étudiés enregistrent des processus de décapage lors d'évènements de crue relativement fréquents (compris entre la crue biennale et quinquennale, selon le tronçon fluvial considéré). Ceci souligne que ces bras possèdent une certaine capacité d'auto-entretien ce qui leur confère des durées de vie potentielles variées qui s'étendent d'une vingtaine d'années pour les bras les plus prompts à s'atterrir, à plusieurs siècles pour les bras présentant les plus fortes capacités d'auto-entretien.

La Figure 19 montre le résultat d'une analyse en composantes principales inter-bras, présenté sur le plan factoriel formé des deux premiers axes expliquant le maximum de variance. Les bras sont ordonnés principalement selon les caractéristiques granulométriques des dépôts sédimentaires sur l'axe des ordonnées et selon le taux de recouvrement de leur fond par les sédiments fins sur l'axe des abscisses. Les types de conditions ont été déterminés à partir d'une classification ascendante hiérarchique réalisée sur les deux premières composantes principales de l'analyse.

La position des bras après restauration (code à 4 lettres) correspond à une condition moyenne reposant sur l'ensemble des observés disponibles. Les observations disponibles réalisées avant restauration ont été projetées sur le plan factoriel, permettant ainsi d'apprécier l'effet des travaux réalisés sur les conditions granulométriques observées. Par exemple, la lîne du Cerisier (CERI) montre des conditions de dépôts post-restauration très proches des conditions antécédentes.

Les actions de réintroduction sédimentaire et de réactivation des marges fluviales vont probablement entraîner la mobilisation d'une charge de fond ce qui pourrait remettre en question la pérennité de certains bras (effets sur la connectivité hydrologique des bras en crue ou en débit réservé).

Tableau 1. Estimation de la durée de vie potentielle des bras restaurés en tant qu'habitats aquatiques (modifié et adapté d'après Riquier et al., 2017).

	MALO	BROT	LUIS	MOIR	BEAR	FOUR	LUCE	ENIL
Durée de vie (années)	35-47	34-99	Auto-entretien	51-90	35-93	Auto-entretien	> 100	Auto-entretien
	GRAN	VACH	CERI	MATH	MOLO	PONT	CISE	JARI ^a
	> 100	Auto-entretien	> 100	Auto-entretien	21-32	17-22	> 100	Auto-entretien

Figure 20 : Estimation de la durée de vie d'une lîne restaurée (d'après Riquier et al. 2019)

La possibilité d'un auto-entretien des lînes et la durabilité des actions dans le temps (>20 ans) sont deux caractéristiques à prendre en compte dans la définition des actions de restauration de ces milieux, d'où leur conception qui s'accompagne souvent d'une action de type R2.



Figure 21 : Lîne de l'Ilon avant et après restauration (2013 et 2014)

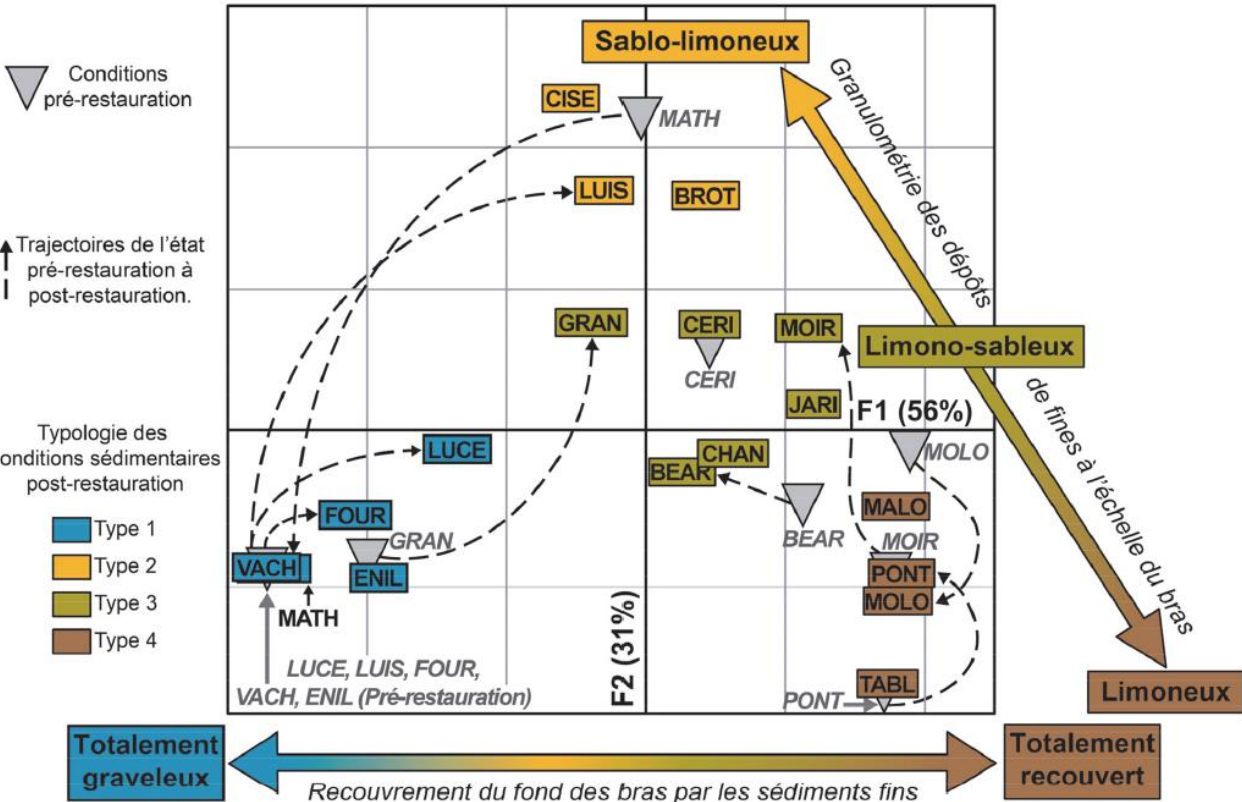


Figure 19 : Analyse de la diversité des conditions granulométriques de surface moyennes mesurées dans les bras étudiés (d'après Riquier et al. 2019)

6. Quelles nouvelles actions de restauration envisager ?

6.1 Quel devenir pour les ouvrages transversaux non équipés (R5) ?

Les ouvrages transversaux en place sur les Vieux Rhône ont souvent été mis en place pour atténuer les phénomènes d'incision liés à la chenalisation du fleuve et ont généralement été réalisés en accompagnement territorial des aménagements hydroélectriques et de la baisse de l'hydrologie résultante. C'était un moyen pour retrouver un niveau similaire à la situation avant aménagement, autant pour les eaux de surface que pour les niveaux de nappe.

La fiche-action G5 exprime les orientations possibles, et les moyens à mettre en œuvre qui sont généralement bien documentés pour ce type d'action. Le constat qui peut être fait est que si les seuils sont abaissés voire effacés sans plus de précaution à partir de la situation actuelle, tel que cela est généralement envisagé par les actions prévues pour le BPE (seuils de Belley, seuil de Beaucaire, etc.), les impacts seront forts (niveau d'eau, nappe, milieux naturels) et ne pourront être acceptés par les acteurs locaux, même si l'action offre directement des gains en termes de continuité sédimentaire et biologique.

Il est donc important de coordonner une telle action dans un programme d'ensemble, et le fil directeur de ce programme d'ensemble est la restauration d'une dynamique sédimentaire. Cette dynamique sédimentaire, construire à partir d'actions de réinjection (R1), de restauration des marges (R2) et de la bande active (R3), permet d'envisager une morphologie différente, avec une pente plus élevée, une largeur plus importante, une certaine mobilité latérale, et ce sont ces conditions qui autorisent ensuite d'envisager l'abaissement ou d'effacement d'un seuil.

Dans ces conditions favorables avec peu d'enjeux concernés, un seuil peut aussi être « noyé » sous un nouveau lit rechargé et élargi comme cela a été réalisé sur le Haut Drac en Champsaur en 2014 (cf. photographies ci-dessous), avec un seuil de 5 m de dénivelé englobé dans la recharge alluviale du lit incisé.



Figure 22 : Recharge sédimentaire et élargissement du lit du Drac en Champsaur ayant permis de noyer dans le lit alluvial le seuil d'alimentation d'un plan d'eau (F.Laval, 2013 ; 2016)

6.2 Quel intérêt de réinjecter du bois mort (R6) ?

Le bois en rivière influence la structure de l'écoulement, ce qui contribue à modifier la dynamique sédimentaire, parfois en exacerbant l'érosion, parfois en forçant le dépôt des sédiments. C'est à l'image des interactions entre le fonctionnement géomorphologique et la végétation alluviale, tel que développé en Mission 3 (§.6.2.3) à partir des travaux de Corenblit (2020).

L'influence qu'exerce le bois en rivière sur l'écoulement et le transport des sédiments se traduit par une modification de la morphologie du cours d'eau voire un changement complet du style fluvial. L'ampleur des répercussions sur la dynamique fluviale relève principalement de la proportion du chenal obstrué, mais aussi de plusieurs autres variables comme la position, l'orientation, la dimension, la porosité et la stabilité de l'embâcle de bois. L'influence du bois et des embâcles sur la morphologie et la dynamique des cours d'eau contribue à modeler un cadre physique et des conditions environnementales pour les organismes vivants que le cours d'eau supporte. Les zones de faibles courants engendrées par le bois en rivière permettent à des sédiments fins de se déposer sur les bancs d'accumulation ou sur la plaine alluviale qui sont colonisés par la végétation. Le bois en rivière représente aussi une source de matière organique utile à la croissance de la végétation de la ripisylve, celle-ci servant de refuge à la faune et permettant de créer des espaces frais et ombragés. Les zones de faible courant créées par les embâcles de bois sont des environnements propices au développement de biofilms et d'algues. Leur développement est facilité par la complexité des structures de bois et l'hétérogénéité des textures en surfaces, qui favorisent la création de microhabitats diversifiés soutenant de nombreuses espèces végétales et animales. D'autre part, le bois en rivière permet aussi de modifier la forme et la composition granulométrique du lit des cours d'eau, ce qui engendre la formation d'habitat dont les substrats sont très variés. En altérant le transport des sédiments, le bois en rivière permet la formation de zones où s'accumulent du gravier et d'autres du sable et même des limons (Boivin et al, 2019).

Les zones d'accumulation de graviers fournissent un environnement favorable à l'éclosion des œufs notamment de salmonidés, alors que les zones de dépôt de sédiments fins en périphérie des embâcles sont généralement riches en matière organique et protégées du courant, ce qui favorise la colonisation par les macroinvertébrés et les juvéniles. D'ailleurs, les microhabitats créés par le bois permettent d'accueillir une diversité d'espèces de macroinvertébrés significativement plus grande que dans les milieux sans bois. Certaines espèces se retrouvent en fait de façon exclusive dans les habitats engendrés par le bois en rivière, soulignant que ce sont des environnements uniques et essentiels au maintien de la diversité biologique. De la même façon que pour les organismes benthiques, ces environnements représentent pour les espèces piscicoles une source abondante de nourriture ainsi qu'un refuge de qualité (thermique, hydraulique et prédation). La forte concentration de macroinvertébrés associée au bois en rivière, eux-mêmes présents à cause de la prolifération d'algues, représente une grande quantité de nourriture pour le poisson. De plus, la diversité des formes, la taille des sédiments et les vitesses d'écoulement induite par la présence de bois en rivière permet de créer des habitats complexes qui peuvent servir de source d'alimentation et de repos. Les vitesses d'écoulement y sont ralenties et elles agissent comme refuge hydraulique, c'est-à-dire que les poissons peuvent s'abriter des courants plus rapides et rester au repos.

Figure 23 : Eventail d'actions possibles pour une gestion durable des bois en rivière (Boivin et al., 2019)

Actions	Implications
Aucune action	- Maintient les bénéfices écosystémiques - Aucun frais
Suivi	- Maintient les bénéfices écosystémiques - Facilite le suivi de l'évolution à long terme - Approprié pour les secteurs à faible risque - Peu de frais
Sensibilisation et signalisation	- Maintient les bénéfices écosystémiques - Réduit les risques chez les usagers - Renseigne sur les bénéfices du bois en rivière
Stabilisation et réintroduction	- Maintient les bénéfices écosystémiques - Réduit les risques associés à la mobilité du bois
Élagage	- Réduit les bénéfices écosystémiques - Réduit le potentiel d'accumulation du bois en transport
Déplacement ou retrait du bois	- Réduit les bénéfices écosystémiques - Réduit les risques associés aux infrastructures et à l'usage - Devient rapidement coûteux - Si beaucoup de bois, peut modifier la morphodynamique du tronçon



Figure 24 : Exemples de bois morts immergés sur un bras du Rhin

W. Liefveld (IS.Rivers, 2018) https://www.youtube.com/watch?v=Ylvlp4HE_8Y&t=47s
(Bureau Waardenburg bv / ecologie & landschap)



Figure 25 : Structures de bois morts immergés et/ou enterrées, évoluant au gré des fluctuations saisonnières, en Oregon (Biohabitats, Goose Creek, 2016)

La grande majorité des études sur la réinjection de bois font état d'amélioration de l'habitat physique (par exemple : fréquence accrue de mouilles, des niches, de la diversité des habitats). Il s'agit d'une des techniques les plus répandue avec la mise en place de structures dans le lit des cours d'eau pour améliorer l'habitat fluvial des poissons.

Le succès apparent de ce type d'opérations pour les populations de poissons a conduit à son application dans de nombreux hydrosystèmes dans le monde. Les échecs constatés de certaines opérations dans des contextes différents ont également permis de se questionner sur les techniques de placement du bois, qui imitent plus précisément les accumulations naturelles de bois. Ainsi, depuis les années 1990, on a vu un abandon de l'utilisation de bûches coupées et des rochers pour placer des arbres entiers voire des embâcles. Cependant, les approches courantes utilisent souvent des structures fixes traditionnelles en bois ou en pierre pour stabiliser les canaux, et les considérations de responsabilité et de sécurité ont conduit à l'utilisation croissante d'approches complexes pour la construction d'embâcles dans les grands cours d'eau. Il demeure que l'enlèvement du bois mort dans les cours d'eau est une pratique qui perdure depuis maintenant plus d'un siècle pour des questions de maintien de la navigation notamment (ce qui est appelé « nettoyage » du cours d'eau) en dépit des améliorations de la qualité des habitats piscicoles qu'il peut induire (Roni et al 2014).

Avant d'envisager la réinjection de bois mort, il paraît déjà essentiel de conserver le bois mort, afin qu'il ne soit pas retiré lors d'opérations d'entretien.

Dans tous les cas, la gestion du mort existant ou la réintroduction de bois mort s'accompagnent de mesures de précautions puisqu'il ne s'agit pas de générer des contraintes supplémentaires, notamment pour l'exploitation des barrages (sensibles aux embâcles et équipés de dégrilleurs) et pour la navigation qui est autorisée 355 jours par an en moyenne, c'est-à-dire également sur des hauts débits capables de remobiliser les bois flottants.

En termes d'enjeu de sûreté, les venues de bois morts ont été étudiées par Ruiz-Villanueva et al. (2022). L'accumulation de bois flotté (c'est-à-dire les troncs flottants, les arbres abattus, les branches et les racines) en amont des barrages peut créer des obstructions, réduire la capacité du déversoir et provoquer des niveaux d'eau plus élevés indésirables dans le réservoir. Pour minimiser ces problèmes, certains gestionnaires de barrages doivent retirer mécaniquement régulièrement le bois flotté. C'est le cas du barrage de Génissiat sur le Rhône, où sont piégés tous les bois provenant de l'amont et des principaux affluents. Des séries de données hydrologiques ont fourni des informations détaillées sur les conditions d'inondation transportant le bois. Les résultats préliminaires ont montré que, comme prévu, des inondations plus importantes ont contribué à l'augmentation du volume de bois, mais des conditions hydrauliques similaires ont entraîné une large gamme de volumes de bois. Le débit de pointe ne semble pas être le meilleur prédicteur et d'autres variables telles que l'origine, la durée, le volume et la fréquence de l'inondation doivent être prises en compte ainsi que la durée ou les caractères de la période inter-inondations. Les résultats ont montré que la quantité de bois arrivant au réservoir varie en fonction de la contribution de chaque affluent, de la disponibilité de bois liée aux crues antérieures et des caractéristiques du peuplement forestier.

Les bois réinjectés doivent donc être fixés, ancrés, stabilisés, etc. Ces aménagements sont possibles en secteur courant ou en annexes comme en Oregon (Biohabitats : https://www.youtube.com/watch?v=kPW-0xLi_5k / <https://www.biohabitats.com/project/river-island-north-restoration/> ; Figure 25) ou en secteur lentique, voire navigable (cas des travaux aux Pays-Bas de W.Liefveld ; cf. Figure 24).

6.3 Quelles actions pour l'amélioration des habitats en retenue et canaux (R7) ?

Le long du Rhône, plusieurs retenues bénéficient d'un statut d'espace protégé ou classé au titre de son intérêt écologique car ces milieux abritent des habitats naturels et/ou des habitats d'espèces patrimoniaux.

On peut citer à titre d'exemple la retenue du défilé de l'Etournel, la retenue de Printegarde, etc. Ces retenues ont en commun la présence d'habitats naturels particuliers telles que des roselières à Roseau commun, des vasières qui peuvent s'exonder, des herbiers aquatiques également. L'intérêt écologique des retenues et canaux est lié à la largeur du 'plan d'eau' et à ses capacités d'abri et de nourriture pour la faune notamment. Il pourrait donc être opportun de favoriser de tels habitats liés notamment à des apports et accumulation de sédiments dans certaines retenues et canaux également en privilégiant bien entendu les secteurs où peuvent s'accumuler les sédiments pour éviter toute nécessité d'export de sédiments de l'autre (dragage). Le type de sédiments peut être diversifié mais en général un sédiment fin de type sable ou vase est préférable pour ces habitats.

Outre les secteurs d'accumulation naturelle de sédiments aux confluences, les actions de dragage de sédiments étant toujours nécessaire pour certaines activités anthropiques, il pourrait être intéressant de privilégier dans les différentes UHC des secteurs où déposer ces sédiments et privilégier ainsi la reconstitution d'habitats intéressants plutôt que de les mettre dans des fosses profondes.

Créer de tels habitats consiste également à accompagner une évolution sédimentologique des retenues et des canaux : les marges des surlargeurs ont vocation à accumuler les sédiments et éventuellement s'atterrir. Or le fait de favoriser ces habitats, s'ils sont compatibles avec les enjeux de sûreté et de ligne d'eau au sein de la retenue, est un élément favorisant la constitution d'un chenal d'écoulement préférentiel, dans lequel les flux de fines et de sables sont accélérés. Il y a donc une réelle synergie à mettre en place des actions de restauration qui ont des bénéfices pour la gestion sédimentaire.



Figure 26 : Exemple de roselière constituée sur des hauts fonds en entrée de canal usinier de Montélimar (ARALEP)

6.4 Peut-on redimensionner des systèmes d'endiguement avec le retour des sédiments (R8) ?

L'intérêt écologique des RCC est liée à plusieurs facteurs (les processus écologiques encore existants même s'ils sont amoindris, le reste de naturalité qu'ils peuvent accueillir également, une combinaison de systèmes lentiques et lotiques, une mosaïque d'habitats). Afin de restaurer les RCC, plusieurs combinaisons d'actions de restauration doivent être envisagées afin de gagner en diversité d'habitats et renouvellement ?

Il est nécessaire au préalable de travailler sur les processus naturels qui peuvent favoriser le renouvellement des formes et donc des habitats. Il s'agit donc de la fréquence des crues morphogènes (augmentation des débits réservés, lâchers plus importants de barrage), de la quantité de sédiments entrants dans le RCC et celle mobilisable. Ces processus étant amoindris, il est nécessaire de les restaurer ou de les 'remplacer en partie' en apportant du sédiment (recharge sédimentaire en grossiers ou fins) ou de mobiliser du sédiment dans les RCC excédentaires (réactivation des marges alluviales sur une grande surface avec charriage des bancs). Les débits doivent ensuite être augmentés ou favorisés pour permettre aux crues de remodeler ce paysage.

6.5 Quelles actions de restauration d'anciennes gravières (R9) ?

Les gravières peuvent revêtir un intérêt écologique pour certaines espèces ou habitats en fonction de leur configuration, notamment la diversité des habitats naturels qu'elle présente, les espèces qu'elles abritent et leur mode d'alimentation en eau. A titre d'exemple, certaines gravières à berges abruptes et profondes sont peu propices à une biodiversité élevée tandis que des gravières restaurées ou restituées après extraction avec des profils différents (berges en pente douce, îlots, berges sinueuses, etc.) le sont. Il existe de nombreux cas où les gravières sont restaurées en tant que telles à des fins écologiques pour favoriser des habitats humides et des espèces notamment. Dans le cadre de ce plan de gestion sédimentaire, il peut être intéressant de restaurer certaines gravières de manière à ce qu'elles participent activement à la biodiversité et au fonctionnement de l'écosystème fluvial.

La première action qui peut être envisagée est l'intégration de la gravière comme annexe hydraulique avec (re)connexion directe au Rhône. Il est souvent nécessaire de procéder à une restauration morphologique pour favoriser les habitats humides et diversifier les communautés végétales notamment par un comblement partiel (réalisation de hauts fonds) de la gravière. Les sédiments peuvent venir du creusement de bras secondaires (ex casiers n°9 de la Malourdie, CEN Savoie ; lacs du Meyrol, lacs du Rhône, CEN RA) avec travail en déblai/remblai où à partir de sédiments dragués sur le Rhône dans les secteurs excédentaires.

Il est nécessaire avant toute chose de réaliser un diagnostic écologique de la gravière afin de juger des effets positifs et/ou négatifs potentiels. Il est notamment courant que les gravières, souvent alimentées par les eaux de la nappe soient moins riches sur le plan trophique et abritent des espèces végétales et animales plus exigeantes et patrimoniales par rapport au Rhône au niveau trophique plus élevé. Dans ce cas, il n'apparaît pas opportun de privilégier une intégration de la gravière à l'écosystème directement en conservant une alimentation phréatique. Lorsque le diagnostic met en évidence une qualité écologique réduite, le gain écologique peut alors être important.



Figure 27 : Vue aérienne du casier de la Malourdie reconnecté au RCC de Chautagne (CEN Savoie, 2019)

6.6 Faut-il relever les débits et régimes réservés (R10) ?

Cf. fiche action R10

L'augmentation des débits réservés et la mise en place de régime réservé a fait l'objet de nombreuses évolutions depuis les années 2000, détaillées dans le rapport de Mission 4. A ce jour, des évolutions sont en question sur :

- Le canal de Miribel : sur ce linéaire une augmentation de débit dans l'état actuel du lit serait peu profitable. Une augmentation doit donc être raisonnée avec la restauration morphologique du lit envisagée, ou a posteriori, afin de maximiser les gains écologiques une fois que l'aménagement morphologique sera stabilisé ;
- Le RCC de Donzère : sur ce linéaire, le passage en régime réservé est en discussion entre les différents acteurs concernés. Les effets seront avant liés aux actions de restauration, dont la réinjection sédimentaire, qui pourront être menées et qui feront évoluer favorablement les habitats aquatiques.

6.7 Quelle peut être l'utilité de débits morphogènes (R11) ?

► Exemple de Chautagne

Sur le Vieux Rhône de Chautagne (UHC#05-CHA) l'analyse des courbes de débits classés montre un écart significatif, entre les débits théoriques et les débits réels. Il existe des doutes sur les courbes de débits classés en valeur absolue car les courbes de tarage ne sont pas régulièrement actualisées ; cependant, il n'existe pas de doute sur la fréquence de mise en eau du RCC.

Aussi, on peut considérer que les débits morphogènes sont d'une certaine manière déjà en place : pour les débits plus rares (dépassés 20% du temps), la courbe théorique montre que les déversés pour des débits supérieurs à la capacité de l'usine majorée du débit réservé (soit environ 770 m³/s) devraient avoir lieu pour 5% du temps (soit environ 18 jours par an). La courbe des débits mesurés par la CNR montre qu'en réalité, des déversés ont eu lieu sur environ 15% du temps (soit environ 54 jours/an), sur la période 1993-2018. Ces résultats bruts sont à prendre avec précaution dans la mesure où la CNR estime que le calage des lois hauteur / débit des stations hydrométriques sous les barrages de dérivation pourrait être amélioré. Toutefois, ils montrent une tendance nette de délivrance dans le Vieux Rhône de débits réels plus élevés et fréquents que la théorie ne le prévoit. Cet écart est dû principalement à des conditions de gestion et manœuvres des ouvrages hydroélectriques, programmée ou non programmés : maintenance d'un groupe, déclenchement d'un groupe, entretien de vannes, etc. Sur le Haut-Rhône, les usines hydroélectriques sont équipées de seulement 2 groupes ; ainsi, lorsque l'un des groupes est en maintenance, l'impact hydrologique est rapidement significatif : en effet, pour un débit d'équipement de 700 m³/s sur deux groupes, c'est 350 m³/s qui vont transiter dans le Vieux Rhône en complément du débit réservé. Une telle gestion peut s'apparenter à la délivrance de débits morphogènes. En effet, sur le Vieux Rhône de Chautagne, le débit de début d'entraînement des matériaux (qui peut être assimilé au débit morphogène), est donné à 400 m³/s (Bravard et Klingeman, 1993).

Avec cette donnée et les courbes de débits classés, on peut en déduire que :

- D'après la courbe des débits classés du Rhône total, ce débit était atteint avant aménagement en moyenne 130 jours par an ;
- Dans l'état actuel, d'après la courbe des débits classés théorique, ce débit est délivré en moyenne moins de 1 jour par an (0,2% du temps) ; d'après la courbe des débits classés réels, ce débit est délivré environ 7 jours par an (2% du temps), soit 10 fois plus souvent que d'après la courbe théorique.

Des écarts similaires se retrouvent dans les analyses de transport solide présentées dans la fiche UHC#05-CHA. En effet, d'après les calculs de Vázquez-Tarrío (2020) basés sur la répartition théorique des débits, la capacité de charriage dans le Vieux Rhône de Chautagne est estimée entre 500 et 2 000 m³/an. Or, le bilan sédimentaire basé sur des données bathymétriques montre que le Vieux Rhône, qui ne bénéficie pas d'apports grossiers depuis l'amont, s'est déstocké en moyenne de 13 000 m³/an depuis 2000, et que ce déstockage était de 27 000 m³/an avant 2000, dans un contexte sans extraction (sauf en aval au pont de la Loi, ce qui a pu induire une érosion régressive). Sur les déstockages précédents, une part des volumes est constituée par la matrice des alluvions grossières, composée de sables et de limons, qui sont remobilisés en suspension et ne doivent pas être comptabilisés dans le charriage. Toutefois, même en considérant que la part des éléments fins représente 30 à 50% des volumes déstockés, il existe bien des écarts importants entre les capacités de

charriage théorique (500 à 2 000 m³/an) et le déstockage « bathymétrique », qui serait d'environ 7 000 m³/an de matériaux charriés (valeur retenue dans la fiche UHC#05-CHA).

Les calculs pourraient être basés sur d'éventuelles hypothèses inadaptées concernant des données d'entrée (granulométrie, lignes d'eau), mais il est fort probable que les vraies causes soient liées aux hypothèses hydrologiques retenues pour les débits classés. Si tel devait être le cas, on pourrait retenir pour le RCC de Chautagne que, quelle que soit la fréquence des déversés, le flux de charriage serait en moyenne de 1 000 m³ par jour de transport solide, ce qui est une valeur réaliste.

Cet exercice montre que le Vieux Rhône de Chautagne bénéficie probablement, et ce depuis plusieurs années, de débits supérieurs à ceux que prévoient les consignes de gestion, et que ces débits peuvent être assimilés à des « lâchers morphogènes » au sens où ils augmentent le nombre de jours annuels avec une activité sédimentaire. Inversement, si les consignes de gestion étaient appliquées strictement depuis plusieurs années, le Vieux Rhône de Chautagne ne présenterait probablement pas autant d'activité sédimentaire que dans l'état actuel, et les enjeux d'engrèvement au pont de la Loi seraient probablement moindres.

Par extrapolation, il s'avère que d'autres UHC du fleuve se retrouvent dans une telle situation, le cas de Chautagne étant un cas où les écarts sont majorés du fait de la présence de deux groupes de turbines seulement. Dès qu'un groupe est en maintenance, la moitié du débit d'équipement (700 m³/s, soit 350 m³/s pour la moitié) est déversée dans le RCC de Chautagne.

► Analyse générale

Les barrages peuvent avoir des impacts hydrologiques plus ou moins marqués : le régime des crues (débit, pic, fréquence, durée) peut être modifié et de fait, l'occurrence des débits morphogènes naturels altérée. Ceci peut engendrer des effets géomorphologiques plus ou moins marqués, parmi lesquels on retrouve fréquemment une altération des processus sédimentaires, tels que des dépôts importants de sédiments fins ou grossiers, ou, au contraire, l'absence totale de transport solide, le manque de renouvellement des formes fluviales ou encore un développement exacerbé de la végétation terrestre ou aquatique. Ces altérations géomorphologiques peuvent elles-mêmes engendrer différents types d'impacts : des impacts « écologiques » au sens large, en entraînant notamment des altérations de la structure et/ou de la disponibilité des habitats aquatiques et rivulaires indispensables au bon fonctionnement des biocénoses voire des impacts « sociétaux ».

Les lâchers morphogènes correspondent à des débits relativement élevés lâchés par les barrages afin de générer des changements dans les caractéristiques physiques des lits fluviaux (par exemple, décolmatage, désensablement, élargissement des bandes actives alluviales, augmentation de la charge sédimentaire grossière, gestion de la végétation riveraine...) et de créer ou d'améliorer les habitats aquatiques et riverains.

Deux approches scientifiques ont conduit à aborder la question de débits qui pourraient agir sur les formes fluviales et être donc morphogènes, une approche dite de « géométrie hydraulique » et une approche classique de mesure du transport solide.

Dans l'approche dite de « géométrie hydraulique », on cherche à prédire la géométrie d'un chenal, principalement sa profondeur et sa largeur à partir d'une valeur de débit (débit pleins bords, débit dominant / Q1,3 an ou Q 1,5 an). Dans l'approche de mesure du transport solide, on cherche à établir la valeur du débit de début de mouvement ou débit critique (par peinture de particules, les marquages divers (pit tags), les hydrophones). Ce débit constitue ainsi un seuil au-delà duquel le débit devient alors significativement morphogène.

