



DREAL AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Le 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 2
Synthèse du fonctionnement hydrosédimentaire
du fleuve Rhône

Version finale – décembre 2020

Réf : CEAUCE172551 / REAUCE02991-03



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



DREAL
AUVERGNE-RHONE-ALPES

Le 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 2
Synthèse du fonctionnement hydrosédimentaire du fleuve Rhône

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
Note sur la sectorisation en UHC	22/06/2018	01	F. LAVAL	G. GILLES		F. LAVAL	
Rapport provisoire de Mission 2	12/10/2020	02	BURGEAP : F. LAVAL, G. GILLES, T. CUMIN GEOPEKA : G. FANTINO, E. CATALON	G. GILLES		F. LAVAL	
Rapport final de Mission 2	15/12/2020	03	BURGEAP : F. LAVAL GEOPEKA : G. FANTINO	G. GILLES		F. LAVAL	

Numéro de contrat / de rapport :	Réf : CEAUCE172551 / REAUCE02991-03
Numéro d'affaire :	A41860
Domaine technique :	BV04
Mots clé du thésaurus	SCHEMA DIRECTEUR D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX, TRANSPORT SOLIDE PAR CHARRIAGE, TRANSPORT SOLIDE PAR SUSPENSION, SEDIMENT, HYDRAULIQUE FLUVIALE, INONDATION, EAU A USAGE AGRICOLE, EAU A USAGE INDUSTRIEL, EAU A USAGE DOMESTIQUE, VOIE NAVIGABLE, ECLUSE, POISSON, QUALITE ECOLOGIQUE, HABITATS AQUATIQUES



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), 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 2.

Cette mission s'est déroulée entre mars 2018 et septembre 2020. La Partie A a été validée en septembre 2018. La collecte des données a été menée jusqu'en juin 2019, ce qui peut expliquer la non prise en compte de données plus récentes.

Le travail a été mené conjointement par BURGEAP et GEOPEKA pour l'ensemble de la mission. La cohérence de l'ensemble est assurée par BURGEAP.

L'objectif de cette Mission 2 est de faire la synthèse du fonctionnement hydrosédimentaire du Rhône. L'approche doit être structurée autour des dimensions suivantes :

- **La trajectoire hydromorphologique du Rhône** : quel état « naturel » au 19^{ème} siècle ? quelles pressions anthropiques sur le milieu du 20^{ème} siècle à aujourd'hui ? quel fonctionnement actuel ? quelle tendance attendre compte tenu du fonctionnement actuel du Rhône et de ses affluents ? ;
- **Les 3 dimensions géographiques** que sont l'axe Rhône, les unités hydrographiques cohérentes (UHC), les tronçons homogènes (TH) et les sites de gestion (décrits en détails en Mission 4) ;
- **Le rôle des 3 composantes granulométriques** : limons (fines), sables et grossiers dans ces différentes évolutions.

Le travail, mené par BURGEAP et GEOPEKA, a consisté à analyser en détail les données collectées en Mission 1, à interpréter l'ensemble des éléments, et à produire les parties suivantes :

- PARTIE A : Sectorisation du fleuve Rhône (en UHC et TH) ;
- PARTIE B : Trajectoire hydromorphologique du Rhône ;
- PARTIE C : Processus hydrosédimentaires actuels ;
- PARTIE D : Synthèse.

Le rapport de Mission 2 s'accompagne de documents complémentaires :

- Fiches de synthèse par UHC :
 - Un rapport de synthèse pour chacune des 25 UHC du Rhône ;
 - Les sections A, B et C de ces fiches correspondent plus particulièrement aux éléments traités dans le rapport de Mission 2 ;
- Notice explicative des fiches UHC ;
- Rapport annexe : bibliographie, glossaire.

Pour citer ce document :

Laval F., Fantino G., Catalon E., Cumin T., Gilles G., Mosselman E. (2020). Etude préalable au schéma directeur de gestion sédimentaire du fleuve Rhône du lac Léman jusqu'à la mer Méditerranée. Phase 1 – Etat des lieux. Rapport de Mission 2 – Synthèse du fonctionnement hydrosédimentaire du fleuve Rhône. Groupement de bureaux d'études BURGEAP-GEOPEKA-ACTEON-ARALEP-MOSAÏQUE Environnement-DELTARES. Secrétariat technique : DREAL, CNR, EDF, Agence de l'Eau.

SOMMAIRE

PARTIE A. SECTORISATION DU FLEUVE RHONE 6

1. Méthodologie 7

2. Analyse de l’emprise latérale du périmètre d’étude 7

3. Analyse des sectorisations existantes 8

3.1 Masses d’eau du SDAGE Rhône-Méditerranée 8

3.2 Tronçons SYRAH 8

3.3 Tronçons OSR 9

3.4 Tronçons établis dans le cadre de l’OSR4 (action I.4) 9

3.5 Référencement en points kilométriques 10

3.6 Affluents majeurs à intégrer dans la sectorisation 11

4. Sectorisation retenue 12

4.1 Synthèse sur les sectorisations existantes 12

4.2 Définition des tronçons homogènes et unités hydrographiques cohérentes 12

4.3 Codification et bilan 13

PARTIE B. TRAJECTOIRE HYDROMORPHOLOGIQUE DU RHÔNE 16

1. Présentation du bassin versant 17

1.1 Contexte général 17

1.2 Contexte géomorphologique 17

1.3 Contexte des principaux affluents 18

2. Histoire du fleuve et évolutions géomorphologiques récentes 20

2.1 Une base de connaissances très riche qui s’étoffe depuis le début du 20^e.s 20

2.2 Premières approches globales du fleuve 21

2.3 État morphologique « avant aménagements » 21

2.4 Historique des pressions sur le milieu alluvial 22

2.4.1 Avant le 19^{ème} siècle : les premiers aménagements de digues paysannes et du delta 22

2.4.2 De 1840 à 1950 : les aménagements de la voie fluviale et premiers barrages 23

2.4.3 De 1950 à 1990 : les aménagements CNR 26

2.4.4 De 1954 à 1995 : les extractions dans le lit du Rhône 31

2.5 Chronologie et rôles des aménagements sur la morphologie du fleuve 34

2.5.1 Une trajectoire fortement orientée par les aménagements du lit et du bassin versant 34

2.5.2 Une incision du Rhône avant tout liée aux aménagements Girardon 34

2.5.3 Une réduction considérable de la fourniture en sédiments par les affluents 34

2.5.4 Une incision du lit complétée par les extractions dans le Rhône 35

2.5.5 Des aménagements hydroélectriques réduisant les capacités de charriage 37

2.5.6 Des aménagements hydroélectriques favorisant les dépôts de fines 37

2.5.7 Un contexte sociétal en perpétuelles évolution 38

PARTIE C. PROCESSUS HYDROSÉDIMENTAIRES ACTUELS 39

1. Fonctionnement hydrologique et hydraulique 40

1.1 Hydrologie caractéristique en étiage et module 40

1.1.1 Module et débit semi-permanent 40

1.1.2 Etiages 42

1.1.3 Plus hautes eaux navigables (PHEN) 42

1.2 Hydrologie caractéristique en crues 43

1.2.1 Dynamique des crues du Rhône 43

1.2.2 Crues historiques depuis le 15^{ème} siècle 44

1.2.3 Crues récentes depuis le 19^{ème} siècle 45

1.2.4 Description des principales crues historiques 46

1.2.5 Crues de référence et crues caractéristiques 48

1.2.6 Synthèse des débits caractéristiques dans les UHC 49

1.3 Impact du changement climatique 51

1.3.1 Impacts historiques du changement climatique 51

1.3.2 Impacts futurs du changement climatique 51

1.4 Rôle hydraulique des ouvrages hydroélectriques 53

1.4.1 Schéma type d’un ouvrage à dérivation 53

1.4.2 Répartition de débits 53

1.4.3 Lignes d’eau 56

1.4.4 Fonctionnement par éclusées 59

2. Mécanismes de transport sédimentaire 60

2.1 Définitions sur les modes de transport sédimentaire 60

2.2 Echelles granulométriques 60

2.3 Mécanismes de transport solide observés sur le Rhône 61

3. Stocks sédimentaires 62

3.1 Stocks sédimentaires dans l’espace alluvial 62

3.1.1 Une forte variabilité des conditions de sédimentation 62

3.1.2 Caractérisation volumétriques et granulométriques des marges alluviales 63

3.1.3 Pollution des stocks sédimentaires 64

3.2 Granulométrie du lit et des bancs du Rhône 65

3.2.1 Des données longtemps parcellaires et difficiles à recueillir 65

3.2.2 Un faible gradient granulométrique longitudinal marqué par la pente 66

3.2.3 Une forte variabilité spatiale de la granulométrie 66

3.2.4 Une granulométrie sous influence de l’histoire et de la variabilité des pentes 67

3.3 Contribution sédimentaire des affluents 69

3.3.1 Apports par le Lac Léman 69

3.3.2 Typologie des affluents 69

3.3.3 Contribution en matières en suspension (MES) 69

3.3.4 Contribution des affluents en sable 70

3.3.5 Contribution des affluents en charriage 71

4. Tendances d’évolution et bilans sédimentaires 76

4.1 Tendances d’évolution du tracé en plan 76

4.1.1 Introduction 76

4.1.2 Tracé en plan des Vieux Rhône 76

4.1.3 Puissances spécifiques 76

4.2 Bilans sédimentaires des tronçons homogènes 79

4.2.1 Méthodologie 79

4.2.2 Synthèse des résultats pour la période avant 2000 82

4.2.3 Synthèse des résultats pour la période depuis 2000 83

4.2.4 Synthèse des résultats pour la période depuis les mises en eau de barrages 84

4.2.5 Equilibre sédimentaire du chenal navigable 86

4.3 Apports à la mer et devenir des sédiments fluviaux 87

4.3.1 Caractérisation et évolution des apports à la mer 87

4.3.2 Distribution spatiale des apports à la mer 87

4.3.3 Interaction des apports pro-deltaïques avec l’évolution littorale 89

5. Dynamique et flux sédimentaires 90

5.1 Dynamique des sédiments grossiers 90

5.1.1 Méthodologie 90

5.1.2 Taille maximale des particules remobilisables 92

5.1.3 Capacité de charriage moyenne annuelle 95

5.2 Transit des sables et des sédiments fins 101

5.2.1 Rappels sur les notions de transport sableux et fin 101

5.2.2 Méthodologie 101

5.2.3 Capacités de charriage pour les sables 101

5.2.4 Transit des matières en suspension 103

5.3 Synthèse des flux grossiers, sableux et fins 106

PARTIE D. SYNTHÈSE..... 107

1.	Introduction.....	108
2.	Synthèse des connaissances à approfondir	108
3.	Historique du continuum sédimentaire	109
4.	État actuel des flux grossiers du Rhône et de ses affluents	110
5.	Résumé du fonctionnement hydrosédimentaire actuel	113
6.	Hierarchisation des enjeux sédimentaires par UHC	115

ANNEXES

- Annexe 1. Base de données des Unités Hydrographiques Cohérentes (UHC)
- Annexe 2. Base de données des tronçons homogènes (TH)
- Annexe 3. Base de données des affluents

PARTIE A. SECTORISATION DU FLEUVE RHONE



1. Méthodologie

Le diagnostic de la Mission 2 sur le fonctionnement hydrosédimentaire prévoit un rendu à l'échelle du l'axe Rhône et à l'échelle d'Unités Hydrographiques Cohérentes (UHC).

L'axe Rhône est décomposé en 4 grands tronçons homogènes dans les études et travaux scientifiques antérieurs (notamment Bravard, 2010 et EGR, 2000) :

- Le Haut-Rhône du lac Léman à la confluence avec la Saône ;
- Le Rhône moyen, de la confluence avec la Saône à la confluence avec l'Isère ;
- Le Rhône inférieur ou Bas Rhône, de la confluence avec l'Isère au palier d'Arles ;
- Le Delta du Rhône, entre le palier d'Arles et la mer Méditerranée.

A ce stade, ces grands tronçons ne sont pas remis en question.

Les Unités Hydrographiques Cohérentes (UHC) sont une dénomination utilisée pour l'établissement des plans de gestion sédimentaire (Art. L215-15 du Code de l'Environnement) :

« Les opérations groupées d'entretien régulier d'un cours d'eau, canal ou plan d'eau (...) 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 ».

Par cette approche, le législateur a souhaité éviter toute gestion localisée sans vision globale du fonctionnement du cours d'eau.

Une définition des UHC est proposée par Malavoi et al. (2010). Il s'agit d'une définition générale qui mérite d'être adaptée au cas par cas :

« 1) L'unité hydrographique cohérente pour un cours d'eau de montagne (...) sera l'ensemble de son bassin versant et de son réseau hydrographique ;

2) L'unité hydrographique cohérente pour un cours d'eau de plaine à faible charge solide pourra être un tronçon géomorphologique homogène (quelques kilomètres) ou une succession de tronçons dans une unité géomorphologique homogène (quelques dizaines de kilomètres), comprenant éventuellement les affluents qui s'y jettent. A minima, une UHC devrait consister en une succession de tronçons géomorphologiques homogènes situés dans la même unité géomorphologique homogène correspondant sensiblement à la même hydroécologie de niveau II (HER2). Un tronçon géomorphologique homogène présente des caractéristiques homogènes, telles que la largeur de fond de vallée, la pente de la vallée, l'ordre de Strahler, etc. ».

Compte tenu de ces éléments, nous avons procédé selon les étapes suivantes qui sont développées ci-après :

- Définition de l'emprise latérale du périmètre d'étude ;
- Analyse des sectorisations existantes ;
- Définition de Tronçons Homogènes (TH) et d'Unités Hydrographiques Cohérentes (UHC) ;
- Définition de passerelles entre la sectorisation retenue et les sectorisations existantes.

2. Analyse de l'emprise latérale du périmètre d'étude

Avant de définir la sectorisation en Unités Hydrographiques Cohérentes (UHC), sous forme de grandeurs linéaires, nous avons défini l'emprise latérale du périmètre d'étude.

L'emprise latérale définit le périmètre d'influence potentiel du Rhône, et plus particulièrement de son fonctionnement hydrosédimentaire. Ces influences se portent en premier lieu sur le lit mineur, le lit moyen et ses annexes fréquemment mis en eau lors des crues ; elles peuvent porter également sur le lit majeur dans sa globalité, et sur les zones humides connectées à la nappe alluviale du Rhône, même si l'ampleur et la fréquence des influences sont moindres.

Il aurait été possible de retenir le fond de vallée alluvial (enveloppe des couches géologiques Fz et Fyz correspondant aux alluvions actuelles et récentes / donnée SYRAH). Cependant, cette emprise aurait été trop large et peu pertinente, notamment au niveau des plaines alluviales communes avec les affluents.

Nous avons préféré focaliser sur les fonctionnalités de l'hydrosystème Rhône et utiliser les connaissances actuelles sur la nappe alluviale et les zones inondables. Aussi, 2 couches géographiques principales ont été utilisées pour définir l'emprise latérale du périmètre d'étude :

- L'emprise de la nappe alluviale (« napealluviale_fleuverhone »), déterminée dans l'étude SAFEGE-ANTEA (2010) ;
- L'emprise des crues historiques (« atl_rhone_surface_inondable »), déterminée dans le cadre des travaux de la ZABR (Bravard et al., 2008).

La superposition cartographique a montré que la couche « napealluviale_fleuverhone » était généralement plus étendue que la couche « atl_rhone_surface_inondable ». Dans certains secteurs comme la confluence avec la Drôme présentée sur la Figure 1, la couche « nappe alluviale » semble présenter quelques incohérences de tracé en excluant des zones inondables historiques, a priori composées d'alluvions et donc d'une nappe alluviale.

Aussi, la couche retenue pour le périmètre d'étude est équivalente à l'assemblage des 2 couches précédentes « napealluviale_fleuverhone » et « atl_rhone_surface_inondable ». Un exemple d'analyse est présenté sur la Figure 1 ci-dessous. Les fiches UHC qui accompagnent ce rapport de Mission 2 présentent ce périmètre dans les cartes de « A- Présentation générale » à l'échelle de chaque UHC.

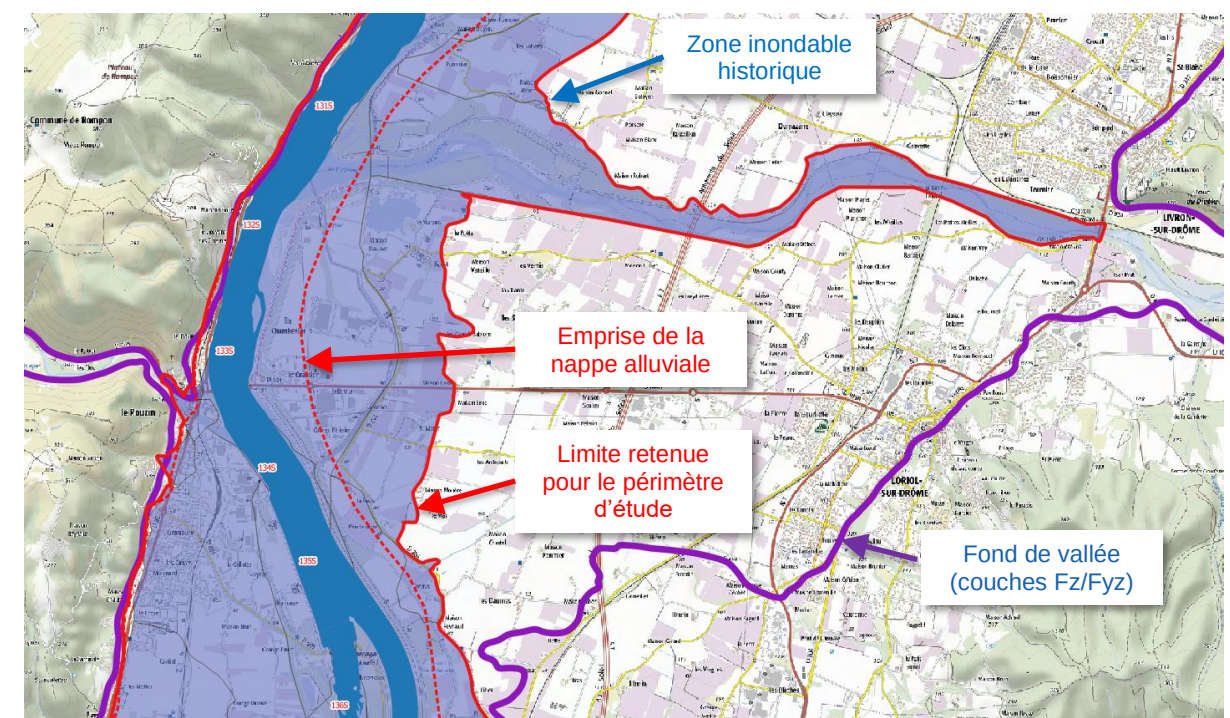


Figure 1 : Exemple de superposition de couches pour la construction du périmètre d'étude (secteur de la confluence avec la Drôme)

3. Analyse des sectorisations existantes

Nous avons recensé plusieurs sectorisations existantes du Rhône, dont les objectifs sont à différencier :

- Masses d’eau du SDAGE Rhône Méditerranée, qui sont visées par l’atteinte du bon état (BEE) ou du bon potentiel (BPE) écologique ;
- Tronçons SYRAH (SYstème Relationnel d’Audit de l’Hydromorphologie des Cours d’Eau), qui sont l’échelle d’analyse du risque d’altération du fonctionnement des processus physiques des cours d’eau (travaux de recherche menés par l’ONEMA et l’IRSTEA) ;
- Sectorisation de l’OSR (Observatoire des Sédiments du Rhône), qui vise à structurer les travaux de recherche menés dans le cadre de la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) ;
- Sectorisation dans le cadre de l’OSR4 (Observatoire des Sédiments du Rhône) au sujet des évolutions morphodynamiques du chenal sur le long terme (action I.4) ;
- Sectorisation en points kilométriques (PK) utilisée par les scientifiques et la CNR.

Il est nécessaire également d’intégrer les affluents dans cette sectorisation, notamment les affluents dits « majeurs » identifiés dans l’EGR (2000), qui ont un rôle important dans le fonctionnement sédimentaire.

3.1 Masses d’eau du SDAGE Rhône-Méditerranée

Dans le cadre du SDAGE et de la mise en œuvre de la DCE, le Rhône est sectorisé en 26 masses d’eau :

- FRDR2000 à 2009 : 10 masses d’eau principales correspondant au Rhône total ou aux canaux de dérivation hydroélectriques. Il s’agit de masses d’eau portant sur de grands linéaires (de 10 à 125 km) ; par exemple le Rhône de Seyssel au Pont d’Evieu (FRDR2001 ; 53,3 km) ou le Rhône de la Saône à l’Isère (FRDR2006 ; 100,5 km) ;
- FRDR2001A, B, etc. : 14 masses d’eau secondaires correspondant à des tronçons de Rhône court-circuités (ou Vieux Rhône), de 8 à 32 km de longueur. On notera quelques subtilités de définition de ces masses d’eau :
 - la masse d’eau FRDR2007F qui correspond à la lône de Caderousse et au Bras des Arméniers est la seule qui n’a pas le fonctionnement d’un Rhône court-circuité. Par ailleurs, elle est incluse dans le linéaire de la masse d’eau FRDR2008 (et non FRDR2007) ;
 - les Rhône court-circuités de Sault-Brénaz (FRDR2004), de St-Vallier (FRDR2006) et de Caderousse (FRDR2007) ne font pas l’objet d’une masse d’eau spécifique (ce qui représente 3 RCC sur 16 au total) ; enfin, sur Avignon, le Vieux Rhône de Villeneuve est intégré dans la masse d’eau (FRDR2008) alors que celui de Sauveterre ou bras d’Avignon est une masse d’eau spécifique (FRDR2008A) ;
- FRDT19 et 20 : 2 masses d’eau de transition correspondant aux linéaires du Petit Rhône et du Grand Rhône dans le delta de la Camargue, sous influence marine.

Le Tableau 1 récapitule les données contenues dans la couche masse d’eau de référence (source : <http://carmen.carmencarto.fr>).

3.2 Tronçons SYRAH

Dans le cadre des travaux SYRAH du pôle Hydroécologie de l’ONEMA et de l’IRSTEA (aujourd’hui INRAe), le Rhône a été traité comme tous les cours d’eau du territoire national et a fait l’objet d’une sectorisation sur la base de critères hydromorphologiques non influencés : largeur du fond de vallée alluvial (lit majeur, sigles Fz et Fyz) ; pente du fond de vallée ; l’hydrologie (rang de Strahler, débits moyens) ; nature du substrat.

Le Rhône se présente sous la forme de 21 tronçons d’une longueur de 7 à 78 km. Les changements dans l’ordre de Strahler correspondent aux confluences avec le Fier (ordre 5), la Saône (6) et l’Isère (7). La Durance ne produit pas de changement de l’ordre de Strahler. Le Rhône présente donc un ordre de Strahler de 8 à son débouché en mer.

Le Tableau 2 récapitule les données contenues dans la couche SYRAH de référence (source : <http://www.data.eaufrance.fr>).

La différence sur le linéaire total (540 km) par rapport à celui des masses d’eau (613 km) provient de plusieurs écarts cartographiques : SYRAH ne prend pas en compte le Petit Rhône (60 km) et passe par les Vieux Rhône, alors que les masses d’eau passent en priorité par les canaux de dérivation.

Tableau 1 : Sectorisation du Rhône d’après les masses d’eau du SDAGE RM

Code Masse	Nom masse d'eau	Type	Longueur (km)	L Rhône (km)	L RCC (km)
FRDR2000	Le Rhône de la frontière suisse au barrage de Seyssel	MEFM	55,9	55,9	
FRDR2001	Le Rhône du barrage de Seyssel au pont d'Evieu	MEFM	53,3	53,3	
FRDR2001A	Rhône de Chautagne	MEFM	9,9		9,9
FRDR2001B	Rhône de Belley	MEN	18,1		18,1
FRDR2001C	Rhône de Bregnier-Cordon	MEN	13,8		13,8
FRDR2002	Le Rhône du pont d'Evieu au défilé de St Alban Malarage	MEN	10,6	10,6	
FRDR2003	Le Rhône du défilé de St Alban à Sault-Brenaz	MEFM	16,0	16,0	
FRDR2004	Le Rhône de Sault-Brenaz au pont de Jons	MEN	37,0	37,0	
FRDR2005	Le Rhône du pont de Jons à la confluence Saône	MEFM	37,0	37,0	
FRDR2005A	Le Rhône de Miribel (de Jons à la confluence canal de Jonage)	MEFM	18,4		18,4
FRDR2006	Le Rhône de la confluence Saône à la confluence Isère	MEFM	100,5	100,5	
FRDR2006A	Rhône de Vernaison	MEFM	11,8		11,8
FRDR2006B	Rhône de Roussillon	MEN	12,9		12,9
FRDR2007	Le Rhône de la confluence Isère à Avignon	MEFM	124,9	124,9	
FRDR2007A	Rhône de Bourg-Lès-Valence	MEFM	10,5		10,5
FRDR2007B	Rhône de Charnes-Beauchastel	MEFM	8,4		8,4
FRDR2007C	Rhône de Baix-Logis-Neuf	MEFM	9,4		9,4
FRDR2007D	Rhône de Montélimar	MEFM	15,1		15,1
FRDR2007E	Rhône de Donzère	MEN	31,9		31,9
FRDR2007F	Lône de Caderousse et bras des Arméniers	MEFM	20,6		20,6
FRDR2008	Le Rhône d'Avignon à Beaucaire	MEFM	48,6	48,6	
FRDR2008A	Bras d'Avignon et ses annexes	MEFM	14,6		14,6
FRDR2008B	Rhône de Beaucaire	MEFM	7,9		7,9
FRDR2009	Le Rhône de Beaucaire au seuil de Terrin et au pt de Sylveréal	MEFM	70,7	70,7	
FRDT19	Le Petit Rhône de pt de Sylveréal à la Méditerranée	MEFM	19,3	19,3	
FRDT20	Le Rhône du seuil de Terrin à la Méditerranée	MEFM	39,2	39,2	
TOTAL			816	613	203

Tableau 2 : Sectorisation du Rhône d’après SYRAH

N°	ID_TRONCON	Rang Strahler	Longueur (km)	Pente du lit %	Surface de bassin drainée (km²)	Largeur fond de vallée (km)	largeur pleins bords (m)
1	57099	5	20,6	0,16	10300	0,2	-
2	57100	5	6,9	0,07	10370	0,7	-
3	57101	5	21,9	0,31	10804	0,1	-
4	57102	5	10,2	0,07	10941	0,3	-
5	57109	6	20,3	0,15	12730	2,9	145
6	57103	6	12,7	0,05	13688	0,8	145
7	57108	6	17,6	0,08	14020	1,7	145
8	57106	6	18,4	0,01	14834	3,8	145
9	57107	6	17,8	0,05	15186	0,8	145
10	57105	6	28,5	0,05	15376	1,8	145
11	57104	6	35,1	0,06	20275	3,6	145
12	57110	7	17,7	0,05	50194	0,9	214
13	57111	7	17,6	0,06	51067	0,9	214
14	57112	7	37,5	0,04	51927	1,7	214
15	57113	7	16,9	0,06	53796	1,2	214
16	57114	7	12,8	0,09	54586	1,4	355
17	57116	8	34,8	0,09	66711	2,2	345
18	57117	8	33,9	0,05	70150	2,5	190
19	57115	8	21,5	0,08	71363	8,3	422
20	57118	8	59,8	0,04	77048	12,8	422
21	57119	8	77,6	0,02	96031	18,1	422
TOTAL			540				

3.3 Tronçons OSR

Dans le cadre des travaux de la ZABR sur le Rhône, une sectorisation du Rhône a progressivement été adoptée à partir des études menées au cours du programme OSR1 (2009-2011).

Cette sectorisation est basée notamment sur les complexes hydroélectriques qui structurent le fonctionnement hydrosédimentaire du Rhône. Un tronçon inclut donc la retenue, le canal usinier, le Vieux Rhône correspondant, jusqu'à la confluence canal usinier / Vieux Rhône (ou « restitution »). Les délimitations amont aval sont définies sommairement à quelques centaines de mètres près.

On note ainsi 24 tronçons homogènes sur l'ensemble du linéaire du Rhône. Le tronçon SUI porte sur les 3 ouvrages du territoire suisse. Le tronçon LIT correspond au littoral méditerranéen du delta du Rhône.

Tableau 3 : Sectorisation du Rhône utilisée dans l'OSR

N°	Code	UHC
1	SUI	Suisse
2	GEN	Génissiat
3	SEY	Seyssel
4	CHA	Chautagne
5	BEL	Belley
6	BRC	Brégnier Cordon
7	SBR	Sault-Brénaz
8	AIN	Confluence Ain
9	LYM	Lyon
10	PBN	Pierre-Bénite
11	VAU	Vaugris
12	PDR	Péage de Roussillon
13	VAL	Saint-Vallier
14	BLV	Bourg-lès-Valence
15	BEA	Beauchastel
16	BLN	Baix Logis Neuf
17	MON	Montélimar
18	DZM	Donzère Mondragon
19	CAD	Caderousse
20	AVI	Avignon
21	BEC	Beaucaire
22	GRO	Grand Rhône
23	PRO	Petit Rhône
24	LIT	Littoral

3.4 Tronçons établis dans le cadre de l'OSR4 (action I.4)

Dans le cadre des travaux de l'OSR3, et notamment de la thèse de Parrot (2015), la sectorisation présentée précédemment était jusqu'alors utilisée.

Les travaux menés en 2016-2018 pour l'OSR4, dans le cadre de l'Action I.4 « Evolutions morphodynamiques du chenal sur le long terme », ont conduit à utiliser un découpage en tronçons « intra-barrages » ou « biefs » délimités par un barrage de retenue en amont et par le barrage de retenue suivant en aval (cf. Figure 2 et Figure 3). Cette sectorisation en biefs est utilisée par certains services de la CNR. Dans l'exemple de la Figure 3, le tronçon illustré correspond au « bief de St-Vallier », incluant la retenue de St-Vallier (barrage d'Arras), mais également le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon, remontant ainsi jusqu'au barrage de St-Pierre-de-Bœuf.

Cette sectorisation a du sens dans une logique de continuité sédimentaire des Vieux Rhône qui débutent au niveau du barrage de retenue amont et qui débouchent dans la retenue du barrage aval. Cependant, elle isole une retenue du RCC situé en aval, et ne permet pas d'analyser la continuité sédimentaire à travers le barrage de retenue.

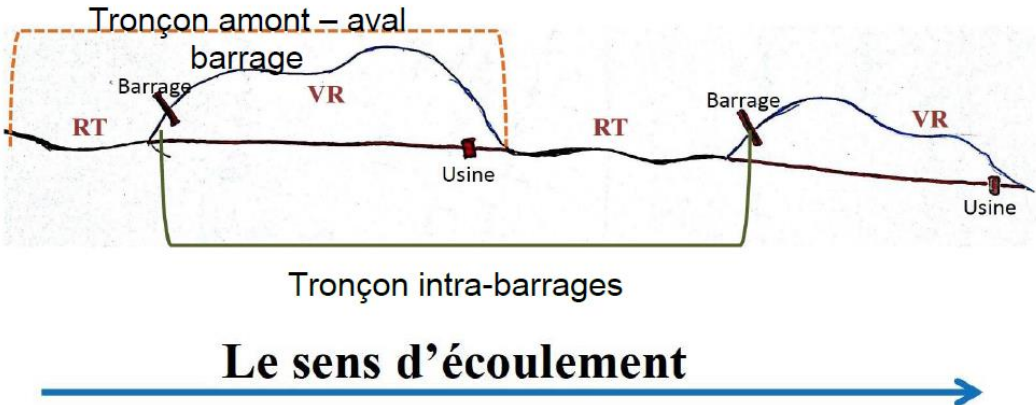


Figure 2 : Principe de sectorisation de barrage à barrage dans le cadre de l'OSR4 (action I.4)

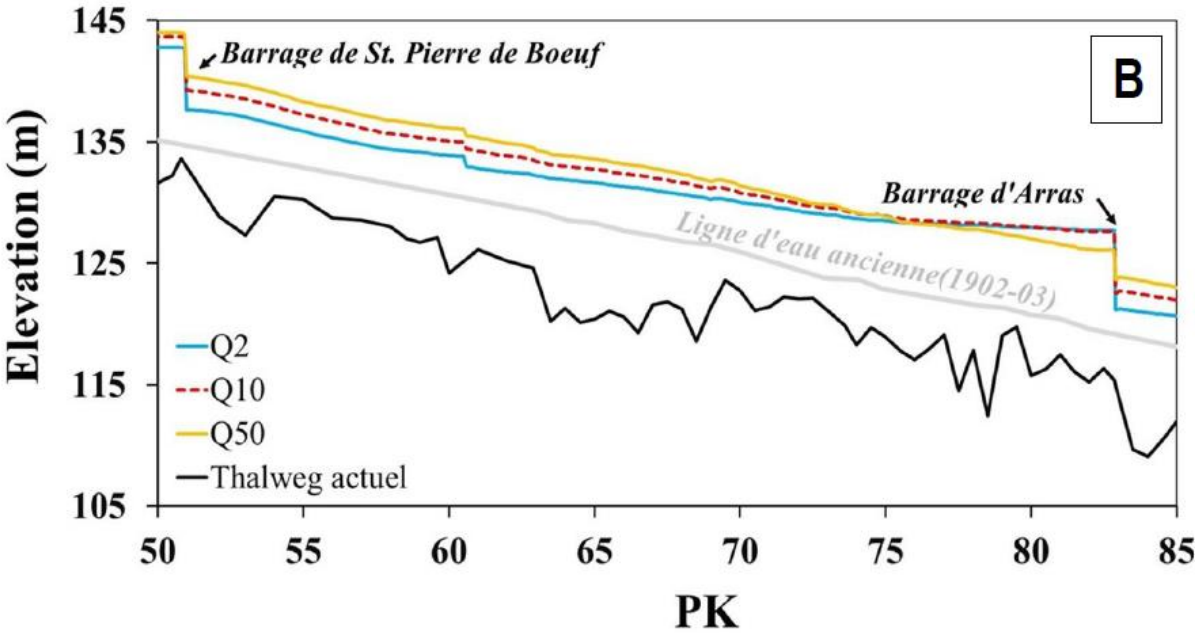


Figure 3 : Exemple de rendu de profil en long de barrage à barrage (bief de St-Vallier)

Source Vázquez-Tarrío (2018)

3.5 Référencement en points kilométriques

Il existe plusieurs référencements en points kilométriques (PK) le long du Rhône.

Le premier système (PK « Rhône ») est historique et sera utilisé en priorité dans le cadre de la présente étude. Le second (PK « MAGE ») est utilisé par l'INRAE pour la modélisation hydraulique et par l'OSR pour les travaux scientifiques qui en découlent. Il existe enfin des systèmes de PK locaux utilisés par les modélisations hydrauliques de la CNR.

Il n'existe pas de passerelle simple entre ces différents systèmes de PK.

► Système de PK « Rhône »

Le Rhône a fait l'objet dès le 19^{ème} siècle d'une sectorisation en points kilométriques (PK) qui est utilisée par les exploitants comme la CNR, VNF ou EDF (repères de navigation et d'aménagements hydroélectriques) et les scientifiques de l'OSR.

Le point de référence (PK 0) est situé en aval du pont Pasteur à Lyon, et en amont de la confluence avec la Saône. Les PK sont positifs ou associés à un « S » comme « Sud » en aval de Lyon (par exemple « PK 25 » ou « PK 25S »). Les PK sont négatifs ou associés à un « N » comme « Nord » en amont de Lyon (par exemple « PK -15 » ou « PK 15N »).

Ces PK sont matérialisés sur site le long du Rhône par des bornes sur chacune des berges (cf. Figure 4).

Comme ce système a été mis en place avant la création des ouvrages hydroélectriques, les PK sont en continuité entre le Rhône total (dans ses sections à débit total) et les Vieux Rhône. Si des aménagements ont été réalisés depuis leur mise en place, ces PK restent la référence du fait des usages qui leur sont rattachés et de leur matérialisation sur site :

- Avec l'aménagement des dériviages des ouvrages hydroélectriques, les PK ont été étendus dans les canaux de dérivation. En amont de chaque usine, les PK sont prolongés de l'amont à partir de la prise d'eau du canal ; en aval des usines, les PK sont prolongés depuis l'aval à partir des confluences avec les Vieux Rhône ou restitutions. Comme les canaux de dérivation sont généralement plus courts que les Vieux Rhône, le lieu même de l'usine peut marquer une discontinuité dans la numérotation des PK du canal de dérivation. Par exemple, pour le bief de Péage-de-Roussillon (PDR), le PK en amont immédiat de l'usine est 59,8 et le PK en aval immédiat de l'usine est 61,2 (soit un écart de 1,4 km qui correspond à la différence de longueur entre le Vieux Rhône et le canal de dérivation) ;
- Avec l'aménagement des retenues (ou éventuellement pour d'autres raisons), des rescindements de méandres ont pu être opérés sur le tracé du Rhône. De ce fait, la longueur réelle du Rhône a été raccourcie mais les PK n'ont pas été modifiés. Par exemple, dans la retenue de St-Pierre-de-Bœuf (PDR), le double méandre des Roches-de-Condrieu est passé d'une longueur de 4 km entre les PK39 et 43 à une longueur de 3,375 km. Les interdistances entre les PK39 à 43 ne sont donc plus d'1 km exactement.

Ce système de PK fait l'objet de données SIG existantes (PK sur l'axe du Rhône et PK sur les berges). Il est appelé ici PK « Rhône » ; il peut être mentionné également comme PK « CNR » dans la littérature.

Compte tenu des distorsions locales, l'utilisation de ce système de PK peut impliquer un ajustement, tout au moins une prudence, dans les calculs et modélisation hydrauliques, et l'exploitation de pentes locales ou des longueurs de linéaires.

► Système de PK « MAGE »

L'IRSTEA travaille depuis plusieurs années sur la modélisation hydraulique du Rhône sous le logiciel MAGE. Dans ce cadre, des profils en travers du lit mineur sont utilisés et sont repérés par un PK spécifique. Ces PK sont référencés dans un système similaire à celui des PK « Rhône » (origine PK 0 à Lyon) mais avec un ajustement des interdistances entre profils de façon à correspondre à la réalité physique.

A notre connaissance, ce système n'a pas fait l'objet d'une couche SIG de géoréférencement avec un objet par PK. Par contre, ce système reste attaché à la modélisation hydraulique et aux calculs de lignes d'eau, utilisée notamment dans les travaux de Parrot (2015) et de Daniel Vázquez-Tarrio (2018-2020). Aussi, des écarts peuvent exister en termes d'affichage entre le PK d'un lieu (par exemple un barrage) sur un profil en long de ligne d'eau et le PK de ce lieu sur la cartographie.

Sur la Figure 5 qui suit, le profil en travers est affecté d'un PK « MAGE » 54 tout en étant situé à 80 m du PK54 dans le système PK « Rhône ».

► Système de PK locaux

La CNR utilise des modèles hydrauliques par bief pour ses propres besoins d'exploitation. Les résultats de lignes d'eau qui nous ont été rendus sont fournis dans un système de PK local (par exemple PK 0 au niveau d'un barrage). Chaque profil en travers est dénommé par son PK « Rhône » correspondant, ce qui permet d'identifier les correspondances. Ces lignes d'eau sont a priori compatibles avec le système PK « MAGE » ; cependant, suite aux aménagements du Rhône (rescindement de méandre, déplacement du lit, etc.), les PK anciens ne sont pas toujours représentatifs de la réalité. Ainsi, l'analyse des données montre qu'il est nécessaire de procéder à des ajustements d'abscisses grâce à un recalage sur des points durs connus (barrages, seuils, ponts) (cf. PARTIE C / §.0).



Figure 4 : Exemple de localisations de PK « Rhône » sur le bief de Péage de Roussillon (PDR)

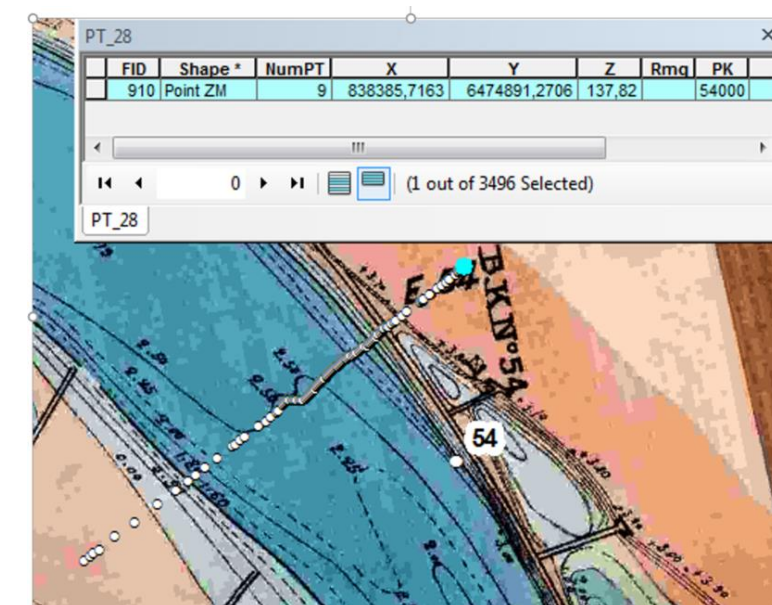


Figure 5 : Exemple de de profils en travers MAGE sur le bief de Péage de Roussillon (PDR) (OSR)

3.6 Affluents majeurs à intégrer dans la sectorisation

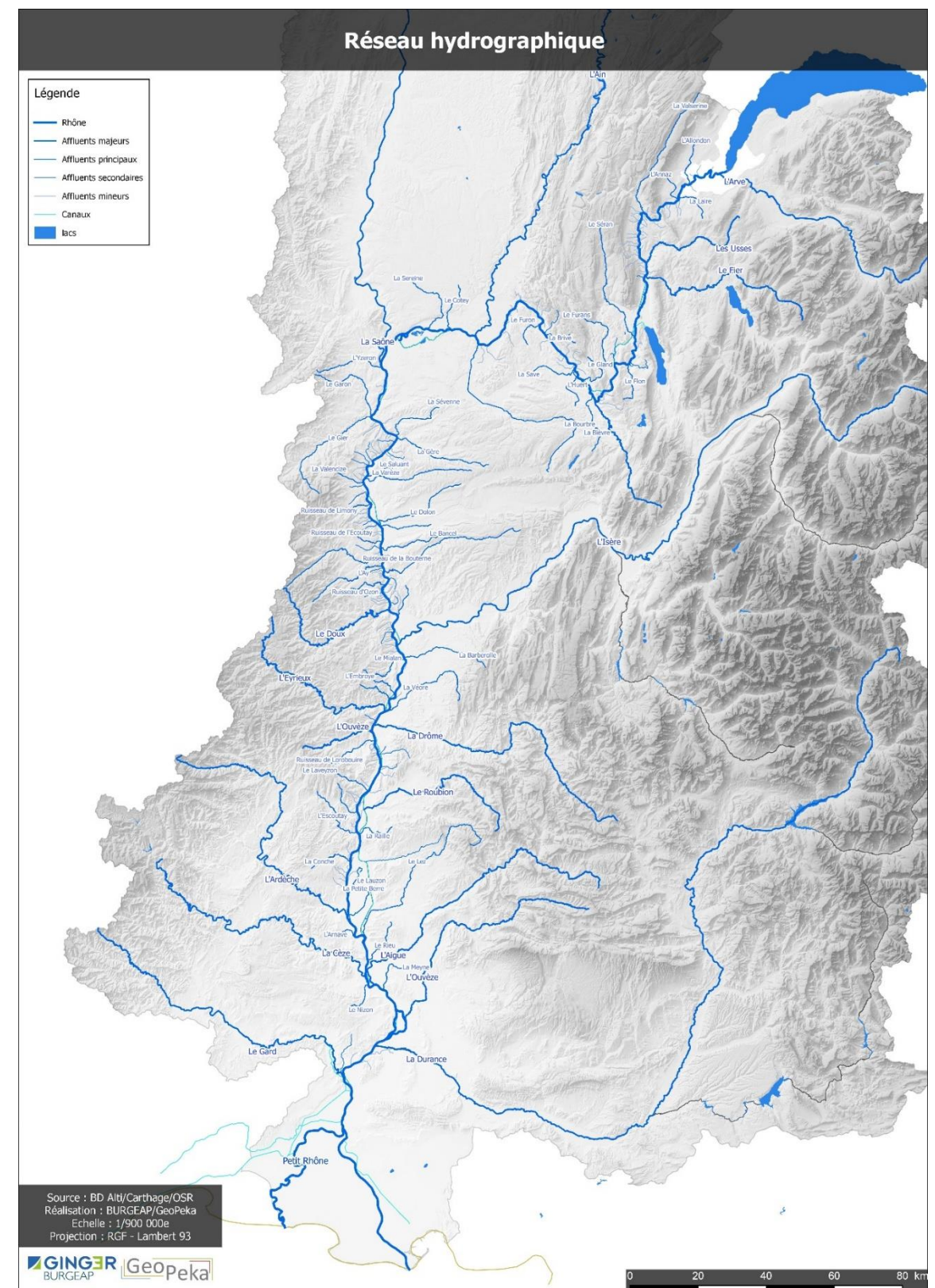
Le travail de Mission 1, consolidé par le travail des missions suivantes, a permis d'identifier les affluents du fleuve Rhône (cf. Carte 1). La base de données cartographique utilisée est la base de données BD Carthage établies par les agences de l'eau.

Les affluents sont classés selon 4 catégories :

- **Les affluents majeurs (rang 1)¹** : il s'agit de 18 affluents identifiés dès l'EGR (2000) comme des contributeurs importants au fonctionnement alluvial (d'amont en aval) : Arve, Les Usses, Fier, Guiers, Ain, Saône, Doux, Isère, Eyrieux, Ouvèze (ardéchoise), Drôme, Roubion, Ardèche, Cèze, Aigues, Ouvèze (provençale ou drômoise), Durance, Gardon ;
- **Les affluents principaux (rang 2)** : il s'agit de 52 affluents de plus de 10 km extraits de la BD Carthage, avec ou sans action de gestion sédimentaire ;
- **Les affluents secondaires (rang 3)** : il s'agit de 25 affluents de moins 10 km qui font l'objet d'interventions sédimentaires par la CNR inscrite dans l'arrêté d'autorisation de 2011 (PGPOD CNR, 2009) ;
- **Les affluents mineurs (rang 4)** : 146 cours d'eau restants issus de la BD Carthage.

Soit au total 241 affluents identifiés.

Compte tenu de leur rôle dans le fonctionnement hydrosédimentaire et selon les recommandations méthodologiques de la partie §.1, les 18 affluents majeurs présentent un intérêt à intégrer la sectorisation du Rhône.



Carte 1 : Réseau hydrographique du Rhône et de ses affluents

¹ Le rang qui est indiqué ici n'est pas le rang de Strahler

3. l'analyse du territoire nécessite d'intégrer la dimension transversale, notamment vis-à-vis des enjeux écologiques, sûreté/sécurité et socio-économique et de travailler à une échelle géographique compacte autour d'un complexe hydroélectrique.

4. Sectorisation retenue

4.1 Synthèse sur les sectorisations existantes

Chacune des sectorisations précédentes répond à des objectifs précis et peut présenter des avantages et des inconvénients dans le cadre du schéma directeur de gestion sédimentaire du Rhône :

- La sectorisation en masse d'eau du SDAGE identifie bien les Vieux Rhône. A contrario, les masses d'eau principales présentent de très grands linéaires ou ne tiennent pas compte d'affluents majeurs (par exemple la confluence de l'Ain est située au cœur du linéaire de la masse d'eau FRDR2004), ce qui rend cette sectorisation insuffisante pour une gestion sédimentaire ;
- La sectorisation SYRAH est basée sur le fonctionnement non perturbé du Rhône, donc non influencé par les ouvrages hydroélectriques. Compte tenu du rôle des ouvrages hydroélectriques dans le fonctionnement sédimentaire, cette sectorisation peut ne pas être adaptée pour le schéma directeur de gestion sédimentaire, mais elle peut être utile pour la caractérisation d'un état de référence ;
- Les tronçons OSR présentent l'avantage d'être opérationnels et appliqués aux programmes scientifiques. Ils sont régulièrement utilisés par la CNR ou par les scientifiques. Leur délimitation devrait être précisée et rendue cohérente, notamment vis-à-vis du rôle d'affluents comme l'Ain ;
- Les tronçons OSR4 développés dans le cadre de l'action I.4 sont intéressants dans la logique de continuum sédimentaire à l'échelle des Vieux Rhône et des retenues aval dans lesquels ils débouchent. Cependant, ils segmentent les complexes hydroélectriques en termes d'ouvrages de génie civil (la retenue et le canal d'amenée d'une part ; le Vieux Rhône d'autre part) et de gestion du territoire, ce qui rend la sectorisation peu opérationnelle. Par exemple, à la confluence Rhône / Isère, l'Isère serait rattachée au canal d'amenée et la retenue amont, alors que le Vieux Rhône constituerait une autre unité en aval, rattachée à la retenue de Beauchastel ;
- Le référencement en points kilométriques (PK « Rhône ») est une information essentielle, déjà utilisée par les gestionnaires, et qui doit être reprise dans le schéma directeur, tout en étant conscient des distorsions locales qui peuvent exister, en lien notamment avec les modélisations hydrauliques (PK « MAGE », PK locaux de la CNR).

En conclusion, on peut constater qu'à chaque sectorisation est attachée un objectif scientifique ou de gestion, et qu'il n'existe aucun mode de sectorisation totalement satisfaisant dans le cadre d'une gestion globale et pluridisciplinaire d'un fleuve artificialisé tel que le Rhône.

Pour s'en convaincre, on peut retenir que la retenue de chaque barrage est à l'interface de ces méthodes de sectorisation : soit elle est rattachée au complexe hydroélectrique aval, soit elle est rattachée au Vieux Rhône situé en amont (notion de bief). Idéalement, il faudrait donc une sectorisation à « chevauchement » où la retenue appartiendrait à la fois au tronçon amont et au tronçon aval, mais ce principe n'est pas compatible avec les rendus textuels, cartographiques et opérationnels envisagés dans le schéma directeur.

Aussi, la sectorisation à retenir doit être adaptée et faire l'objet d'un compromis. Le choix qui a été fait est présenté dans la partie qui suit.

4.2 Définition des tronçons homogènes et unités hydrographiques cohérentes

A partir de l'analyse précédente, trois grands principes peuvent être retenus :

1. dans le cadre de masses d'eau fortement modifiées comme celle du fleuve Rhône, il semble essentiel que la sectorisation soit cohérente avec les aménagements hydroélectriques qui ont une incidence très forte sur le fonctionnement hydraulique et sédimentaire (contrôle de l'hydrologie, contrôle des niveaux d'eau, effets de piégeage et relargage des sédiments) ;
2. la sectorisation doit être compatible avec l'enjeu de continuum sédimentaire entre chaque Vieux Rhône et la retenue immédiatement en aval, autant en terme de diagnostic que de préconisations de gestion ;

Dans un premier temps, et dans l'esprit du guide établi par Malavoi et al. (2010), nous avons défini successivement des tronçons homogènes (TH) et des unités hydrographiques cohérentes (UHC) (cf. Figure 7) :

- **Tronçons homogènes (TH) :** ces tronçons sont homogènes sur la base d'une combinaison de critères géomorphologiques (composantes naturelles) et anthropiques (suite aux aménagements pour l'hydroélectricité, la navigation voire l'irrigation). Au-delà des critères géomorphologiques régulièrement utilisés (fond de vallée, pente de vallée, hydrologie), les critères suivants ont prédominé : répartition de débit (canal de dérivation ou Vieux Rhône) ; remous de la retenue d'un barrage ; linéaire de Rhône total courant ; confluence avec un affluent ou diffluence (Petit Rhône).
- Ainsi, on peut définir plusieurs « types » de tronçons homogènes (TH) selon s'ils se réfèrent ou non à des aménagements anthropiques :
- CU : canal usinier ou canal de dérivation d'une usine hydroélectrique, comprenant le canal d'amenée en amont de l'usine, et le canal de restitution en aval de l'usine ;
 - RCC : linéaire court-circuité (ou Vieux Rhône) ou lône majeure au sein de ce linéaire court-circuité (par exemple : Vieux Rhône de Neyron) ; il n'est pas considéré qu'un ouvrage intermédiaire (par exemple un seuil dans un RCC) déclenche le fractionnement d'un tronçon homogène de type RCC ; toutefois, l'analyse ultérieure montrera qu'un fractionnement et la définition de « sous-TH » est parfois utile pour commenter le fonctionnement hydrosédimentaire ;
 - R : retenue de barrage dans l'emprise définie par le remous en conditions de débit semi-permanent (cf. données EGR (2000) ; rapport V3D1A3). Trois situations se présentent :
 - lorsque le remous d'une retenue aval remonte jusqu'au pied d'un ouvrage sans dérivation, la limite amont est prise au pied de l'ouvrage ou éventuellement un peu plus en aval lorsqu'il existe un élément qui lui soit rapporté (zone de dissipation, station de suivi de la turbidité, etc.). La localisation de ces limites amont de retenue est précisée dans le Tableau 3 ;
 - lorsque le remous d'une retenue aval remonte dans un Vieux Rhône amont, la limite amont du tronçon homogène de type R est prise à la restitution (confluence RCC / CU) ;
 - lorsque le remous d'une retenue aval n'atteint pas le Vieux Rhône en amont, un tronçon de type RT prend naissance entre la restitution (confluence RCC / CU) et la limite amont du tronçon homogène de type R ;
 - RT : linéaire de Rhône total entre deux complexes hydroélectriques, hors influence d'une retenue ;
 - A : linéaire aval d'un affluent majeur, au sein de l'emprise latérale du périmètre d'étude (cf. §.2). La confluence avec un tel affluent décompose le tronçon émissaire (type CU, RCC, R ou RT) en 2 tronçons homogènes, sauf si le point de confluence est proche d'une transition existante (entre R et RT, entre R et RCC/CU, etc.) de façon à ne pas créer de petits tronçons non pertinents.

Unités hydrographiques cohérentes (UHC) : une fois les tronçons homogènes (TH) définis, nous avons procédé à leur agrégation sous forme d'Unités Hydrographiques Cohérentes (UHC).

L'agrégation des tronçons homogènes (TH) en UHC a été privilégiée autour des complexes hydroélectriques (principe n°1) et du territoire (principe n°3). Pour répondre au principe de continuum sédimentaire (principe n°2), il est prévu d'intégrer dans les analyses le tronçon homogène de la retenue immédiatement en aval.

Par exemple, au niveau du complexe hydroélectrique de Péage de Roussillon, 3 tronçons homogènes sont définis (cf. Figure 7) :

- PDR1 : retenue de Péage de Roussillon ;
- PDR2 : canal usinier de Péage de Roussillon (usine de Sablons) ;
- PDR3 : Vieux Rhône de Péage de Roussillon

Ces 3 tronçons homogènes composent l'Unité Hydrographique Cohérente UHC#13-PDR. A cette UHC est rattaché le tronçon homogène STV1 qui correspond à la retenue de St-Vallier, qui est dans la continuité sédimentaire du tronçon PDR3. Les tronçons PDR3 et STV1 constituent le bief de St-Vallier.

L'UHC se présente ainsi comme un périmètre géographique cohérent au sein duquel des actions peuvent impacter sur d'autres actions ou sur des mêmes enjeux (écologiques, risques, socio-économiques). Les impacts pourront porter également sur le tronçon homogène immédiat aval. Enfin, il pourra exister des cas (dans le cadre des chasses par exemple) où les impacts devront être pris en considération sur plusieurs UHC en série.

La cartographie globale des UHC est reportée sur la Carte 2.

Des passerelles sont établies dans des tableaux de correspondance pour assurer un lien avec les masses d'eau du SDAGE (cf. Tableau 3 et Tableau 4).

4.3 Codification et bilan

La codification suivante est retenue pour les UHC et TH :

- Les UHC sont numérotées d'amont en aval, de #1 à #25, et nommées avec un trigramme (code à 3 lettres) comme listé dans le Tableau 3 ;
- Les TH sont numérotés selon deux modes :
 - Un mode complet : xx-AAAY-BB (par exemple 17-BLN4-R) avec :
 - xx : numéro de l'UHC ;
 - AAA : trigramme de l'UHC ;
 - y : numéro du tronçon dans l'UHC ;
 - BB : code du type de tronçon : CU, RCC, R, RT, A ;
 - Ce mode permet de disposer d'une information complète et ordonnée dans le SIG et de rapporter chaque tronçon homogène à la typologie ;
 - L'ordre de numérotation des TH suit successivement la retenue (R), le canal usinier (CU), le Rhône court-circuité (RCC) ; un tronçon de Rhone total (RT) entre deux complexes hydroélectriques étant affecté à l'UHC amont. Les affluents viennent s'intercaler d'amont en aval dans la numérotation.
 - Un mode simplifié : AAAY (par exemple BLN4). Ce mode simplifié sera privilégié dans la rédaction des rapports.

Dans le texte, il sera régulièrement utilisé la mention « UHC#xx-AAA » ou « xx-AAA » pour renvoyer à l'UHC concernée, ou « AAAY » pour renvoyer au TH concerné.

On obtient ainsi :

- 25 unités hydrographiques cohérentes (UHC) :**
 - Pour une longueur totale du Rhône de 539 km (par les canaux usiniers) et de 557 km (par les Vieux Rhône (+16 km), en supposant un cheminement par le bras d'Avignon), à laquelle s'ajoute le Petit Rhône (59,8 km). La longueur moyenne des UHC est de 24 km [8 à 60 km] ;
 - d'une longueur totale de 933 km en incluant tous les tronçons, y compris les tronçons correspondants aux linéaires aval des affluents majeurs ;
 - On note deux grands types d'UHC :
 - 21 UHC correspondant à des complexes hydroélectriques ; pour chacune de ces UHC, nous avons défini une terminologie des sites (barrage, usine, Vieux Rhône) en accord avec celle utilisée par les gestionnaires (cf. Tableau 3) ;
 - 4 UHC correspondant à des linéaires de Rhône total (St-Vulbas en amont de l'Ain, Palier d'Arles, Petit-Rhône, Grand-Rhône) ;

• 104 tronçons homogènes (TH) :

- de longueurs cumulées 933 km, d'une longueur moyenne de 8,97 km [0,37 à 47,5 km] ;
- chaque UHC comporte entre 1 et 8 tronçons homogènes (TH) ;
- en moyenne, il y a donc 4 TH par UHC, avec un linéaire total moyen de 38 km par UHC ;
- les TH des affluents (A) représentent 141 km (soit 8 km en moyenne par affluent) ;
- le linéaire cumulé des canaux de dérivation (CU) représente 174 km (10,9 km en moyenne par canal) ;
- le linéaire cumulé des 16 Vieux Rhône (RCC), 17 en comptant deux RCC pour Avignon, représente 183 km (11,4 km par Vieux Rhône).