Le débit dominant ou efficace est classiquement obtenu en évaluant pour chacun des débits d'une courbe de débits classés le transport solide résultant (via une formule semi-empirique ou une courbe de tarage hydrosédimentaire). En faisant le produit entre le flux solide et l'occurrence, on peut retrouver un pic de transport solide (débit dominant).

Loire et al. (2020) ont établi une typologie des types de lâchers en fonction des objectifs de ceux-ci (et des enjeux qu'ils touchent) (Figure 28).

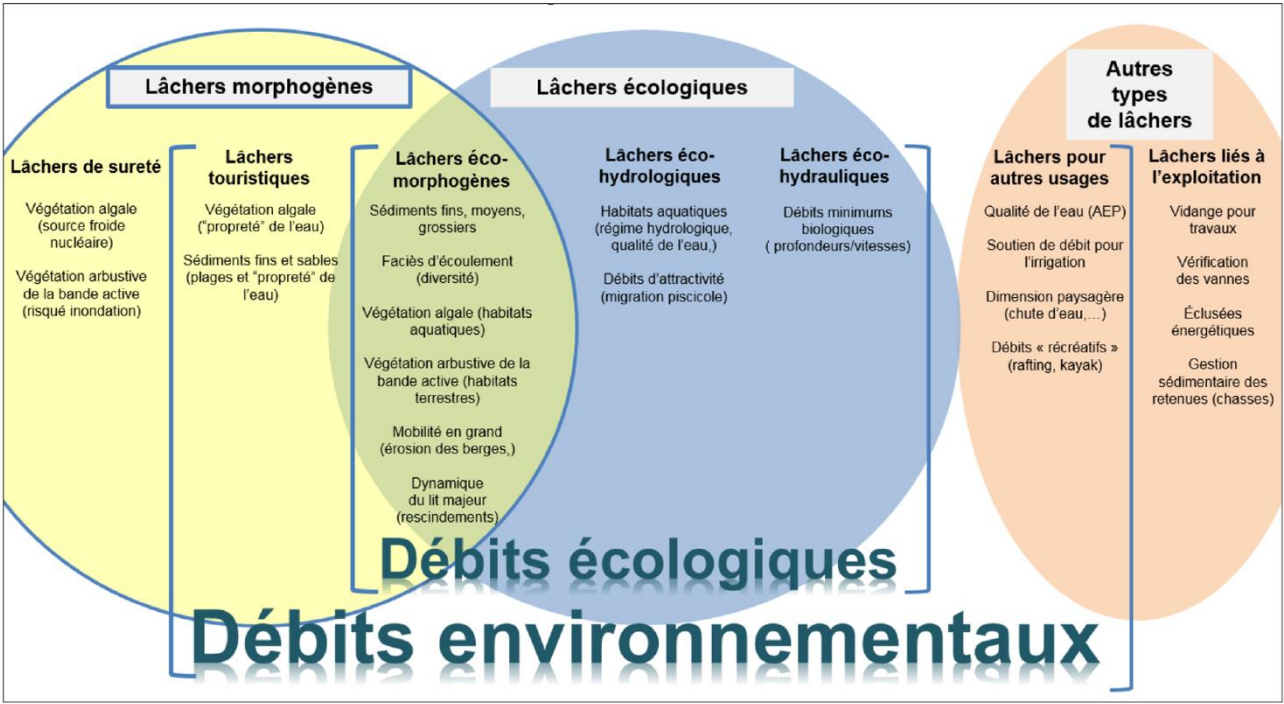


Figure 28 : Typologie des lâchers en fonction des enjeux visés (d’après Loire et al. 2020)

Geomorphic action	Remove fine non cohesive sediment	Remove sand	Move coarse or fine cohesive or interstitial sediment	Activate geomorphic units and bars erosion	Activate river mobility and erosion	Activate floodplain
	Discharge / Duration					
Key geomorphic indicator	- Clogging level on targeted geomorphic units - Fine sediment thickness - Water depth - SSC / Fine sediment budget	- Clogging level on targeted geomorphic units - Sand thickness - Water depth - Particule covered distance - Bed active scour layer - Sand sediment transport estimation / Sediment budget	- Same indicators as "remove fine non cohesive sediment" for cohesive fine sediment - Interstitial clogging level - Particule covered distance - Bed active scour layer - Bedload transport estimation / Sediment budget	- Geomorphic units comparison - Bank index - Bed active scour layer - Topographic change	- Riverbanks erosion index - Plan evolution - Sinuosity index - Topographic change	- Water depth on floodplain - Suspended sediment on floodplain - Topographic change
Key biologic indicator	- Number of spawning area - Fish biomass - Fish density - Fish growth - Macroinvertebrate index	- Number of spawning area - Fish biomass - Fish density - Fish growth - Macroinvertebrate index	- Number of spawning area - Fish biomass - Fish density - Fish growth - Macroinvertebrate index - Habitat diversity	- Number of spawning area - Fish biomass - Fish density - Fish growth - Macroinvertebrate index - Habitat diversity - Type, density and biomass of fauna	- Number of spawning area - Fish biomass - Fish density - Fish growth - Macroinvertebrate Index - Habitat diversity - Type, density and biomass of fauna - Type, density and biomass of flora	- Habitat diversity - Type, density and biomass of fauna - Type, density and biomass of flora
Key aquatic and terrestrial vegetation indicator	-	-	- Type of aquatic vegetation - Density - Biomass - Fine and coarse sediment transport	- Type of aquatic vegetation - Density - Biomass - Bed active scour layer - Topographic change - Type, density and biomass of flora	- Type of aquatic vegetation - Density - Biomass - Bed active scour layer - Topographic change - Type, density and biomass of flora	- Type of aquatic vegetation - Density - Biomass - Suspended sediment on floodplain - Topographic change

Figure 29 : Indicateurs de suivi et de succès pour analyser les effets des lâchers morphogènes (Loire, 2019)

Loire (2019) recense différents types de lâchers éco-géomorphologiques qui se distinguent par différents niveaux d'ambition allant de la gestion de l'état du chenal à l'évolution géométrique. Leur mise en œuvre nécessite une phase de tests et d'évaluation du succès de ces tests pour s'inscrire dans une démarche d'amélioration de cette approche.

Des recherches sont encore nécessaires pour dimensionner les rejets d'eau et proposer des mesures alternatives ou complémentaires, comme la nécessité d'effectuer plusieurs débits de pointe afin d'améliorer les résultats. De même, les effets à long terme sont encore mal connus, même si des informations sont disponibles sur quelques cours d'eau. Pour éclairer la gestion future des flux, la comparaison des expériences de divers contextes pourrait être améliorée par une analyse multicritère prenant en compte la surface drainée, le régime d'écoulement, les coûts de mise en œuvre (y compris la perte de revenus énergétiques et la surveillance et les frais d'études).

Exemple de bilan économique et comparaison avec la gestion actuelle sur l'Isère (Loire 2019)

Le lâcher de 2018 sur l'Isère a été réalisé dans un contexte de forte hydraulité. L'expérimentation a donc pu être testée à moindre coût car les débits n'ont pas été fortement soutenus par les usines. Les principaux préjudices économiques sont liés aux pertes énergétiques dues à l'arrêt de la centrale de Randens et aux arrêts de production imposés sur les aménagements de la Bathie et de Montrigon pour la réalisation du suivi post expérimentation. Au total, l'expérimentation a coûté 200 000 euros. En année moyenne, d'après les statistiques hydrologiques et économiques, le coût d'une telle expérimentation peut s'élever à 1 170 000 €HT pour un prix du MW/h de 41,5 € (coût à réévaluer régulièrement au regard de la volatilité observée sur les marchés).

La mobilisation de bureaux d'études pour réaliser les mesures s'élève à environ 200 000 €HT. Les coûts liés à la mobilisation de l'ingénierie interne d'EDF (hors exploitation) à 70 000 €HT. Au total, l'expérimentation de 2018 a donc coûté 470 000 €HT. Cette même expérimentation pourrait coûter près de 1 500 000 €HT si elle venait à être reconduite sur les mêmes bases lors d'une hydrologie moyenne. Pour être tout à fait complet, il conviendrait de rajouter à ces montants ceux liés aux études préalables nécessaires au dimensionnement (modèle physique : 1 400 000 €HT, suivi géomorphologique historique des bancs ; 100 000 €HT et participation à la thèse (Jourdain, 2017) portant sur l'étude de la végétation : 8 000 HT. Entre 60 et 70% de ces coûts ont été supportés par EDF et l'autre partie par l'Agence de l'Eau.

Afin de comparer sur le long terme la gestion actuelle (travaux et essartements réguliers) avec une gestion par lâchers, trois scénarios ont été construits. Le linéaire pris en compte pour la simulation correspond au tronçon entre Albertville et la confluence avec l'Arc. C'est en effet sur ce linéaire de l'Isère uniquement que les lâchers sont hydrologiquement significatifs et donc potentiellement efficaces. Le premier scénario (Tableau 14) est basé sur :

- Des bancs ayant fait l'objet de travaux à l'année 0 ;
- Une mise en œuvre annuelle de lâchers sur la base du coût moyen annuel (lâcher et suivis : 1 500 000 €HT) défini précédemment ;
- L'hypothèse qu'une faible proportion (15%) de la surface des bancs ne sera jamais remobilisée par les lâchers. En effet, le bilan de cette expérimentation montre qu'une part importante des bancs n'est pas mobile et risque d'être végétalisée et donc de devoir à terme faire l'objet de travaux d'entretien. Une estimation du coût des travaux a été effectuée par rapport au coût des travaux effectués en 2017 par le SISARC en effectuant un rapport de coût par kilomètre sans actualisation (1 100 000 €HT) ;
- Une périodicité de travaux fixée par sécurité à 10 ans. Dans la réalité, les précédents travaux sur la zone ont été réalisés en 1999 et 2017 ;
- La gestion de la végétation sur les bancs non mobiles tous les 3 ans pour éviter le stade de développement arbustif favorisant davantage la fixation et l'exhaussement des bancs.

Le second scénario prend en compte une proportion de 30% de bancs non mobiles. Seuls les coûts des travaux et des essartements sont donc modifiés.

Enfin, le dernier scénario « sans lâcher » correspond à la gestion actuelle (travaux et essartements) de la Combe de Savoie. Les essartements ont cependant actuellement lieu tous les 3 ans dans la Combe de Savoie. Dans notre calcul, les essartements sont effectués tous les ans pour maximiser la réussite de travaux. La période entre travaux est la même que pour les autres scénarios. Les travaux concernent par contre 100% des bancs.

Le coût de revient des lâchers d'eau est clairement impactant par rapport au coût des travaux sur le long terme. Le rapport est du simple au double, que les surfaces de bancs non mobiles soient faibles (15%) ou plus conséquentes (30%). En revanche, écologiquement et environnementalement (bilan carbone par exemple), le recours à des lâchers fait sens par rapport à des travaux en rivière néanmoins le corridor fluvial, endigué à l'extrême, n'offre pas une grande diversité écologique. Le gain écologique est toutefois difficile à chiffrer.

	Scénario lâcher (15%)		Scénario lâcher (30%)		Scénario sans lâcher	
Année 0	Travaux		Travaux		Travaux	90 000
Année 1	Lâcher	1 500 000	Lâcher	1 500 000	Essartements	90 000
Année 2	Lâcher	1 500 000	Lâcher	1 500 000	Essartements	90 000
Année 3	Lâcher	1 500 000	Lâcher	1 500 000	Essartements	90 000
	Essartements	15 000	Essartements	30 000	Essartements	90 000
Année 4	Lâcher	1 500 000	Lâcher	1 500 000	Essartements	90 000
Année 5	Lâcher	1 500 000	Lâcher	1 500 000	Essartements	90 000
Année 6	Lâcher	1 500 000	Lâcher	1 500 000	Essartements	90 000
	Essartements	15 000	Essartements	30 000	Essartements	90 000
Année 7	Lâcher	1 500 000	Lâcher	1 500 000	Essartements	90 000
Année 8	Lâcher	1 500 000	Lâcher	1 500 000	Essartements	90 000
Année 9	Lâcher	1 500 000	Lâcher	1 500 000	Essartements	90 000
Année 10	Travaux	1 100 000	Travaux	2 200 000	Travaux	6 586 286
	Total	14 630 000	Total	15 760 000	Total	7 666 286

Tableau 14 : Comparaison des scénarios de gestion avec ou sans lâcher sur la Combe de Savoie. Les montants sont indiqués en euros hors taxes

Figure 30 : Comparaison des scénarios de gestion avec ou sans lâcher sur l'Isère en Combe de Savoie (montant en €HT) (Loire, 2019)

En conclusion, on peut retenir pour le Rhône que :

- Des débits morphogènes n'auront pas le même impact économique sur un RCC en Chautagne que sur le RCC de Péage-de-Roussillon, du fait des débits morphogènes plus élevés dans le second cas et des impacts hydroélectriques également plus élevés ;
- La mise en place de débit morphogène nécessite des expérimentations afin de confirmer les objectifs, organiser les questions de sécurité, caler les données techniques tels que les débits, les durées, et les vitesses de montée et de descente, etc. ;
- Des débits morphogènes conduisent à majorer le transport solide et ne sont pas bénéfiques globalement lorsqu'un tronçon est en déficit sédimentaire (c'est-à-dire que le lâcher expulsera plus de volumes sédimentaires qu'il ne peut en entrer).

7. Quels outils pratiques pour une réinjection sédimentaire ?

7.1 Comment évoluent les pratiques de restitution des sédiments grossiers au fleuve ?

7.1.1 Evolution des actions de réinjection

Cette partie vient compléter le retour d'expérience de la Mission 4 sur les réinjections sédimentaires.

La chronologie ci-dessous résume l'évolution des pratiques de gestion sur le Rhône à travers notamment la destination des matériaux.

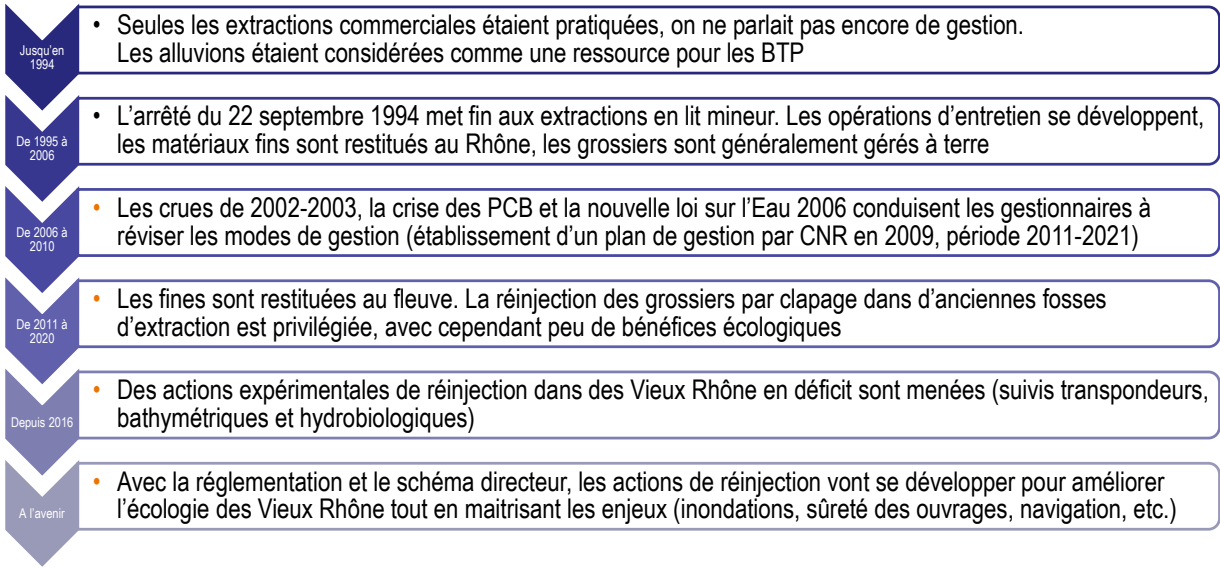


Figure 31 : Evolution des pratiques de gestion au cours du temps (F.Laval et al., IS Rivers 2022)

7.1.2 Réinjections récentes de sédiments

Dans le cadre des dragages d'entretien, CNR ou EDF remettent les sédiments au Rhône lorsque cela est possible. La restitution au Rhône est systématique pour les sédiments fins excepté en cas d'enjeu de pollution dans les sédiments. Pour les sédiments grossiers, les pratiques ont fortement évolué comme indiqué précédemment, ce qui est confirmé par les chiffres ci-dessous.

Avec les opérations les plus récentes, qui inclut à la fois les restitutions en retenue (G4) et en RCC (R1), il apparaît que 246 000 m³ de sédiments grossiers ont été restitués au Rhône entre 2017 et 2020 (soit 61 500 m³/an) et que 400 000 m³ ont été réinjectés entre 2015 et 2019 (80 000 m³/an). Les projets à venir en 2020/2021 représentaient quant à eux 170 000 m³ de matériaux grossiers, soit 85 000 m³/an, ou au total 570 000 m³ entre 2015 et 2021 (soit 81 000 m³/an). Ces rythmes de réinjection sont équivalents au double du rythme constaté en Mission 4 sur la période 1995-2018 (42 000 m³/an).

CNR mène des projets de restauration des marges et des îlons du Rhône depuis de nombreuses années. Dans le cadre de ces chantiers, les sédiments sont restitués directement au Rhône lorsque ceux-ci ne sont pas pollués. Ainsi, ces dernières années, les volumes suivants ont été restitués au Rhône lors des travaux de restauration :

- Péage de Roussillon (2018) : 7 000 m³
- Donzère-Mondragon – Lône des Dames/Grange écrasée (2019) : 20 000 m³
- Donzère-Mondragon – Lône de Banc rouge (2019) : 10 000 m³

D'autres projets sont également en cours d'étude. Ils concernent la restitution de sédiments grossiers dans le Vieux-Rhône de Pierre-Bénite (Ciselande), le Vieux-Rhône de Beauchastel (Charmes) et le Vieux-Rhône de Logis Neuf (Géronton) pour des volumes importants : 180 000 m³ de matériaux grossiers sur le seul projet de Pierre-Bénite (communication CNR / novembre 2021).

La carte ci-dessous présente la synthèse des matériaux grossiers restitués au fleuve sur la période 2015-2019, que ce soit suite à des dragages d'entretien ou des restaurations écologiques.

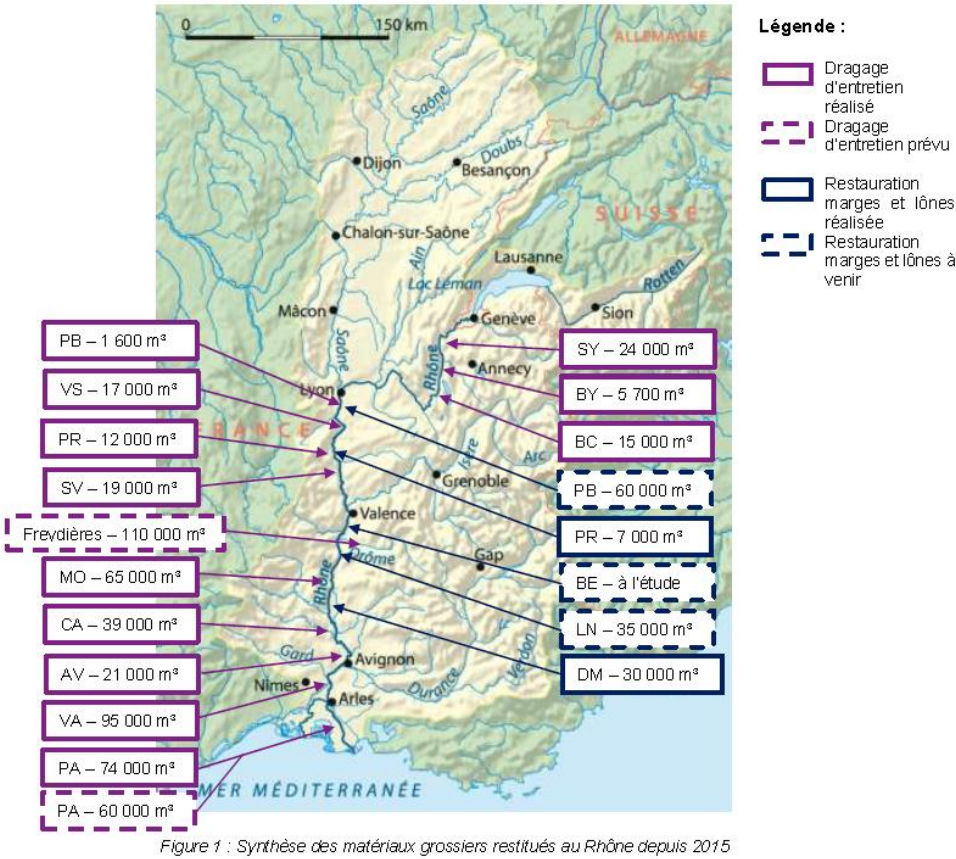


Figure 1 : Synthèse des matériaux grossiers restitués au Rhône depuis 2015

Figure 32 : Synthèse cartographique des matériaux grossiers restitués au Rhône 2015 et 2019 (CNR)

CHUTE	SITE DE DRAGAGE	ANNEE	VOLUME (m³)	LIEU DE RESTITUTION
SEYSEL	Les Ussets	2020	23 800	Amont confluence Rhône-Usses
BELLEY	Chenal navigable entre pont de la Loi et pont SNCF Vions	2015	5 700	PK - 133.400
BRENIER CORDON	Chenal île Peyrieu	2017	15 390	PK 110.150 à 110.800
PIERRE BENITE	Yzeron	2015	1 561	PK 1.3 à 2
VAUGRIS	Chenal à la confluence du Gier	2015	13 000	PK 19.500
VAUGRIS	Gère	2016	4 038	PK 28.900
PEAGE DE ROUSSILLON	Chenal de navigation PK 42.500	2019	12 050	PK 42.200 à 42.300
SAINT VALLIER	Chenal au droit du Ruisseau des claires	2015	1 695	PK 62.400
SAINT VALLIER	Riverolles	2015	4 890	PK 81.00
SAINT VALLIER	Confluence de la Cance amont	2017	10 850	PK 77.500
SAINT VALLIER	Chenal de navigation PK 66.300 à 66.700 RG	2018	1 865	PK 66.300 à 66.700
BAIX-LE-LOGIS-NEUF	Piège à graviers de la Drôme	2016 / restitution à venir	110 000	Lac des Freydières
MONTELMAR	Chenal Lafarge	2016	28 470	PK 156.200 à 157.600
MONTELMAR	Le Roubion	2019	37 000	Plan d'eau du Meyrol
CADEROUSSE	La Cèze	2018	39 479	PK 223.200 à 224.600
AVIGNON	Déversoir de Roquemaure	2017	21 200	PK 223.500
VALLABREGUES	Durance aval	2017	95 360	PK 257.700 à 258.000 et 261.000 à 261.500
PALIER D'ARLES	Amont défluent, défluent, quais et Ségonnaux	2015	53 000	PK 285.500 à 286.500

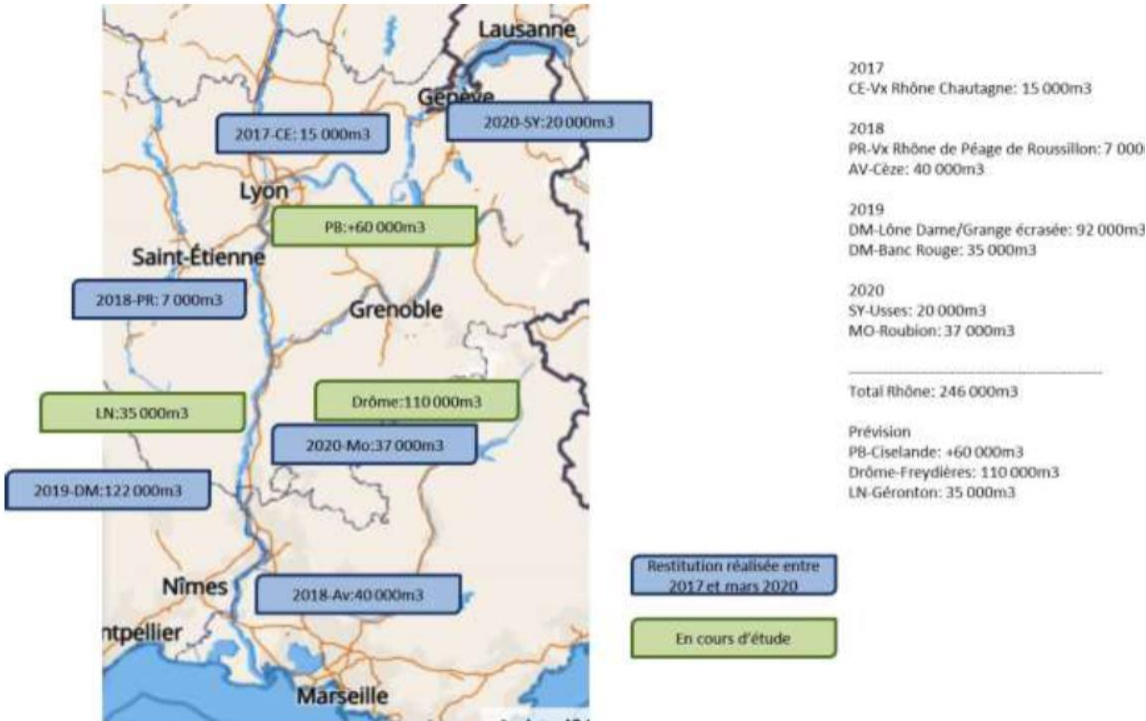


Figure 1 : Restitution de sédiments grossiers au Rhône sur la période 2017-2020

Figure 33 : Restitution de sédiments grossiers au Rhône sur la période 2017-2020



Figure 34 : Recharge en andains et régalinge sous le niveau d'eau pour les matériaux de la lône de la Grange Ecrasée (UHC#19-DZM / RCC de Donzère)

7.2 Quels sont les gains attendus ?

7.2.1 Généralités

Une réinjection sédimentaire peut contribuer 1) à rehausser les fonds alluviaux (suite à une incision), 2) à restaurer un flux de charriage (suite à une privation amont), et 3) à restaurer conjointement ces deux processus. En anglais, on utilise généralement les termes de « sediment augmentation », « sediment nourishment » ou encore « sediment replenishment » (Kondolf, 2014).

Kondolf (2014) indique que, pour compenser le manque d'apport de sédiments en aval des barrages, des sédiments peuvent être ajoutés au chenal, selon une approche appelée en français « réinjection sédimentaire ». Le plus souvent, les sédiments ajoutés sont du gravier et du sable, et dans les rivières avec des espèces de poissons remarquables et d'autres espèces écologiques sensibles ; il existe souvent des interdictions d'augmenter la turbidité, ce qui limite l'ajout de sédiments. La plupart des exemples à ce jour proviennent des États-Unis, du Japon et de l'Europe, et la majorité concerne la restauration de l'habitat. Dans la plupart des cas, les sédiments ajoutés proviennent de carrières de graviers dans la plaine inondable ou d'autres sources similaires, mais dans certains cas (comme la rivière Middle American à Ralston Afterbay et pour plusieurs barrages au Japon), les sédiments sont prélevés dans les dépôts du delta du réservoir ou des pièges à sédiments construits à l'extrémité amont du réservoir.

L'une des plus grandes réinjections sédimentaires en cours est celle du Rhin sous le barrage d'Iffezheim (cf. Mission 5), où une moyenne de 170 000 m³ de sédiments grossiers est ajoutée au chenal chaque année, pour empêcher l'incision du canal et les conséquences dommages aux infrastructures comme les ponts, les traversées de pipelines, les remblais et le chenal navigable. Pourtant, la plupart des projets de réinjection sont entrepris pour restaurer l'habitat aquatique, en particulier pour les poissons. La réinjection de sédiments peut être mise en œuvre en plaçant des sédiments directement dans la partie courante du cours d'eau, mais elle est plus communément opérée à partir d'un dépôt de gravier le long des marges de la rivière, qui peut être mobilisé par des débits élevés (par exemple, des stocks dans le chenal ou des bancs ponctuel). De plus en plus, les projets de réinjection sont conçus pour restaurer une partie de la charge de graviers de la rivière sous le barrage, afin que la rivière elle-même puisse transporter et redistribuer le gravier sur les bancs et les radiers naturels, qui ont une grande valeur en habitats aquatiques.

Moiroud et Piégay (2017) complètent les éléments précédents en faisant part du retour d'expérience des réinjections sur le Rhin. La recharge par injection mécanique dans des zones hydrauliquement actives est plus efficace que la recharge par érosion latérale. Les points vigilance suivants sont mis en avant :

- Importance de tester sur des modèles et in situ à petite échelle pour évaluer les risques et les bénéfices : connaître les volumes charriés / crues, spatialisation des érosions-dépôts, tri granulométrique ;
- Coupler recharges et ré-élargissements pour diversifier les formes fluviales, sinon risque de simple transfert aval sans création de zones différenciées de dépôt ;
- Incertitudes sur les processus de transport en grandes rivières, suivis partiels, etc. : il est nécessaire de combiner les méthodes de monitoring ;
- Bien définir les objectifs et déployer les indicateurs appropriés : sur le Rhin, les effets des recharges sur les communautés biologiques (invertébrés, macrophytes, poissons) sont difficiles à mettre en évidence car ils se confondent avec les effets des crues, variations du débit réservé, qualité de l'eau, domination d'espèces invasives (cf. §.7.2.2).

7.2.2 Gains écologiques

► REX de la réinjection en Chautagne en 2016

Dans le cadre de la réinjection de 15 000 m³ en Chautagne en 2016, un suivi a été réalisé (CNR, 2018), sur le volet bathymétrique, mais également sur le volet hydrobiologique. Des indices IBGN ont été établis.

Le Haut-Rhône en général et le Vieux-Rhône de Chautagne en particulier présentent une qualité des peuplements d'invertébrés benthiques globalement bonne (résultats RCS et suivi Rhône-éco). Le protocole mis en place fait ressortir des peuplements diversifiés et accueillant des taxons d'une sensibilité élevée, et ce, dès la campagne en état initial. Le protocole mis en place permet d'avoir une vision globale de la qualité hydrobiologique de la station mais reste peu sensible aux variations fines de la qualité d'habitat.

On notera cependant qu'entre 2016 et 2018 les indices des deux stations connaissent une amélioration des groupes faunistique indicateurs, de la diversité et une répartition plus large des taxons sensibles. Il est probable que ces évolutions soient largement imputables aux crues de janvier 2018. Il est très net (observation de terrain, vidéo) que ces crues ont modifié la nature des fonds, elles ont notamment permis de décolmater les substrats graveleux et par conséquent d'améliorer leur capacité biogène.

Il n'est donc pas évident de faire la part des choses entre les gains induits par la remise à disposition de matériaux graveleux et les variations saisonnières induites entre autres par les fluctuations hydrologiques. Une prolongation de ce suivi dans le temps aurait pu permettre d'obtenir des éléments plus fins mais l'absence d'état initial sur une chronique longue empêche de pouvoir appréhender les variations saisonnières.

► REX des réinjections sur le Rhin

Les communautés de macro-invertébrés constituent un compartiment biologique couramment utilisé dans les études d'évaluation d'actions de restauration mais montrent le plus souvent des réponses contrastées selon les contextes environnementaux ou les types d'action mis en œuvre.

La dynamique des communautés de macro-invertébrés a été analysée par Staentzel et al. (2022) de 2014 à 2020 dans trois sections du Vieux Rhin, avant et après restauration, le long d'un tronçon naturel résiduel à l'aval du barrage de dérivation de Kembs (France) :

- (i) une section non restaurée,
- (ii) une section restaurée en février-mars 2015 par une injection sédimentaire de 18 340 m³,
- (iii) une section restaurée en mars-avril 2016 par une autre injection sédimentaire de 30 000 m³. Ces deux injections sédimentaires avaient pour but d'augmenter l'hétérogénéité des habitats en affinant la taille des particules dans le chenal central de la rivière.

Les travaux de restauration sur le Rhin montrent qu'après réinjection sédimentaire, les habitats se sont diversifiés, et on peut observer une plus grande hétérogénéité d'habitats (lenticques vs lotiques). La mise en place d'épis a permis une augmentation de la richesse taxonomique globale de la faune benthique. Un nouveau groupe fonctionnel supplémentaire est apparu après travaux : les espèces fouisseuses adaptées aux zones de sédimentation.

Cependant, Staentzel et al. ont également constaté que la dynamique des communautés de macroinvertébrés ne reflétait pas de manière significative les effets attendus de la restauration des habitats. En effet, les principaux moteurs de la dynamique locale ne sont pas seulement liés à l'action de restauration en elle-même, mais elle est régie voire modifiée par d'autres facteurs tels que la variabilité saisonnière, les événements hydrologiques, les travaux liés à la restauration, les invasions biologiques ou encore par la qualité chimique de la rivière.

► Autres gains potentiels

Les travaux de Marteau et al (2022) ont montré que la restauration des formes n'était pas suffisante pour restaurer les fonctions thermiques dans leur dimension spatiale sur les 3 cas d'étude présentés. Malgré des formes montrant divers degrés de récupération, le régime thermique des tronçons réhabilités (c'est-à-dire le gradient de température, la densité des nappes d'eau froide, etc.) n'a pas réussi à se rétablir.

Les travaux montrant que les gains sur les fonctions thermiques de cours d'eau restaurés sont associés à des gains écologiques demeurent une question scientifique à creuser.

Avec le nombre croissant de programmes de réhabilitation et une pression croissante des changements globaux sur les rivières, Marteau et al. (2022) suggèrent que la surveillance de la température de l'eau devienne une partie courante des projets de réhabilitation.

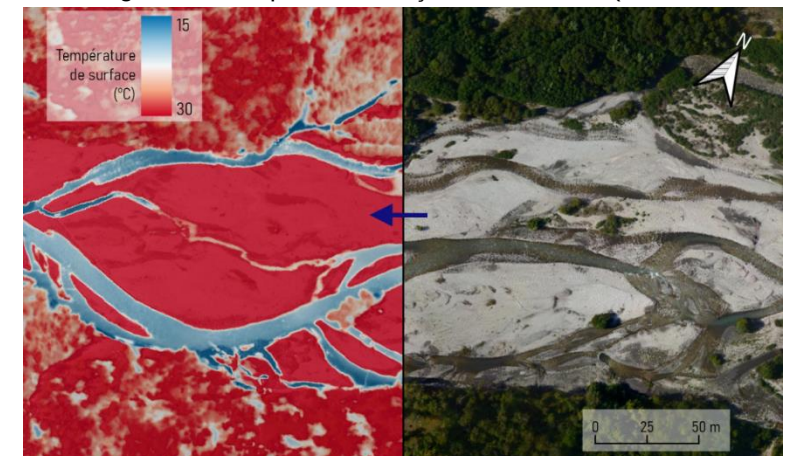


Figure 35 : Exemple de rendu d'image infra-rouge pour l'analyse de la thermie d'un cours d'eau (Marteau, 2022)

7.3 Quels indicateurs de dimensionnement ?

Le dimensionnement d'une opération de réinjection sédimentaire doit se déterminer en termes de volumes nécessaires, volumes disponibles, granulométries du lit en place, granulométries des matériaux apportés, dynamique sédimentaire du lit, transport de sédiment, modalités de réinjection, etc. Il s'agit donc d'une action complexe qui doit être étudiée attentivement dans son format initial, avant éventuellement d'être renouvelée avec de nouvelles conditions.

Sont proposés ci-dessous des indicateurs d'aide au dimensionnement des actions, dont certains déjà utilisés en Mission 2, qui sont recommandés en Mission 9 pour le suivi et l'actualisation du schéma directeur.

7.3.1 Quels outils de quantification des flux ?

Le tableau ci-dessous résume l'état de l'art actuel pour les estimations théoriques et les quantifications des flux fins, sableux et grossiers.

Tableau 15 : Bilan des données exploitées par type de flux sédimentaire

Cours d'eau	Type de flux	Données théoriques	Données de validation
Rhône	Grossiers	Proportion de grossiers d'après modèle GTM de Recking, 2016) Diamètres max remobilisable en crue	Bilan sédimentaire d'après bathymétries Expertise du fonctionnement
	Sables	Courbes de tarage ponctuelles / Qs = f(Q) Proportion de sables d'après modèle GTM de Recking, 2016)	Bilan sédimentaire d'après bathymétries Mesures ponctuelles par prélèvements et/ou AdCP
	Fines (MES)	Modèles de bassins versants	Mesures MES au niveau de réseau de station de suivi du Rhône
Affluents	Grossiers	Etudes de bassins versants (capacités de charriage)	Bilan des volumes dragués aux confluence Expertise du fonctionnement
	Fines (MES)	Etudes de bassins versants (estimation des flux de MES)	Mesures MES au niveau de réseau de station de suivi du Rhône

7.3.2 Puissance spécifique

Il a été démontré depuis de nombreuses années que les capacités d'ajustement d'un cours d'eau étaient en grande partie fonction de sa puissance spécifique. Deux seuils de puissance spécifique ont été identifiés dans la littérature (Malavoi & Bravard, 2010) :

- un seuil « majeur » aux environs de 35 W/m², au-dessus duquel la puissance naturelle de cours d'eau anciennement chenalisés a permis à ces derniers de réajuster leurs formes et de retrouver petit à petit une géométrie plus naturelle ;
- un seuil mineur aux environs de 25 W/m², en dessous duquel la dynamique n'a pas permis de retour à la morphologie primitive.

Cet indicateur est utile notamment pour apprécier la capacité du cours d'eau à évoluer latéralement (mobilité latérale). Cependant, cet indicateur n'est pas toujours bien approprié car trop intégratif et dépendant de la qualité des données (débits de pleins bords, largeur en eau). Les résultats synthétisés pour le Rhône en Mission 2 sont rappelés ici pour mentionner les ordres de grandeur, mais ils doivent être pris avec précaution, et servent essentiellement à hiérarchiser les Vieux Rhône entre eux.

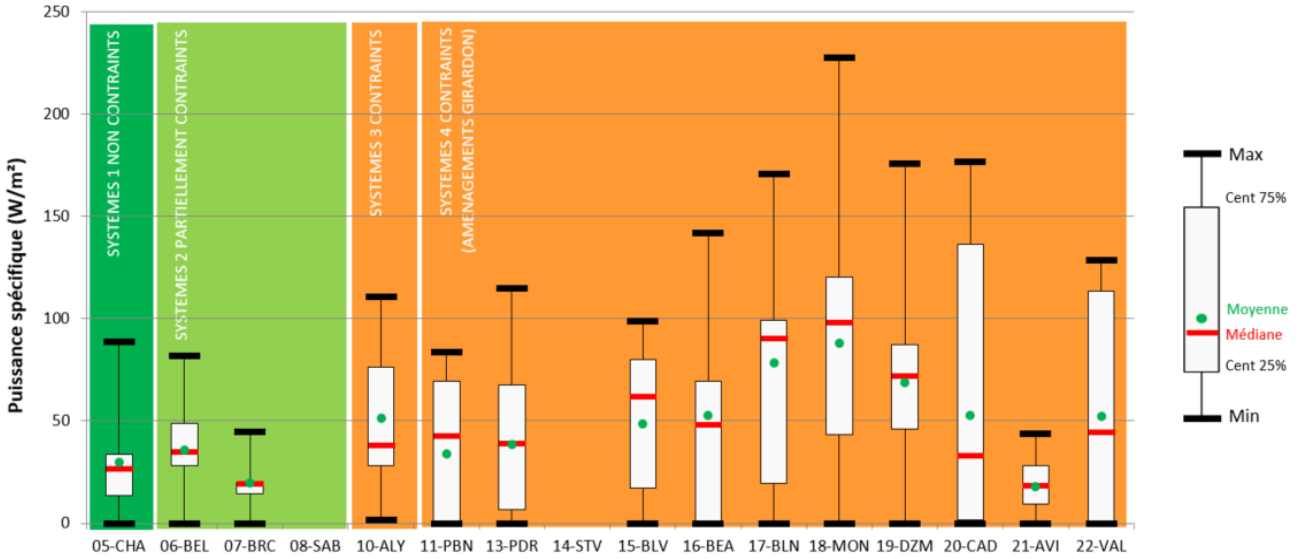


Figure 36 : Puissances spécifiques caractéristiques dans les Vieux Rhône synthétisées par UHC (d'après données Gaydou, 2013)

7.3.3 Diamètre maximal remobilisable (Dmax)

Les pentes de ligne d'eau et les niveaux d'eau obtenus avec un modèle hydraulique permettent de déterminer, à l'aide d'une contrainte critique de mise en mouvement ou coefficient de Shields (θ_c), le diamètre maximal des particules mobilisables pour un événement de crue donné selon l'équation suivante :

$$D_{max} = \tau \cdot [\theta \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g]^{-1}$$
 avec τ de la forme : $\tau = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot i$

Avec :

- τ : contrainte de cisaillement (N/m²)
- ρ : masse volumique des sédiments (2650 kg/m³)
- ρ_s : masse volumique de l'eau (1000 kg/m³)
- g : accélération de la pesanteur (9,81 m.s⁻²)
- θ : contrainte critique de Shields (adimensionnel)
- R_h : rayon hydraulique (m)
- i : pente d'énergie de la ligne d'eau (m/m)

θ_c : contrainte critique variant entre 0,03 et 0,06. On notera que 0,03 est une valeur communément retenue pour une granulométrie étendue (Parker, 2003) ; 0,06 est une valeur relativement élevée caractérisant un lit avec des matériaux plutôt grossiers, imbriqués et/ou présentant une tendance au pavage.

De tels calculs ont été menés en Mission 2 à partir de contraintes de cisaillement fournies par l'OSR (Vázquez-Tarrío, 2018, 2020) pour l'ensemble du Rhône. Ils ont été repris par BURGEAP (2021) dans le cadre d'une étude de faisabilité de réinjection de matériaux dragués au Pont de la Loi (UHC#05-CHA).

Les résultats sont présentés sur les figures suivantes.

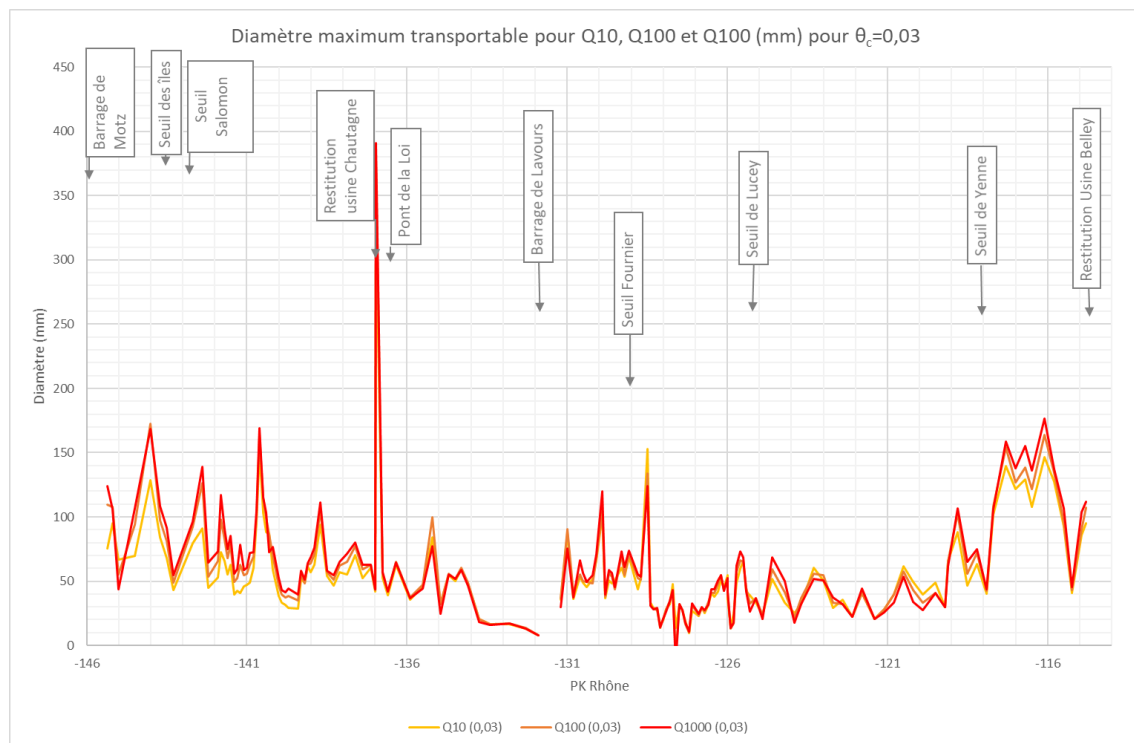


Figure 37: Diamètres maximums transportables pour Q10, Q100 et Q1000 (mm) pour $\theta_c=0,03$

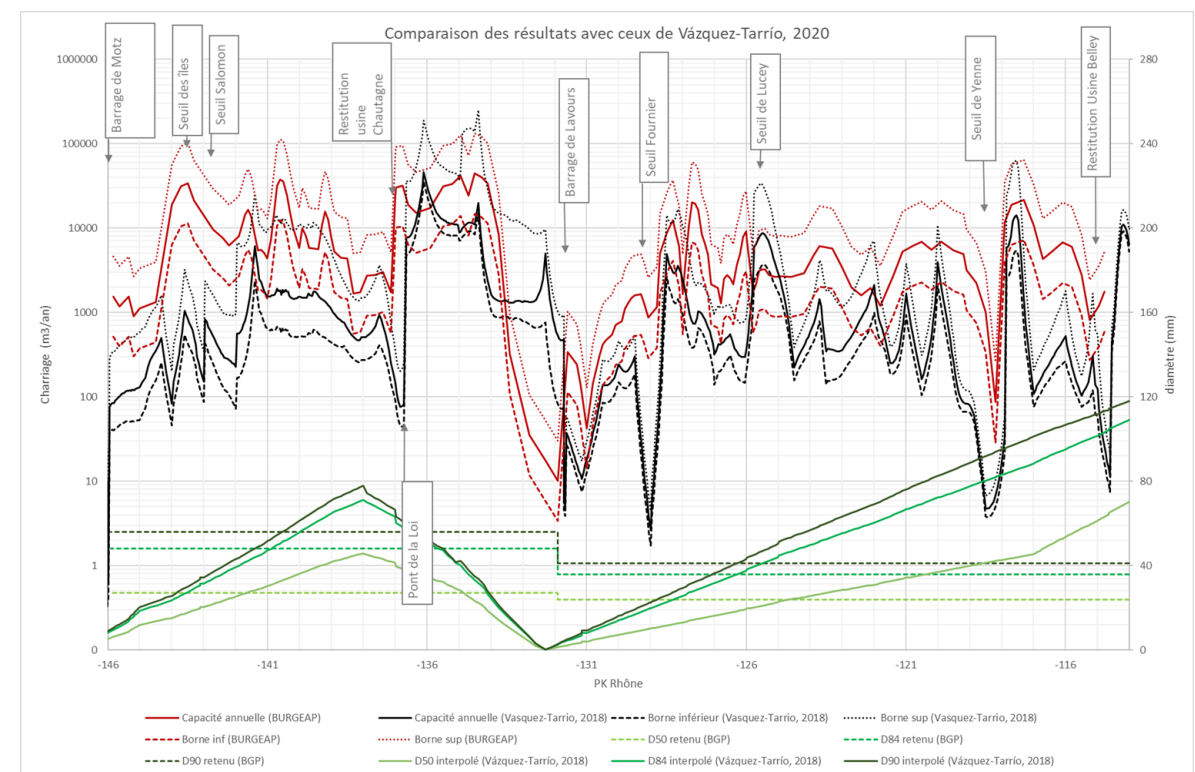


Figure 38 : Capacité de charriage annuelle moyenne avec deux modes de calculs

Le premier calcul donne les courbes noires (avec médiane, borne inf et borne sup), et est issu de Vázquez-Tarrio (2018, 2020) sur la base d'une granulométrie interpolée (droites continues en vert). Le second calcul a été réalisé par BURGEAP pour le dossier de Pont de la Loi (2021) ; il donne les courbes rouges (avec médiane, borne inf et borne sup) et se base sur une granulométrie identifiée comme étant en transit (mesure sur bancs actifs).

7.3.4 Capacité de charriage en moyenne annuelle

Les formules de calcul de la capacité de charriage sont nombreuses dans la littérature. Celles-ci mobilisent la géométrie des profils en travers, les conditions hydrologiques (courbe de débit classé pour la capacité moyenne annuelle ; hydrogrammes pour les crues), les pentes d'énergie, les coefficients de rugosité, la largeur de la bande active et la distribution de la granulométrie. La plupart des formules courantes ont été implémentées dans l'outil BedLoadWeb de l'INRAE (<https://www.bedloadweb.com/>).

Dans le diagnostic de Mission 2, les calculs de Vázquez-Tarrio et al (2018, 2020), basés sur la formule de Recking et la granulométrie en place dans le fond de lit, ont été utilisés et ont été repris comme base de données de référence. Dans le cadre d'une étude spécifique, BURGEAP (2021) a testé sur les sites des RCC de Chautagne et de Belley le calcul des capacités de charriage en moyenne annuelle en faisant évoluer la granulométrie et les courbes de débits classées. Les résultats sont comparés sur la Figure 38 et assorties de bornes inférieures et supérieures qui expriment les incertitudes sur les calculs. Par exemple, il est généralement constaté que la borne inférieure est de l'ordre de 1/3 de la valeur médiane et que la borne supérieure est équivalente à 3 fois la valeur médiane. La comparaison de ces calculs est utile pour analyser la variabilité des résultats et l'influence de la granulométrie et de la courbe des débits classés (cf. R11 débits morphogènes).

7.3.5 Capacité de charriage en crue

Un calcul qui n'a pas été réalisé en Mission 2 et qui peut être utile est le calcul de capacité de charriage pour différentes crues (par exemple Q2, Q10, Q100, voire Q1000 dans le cadre d'ouvrage de sûreté), considérant un hydrogramme de référence avec un débit de pointe et une durée de base.

Un test a été mené par BURGEAP en 2021, toujours sur les RCC de Chautagne et de Belley. Les résultats peuvent être comparés avec la valeur moyenne annuelle. Sur la Figure 39, les courbes montrent que sur le RCC de Chautagne, le charriage annuel est assez élevé et serait équivalent à celui d'une crue centennale voire millénaire ; sur le RCC de Belley, le charriage annuel est moyen, et serait équivalent à celui d'une crue quinquennale (entre Q2 et Q10).

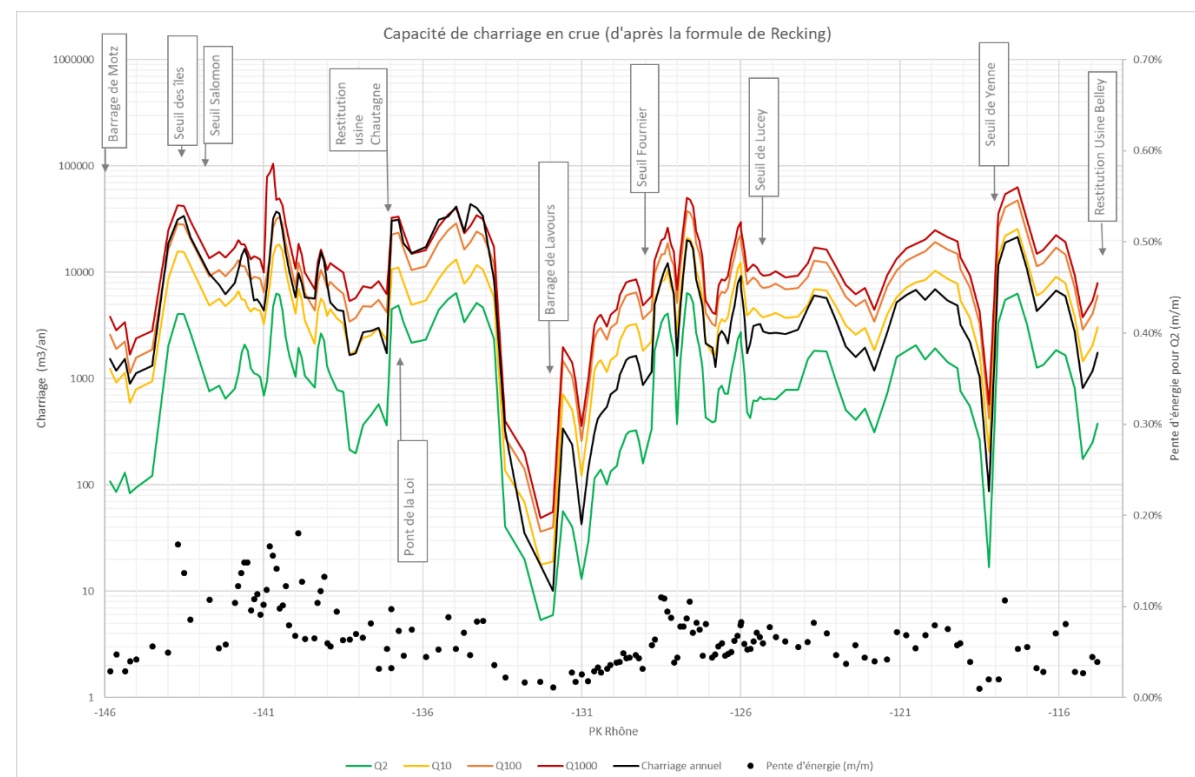


Figure 39 : Capacités de charriage calculées

7.4 Quelles modalités de réinjection ?

7.4.1 Modalités de réinjection par voie terrestre

Les retours d'expérience en matière de réinjection sédimentaire se multiplient depuis plusieurs années et permettent de commencer à identifier une typologie des modalités de réinjection, avec leurs avantages et inconvénients. Le tableau ci-dessous est établi d'après des expériences recensées et constitue un premier niveau d'analyse pour les réinjections par des voies terrestres.

On notera que quelle que soit la technique utilisée, et au-delà de considérations économiques, il est préconisé de ne pas procéder à un tri granulométrique ou un lavage des matériaux. Les matériaux sableux et fins font partie du panel granulométrique et ont un rôle à un jouer dans les processus hydrosédimentaires (constitution d'une nappe alluviale, revégétalisation, etc.).

Tableau 16 : Récapitulatif des différents types de réinjection sédimentaires et analyse comparative

Type de réinjection	Objectif	Exemple	Avantages	Inconvénients
Rehaussement des fonds, reconstitution du lit	Reconstituer le profil en long	Drac à St-Bonnet en Champsaur (05, CLEDA) – 355 000 m³	Opération ambitieuse avec des gains élevés sur les milieux aquatiques et humides	Travaux lourds, avec impacts forts, notamment sur les lignes d'eau et l'écologie. Pertinent uniquement si les flux amont sont suffisants
Mise en andains sur banc d'alluvions	Restaurer les flux grossiers	Rivière d'Ain (01, SR3A) – quelques centaines à quelques milliers de m³	Solution facile à mettre en œuvre (simple déversé de camions). Impacts limités	Volumes limités à quelques milliers de m³. Potentielle difficulté de remobilisation des sédiments sur bancs en intrados
Reconstitution de bancs	Restaurer les formes alluviales et les flux grossiers	Buëch (04, EDF) – 43 500 m³	Anticipe la restauration de formes alluviales. Impacts limités sur les milieux aquatiques (lit d'étiage non impacté)	Risque de création de bancs perchés qui ne seront pas remobilisés et vont se végétaliser
Piste en remblai dans le lit	Restaurer les flux grossiers, restaurer des formes alluviales	Vieux Rhône de Chautagne (73, CNR) – 15 000 m³	Facilité de mise en œuvre en grand cours d'eau	Chantier sensible aux conditions hydrologiques (crues) Impacts sur les milieux aquatiques (fonds, faune)
Déversé de matériaux en haut de berge	Restaurer les flux grossiers, restaurer des formes alluviales	Sacramento, sous le barrage de Keswick (USA, Californie) Fontaulière, sous le barrage de Pont-de-Veyrières (07, SDEA) – 2 000 m³	Facilité de mise en œuvre en cas de difficulté d'accès Le cours d'eau mobilise progressivement des volumes adaptés à sa capacité	Enjeu de sécurité pour les riverains (glissement du talus) Végétalisation possible du remblai
Recharge sur un seuil	Restaurer les flux grossiers tout en confortant un ouvrage	Giffre à Morillon (74, SM3A) – 25 000 m³	Confortement de l'ouvrage par comblement des vides (mais pas de confortement structurel)	Difficulté de mise en œuvre (batardeaux, fortes vitesses, etc.). Afflux potentiellement important de sédiments en aval
Recharge en damiers	Mettre à disposition de la rivière les quantités d'alluvions dont elle a besoin pour reconstituer son lit	Aire (Suisse) – volume inconnu	La rivière érode les formes proposées et met en place un lit à la géométrie équilibrée en fonction de ses processus	Ne constitue pas réellement une recharge sédimentaire ; il s'agit plutôt d'un mode de renaturation de rivière. Cependant, le concept de « mettre à disposition des stocks et formes » est intéressant dans l'esprit de la réinjection sédimentaire



Exemple de reconstitution d'un matelas alluvial

Haut-Drac (CLEDA, 05) – 355 000 m³

Photos pendant les travaux, 1 an après travaux, 3 ans après travaux



Exemple de mise en andains sur les berges

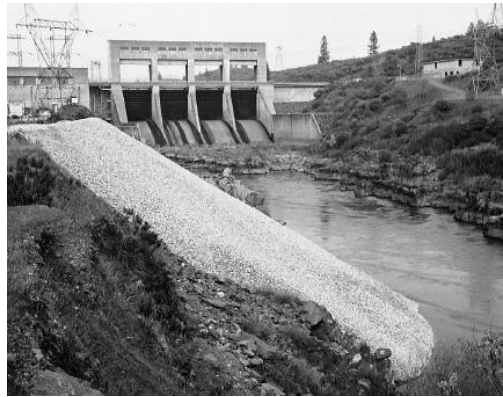
Rivière d'Ain (SR3A, 01) – quelques centaines à quelques milliers de m³



Exemple de recomposition de bancs alluviaux

Le Buëch à Saint-Sauveur (EDF, 04) – 43 500 m³

Figure 40 : Exemples de techniques de réinjection sédimentaire (1/2) (d'après BURGEAP, 2021)



Exemple de déversé en haut de berge

Le Sacramento sous le barrage de Keswick aux Etats-Unis (Californie, USA)

La Fontaulière, sous le barrage de Pont-de-Veyrières (07, SDEA) – 2 000 m³



Exemple de dépôt dans le lit actif

Le Vieux Rhône de Chautagne sous le barrage de Motz – 17 000 m³



Exemple de recharge sur un seuil

Le Giffre à Morillon (SM3A, 74) – 25 000 m³



Exemple de création d'un nouveau lit par damiers

L'Aire en Suisse (2013 à 2015)
(<http://www.theriverchronicle.ch>)

Figure 41 : Exemples de techniques de réinjection sédimentaire (2/2) (d'après BURGEAP, 2021)

7.4.2 Stockage intermédiaire

Les modalités de réinjection peuvent nécessiter un stockage intermédiaire après la phase de dragage. Dans un premier temps, un stockage est souvent indispensable pour bénéficier d'une phase de ressuyage avant de transporter les matériaux sur les voies routières. Dans un second temps, dans la phase de transport entre le lieu de dragage et le lieu de réinjection, il est parfois nécessaire de disposer d'un lieu de stockage provisoire pour plusieurs raisons : les conditions de mise en œuvre de dragage ne sont pas forcément les mêmes que pour une opération de réinjection ; par exemple, l'action de réinjection nécessite des autorisations complémentaires qui ne sont pas obtenues au moment du dragage ; la réinjection sera issue de l'assemblage de matériaux venant de plusieurs destinations, etc.

La mise en place et l'identification de lieux de stockage temporaires et bien placés semblent être un enjeu pour l'avenir si les opérations de dragages / réinjections se multiplient. C'est un enjeu économique dans la mesure où ces lieux de stockage ne doivent pas conduire à majorer les coûts de transport en étant placés à des distances inadaptées des lieux de dragage et de réinjection. C'est également un enjeu technique car un site de stockage ne peut être implanté en zone inondable sans conditions, et les contraintes écologique (batraciens notamment) sont souvent importantes. Cette question qui dépasse le cadre de la présente étude doit être bien anticipée par les gestionnaires.