Plusieurs remarques peuvent être tirées de l'application de la sectorisation dans les fiches UHC :

- Chaque UHC et TH est défini par ses PK amont et aval dans le système des PK « Rhône ». Par souci de simplification, les mentions « N » ou le signe négatif « - » en sont pas mentionnés systématiquement et sont implicites pour le Haut-Rhône ;
- L'analyse hydrosédimentaire dans les fiches UHC a pu conduire parfois à sous-sectoriser les tronçons homogènes (TH) afin de mieux caractériser certains fonctionnement locaux (effet d'un seuil dans un Vieux Rhône, différenciation entre un RCC courant et un RCC lentique, différenciation entre la partie amont et la partie aval d'une retenue, etc.). Ces sous-secteurs gardent la dénomination du TH correspond et sont simplement définis par leurs PK amont et aval correspondants ;
- Les linéaires calculés sont issus de la cartographie SIG qui a donné lieu aux différentes cartes des fiches UHC. Il est possible que ces linéaires soient différents des linéaires connus des gestionnaires du fait de la localisation des points de confluence. Par exemple, à la restitution, le point de confluence est généralement situé en aval du musoir à l'intersection de l'axe du RCC et du canal de restitution, et non pas au musoir exactement.

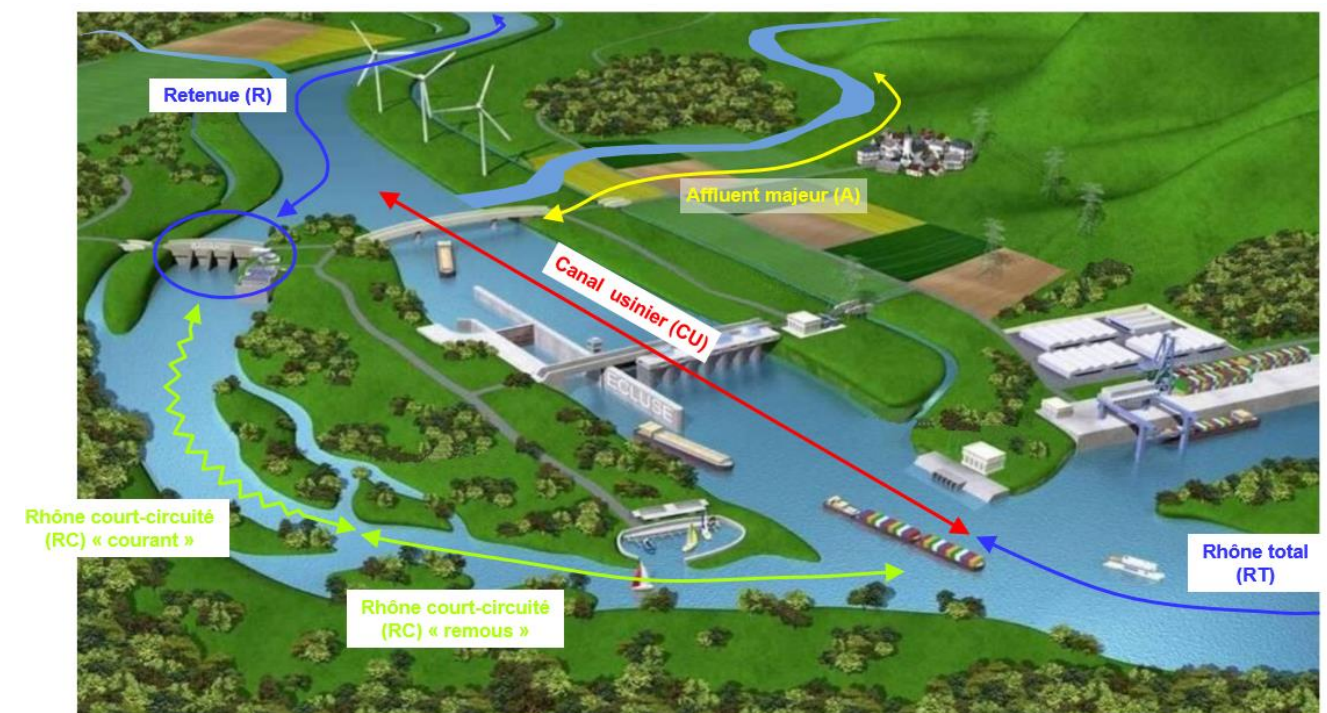


Figure 6 : Illustration d'une sectorisation type en tronçons homogènes

Tableau 3 : Sectorisation en Unités Hydrographiques Cohérentes (UHC)

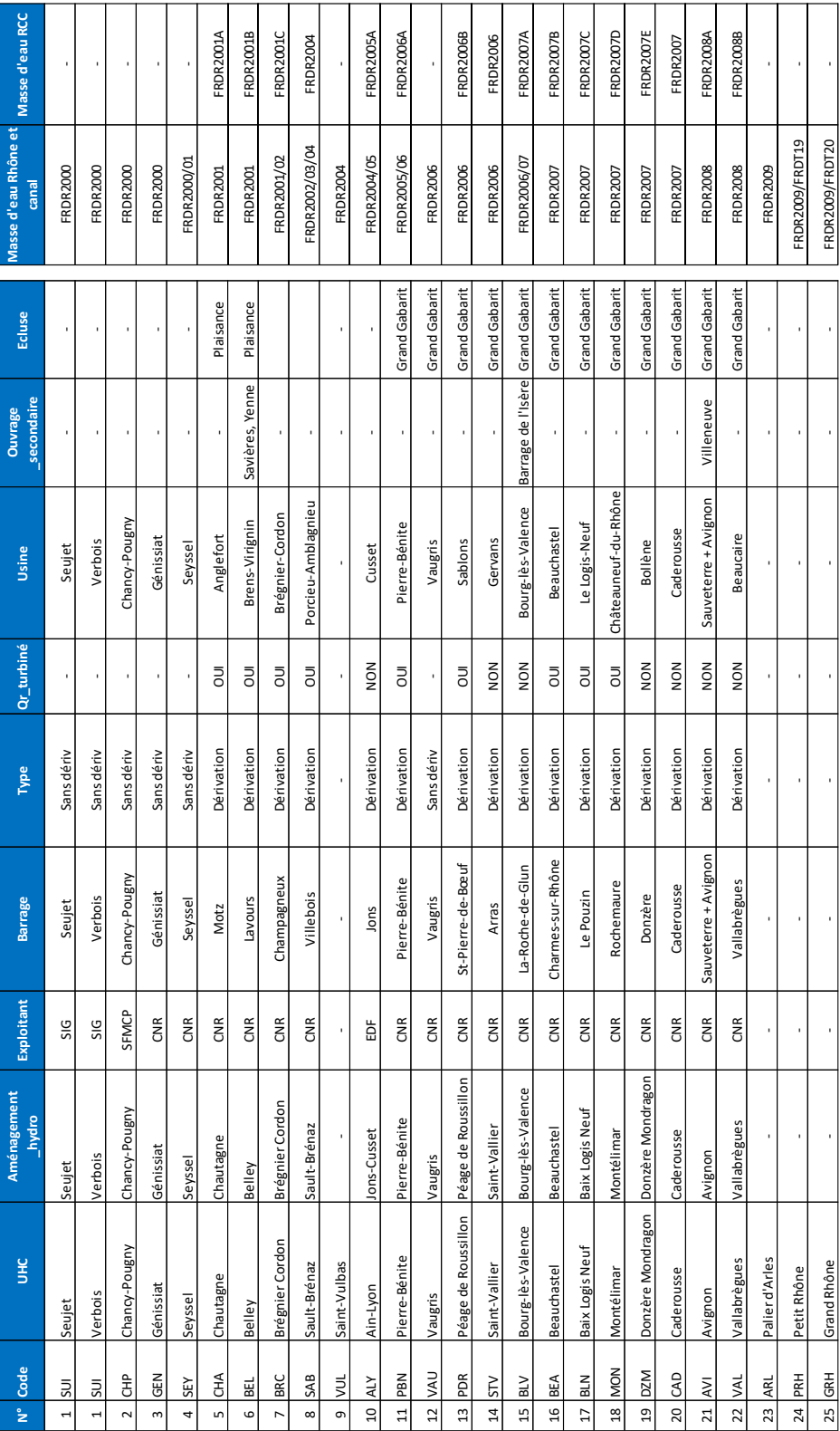
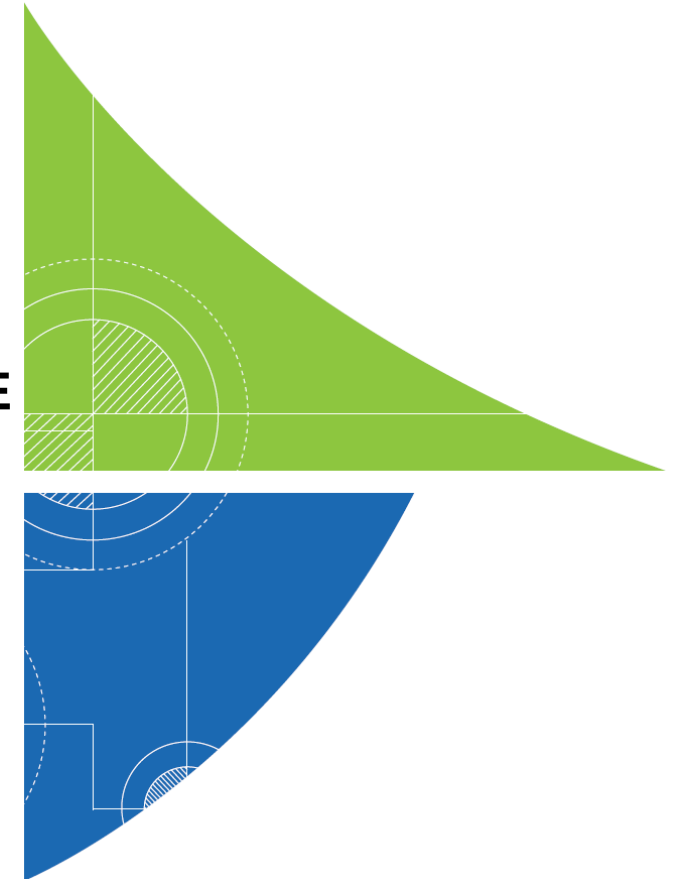


Tableau 4 : Sectorisation en UHC et Tronçons Homogènes (TH)

Code_hydro	Code	Cours d'eau	Longueur (m)	Longueur totale par UHC (m)	Longueur Rhône par CU (m)	Longueur Rhône par RCC (11 m)	Pk amont	Largeur moyenne en eau	N° UHC	UHC	Am-Av	TH_court	TH_complet	Masse d'eau SDAGE
V1610000	R	Le Rhône	1 114				-205,1	260	01	SUI	01	SUI1	01-SUI1-R	FRDR2000
V1610000	R	Le Rhône	1 194				-204,2	113	01	SUI	01	SUI2	01-SUI2-R	FRDR2000
V0-0200	A	L'Ain	368				-203,3	91	01	SUI	01	SUI3	01-SUI3-A	FRDR355a
V1610000	R	Le Rhône	11 833				-203,3	223	01	SUI	01	SUI4	01-SUI4-R	FRDR2000
V1610000	RT	Le Rhône	1 471	15 980	15 612	15 612	-194,0	115	01	SUI	01	SUI5	01-SUI5-RT	FRDR2000
V1610000	R	Le Rhône	4 500				-192,9	189	02	CHP	02	CHP1	02-CHP1-R	FRDR2000
V1610000	RT	Le Rhône	1 700	6 200	6 200	6 200	-188,4	127	02	CHP	03	CHP2	02-CHP2-RT	FRDR2000
V1610000	R	Le Rhône	24 598				-186,7	243	03	GEN	03	GEN1	03-GEN1-R	FRDR2000
V1610000	RT	Le Rhône	1 631	26 229	26 229	26 229	-162,2	63	03	GEN	03	GEN2	03-GEN2-RT	FRDR2000
V1610000	R	Le Rhône	8 652				-160,5	179	04	SEY	04	SEY1	04-SEY1-R	FRDR2000
V11-0400	A	Les Usse	3 000				-151,8	56	04	SEY	04	SEY2	04-SEY2-A	FRDR540
V1610000	RT	Le Rhône	2 170	13 822	10 822	10 822	-151,8	146	04	SEY	04	SEY3	04-SEY3-RT	FRDR2001
V1610000	R	Le Rhône	1 757				-149,5	244	05	CHA	05	CHA1	05-CHA1-R	FRDR2001
V12-0400	R	Le Fier	1 683				-147,9	61	05	CHA	05	CHA2	05-CHA2-A	FRDR330
V1610000	R	Le Rhône	1 723				-147,9	387	05	CHA	05	CHA3	05-CHA3-R	FRDR2001
V1265002	CU	Dérivation de Chautagne	9 242				-146,4	98	05	CHA	05	CHA4	05-CHA4-CU	FRDR2001
V1610000	RCC	Le Rhône	9 495				-146,0	100	05	CHA	05	CHA5	05-CHA5-RCC	FRDR2001A
V1610000	RT	Le Rhône	2 202	26 102	14 924	15 177	-136,6	149	05	CHA	05	CHA6	05-CHA6-RT	FRDR2001
V1610000	R	Le Rhône	2 871				-134,6	308	06	BEL	06	BEL1	06-BEL1-R	FRDR2001
V1-3002	CU	Dérivation de Belley	15 090				-132,0	196	06	BEL	06	BEL2	06-BEL2-CU	FRDR2001
V1610000	RCC	Le Rhône	17 742	35 703	17 961	20 613	-131,6	112	06	BEL	06	BEL3	06-BEL3-RCC	FRDR2001B
V1610000	R	Le Rhône	11 365				-114,5	234	07	BRC	07	BRC1	07-BRC1-R	FRDR2001
V1-3022	CU	Dérivation de Brégnier-Cordon	8 116				-103,4	175	07	BRC	07	BRC2	07-BRC2-CU	FRDR2001
V1610000	RCC	Le Rhône	4 583				-102,9	126	07	BRC	07	BRC3	07-BRC3-RCC	FRDR2001C
V15-0400	A	Le Gualers	2 209				-98,8	36	07	BRC	07	BRC4	07-BRC4-A	FRDR515
V1610000	RCC	Le Rhône	7 702				-98,8	108	07	BRC	07	BRC5	07-BRC5-RCC	FRDR2001C
V1610000	RT	Le Rhône	6 258	40 233	25 739	29 908	-91,6	215	07	BRC	07	BRC6	07-BRC6-RT	FRDR2002
V1610000	RT	Le Rhône	13 984				-84,8	185	08	SAB	08	SAB1	08-SAB1-RT	FRDR2002/2003
V1610000	R	Le Rhône	6 491				-70,6	509	08	SAB	08	SAB2	08-SAB2-R	FRDR2003
V1635002	CU	Dérivation de Sault-Brénaz	2 151				-63,8	82	08	SAB	08	SAB3	08-SAB3-CU	FRDR2004
V1610000	RCC	Le Rhône	2 018				-63,6	95	08	SAB	08	SAB4	08-SAB4-RCC	FRDR2004
V1610000	RT	Le Rhône	2 604	27 248	25 230	25 097	-61,6	124	08	SAB	08	SAB5	08-SAB5-RT	FRDR2004
V1610000	RT	Le Rhône	23 948	23 948	23 948	23 948	-59,0	136	09	VUL	09	VUL1	09-VUL1-RT	FRDR2004
V1610000	R	Le Rhône	8 944				-35,5	164	10	ALY	10	ALY1	10-ALY1-R	FRDR2004
V2-0200	A	L'Ain	11 566				-34,5	69	10	ALY	10	ALY2	10-ALY2-A	FRDR484
V3005022	R	Canal de Jonage	5 788				-27,0	102	10	ALY	10	ALY3	10-ALY3-R	FRDR2005
V3005022	CU	Canal de Jonage	15 165				21,6	152	10	ALY	10	ALY4	10-ALY4-CU	FRDR2005
V1610000	RCC	Canal de Miribel	13 934				-26,6	82	10	ALY	10	ALY5	10-ALY5-RCC	FRDR2005A
V1610000	RCC	Canal de Miribel	4 737				-13,0	61	10	ALY	10	ALY6	10-ALY6-RCC	FRDR2005A
V3005051	RCC	Le Vieux Rhone	4 714				-13,0	49	10	ALY	10	ALY7	10-ALY7-RCC	FRDR2005A
V1610000	RT	Le Rhône	2 458	66 906	32 355	34 787	-8,4	201	10	ALY	10	ALY8	10-ALY8-RT	FRDR2005
V1610000	R	Le Rhône	6 836				-6,0	177	11	PBN	11	PBN1	11-PBN1-R	FRDR2005
U-0000	A	La Saône	10 123				0,8	137	11	PBN	11	PBN2	11-PBN2-A	FRDR1807B
V1610000	R	Le Rhône	4 133				0,8	245	11	PBN	11	PBN3	11-PBN3-R	FRDR2006
V30-4002	CU	Dérivation de Pierre Bénite	11 836				3,6	136	11	PBN	11	PBN4	11-PBN4-CU	FRDR2006
V1610000	RCC	Le Rhône	10 515	43 443	22 805	21 484	5,0	133	11	PBN	11	PBN5	11-PBN5-RCC	FRDR2006A
V1610000	R	Le Rhône	18 785	18 785	18 785	18 785	15,3	244	12	VAU	12	VAU1	12-VAU1-R	FRDR2006
V1610000	R	Le Rhône	16 883				33,9	282	13	PDR	13	PDR1	13-PDR1-R	FRDR2006
V3-3002	CU	Dérivation de Péage de Roussillon	11 445				50,5	158	13	PDR	13	PDR2	13-PDR2-CU	FRDR2006
V1610000	RCC	Le Rhône	12 421	40 749	28 328	29 304	51,0	146	13	PDR	13	PDR3	13-PDR3-RCC	FRDR2006B
V1610000	R	Le Rhône	19 060				63,3	366	14	STV	14	STV1	14-STV1-R	FRDR2006
V3625002	CU	Dérivation de Saint Vallier	4 582				82,2	160	14	STV	14	STV2	14-STV2-CU	FRDR2006
V1610000	RCC	Le Rhône	4 506	28 148	23 642	23 566	82,7	147	14	STV	14	STV3	14-STV3-RCC	FRDR2006
V1610000	RT	Le Rhône	3 428				87,2	212	15	BLV	15	BLV1	15-BLV1-RT	FRDR2006
V37-0400	A	Le Doux	4 206				90,4	86	15	BLV	15	BLV2	15-BLV2-A	FRDR452
V1610000	R	Le Rhône	9 133				90,4	300	15	BLV	15	BLV3	15-BLV3-R	FRDR2006
1002	CU	Dérivation de Bourg les Valence	4 093				97,9	141	15	BLV	15	BLV4	15-BLV4-CU	FRDR2006
W-0000	A	L'Isère	13 111				101,9	167	15	BLV	15	BLV5	15-BLV5-A	FRDR312
1002	CU	Dérivation de Bourg les Valence	6 316				101,9	209	15	BLV	15	BLV6	15-BLV6-CU	FRDR2006
V1610000	RCC	Le Rhône	3 638				99,6	128	15	BLV	15	BLV7	15-BLV7-RCC	FRDR2007A
V1610000	RCC	Le Rhône	6 126	50 051	22 970	22 325	102,7	166	15	BLV	15	BLV8	15-BLV8-RCC	FRDR2007A
V1610000	R	Le Rhône	11 222				108,7	313	16	BEA	16	BEA1	16-BEA1-R	FRDR2007
V1610000	RCC	Le Rhône	7 860				119,6	198	16	BEA	16	BEA2	16-BEA2-RCC	FRDR2007B
V4025002	CU	Dérivation de Beauchastel	7 153				119,1	167	16	BEA	16	BEA3	16-BEA3-CU	FRDR2007
V41-0400	A	L'Eynoux	9 667	35 902	18 375	19 082	126,8	72	16	BEA	16	BEA4	16-BEA4-A	FRDR444b
V1610000	R	Le Rhône	4 970				126,8	283	17	BLN	17	BLN1	17-BLN1-R	FRDR2007
V42-0400	A	La Drôme	6 891				131,6	87	17	BLN	17	BLN2	17-BLN2-A	FRDR438a
V1610000	R	Le Rhône	4 046				131,6	297	17	BLN	17	BLN3	17-BLN3-R	FRDR2007
V4300500	A	L'Ouvèze (Ardèche)	1 024				133,9	45	17	BLN	17	BLN4	17-BLN4-A	FRDR1320c
V43-4002	CU	Dérivation de Baix le Logis Neuf	9 585				135,1	219	17	BLN	17	BLN5	17-BLN5-CU	FRDR2007
V1610000	RCC	Le Rhône	8 686	35 202	18 601	17 702	135,7	172	17	BLN	17	BLN6	17-BLN6-RCC	FRDR2007C
V1610000	R	Le Rhône	9 121				143,9	526	18	MON	18	MON1	18-MON1-R	FRDR2007
V4-3002	CU	Dérivation de Montélimar	6 182				151,7	210	18	MON	18	MON2	18-MON2-CU	FRDR2007
V44-0400	A	Le Roubon	1 298				157,9	156	18	MON	18	MON3	18-MON3-A	FRDR428a
V4-3002	CU	Dérivation de Montélimar	8 361				157,9	214	18	MON	18	MON4	18-MON4-CU	FRDR2007
V1610000	RCC	Le Rhône	13 977	38 939	23 664	23 098	152,9	196	18	MON	18	MON5	18-MON5-RCC	FRDR2007D
V1610000	R	Le Rhône	5 405				166,4	308	19	DZM	19	DZM1	19-DZM1-R	FRDR2007
V-2002	CU	Dérivation de Donzère-Mondragon	29 081				169,6	105	19	DZM	19	DZM2	19-DZM2-CU	FRDR2007
V1610000	RCC	Le Rhône	20 648				171,5	168	19	DZM	19	DZM3	19-DZM3-RCC	FRDR2007E
V50-0400	A	L'Ardèche	9 998				191,8	113	19	DZM	19	DZM4	19-DZM4-A	FRDR411b
V1610000	RCC	Le Rhône	9 176	74 308	34 486	35 229	191,8	204	19	DZM	19	DZM5	19-DZM5-RCC	FRDR2007F
V1610000	R	Le Rhône	12 378				200,8	337	20	CAD	20	CAD1	20-CAD1-R	FRDR2007
V5485002	CU	Dérivation de Caderousse	4 654				212,7	194	20	CAD	20	CAD2	20-CAD2-CU	FRDR2007
V1610000	RCC	Le Rhône	5 913				213,1	255	20	CAD	20	CAD3	20-CAD3-RCC	FRDR2007
V54-0400	A	La Cèze	6 516				213,8	49	20	CAD	20	CAD4	20-CAD4-A	FRDR394b
V53-0400	A	L'Agues	15 325	44 786	17 032	18 291	218,0	30	20	CAD	20	CAD5	20-CAD5-A	FRDR401b
V1610000	R	Le Rhône	10 958				218,9	317	21	AVI	21	AVI1	21-AVI1-R	FRDR2008
V6210501	R	Bras de Villeneuve	2 630				232,0	275	21	AVI	21	AVI2	21-AVI2-R	FRDR2008
V6210501	CU	Bras de Villeneuve	7 768				244,2	179	21	AVI	21	AVI3	21-AVI3-CU	FRDR2008
V6210501	RCC	Bras de Villeneuve	3 121				233,1	199	21	AVI	21	AVI4	21-AVI4-RCC	FRDR2008
V1610000	RCC	Le Rhône	3 902				230,7	147	21	AVI	21	AVI5	21-AVI5-RCC	FRDR2008A
V6-0200	A	L'Ouvèze (Drôme)	5 894				234,6	36	21	AVI	21	AVI6	21-AVI6-A	FRDR383
V1610000	RCC	Le Rhône	9 644	43 917	21 356	30 398	234,6	182	21	AVI	21	AVI7	21-AVI7-RCC	FRDR2008A
V1610000	R	Le Rhône	18 124				244,2	447	22	VAL	22	VAL1	22-VAL1-R	FRDR2008
X-0000	A	La Durance	19 230				248,2	217	22	VAL	22	VAL2	22-VAL2-A	FRDR244
V1610000	RCC	Le Rhône	7 142				262,5	225	22	VAL	22	VAL3	22-VAL3-RCC	FRDR2008B

PARTIE B. TRAJECTOIRE HYDROMORPHOLOGIQUE DU RHÔNE



1. Présentation du bassin versant

1.1 Contexte général

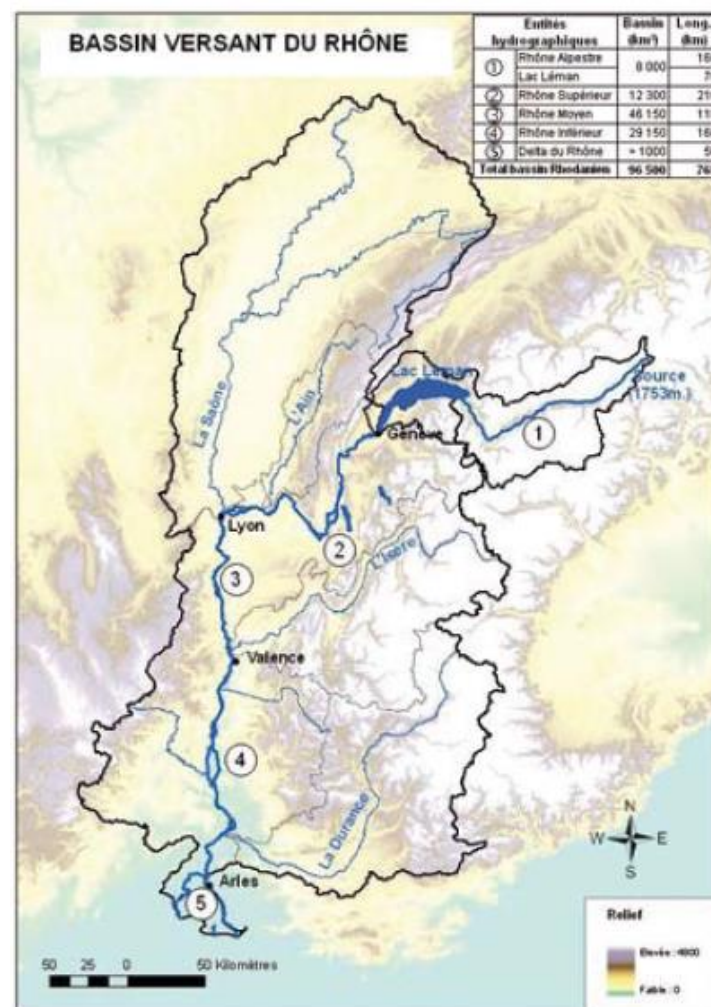
Le Rhône fait partie des grands fleuves européens, avec une longueur totale de plus de 812 km et un bassin versant de 98 000 km². Il prend sa source en Suisse au glacier du Rhône dans le massif des Alpes uranaises.

Dans un premier temps, le Rhône parcourt la Suisse, se jette dans le lac Léman avant d'en sortir à Genève. Il entre ensuite en France, où il parcourt environ 550 km (539 km par les canaux usiniers, 557 km par les Vieux Rhône / §.4.3). Il prend la direction vers l'ouest de la ville de Lyon qu'il traverse et où il reçoit les apports de la Saône son principal affluent, avant de bifurquer vers le sud. Il longe à l'ouest le massif Central et à l'est les collines molassiques flanquées contre les Préalpes.

Il reçoit de nombreux affluents d'origine alpine sur tout son linéaire : l'Arve ; le Fier, le Guiers, l'Isère, la Drôme, l'Aigue, l'Ouvèze provençale, la Durance ; sur l'autre rive, il bénéficie des apports d'affluents du Massif Central, au caractère cévenol : le Doux, l'Eyrieux, l'Ardèche ; la Cèze, le Gardon.

Il termine son cours dans le delta de Camargue après un parcours total d'environ 812 km, pour se jeter dans la mer Méditerranée via deux branches : la branche principale est le Grand Rhône et s'écoule vers l'est ; la branche secondaire est le Petit Rhône et s'écoule vers l'ouest du delta.

Les principales villes arrosées par le fleuve sont, de l'amont vers l'aval, Genève, Lyon, Valence, Avignon et Arles.



Bassin versant du Rhône (© IGN - Paris 2008. Reproduction interdite - Autorisation n°50-8610, © Photothèque CNR).

Figure 8 : Bassin versant du Rhône (d'après le Rhône en 100 questions, 2010)

1.2 Contexte géomorphologique

Le bassin versant du Rhône est remarquable par sa diversité climatique et géologique.

Dans un contexte de piémont alpin, la géomorphologie naturelle du Rhône est particulière : la pente du fleuve entre le lac Léman et la mer ne suit pas une décroissance continue de l'amont vers l'aval. Cette évolution est liée en effet à la présence d'affleurements et de verrous rocheux, et à des charges grossières différenciées apportées par les affluents.

Le Rhône peut être divisé en cinq entités (d'après Le Rhône en 100 questions ; Bravard et al., 2010) :

- **Le Rhône alpestre (ou Rhône suisse) de sa source au Léman**, est un torrent qui parcourt environ 160 km dans une vallée encaissée entre les Alpes Bernoises au Nord et les Alpes Pennines du Valais. Son bassin versant, de 5 220 km² à l'entrée du Léman, est remarquable par son relief élevé et accidenté. Plus de la moitié de la surface drainée se situe au-dessus de 2 100 m d'altitude. La pente moyenne est forte (0,9 % ou 9 m/km).

Le lac Léman est la plus grande masse d'eau douce d'Europe avec un volume de 89 km³. Il s'étend sur 70 km pour une surface de 582 km². Douze années sont nécessaires pour que les eaux du lac se renouvellent complètement. À la sortie du Léman, l'altitude du Rhône est de 370 m et la surface drainée de 8 000 km².

- **Le Haut Rhône français, du Léman à la Saône**, dans un parcours sinueux de 210 km, traverse les massifs du Jura et des Préalpes avant de rejoindre la plaine de l'Ain. Son bassin est de 12 300 km² et sa pente moyenne de 1‰ (1 m/km) passe par des valeurs élevées (3 ‰ à Bellegarde) puis est décroissante jusqu'à la confluence de l'Ain. Sur ce tronçon, le fleuve rencontre une succession de gorges étroites à fortes capacités de charriage (défilés de Bellegarde et de Yenne), et de plaines aux champs d'inondation étendus (marais de Chautagne, de Lavours, lac du Bourget, plaine de Yenne). Ces plaines correspondent à d'anciens surcreusement glaciaires partiellement remblayés après le dernier retrait glaciaire, ce qui a historiquement entraîné une interruption totale du transit des matériaux grossiers et un exhaussement progressif du lit dans ces ombilics, notamment en amont du défilé de Malville, dans l'actuelle retenue de Sault-Brénaz (Figure 9) ;

Le Lac du Bourget, plus grand lac naturel français, draine un bassin de 560 km² et se déverse dans le Rhône par le canal de Savières. Le cours de cet émissaire s'inverse lors des crues du fleuve de sorte que le lac participe ainsi à leur atténuation.

En aval de Sault-Brénaz, le Rhône a creusé son lit dans des terrasses fluvio-glaciaires, se caractérise par une pente modérée (0,3‰) et une faible mobilité latérale du lit. En aval de la confluence de l'Ain, les apports importants en matériaux solides de la rivière ont eu pour conséquence d'accroître très sensiblement la pente du fleuve (0,8‰ à 1‰) et sa mobilité latérale au sein d'un grand espace de régulation constitué par l'actuelle Ile de Miribel Jonage.

- **Le Rhône Moyen, de la Saône à l'Isère**, initie le « Rhône aval », parcourt 110 km et draine un bassin de 46 150 km². À Lyon, le fleuve se heurte à la barrière rocheuse du Massif Central qui l'oblige à modifier la direction de son cours suivant un axe Nord-Sud qu'il ne va plus quitter jusqu'à la mer. Il longe alors le Massif Central et les Préalpes. Dans ce tronçon, la pente moyenne s'abaisse à 0,55‰. L'encaissement de la vallée et les faibles apports en matériaux grossiers (la Saône n'amène que des sables et une partie seulement des flux de l'Ain franchissait Lyon) ont limité la mobilité naturelle du lit sur ce secteur. Le Rhône, relativement rectiligne entre Lyon et Andance, devenait localement plus divaguant dans des secteurs de remplissage alluvionnaire comme Péage-de-Roussillon (cf. Carte 3 ; Figure 10) ;

- **Le Rhône Inférieur ou Bas Rhône, entre l'Isère et Beaucaire**, draine un bassin de 29 150 km² soumis au climat méditerranéen. Son cours, long de 160 km, est une suite de défilés et de plaines alluviales qui respecte l'axe d'écoulement rectiligne Nord- Sud imposé par les massifs qui l'encadrent. La confluence avec l'Ardèche marque une transition dans ce secteur. La pente moyenne est de 0,6‰.

En amont de l'Ardèche, ce secteur se caractérise par une pente plus forte (localement supérieure à 0,8 ‰) associée à de fréquents affleurements rocheux. Le fleuve recevait des apports en matériaux grossiers de la Drôme et des affluents cévenols. Le fleuve présentait, avant les premiers aménagements pour la navigation, une morphologie de lit en tresses sur de nombreux secteurs, notamment au confluent de la Drôme, et en aval du défilé de Donzère (cf. Carte 3 ; Figure 10) ;

En aval de l'Ardèche, la pente du fleuve commence à décroître sensiblement. Ce secteur a été affecté par la remontée du niveau marin après le maximum glaciaire, qui a contribué au réalluvionnement de la basse vallée. Le fleuve divaguait alors librement et développait un lit à bras multiples. Les apports importants en matériaux solides provenant de la Durance et du Rhône se sont progressivement déposés, la Durance constituant un cône de déjection qui favorisaient les divagations du Rhône en amont d'Avignon (cf. Carte 3 ; Figure 10) ;

- **Le Delta du Rhône** commence en aval de Beaucaire. A hauteur d'Arles, le fleuve se sépare en deux bras qui enserrant la plaine de la Camargue. Le Petit Rhône, de direction Sud- Ouest, rejoint la Méditerranée 40 km plus loin dans le golfe de Beauduc. Le Grand Rhône s'oriente au Sud-Est pour déboucher dans la mer près de Fos.

Le delta résulte de la remontée du niveau marin au cours de l'holocène (depuis 10 000 BP) et de dépôts alluviaux déposés sur une nappe caillouteuse pléistocène (périodes glaciaires), formée de gros galets. Le profil en long du Rhône – et de ses deux Bras (Petit Rhône et Grand Rhône) – s'est ajusté : sa pente naturelle en étiage tombe à moins de 0,1 ‰ en aval d'Arles. Les différents bras évoluaient par avulsions (création d'un nouveau lit par déversement latéral), avant les premiers aménagements anthropiques du Moyen Age. Les débouchés en mer – les graus – n'ont cessé de prograder vers le littoral.

En Méditerranée, le delta du Rhône est par sa superficie (1 500 km²) en deuxième position derrière le delta du Nil, 15 fois plus vaste (24 000 km²).

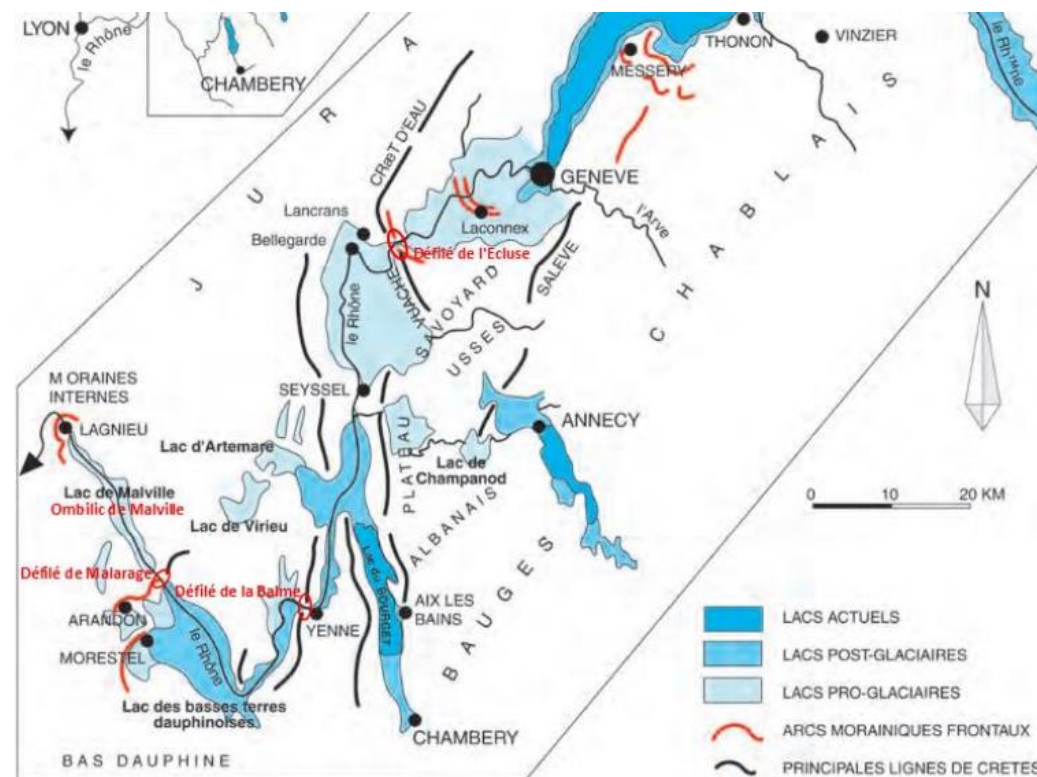


Figure 9 : Succession d'ombilics glaciaires sur le Haut-Rhône (in EKIUM, 2014)

La Carte 3 synthétise les anciens tracés du Rhône et de ses différents bras au cours des âges. Cette information peut se traduire également sous forme d'un profil en long de la largeur de plaine et de la largeur de la bande active en 1860 (cf. Figure 10).

Les travaux de Bravard (2005) ont montré que le style fluvial et la largeur active du lit du Rhône ont évolué au cours du temps comme le montre la Figure 11 pour la période -1000 à 2000, avec des phases de style fluvial en tresses et des phases de style fluvial méandrique. Le Petit Age Glaciaire (PAG) est connu pour avoir résulté

d'une période climatique froide du 15^{ème} siècle à la fin du 19^{ème} siècle. Il succède à l'optimum climatique médiéval (OCM), période plus chaude. Ce Petit Age Glaciaire se caractérise par des périodes d'avancées puis de maximums successifs des glaciers, auxquelles correspondent plusieurs minimums de températures moyennes très nets. Pendant cette période, la production sédimentaire des cours d'eau a été exacerbée par les phénomènes d'érosion et de transport dans les cours d'eau dont les crues ont été marquées, notamment au 18 et 19^{ème} siècle (Cœur, 2008). Leur style fluvial a évolué vers des lits en tresses très actifs. Pour le Rhône, des évolutions du style fluvial ont résulté de vagues d'apports sédimentaires de la part des affluents, sans toutefois qu'une continuité de style fluvial puisse être observée sur l'ensemble du linéaire. L'absence de continuité du charriage sur le Haut-Rhône montre qu'il restait des secteurs de discontinuité pour les fractions les plus grossières (graviers, galets) du transport solide. Des secteurs comme l'île de Miribel Jonage, les îles de la Platières à Péage de Roussillon, les îles d'Avignon, etc. constituaient des zones de régulation du transport solide qui tamponnaient les flux venant de l'amont.

Aussi, ce contexte géomorphologique global démontre la difficulté de définir par la suite de l'étude un état de référence figé pour le fleuve Rhône. Par la suite, l'état actuel pourra être comparé à une situation antérieure – on fera notamment référence à une situation « avant aménagements » - mais il sera nécessaire de relativiser cette situation par rapport aux évolutions naturelles qui se sont produites au cours du temps.

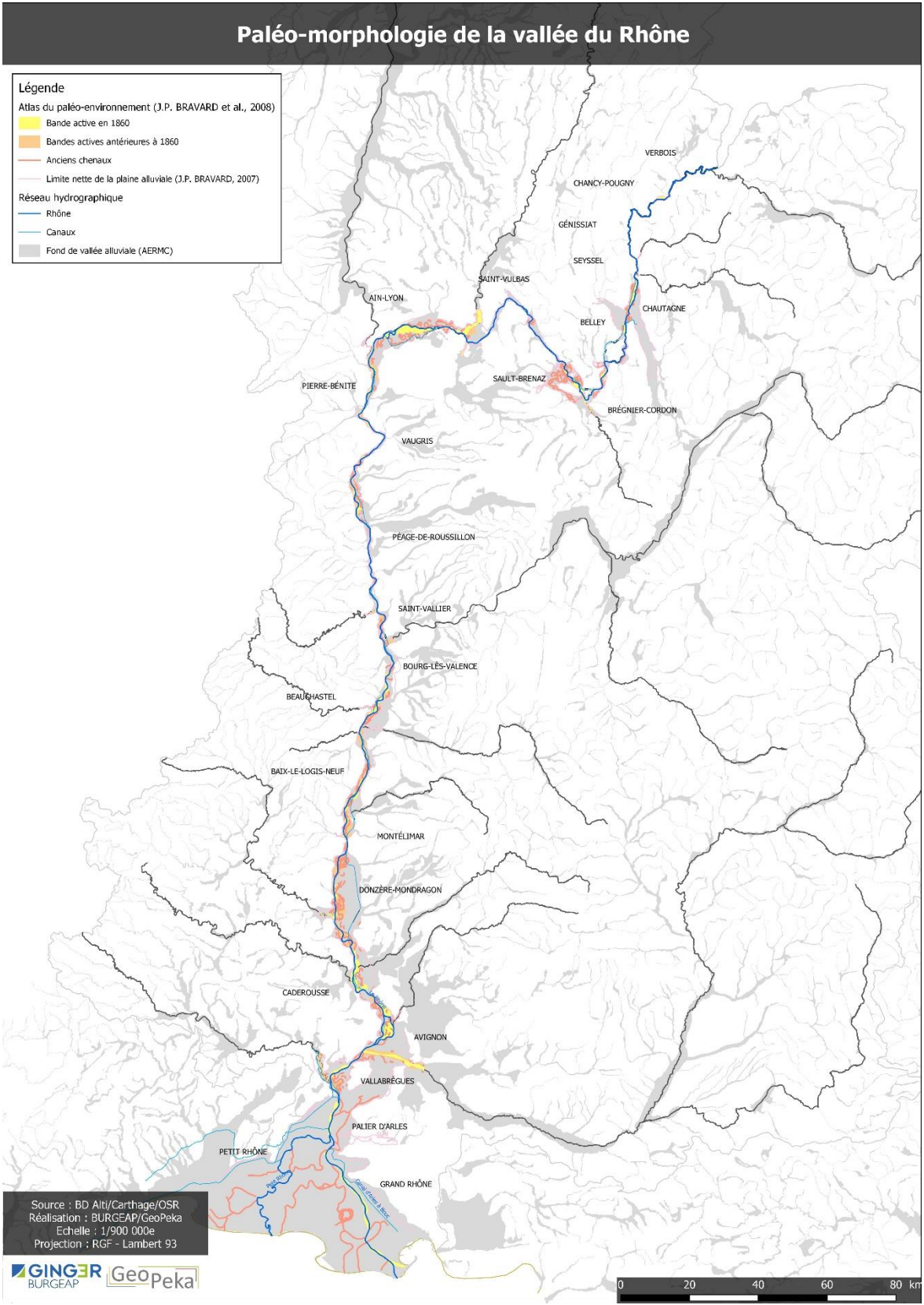
1.3 Contexte des principaux affluents

La PARTIE A / §.3.6 a permis de catégoriser les affluents selon une terminologie qui sera reprise dans la suite de la PARTIE B.

Une cartographie des affluents est proposée avec la Carte 1.

Ces affluents ont des caractéristiques géomorphologiques très différentes, à l'image des 18 affluents majeurs regroupés selon leurs caractéristiques :

- L'Arve, premier affluent alpestre en aval du Léman, draine les eaux du Mont Blanc et de terrains de nature variée ;
- Les Usses, le Fier, le Guiers ont des bassins montagneux essentiellement perméables mais dont les fortes pentes favorisent le ruissellement ;
- L'Ain, affluent jurassien, est le principal tributaire du Haut Rhône. Il prend sa source à 700 m d'altitude en Franche-Comté, et draine sur 195 km la partie occidentale du Jura méridional. Son bassin montagneux (3 750 km²) est soumis aux pluies océaniques. La pente moyenne du lit est de 0,2 ‰.
- La Saône, longue de 480 km, est la première rivière de France par la superficie de son bassin versant, de près de 30 000 km². Elle draine le revers sud-ouest des Vosges et les plateaux jurassiens, à l'ouest le rebord oriental du Massif Central, enfin la plaine bressane dans sa partie centrale. La pente moyenne du lit est faible (0,02 ‰).
- L'Isère, affluent alpestre de la rive gauche, prend sa source à 2 990 m d'altitude et draine sur 11 800 km² les hauts reliefs des Alpes, des Préalpes et du sillon alpin. Elle rejoint le Rhône au Nord de Valence après avoir parcouru 290 km.
- Le Doux, l'Eyrieux, l'Ouvèze Ardéchoise, l'Ardèche, la Cèze et le Gardon drainent les bassins accidentés du rebord oriental du Massif Central, aux roches dures et imperméables. Par leur orientation et leur hauteur, les Cévennes font écran aux pluies méditerranéennes à l'origine des crues cévenoles violentes. Leur apport en eaux est négligeable, excepté en crue.
- La Drôme, le Roubion, l'Aigue et l'Ouvèze provençale sont des affluents préalpins méridionaux qui descendent des Préalpes du Sud et sont soumis aux pluies méditerranéennes. Ils drainent des terrains moins imperméables et aux reliefs plus modérés que ceux des Cévennes.
- La Durance longue de 305 km, affluent préalpin, draine un bassin montagneux de 14 300 km² soumis au climat méditerranéen. La pente moyenne du lit est forte (0,6 ‰).



Carte 3 : Paléo-morphologie de la vallée du Rhône (d'après Bravard et al., 2008)

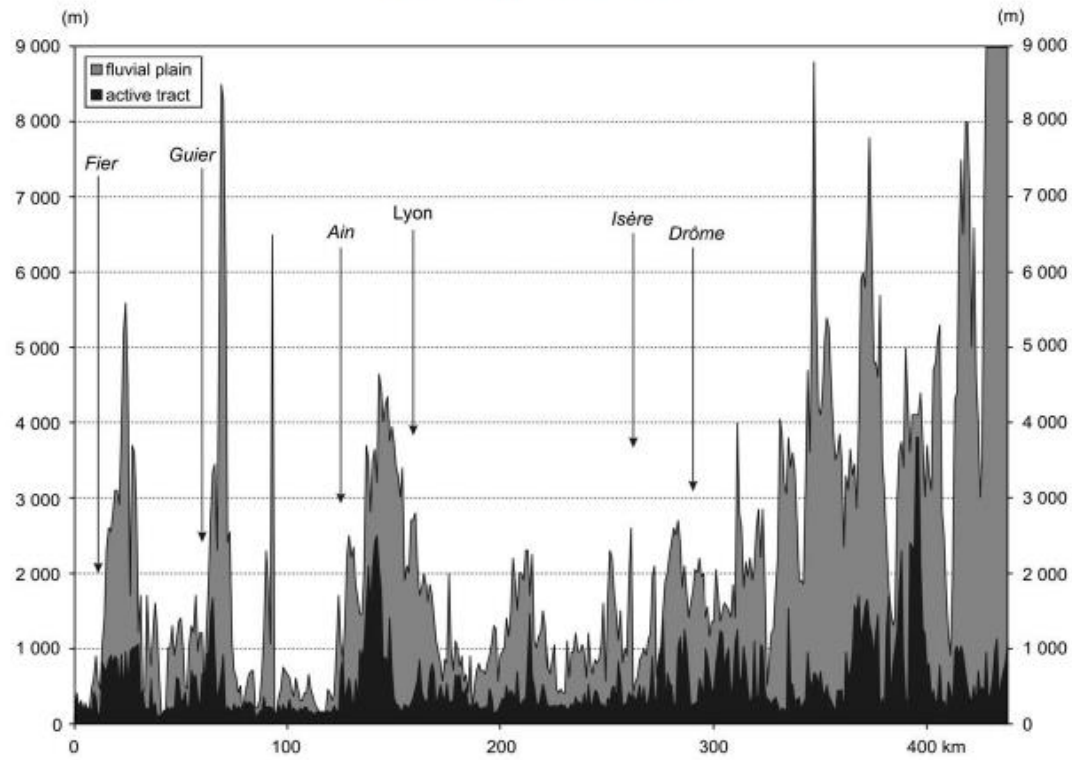


Figure 10 : Profil en long des largeurs de plaine et de bande active en 1860 (source : Bravard, 2009)

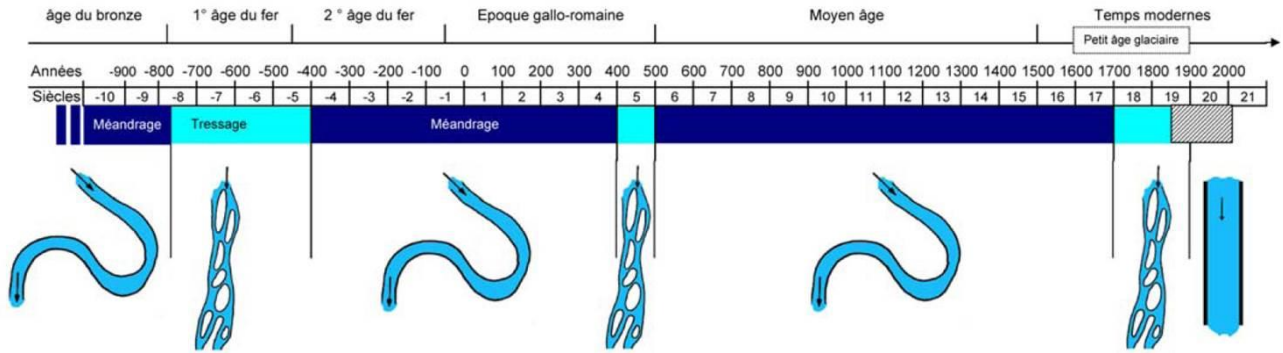


Figure 11 : Phases d'évolution du style fluvial du Rhône depuis l'Age du Bronze (Bravard, 2005)

2. Histoire du fleuve et évolutions géomorphologiques récentes

Le Rhône est un fleuve lourdement aménagé. L'ensemble de son linéaire peut être considéré comme un cours d'eau à haut niveau d'anthropisation. Son rôle d'axe de communication et surtout de transport de marchandises a été le facteur premier de son aménagement.

Dès la seconde moitié du 19^{ème} siècle, d'importants travaux de rectification et de chenalisation ont été entrepris en vue d'améliorer les conditions de navigation pour les navires à vapeur. Par la suite, ce sont les besoins en énergie qui ont impliqué « l'électrification du fleuve ». Ainsi, l'utilisation du fleuve a induit des vagues successives d'aménagement qui sont venues modifier son état éco-morphologique.

Ces interventions ont eu de profondes incidences sur son fonctionnement hydrosédimentaire, dont l'état « naturel », dans une situation « avant aménagement », qu'il est aujourd'hui difficile de restituer avec précision. Toutefois, plusieurs sources de données sont utiles pour comprendre l'état de Rhône à la veille de ses grands cycles d'aménagement.

2.1 Une base de connaissances très riche qui s'étoffe depuis le début du 20^e.s

L'histoire géomorphologique récente du Rhône a été documentée avec précision grâce aux projets d'aménagement du fleuve.

Avant le début du 19^{ème} siècle, des cartographies du fleuve existent, à l'image de l'atlas de Grandvoinet (1780-1784) qui servit à identifier les propriétaires pour lever l'impôt. En revanche, elles ne sont ni suffisamment précises pour en tirer des analyses autres que qualitatives, ni exhaustives permettant une étude à l'échelle du corridor.

La première cartographie portant sur l'ensemble du fleuve est un atlas de 1830, son objectif était d'identifier les digues à construire pour améliorer la navigation (Talaska, 2014). Sa précision géographique ne permet toutefois pas de le géoréférencer. En revanche, l'Administration des Ponts et Chaussées, avec l'affinement de son projet de rectification du fleuve, va finir par produire plusieurs séries d'atlas et de grandes quantités d'informations topo-bathymétriques. Le premier de ces atlas, souvent pris comme étant de référence d'un fleuve avant ses grands aménagements date de 1860. Avec l'avancement des travaux qui se sont déroulées sur plus d'un demi-siècle, plusieurs autres cartographies seront établies :

- L'atlas de 1860 ;
- L'atlas des Ponts et Chaussées, dit de 1891 ;
- Les atlas des Ponts et Chaussées, dit Bathymétrique de 1902 et 1922 ;
- Les plans Branciard, dit de 1910 ;
- Les plans avant travaux de la CNR qui ont été levés avant la construction des barrages.

Dans son travail d'analyse historique, Cœur (ACTHYS, 2017) a identifié de nouvelles planches topo-bathymétriques qui n'ont pas été exploitées à ce jour et qui ne sont pas répertoriées sur la Figure 12 (comm. pers. S.Reynaud, CNR).

A partir la mise en concession du fleuve, la connaissance de l'état des fonds sera déléguée à la CNR qui réalise régulièrement (en moyenne tous les 5 ans) des campagnes bathymétriques sur l'ensemble du domaine concédé.

Plus récemment, la CNR s'est équipée d'un bateau hydrographique, le « Frédéric Mistral », qui explore le fond du Rhône qui sont navigables (cf. Figure 13). Quatre vedettes hydrographiques complètent les données pour les zones non navigables. L'objectif est de vérifier que le chenal navigable offre un mouillage suffisant. Les levés sont réalisés sous forme de profils de travers et depuis quelques années sous forme de bathymétrie 3D (cf. Figure 14).

D'après les analyses menées en Mission 5, les levés qu'assure la CNR sur le Rhône sont parmi les plus fournis parmi les grands cours d'eau européens.

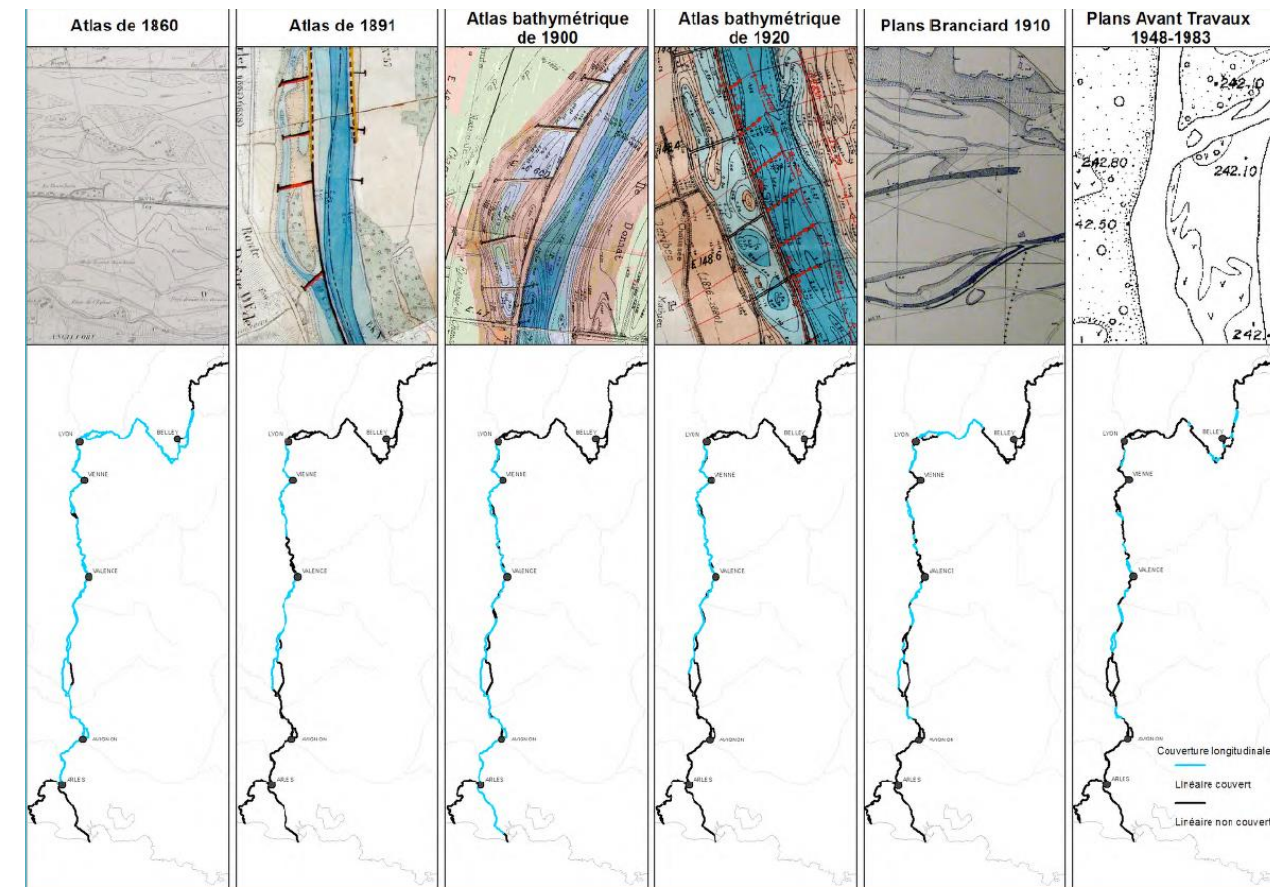


Figure 12 : Documents topo-bathymétriques historiques disponibles sur le Rhône (Talaska, 2014)



Figure 13 : Le bateau hydrographique « Frédéric Mistral » (CNR)

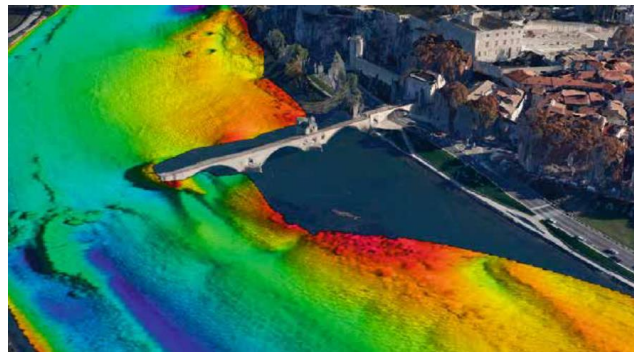


Figure 14 : Exemple de bathymétrie 3D sur le bras d'Avignon (CNR)

2.2 Premières approches globales du fleuve

Les études du fleuve Rhône qui portent sur l'ensemble du corridor sont relativement rares. La première, qui dresse un bilan du fonctionnement hydrologique du Rhône est l'œuvre pionnière de Maurice Pardé, « Le Régime du Rhône », publié en 1925.