7.4.3 Clapage devant barrage

Les conditions de transport de sédiments débutent, pour un certain nombre de sites de dragage, dans le milieu fluvial, y compris pour des dragages de sédiments grossiers (G3). Une pelleteuse est installée sur un ponton et drague le site (confluence, queue de retenue, etc.) puis remplit une barge adossée au ponton, avant que celle-ci ne débute le trajet vers la destination souhaitée.

Si cette destination est un RCC en déficit, et pour suivre l'une des modalités de réinjection précédentes, les matériaux devront être débarqués à terre, rechargés sur des camions, avant d'être amenés au Vieux Rhône par voie terrestre (R1). Un tel trajet conduit à des coûts importants (cf. §. 7.5) car cela ajoute au minimum une rupture de charge, c'est-à-dire au minimum un transfert entre deux modes de transport. Les barges de transport utilisées peuvent être des barges à clapet, capable de libérer les volumes de sédiments dans une zone en eau où la barge peut accéder (tirant d'eau de 2 m minimum). Cependant, si le RCC concerné n'est pas navigable – ce qui est généralement le cas dans sa partie courante, aucune barge ne peut venir procéder à une réinjection par voie fluviale.

Une solution intéressante serait de pouvoir claper les sédiments transportés devant le barrage de retenue qui constitue la limite amont d'un RCC, de façon suffisamment proche, afin que les matériaux soient repris lors d'une ouverture du barrage même si la retenue n'est pas abaissée, si besoin par des courants de turbidité locaux. En première approche, cela aurait de nombreux avantages techniques et économiques. Sur le plan technique, les matériaux seraient distribués par des mécanismes naturels dans le RCC lors d'ouverture du barrage, c'est-à-dire pour des petites crues (ouvertures quelques jours par an en général) ; les impacts écologiques liés à la recharge seraient limités ; sur le plan économique, les coûts de transport vers le RCC ne seraient pas majorés par les ruptures de charge et seraient, pour des distances similaires, équivalents aux coûts de restitution en retenue (G4).

Les points de vigilance à analyser pour ce type d'opération sont de plusieurs ordres : les matériaux apportés vont-ils rehausser les lignes d'eau au point de fausser le pilotage du barrage et aggraver la sûreté ? les matériaux clapés vont-ils effectivement être remobilisés ? les infrastructures du barrage de retenue peuvent-elles admettre le passage de sédiments grossiers ? etc. Ces différentes questions non exhaustives devraient faire l'objet d'une analyse de faisabilité, avec des conditions globales et communes pour tous les ouvrages, et des conditions particulières ouvrage par ouvrage, une analyse des impacts, des éventuelles mesures d'adaptation nécessaires. Au final une analyse coûts bénéfice, appuyées sur plusieurs exemples appliqués et tests grandeur nature devrait permettre de préciser les conditions de faisabilité de ce type de gestion.

A ce stade, il peut être remarqué qu'il peut exister une certaine faisabilité : en effet, des opérations de clapage devant barrage pour restitution au RCC ont été menées par le passé, notamment par EDF au barrage de Jons (10-ALY) entre 1937 et 1983 à raison de 9 000 m³/an environ pour des matériaux dragués dans le canal de Jonage (BURGEAP, 2017). Cet ouvrage est déjà transparent aux flux grossiers transitant dans la retenue ce qui est un facteur favorable à une telle gestion. Pour les ouvrages CNR, même si les opérations ne sont pas décrites précisément, il est probable que ce procédé de clapage a été mis en œuvre par le passé pour certains ouvrages particuliers : par exemple, pour les dragages des matériaux grossiers des Usses et leur restitution devant le barrage de Seyssel qui a priori pouvait les faire transiter ultérieurement en aval. Enfin, il est probable que certains ouvrages comme le barrage du Pouzin ou le barrage de Donzère laissent passer des sédiments grossiers tout au moins lors de crues exceptionnelles, et qu'un clapage devant ces ouvrages soit plus réaliste qu'ailleurs.



Figure 42 : Illustration d'une pelleteuse sur ponton et d'une barge à clapet à la confluence de la Gère (cf. Mission 4)



Figure 43 : Illustration d'une barge à clapet sur le Rhin (cf. Mission 5)

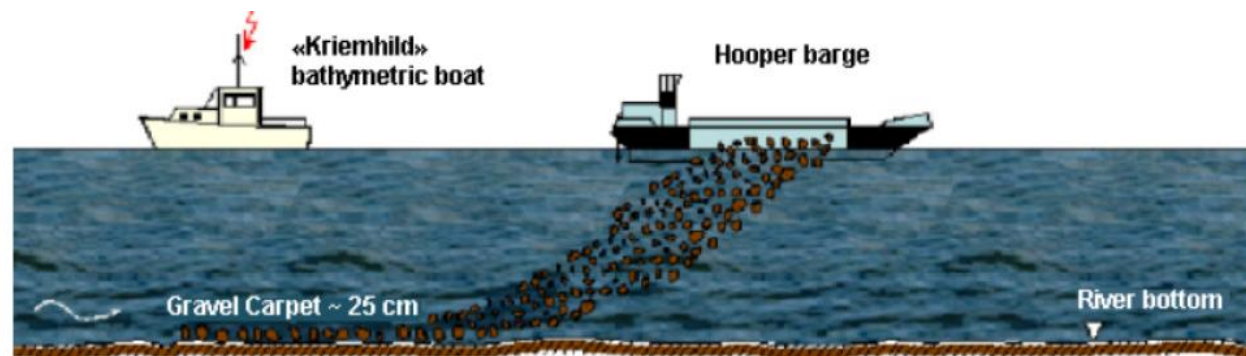


Figure 44 : Procédé de recharge sédimentaire en aval du barrage d'Iffezheim (cf. Mission 5)

7.5 Comment chiffrer les actions, dont le transport ?

Un travail d'analyse des coûts unitaires a été mené en Mission 6. Il a permis d'établir les coûts unitaires de chaque action-clé et les paramètres faisant évoluer ces coûts. Ces coûts unitaires sont rappelés dans le chapitre §.2.

Dans cette partie des précisions sont apportées sur le chiffrage des actions liées aux dragages / transport / réinjection de sédiments.

7.5.1 Détails sur les coûts de dragages et de transport des sédiments grossiers

Les coûts unitaires des étapes d'une opération de dragage de sédiments grossiers et transport en fonction du lieu de dragage, du transport (routier ou fluvial) et de la destination ont fait l'objet d'une analyse détaillée.

Les coûts unitaires employés par CNR sont généralement de la forme suivante :

- Amené/repli atelier de dragage (€),
- Dragage des sédiments (€/m³),
- Reprise pour chargement sur tombereau (€/m³),
- Transport tout terrain des sédiments jusqu'à la route et dépotage (€/m³.km),
- Reprise des matériaux (€/m³),
- Transport des sédiments sur la route, puis chargement voie fluvial, transport, déchargement, chargement camion et transport sur la route jusqu'à dépôt en bord de route (€/m³.km),
- Aménagement du site de restitution (€/m³),
- Reprise pour chargement tombereau (€/m³),
- Transport tout terrain de la route au site de restitution (€/m³.km),
- Mise en place sur site de restitution (€/m³).

Nous avons cherché à généraliser les opérations et avons abouti au synoptique de la Figure 45. Les coûts sont repris dans le Tableau 17.

A chaque étape (nommée par un code), un coût doit correspondre. Il peut s'agir d'un forfait éventuel à s'acquitter ou d'un coût unitaire par m³ ou par m³.km.

Toutes les étapes ne sont pas forcément obligatoires, elles dépendent de l'option choisie, c'est-à-dire du trajet des sédiments du lieu de dragage jusqu'au lieu de restitution.

En fonction de l'option choisie (plusieurs options sont généralement possibles pour un même site) un coût total par m³ peut être calculé. Il sera fonction d'une part fixe pour les étapes concernées par des forfaits éventuels (U - Aménagement du site de dragage, V - Aménagement du site de restitution, etc.) et d'une part variable par m³ et par m³.km.

Les différentes étapes de dragages, de transport et de restitution des matériaux sont illustrées par le synoptique de la Figure 45. Toutes les configurations possibles sont illustrées, selon que le dragage a lieu en milieu terrestre ou aquatique, que le transport a lieu en milieu terrestre (piste, route) ou fluvial, ou que la restitution a lieu par accès terrestre ou par clapage en milieu aquatique.

Tableau 17 : Coûts unitaires des étapes de dragage de sédiments grossiers

Opération	Min	Moyenne	Maximum	Source
U- Eventuel aménagement du site de dragage (rampe d'accès, etc.) (forfait €)	20 000 €	50 000 €	100 000 €	
A1- Amenée/repli atelier de dragage grossier	5% du montant des travaux	10% du montant des travaux	15% du montant des travaux	
A2- Dragage des sédiments grossiers et mise en remblai (€/m³)	2 €/m³	12,8 €/m³	50 €/m³	Voir action G3
A3.1- Reprise pour chargement sur semi (€/m³)	4,5 €/m³	5 €/m³	5,5 €/m³	EGIS (2020)
A3.2- Transport des sédiments sur la route et dépotage à l'arrivée (€/m³/km)	0,56 €/m³/km	0,72 €/m³/km	0,87 €/m³/km	EGIS (2020)
C – Stockage à terre	Forfait de 196 € ou 0,196 €/ m³	Forfait de 13 720 € ou 0,196 €/ m³	Forfait de 58 800 € ou 0,196 €/ m³	Entre 1 000 et 300 000 m³ de stockage, sachant que 1 hectare peut stocker 25 000 m³ et que le prix moyen d'un hectare est de 4 900 €.
A4.1- Reprise pour chargement sur tombereau (€/m³)	4,5 €/m³	5 €/m³	5,5 €/m³	EGIS (2020)
A4.2- Transport tout terrain des sédiments sur piste et dépotage (€/km/m³)	0,56 €/m³.km	0,72 €/m³.km	0,87 €/m³.km	EGIS (2020)
V- Eventuel aménagement du site de restitution (forfait €)	50 000 €	100 000 €	200 000 €	
A5- Régalage et mise en forme sur le site de restitution (€/m³)	5 €/m³	7 €/m³	8,10 €/m³	Le max correspond à l'opération Chautagne sur 15 000 m³. Valeur min fournie par CNR
W- Eventuel aménagement du site de dragage (rampe d'accès, etc.) (forfait €)	50 000 €	100 000 €	200 000 €	
B1- Amenée/repli atelier de dragage grossier sur ponton	1,07 €/m³	1,62 €/m³ Ou forfait moyen de 453 600 €	2,86 €/m³	CNR – Logis Neuf (gros volume, tout fluvial)
B2- Dragage des sédiments grossiers et chargement barge (€/m³)	3,93 €/m³	8,93 €/m³	13,21 €/m³	CNR – Logis Neuf (gros volume, tout fluvial)
B3- transport par barge (€/m³/km)	0,30 €/m³/km + 5,26 €/m³ par passage d'écluse*	0,80 €/m³.km + 5,26 €/m³ par passage d'écluse*	1,12 €/m³.km + 5,26 €/m³ par passage d'écluse*	CNR – Logis Neuf (pour 270 000 m³ transporté sur 10 km, tout fluvial)
Z- Eventuelle mise au gabarit du chenal navigable (forfait €)	100 000 €	200 000 €	500 000 €	

Opération	Min	Moyenne	Maximum	Source
B4- Clapage (€/m³)	≈ 1 €/m³	≈ 1 €/m³	≈ 1 €/m³	Coût a priori nul. Un forfait minimal est compté pour les manœuvres de barge
Y- éventuel aménagement de quai de chargement (forfait €)	100 000 €	150 000	200 000 €	
B5- reprise pour chargement tombereau ou semi (€/m³)	5 €/m³ **	6 €/m³ **	7 €/m³ **	EGIS (2020) CNR – Logis neuf (gros volume, tout fluvial)
B6- Dépotage benne dans barge (sans surcoût)		3 €/m³		
X- éventuel aménagement de quai de chargement (forfait €)	100 000 €	150 000	200 000 €	

* temps d'immobilisation dans l'écluse (environ 40 min). Le passage des barges dans les écluses est gratuit

** une plus-value s'applique au-dessus de 1 km entre le lieu de reprise et de chargement : [0.62 ; 0.74 €/m³.km]

Tous ces coûts unitaires une fois connus permettent de simuler différentes situations de dragages-transport-restitution, comme illustré dans la Figure 45.

Des exemples caractéristiques sont donnés dans le Tableau 18. Ils démontrent que :

- Les coûts de transport augmentent les coûts des opérations. En milieu terrestre, le coût des opérations peut atteindre rapidement 30 €/m³, et s'élève à des valeurs de 40, 50 voire 60 €/m³ lorsque les distances sont importantes (plus de 40-50 km). Le coût unitaire de 30 €/m³ retenu pour l'action-clé R1 est un surcoût sur l'action G3 de dragage : il compte les coûts de réinjection depuis le lieu de stockage, le dragage ayant été réalisé par une action G3 ;
- Le coût de transport est sensiblement le même entre le transport terrestre (0,72 à 0,87 €/m³.km) et le coût par voie fluviale (0,80 €/m³.km). Le transport fluvial a une image de transport vertueux mais cela est valable essentiellement pour les charges importante (3 000 à 6 000 tonnes). Pour le transport de sédiments, les barges présentent des capacités relativement limitées de l'ordre de 500 à 1500 tonnes (soit 250 à 750 m³) dont le côté vertueux est amoindri ;
- Le transport par rail n'est pas développé dans ce synoptique mais il pourrait être ajouté compte tenu de son intérêt économique sur le transport : en effet, certaines données fournissent des coûts de transport de l'ordre de 0,05 à 0,10 €/m³.km, considérant qu'un train est composé de 10 wagons de 60 m³ chacun (soit 600 m³ par voyage) (<https://lomm.medium.com/transport-de-marchandises-mod%C3%A8les-de-co%C3%BBts-le-transport-ferroviaire-1-2-f55bb45a8c5d>). Ce coût semble très intéressant car il est 8 à 15 fois plus faible que celui de la route ou de la voie fluviale. Cependant, pour la voie ferrée, les coûts d'investissement sont importants : au-delà de s'appuyer sur une ligne existante, une opération de gestion sédimentaire nécessite une voie indépendante avec des infrastructures de chargement, et les mêmes équipements sont nécessaires à l'arrivée. Sans compter que les sites de départ et d'arrivée ne peuvent se démultiplier. Néanmoins, l'option de transport par voie ferrée mérite d'être étudié lorsqu'une voie ferrée est existante à proximité du site de dragage envisagé, ce qui serait le cas d'un futur site de dragage dans la fosse de la Feyssine (UHC#10-ALY).
- Afin de minimiser les coûts, il s'agit de minimiser les ruptures de charge, c'est-à-dire les transferts de sédiments entre deux modes de transport et les phases de stockage provisoire. Ainsi, les coûts sont minimisés :
 - en milieu terrestre, lorsque les matériaux sont dragués par voie terrestre, transportés par route ou piste puis régaliés à terre dans le lit de destination (cf. Figure 46) ;
 - en milieu aquatique, lorsque les matériaux sont dragués sur ponton, transportés sur barge puis clapés sur leur lieu de destination (Figure 47).

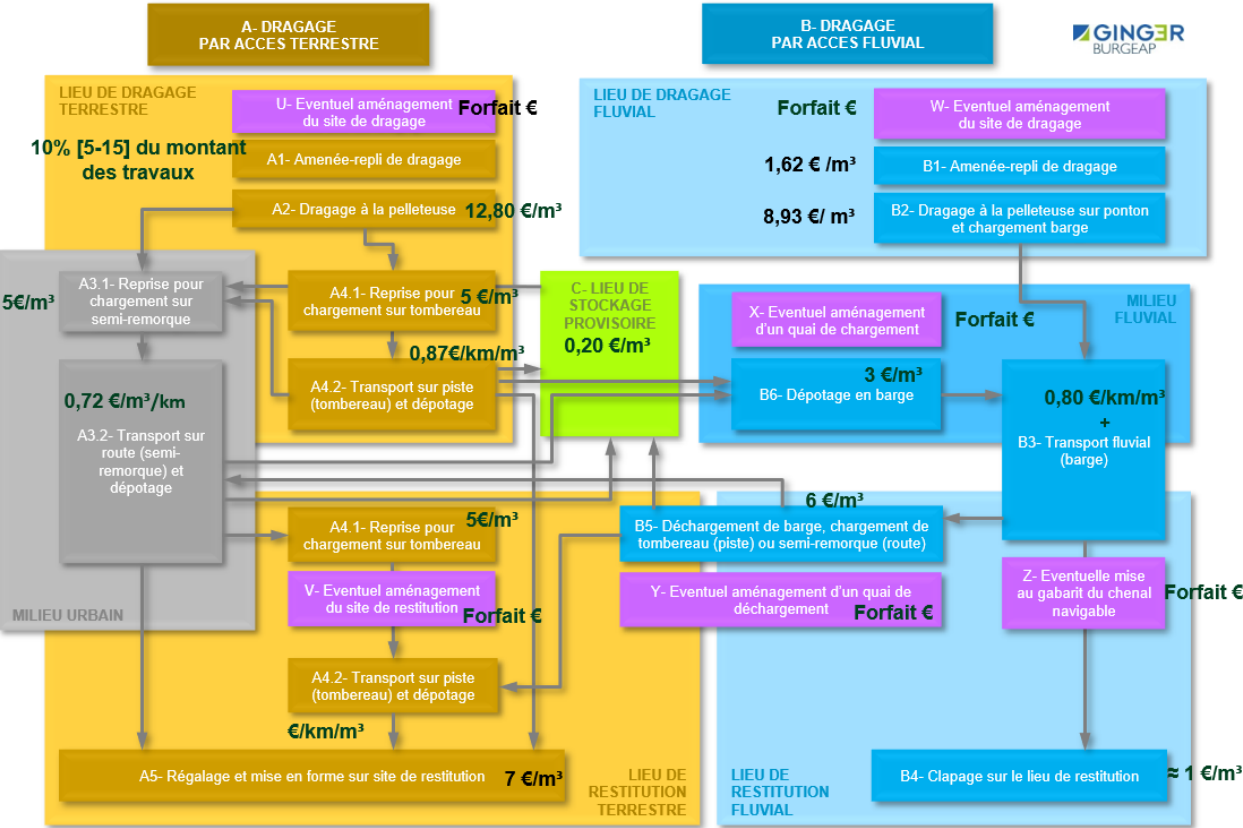


Figure 45 : Synoptique des coûts de dragages, transports et restitutions de sédiments grossiers (toutes situations possibles)

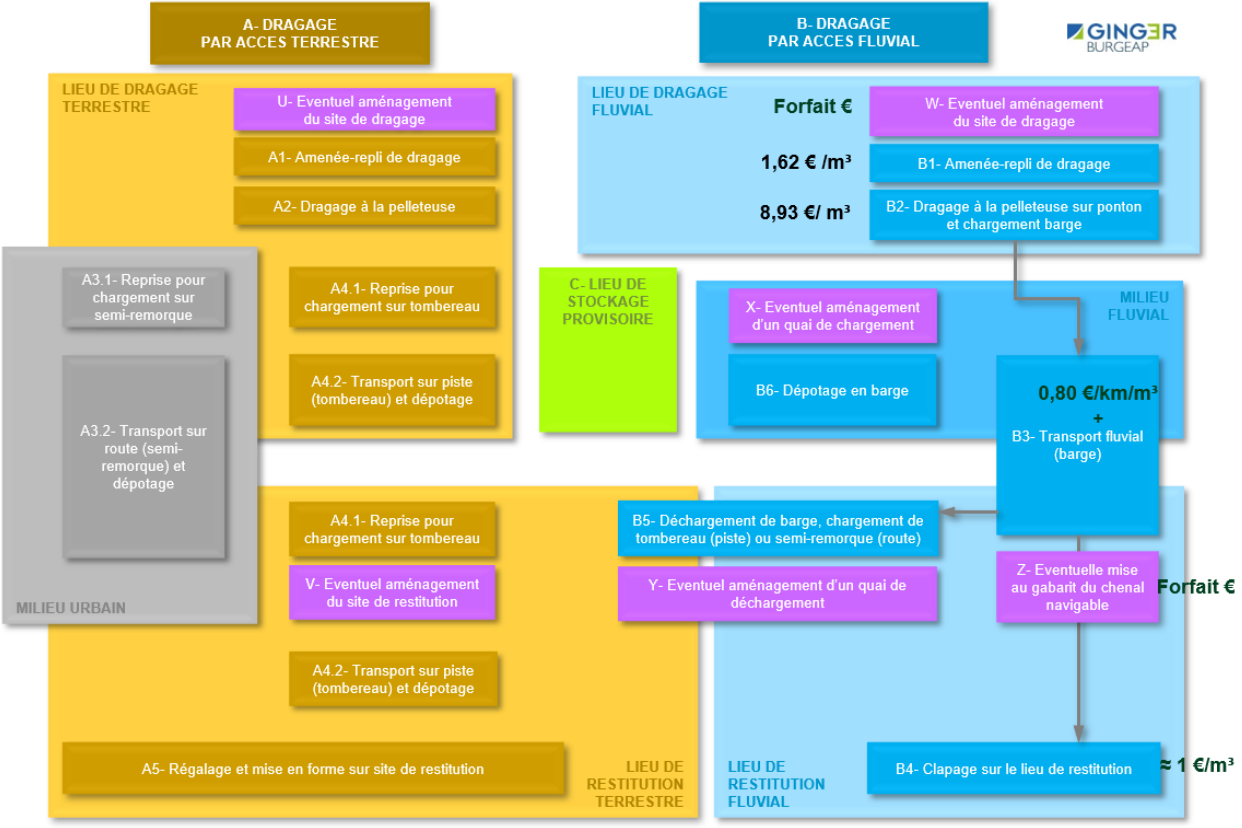


Figure 47 : Synoptique des coûts de dragages, transports et restitutions de sédiments grossiers (cas le plus simple en milieu fluvial : 0 rupture de charge, pas de stockage)

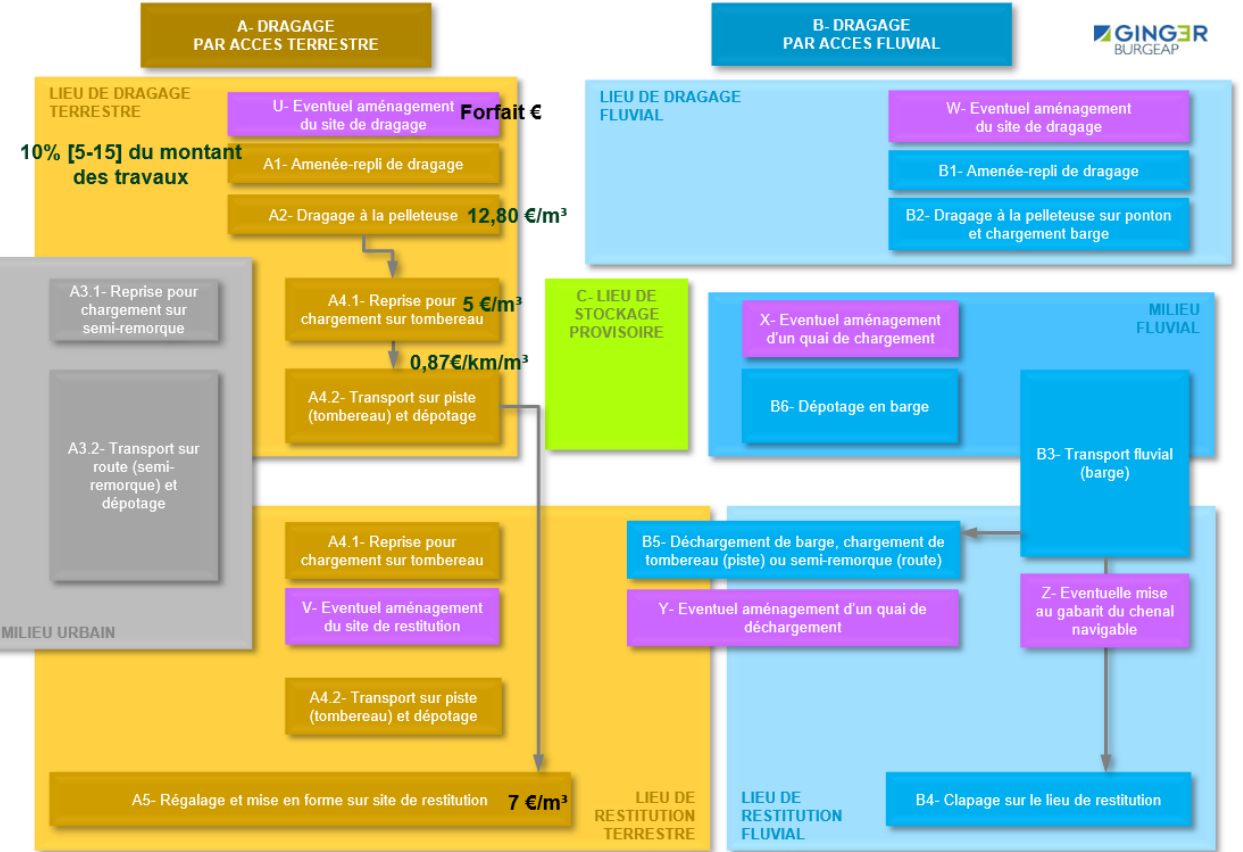


Figure 46 : Synoptique des coûts de dragages, transports et restitutions de sédiments grossiers (cas le plus simple en milieu terrestre : 1 rupture de charge, pas de stockage)

Tableau 18 : Exemple de chiffrage d'opérations de dragage, transport et restitutions de sédiments grossiers

Exemple de situation	Séquence de coûts unitaire	Coût total au m³ (pour environ 10 000 m³) *
Dragage terrestres, transport sur piste, restitution en milieu terrestre (cas terrestre le plus simple)	A1-A2-A4.1-A4.2-A5	Pour 5 km de pistes : 30 €/m³ - dont 25 €/m³ de manipulation - dont 5 €/m³ de transport
Dragage terrestres, transport sur piste, transport sur route, restitution en milieu terrestre	A1-A2-A4.1-A4.2-A3.1-A3.2-A5	Pour 2 km de pistes et 20 km de route : 47 €/m³ - dont 30 €/m³ de manipulation - dont 16 €/m³ de transport
Dragage fluvial, transport par barge, clapage en retenue (cas fluvial le plus simple)	B1-B2-B3-B4	Pour 5 km de navigation : 16 €/m³ - dont 12 €/m³ de manipulation - dont 4 €/m³ de transport
Dragage fluvial, transport par barge, déchargement de barge, transport sur piste, restitution en milieu terrestre	B1-B2-B3-B5-A4.2-A5	Pour 5 km de navigation et 5 km de piste : 32 €/m³ - dont 24 €/m³ de manipulation - dont 8 €/m³ de transport

* non compris les coûts forfaitaires du synoptique de la Figure 45 (U- aménagement du site de dragage, X- aménagement d'un quai de chargement, etc.)

7.5.2 Détails sur les coûts de dragages de sédiments fins

Plusieurs informations utiles ont été communiquées par CNR sur les modalités de dragages de sédiments fins à la drague aspiratrice :

- L'usage de la drague aspiratrice correspond classiquement à une granulométrie fine, composées de limons et de sables. Toutefois, lorsque les sédiments sont mélangés et contiennent des graviers, l'usage de la drague aspiratrice est pratiqué pour une granulométrie s'élevant jusqu'à 10 mm environ. Au-delà de 10 mm, il existe des risques de casse de matériel, mais ces risques sont parfois pris par les entreprises car l'outil de la drague aspiratrice peut présenter des avantages par rapport à une pelle mécanique (accessibilité sous pont ou autre infrastructure, sécurité en cas de vitesses d'écoulement, facilité de chargement en barge, facilité de restitution directe au bout de la conduite de refoulement ;
- La longueur courante de refoulement de sédiments fins est de 750m. Au-delà, il est généralement défini un prix au m³/hm de conduite supplémentaire. Au-delà de 2500m, même pour une très grosse drague et des sédiments fins, il faut installer un relais. Dans ces conditions, la longueur de conduite n'est plus limitée à condition de mettre des relais. La perte de rendement est intégrée dans les prix des entreprises. Par exemple, pour un grosse drague aspiratrice utilisée pour un très gros volume (>100 000 m³), le prix du m³ transporté jusqu'à 750m est de 4€/m³ (hors installation de chantier), et au-delà de cette distance, la plus-value est de 0,15€/m³.hm (hors installation du linéaire de conduites supplémentaires), soit par exemple 1,50 €/m³ pour chaque km supplémentaire.

7.5.3 Quel surcoût acceptable pour les actions de réinjection sédimentaire ?

Cette question a été soulevée en Mission 7 (§.4.2.3).

Sans en reprendre tous les éléments, les principes suivants pourraient être retenues. Ils restent toutefois à confirmer en renforçant les retours d'expérience et la capacité des gestionnaires à gérer plus de volumes en restitution sur des distances globalement plus grandes.

- **A l'avenir, il serait souhaitable de définir des distances maximales admissibles** pour transporter des sédiments afin de maîtriser les coûts et les bilans GES des opérations. Les surcoûts pourraient être assortis d'un critère sur l'intérêt écologique de la réinjection. Aussi, en phase avec les propositions émises pour la stratégie proposée, nous pensons que les distances maximales suivantes devraient être préconisées :
 - **Pour une réinjection avec intérêt écologique fort** : 40 à 50 km maximum par voie routière ou voie fluviale (coûts et bilan GES globalement équivalents) ; la majoration de coût liée au transport est alors de 30 à 40 €/m³. Cette distance peut éventuellement être allongée par voie ferrée, la faisabilité et les coûts pouvant être intéressants selon les conditions de mise en oeuvre ;
 - **Pour une réinjection avec intérêt écologique moyen** : 20 à 30 km maximum par voie routière ou voie fluviale (coûts et bilan GES globalement équivalents) ; la majoration de coût liée au transport est alors de 15 à 25 €/m³.
 - **Pour une réinjection avec intérêt écologique nul ou négligeable** : 10 km maximum par voie routière ou voie fluviale (coûts et bilan GES globalement équivalents). La majoration de coût liée au transport est alors de 8 €/m³. Ce type de situation équivaut aux restitutions de type G4 dans les retenues telles que pratiquées sur plusieurs sites.