Puis, il faudra attendre 75 ans, pour qu'émerge à nouveau des réflexions globales à l'échelle du fleuve. C'est le cas avec la réflexion sur la restauration écologique sur le Rhône qui a pris racine dans la mobilisation conjointe des scientifiques et des militants écologistes face à la deuxième vague d'équipements hydroélectriques, consécutive au second choc pétrolier (Roux, 2014).

Le Programme Interdisciplinaire de Recherche en Environnement (PIREN) Rhône est lancé en 1979 et va permettre l'analyse des dynamiques du Rhône à la lumière des concepts de l'hydrosystème. Ces préceptes vont trouver une traduction opérationnelle dans le Plan d'action Rhône de 1992 de l'Agence de l'Eau RMC, dans le SDAGE de 1996, puis dans le programme décennal de restauration hydraulique et écologique du Rhône initié en 1998.

Parallèlement à ces travaux scientifiques et suite aux crues de 1994-1995, la CNR commande auprès de plusieurs bureaux d'étude (SOGREAH, SAFEGE) une étude d'envergure sur les fonctionnements hydrologiques, hydrauliques et géomorphologiques du fleuve. Il s'agit de l'Etude Globale du Rhône, ou EGR, diffusées en 2000, et qui fait encore référence aujourd'hui sur de nombreux aspects.

Les travaux des scientifiques, quant à eux, seront progressivement capitalisés dans ces différents programmes de recherche (RhônEco, Observatoire des Sédiments du Rhône, Observatoire Homme/Milieus de la Vallée du Rhône) qui fonctionnent aujourd'hui en routine. Cette dynamique scientifique, structurée par la Zone Atelier Rhône (ZABR), outil pluridisciplinaire de l'Institut Environnement Écologie (INEE) du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), font du Rhône un laboratoire grandeur nature de la restauration physique des milieux alluviaux.

2.3 État morphologique « avant aménagements »

Au l'aube du 19^{ème} siècle Rhône n'a pas encore subi, ou très faiblement et très ponctuellement, les effets des interventions humaines visant à en exploiter ou contrôler ses eaux, mais aussi celles de ses affluents. Cette période peut être considérée comme caractéristique d'une situation « avant aménagements » sans toutefois qu'il soit possible de la qualifier strictement d'« état de référence » compte tenu des évolutions naturelles antérieures (cf. §.1).

Le fleuve a alors un régime liquide et solide non perturbé par les barrages. Les aménagements latéraux (digues) restent locaux et plutôt situés en lit majeur (digues paysannes) et les extractions de matériaux, qui deviendront massives après la seconde Guerre Mondiale, n'ont pas encore débutées.

Le tracé en plan du fleuve est alors relativement libre de toute contrainte autre que les zones de resserrement naturellement liées au relief de l'encaissant. Le transport solide peut migrer librement d'amont en aval et se déposer à la faveur des secteurs de remplissage structuraux ou de rupture de pente locale comme décrit dans le contexte géomorphologique (cf. §.1).

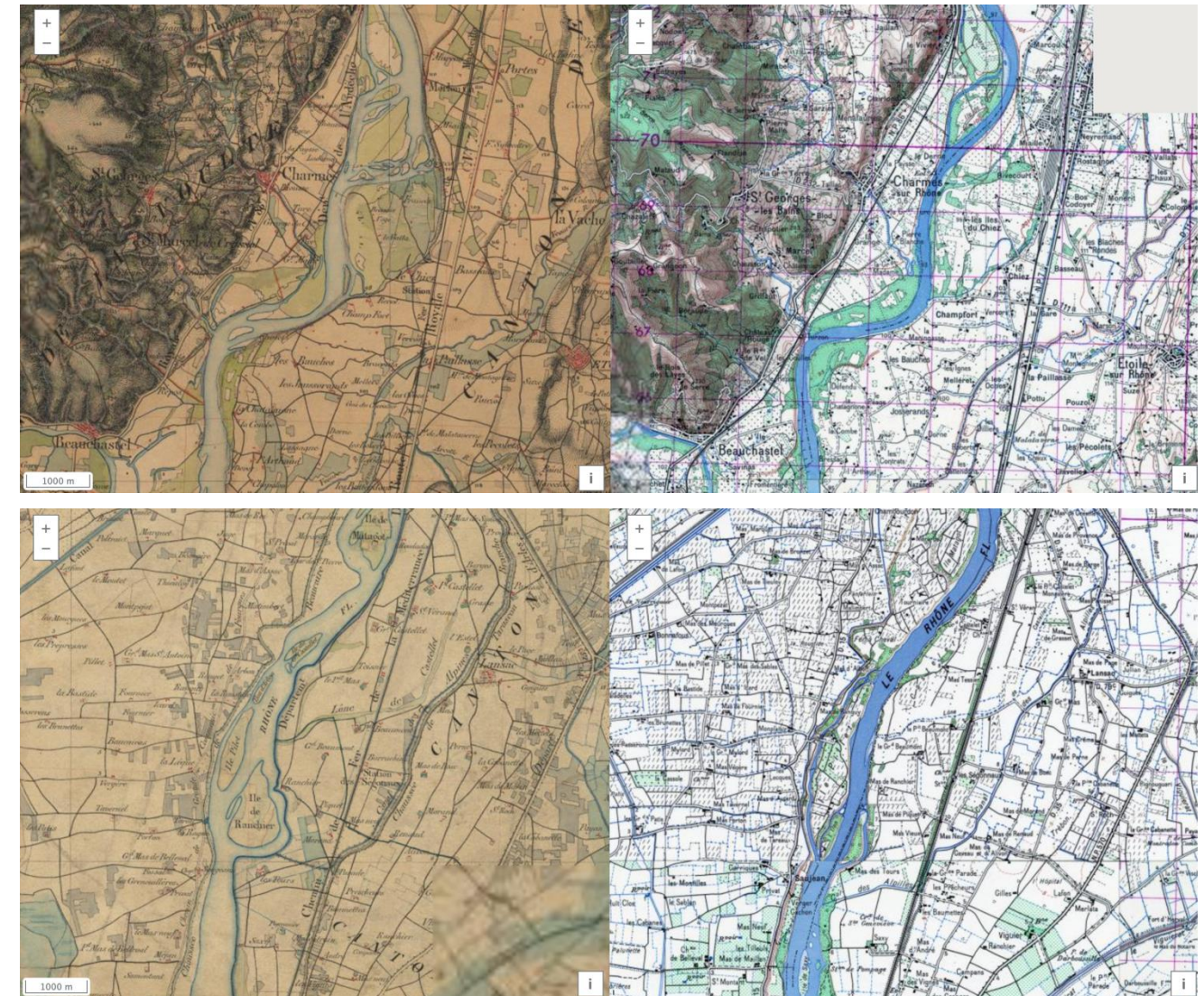


Figure 15 : Exemples de zone de régulation du transport solide au niveau de Charmes sur Rhône (en haut) et aval de Beaucaire (en bas). A droite carte d'Etat-Major (milieux du 19^{ème} siècle ; à gauche la carte topographique des années 1950/60 qui montre les effets de travaux de rectification (Source : Géoportail IGN)

S'il est très difficile de savoir à quel point ces secteurs d'importante activité sédimentaire sont uniquement des reliquats du changement de style fluvial induit par le Petit Age Glaciaire, il est certain que d'autres portions du fleuve présentaient un fonctionnement moins dynamique. C'est le cas des zones où le tarissement de la charge de fond survenait soit par réduction des apports amont : comme c'est le cas du Rhône en amont de la confluence avec l'Ain, après le passage des ombilics glaciaires du Haut Rhône. C'est aussi le cas à l'aval de Lyon après le passage de la plaine de tressage de Miribel-Jonage. Le déséquilibre des apports solides/liquides avec l'arrivée de la Saône et la situation encaissée de la vallée renforcent le tarissement et la baisse d'activité morphologique du fleuve jusqu'à Tournon-sur-Rhône (à l'exception locale de la plaine de Péage-de-Roussillon).

Ailleurs, quand les apports sédimentaires devenaient trop intenses pour la puissance d'évacuation du fleuve, de véritables zones de tressage apparaissaient. Les deux exemples les plus emblématiques car étudiés dans le détail par différentes études sont la plaine de Chautagne et le tronçon de Miribel Jonage à l'aval de la confluence de l'Ain, mais les secteurs considérés comme ayant été en tresses représentaient une grande partie du linéaire du Rhône amont, en amont de la confluence avec le Guiers, et sur le Rhône aval à partir de la confluence avec la Drôme (cf. Figure 17).



Figure 16 : Illustration du tracé en plan du Rhône dans la plaine de Miribel-Jonage en 1860 (Source SEGAPAL)

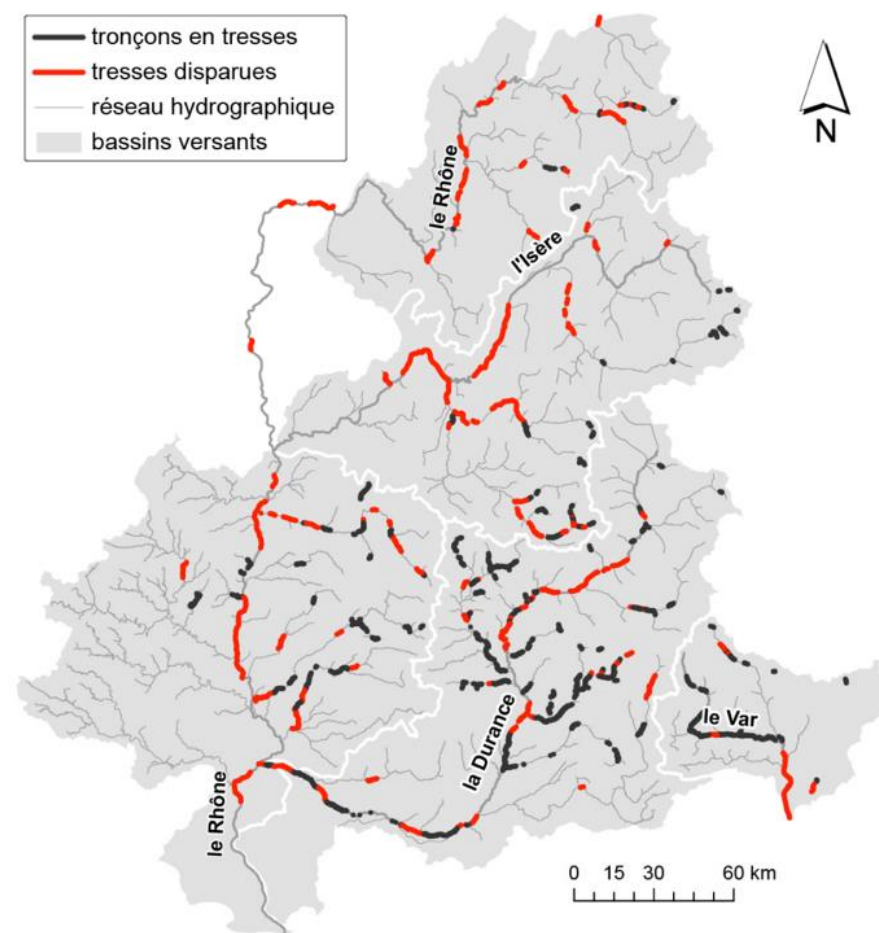


Figure 17 : Localisation des tronçons en tresse actuels et disparus sur une partie du bassin du Rhône (Source : AERMC, 2019)

2.4 Historique des pressions sur le milieu alluvial

Le Rhône, comme beaucoup de grands fleuves, a fait l'objet au cours des deux derniers siècles de nombreux aménagements qui ont assez lourdement modifié son fonctionnement hydrosédimentaire. Les grands types d'aménagement sont : l'endiguement, la chenalisation, les extractions de sédiments, la création de barrages et de seuils, ainsi que l'aménagement du territoire pour l'agriculture et l'urbanisation.

Dans le même temps, ses propres affluents ont été aménagés également avec les mêmes types d'aménagement et pour les mêmes objectifs : navigation, hydroélectricité, fourniture en granulats, développement des territoires. Les affluents les plus concernés sont notamment, d'amont en aval : l'Arve (barrages, extractions), le Fier (barrages, extractions), l'Ain (grands barrages), la Saône (navigation), l'Isère (grands barrages, endiguements, extractions), l'Ardèche (extractions), la Durance (grands barrages, endiguements, extractions), le Gardon (extractions). L'historique d'aménagement d'affluents n'est pas développé dans les parties qui suivent ; il est synthétisé dans les fiches UHC.

Si les premiers ouvrages n'ont perturbé le fonctionnement écologique qu'à la marge, les travaux systématiques d'aménagement de la voie fluviale, réalisés à la fin du 19^{ème} siècle et au début du 20^{ème} siècle ont été les premiers à modifier les flux d'eau et de sédiments, et les formes qui en résultent. Dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle, l'industrialisation de la voie fluviale et l'aménagement hydroélectrique associé sont venus renforcer cette anthropisation de l'hydrosystème fluvial.

2.4.1 Avant le 19^{ème} siècle : les premiers aménagements de digues paysannes et du delta

Les premiers aménagements de l'espace alluvial du Rhône n'ont eu que des impacts ponctuels en raison de leurs faibles emprises spatiales et densité, ainsi que des moyens techniques disponibles à l'époque pour leur réalisation. Toutefois, les aménagements du delta, réalisés dès le Moyen-Age, ont modifié durablement la morphologie du Rhône.

Sur l'essentiel du linéaire du Rhône, les aménagements avant le 19^{ème} siècle se limitent à des ouvrages de franchissement et des digues longitudinales ou transversales qui ont pour vocation de contenir les débordements d'un fleuve impétueux. Ce linéaire de digues, nommées « digues paysannes » ou « chaussées en terre » est estimé à une centaine de km vers 1860 et à 300 km en 1880. Cette augmentation est due aux aménagements qui ont été déclenché par de fortes crues, notamment la grande crue de 1856.

Le long de l'axe Rhône, ces systèmes de protection sont plus importants, plus proches du l'imit mineur et mieux structurés sur le Bas-Rhône et en particulier en Camargue qui a vu les premiers aménagements débuter dès le Moyen-Age.



Figure 18 : Ancienne digue paysanne dans la plaine de Péage de Roussillon (13-PDR) qui supporte aujourd'hui la RD4 entre Sablons et Salaise (Google)

En effet, en Camargue, les premiers aménagements sont rapportés dès les 11-12^{ème} siècles. Les premiers aménagements de la Camargue étaient motivés par une volonté de protection contre les crues. Ces besoins ont pris de plus en plus d'importance avec l'émergence du Petit Age Glaciaire, et afin de limiter l'encombrement des graus (embouchures en mer d'un bras du Rhône).

Progressivement, le tracé le plus oriental du Rhône a été privilégié lors des endiguements successifs (achevés en 1869) et des fermetures de défluviations : Rhône de St-Ferréol à partir du 13^{ème} siècle, Rhône d'Ulmet au 15^{ème} siècle, Rhône du Grand Passon (Moyen-Âge), Rhône de Bras de Fer (fonctionnel de 1586 à 1711), pour aboutir au Grand Rhône actuel en 1711 (cf. Figure 19).

Côté littoral, la Digue à la Mer créée en 1856-1859 eut pour effet de supprimer les incursions des eaux de tempêtes marines dans le delta inférieur.

Ainsi, avant tout aménagement pour la navigation ou l'hydroélectricité (aménagements Girardon, aménagements CNR), le Rhône bénéficiait d'endiguements sur une grande partie de son lit mineur / lit moyen, notamment dans le bas Rhône, et de façon continue en aval de Beaucaire.

Cette succession d'aménagements explique pourquoi plusieurs linéaires, notamment dans le Bas Rhône et en Camargue (Palier d'Arles, Grand Rhône), possèdent une superposition de digues en haut de berge, en limite de lit mineur, et d'endiguements Girardon au sein de ce lit mineur (cf. Figure 20).

Inversement, certains linéaires du Rhône n'ont pas bénéficié d'aménagements Girardon, notamment sur le Haut-Rhône (cf. Figure 24). Les digues qui contrôlent l'espace de divagation historique du Rhône sont alors d'anciennes digues paysannes (cas des endiguements larges de l'UHC#05-CHA de Chautagne ou de la plaine de Bouchage et de Brangues dans l'UHC#07-BRC de Brégnier-Cordon).

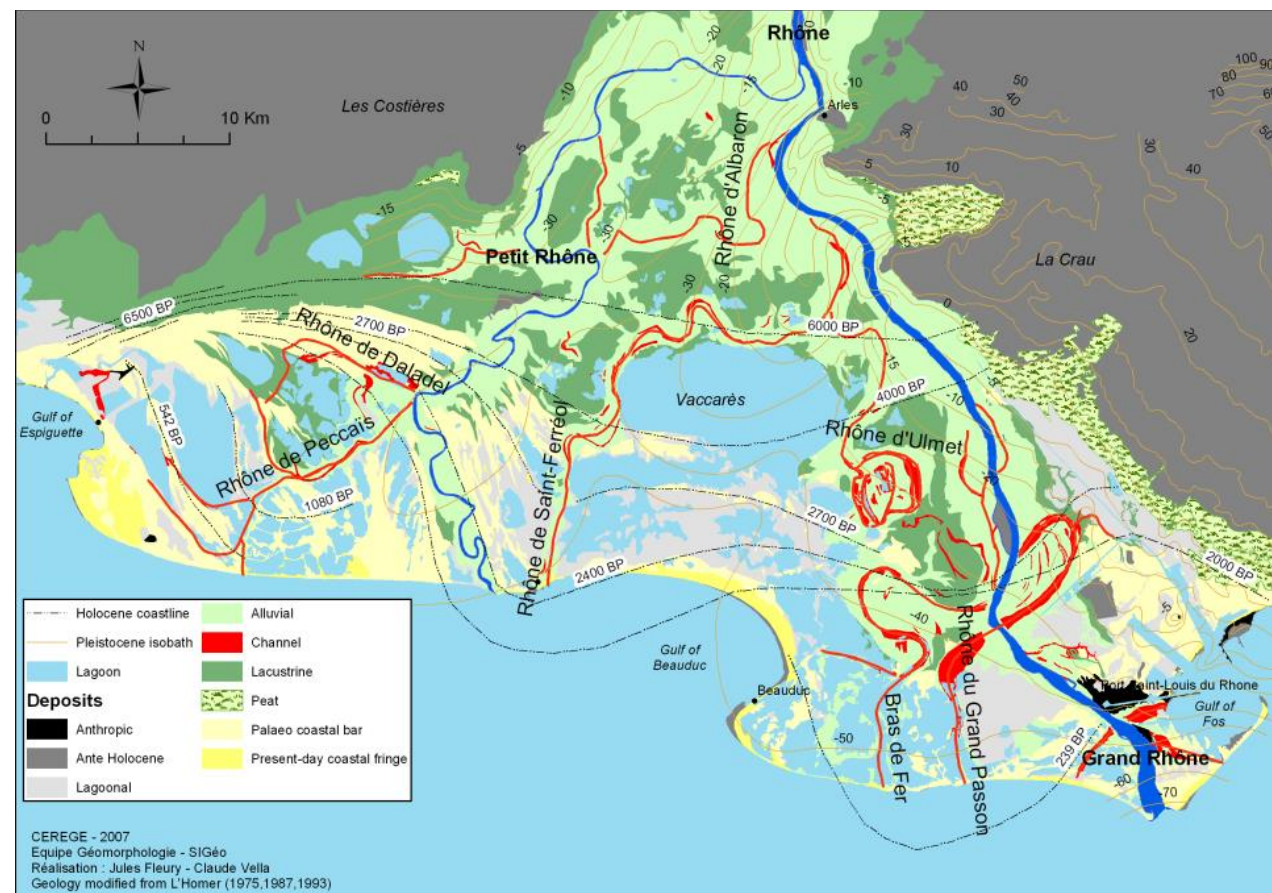


Figure 19 : Géomorphologie du delta et anciens tracés abandonnés (CEREGE, 2007 ; in Raccasi, 2008)

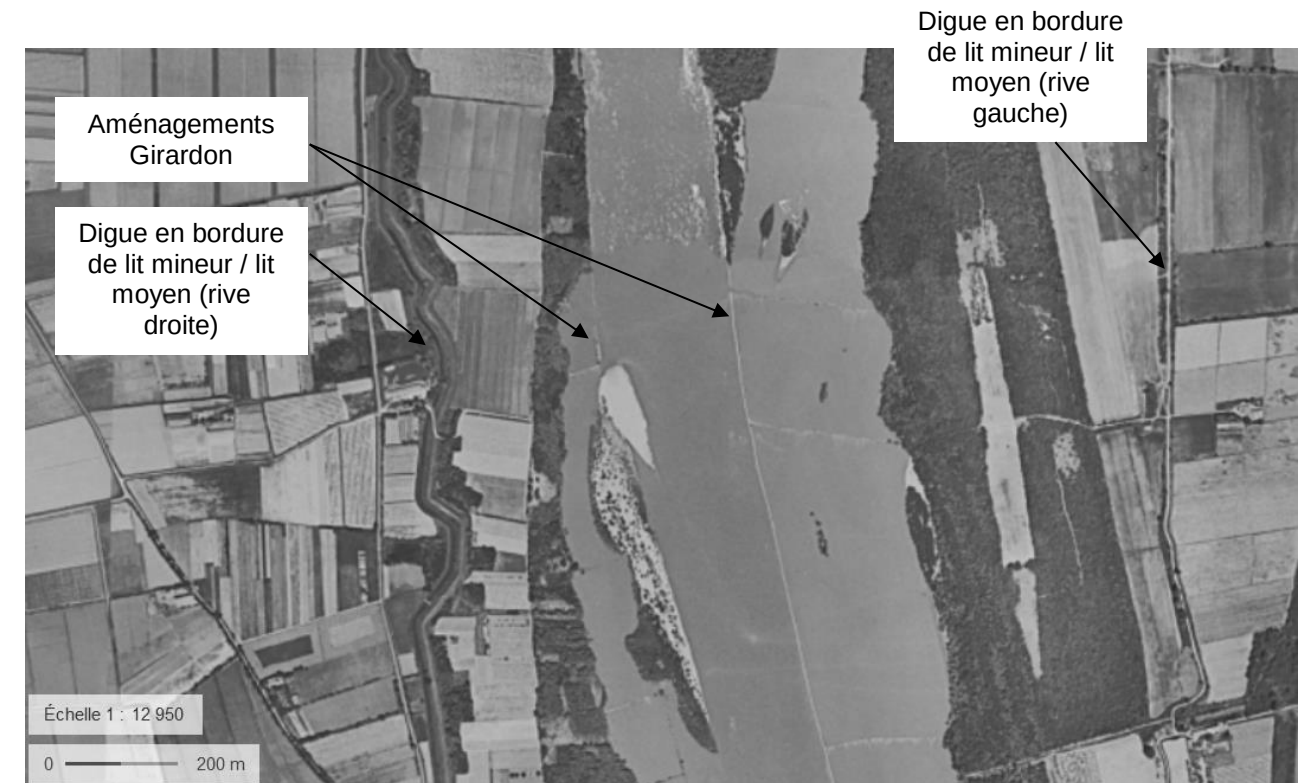


Figure 20 : Aménagements entre Beaucaire et Arles (Palier d'Arles) vers 1960 (Géoportail, IGN)

2.4.2 De 1840 à 1950 : les aménagements de la voie fluviale et premiers barrages

► Les travaux de rectification : l'essor de la navigation à vapeur et la concurrence fleuve/rail

La navigation à vapeur s'est développée à partir de la fin des années 1820 pour définitivement s'imposer vers 1850. Là où, auparavant, 28 jours, 200 hommes et des chevaux étaient nécessaires pour remonter un navire sur le fleuve entre Arles et Lyon, seulement 4 à 5 jours et une douzaine d'hommes suffisaient grâce à la vapeur.

Cependant, ces progrès en matière de navigation furent rapidement concurrencés par le développement des voies ferrées. En 1854 et 1855, les lignes Lyon-Chalon-sur-Saône et Lyon-Avignon sont ouvertes. Dès lors, elles font concurrence à la voie fluviale qui reste handicapée par « les mauvais passages » ne laissant, entre crues et étiages, la navigation possible que six mois par an (environ 170 jours par an). Sous l'impulsion du Ministre ingénieur Freycinet et de sa volonté de moderniser les systèmes d'infrastructure de transport en France, un grand projet d'amélioration de la voie fluviale fut lancé.



Figure 21 : Construction des casiers dits « Girardon » (in ACTHYS, 2017)

Conçu par l'ingénieur principal L. Jacquet, ce projet fut surtout mis en œuvre par H. Girardon à partir 1883.

Le principe de ces aménagements était d'utiliser des épis plongeant pour concentrer les écoulements, en particulier à l'étiage, afin de réduire l'importance des points hauts du fond du lit ou radiers, sans les araser complètement. En effet, le retour d'expérience du Rhin avait montré à l'époque que l'arasement des points hauts pouvait provoquer d'importantes incisions, jusqu'à atteindre le substratum rocheux.

L'objectif était donc d'adoucir les séquences seuils/mouilles de la morphologie initiale à l'aide d'une ligne d'inflexion idéale du tracé en plan (cf. Figure 22). La reprise de ce dernier nécessitait une fixation du lit avec la mise en place de digues basses submersibles dans les concavités, elles-mêmes consolidées par des tenons, le tout formant un système de « casiers ».

En intrados dans la berge convexe, le dispositif était limité en général à des épis plongeants (Figure 23).

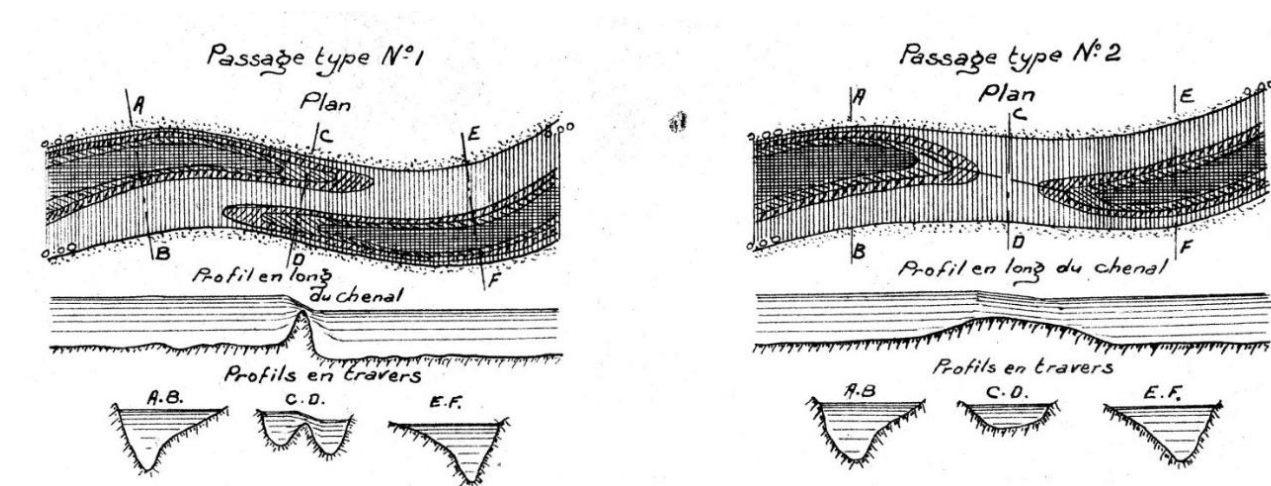


Figure 22 : Schéma type d'un mauvais passage (n°1) et d'un bon passage (n°2) (Girardon, 1894, in CNR, 2016)

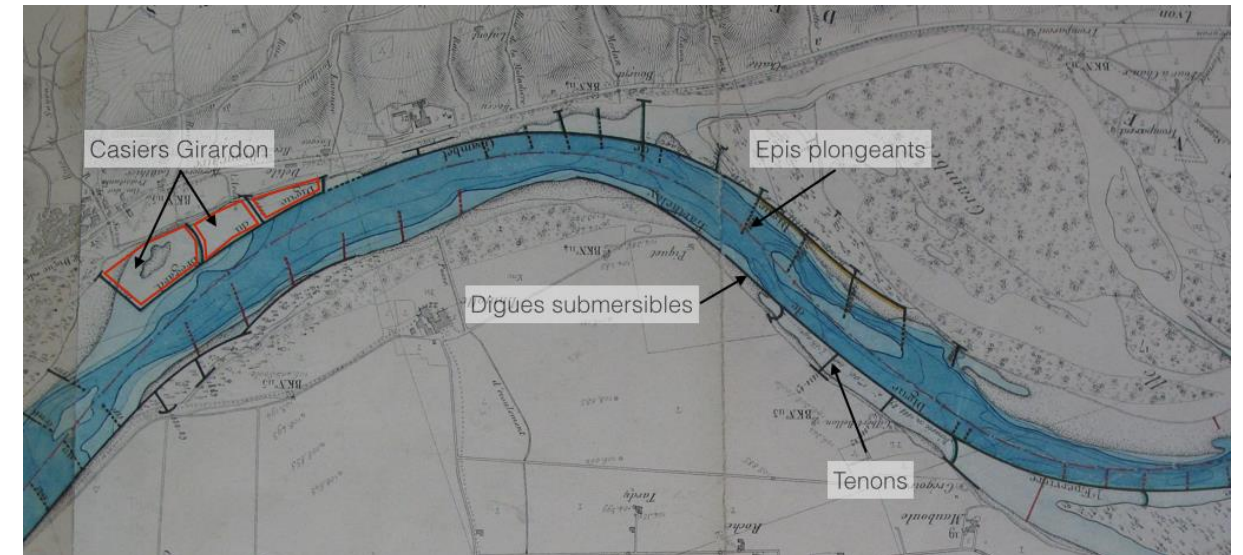


Figure 23 : Les ouvrages de correction fluviales : digues submersibles, épis plongeants, tenons, et casiers « Girardon » (source GeoPeka)

Ces travaux d'amélioration de la voie fluviale furent essentiellement menés entre 1883 et le tout début du 20^{ème} siècle.