NB : On notera que les niveaux d'intérêt écologique « fort », « moyen » et « nul ou négligeable » font référence au travail mené sur les zones déficitaires en Mission 7 (cf. §.2.4).
- **Au niveau économique**, on retiendra que ce qui permettra de maîtriser les coûts sera notamment lié à la limitation des transferts de charge entre modes de transport et stockages intermédiaires. Il sera donc bienvenu :
 - **lorsqu'un dragage a lieu en milieu fluvial** (pelle sur ponton, barge à clapets) que les matériaux soient transportés par voie fluviale et s'approchent au plus près du lieu de réinjection avec la barge, et qu'idéalement, les matériaux soient clapés en amont du barrage de retenue pour le RCC visé, de façon à éviter un transport sur camion pour dépotage et régalaage dans le lit du RCC. Des études de faisabilité doivent être menées pour vérifier la possibilité de claper les matériaux en amont de barrage, en termes de reprise des sédiments (si besoin en testant des RFID) et en termes d'enjeux de sûreté pour les barrages, leur génie civil et leurs équipements.

- **lorsqu'un dragage a lieu par milieu terrestre** (pelle à terre, remplissage de camions), que les matériaux soient transportés par voie terrestre et s'approchent au plus près du lieu de réinjection, à savoir le RCC qui serait rechargé après dépotage et régalaage des matériaux.
- **Des lieux de stockage intermédiaires** doivent prévues voire créés afin d'optimiser les distances de parcours des sédiments, à deux échelles : d'une part au niveau de la collecte en amont (à partir de plusieurs sites) et d'autre part au niveau de la restitution dans des conditions adaptées.

Pour mémoire, les rythmes de restitution au Rhône étaient de 42 000 m³/an sur 1995-2018, ils sont actuellement de 81 000 m³/an (2015-2021), et ils pourraient être de 165 000 m³/an, si tous les sites N3 à matériaux grossiers devaient être gérés de cette manière, voire 225 000 m³/an à terme en incluant les sites N4.

7.6 Quels gains et quels impacts ?

Une réinjection sédimentaire, comme développée en conclusion de Mission 7, est le premier maillon d'une chaîne d'actions visant à augmenter la « valeur » et la « durée de vie » écologiques des particules de graviers.

Cependant, une fois travaillés les éléments de dimensionnement (volumes, granulométrie, lieux de réinjection, etc.), l'analyse des gains et des impacts potentiels est indispensable pour rendre le projet compatible avec la réglementation et rendre le projet compris et acceptée par les acteurs locaux.

Ces gains et ces impacts sont potentiellement nombreux et variés (cf. fiche action R1). Sont développés par la suite un certain nombre de sujets qui sont apparus importants en cours d'étude.

7.6.1 Quels impacts hydrauliques dans le cadre de réinjections sédimentaires ?

► Circulaire n°426 du 24 juillet 2002

La circulaire DE/SDGE/BPIDPF-CCG/n°426 du 24 juillet 2002 porte sur la mise en œuvre du décret n°2002-202 du 13 février 2002 (cité précédemment) modifiant ou créant les rubriques 2.5.0, 2.5.2, 2.5.4 et 2.5.5 de la nomenclature « loi sur l'eau » et des trois arrêtés de prescriptions générales pour les opérations soumises à déclaration au titre de ces rubriques.

Les rubriques précédentes sont issues d'une ancienne nomenclature. La nomenclature en vigueur les dénomme respectivement 3.1.2.0, 3.1.3.0, 3.2.2.0, 3.1.4.0 (cf. partie précédente).

Dans le cas particulier de travaux de réinjection de sédiments en lit mineur, parmi les rubriques précédentes, les rubriques 3.1.2.0 (ex-2.5.0) et 3.2.2.0 (ex-2.5.4) ont vocation à s'appliquer. Cette dernière rubrique s'applique, comme indiqué dans la circulaire, du fait que le « lit majeur comprend le lit mineur ». Ainsi, les incidences d'un remblai en lit mineur doivent être étudiées en lit mineur ainsi qu'en lit majeur. A ce titre, la circulaire exige « dans le cas des ouvrages et remblais dont l'objectif n'est pas d'assurer une protection contre les inondations, la plus grande transparence hydraulique possible », qui se traduit en fonction du niveau d'enjeu en lit majeur :

- **Dans les zones à fort enjeu** : « la plus grande transparence de l'ouvrage est déterminée, au droit des zones à forts enjeux, en fonction de la précision relative du modèle hydraulique et en situation de crue de référence (plus hautes eaux connues) ou à défaut de crue centennale. La tolérance d'exhaussement de la ligne d'eau au droit des zones à forts enjeux ne doit pas dépasser la précision relative du modèle hydraulique utilisé. A titre indicatif, en régime fluvial, cette précision relative est de l'ordre de 1 cm. En régime torrentiel ou dans le cadre de rivières à lit mobile, les modélisations atteignant difficilement ce niveau de précision relative, le seuil de transparence doit être adapté à la précision pouvant être atteinte selon le cas » ;
- **En dehors des zones à fort enjeu** : « Une tolérance un peu plus large que la précision du modèle hydraulique, à apprécier en fonction de chaque situation particulière, peut-être acceptée lorsque l'impact sur les hauteurs d'eau intervient hors de ces zones à forts enjeux ».

Quand une réinjection majeure les risques d'inondation

Actuellement, cet objectif de non aggravation des lignes d'eau peut être un réel frein à des actions de réinjection sédimentaire, quand bien même un RCC serait très largement en déficit. Ainsi, les gestionnaires peuvent se retrouver dans une situation où le RCC est très déficitaire (plusieurs millions de m³) et où la réinjection de quelques dizaines de milliers de m³ (soit seulement quelques % du volume de déficit) n'est pas acceptable en termes d'impact hydraulique.

En effet, les lignes d'eau actuelles, bien que très incisées par rapport à une situation avant aménagement, sont prises pour référence dans l'instruction des dossiers, ce qui est logique par rapport aux enjeux d'urbanisation et de développement de la plaine (a fortiori en cas d'existence d'un PPRi), mais n'est plus logique en termes de fonctionnement et d'équilibre hydrosédimentaire. Comme il s'agit d'un « risque d'inondation » potentiellement majoré, avec des enjeux de responsabilité, les gestionnaires sont dans une posture de précaution qui nécessiterait au contraire une ouverture et un dialogue avec tous les partenaires, notamment les instances en compétence GEMAPI, et un éventuel partage de responsabilités.

Les exemples récents tels que la restauration des marges alluviales du RCC de Pierre-Bénite (stade Avant-projet) montre qu'un travail de concertation avec les acteurs locaux peut conduire, si les enjeux sont limités ou adaptables, à des incidences hydrauliques qui dépassent le « 1 cm » réglementaire (par exemple 10-15 cm).

Quand une réinjection perturbe le fonctionnement d'un barrage de retenue

Il peut exister également des configurations de réinjection qui impactent, en lignes d'eau, le fonctionnement du barrage de retenue qui est en limite amont, assorti éventuellement d'ouvrages annexes (PCH, MCH, passe à poisson). Une action portée par un gestionnaire impacte potentiellement un ouvrage de ce même gestionnaire.

Pour ce sujet, nous pensons que c'est la situation de déficit et d'incision du lit qui doit décider d'un niveau d'impact acceptable :

- Si le RCC n'est pas en incision en aval immédiat du barrage depuis la mise en place de ce barrage**, alors toute réinjection sédimentaire ne doit pas impacter le fonctionnement du barrage et de ses ouvrages annexes. La solution sera de reporter le lieu de réinjection plus en aval pour minimiser les impacts (de l'ordre du centimètre) ou de modifier les conditions hydrauliques locales (abaissement ou effacement d'un seuil qui relèverait la ligne d'eau jusque sous le barrage) ;
- Si le RCC est en incision en aval immédiat de l'ouvrage depuis la mise en place de ce barrage** (cf. Scénarios 3 en Mission 7 pour les situations de chaque RCC), alors cela signifie que les conditions de fonctionnement du barrage de retenue ont évolué au cours du temps (celui-ci a pu donc s'adapter à une incision du lit), et qu'il semble raisonnable d'accepter un impact sur les lignes d'eau qui soit plafonné à l'amplitude de l'incision du lit. Par exemple, si l'incision en étiage est de 0,30 m entre l'état actuel et l'état avant aménagement, alors la réinjection peut admettre un impact de rehaussement de ligne d'eau jusqu'à 0,30 m. Les lignes d'eau avant aménagement pourront donc servir de référence. Cette condition semble pertinente car, si elle ne pouvait pas être admise, cela signifierait que ce serait le fonctionnement du barrage de retenue qui imposerait au RCC de rester dans un état déficitaire et préjudiciable par exemple pour l'atteinte du bon potentiel.

Quels moyens techniques pour analyser les impacts

Les moyens techniques nécessaires pour analyser les impacts précédents sont classiquement des modélisations hydrauliques numériques.

Actuellement, il existe 3 types de modèles hydrauliques sur le Rhône :

- Le modèle MAGE développé pour l'INRAE et utilisé en Mission 2 pour l'analyse du fonctionnement hydrosédimentaire. Ce modèle présente l'avantage d'être un modèle unique et homogène sur l'ensemble du linéaire du Rhône français. Cependant, il s'agit d'un modèle construction en 1D, et qui n'était pas prévu initialement pour simuler les crues. Aujourd'hui, suite à différents échanges et calages en Mission 2 avec l'INRAE, le modèle peut être utilisé jusqu'à Q2 sur le Haut-Rhône et jusqu'à en Q10 sur le Rhône en aval de Lyon ;
- Les modèles CNR développés par biefs par biefs (de barrage à barrage). Le logiciel utilisé est un logiciel propre à CNR. Les modèles sont en 1D maillé en lit majeur, et sont calés de la crue biennale (Q2) à la crue millénale de sûreté (Q1000). Lorsque des prestataires ont besoin de lignes d'eau, ils en font la demande au service hydraulique de CNR ;

- Les modèles locaux développés au cas par cas, selon les objectifs (étude hydrosédimentaires, étude de danger, etc.) avec des logiciels variés en 1D ou 2D, voire avec fonctionnement hydrosédimentaire intégré). Ces modèles existent notamment dans la traversée de Lyon (modèle TELEMAR, BURGEAP, 2017), sur le Palier d'Arles (SYMADREM), etc.

Chacun de ces modèles peut répondre à l'analyse des impacts avec les limites qui lui correspondent. Pour une analyse d'impact en crue centennale (Q100), seuls les modèles CNR ou des modèles spécifiques peuvent correctement analyser les impacts.

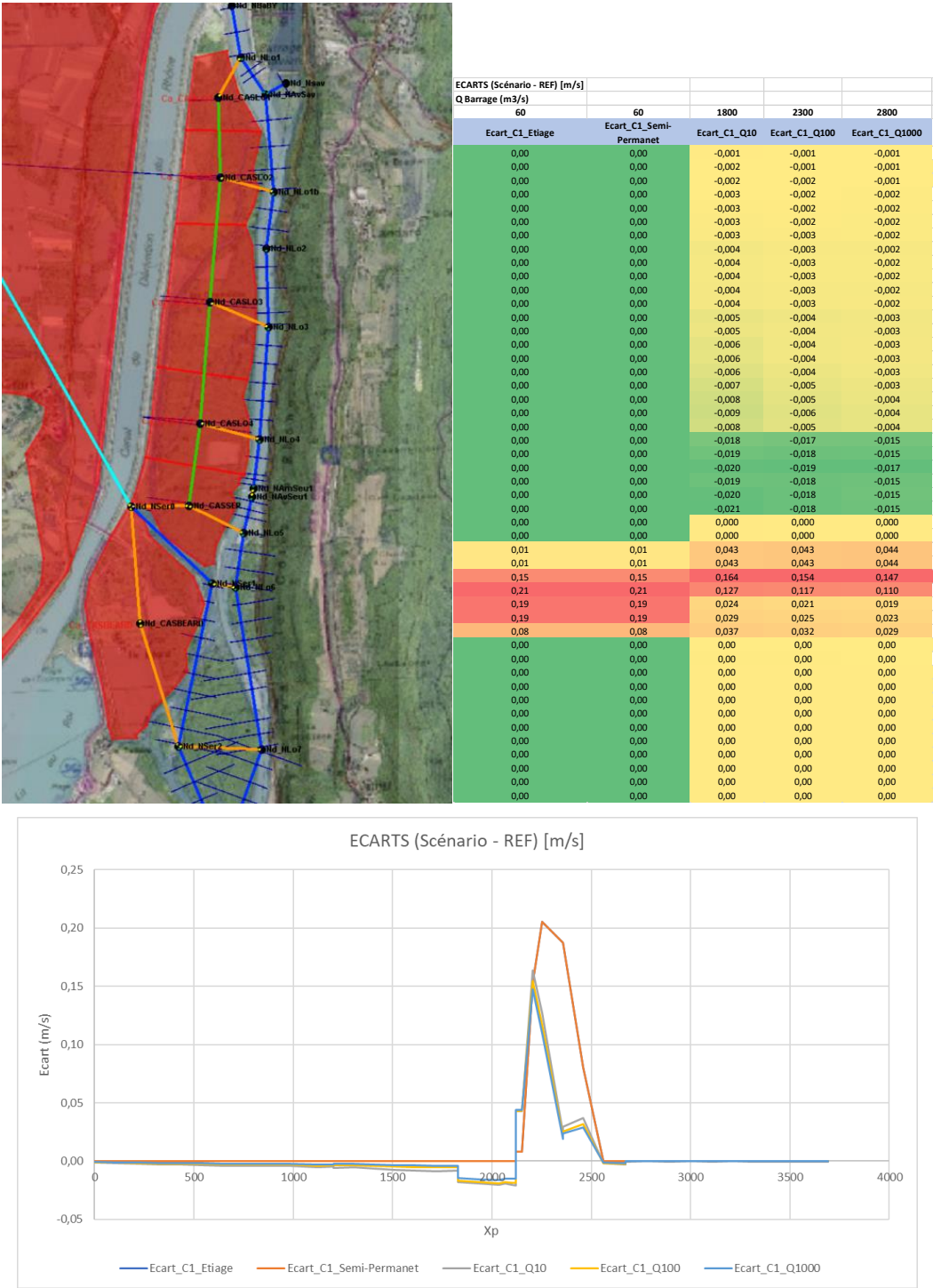


Figure 48 : Exemple d'analyse des impacts hydraulique d'une réinjection dans le RCC de Belley modèle hydraulique CNR) (utilisé par BURGEAP, 2021)

7.6.2 Quels impacts potentiels sur la production d'eau potable ?

Les enjeux de production d'eau potable sont généralement strictement encadrés par des Déclarations d'Utilité Publique (DUP), qui exigent une satisfaction sur la qualité et la quantité de l'eau. Aussi, dès qu'il existe un projet aux alentours d'un captage et de ses périmètres de protection, un avis d'un hydrogéologue agréé est demandé afin de vérifier l'impact sur les relations nappe / rivière, les enjeux qualitatifs et quantitatifs. Bien souvent, un projet de restauration du fonctionnement hydrosédimentaire est perçu avec des impacts négatifs a priori car il vient faire évoluer les processus d'échanges nappe / rivière et augmenter les risques.

Aussi, les enjeux de nappe alluviale, de production AEP et de sûreté de ces usages doivent être appréciés avec détail et finesse, parfois en utilisant des modèles hydrogéologiques, afin que les projets de gestion et de restauration puissent être menés à bout sans dévalorisation des programmes d'action.

7.6.3 Vers la définition de profils d'objectif ?

La définition des actions réalistes à mettre en œuvre par grands secteurs (Mission 7) a nécessité un travail de confrontation entre :

- des apports sédimentaires (capacité amont, affluents) ;
- des zones déficitaires (incisions, extractions) ;
- des capacités de transport ;
- des zones potentielles de stockage.

Ce travail réalisé sur la base des profils en long actuels et historiques a permis de définir une pente qui se rapproche de la notion d'un profil d'objectif.

Toutefois, ce travail reste à ce stade théorique et correspond à la recherche d'une pente d'équilibre dans un état aménagé. Il pourra en revanche guider les choix à faire, secteur par secteur, UHC par UHC, et pourra être un guide dans la définition d'un profil d'objectif, partagé par l'ensemble des acteurs. Ce dernier devra permettre un transfert optimal des sédiments vers l'aval, au regard bien évidemment des usages sensibles présents sur chacun des tronçons.

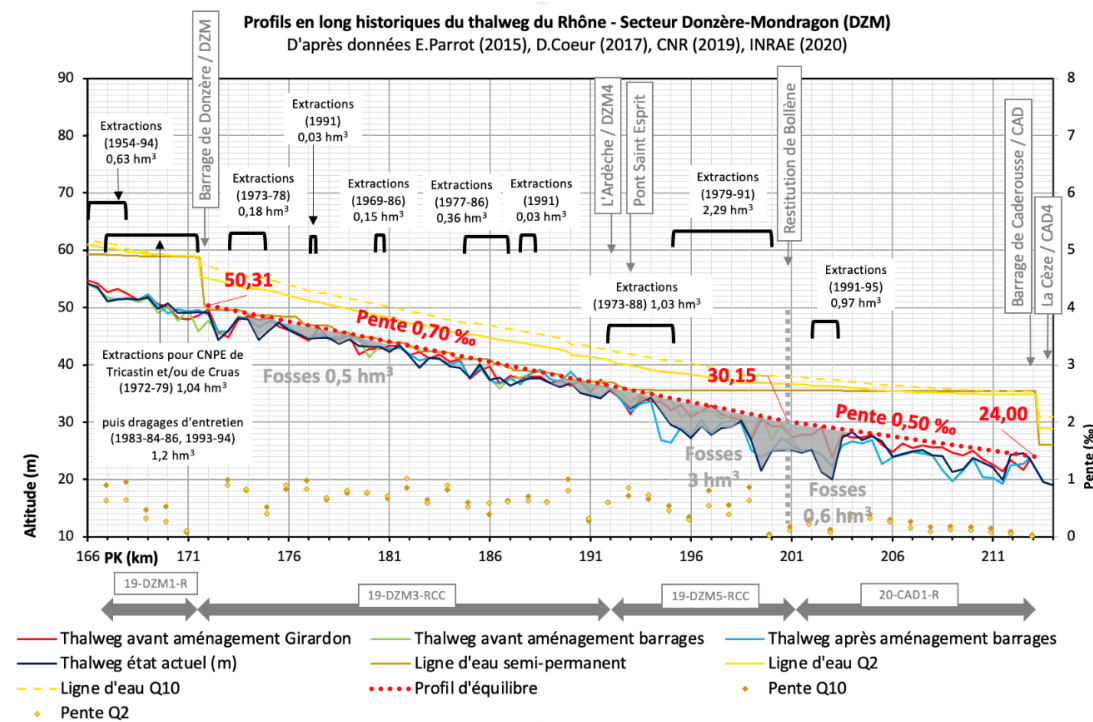


Figure 49 : Illustration du travail réalisé sur les pentes d'« équilibre » par UHC

La définition de profils en long objectifs, au-delà de préciser la gestion des sites existants, pourra permettre de préciser la gestion de futurs sites tels que les sites G9 positionnés en limite aval de RCC courants afin de gérer les flux grossiers qui les atteindraient avant de déclencher des enjeux (sûreté, inondation, navigation, etc.).

Les profils en long objectifs doivent être définis à partir du thalweg (fond du lit) mais si possible, de façon plus pertinente et plus durable, à partir de cotes moyennes du lit mineur calculées à partir de profils en travers moyens. Ces profils en long doivent intégrer 2 cotes :

- une cote maximale admissible, et qui déclenche un dragage lorsque la cote est dépassée sur un linéaire significatif (par exemple 500 m) ;
- une cote minimale en-dessous de laquelle les dragages ne doivent pas descendre en altimétrie.

7.6.4 Impacts à la restitution en aval : temps de transfert des sédiments ?

Certaines questions centrales portent sur le devenir des sédiments réinjectés et plus particulièrement sur la localisation de leurs dépôts plus en aval et leur temps de transfert. Si le modèle MAGE 1D couplé aux analyses de capacité de charriage nous apportent aujourd'hui une partie de réponse, le temps de transfert reste encore à consolider.

Les travaux de Vázquez-Tarrío, mis en œuvre de manière ponctuelle sur l'UHC de Donzère Mondragon ou Péage de Roussillon sur cette problématique apportent des premières réponses. Ainsi, il est donc nécessaire :

- d'une part, de rendre plus robuste le modèle sur les distances de déplacement à l'aide de suivis de la mobilité des particules par transpondeur ;
- d'appliquer ensuite ce modèle sur l'ensemble des RCC où des opérations de réinjection sont en place ;
- d'utiliser ces résultats pour évaluer les incidences hydrauliques.

Ces travaux peuvent également être complétés, en parallèle, par le développement de modèles hydrosédimentaires, qui seraient capables de prendre en considération les changements de géométrie (section, pente) induits par la migration d'une vague sédimentaire. Ce type d'application, qui a été testé sur quelques cas (réinjection sur le Buëch ou la Maronne par exemple) reste, à l'heure actuelle, expérimental, long à déployer donc peu opérationnel.

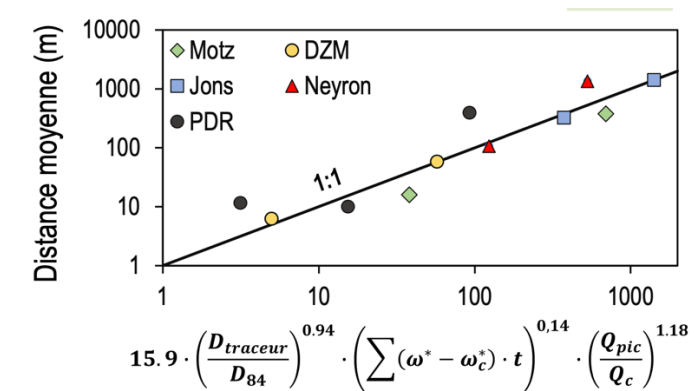


Figure 50 : Modèle expérimental pour déterminer les vitesses de diffusion d'une masse sédimentaire réinjectée

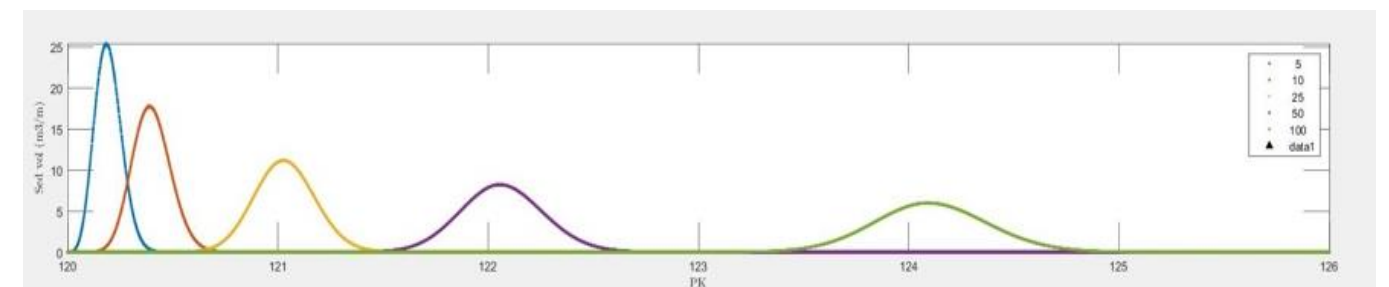


Figure 51 : Exemple d'application de ce modèle sur le RCC de Montélimar

7.6.5 D'autres impacts à analyser ?

L'analyse de l'impact de ces réinjections sédimentaires, tant du point de vue des habitats aquatiques (faciès, diversité granulométrique, etc.), que des peuplements aquatiques (macroinvertébrés benthiques et poissons notamment) apparaît comme un accompagnement indispensable à la bonne évaluation de ces opérations. De telles analyses ont été réalisées sur le RCC de Chautagne (CNR, 2019) ainsi qu'à plus large échelle sur le Rhin (e.g. Staentzel, 2018, Chardon et al., 2019, Chardon et Staentzel, 2021) (cf. partie §.7.2.2).

De plus, il serait nécessaire d'étudier les différents types de formes fluviales créées et donc de végétation associée (habitats pionniers, herbiers aquatiques, etc.) suite aux différentes modalités de restauration écologique déjà réalisées de manière à définir des patrons types d'habitats en fonction des différentes configurations existantes. Ceci permettrait d'améliorer potentiellement les restaurations à venir et la connaissance de la résilience des habitats en fonction des différents seuils à définir (quantité de sédiments injectés ou déposés, type de sédiments, type et volume de débits, etc.).

Enfin, il pourrait être utile de travailler les sujets de sciences humaines en lien avec les actions de réinjection sédimentaire, notamment sur la perception des actions, ce qui renvoient à l'image de la rivière que les acteurs locaux et habitants ont du fleuve qui traverse leur territoire.

7.6.6 Eléments pour un bilan GES

Présentation

Les gaz à effet de serre (GES) qui peuvent être pris en compte dans une analyse d'opération de réinjection sédimentaire sont ceux listées dans l'arrêté du 24 août 2011 relatif aux gaz à effet de serre couverts par les bilans d'émissions de gaz à effet de **serre** correspondant aux dioxydes de carbone (CO₂), méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O), hydrofluorocarbures (HFC), hydrocarbures perfluorés (PCF) et hexafluorure de soufre (SF₆).

Les émissions sont décomposées en trois Scopes en cohérence avec la norme ISO 14064. Cette décomposition permet de séparer ce qui est émis directement par le projet et les émissions moins directement liées.

Pour ce faire on définit ce que l'on appelle le périmètre du projet. Cela recouvre les périmètres physiques (exemple : confluence, retenue) et fonctionnels (exemple : dragage, transport) que l'on considère nécessaires à la réalisation du projet.

- **Le Scope 1** comprend les émissions de GES directement émis sur périmètre. Cela comprend principalement les carburants brûlés sur le périmètre par exemple par : pelleteuses, drague aspiratrice camions, barges, bulldozer, tombereau, etc.
- **Le Scope 2** comprend les émissions directement liées à la production de l'énergie utilisée sur le site mais pas produit sur le site. Cela recouvre principalement les émissions liées à la production d'électricité.
- **Le Scope 3** comprend toutes les autres émissions que l'activités du projet va causer et qui ne sont pas compris dans les Scope 1 et 2. Cela recouvre par exemple les émissions liées à la fabrication des camions de transport (au prorata des km utilisés pour le projet) ou les émissions du personnel venant sur le site.

Pour une opération de dragage / transport / réinjection, le périmètre pris en compte pour le projet comprend :

- Le site de dragage ;
- Les transports des sédiments ;
- Les sites de réinjection.

Scope 1 : Emissions liées à la combustion de :

- Carburant pour les engins de chantier sur le site de dragage ;
- Carburant utilisé sur le site pour l'alimentation des groupes électrogènes ;
- Carburant pour le transport des sédiments.

Scope 2 : Emissions liées à la production de l'électricité réseau utilisée sur les sites de dragage et de réinjection. Cette consommation est généralement très faible et liée aux bâtiments de chantier (chauffage, climatisation).

Scope 3 : Emissions liées à :

- Fabrication des équipements (engins, bâtiments, camions de transport, barges) utilisés sur le périmètre au prorata du temps d'utilisation ;
- Déplacement des salariés depuis leur domicile jusque sur leur site de travail (chantier de dragage ou de réinjection) ;
- Emissions liées à la réalisation des études par les prestataires externes (déplacement des consultants, ordinateurs, etc.) ;
- Partie amont de la production énergétique : émission qui n'est pas due à la combustion directe (transport du fuel à l'usine de production d'électricité, engins nécessaires pour l'extraction de l'uranium, émission de GES lors du raffinage, etc.).

Données utilisées pour chaque source d'émission

Les informations renseignées par source d'émission et pour chaque scenario sont les suivantes :

- **Pour les émissions liées à l'utilisation des engins sur le site de dragage :**
 - Pour chaque engin son cubage et son temps d'utilisation ;
 - Le Poids Total Autorisé en Charge (PTAC) moyen ayant servi au transport.
- **Pour les émissions liées à la base-vie et aux déplacements des salariés :**
 - La durée de présence de la base vie sur le site à réhabiliter ;
 - La surface de la base vie ;
 - Le % d'électricité provenant du réseau pour son fonctionnement ;
 - Le nombre de jours de présence sur le chantier (le chantier et sa base-vie) pour l'ensemble des salariés des différentes entreprises intervenantes.
- **Pour les émissions liées au transport des sédiments :**
 - Distance moyenne parcourue par les sédiments ;
 - Cubage des sédiments déplacées ;
 - Le PTAC moyen des camions utilisés ou barges fluviales utilisés
- **Pour les émissions liées à la réinjection des matériaux sur site :**
 - Distance moyenne parcourue par les terres ;
 - Cubage des terres d'apport livrées ;
 - Le PTAC moyen de camions utilisés ou autres engins.
- **Pour les émissions liées aux équipements de chantier fonctionnant avec un système d'énergie :**
 - Durée d'utilisation ;
 - Puissance nominale des équipements (kW) ;
 - % de l'électricité provenant du réseau ;
 - Pays de traitement (les facteurs d'émission de l'électricité sont différents par pays).
- **Emissions liées à la réalisation des études par des prestataires (des ressources informatiques employées, bâtiment, déplacement etc...) :**

Les calculs sont réalisés sur la base des connaissances disponibles et adaptés au projet. Les facteurs d'émission proviennent principalement de la Base carbone de l'ADEME (<http://www.basecarbone.fr/>).

Les émissions moyennes pour les déplacements pendulaires (travail-domicile) proviennent de l'INSEE.

Exemple d'application : dragage du canal de Jonage

L'exemple présenté consiste à comparer 7 modes de gestion des matériaux grossiers du canal de Jonage (80 000 m³ de matériaux correspondants à un dragage initial avant des dragages équivalents à 5 000 m³/an) :

- G3_Dragage puis restitution R1_Rhône St-Vulbas (35 km) ;
- G3_Dragage puis restitution R1_Ain (Pont d'Ain) (40 km) ;
- G3_Dragage puis restitution G4_retenue Jons (5 km) ;
- G3_Dragage puis restitution R7_marges retenue Jons (6 km) ;
- G3_Dragage puis restitution R1_Canal de Miribel (1 km) ;
- G3_Dragage puis restitution R9_gravières Miribel Jonage (10 km) ;
- G3_Dragage puis gestion à terre et valorisation granulats (15 km).

Les distances de transport sont essentiellement la cause des bilans GES défavorables. Le mode de transport intervient peu, bien que le transport fluvial soit plus vertueux en limitant les ruptures de charge.

Bilan GES (kgCO2e)										
Site	Opération	Volume (m³)	Base vie et employés	Drague aspiratrice	Pelleteuses au dragage	Transport barges	Transport camions	Bulldozer et/ou pelleteuse à destination	TOTAL tCO2e	Ratio kgCO2e/m³
Canal de Jonage	G3_Dragage / R1_Rhône St-Vulbas	80000	5,64	0,00	43,70	0,00	516,28	10,87	576	7,2
Canal de Jonage	G3_Dragage / R1_Ain (Pont d'Ain)	80000	5,64	0,00	43,70	0,00	589,44	10,87	650	8,1
Canal de Jonage	G3_Dragage / G4_retenue Jons	80000	6,72	0,00	32,78	76,13	0,00	0,00	116	1,4
Canal de Jonage	G3_Dragage / R7_marges retenue Jons	80000	7,05	0,00	32,78	89,45	0,95	10,87	141	1,8
Canal de Jonage	G3_Dragage / R1_Canal de Miribel	80000	5,41	0,00	43,70	0,00	18,76	10,87	79	1,0
Canal de Jonage	G3_Dragage / R9_gravières Miribel Jonage	80000	5,41	0,00	43,70	0,00	150,45	10,87	210	2,6
Canal de Jonage	G3_Dragage / gestion à terre et valorisation granulats	80000	5,41	0,00	43,70	0,00	223,62	10,87	284	3,5

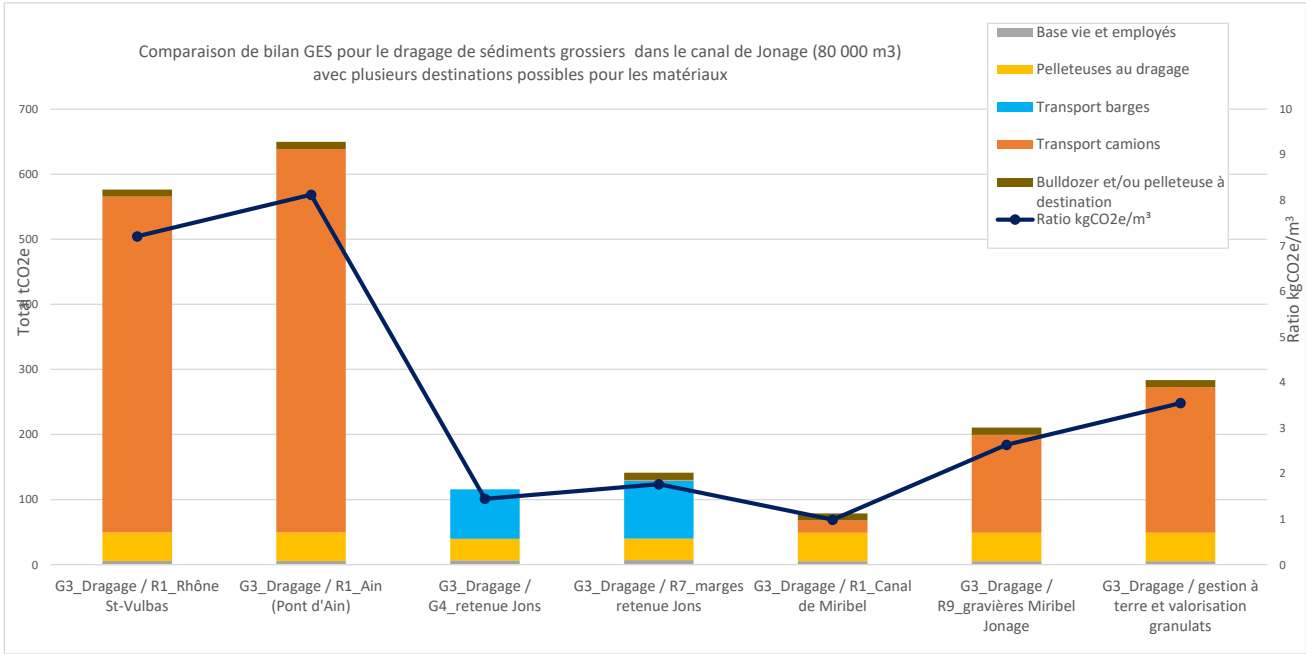


Figure 52 : Exemple d'analyse du bilan GES de différentes solutions (restitution des matériaux grossiers du canal de Jonage)

Exemple d'application : dragage de la confluence Yzeron

L'exemple présenté consiste à comparer 3 modes de gestion des matériaux grossiers de l'Yzeron (1500 m³ de matériaux correspondants à 6 années d'apports moyens à 250 m³/an) :

- Transport par camions puis clapage dans la retenue au droit de la confluence (7 km camion + 1 km barge) ;
- Transport par camions puis clapage en amont du barrage de Pierre-Bénite (7 km camion + 2,4 km barge) ;
- Transport par camions directement vers le RCC de Pierre-Bénite (6 km camion).

A partir du moment où les sédiments sont dans des camions, il est préférable de les mener dans un RCC par cette voie-là plutôt que de les recharger dans une barge.

Bilan GES (kgCO2e)										
Site	Opération	Volume (m³)	Base vie et employés	Drague aspiratrice	Pelleteuses au dragage	Transport barges	Transport camions	Bulldozer et/ou pelleteuse à destination	TOTAL tCO2e	Ratio kgCO2e/m³
Confluence Yzeron	S1- Dragage pelleteuse, camion, barge et clapage face à la confluence	1500	0,57	0,00	1,64	0,25	2,04	0,00	4,50	3,0
Confluence Yzeron	S2- Dragage pelleteuse, camion, barge et clapage en amont du barrage	1500	0,57	0,00	1,64	0,48	2,04	0,00	4,73	3,2
Confluence Yzeron	S3- Dragage pelleteuse, camion et réinjection dans le RCC	1500	0,56	0,00	1,64	0,00	1,78	0,20	4,18	2,8

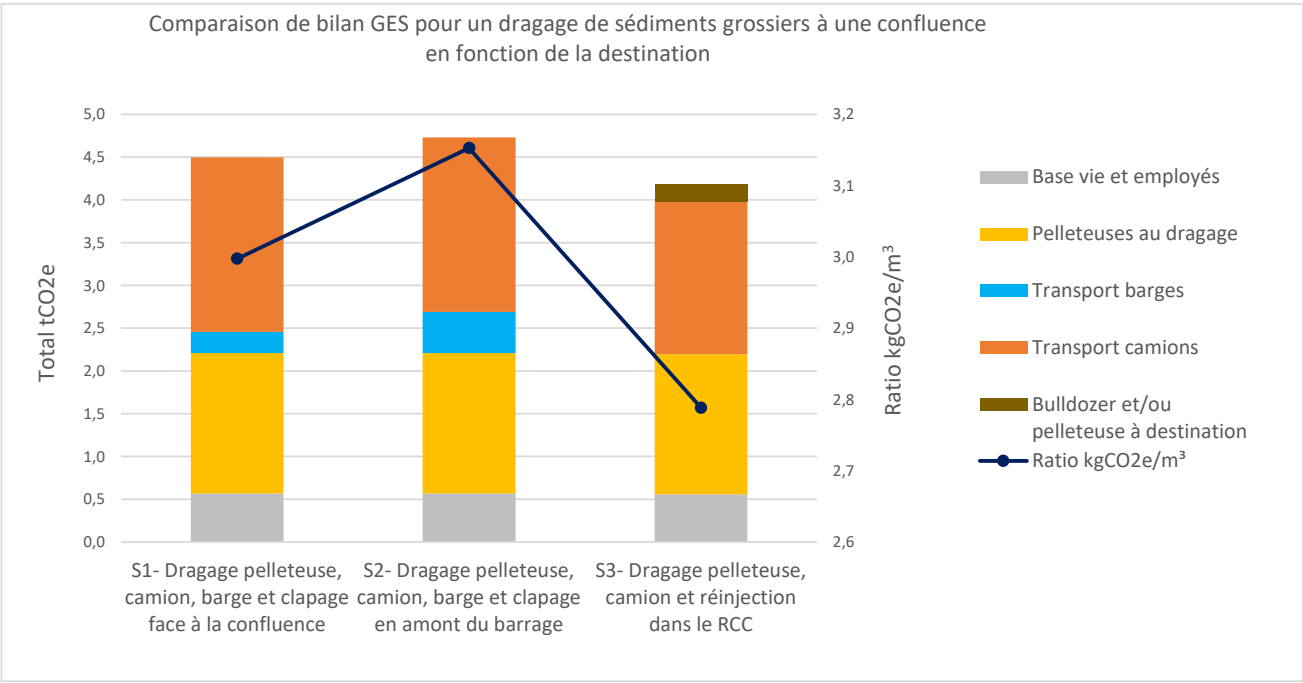


Figure 53 : Exemple d'analyse du bilan GES de différentes solutions (restitution des matériaux grossiers de l'Yzeron)

7.7 Comment choisir entre plusieurs sites de réinjection ?

Au-delà des critères de GES, le choix entre plusieurs sites de réinjection nécessite une analyse multicritère. Les grilles proposées au Chapitre 8.8 sont utiles pour cela.

8. Comment réaliser un choix d'action entre plusieurs solutions ?

Un choix de solution entre plusieurs variantes présentant des éléments techniques et économiques entrelacés et complexes n'est jamais simple. Dans le même esprit que les analyses multicritères de comparaison des scénarios de gestion et de restauration en Mission 7, nous proposons différentes grilles d'analyses multicritères, avec des exemples appliqués.

Dans l'optique de disposer d'outils opérationnels, une gradation dans la complétude des analyses multicritère (AMC) est proposée :

- Analyse multicritère synthétique ;
- Analyse multicritère détaillée.

8.1 Analyse multicritère synthétique

8.1.1 Proposition de grille d'analyse

La grille d'analyse est celle qui a été proposée en Mission 6 pour l'étude des scénarios déclinés en Mission 7.

Les analyses multicritères proposées sont des analyses qualitatives sur lesquelles sont appliquées des notations sommaires. L'objectif est d'obtenir une analyse simple et reproductible.

Les critères d'analyse multicritère retenus sont les suivants :

- Fonctionnement hydrosédimentaire (bilan sédimentaire, processus),
- A) Biologie (habitats, espèces),
- B) Usages socio-économiques (CTO),
- C) Sûreté – sécurité,
- Faisabilité technique,
- Coûts, qui peuvent être détaillés selon :
 - coût d'investissement total (M€HT),
 - coût de fonctionnement (M€/an),
 - coût d'impact (M€/an),
- Empreinte climat GES : empreinte totale estimée globalement (tCO2e/an ou au m³).

On retrouve ici les 3 principales familles d'enjeux : A) Biologie (habitats, espèces), B) Usages socio-économiques (CTO), C) Sûreté – sécurité,

Les analyses peuvent être menées en valeur absolue et comparées selon ce mode. Les analyses peuvent également définir un scénario de référence et les autres scénarios seront comparés à ce premier scénario en relatif.

Une grille d'analyse à 5 notations peut être utilisée : gain élevé (++) ; gain moyen (+) ; absence d'impact (0) ; impact moyen (-), impact fort (--).

Un système de notation peut être affecté aux 3 critères d'enjeux A, B et C. Les notes de +2, +1, 0, -1, -2 sont affectées respectivement aux signes ++, +, 0, -, --. Cette notation permet ainsi d'afficher une note globale du scénario en fonction des effets cumulés sur les 3 familles d'enjeux.

8.1.2 Exemple d'application à l'implantation d'un nouveau site de gestion N4 (G3)

Cet exemple compare deux sites de dragages potentiels en entrée de la traversée de Lyon : site G3_FOSSE_FEYSSINE ou site G3_RETENUE_LYON. La gestion sur le second site suppose que le premier site n'est pas géré, se comble, et que les sédiments atteignent le second site.

Indicateurs	Solution 1 G3_FOSSE_FEYSSINE		Solution 2 G3_RETENUE_LYON	
Principes d'actions	Dragage de sédiments grossiers dans la fosse de la Feyssine avant qui ne se stockent dans la traversée de Lyon et la retenue de Pierre-Bénite		Dragage de sédiments grossiers dans la retenue de Lyon une fois que la fosse de la Feyssine est comblée et/ou transparente	
Technique	Dragage par voie terrestre ou voie fluviale. Devenir des matériaux identique pour les deux solutions (non discriminant)		Dragage par voie fluviale. Devenir des matériaux identique pour les deux solutions (non discriminant)	
Fonctionnement hydrosédimentaire (bilan sédimentaire, processus)	0	Pas de bénéfice pour la continuité sédimentaire par rapport à l'état actuel	+	Mise en place d'une continuité sédimentaire entre les seuils TEO et la traversée de Lyon (Perrache au plus en aval)
A/ Biologie (habitats, espèces)	-	Pas de bénéfice pour la biologie ; impacts négatifs liés aux dragages de la fosse de la Feyssine	++	Mise en place de milieux naturels intéressants dans la fosse de la Feyssine au fur et à mesure de l'enlèvement. Mise en place de hauts fonds dans la traversée de Lyon avec l'enlèvement (et avant dragage). Impacts négatifs liés aux dragages dans la traversée de Lyon
B/ Sûreté - sécurité	+	Préservation des usages dans la traversée de Lyon (navigation, haltes fluviales, réseaux EU-EP). Pas d'impact sur les usages dans la fosse de la Feyssine	--	Impacts forts sur les usages dans la traversée de Lyon (navigation, haltes fluviales, réseaux EU-EP), également en termes de nuisances liées aux travaux
C/ Usages socio-économiques (CTO)	+	Impacts sur les inondations maîtrisés (maintien de la mesure compensatoire, absence d'impact sur PPR)	--	Impacts sur les inondations au droit de la fosse de la Feyssine (abandon de la mesure compensatoire) et dans la traversée de Lyon (majoration des lignes d'eau, cf. PPR)
Faisabilité technique	+	Un seul site de dragage identifié, avec une emprise limitée. Dragage de 10 000 m³/an dans l'état actuel à 30 000 m³/an dans le futur en cas de continuité sédimentaire obtenue en amont	-	Le charriage dans la traversée de Lyon produirait un tri granulométrique sur plusieurs km, induisant des opérations de dragages sur des linéaires importants. Dragage de 10 000 m³/an dans l'état actuel à 30 000 m³/an dans le futur en cas de continuité sédimentaire obtenue en amont
Coût total (M€HT)	0	En moyenne 0,35 à 1,05 M€/an	-	En moyenne 0,50 à 1,50 M€/an
Coût au m³ (€/m³)	0	35 €/m³	-	50 €/m³
Empreinte climat totale (tCO2e)	0	20 à 60 tCO2e/an	-	25 à 75 tCO2e/an
Empreinte climat au m³ (kgCO2e/m³)	0	2,0 kgCO2e/m³	-	2,5 kgCO2e/m³

Bilan (note sur 3 enjeux A, B et C)	+1	Solution plus favorable car elle préserve les usages dans la traversée de Lyon et concentre les opérations de dragage sur un seul site	-2	Solution défavorable car elle disperse les sites de gestion par dragage tout en aggravant la situation des usages et la sûreté dans la traversée de Lyon, et en étant plus coûteuse quel que soit le devenir des sédiments
-------------------------------------	----	--	----	--

++ : gain élevé	+2
+ : gain moyen	+1
0 : absence d'impact ou négligeab	0
- : impact moyen	-1
-- : impact fort	-2

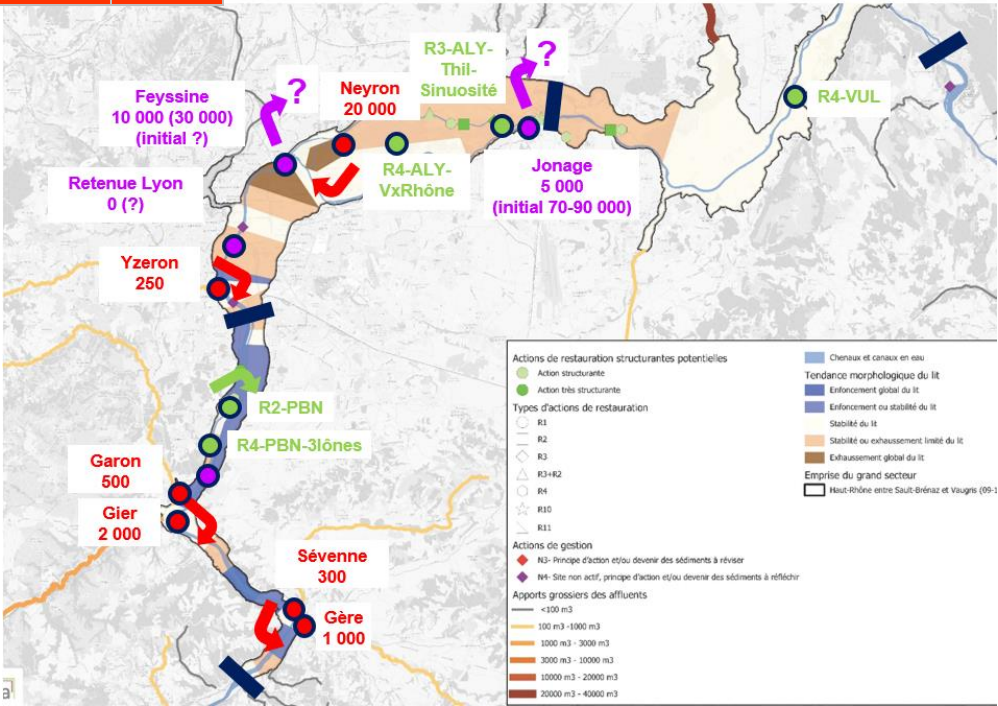


Figure 54 : Exemple d'AMC synthétique : comparaison des sites de dragages N4 de la fosse de la Feyssine et de la retenue de Lyon

8.1.3 Exemple d’application au choix d’un site de réinjection (R1)

L'exemple présenté est le même que celui pour le bilan de GES. Il consiste à comparer 7 modes de gestion des matériaux grossiers du canal de Jonage (80 000 m³ de matériaux correspondants à un dragage initial avant des dragages équivalents à 5 000 m³/an) :

- G3_Dragage puis restitution R1_Rhône St-Vulbas (35 km) ;
- G3_Dragage puis restitution R1_Ain (Pont d'Ain) (40 km) ;
- G3_Dragage puis restitution G4_retenue Jons (5 km) ;
- G3_Dragage puis restitution R7_marges retenue Jons (6 km) ;
- G3_Dragage puis restitution R1_Canal de Miribel (1 km) ;
- G3_Dragage puis restitution R9_gravières Miribel Jonage (10 km) ;
- G3_Dragage puis gestion à terre et valorisation granulats (15 km).

Les distances de transport sont essentiellement la cause de bilans économiques défavorables. Les gains écologiques sont majorés dans les secteurs déficitaires à forte valeur écologique. Le mode de transport intervient peu, bien que le transport fluvial soit plus vertueux en limitant les ruptures de charge.

Figure 55 : Exemple d’AMC synthétique : comparaison des sites de réinjection pour le dragage du canal de Jonage (d’après données EDF complétées)

Indicateurs	Solution 1 G3_Dragage / R1_Rhône St-Vulbas		Solution 2 G3_Dragage / R1_Ain (Pont-d'Ain)		Solution 3 G3_Dragage / G4_Retenue de Jons		Solution 4 G3_Dragage / R7_Marges retenue de Jons		Solution 5 G3_Dragage / R1_Canal de Miribel		Solution 6 G3_Dragage / R9_Gravières Miribel Jonage		Solution 7 G3_Dragage / Gestion à terre revalorisation	
Principes d'actions	Réinjection dans le Rhône de St-Vulbas en aval de Sault-Brénaz		Réinjection dans l'Ain à hauteur de Pont-d'Ain		Réinjection dans la retenue de Jons		Réinjection dans les casiers de la retenue de Jons		Réinjection dans le canal de Miribel		Réinjection dans des gravières de l'île de Miribel Jonage		Revalorisation des BTP, jusqu'au lieu de destination finale	
Mode de transport	Route (35 km)		Route (40 km)		Fluvial (5 km)		Fluvial (5 km)		Route (1 km)		Route (10 km)		Route (5 km + 10 km destination finale)	
Fonctionnement hydrosédimentaire (bilan sédimentaire, processus)	0	Tronçon qui n'est pas en déficit historique (situation naturelle, sauf secteur ancienne extraction à vérifier) mais fonctionne en déstockage. Ne peut admettre 80000 m³ en une opération	++	Bénéfice important pour l'Ain dont la basse vallée est en déficit sur 40 km (processus de pavage)	-	Augmentation du phénomène de stockage/déstockage dans la retenue, risque de réengrèvement dans le canal de Jonage	+	Volume réinjectés qui seraient plus mobiles. Amélioration de la continuité sédimentaire de la retenue (2 km)	-	Apport sédimentaire non nécessaire au canal de Miribel (15 km) qui est en équilibre. Rehaussement du fond de lit	0	Mise en stock des excédents sédimentaires	--	Aucun gain pour les rivières, perte de stock alluvial
A/ Biologie (habitats, espèces)	+	Bénéfice en terme de renouvellement des substrats et d'habitats sur 25 km	++	Bénéfices importants pour les habitats et la biodiversité aquatique sur 40 km de la basse vallée de l'Ain	0	Faible bénéfice écologique, état similaire à l'actuel	+	Bénéfices pour les marges (création de hauts fonds)	+	Gains écologiques limités par rapport à la situation actuelle, rehaussement de la nappe	-	Impacts négatifs sur les milieux des anciennes gravières	-	Aucun gain biologique pour les rivières
B/ Sécurité - sécurité	-	Impacts potentiels sur la prise d'eau CNPE Bugey, les activités de loisirs	0	Impacts négligeables sur les usages (pêche, baignade) du lieu de réinjection	0	Absence d'impact sur hydroélectricité	0	Absence d'impact sur les loisirs (pêche)	0	Impacts négligeables sur les usages (pêche, baignade) du lieu de réinjection	-	Impacts négatifs sur les loisirs (pêche)	+	Permet d'alimenter la filière BTP avec des matériaux de bonne qualité
C/ Usages socio-économiques (CTO)	-	Impacts potentiels sur les inondations (majoration des lignes d'eau, cf. PPRI)	-	Impacts potentiels sur les inondations (majoration des lignes d'eau, cf. PPRI)	-	Impacts potentiels sur les inondations (majoration des lignes d'eau, cf. PPRI)	-	Impacts potentiels sur les inondations (majoration des lignes d'eau, cf. PPRI)	-	Impacts potentiels sur les inondations (majoration des lignes d'eau, cf. PPRI). Impact potentiel sur l'alimentation AEP	0	Impact potentiel sur l'alimentation AEP	0	Aucun impact
Faisabilité technique	0	Nuisances et sécurité sur routes. Reproductible à mesure de la capacité de charriage (10 000 m³/an max)	-	Nuisances et sécurité sur routes. Bonne reproductibilité (environ 10000 à 30000 m³/an)	+	Bonne faisabilité du transport fluvial dans la retenue	0	Faisabilité du transport fluvial à vérifier pour l'accès aux zones de restitution	+	Proximité du lieu de réinjection, mais volume et reproductibilité limités	-	Faisabilité technique complexe du fait des enjeux écologiques et nappe	+	Filière BTP qui peut être demandeuse de matériaux
Coût total (M€HT)	--	4,00 M€	--	4,29 M€	0	1,72 M€	-	2,30 M€	-	2,04 M€	-	2,56 M€	-	2,27 M€
Coût au m³ (€/m³)	--	50 €/m³	--	54 €/m³	0	22 €/m³	-	29 €/m³	-	26 €/m³	-	32 €/m³	-	28 €/m³
Empreinte climat totale (tCO2e)	--	576 tCO2e	--	650 tCO2e	-	116 tCO2e	-	208 tCO2e	0	79 tCO2e	-	210 tCO2e	-	284 tCO2e
Empreinte climat au m³ (kgCO2e/m³)	--	7,2 kgCO2e/m³	--	8,1 kgCO2e/m³	-	1,4 kgCO2e/m³	-	2,6 kgCO2e/m³	0	1,0 kgCO2e/m³	-	2,6 kgCO2e/m³	-	3,5 kgCO2e/m³

Bilan (note sur 3 enjeux A, B et C)	-1	Peut admettre un volume de 10000 à 20000 m³ à confirmer avec la capacité de charriage réelle. Impact économique et CO2 important	+1	Peut admettre un volume important en fonction de la capacité de charriage réelle (à confirmer pour 80000 m³). Gains écologiques importants, mais impact économique et CO2 important	-1	Ne pourrait pas admettre un volume de 80 000 m³ correspondant à plus de 2 fois les apports annuels. Risque de réengrèvement du canal de Jonage. Eventuellement 10000 à 20000 m³.	0	Bon intérêt technique, bathymétrie et accès des barges aux zones de restitution à confirmer	0	Bon intérêt technique et bilan CO2 mais volume à limiter à 10000 ou 20000 m³ à cause des impacts potentiels	-2	Solution présentant peu d'intérêt, sinon pour stocker les sédiments en vue de déficits futurs	0	Solution de repli si les autres solutions ne sont pas faisables, ou sont trop coûteuses
-------------------------------------	----	--	----	---	----	--	---	---	---	---	----	---	---	---

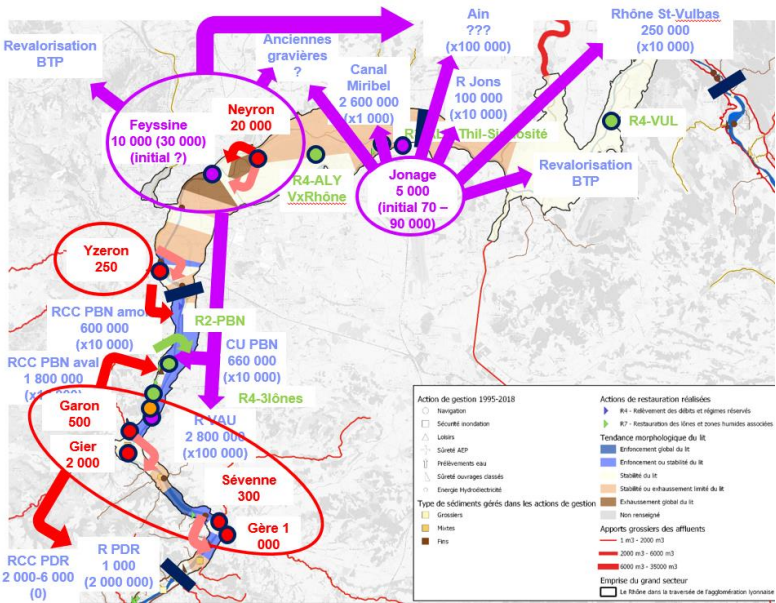


Figure 56 : Exemple d’AMC synthétique : illustrant graphique des différentes hypothèses pour le devenir des sédiments dragués dans le canal de Jonage

8.2 Analyse multicritère détaillée

8.2.1 Pré-sélection de sites

Une analyse multicritère détaillée peut comprendre dans un premier une pré-sélection. Cela peut être le cas par exemple pour des sites de réinjection sédimentaire.

Pour les RCC de Belley et de Chautagne, BURGEAP (2021) et CNR ont établi une grille d'analyse pour une pré-sélection de site (3 sites retenus sur 25 au total).

Les critères utilisés pour l'analyse sont définis comme suit :

- Morphologie – équilibre géomorphologique du linéaire : ce critère sert à identifier si les sites présélectionnés se trouvent sur un tronçon du Vieux Rhône en déficit sédimentaire ou non.
- Morphologie – gestion globale des stocks sédimentaires : ce critère permet d'identifier si une restitution dans le site identifié participera au transit sédimentaire du fleuve (exemple : la restitution dans un plan d'eau déconnecté ne participera pas au transit du fleuve).
- Morphologie – continuité sédimentaire longitudinale (longueur de RCC concerné) : ce critère permet d'identifier l'intérêt de la restitution par rapport à la localisation du site sur le vieux-Rhône, une restitution en amont ayant plus d'intérêt qu'une restitution qui se ferait juste en amont de la restitution. On évalue ici la distance linéaire sur laquelle la restitution aura une incidence, plus la distance est importante, plus l'intérêt est positif.

- Morphologie – continuité sédimentaire (absence d'ouvrage en aval) : ce critère permet de voir s'il y a un obstacle au transit sédimentaire, un ouvrage qui stopperait les matériaux, en aval à proximité directe du site de restitution.
- Hydroélectricité – absence d'enjeu de sécurité des usagers (lâcher d'alerte) : ce critère vient du retour d'expérience de la première restitution en aval du barrage de Motz. Il a été constaté suite à cette opération, que la réinjection en aval direct du barrage avait une incidence sur le pilotage hydraulique de l'ouvrage ; ici on juge ainsi de l'impact potentiel sur la sûreté des ouvrages et la sécurité des usagers.
- Hydroélectricité – absence de problème d'exploitation (pilotage du barrage) : ce critère découle également du retour d'expérience de la restitution en aval du barrage de Motz. Il a été constaté que la remise à l'eau des matériaux trop proche du barrage posait des problèmes dans la gestion du barrage du fait de la modification de la ligne d'eau posant des problèmes pour l'exploitation de l'aménagement.
- Absence de contrainte bathymétrique liée au volume de recharge : ce critère est directement lié aux opérations de restitution antérieures. Les matériaux mettant du temps à transiter en fonction de la capacité de charriage locale, il n'est pas toujours possible de restituer des matériaux plusieurs fois sur un même site et sur un pas de temps court (exemple : aval barrage de Motz, restitution de 15 000 m³ en 2016, dans un secteur avec une capacité de charriage d'environ 1 000 m³/an ; il faut donc théoriquement environ 15 années pour remobiliser tous les matériaux, ce qui rend impossible une nouvelle opération à court terme).