En 1891, un atlas est produit par les Ponts et Chaussées. Ce dernier fait état des travaux réalisés, des compléments à prévoir et des aménagements inutiles à déconstruire. Aujourd'hui, leur recensement n'est pas une tâche aisée car bon nombre de ces ouvrages sont recouverts d'une épaisse couche de sédiments fins ou envoyés dans les retenues hydroélectriques. Des cartographies ont toutefois été établies à partir des anciens documents cartographiques, dans le cadre des travaux de l'OSR, notamment par Gaydou (2013) et Téna (2016) ; elles sont reportées sur les cartes B des fiches UHC.

Ce type d'aménagements a été réalisé sur la quasi-totalité du linéaire du fleuve entre Lyon et la Camargue. En revanche, le Haut Rhône n'a été que très peu aménagé, à l'exception du canal de Miribel (PK-8 à -32), du secteur de Brégnier-Cordon (PK-90 à -109) et du linéaire entre marais de Lavours et canal de Savière (PK-128 à -134).

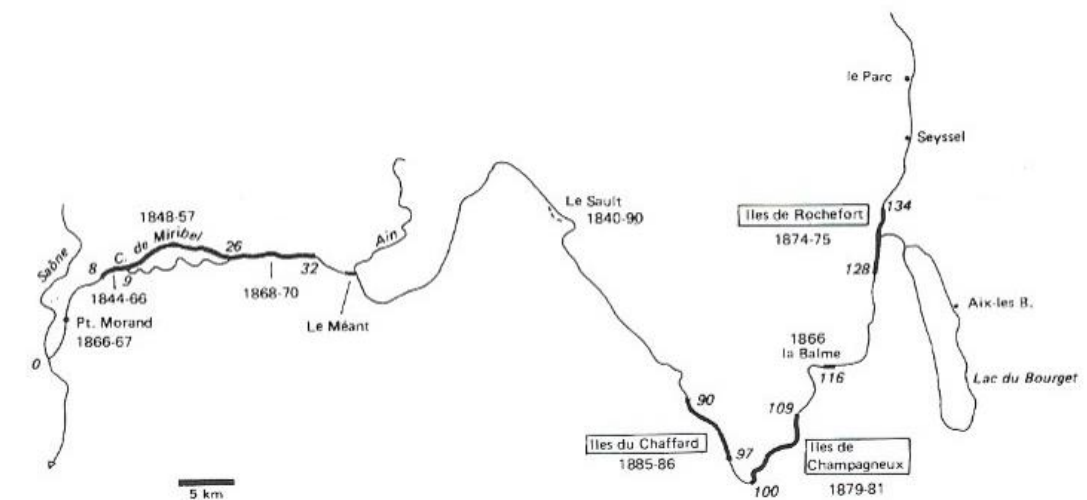


Figure 24 : Localisation des secteurs sur le Haut Rhône ayant fait l'objet de travaux de correction (source Bravard, 2017)

Le but recherché par ces aménagements était de tendre vers 355 jours de navigation possible par an, avec un mouillage de 1,60 m (Gaydou, 2013). Cet objectif fut progressivement atteint sur plusieurs décennies au fur et à mesure que le fleuve s'ajustait morphologiquement aux nouvelles conditions imposées par les ouvrages. En 70 ans, entre 1880 et 1950, ces aménagements ont provoqué, non seulement la suppression des hauts fonds de moins d'1,60 m, mais également la fixation du lit et la disparition des annexes fluviales par concentration des écoulements dans un chenal unique et sédimentation dans ces annexes.

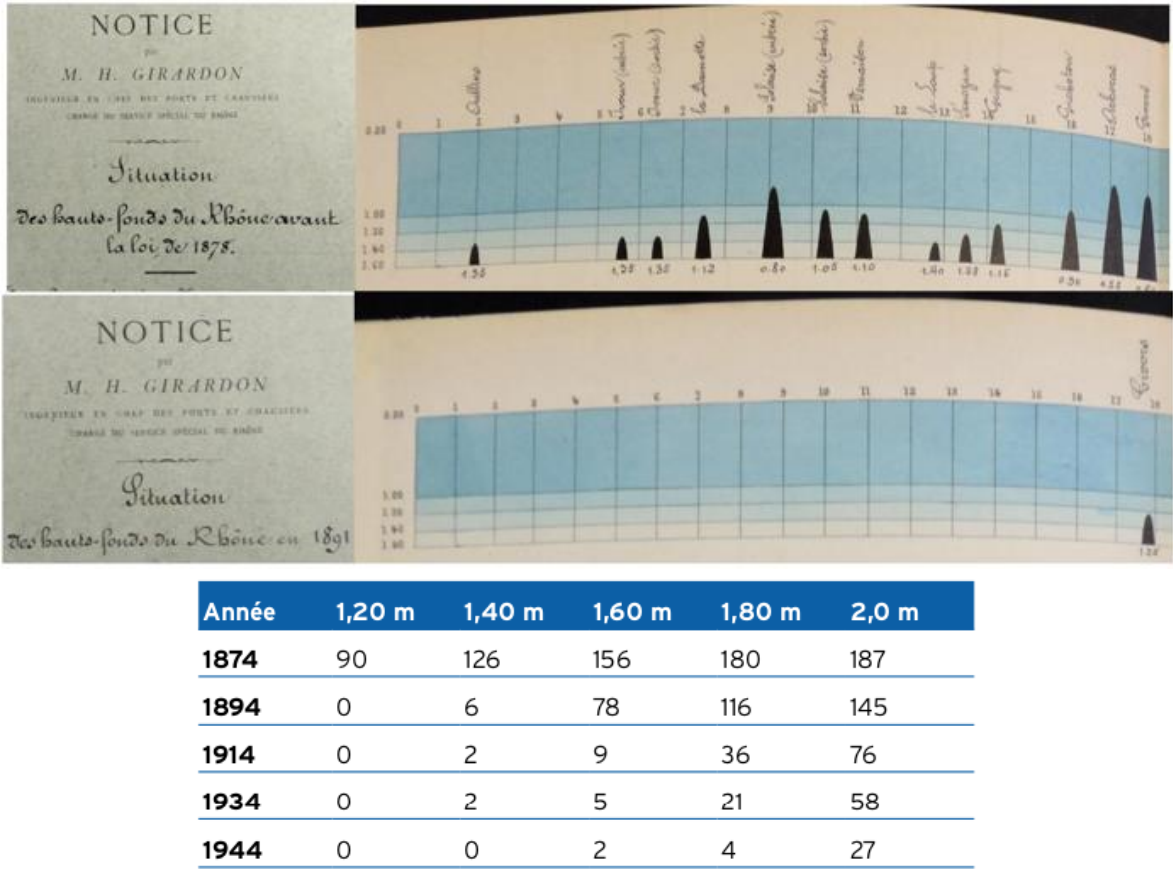


Figure 25 : Réduction des hauts fonds suite aux travaux de correction. A haut, extrait d'un rapport de l'ingénieur chef H. Girardon ; en bas, synthèse chronologique du nombre de hauts fonds en fonction des tirants d'eau (source : en haut, ACTHYS 2017 ; en bas, Bethemont & Bravard, 2016)

► De l'hydromécanique aux débuts de l'exploitation de la « houille blanche »

Le premier ouvrage transversal visant à exploiter la puissance des flots du Rhône est le barrage de Forces Motrices, construit à Bellegarde-sur-Valserine (Haut-Rhône), en 1871. Cet ouvrage alimentait un canal usinier au bout duquel les eaux actionnaient une roue qui mettait en mouvement un câble dit « téléodynamique ».

Cette première installation hydromécanique montra vite des limites tant techniques que commerciales, et fut remplacée par une usine hydroélectrique dès 1884. Cette première installation, la Centrale hydraulique de la Jonction de Valserine, alimentait en électricité la ville de Bellegarde-sur-Valserine (aujourd'hui Valserhône).

D'autres installations proto-industrielles ont été développées comme la création de l'usine de la Coulouvrenière à Genève (1884) en aval du barrage de la Machine, qui permettait de distribuer à la ville de l'eau sous pression. L'utilisation de cette eau sous pression permettra, cinq ans plus tard, d'alimenter trois alternateurs pour produire de l'hydroélectricité au niveau du pont de la Machine. Les demandes en électricité des grandes villes de l'époque ne cessant de croître, les usines hydroélectriques de Chèvre à Genève puis de Cusset à Lyon ont été construites respectivement en 1895 et 1899. A l'époque, l'ouvrage lyonnais installé sur le canal de dérivation de Jonage,

avec ses 7 000 kW d'équipement, a été pendant quelques années l'usine hydroélectrique la plus puissante au monde. En 1937, l'aménagement de Cusset est complété par un barrage de retenue, le barrage de Jons, qui a vocation à mieux réguler la répartition de débits entre le canal de Jonage et le canal de Miribel ; l'incision du chenal du fait des aménagements pour la navigation a probablement déclenché cet aménagement (cf. fiche UHC#10-ALY).

En 1907, l'aménagement de voie d'eau par la construction d'un grand canal latéral est proposé. Ce projet visait, en premier lieu, à l'amélioration de la navigation mais, également, à la construction d'usines hydroélectriques. Pendant plusieurs années, des études techniques seront menées avant que la décision d'un aménagement global du fleuve soit prise et conduite, quelques années plus tard, à la création de la Compagnie Nationale du Rhône en 1933.

Parallèlement, sur le Haut Rhône suisse une deuxième usine hydroélectrique, puis une troisième seront construites sur les sites Chancy-Pougny (1925) et de Verbois (1943) qui noiera le barrage de la Chèvre.



Figure 26 : Barrage de Chancy-Pougny mis en service en 1925 (ww2.sig-ge.ch)

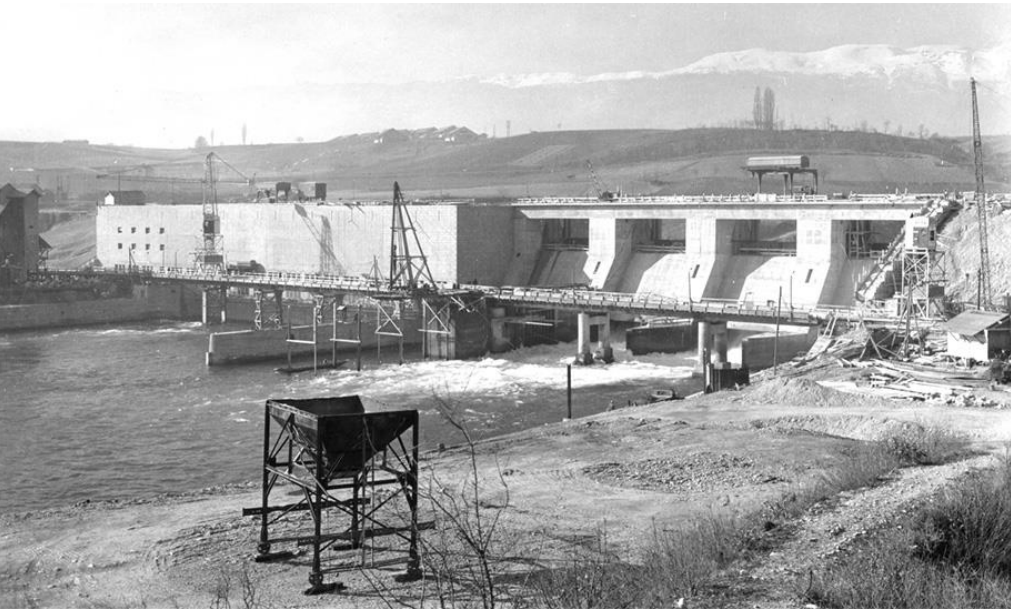


Figure 27 : Barrage de Verbois mis en service entre 1943 (ww2.sig-ge.ch)



Figure 28 : Les premiers aménagements hydroélectriques du Rhône : la Centrale Hydraulique de la jonction de la Valserine, le Pont de la Machine (début 20^{ème} siècle) et l'usine de Cusset (début 20^{ème} siècle) (source : en haut à gauche, Archive Départementale de l'Ain ; en haut à droite collection BGE, Centre d'iconographie genevoise ; en bas : <http://industrialheritage.eu>)

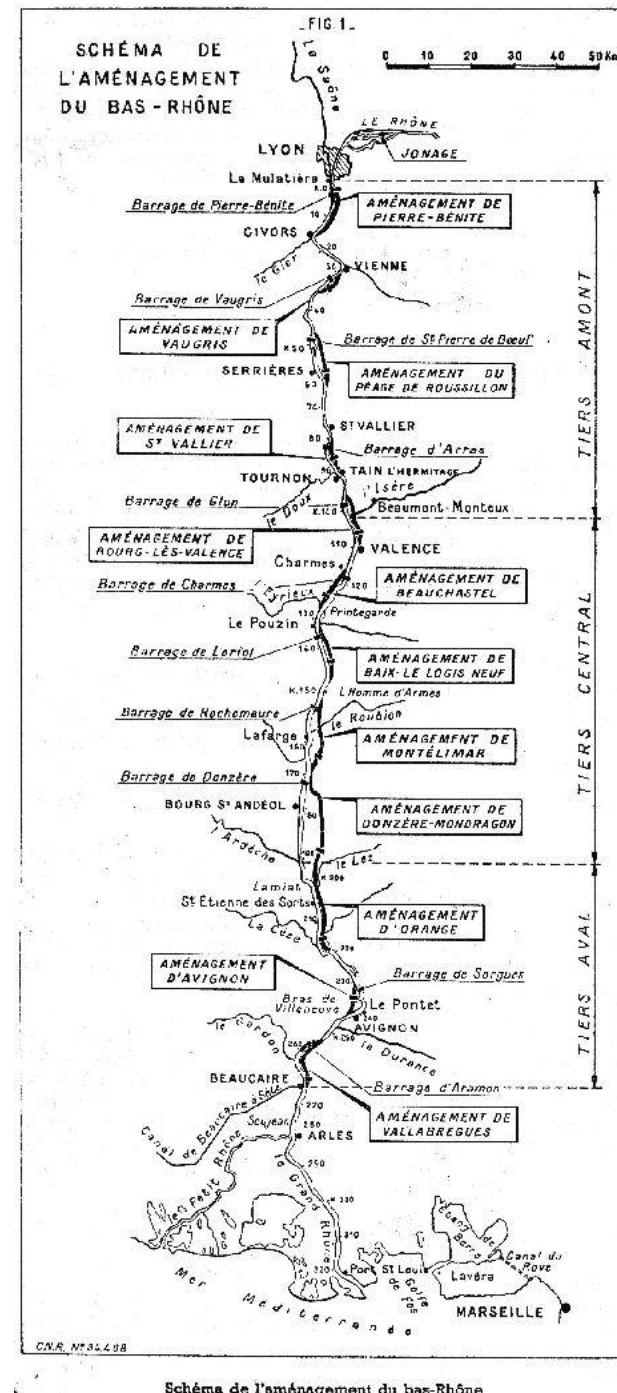


Figure 29 : Schéma de l'aménagement du Rhône tel qu'envisagé par les précurseurs (non daté)

2.4.3 De 1950 à 1990 : les aménagements CNR

En 1933, la Compagnie Nationale du Rhône est créée afin de confier à un opérateur unique l'aménagement du fleuve sur le territoire français.

La mise en valeur du Rhône porte alors sur trois thématiques centrales : l'irrigation, la navigation et l'hydroélectricité. Les éléments de la concession sont développés dans le rapport de Mission 3.

Pour la navigation, l'objectif est de consolider la navigabilité de 355 jours par an affichée avec les aménagements Girardon, et ce, avec un mouillage garanti de 3 m sur l'ensemble du linéaire en aval de Lyon et des vitesses d'écoulement limitées à environ 2 m/s.

Les premiers travaux lancés par la CNR portent sur le Port Edouard Herriot à Lyon (PEHL) et sur la construction du barrage de Génissiat. Le chantier de cet ouvrage, localisé sur les gorges du Rhône à l'aval de Bellegarde-sur-Valserine et permettant une chute de 64 m, débute en 1938. Il ne sera achevé qu'en 1948 en raison de la Seconde Guerre Mondiale. L'aménagement de Génissiat (03-GEN) sera rapidement complété par le barrage de Seyssel (04-SEY) mise en service en 1951, qui a vocation à produire de l'énergie hydroélectrique tout en servant de bassin de compensation des éclusées grâce au marnage possible dans sa retenue.

A la suite de ces premiers aménagements, la CNR se lance dans un vaste programme de construction qui aboutira à la construction de 16 autres chutes hydroélectriques en 34 ans. Ce programme est issu du « projet général d'aménagement du Rhône » élaboré dans les années 1930 et approuvé par le gouvernement en 1935. Sur les vingt aménagements prévus entre la frontière Suisse et la mer, seuls deux n'ont pas été réalisés. Il s'agit de Loyettes et de Miribel-Saint-Clair qui étaient prévus sur le Haut Rhône en amont de Lyon.

Le potentiel hydroélectrique des sites guidera la chronologie des constructions. En effet, les premiers sites aménagés sont ceux de Donzère-Mondragon (19-DZM) en 1952, Montélimar (18-MON) en 1957 et Baix-le-Logis-Neuf en 1960 (17-BLN). Les bénéfices sont doubles pour ces secteurs qui présentent les pentes les plus fortes du Rhône aval : le potentiel hydroélectrique est majoré ; la navigabilité est sécurisée dans les secteurs qui présentaient probablement les vitesses les plus fortes et les mouillages les plus faibles.

Ces ouvrages, à l'exception du barrage de Vaugris contraint par la largeur de la vallée, reposent tous sur la même logique d'aménagement en « feston », avec un barrage de retenue permettant d'alimenter un canal de dérivation (ou canal usinier), dans lequel les débits sont turbinés à une usine (cf. Figure 36). Une section de fleuve se retrouve court-circuitée et privée d'une partie des débits ; elle est nommée Rhône-Court-Circuité (RCC) ou Vieux Rhône (VR). La construction des barrages et des usines a alors nécessité des réaménagements majeurs de la plaine alluviale parmi lesquels il est possible de citer :

- Des excavations pour la construction des canaux usiniers, équipés en entrée d'un seuil empêchant l'entrée des sédiments transportés par charriage, parfois équipés de barrages de garde (19-DZM) ;
- La création de digues insubmersibles et de contre-canaux au niveau des retenues ;
- L'aménagement et l'endiguement des confluences avec parfois la mise en place de siphons ;
- La création de remblais dans le lit majeur pour gérer les résidus des excavations.

Dans le cadre de ces aménagements, il est possible de remarquer que le positionnement des endiguements de retenues s'est adapté au contexte géomorphologique et aux impératifs hydrauliques de capacité d'écoulement en crue. Ainsi, quand un endiguement présente aujourd'hui une surlargeur, deux configurations typiques peuvent se présenter :

- Soit le lit présentait une large bande active : dans ces conditions, le tracé des endiguements s'est adapté à la bande active avant aménagement, et la surlargeur de l'endiguement correspond à une zone de respiration de la bande active. C'est le cas par exemple dans la retenue du barrage de Lavours (06-BEL) où la présence de hauts fonds s'explique par la configuration géomorphologique avant aménagement (cf. Figure 30) ;
- Soit le lit était étroit et ne présentait pas de bande active : un endiguement au niveau des berges n'aurait pas permis de respecter la capacité d'écoulement nécessaire en crue ; aussi, il a été nécessaire de faire porter le tracé d'endiguement sur des terrasses alluviales. De telles configurations, comme observé au niveau de la roselière de Printegarde en aval de la confluence avec la Drôme, expliquent la présence de hauts fonds, qui ont souvent eu tendance à sédimenter après la mise en eau (cf. Figure 31).

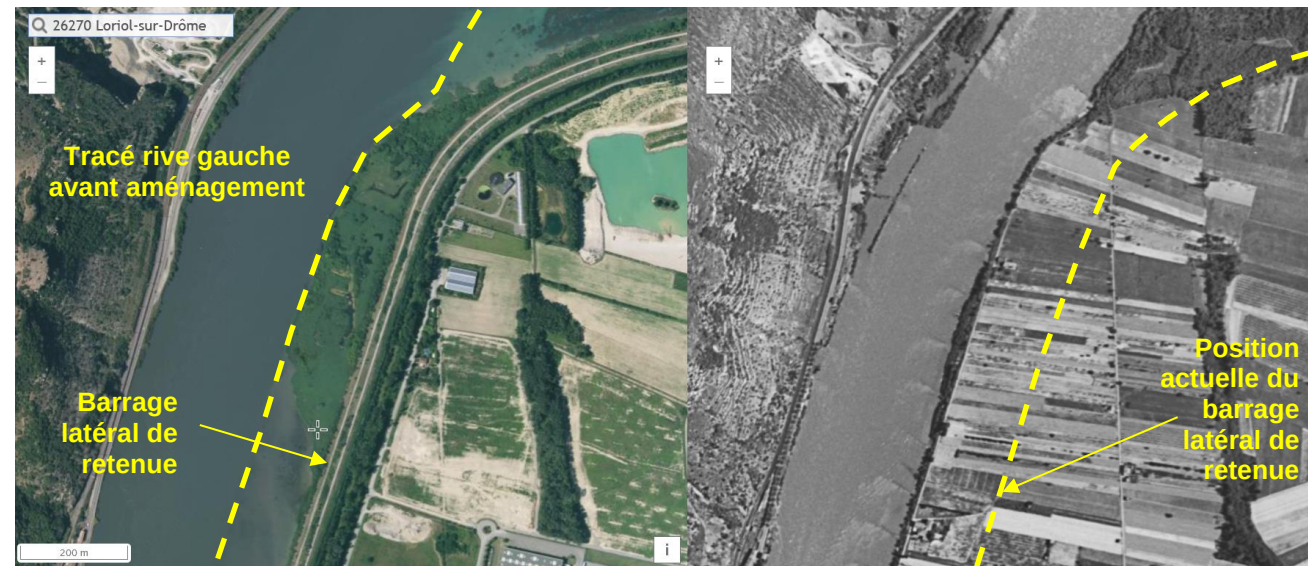


Figure 30 : Endiguement large dans la retenue de Baix-Le-Logis-Neuf, en aval de la Drôme, ayant créé des hauts fonds à l'origine de la roselière de Printegarde (remonterletemps.ign.fr)



Figure 31 : Endiguement large autour de la bande active dans la retenue de Belley favorisant l'émergence de hauts fonds (remonterletemps.ign.fr)

Le site du Palier d'Arles (23-ARL), entre Beaucaire et la Camargue en aval d'Arles, n'a pas été aménagé avec un ouvrage hydroélectrique, mais uniquement pour la navigation. A ce titre, le fleuve a fait l'objet, dans les années 1970, d'extractions et de l'arasement du seuil naturel de Terrin sur le Grand Rhône, afin de garantir un mouillage de 4,25 m entre le port de Marseille-Fos et le port d'Arles-Nord, et un mouillage de 3 m en amont. Ce besoin d'un mouillage de 4,25 m s'explique par la remontée des navires fluvio-maritime jusqu'au port d'Arles. Aussi, on parle de l'« aménagement du Palier d'Arles » au même titre qu'un autre aménagement de la concession du Rhône.

Au-delà des travaux directement liés à la construction des aménagements de l'axe fluvial, des travaux complémentaires ont été réalisés, soit en lien avec les deux autres missions de la CNR, soit pour optimiser la production hydroélectrique ou corriger des effets non attendus :

- Des extractions à but énergétiques dans les canaux de fuites ou les queues de retenue aval,
- Des rescindements de méandre afin d'optimiser la voie fluviale, notamment en augmentant les rayons de courbure du chenal navigable (exemple du méandre des Roches-de-Condrieu) ;
- La création de prises d'eau pour l'irrigation ;
- La création de seuils dans les Vieux Rhône afin de maintenir les niveaux d'eau tels qu'ils étaient avant aménagement, suite à la demande des acteurs locaux ;
- L'imperméabilisation des canaux usiniers pour corriger les effets sur les relations nappe/fleuve ;
- L'aménagement de plateformes industrialo-portuaires, pour partie remises en gestion aux Chambre de Commerce et d'Industries locales ;
- L'aménagements de petites centrales hydroélectriques sur le barrage de retenue : groupe de restitution (GR) pour délivrer le débit réservé, petite centrale hydroélectrique (PCH), mini-centrale hydroélectrique (MCH) (Tableau 6) ;
- Et plus récemment, l'aménagement de passes à poissons au droit d'usines ou barrages de retenue.

En parallèle à ces aménagements dans la concession, d'autres usages sont venus se greffer sur l'infrastructure Rhône : extractions de granulats, base de loisirs, ports de plaisance, etc. C'est également le cas de Centres nucléaires de production électrique (CNPE), qui se sont installés progressivement : Bugey en 1972, Tricastin en 1980, Cruas en 1983, St-Alban en 1986.

Aujourd'hui, la concession CNR comprend 18 complexes hydroélectriques (19 centrales hydroélectriques principales avec le double aménagement d'Avignon), 7 GR, 6 PCH (dont l'une est en construction) et 2 MCH (cf. Carte 4 ; Tableau 6). Elle a permis d'aménager 330 km de voie navigable entre le port E. Herriot à Lyon et le port de Marseille-Fos (cf. Carte 5).

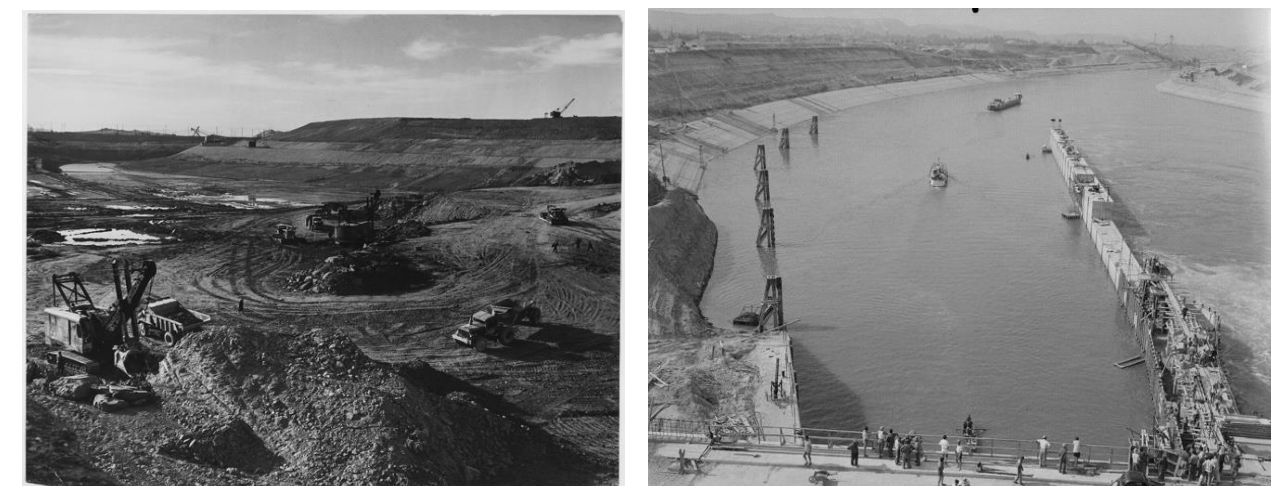


Figure 32 : Construction de l'aménagement de Donzère-Mondragon / 19-DZM (source : à gauche, Wikipédia ; à droite, Patrimoine numérique)



Figure 33 : Charge de fond retenue dans des épis Girardon avant les premiers aménagements hydroélectriques (en haut : en amont de la confluence avec le Lavézon ; en bas : au droit de l'ancien pont de Rochemaure / 18-MON) (IGN, 1949)



Figure 34 : Le Rhône au pont du Robinet en amont du futur barrage de Donzère mis en service en 1952 (IGN, 1949)



Figure 35 : Évolution de la morphologie de la confluence de la Durance entre 1947 et 1967 suite aux extractions et premiers aménagements sur ce cours d'eau, et avant la mise en eau de la retenue de Vallabrègues (1970)

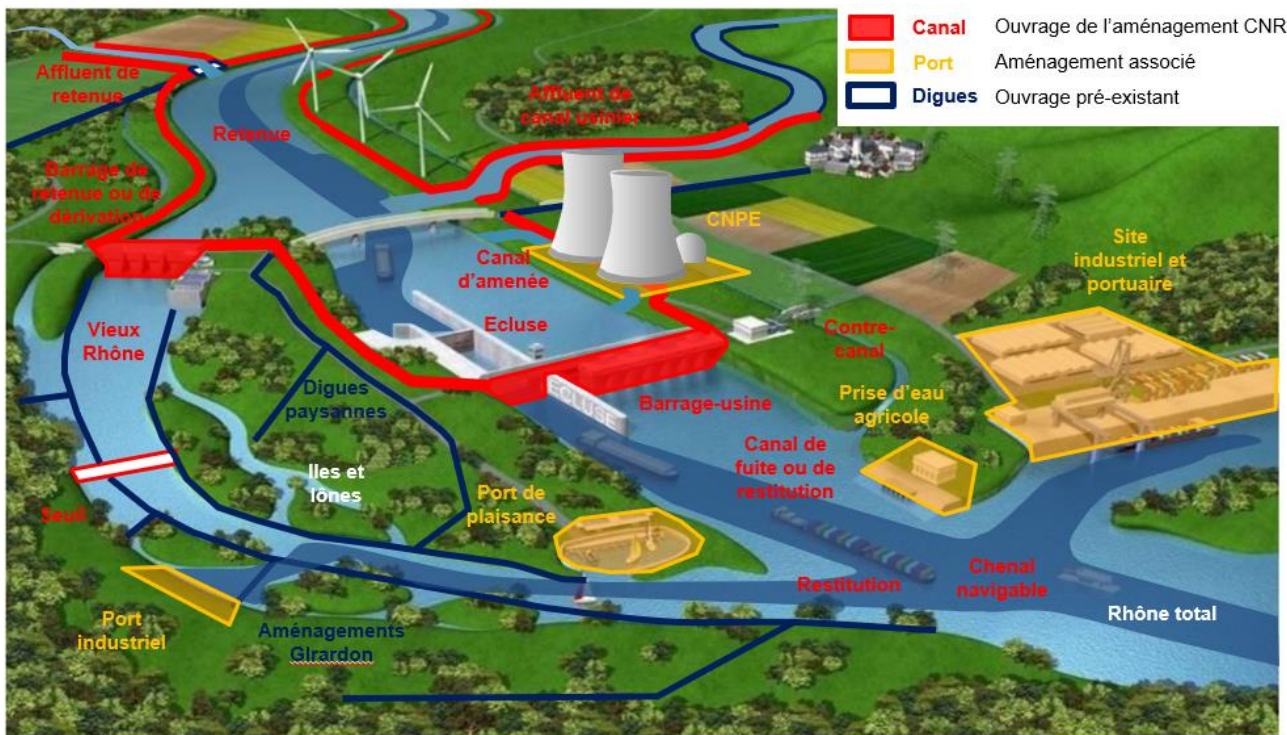


Figure 36 : Aménagement type sur le Rhône

UHC	Aménagements	Mise en service	Sites de production	Exploitant	N°	Puissance installée (MW)	Puissance totale installée (MW)	Prod. annuelle (GWh)	Nb de groupes	% / France (Puissance)	% / France (Production)	Rang France (Puissance)	Rang France (Production)
01-SUI	Seujet-Verbois	1995	Seujet	SIG		5,6	5,6	25	3				
		1943	Verbois	SIG		100,	100,0	466	4				
02-CHP	Chancy-Pougny	1924	Chancy-Pougny	SFMCPE		49,	49,0	250	5				
03-GEN	Génissiat	1948	Génissiat (usine)	CNR	1	420,	423,0	1 786	6+2	13,7%	10,8%	1	2
		1948	Génissiat (barrage)			3,0							
04-SEY	Seyssel	1951	Seyssel	CNR	2	45,	45,0	166	3	1,5%	1,0%	19	19
05-CHA	Chautagne	1980	Anglefort	CNR	3	90,	95,8	487	2	3,1%	3,0%	12	13
		2012	Motz (PCH)			5,8							
06-BEL	Belley	1982	Brens-Virginin	CNR	4	90,	95,5	453	2	3,1%	2,7%	13	14
		2014	Lavours (PCH)			5,0							
		2011	Seuil Yenne			0,5							
07-BRC	Brégner-Cordon	1983	Brégner-Cordon	CNR	5	70,	75,4	324	2	2,4%	2,0%	15	17
		1984	Champagneux			5,4							
08-SAB	Sault-Brénaz	1986	Sault-Brénaz	CNR	6	45,	46,3	249	2	1,5%	1,5%	18	18
		1986	Villebois			1,3							
09-VUL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10-ALY	Jons-Cusset	1899	Cusset	EDF		63,	64,5	415	15	2,1%	2,5%	17	15
		1899	Jons			1,5							
11-PBN	Pierre-Bénite	1966	Pierre-Bénite	CNR	7	84,	91,4	528	4	3,0%	3,2%	14	12
		2000	Pierre-Bénite (PCH)			7,4							
12-VAU	Vaugris	1980	Vaugris	CNR	8	72,	72,0	332	4	2,3%	2,0%	16	16
13-PDR	Péage-de-Roussillon	1977	Sablons	CNR	9	160,	160,7	885	4	5,2%	5,4%	9	8
		1977	St-Pierre-de-Boeuf			0,7							
14-STV	Saint-Vallier	1971	Gervans	CNR	10	120,	120,0	668	4	3,9%	4,0%	11	11
15-BLV	Bourg-lès-Valence	1968	Bourg-lès-Valence	CNR	11	180,	180,0	1 082	6	5,8%	6,6%	7	7
16-BEA	Beauchastel	1963	Beauchastel	CNR	12	192,	192,7	1 211	6	6,2%	7,3%	6	6
		1965	Charmes			0,7							
17-BLN	Baix-Logis-Neuf	1960	Logis-Neuf	CNR	13	215,	221,7	1 223	6	7,2%	7,4%	4	5
		1991	Le Pouzin			1,0							
		2017	Le Pouzin (PCH)			5,7							
18-MON	Montélimar	1957	Châteauneuf-du-R.	CNR	14	295,	301,5	1 628	6	9,8%	9,9%	3	3
		2015	Rochemaure (PCH)			6,5							
19-DZM	Donzère-Mondragon	1952	Bolène	CNR	15	348,	348,0	2 032	6	11,3%	12,3%	2	1
20-CAD	Caderousse	1975	Caderousse	CNR	16	156,	156,0	843	6	5,1%	5,1%	10	10
21-AVI	Avignon	1973	Avignon	CNR	17	126,	178,7	857	6	5,8%	5,2%	8	9
		1973	Sauveterre			52,							
		2017	Sauveterre (MCH)			0,7							
22-VAL	Vallabrègues	1970	Beaucaire	CNR	18	210,	218,2	1 269	6	7,1%	8,1%	5	4
> 2021	Vallabrègues	8,2	63			1							
23-ARL	-	-	-	-	-								
24-GRH	-	-	-	-	-								
25-PRH	-	-	-	-	-								
Total Rhône CNR						3021,9	3021,9	16085,8					
Total Rhône France						3086,4	3086,4	16500,8		100,0%	100,0%		
Total Rhône						3241,	3241,	17241,8					

215,	usine hydroélectrique principale
1,0	groupe de restitution
5,7	petite centrale hydroélectrique récente (PCH)
0,7	mini centrale hydroélectrique récente (MCH)

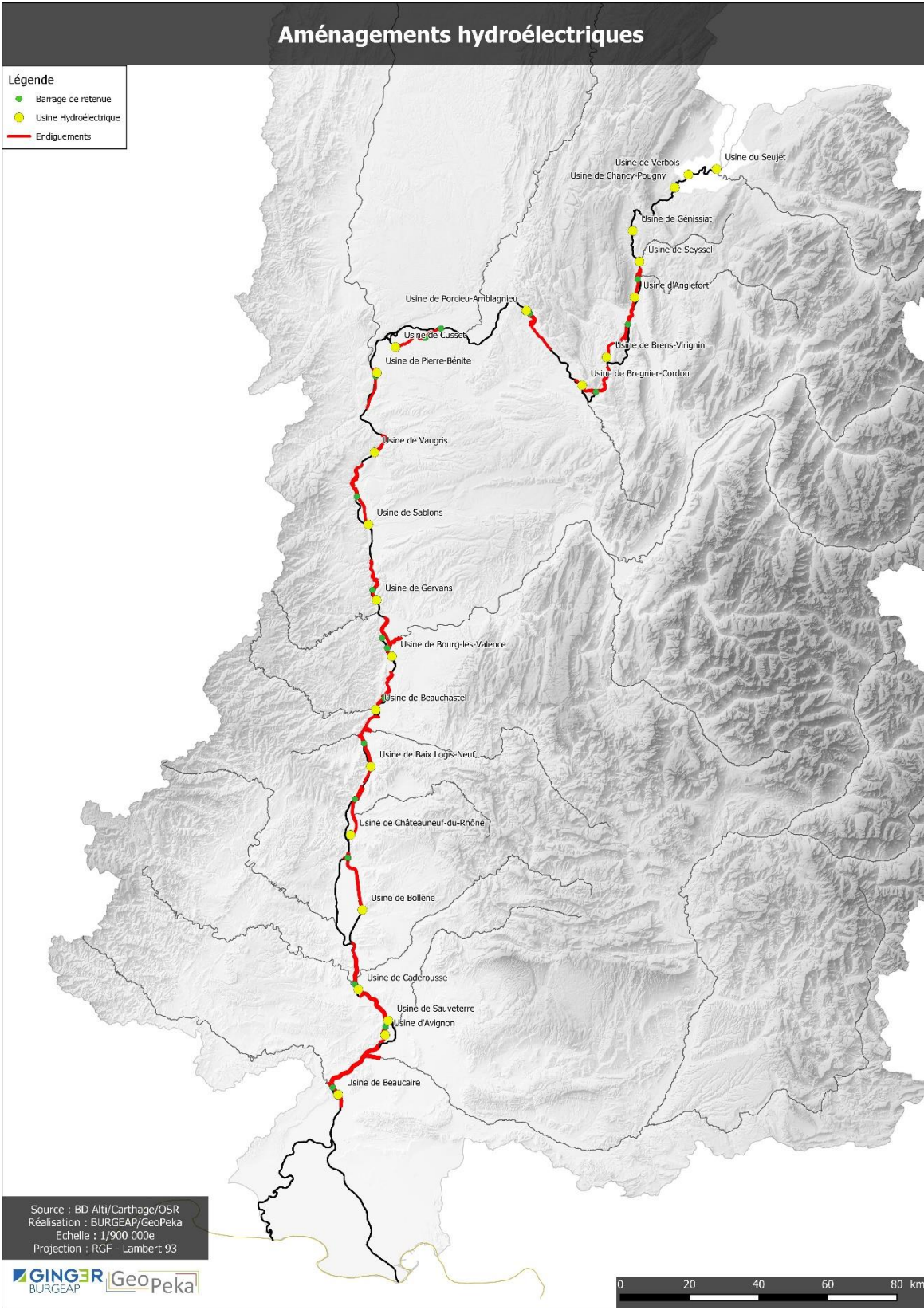
Tableau 5 : Chronologie des aménagements hydroélectriques de la vallée du Rhône

Il s'agit des ouvrages existants dans l'état actuel ; ne sont pas mentionnés les ouvrages abandonnés dans le cadre des aménagements les plus récents.

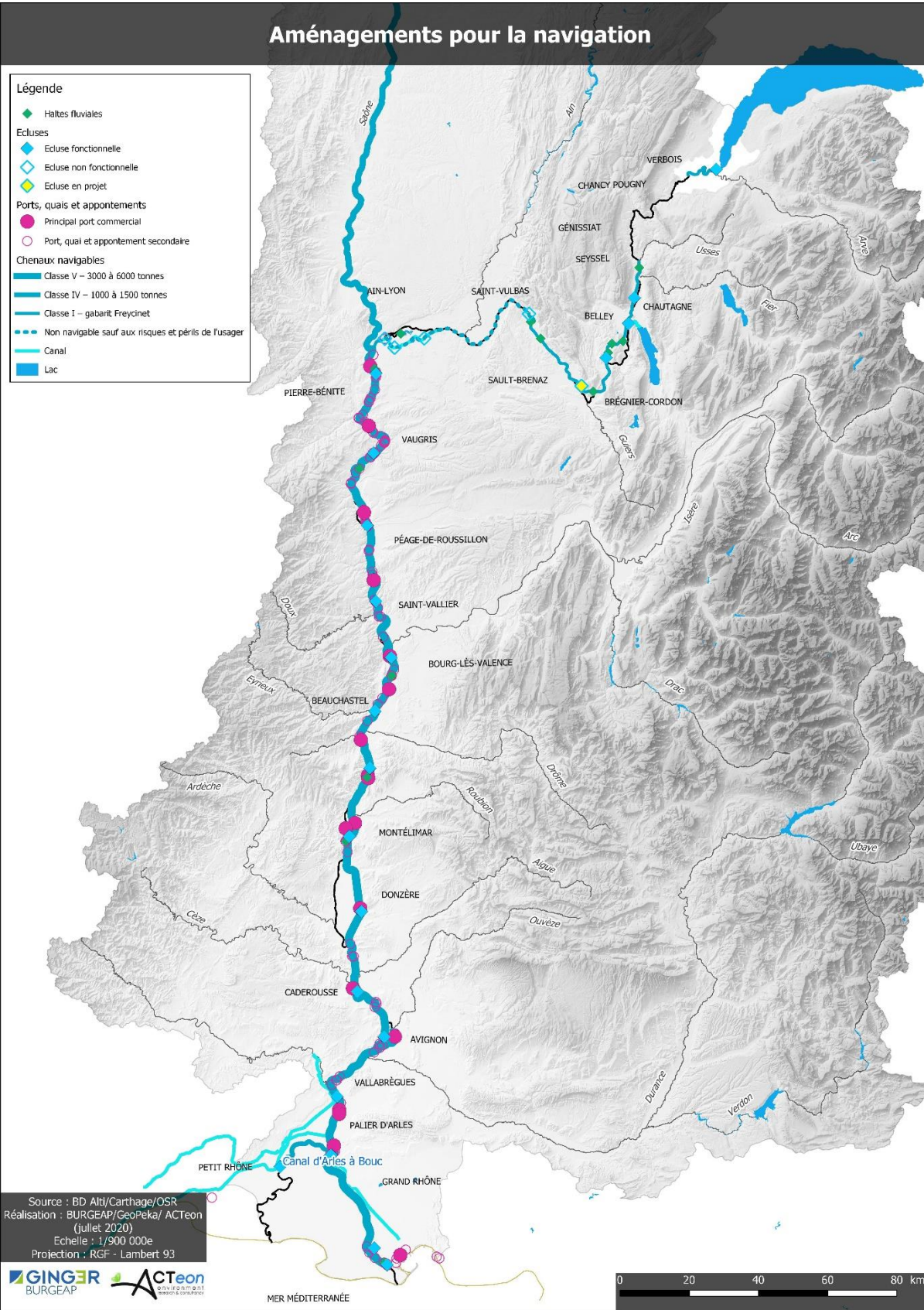
Tableau 6 : Listes et caractéristiques des chutes CNR sur le Rhône en 2019

(la PCH de Vallabrègues, en projet, est intégré dans cet état des lieux de 2019)

Ordre	Année	UHC	Barrage mis en service
1	1884	01-SUI	Machine, puis Seujet (1995)
			
	1898		
2	1899	10-ALY	Cusset
	1900		
	1901		
	1902		
	1903		
	1904		
	1905		
	1906		
	1907		
	1908		
	1909		
	1910		
	1911		
	1912		
	1913		
	1914		
	1915		
	1916		
	1917		
	1918		
	1919		
	1920		
	1921		
	1922		
	1923		
3	1924	02-CHP	Chancy-Pouigny
	1925		
	1926		
	1927		
	1928		
	1929		
	1930		
	1931		
	1932		
	1933		
	1934		
	1935		
	1936		
	1937	10-ALY	Jons
	1938		
	1939		
	1940		
	1941		
	1942		
4	1943	01-SUI	Verbois
	1944		
	1945		
	1946		
	1947		
5	1948	03-GEN	Génissiat
	1949		
	1950		
6	1951	04-SEY	Seyssel
7	1952	19-DZM	Donzère-Mondragon
	1953		
	1954		
	1955		
	1956		
8	1957	18-MON	Montélimar
	1958		
	1959		
9	1960	17-BLN	Baix-Le-Logis-Neuf
	1961		
	1962		
10	1963	16-BEA	Beauchastel
	1964		
	1965		
11	1966	11-PBN	Pierre-Bénite
	1967		
12	1968	15-BLV	Bourg-lès-Valence
	1969		
13	1970	22-VAL	Vallabrègues
14	1971	14-STV	Saint-Vallier
	1972		
15	1973	21-AVI	Avignon
	1974		
16	1975	20-CAD	Caderousse
	1976		
17	1977	13-PDR	Péage-de-Roussillon
	1978		
18	1979	12-VAU	Vaugris
19	1980	05-CHA	Chautagne
	1981		
20	1982	06-BEL	Belley
21	1983	07-BRC	Brégnier-Cordon
	1984		
	1985		
22	1986	08-SAB	Sault-Brénaz
	1987		



Carte 4 : Principaux aménagements pour l'hydroélectricité



Carte 5 : Principaux aménagements pour la navigation

2.4.4 De 1954 à 1995 : les extractions dans le lit du Rhône

Les extractions et l'exploitation de granulats sont attestées sur le Rhône à partir de 1954 (ACTHYS, 2017). Ce sont essentiellement les travaux de reconstruction d'après-guerre puis de développement économique (barrages latéraux, CNPE, A7, LGV, infrastructures, etc.) qui expliquent que ces activités ont pris des proportions importantes.

En réalité, des extractions ont probablement démarré avant 1954, notamment dans les grandes agglomérations comme Lyon. Cette hypothèse s'appuie sur le fait que les travaux de chenalisation du canal de Miribel, menés à partir de 1847 jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle ont généré une incision du lit de l'ordre de 2 à 3 m (cf. §.C4 ; fiche UHC#10-ALY). Les volumes ainsi mobilisés ont provoqué des dépôts dans la partie aval du canal de Miribel et ont conduit à faire basculer sa pente (Malavoi, 2008). Il est très probable que ces afflux de sédiments aient pénétré dans la traversée urbaine de Lyon, dont la capacité de charriage était déjà réduite avant aménagement CNR par rapport aux apports de l'Ain. De tels apports que l'on imagine importants ont probablement déclenché des extractions dans la traversée urbaine. Cependant, les moyens mécaniques de l'époque n'ont réellement permis de procéder à des excavations importantes qu'à partir de 1920 environ, et plus sûrement à partir de 1945 (cf. Figure 37).

Le Tableau 7 synthétise les volumes de sédiments extraits dans le lit mineur du Rhône pour chaque UHC entre 1954 et 1995. Les données sont initialement extraites de l'EGR (2000) et de l'étude ACTHYS (2017) ; elles ont ensuite été consolidées avec les études récentes (Dynamique Hydro, 2018-2019) et la construction des bilans sédimentaires (cf. PARTIE C / Chapitre §.4.2.1).

La date de 1995 est retenue pour faire la distinction entre les extractions commerciales et les dragages d'entretien. En effet, l'arrêté ministériel du 22 septembre 1994 a interdit toute exploitation de granulats dans le lit mineur des cours d'eau. Il est probable que des opérations d'exploitation engagées avant 1994 ait mis quelques années avant d'être définitivement suspendues ; toutefois, on peut considérer qu'avec la promulgation de la Loi sur l'Eau de 1992 et ses décrets d'application, les opérations d'entretien se sont rapidement développées par rapport aux opérations d'extraction. La base de données dragages de la CNR, exploitée en Mission 4, confirme cette évolution des pratiques, notamment suite aux crues de 1994 et 1995 qui ont nécessité des volumes importants de dragages d'entretien.

► En amont de Lyon

Sur le Haut-Rhône, la compilation des données permet de faire un bilan des extractions historiques dans le lit mineur du Rhône (EGR, 2000, rapport V3D1A6 ; EKIUM, 2015).

Au total, sur la période 1954-1995, les volumes extraits en amont de Lyon sont de l'ordre de 4,6 millions de m³ (4,6 hm³). Dans le détail, ces volumes d'extraction sont très inégalement répartis puisque les extractions sur la seule UHC#10-ALY (Ain-Lyon) représente plus de 54 % des volumes extraits (2,6 hm³ renseignés ; probablement beaucoup plus en intégrant la période avant 1954). Les autres sites les plus sollicités sont la queue de retenue de Génissiat sur le site de l'Etournel, avec plus de 10 % des volumes extraits (0,50 hm³), plusieurs sites dans le Vieux Rhône de Belley (10% ; 0,50 hm³), ainsi que plusieurs autres sites sur le secteur de Brégnier-Cordon (12% ; 0,57 hm³). Sur les autres UHC, le total des extractions est inférieur à 0,50 hm³.

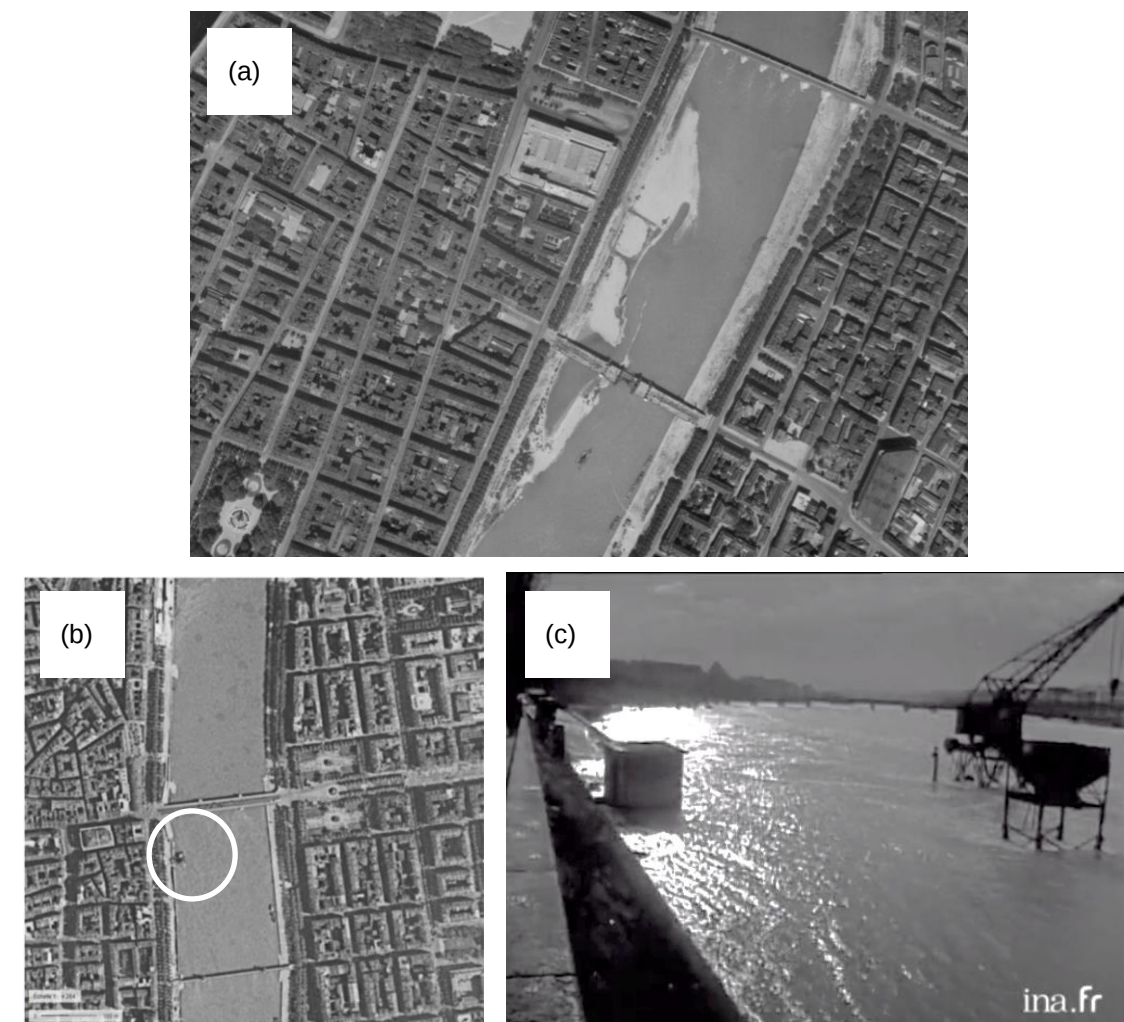
► En aval de Lyon

L'analyse menée par ACTHYS (2017) sur le Rhône en aval de Lyon a permis de traiter *in fine* l'ensemble des sources relatives aux extractions dans le fleuve Rhône entre Lyon et la Camargue sur la période 1954-2010. Ces données ont été comparées à celle de l'EGR (2000) qui sont partielles et dont il faut retirer les volumes extraits sur les affluents. Des données ACTHYS, peuvent être retirés les volumes issus d'opérations qui peuvent être identifiées comme des dragages d'entretien, réalisés entre 1995 et 2010. Les principales zones d'extraction ont été cartographiées à partir des données ACTHYS à l'échelle des UHC (cartes B). L'analyse est confortée avec d'autres données locales comme les bilans sédimentaires de Dynamique Hydro (2018-2019) et BURGEAP (2017).

D'après l'EGR, le volume total extrait en aval de Lyon était de 14,8 hm³. D'après les données ACTHYS, les volumes extraits sont en réalité d'une valeur médiane de 41,1 millions de m³ (41,1 hm³, +/- 7,0 hm³). Les écarts sont liés à des volumes incertains, estimés à 14,0 hm³, ce qui donne une fourchette globale de 34,1 à 48,1 hm³ (cf. Tableau 7).

Il convient toutefois de nuancer ces chiffres, du fait d'abord de la part conséquente des volumes considérés comme incertains (14 hm³, soit 29% du total), du fait ensuite de leur variance dans le temps et d'un site à l'autre (cf. Figure 39). En effet, ce ne sont pas moins de 30 hm³ (62% du total) qui sont extraits en seulement 15 ans, de 1971 à 1985, soit 2 hm³ par an (cf. Figure 39).

Après consolidation à l'échelle des UHC (cf. fiches UHC pour chaque secteur ; synthèse sur la Figure 41 et le Tableau 7), les volumes incertains ont été réduits à 11,4 hm³ et quelques opérations ont été ajoutées. En aval de Lyon, les volumes d'extraction sont finalement estimés entre 38,5 et 49,9 hm³, avec des fortes variations selon les UHC. Avec les extractions dans le Haut-Rhône, les volumes atteignent au total 43,1 à 55,8 hm³. Au-delà du fait que des données post-1998 ont été collectées, il s'agit d'un cumul beaucoup plus élevé que l'estimation de 14,8 hm³ de l'EGR (2000).



(a) Extractions dans la traversée de Lyon en 1947 entre le Pont de l'Université et le Pont Galliéni (<https://remonterletemps.ign.fr/>)

(b) Présence d'une dragline en aval de l'ancien Pont Morand (1950-65) (Géoportail, IGN)

(c) Dragline dans le lit du Rhône lors de la crue de 1955 (Dauphiné Libéré, archives INA.fr)

Figure 37 : Bancs d'alluvions dans la traversée de Lyon et extractions vers 1947 et 1955

Sur la période 1954-1995, les données consolidées par UHC donnent les principales estimations suivantes :

- L'UHC la plus sollicitée est le Palier d'Arles (23-ARL), avec 7,05 hm³ confirmés. Sur cette UHC, les opérations de dragages entre 1995 et 2010 réduisent les volumes d'ACTHYS (cf. Tableau 7) ;
 - Suivent ensuite les UHC de Péage-de-Roussillon (13-PDR) avec 6,95 hm³ et Donzère-Mondragon (19-DZM) avec 6,78 hm³ ;
 - Pierre-Bénite (11-PBN), Vaugris (12-VAU) et Vallabrègues (22-VAL) constituent un autre ensemble avec des volumes compris entre 4,5 et 5 hm³ ;
- A eux seuls, les 6 sites précédents totalisent 34,9 hm³ et 70% du volume total.
- un troisième groupe constitué de St-Vallier (14-STV), Bourg-lès-Valence (15-BLV), Montélimar (18-MON) et Avignon (21-AVI) échelonne ses prélèvements entre 2 et 3,7 hm³ ;
 - sur les autres UHC, le total des extractions est de l'ordre ou inférieur au million de m³.

Par ailleurs, au regard des profils en long établis dans les études OSR, des correspondances peuvent être établies de manière assez claire entre l'existence des fosses et les extractions en particulier sur les sites de Pierre-Bénite, Vaugris, Péage de Roussillon, St Vallier, Bourg lès Valence, Baix Logis Neuf, Montélimar, Donzère-Mondragon (entre les pk195 et 200) et Palier d'Arles (extractions considérables dans les années 70).

Enfin, en lien avec les flux sédimentaires de charriage avant aménagements, et qui s'établissaient entre 100 000 m³ et 350 000 m³/an entre la confluence avec l'Arve et le débouché en mer Méditerranée (cf. PARTIE C / Chapitre §.5), le total des extractions effectives et potentielles (55,9 hm³) correspondrait ainsi à plusieurs siècles de transport solide du fleuve (entre 150 et 550 ans selon les secteurs considérés). Pendant la période très active (1971-1985), le volume d'extraction annuel équivalait sur le Rhône aval à 10 fois le transit annuel.