Les résultats d'une telle analyse multicritère sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 19 : Exemple de grille d'analyse de pré-sélection (de sites de réinjection sédimentaire, RCC de Belley et Chautagne)

N°_SITE	NOM_SITE	PK	Analyse critère site de réinjection potentiel							Résultat analyse multicritère (site favorable pour une restitution)
			Morphologie – équilibre géomorphologique du linéaire	Morphologie – gestion globale des stocks sédimentaires	Morphologie – continuité sédimentaire longitudinale (longueur de RCC concerné)	Morphologie – continuité sédimentaire (absence ouvrage en aval)	Hydroélectricité – absence d'enjeu de sécurité des usagers (lâcher d'alerte)	Hydroélectricité – absence pb exploitation (pilotage du barrage)	Absence de contraintes bathymétriques liées au volume de recharge	
0	Aval barrage de Motz RG	145,58	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	NON	NON	Non retenu
1	Banc amont Malourdie - amont seuil des îles	143,78	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	Non retenu
2	Banc amont Malourdie - entre les deux seuils	143,63	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	Non retenu
3	Banc amont Malourdie - aval seuil Salomon	142,80	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	Non retenu
4	RG aval seuil des îles	143,55	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	Non retenu
5	Banc serrières RG - aval banc	141,30	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	Retenu
6	Banc serrières RG - milieu banc	141,55	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	Retenu
7	Banc serrières RG - amont banc	141,80	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	Retenu
8	Banc Malourdie RD	140,95	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	Non retenu
9	Banc Malourdie RG - amont banc	140,30	NON	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	Non retenu
10	Banc Malourdie RG - aval banc	139,58	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	Non retenu
11	Banc aval Malourdie RD - amont banc	139,50	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	Non retenu
12	Banc aval Malourdie RD - aval banc	139,35	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	Non retenu
13	Casier 10 malourdie	141,50	OUI	NON	NC	OUI	OUI	OUI	OUI	Non retenu
14	Gravière sud GraviRhône	135,20	OUI	NON	NC	OUI	OUI	OUI	OUI	Non retenu
15	Aval RG barrage Lavours	131,18	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	NON	OUI	Non retenu
16	Aval RD barrage Lavours	131,32	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	NON	OUI	Non retenu
17	Aval RD barrage Lavours 2	130,85	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	NON	OUI	Non retenu
18	Aval seuil Fournier	128,90	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	Retenu
19	PK 127.3 RG	127,30	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	Non retenu
20	Aval seuil Lucey RG	125,18	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	Non retenu
21	Aval seuil Lucey RD	124,88	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	Non retenu
22	Banc Etain	123,35	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	Non retenu
23	Aval seuil de Yenne	117,75	NON	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	Non retenu
24	Hameau Magnin PK 121 RD	121,00	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	Non retenu

8.2.2 Proposition d'analyse multicritère détaillée

Une grille d'analyse détaillée a été testée sur le site du Pont de la Loi (BURGEAP, 2021).

Chacun des sites, avec ses modalités de restitution, est étudié par une analyse multicritère semi-quantitative et synthétique dont les paramètres retenus sont présentés de manière exhaustive dans le Tableau 20. Les grandes catégories de critères étudiés :

- Effets sur les fonctions hydromorphologiques et biologiques ;
- Effets sur les enjeux sûreté et sécurité
- Effets sur les usages économiques ;
- Faisabilité technique ;
- Contribution aux différentes politiques publiques ;
- Coûts.

Pour chaque catégorie, des sous-critères détaillés permettent d'appréhender les tendances positives ou négatives liées aux scénarios.

La grille d'analyse multicritère est présentée en pages suivantes. Elle peut comprendre 2 approches :

- Une approche qualitative, avec des notes de tendance d'impact ou de gain : --, -, 0, +, ++ ;
- Un essai d'approche quantifiée, en affectant les notes précédentes des coefficients -2, -1, 0, 1 et 2. Les valeurs obtenues n'ont pas de signification intrinsèque mais permettent de hiérarchiser chaque scénario par rapport à l'autre. Idéalement, aucune pondération n'est nécessaire car chaque critère garde un poids qui lui est propre et qui dépend de la perception des acteurs. Cependant, on peut chercher à équilibrer le nombre de critères par thématiques.

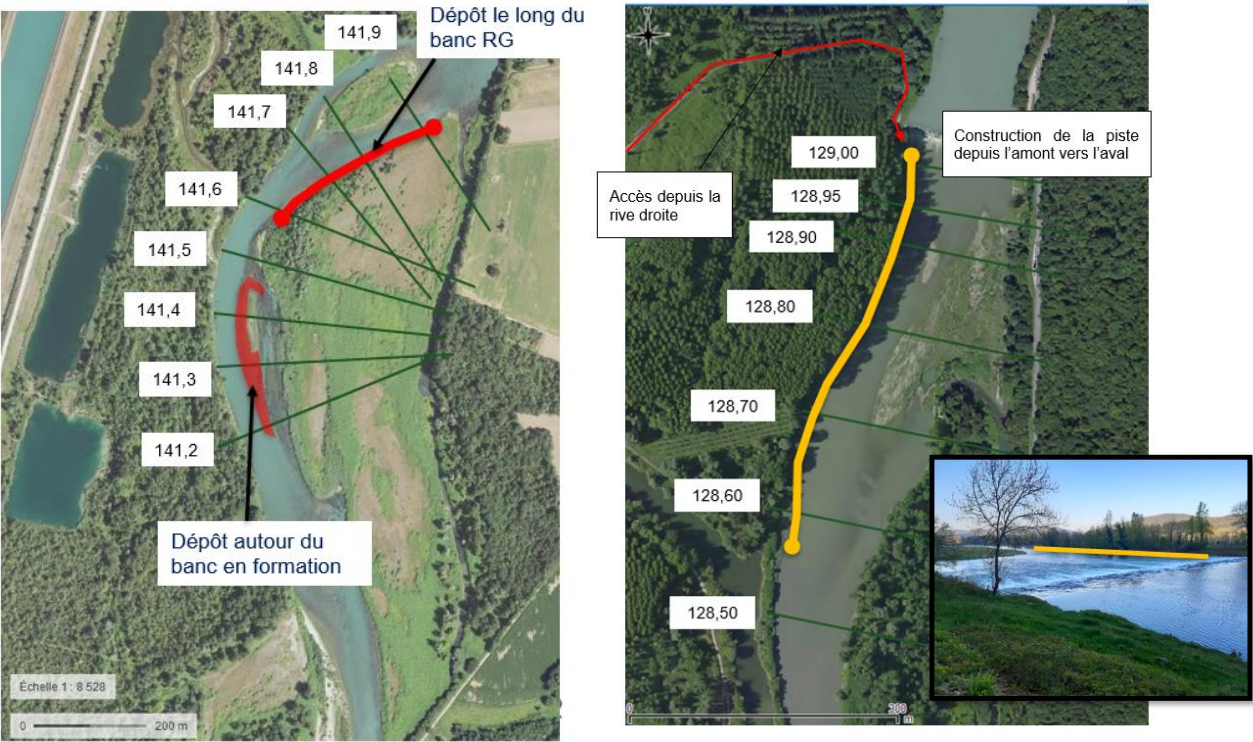


Figure 57 : Exemple d'analyse multicritère détaillée (de sites de réinjection sédimentaire 1 et 3B, RCC de Belley et Chautagne)

Tableau 20 : Exemple d'analyse multicritère détaillée (de sites de réinjection sédimentaire1, 3A et 3B, RCC de Belley et Chautagne)

Site n°	1	3A	3B
Nom du site	Méandre de Serrières	Aval seuil Fournier rive gauche	Aval seuil Fournier rive droite
PK	141.9-141.3	129.0-128.6	129.0-128.6
Distance depuis lieux de stockage provisoire	8,5 - 15,5 km	9 - 5,5 km	10 - 4 km
Dmax pour Q2	20-40 mm	10-50 mm	10-50 mm
Capacité charriage moyenne annuelle	5 000-20 000 m³/an	5 000-15 000 m³/an	5 000-15 000 m³/an
Capacité charriage Q2	1 000-2 000 m³	1 000-4 000 m³	1 000-4 000 m³
Capacité charriage Q10	4 000-5 000 m³	2 000-10 000 m³	2 000-10 000 m³
Effets sur les fonctions hydromorphologiques et biologiques			
Hydrogéologie – échanges nappe rivière	0	0	0
Morphologie – équilibre géomorphologique local	++	+	++
Morphologie – équilibre géomorphologique de l'UHC	++	++	++
Morphologie – mobilité latérale	++	+	+
Morphologie – continuité sédimentaire longitudinale	+	++	++
Morphologie – continuité sédimentaire pour les affluents	0	0	0
Biogéochimie – autoépuration au sein du lit mineur	+	+	+
Biogéochimie – effet tampon des zones rivulaires	0	0	0
Biologie – trame verte - sous-trame milieux pionniers et forêt	0	0	0
Biologie – trame bleue - continuité longitudinale et latérale	0	0	0
Biologie – diversité des habitats	+	+	+
Biologie – habitats remarquables	0	0	0
Biologie – flore protégée et remarquable	+	++	++
Biologie – flore exotique envahissante	-	0	0
Biologie - faune - cortège milieu aquatique	0	0	0
Biologie - faune - cortège habitats humides et terrestres	0	0	0
Effets sur les enjeux de sûreté et sécurité			
Aléas - Ecrêtement des crues	+	+	+
Aléas - Aléa inondation en zone à enjeux	0	0	0
Aléas - Sûreté des ouvrages classés	-	0	0
Aléas de mobilité latérale	0	-	0
Vulnérabilité - Dommages aux/liées aux personnes	0	0	0
Vulnérabilité - Dommages aux biens	0	0	0
Effets sur les usages socio-économiques			
Navigation	0	0	0
Hydroélectricité	0	0	0
CNPE	0	0	0
AEP	0	0	0
Prise d'eau (industrie, agriculture)	0	0	0
Agriculture	0	0	0
Réseaux (hors AEP)	0	0	0
Pêche, chasse	+	+	+
Pratiques aquatiques (sports d'eau vive, baignade)	0	0	0
Pratiques terrestres (randonnée, voie verte, etc.)	0	0	0
Paysage	0	0	0
Faisabilité			
Contrainte foncière	0	0	0
Contraintes d'accès, de circulation	--	-	--
Contraintes écologiques espèces protégées	-	-	0
Contraintes écologiques espèces exotiques	--	--	-
Contraintes bilan CO2 (distance transport, volumes, etc.)	--	--	-
Contribution aux différentes politiques			
Adaptation au changement climatique	+	+	+
Atteinte du bon état / potentiel écologique (DCE)	+	+	+
Gestion sédimentaire, habitats, continuité (SDAGE)	++	++	++
Lutte contre les inondations (DCI)	0	0	0
Biodiversité (TVB, directives habitats, etc.)	++	++	++
Coûts			
Modalités foncières	0	0	0
Montant des travaux	--	-	-
Coûts annuels de fonctionnement des aménagements	0	0	0
Renouvellement de l'opération	++	++	++

Notation par rapport à l'état actuel selon 5 niveaux

++ : gain très positif
+ : gain moyen
0 : absence d'impact ou négligeable
- : impact moyen
-- : impact fort

Tableau 21 : Synthèse de préconisations générales pour les affluents

9. Quels autres sujets à traiter dans le futur ?

9.1 Quelles préconisations pour les bassins versants affluents ?

La question de la gestion sédimentaire des affluents en lien avec celle du Rhône dépasse le cadre de la présente étude. Toutefois, les principes de gestion du Rhône restent fortement dépendants des apports des affluents et de leur gestion. Certaines synergies pourraient apparaître avec des affluents en excédent sans continuité sédimentaire et des secteurs de Rhône déficitaire, ou inversement.

A l'avenir, il pourrait donc être utile d'améliorer les échanges techniques entre les acteurs du Rhône et les acteurs des bassins versants affluents dans un intérêt commun de meilleure gestion sédimentaire.

Le tableau ci-après résume les éléments généraux qui peuvent être émis à ce stade pour les 18 affluents majeurs. Cette vision est forcément partielle puisque des enjeux forts peuvent également exister sur de petits affluents. Aussi, il sera utile de prolonger ce travail en utilisant les synthèses établies sur les affluents dans le cadre de la Phase 1 (notamment dans les fiches de synthèse par UHC).

Pour les sédiments fins et sableux, même s'ils impliquent des mesures de gestion conséquentes et coûteuses notamment sur le Haut-Rhône et la basse Isère, puis dans un certain nombre de retenues, les apports depuis les affluents doivent se poursuivre afin de participer à la construction des habitats des Vieux Rhône et au fonctionnement du delta et du littoral. La gestion hydrosédimentaire du Rhône ne saurait motiver une limitation de la production sédimentaire dans les bassins versants affluents.

Pour les sédiments grossiers, plusieurs commentaires généraux peuvent être formulés :

- Dans un premier temps, on remarquera qu'il ne serait pas simple de préconiser à un bassin versant affluent présentant un fonctionnement sédimentaire a priori en équilibre, voire même en déficit, de réduire ses apports au prétexte que la confluence avec le Rhône serait située en zone excédentaire. Le linéaire de l'affluent en amont de la confluence se retrouverait privé d'une partie de ses sédiments alors qu'il pourrait être en bon état de fonctionnement actuellement. Plusieurs affluents sont dans cette situation : Arve, Usses, Doux, Eyrieux, Drôme, Ouvèze Ardéchoise, Roubion, Cèze, Durance. A ce stade, la préconisation retenue est de ne pas modifier le fonctionnement sédimentaire dans le bassin versant affluent ;
- Inversement, certains affluents et parfois les mêmes, présentent des déficits ou des tendances au déficit : Guiers, Ain, Eyrieux, Roubion, Ardèche, Cèze, Gardon. Dans le cas où le grand secteur du Rhône correspondant serait en excédent après avoir épuisé toutes les solutions locales de réinjection de sédiments, alors une solution de remonter les sédiments dans le bassin versant pourrait être étudiée, en accord avec le gestionnaire GEMAPI de ce bassin versant ;
- Enfin, il y a des bassins versants particuliers, qui n'entrent pas dans les catégories précédentes : la Saône parce qu'elle n'apporte pas de matériaux grossiers ; l'Isère qui a eu apporté des matériaux grossiers et qui n'apporte plus que des sables actuellement (le retour des matériaux grossiers est toutefois à surveiller dans la retenue de Beauvoir) ;

Les apports des affluents doivent a minima être intégrés dans les suivi futurs afin d'apprécier l'évolution de leurs apports et d'aider à la prise de décision pour la gestion sédimentaire du Rhône.

S	N°	UHC	Affluents majeurs	Apports grossiers avant aménagements (m³/an)	Apports grossiers actuels en entrée d'UHC (m³/an)	Commentaire sur le fonctionnement actuel	Situation du Rhône à la confluence	Préconisations
I	01	SUI	ARVE	100 000	20 000	Apports proches d'une situation non perturbée (capacité de charriage maximale qui pourraient être de 30 000 m³/an au maximum)	Excédent (retenue de Verbois)	Ne pas chercher à modifier le fonctionnement sédimentaire Eventuellement remonter des excédents de la retenue de Verbois dans le bassin versant
I	04	SEY	USSES	20 000	4 000	Apports proches d'un état non perturbé	Excédent (retenue de Seyssel) Utilité des apports pour réinjection R1 dans le RCC de Chautagne	Ne pas chercher à modifier le fonctionnement sédimentaire
II	05	CHA	FIER	60 000	-	Apports du Fier et du Chéran de l'ordre de 10 000 (max 30 000) m³/an stoppés en queue de retenue du barrage de Vallières	Excédent (retenue de Motz) Utilité potentielle des apports pour le RCC de Chautagne (15 km)	Intégration d'une solution de transfert de matériau en provenance de la queue de retenue de Vallières dans les scénarios locaux
II	07	BRC	GUIERS	10 000	500	Apports bridés par des blocages / ralentissements dans des barrages en amont (Romagnieu, SALPA, etc.)	Equilibre (RCC de Brégnier Cordon). Faible apport, correspondant cependant à la faible capacité de charriage actuelle Utilité potentielle d'apports supplémentaires pour le RCC de Brégnier-Cordon	Favoriser la continuité sédimentaire en amont de la confluence. Eventuellement remonter des excédents dans le linéaire en amont de la confluence
III	10	ALY	AIN	100 000	35 000	Apports à saturation (30-40 000 m³/an), en déclin dans les décennies à venir (valeur plancher de 10 000 m³/an) du fait du blocage des apports amont (réservoirs), et malgré des réinjections dans le bassin versant	Equilibre (dans la retenue de Jons)	Engager un suivi des apports (bathymétrie, géophone, hydrophone) Dans la mesure du possible, remonter des excédents dans le bassin versant
III	11	PBN	SAONE	-	-	Aucun apport grossier	-	-
IV	15	BLV	DOUX	8 000	6 000	Apports proches d'un état non perturbé	Excédent (retenue de Bourg-lès-Valence)	Ne pas chercher à modifier le fonctionnement sédimentaire
IV-V	15	BLV	ISERE	50 000	-	Aucun apport grossier	-	Surveillance du retour des apports grossiers au niveau de la retenue de Beauvoir (potentiellement 10-20 000 m³/an)
V	16	BEA	EYRIEUX	20 000	5 000	Apports en déclin du fait d'obstacles en amont	Excédent (retenue du Pouzin) Utilité des apports pour réinjection R1 dans le RCC de Beauchastel	Ne pas chercher à modifier le fonctionnement sédimentaire Eventuellement remonter des excédents dans le bassin versant
V	17	BLN	DROME	40 000	20 000	Apports proches d'un état non perturbé	Excédent (retenue du Pouzin) Utilité des apports pour réinjection R1 dans les RCC de Baix-Le-Logis-Neuf, Montélimar et Donzère	Ne pas chercher à modifier le fonctionnement sédimentaire
V	17	BLN	OUEZE ARDECHOISE	15 000	4 000	Apports proches d'un état non perturbé	Excédent (retenue du Pouzin) Utilité des apports pour réinjection R1 dans le RCC de Baix-Le-Logis-Neuf	Ne pas chercher à modifier le fonctionnement sédimentaire
V	18	MON	ROUBION	10 000	2 000	Apports en déclin du fait d'anciennes extractions et obstacles en amont (malgré des réinjections dans le bassin versant)	Excédent (canal de Montélimar) Utilité des apports pour réinjection R1 dans le RCC de Montélimar	Ne pas chercher à modifier le fonctionnement sédimentaire Eventuellement remonter des excédents dans le bassin versant
V	19	DZM	ARDECHE	15 000	3 000	Apports en déclin du fait d'anciennes extractions et obstacles en amont	Equilibre (dans le RCC de Donzère)	Ne pas chercher à modifier le fonctionnement sédimentaire Eventuellement remonter des excédents dans le bassin versant
VI	20	CAD	CEZE	10 000	5 000	Apports en déclin du fait d'anciennes extractions et obstacles en amont	Excédent (dans le RCC de Caderousse) En équilibre entre apports et capacité de charriage	Ne pas chercher à modifier le fonctionnement sédimentaire Eventuellement remonter des excédents dans le bassin versant
VI	20	CAD	AIGUES	2 000	-	Apports du bassin versant qui n'atteignent plus la confluence avec le Rhône	Excédent (Bras des Arméniers, RCC d'Avignon)	Propres sédiments sédiments à gérer dans le bassin versant
VI	21	AVI	OUEZE DROMOISE	5 000	-	Apports du bassin versant en déclin (anciennes extractions) qui n'atteignent plus la confluence avec le Rhône	Excédent (RCC d'Avignon)	Propres sédiments sédiments à gérer dans le bassin versant
VI	22	VAL	DURANCE	200 000	6 000	Apports réduits du fait des aménagements et extractions en amont, pourraient augmenter à l'avenir	Excédent (retenue de Vallabrègues) Utilité des apports pour réinjection R1 dans le Palier d'Arles	Ne pas chercher à modifier le fonctionnement sédimentaire
VI	22	VAL	GARDON	5 000	-	Apports annulés du fai d'anciennes extractions en basse vallée. Retour des sédiments possibles sous 2-3 décennies	Excédent par rapports aux capacités (RCC de Vallabrègues) Utilité des apports pour réinjection R1 dans le RCC de Vallabrègues ou Palier d'Arles	Ne pas chercher à modifier le fonctionnement sédimentaire Eventuellement remonter des excédents dans le bassin versant
			TOTAL	670 000	110 500			

9.2 Identifier la trajectoire future d'évolution du Rhône

A travers les préconisations des stratégies proposées et les suivis scientifiques qui seront menés, il sera possible à l'avenir de « tracer » la trajectoire hydro-éco-morphologique du Rhône, notamment des Vieux Rhône qui continueront à faire l'objet de travaux de restauration.

Ces trajectoires pourront être illustrées par des graphiques comme la figure ci-dessous, proposé par Arnaud (2012) d'après Dufour et Piégay (2009) pour le Rhin. Dans ce schéma pourrait être intégré un indicateur sur l'état des stocks / déficit d'une UHC ou d'un grand secteur, afin de suivre la tendance et être en mesure d'anticiper.

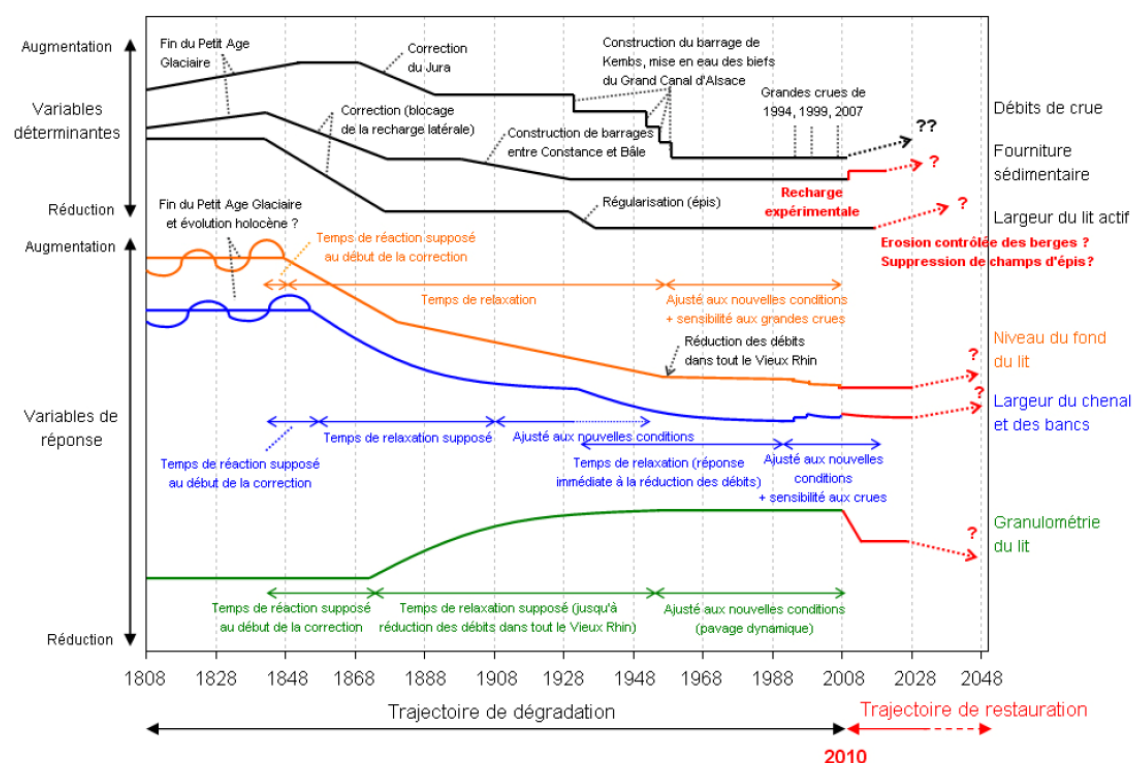


Figure 58 : Exemple de représentation schématique des trajectoires temporelles de dégradation et de restauration (le Rhin entre Kembs et Breisach, in Arnaud, 2012)

9.3 En quoi la gestion sédimentaire et la filière de granulats sont liées ?

Les bilans sédimentaires globaux établis en conclusion de Mission 7 ont montré que certains grands secteurs du Rhône pourraient subir à long terme des situations de « saturation » en matériaux grossiers du fait des enjeux sûreté-sécurité ou socio-économiques qui seraient déclenchés et du fait que chaque grand secteur, UHC ou groupe d'UHC fonctionne, malgré des améliorations possibles sur la continuité, en compartiment fermé.

A l'avenir, toutes les solutions de réinjections en milieux alluvial devront être recherchées et étudiées, y compris dans les bassins versants affluents et d'anciennes gravières. Cependant, si malgré ces solutions, il reste des excédents à gérer, les acteurs d'un territoire pourront se poser la question d'introduire des volumes dans la filière des granulats. Le fait de faire des actions de restauration ambitieuses qui dégagent des volumes de déblais peut aussi accélérer cette réflexion car un seul projet ambitieux pourrait conduire une UHC ou un groupe d'UHC à se retrouver en situation de saturation de matériaux grossiers.

Ce type de réflexion pourrait être intégré dans les schémas régionaux de carrière, et la filière alluvionnaires pourrait un appoint de ressource et dans certains cas éventuellement une solution moins impactante qu'une ouverture de gravière en lit majeur avec des sensibilités de nappe ou écologie.

9.4 Faut-il engager des continuités sédimentaires en circuit fermé ?

Les stratégies proposées par grands secteurs montrent que, compte tenu de la situation excédentaire et fermée de chaque territoire géographique, il peut exister des situations où, à terme, les flux sédimentaires grossiers tourneraient en boucle sur un périmètre donné : les matériaux arrivant en limite aval seraient dragués et remontés en amont en départ du secteur déficitaire.

Ce type de fonctionnement est aujourd'hui acté sur le Danube non aménagé entre Vienne et Bratislava, où se cumulent des enjeux de navigation et des enjeux écologiques du fait d'une très forte privation de sédiments par le passé (extractions, blocage des sédiments dans les retenues amont). Après avoir procédé à des réinjections sédimentaires depuis 1996 à hauteur de 186 000 m³/an, au maximum 235 000 m³/an en 2019, le linéaire est aujourd'hui globalement en équilibre. Un piège à sédiments a été aménagé au PK1888 à l'approche de Bratislava (Slovaquie) et de la retenue de barrage de Gabčíkovo-Nagymaros en aval, et les sédiments dragués sont remontés sur 20 km (PK1908) sous le barrage de Freudenu afin de faire fonctionner le linéaire en boucle fermée (cf. Mission 5 ; cf. Figure 59).

Ce type de situation pourrait exister à terme, avec des proportions moindres toutefois, sur le Rhône. Le fait de faire remonter des sédiments est d'une certaine manière contraire aux lois de la gravité et peut interpeller. Aussi, au-delà des aspects techniques, les débats devront porter avec les acteurs locaux, avec la société civile, sur la pertinence de fonctionner ainsi.

Les secteurs qui pourraient être concernés par un fonctionnement en boucle sont notamment :

- Secteur II : Le Vieux Rhône de Chautagne (environ 12 km), qui bénéficie de peu d'apports amont, et dont la continuité sédimentaire plus en aval (RCC de Belley) est possible mais actuellement limitée en capacité de charriage (1 000 à 2 000 m³/an) ;
- Secteur III : le système Ain – canal de Miribel – fosse de la Feyssine ou retenue de Pierre-Bénite. Le fait de faire remonter les sédiments entre Lyon et Pont-d'Ain (55 km a priori plutôt par voie ferrée, cf. Mission 7) peut paraître très ambitieux ; il permettrait toutefois d'assurer la pérennité de fonctionnement hydro-éco-morphologique d'un secteur remarquable de 70 km, enchainant Ain et Rhône de Miribel ;
- Secteur VI : Le Palier d'Arles (15 km) qui pourrait être en déficit à l'avenir tout comme le Danube en aval de Vienne ou le Rhin en aval d'Iffezheim. Ce linéaire pourrait inclure également le RCC de Vallabrègues (+ 8 km) si le seuil de Beaucaire est rendu franchissable pour les sédiments grossiers.

D'autres secteurs, sur de plus petits linéaires, pourraient résulter des stratégies proposées localement.

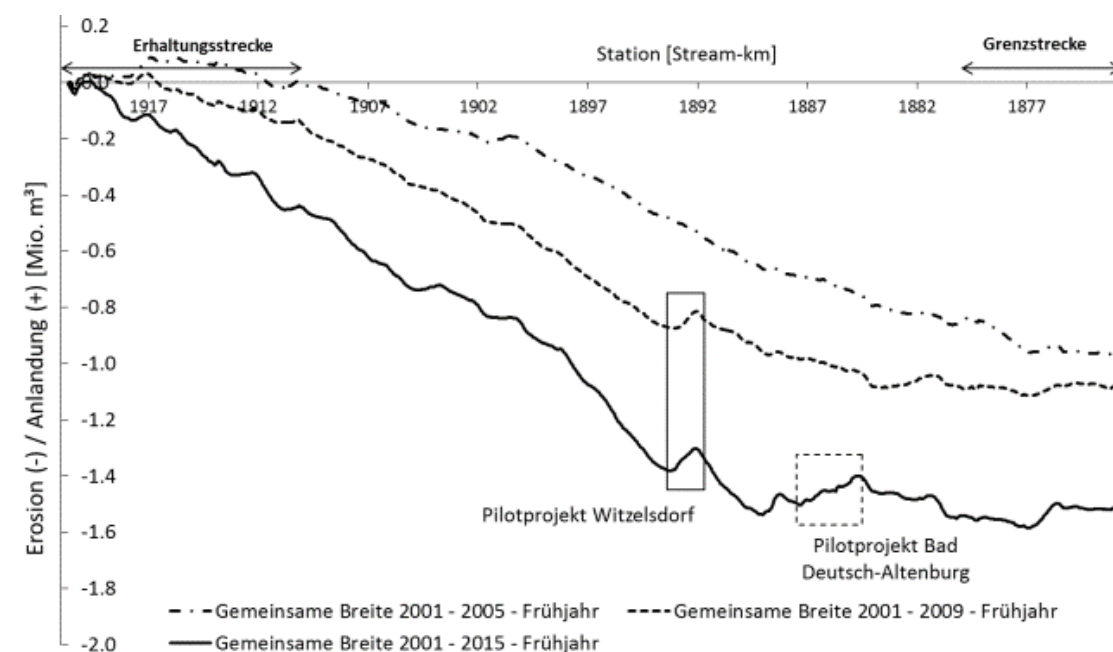


Figure 59 : Evolution cumulée du lit en aval de Freudenu entre 2001 et 2015 (Habersack et al., 2017)

9.5 Quelle stratégie mettre en place en travaux d'urgence post-crue ?

La question de la gestion sédimentaire d'urgence en travaux post-crue exceptionnelle n'a pas été traitée dans l'étude. C'est un vrai sujet qui mériterait une attention particulière afin d'anticiper les situations et prévoir les mesures de gestion les plus adaptées.

Globalement, avec le retour d'expérience des crues de 2002 et 2003, plusieurs tendances peuvent se dégager :

- Les confluences seraient des lieux particuliers d'apports grossiers, à la mesure des crues subies par ces affluents. Les volumes actuellement gérés à ces confluences pourraient être majorés sur une période courte ;
- Les queues de retenue, où se développent des capacités de charriage plus importantes du fait de la restitution, pourraient redevenir des lieux sensibles alors que les actions de dragages sur de tels sites sont parfois espacées dans le temps ;
- Les linéaires aval de Vieux Rhône, a fortiori des Vieux Rhône restaurés et ayant bénéficié d'actions de réinjection pourraient voir les apports sédimentaires majorés. Les sites de type G9 prendraient un caractère plus significatif dans la gestion des volumes.

Il est très probable que, sur une crue exceptionnelle, les apports grossiers habituels soient très largement majorés, et conduisent par exemple à devoir gérer de l'ordre du double du volume moyen annuel. Dans ces circonstances, le devenir des sédiments devrait être anticipé et si la réinjection en secteur déficitaire reste prioritaire, elle ne pourra être réalisée immédiatement lors des travaux ou dans des délais courts. Cela signifie donc qu'il faudra procéder à des stockages temporaires, d'où la nécessité d'anticiper en amont cette question déjà soulevée en partie §.7.4.2.

Une crue exceptionnelle pourra également faire progresser plus rapidement un secteur vers une saturation en matériaux grossiers, d'où la nécessité de suivre globalement les bilans sédimentaires globaux établis en Mission 7 et d'établir les trajectoires futures comme illustré en partie §.9.2.

9.6 Les éclusées influencent-elles le fonctionnement hydrosédimentaire ?

Une synthèse de l'étude menée par l'Agence de l'eau sur le rôle des éclusées (ECOGEA, 2018) a été réalisée en Mission 6. Dans cette étude, le Rhône n'a pas pu être traité comme les autres cours d'eau (dimensions et degrés d'artificialisation), mais des risques ont tout de même été évalués.

Les résultats des indicateurs établis par Courret (sévérité de la perturbation hydrologique) vont de très faible (1/5) au maximum (5/5) :

- 5 à Génissiat (éclusées très sévères) ;
- 4 à Seyssel ;
- 3 à Belley et Chautagne (moyennement sévères) ;
- 2 à Brégnier-Cordon et Sault-Brénaz ;
- 1 à Cusset, Jonage, Pierre-Bénite, Vaugris.

Les notes précédentes, combinées avec l'analyse de la vulnérabilité, fournissent des secteurs à risques :

- à risque fort à l'aval de Génissiat et de Seyssel,
- à risque moyen à l'aval de Chautagne ;
- à risque faible ailleurs.

L'expérience montre que certains risques peuvent être sous-estimés.

Par ailleurs, certaines actions permettant l'atteinte du bon potentiel écologique portent sur l'atténuation des impacts des éclusées, notamment pour :

- la masse d'eau FRDR2000 : « Diminuer l'échouage des juvéniles de poissons provoqué par les éclusées ». Action comptant pour 77% de l'atteinte du BPE de cette masse d'eau ;
- la masse d'eau FRDR2004 : « Réduire le marnage ». Action comptant pour 8% de l'atteinte du BPE de cette masse d'eau ;
- la masse d'eau FRDR2006b : « Gestion de l'amplitude du marnage journalier dans le remous de la retenue de Saint-Vallier ». Action comptant pour 0% de l'atteinte du BPE de cette masse d'eau ;

Des réflexions futures devront être menées pour préciser le rôle des éclusées et des marnages associés sur le transport solide (fin, sableux, grossier) et sur les habitats correspondants à ces substrats, en termes de composition et de submersion / émergence.

9.7 Est-ce que la gouvernance et les moyens techniques et humains sont adaptés ?

Globalement, les stratégies proposées vont faire évoluer les pratiques des gestionnaires et vont nécessiter des moyens humains, techniques, organisationnel qui sont à faire progresser par rapport à la situation actuelle. Des progrès devront également être menés dans la concertation et la communication auprès des acteurs locaux et des habitants, car dans la durée les pratiques doivent pouvoir être expliquées et acceptées par la société et la société civile.

Dans les secteurs concédés du Rhône, la gouvernance est généralement bien assise et peut améliorer en continuant à développer les outils et démarches de concertation mentionnées précédemment. La prolongation de la concession CNR jusqu'en 2041 donne une bonne visibilité au portage et à la réalisation des actions jusqu'à cette échéance.

L'articulation et la coordination entre les concessions (CNR, EDF) et les collectivités à compétences GEMAPI (SHR, SYMADREM, etc.) ne cessent de s'améliorer et conduiront dans les prochaines années à une optimisation de la gestion du fleuve et de ses annexes.

La gouvernance pourrait être consolidée dans les secteurs du Rhône qui ne sont pas concédés, notamment dans la traversée de l'agglomération de Lyon, où plusieurs acteurs participent à la gestion du fleuve : Métropole de Lyon, SYMALIM, EDF, CNR, VNF. Au cours de 2021 et 2022, les acteurs se sont réunis et ont travaillé à l'établissement d'une feuille de route ; des principes ont été définis dans ce secteur pour que les acteurs travaillent de façon partenariale la gestion sédimentaire :

- Construire les modalités d'animation et la gouvernance associée ;
- Poursuivre le travail collectif à court terme ;
- Renforcer les collaborations hors territoire ;
- Rassembler les éléments pour définir un suivi sédimentaire global, pertinent, suffisant et commun du territoire ;
- Travailler sur des scénarios pour avancer dans la définition de la stratégie globale de gestion sédimentaire

Enfin, des connexions plus régulières devraient être établies entre les collectivités GEMAPI ayant compétences sur les bassins versants affluents et les gestionnaires du Rhône (CNR, EDF ou autres collectivités) afin de mieux anticiper les enjeux partagés de gestion hydrosédimentaire. Cela peut être le cas pour des mesures de gestion sédimentaire ou actions de restauration (réinjection, restauration de marges) qui peuvent avoir lieu dans les affluents et venir influencer sur les apports sédimentaires au Rhône et son fonctionnement morphologique. Cela peut être le cas également dans le cadre d'un tarissement attendu des apports ou au contraire d'un retour des sédiments qui pourrait être attendu dans les années / décennies à venir. Enfin, certains bassins versants affluents pourraient se montrer intéressés par des excédents sédimentaires grossiers sur le Rhône, surtout dans la perspective d'une saturation à long terme. Les enjeux connus sur les affluents sont rappelés en partie §.9.1.

BIBLIOGRAPHIE COMMUNE AUX MISSIONS 6, 7, 8 ET 9

AERMC (2013)	Etude de caractérisation des vulnérabilités du bassin Rhône-Méditerranée aux incidences du changement climatique dans le domaine de l’eau	CGDD & CEREMA (2018)	Évaluation environnementale - Guide d'aide à la définition des mesures ERC 134 p
AERMC (2016)	Bilan actualisé des connaissances sur le changement climatique	Chardon V. (2019)	Effets géomorphologiques des actions expérimentales de redynamisation du Rhin à l’aval de Kembs. Thèse de doctorat.
AERMC (2022)	Note de méthode pour l’estimation du coût du programme de mesures Rhône Méditerranée 2022-2027. Documents et données techniques pour l’élaboration du SDAGE 2022-2027 du bassin Rhône-Méditerranée	Chardon, V. et al (2021)	Efficiency and sustainability of gravel augmentation to restore large regulated rivers: Insights from three experiments on the Rhine River (France/Germany)
Annendale, G.W. et al. (2003)	Reservoir conservation. Volume I. The RESCON Approach. Economic and engineering evaluation of alternative strategies for managing sedimentation in storage reservoirs	Chardon, V. et Staentzel, C. (2021)	Érosion maîtrisée et injections sédimentaires : quels enjeux et effets dans les milieux semi naturels ? cas du Vieux Rhin, France. Journée d’échanges techniques « évaluation de la restauration », 16 novembre 2021
Arnaud, F. (2012)	Approches géomorphologiques historiques et expérimentales pour la restauration de la dynamique sédimentaire d’un tronçon fluvial aménagé : le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne). Thèse de doctorat de l’Université Lumière Lyon2.	Ciotti, D. et al. (2021)	Design Criteria for Process-Based Restoration of Fluvial Systems
Aubé D. (2017)	Impact du changement climatique dans le domaine de l'eau sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse, bilan actualisé des connaissances	Cluer & Thorne (2014)	A Stream Evolution Model Integrating Habitat and Ecosystem Benefits. in River Research and Applications · February 2014
Bard, A. et Lang M. (2018)	Actualisation de l'Hydrologie des crues du Rhône, Rapport Synthétique de diffusion des résultats. Hydroconsultant et IRSTEA.	CNR (2018)	Suivi d'une opération de réinjection sédimentaire dans le Vieux-Rhône de Chautagne. Rapport d'étude
Bertrand F. (2015)	L’intégration de l’adaptation aux effets des changements climatiques dans les politiques locales de l’eau.	CNR (2020)	Restitution au Rhône des sédiments issus de dragages d'entretien depuis 2015. Note interne.
Boivin, M. et al. (2019)	Guide d’analyse de la dynamique du bois en rivière. Guide scientifique présenté au Conseil de l’eau du Nord de la Gaspésie et à la Fondation de la Faune du Québec. 97 pages + annexes.	CNR (2020)	Chute de Logis Neuf. Retenue de Baix-le-Logis-Neuf. Compléments Fiche Incidence Dragage Mémoire en réponses aux questions suite à la réunion programmation dragage du 12 Mars 2020
BRLi, (2014)	Etude de la gestion quantitative et des débits du Rhône en période de basses eaux	CNR (2022)	Premier Plan 5Rhône. Mars 2022 / Mars 2027
BRLi (en cours)	Etude hydrologique du Rhône sous changement climatique	Comité de bassin Rhône Méditerranée (2020)	SDAGE 2022-2027 - Bassin Rhône Méditerranée. Rapport environnemental
BURGEAP (2018)	Le Rhône de l’Ain jusqu’au barrage de Pierre-Bénite. Etude de gestion sédimentaire – Phase 1A : Etat des lieux et investigations préalables	Comité de bassin Rhône Méditerranée (2022)	Schéma directeur d’aménagement et de gestion des eaux 2022-2027 - Bassin Rhône Méditerranée. Volume principal. Annexes. Documents d’accompagnement.
BURGEAP (2019)	Vieux Rhône de Neyron. Dossier de demande de renouvellement de l’autorisation du plan de gestion sédimentaire. METROPOLE DE LYON – DIRECTION DE L’EAU	Comité de bassin Rhône Méditerranée (2022)	Programme de mesures 2022-2027 - Bassin Rhône Méditerranée.
BURGEAP (2021)	Projet de dragage sur le fleuve Rhône au Pont de la Loi (PK-137 à PK-134). Analyse morphologique des sites envisagés pour une restitution des sédiments. CNR	Comité de suivi environnemental APAVER 2021 (2022)	Gestion sédimentaire du Haut Rhône suisse et français
Camenen, B. et al (2022)	Synthèse des mesures hydro-sédimentaires lors de la chasse de la Basse-Isère de janvier 2021. INRAE / CNR / EDF	Dayon et al. (2018)	Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties. Comptes Rendus Geoscience. Volume 350, Issue 4, May–June 2018, Pages 141-153
Cassel M. (2017)	Caractérisation des particules dans les lits à galets : expérimentation, développements méthodologiques et applications in situ	Direction générale de l'Energie et du Climat (2020)	Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l’énergie et le climat. Stratégie nationale bas carbone (SNBC) et Programmation pluriannuelle de l’énergie (PPE)
		Dufour, S. et Piégay, H. (2009)	From the myth of a lost paradise to targeted river restoration : Forget natural references and focus on human benefits. River Research and Applications, 25(5):568–581
		ECOGEA (2018)	Caractérisation des risques éco-morphologiques associés au fonctionnement par éclusées des masses d’eau des bassins Rhône Méditerranée Corse

EGIS (2010)	Etude du renforcement des digues du Petit Rhône. Diagnostic morphodynamique	Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (2019)	Projet de prolongation de la concession du Rhône. Synthèse du dossier de concertation.
EGIS (2020)	Aménagement de l'Eyrieux : étude hydraulique et consignes d'entretien		
EGIS-GEOPEKA (2021)	Etude de renforcement et recul limité des digues du Petit Rhône	Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (2020)	Stratégie nationale bas carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone
European Commission (2021)	Biodiversity Strategy 2030. Barrier Removal for River Restoration	Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (2020)	Guide national sur les principales méthodologies de construction par une entreprise d'une trajectoire de réduction de ses émissions de gaz à effet de serre cohérente avec les budgets carbone sectoriels
Flitcroft, R. et al. (2022)	Rehabilitating Valley Floors to a « Stage 0 » Condition: A Synthesis of Opening Outcomes. Front. Environ. Sci. 10:892268. July 2022		La prise en compte du patrimoine fluvial dans le projet de restauration du vieux Rhône de Péage-de-Roussillon. Mémoire de première année de Master, Université Lyon 2. Direction J.-P. Bravard (Professeur émérite) et C. Moiroud (Compagnie Nationale du Rhône, Division de l'ingénierie)
Gaydou P. (2013)	Schéma directeur de ré-activation de la dynamique fluviale des marges du Rhône. [Rapport de recherche] CNRS UMR 5600 - EVS. 2013. (hal-03444308)	Nadal D. (2008)	Restauration écologique du Rhône, fondements, résultats et perspectives. Diaporama 10 mars 2022 – Brégnier-Cordon
GRONTMIJ (2013)	Potentiel écologique du fleuve Rhône	Olivier J.M. (2022)	Quelle(s) reconquête(s) associée(s) à la restauration hydraulique et écologique du Rhône ? REVER 10 - Restaurer ou reconquérir - 19-21 Mars 2019, MNHN Paris
Habersack H. et Piégay, H. (2008)	River restoration in the Alps and their surroundings : past experience and future challenges	Olivier, J.-M. & Wichroff, E. (2018)	Programme d'action de l'Observatoire des Sédiments du Rhône OSR6 2021-2023
Habersack H. et al. (2019)	Sediment Manual for Stakeholders. Output 6.2 of the Interreg Danube Transnational Project DanubeSediment co-funded by the European Commission, Vienna	OSR6 (2022)	Analyse spatio-temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la Méditerranée
IXSANE (2017)	Le Rhin de Huningue à Lauterbourg. Plan de Gestion Pluriannuel des Opérations de Dragage. Dossier de demande d'autorisation au titre des articles L214-1 et suivants du code de l'Environnement. Etude d'impact. VOIES NAVIGABLES DE France. Direction territoriale de Strasbourg.	Parrot E. (2015)	Mémoire de deuxième année de master, Université Lyon 2
Janssen, P. et al. (2020)	Divergence of riparian forest composition and functional traits from natural succession along a degraded river with multiple stressor legacies	Portevin J.L. (2003)	Direction J.-P. Bravard (Professeur émérite) et G. Collilieux (département environnement de la Compagnie nationale de Rhône, Division de l'ingénierie)
Kondolf, M. (2011)	The « espace de liberté » and restoration of fluvial process : when can the river restore itself when must we intervene ?	Poulier G. et al. (2018)	Bilan actualisé des flux de matières en suspension et micropolluants associés sur le bassin du Rhône. Action III.3. Septembre 2018 – Version finale
Kondolf, M. et al. (2014)	Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers. Experiences from five continents. Earth's Future / 10.1002/2013EF000184	Powers et al. (2018)	A process-based approach to restoring depositional river valleys to Stage 0, an Anastomosing channel network : restoring streams to « Stage 0 » in unconfined valleys in the USA. in River Research and Applications · November 2018
Lacroix et al. (2021)	La montée du niveau de la mer d'ici 2100. Scénarios et conséquences. Editions Quae	Plan d'action du bassin Rhône-Méditerranée pour la pollution par les PCB (2013)	Recommandations relatives aux travaux et opérations impliquant des sédiments aquatiques potentiellement contaminés. SDAGE Rhône-Méditerranée 2010-2015
Laval, F. et al. (2022)	Retour d'expérience de 25 années de gestion sédimentaire et de restauration du Rhône. Poster, IS Rivers, 2022	Räpple B. (2018)	Sedimentation patterns and riparian vegetation characteristics in novel ecosystems on the Rhône River, France : A comparative approach to identify drivers and evaluate ecological potentials. Thèse de doctorat.
Loire R. (2019)	Contribution à la définition et à la mise en œuvre de débits morphogènes en aval des aménagements hydro-électriques. Thèse de Doctorat.	Riquier J. (2015)	Réponses hydrosédimentaires de chenaux latéraux restaurés du Rhône français : structures spatiales et dynamiques temporelles des patrons et des processus, pérennité et recommandations opérationnelles. Thèse de doctorat.
Loire et al (2021)	Lâchers d'eau morphogènes - Guide de mise en œuvre. Guide OFB.	Ruiz-Villanueva, V. et al. (2022)	Le grand bois en cours d'eau à la retenue du barrage de Génissiat : de problèmes en opportunités. 39th IAHR World Congress at Granada, Spain (2022)
Malavoi & Bravard (2010)	Eléments d'hydromorphologie fluviale	Secrétariat Technique du SDAGE (2014)	La restauration écologique du fleuve Rhône. Outil pour évaluer le potentiel écologique du fleuve et définir où et comment le restaurer
Marteau, B. et al. (2022)	Cartographie thermique des rivières par infrarouge thermique aéroporté : inventaire des habitats, diagnostic thermique et appui à la conservation	Secrétariat technique du SDAGE (2011, mis à jour en 2019)	Note du secrétariat technique du SDAGE : qu'est-ce que le bon état des eaux ?
Michelot, J.-L. (2020)	A quoi sert le Rhône ? Une approche sensible des services hydrosystémiques. Extrait de Le Rhône. Territoire, ressource et culture, textes réunis par Emmanuel REYNARD, Alain DUBOIS et Muriel BORGEAT-THELER, Sion, 2020 (Cahiers de Vallesia, 33), p. 93-117.	Seignemartin, G. et al. (2021)	Les marges alluviales endiguées du Rhône : trajectoires d'atterrissement, état des lieux hydrosédimentaire et sanitaire, perspectives opérationnelles

SFMCP (2015)	Barrage de Chancy-Pougny ; Manœuvres d'accompagnement des abaissements partiels et des dragages de la retenue de Verbois. Période 2016-2026. Dossier d'étude d'impact sur l'environnement – Tome 1. Présentation du scénario de gestion. Etude des caractéristiques physiques et du milieu humain. Dossier final.
SIG & SFMCP (2015)	Opérations de gestion sédimentaire sur le Rhône genevois. Période 2016-2026. Dossier technique et évaluation de l'impact sur l'environnement.
SYMADREM (2021)	Les marges alluviales endiguées du Rhône : trajectoires d'atterrissement, état des lieux hydrosédimentaire et sanitaire, perspectives opérationnelles
TEREO (2021)	Opération de renforcement et de décorsetage des digues du Petit Rhône. Diaporama réunion du 6 décembre 2021. Présentation aux partenaires du Plan Rhône
The Shift Project (2022)	Assurer le fret dans un monde fini. Dans le cadre du plan de transformation de l'économie française (PTEF)
Tissot, N. et al. (2021)	Geomorphic responses of restored frequently flowing side channels along the Rhône River
Valé, N. (2004)	Mémoire de deuxième année de Master, Université Lyon 2 Direction JP Bravard (Professeur émérite) et G Collilieux (département environnement de la Compagnie Nationale de Rhône, Division de l'ingénierie)
Vázquez-Tarrío et al. (2018, 2020)	OSR4 2015-2017. Evolutions morphodynamiques du chenal sur le long-terme. Action I.4

FIGURES

Figure 1 : Linéaires de réservoirs biologiques	11
Figure 2 : Orientations transversales et sectorielles de la Stratégie Nationale Bas Carbone	12
Figure 3 : (a) Projet de dragage 2011-2013, (b) sensibilités écologiques, (c) évolutions bathymétriques du lit mineur avant et après dragage à la confluence du Doux (CNR, 2016, conférence SHF)	18
Figure 4 : Frise chronologique de l'APAVÉR 2021	20
Figure 5 : Evolution du niveau de Verbois et des taux de MES en aval de Chancy-Pougny	20
Figure 6 : Bilan du comblement de la retenue de Verbois, stabilisé à 3,1 hm³ après l'APAVÉR 2021	20
Figure 7 : Evolution des concentrations de MES mesurées à la station de référence de Seyssel	20
Figure 8 : Evolution de la végétation des bancs en fonction des conditions pédologiques et historiques (Janssen, 2020)	22
Figure 9 : Engins utilisés et exemple de banc perché charrué (RCC de Montélimar ; ARALEP)	22
Figure 10 : Exemples d'engin utilisé pour l'essartage (tracteur forestier avec broyeur à l'avant)	23
Figure 11 : Exemple de « môle » créé sur le Rhin (en vert) à partir de matériaux de dragage et permettant de diminuer la sédimentation	23
Figure 12 : Typologie de l'atterrissement des casiers, illustration pour le RCC de Péage-de-Roussillon (Seignemartin et al., 2022)	25
Figure 13 : Exemple de restauration de la bande active étudiée pour le RCC de Péage-de-Roussillon	26
Figure 14 : Exemple de restauration de la bande active envisagé sur la Durance (cf. Mission 5)	26
Figure 15 : Principes de restauration de l'espace alluvial basé sur les processus (Ciotti et al, 2021)	27
Figure 16 : Principes de restauration de l'espace alluvial basé sur les formes (Ciotti et al, 2021).....	27
Figure 17 : (a) Modèle d'évolution morphologique d'après Cluer & Thorne (2014) (b) bénéfices physiques et écologiques fournis par chaque stade d'évolution morphologique	28
Figure 18 : Restauration au stade « Stage 0 » et évolution sur la période 2015-2021 sur le Whychus Creek (Oregon, USA) (Flitcroft et al, 2022).....	28
Figure 19 : Analyse de la diversité des conditions granulométriques de surface moyennes mesurées dans les bras étudiés (d'après Riquier et al. 2019).....	29
Figure 20 : Estimation de la durée de vie d'une lône restaurée (d'après Riquier et al. 2019).....	29
Figure 21 : Lône de l'Illon avant et après restauration (2013 et 2014)	29
Figure 22 : Recharge sédimentaire et élargissement du lit du Drac en Champsaur ayant permis de noyer dans le lit alluvial le seuil d'alimentation d'un plan d'eau (F.Laval, 2013 ; 2016)	30
Figure 23 : Eventail d'actions possibles pour une gestion durable des bois en rivière (Boivin et al., 2019)	30
Figure 24 : Exemples de bois morts immergés sur un bras du Rhin	31
Figure 25 : Structures de bois morts immergés et/ou enterrées, évoluant au gré des fluctuations saisonnières, en Oregon (Biohabitats, Goose Creek, 2016)	31
Figure 26 : Exemple de roselière constituée sur des hauts fonds en entrée de canal usinier de Montélimar (ARALEP)	32
Figure 27 : Vue aérienne du casier de la Malourdie reconnecté au RCC de Chautagne (CEN Savoie, 2019)	32
Figure 28 : Typologie des lâchers en fonction des enjeux visés (d'après Loire et al. 2020)	34
Figure 29 : Indicateurs de suivi et de succès pour analyser les effets des lâchers morphogènes (Loire, 2019)	34
Figure 30 : Comparaison des scénarios de gestion avec ou sans lâcher sur l'Isère en Combe de Savoie (montant en €HT) (Loire, 2019).....	35
Figure 31 : Evolution des pratiques de gestion au cours du temps (F.Laval et al., IS Rivers 2022)	35
Figure 32 : Synthèse cartographique des matériaux grossiers restitués au Rhône 2015 et 2019 (CNR)	36
Figure 33 : Restitution de sédiments grossiers au Rhône sur la période 2017-2020	36
Figure 34 : Recharge en andains et régalaage sous le niveau d'eau pour les matériaux de la lône de la Grange Ecrasée (UHC#19-DZM / RCC de Donzère)	36
Figure 35 : Exemple de rendu d'image infra-rouge pour l'analyse de la thermie d'un cours d'eau (Marteau, 2022).....	37

Figure 36 : Puissances spécifiques caractéristiques dans les Vieux Rhône synthétisées par UHC (d'après données Gaydou, 2013)	38
Figure 37: Diamètres maximums transportables pour Q10, Q100 et Q100 (mm) pour $\theta_c=0,03$	39
Figure 38 : Capacité de charriage annuelle moyenne avec deux modes de calculs	39
Figure 39 : Capacités de charriage calculées	39
Figure 40 : Exemples de techniques de réinjection sédimentaire (1/2) (d'après BURGEAP, 2021)	40
Figure 41 : Exemples de techniques de réinjection sédimentaire (2/2) (d'après BURGEAP, 2021)	41
Figure 42 : Illustration d'une pelleteuse sur ponton et d'une barge à clapet à la confluence de la Gère (cf. Mission 4).....	42
Figure 43 : Illustration d'une barge à clapet sur le Rhin (cf. Mission 5).....	42
Figure 44 : Procédé de recharge sédimentaire en aval du barrage d'Iffezheim (cf. Mission 5).....	42
Figure 45 : Synoptique des coûts de dragages, transports et restitutions de sédiments grossiers (toutes situations possibles)	44
Figure 46 : Synoptique des coûts de dragages, transports et restitutions de sédiments grossiers (cas le plus simple en milieu terrestre : 1 rupture de charge, pas de stockage).....	44
Figure 47 : Synoptique des coûts de dragages, transports et restitutions de sédiments grossiers (cas le plus simple en milieu fluvial : 0 rupture de charge, pas de stockage)	44
Figure 48 : Exemple d'analyse des impacts hydraulique d'une réinjection dans le RCC de Belley modèle hydraulique CNR) (utilisé par BURGEAP, 2021).....	46
Figure 49 : Illustration du travail réalisé sur les pentes d'« équilibre » par UHC.....	47
Figure 50 : Modèle expérimental pour déterminer les vitesses de diffusion d'une masse sédimentaire réinjectée	47
Figure 51 : Exemple d'application de ce modèle sur le RCC de Montélimar	47
Figure 52 : Exemple d'analyse du bilan GES de différentes solutions (restitution des matériaux grossiers du canal de Jonage).....	49
Figure 53 : Exemple d'analyse du bilan GES de différentes solutions (restitution des matériaux grossiers de l'Yzeron)	49
Figure 54 : Exemple d'AMC synthétique : comparaison des sites de dragages N4 de la fosse de la Feyssine et de la retenue de Lyon.....	50
Figure 55 : Exemple d'AMC synthétique : comparaison des sites de réinjection pour le dragage du canal de Jonage (d'après données EDF complétées).....	51
Figure 56 : Exemple d'AMC synthétique : illustrant graphique des différentes hypothèses pour le devenir des sédiments dragués dans le canal de Jonage	51
Figure 57 : Exemple d'analyse multicritère détaillée (de sites de réinjection sédimentaire 1 et 3B, RCC de Belley et Chautagne)	53
Figure 58 : Exemple de représentation schématique des trajectoires temporelles de dégradation et de restauration (le Rhin entre Kembs et Breisach, in Arnaud, 2012)	55
Figure 59 : Evolution cumulée du lit en aval de Freudenu entre 2001 et 2015 (Habersack et al., 2017).....	55

TABLEAUX

Tableau 1 : Cadre réglementaire général (source : PDM SDAGE 2022-2027)	5
Tableau 2 : Rubrique Loi sur l'Eau régulièrement observées pour un projet de restauration	5
Tableau 3 : Valeurs guides d'interprétation pour les sédiments destinés à être restitués dans le cours d'eau.....	8
Tableau 4 : Valeurs réglementaires en contenu total de mise en décharge en ISDI (arrêté du 12 décembre 2014) et en ISDND (arrêté du 12 mars 2012)	10
Tableau 5 : Valeurs réglementaires lors du test de lixiviation pour la mise en décharge en ISDI (arrêté du 12/12/2014), en ISDND (arrêté du 12/03/2012) et en ISDD (arrêté du 30/12/2002)	10
Tableau 6 : Coûts unitaires des actions de gestion	13
Tableau 7 : Coûts unitaires des actions de restauration.....	14
Tableau 8 : Conditions de mise en œuvre de différentes techniques de dragages	16
Tableau 9 : Classement par ordre décroissant de volume des sites de gestion en sédiments fins (G1)	17
Tableau 10 : Classement par ordre décroissant de volume des sites de gestion en sédiments fins (G3)	17
Tableau 11 : Distinction entre les actions-clés de chasse (G5) et de mise en transparence (G6).....	19
Tableau 12 : Pistes non exhaustives pour éviter ou diminuer l'importance d'un dragage.....	24
Tableau 13 : Pistes non exhaustives pour diminuer la vulnérabilité des enjeux exposés dans le cadre d'un site de dragage.....	24
Tableau 14 : Restitution au Rhône des sédiments issus de dragages d'entretien entre 2015 et 2019 (CNR)	36
Tableau 15 : Bilan des données exploitées par type de flux sédimentaire	38
Tableau 16 : Récapitulatif des différents types de réinjection sédimentaires et analyse comparative	40
Tableau 17 : Coûts unitaires des étapes de dragage de sédiments grossiers	43
Tableau 18 : Exemple de chiffrage d'opérations de dragage, transport et restitutions de sédiments grossiers.....	44
Tableau 19 : Exemple de grille d'analyse de pré-sélection (de sites de réinjection sédimentaire, RCC de Belley et Chautagne).....	52
Tableau 20 : Exemple d'analyse multicritère détaillée (de sites de réinjection sédimentaire1, 3A et 3B, RCC de Belley et Chautagne)	53
Tableau 21 : Synthèse de préconisations générales pour les affluents	54