La Carte 6 localise les zones d'extraction du Rhône aval d'après ACTHYS (2017), qui sont reportées à l'échelle des UHC sur les Cartes B. Ces secteurs cumulent 45,3 hm³ d'extractions (cf. Figure 41).

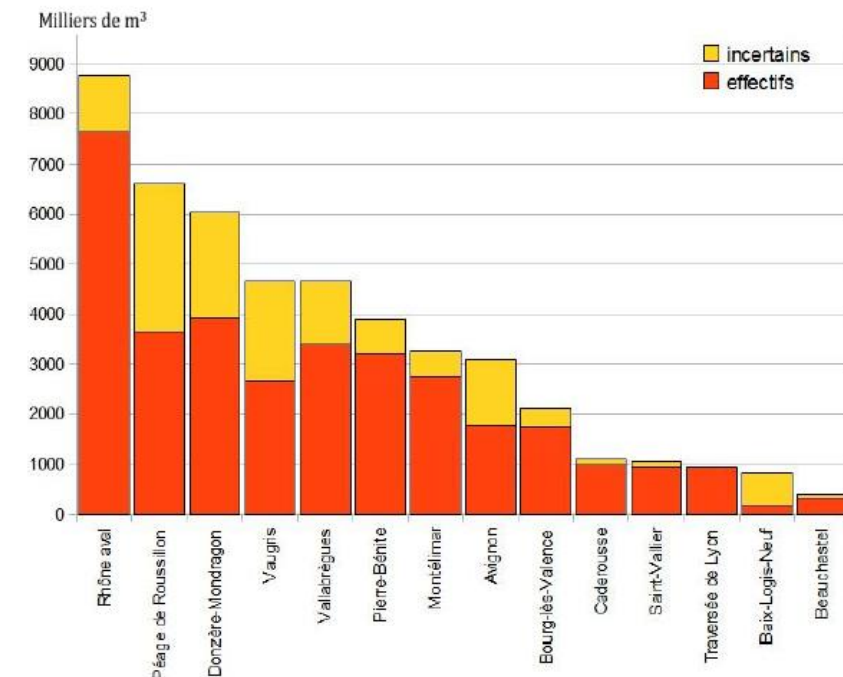


Figure 39 : Prélèvements de sédiments dans le Rhône entre 1954 et 2010 (source : ACTHYS, 2017) - Localisation (en haut à gauche) ; Volumes annuels (en haut à droite) ; Volume par site (en bas)

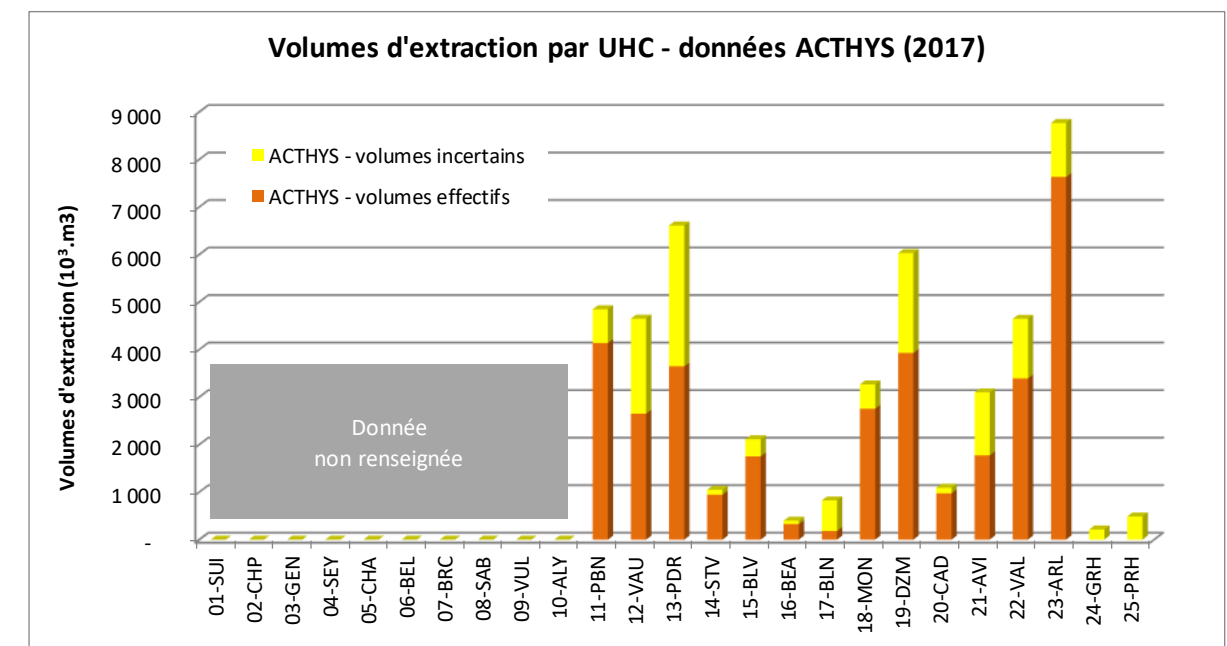


Figure 40 : Prélèvements de sédiments dans le Rhône entre 1954 et 2010 (source : ACTHYS, 2017)

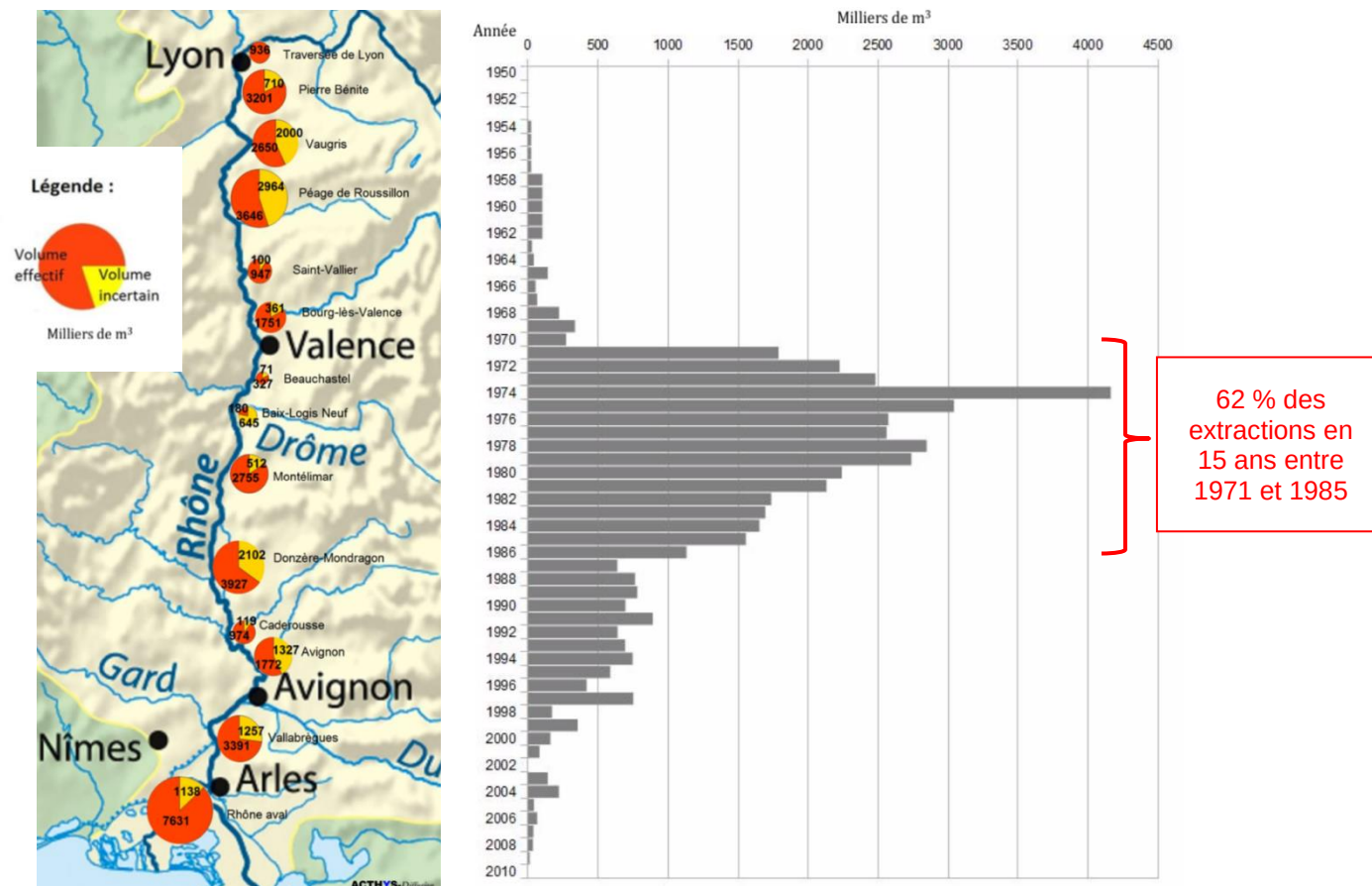


Figure 38 : Cartographie et chronologie des extractions en aval de Lyon entre 1954 et 2010 (source : ACTHYS, 2017)

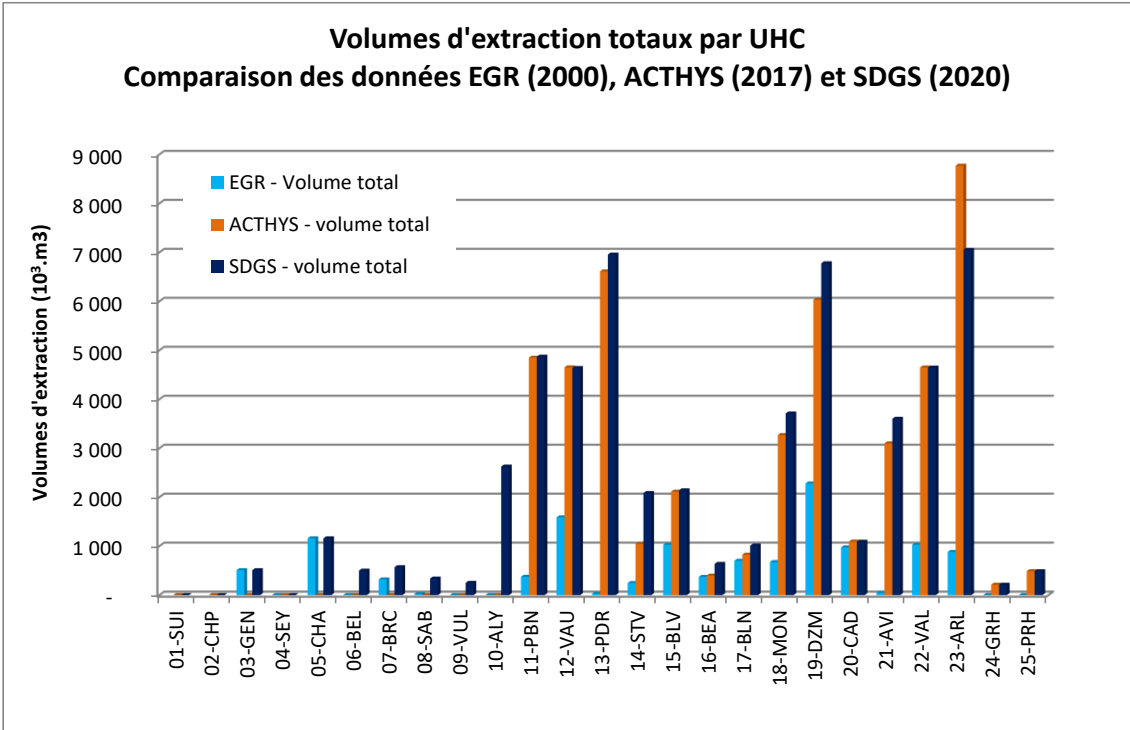
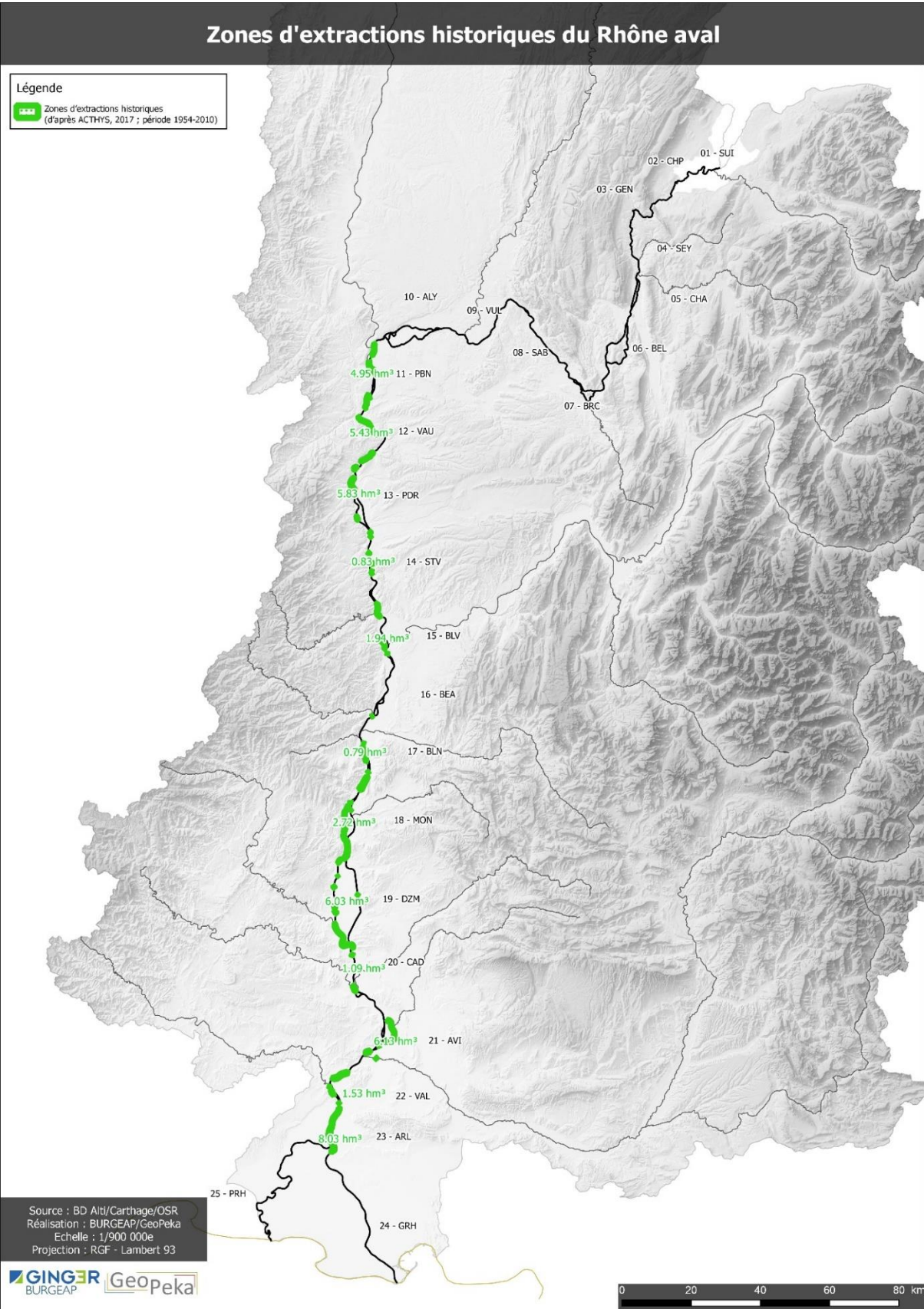


Figure 41 : Comparaison des volumes d'extraction estimés par l'EGR et ACTHYS avec les volumes consolidés dans le cadre de la présente étude (SDGS)

Tableau 7 : Volume d'extraction dans le Rhône par UHC entre 1954 et 1995

N°	UHC	Volumes EGR (2000) (10 ³ .m3)	Volumes ACTHYS (2017) (10 ³ .m3)			Volumes estimés dans le SDGS (2020) (10 ³ .m³)			TOTAL sur carte B
		EGR - volumes total	ACTHYS - volumes effectifs	ACTHYS - volumes incertains	ACTHYS - volume total	SDGS - volumes effectifs	SDGS - volumes incertains	SDGS - volume total	
01-SUI	Seujet-Verbois		ND	ND	ND	-	-	-	
02-CHP	Chancy-Pougny		ND	ND	ND	-	-	-	
03-GEN	Génissiat	509	ND	ND	ND	509	-	509	
04-SEY	Seyssel	-	ND	ND	ND	-	-	-	
05-CHA	Chautagne	1 159	ND	ND	ND	1 159	-	1 159	
06-BEL	Belley	-	ND	ND	ND	370	130	500	
07-BRC	Brégnier-Cordon	320	ND	ND	ND	570	-	570	
08-SAB	Sault-Brénaz	19	ND	ND	ND	338	-	338	
09-VUL	Saint-Vulbas	ND	ND	ND	ND	250	-	250	
10-ALY	Ain-Lyon	ND	ND	ND	ND	2 625	-	2 625	
11-PBN	Pierre-Bénite	374	4 137	710	4 847	4 159	710	4 869	4 950
12-VAU	Vaugris	1 587	2 650	2 000	4 650	2 637	2 000	4 637	5 430
13-PDR	Péage de Roussillon	26	3 646	2 964	6 610	4 670	2 284	6 954	5 830
14-STV	Saint-Vallier	246	947	100	1 047	947	1 137	2 084	830
15-BLV	Bourg-lès-Valence	1 027	1 751	361	2 112	2 140	-	2 140	1 940
16-BEA	Beauchastel	371	327	71	398	638	-	638	
17-BLN	Baix-Le-Logis-Neuf	701	180	645	825	980	30	1 010	790
18-MON	Montélimar	675	2 755	512	3 267	3 579	130	3 709	2 720
19-DZM	Donzère-Mondragon	2 279	3 927	2 102	6 029	5 259	1 518	6 777	6 030
20-CAD	Caderousse	974	974	119	1 093	1 090	-	1 090	1 090
21-AVI	Avignon	45	1 772	1 327	3 099	2 274	1 327	3 601	6 130
22-VAL	Vallabrègues	1 028	3 391	1 257	4 648	3 389	1 257	4 646	1 530
23-ARL	Palier d'Arles	881	7 631	1 138	8 769	6 700	350	7 050	8 030
24-GRH	Grand Rhône	-	-	212	212	-	212	212	
25-PRH	Petit Rhône	-	-	488	488	-	488	488	
Sous total Haut-Rhône		2 007	-	-	-	5 821	130	5 951	45 300
Sous-total Rhône aval		10 214	34 088	14 006	48 094	38 462	11 443	49 905	45 300
TOTAL GENERAL		12 221	34 088	14 006	48 094	44 283	11 573	55 856	45 300

ND : non déterminé



Carte 6 : Localisation des zones d'extraction historiques du Rhône aval (d'après ACTHYS, 1954-1995)
(linéaires reportés sur les cartes B dans les fiches UHC)

2.5 Chronologie et rôles des aménagements sur la morphologie du fleuve

Les éléments de synthèse qui suivent sur la trajectoire morphologique du Rhône sont issus des études et travaux scientifiques existants, notamment EGR (2000), thèse de Parrot (2015), travaux de l'OSR4 (2015-2018), Rhône en 100 questions (Bravard et al., 2010). Ces premières conclusions sont revisitées à la faveur des éléments nouveaux apportés par les parties précédentes, notamment sur les volumes extractions, et annoncent les analyses complémentaires menées en PARTIE C.

2.5.1 Une trajectoire fortement orientée par les aménagements du lit et du bassin versant

En plus d'un siècle et demi d'aménagements à large échelle, la physionomie du fleuve a été profondément bouleversée.

Des travaux de correction et de chenalisation, tels que ceux menés pour améliorer la voie fluviale à la fin du 19^{ème} siècle, ont pour conséquence la stabilisation du tracé en plan, l'incision du chenal, la déconnexion des annexes fluviales et le piégeage des sédiments en arrière des digues basses.

Quant aux aménagements hydroélectriques débutés avec le 20^{ème} siècle et accélérés à partir de 1950, ils induisent, en principe, la perturbation de la continuité sédimentaire liée à la réduction des volumes charriés de sédiments grossiers en raison, d'une part, de la perte de compétence au niveau des retenues et, d'autre part, de la diminution des fréquences de débits morphogènes dans les sections court-circuitées. Cependant, en contrepartie, la diminution de fréquence des débits morphogènes est un facteur de stabilité lorsqu'un tronçon est en déficit d'apports depuis amont : le déstockage des matériaux présents est ralenti, ainsi que la tendance au pavage du fond du lit.

Par ailleurs, les extractions, si elles sont réalisées dans des proportions importantes par rapports aux flux naturels de charriage, jouent un rôle majeur : la fouille d'extraction piège les matériaux provenant de l'amont, et le linéaire aval se retrouve privé de sédiment, même si une partie des flux se rétablit par érosion progressive tant que les fonds ne sont pas pavés.

Enfin, le fonctionnement d'un fleuve comme le Rhône est étroitement dépendant de la dynamique sédimentaire de ces affluents. Si ceux-ci font l'objet d'aménagements dans leurs bassins versants (barrages avec retenue, extractions, endiguement), a fortiori à l'approche de la confluence, les apports au fleuve sont réduits et sa propre dynamique se trouve altérée.

L'observation des formes actuelles laissent à penser que ces effets théoriques ont été pleinement effectifs. Toutefois, il semble important de préciser la chronologie dans laquelle ces processus se sont déroulés et de distinguer les effets des aménagements du Rhône de ceux des affluents, mais aussi des extractions de granulats à l'échelle du bassin.

2.5.2 Une incision du Rhône avant tout liée aux aménagements Girardon

Plusieurs études portant sur l'évolution des annexes fluviales du Rhône ont montré l'importance des effets des travaux d'amélioration de la voie fluviale du 19^{ème} siècle.

En effet, la simplification du tracé, le comblement des annexes et la disparition des traces d'une charge en transit (bancs et atterrissements) apparaît rapidement après la mise en place des ouvrages de correction de type Girardon. La rétraction du lit liée à ces aménagements a fortement augmenté la capacité de charriage et mécaniquement provoqué une incision du lit ; les matériaux arrachés ont pour partie été piégés dans les casiers de ces mêmes aménagements Girardon, alors que le reste poursuivait son transit en aval. L'incision a été d'autant plus marqué que les apports amont ont été réduits, comme par exemple le Vieux Rhône de Pierre Bénite qui ne bénéficiait pas d'apports d'affluents (absence de charriage dans la Saône) et qui subissait les extractions dans le Rhône en amont de Lyon.

Les phénomènes d'incision ont été, par exemple, clairement démontrées par les travaux du CEREGE sur le Rhône aval (Raccasi, 2008 ; Provansal et al., 2012) ou de l'OSR sur Péage de Roussillon. Ces derniers travaux estiment que 56 % des volumes de sédiments stockés dans les casiers Girardon ont été piégés avant la construction du barrage de Saint-Pierre-de-Boëuf (contre 29% après) (OSR3 - Analyse des processus de sédimentation dans le lit majeur et les annexes fluviales du RCC de Péage-de-Roussillon, 2015).

Plus récemment, il a été démontré que les impacts sur les bras morts liés à la création des barrages ne sont pas systématiques et qu'ils dépendent, à la fois du niveau de sédimentation à date de la construction, mais aussi de la position longitudinale du bras mort dans le tronçon court-circuité (les annexes en amont sont plus sensibles). Ainsi, l'effet de l'incision post-dérivation n'a été qu'un facteur de second ordre dans l'évolution des marges (Dépret, 2017).

L'importance des impacts des ouvrages de rectification par rapport à ceux des barrages et des extractions, s'explique essentiellement par leurs effets respectifs sur l'évolution du profil en long. L'incision consécutive aux ouvrages de correction a été bien plus importante que celle post-dérivation, notamment à l'aval de Lyon (Parrot, 2015). Si les rythmes d'incision semblent comparables (-1,73 cm/an avant aménagements CNR contre -1,72 cm/an après aménagements), l'affaissement moyen du plancher alluvial est nettement plus considérable sur la première période (-1,81 m avant aménagements CNR contre -0,46 m après aménagements et extractions) du fait des périodes considérées.

2.5.3 Une réduction considérable de la fourniture en sédiments par les affluents

Parallèlement à ces effets imputables aux aménagements du fleuve lui-même, l'évolution de l'occupation du sol sur les têtes de bassins du Rhône, l'aménagement hydroélectrique des affluents, mais aussi les extractions commerciales des matériaux sur les affluents et le Rhône ont contribué aux changements morphologiques observés aujourd'hui. S'il est très difficile d'établir l'influence respective de ces facteurs, notamment du fait des distances importantes entre les sources et l'axe du Rhône, plusieurs études se sont penchées sur cette problématique.

Certaines études soulignent que les modifications enregistrées sur les têtes de bassin (déprise rurale, aménagements hydroélectriques sur les affluents) ne peuvent pas expliquer, à elles seules, les modifications des volumes charriés sur le Rhône. Les stocks disponibles dans les vallées, notamment celles du piémont alpin, auraient permis de compenser les réductions des apports amont (EGR, 2000 ; rapport V3D1A1). Toutefois, ce sont surtout les extractions massives au niveau de ces mêmes vallées, réalisées durant la seconde moitié du 20^{ème} siècle, qui ont privé le Rhône de ses apports sédimentaires naturels.

L'estimation précise des volumes prélevés sur les affluents est impossible à réaliser mais les rares données disponibles (dont EGR, 2000) donnent l'ampleur du phénomène : 17 hm³ extraits sur l'Arve entre 1950 et 1985 (soit 113 années de transport naturel), plus de 8 hm³ dans la traversée de Grenoble sur le Drac entre 1950 et 1970 (jusqu'à 550 000 m³/an), 400 000 m³/an sur l'Aigues en 1985, 250 000 m³/an sur la Drôme en 1975, 290 000 m³ sur l'Ardèche en 1983, 121 500 m³/an sur l'Eyrieux au début des années 1980, etc.

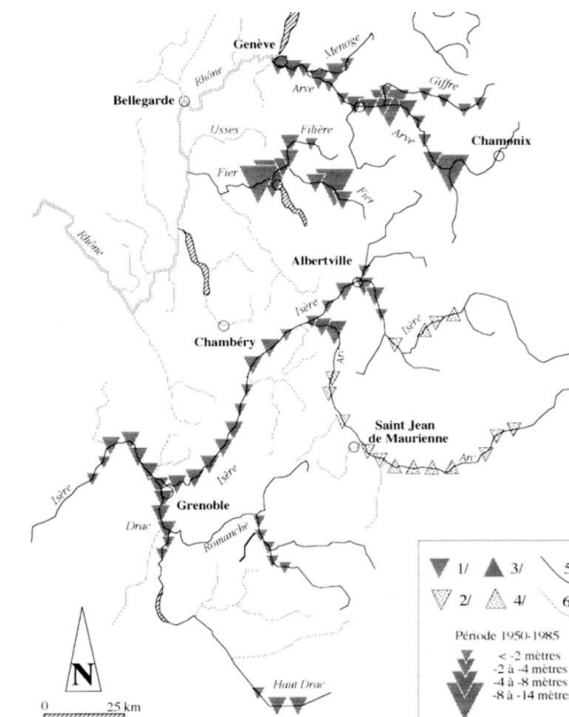


Figure 42 : Principales zones d'incision sur les rivières des Alpes du Nord (Peiry, 1994)

Ces extractions, couplées à la construction de barrages sur les affluents, ont conduit à des incisions notables sur une grande partie des affluents, aussi bien dans les Alpes du Nord (Peiry et al., 1994) que pour les affluents du Rhône moyen (Landon, 1996). L'Isère est un exemple typique de cours d'eau ayant subi de très fortes extractions (dans l'agglomération de Grenoble notamment), ainsi que des aménagements de barrages dans sa basse vallée, et qui n'est plus en mesure d'apporter des graviers au Rhône alors que sa contribution historique est estimée entre 50 000 et 100 000 m³/an de graviers et galets (EGR, 2000).

Ainsi, la plupart des affluents sont concernés par une réduction drastique de leurs apports au Rhône qui résultent 1) des extractions dans le bassin versant qui ont créé de réels déficits ; 2) des barrages dans la partie aval des affluents, 3) des endiguements qui bloquent les possibilités de recharge latérale.

Toutefois, toutes les situations des affluents ne sont pas comparables. Les volumes d'extraction ou l'implantation de barrages ne traduisent pas systématiquement des déficits directs au niveau du Rhône : le transport solide peut en effet se reconstituer avec des apports d'affluents secondaires ou par érosion au sein de l'espace de mobilité. C'est le cas par exemple de la rivière d'Ain, qui continue à apporter des flux significatifs au Rhône, malgré le blocage des apports du bassin versant dans des retenues, grâce aux érosions et au déstockage dans son espace de mobilité.

Inversement, on notera que, avant toute phase d'aménagement, de nombreux affluents n'avaient pas achevé leur continuité sédimentaire vers le lit du Rhône en entrant dans sa vallée. En effet, certains cours d'eau comme le Roubion, l'Aigues, l'Ouvèze provençale, et probablement la Drôme, avant d'être endigués dans leur basse vallée, s'étaient sur un large cône de déjection. Ainsi, les dépôts sur ce cône de déjection étaient importants et une proportion très réduite de leur flux sédimentaire initial atteignait le Rhône.

La PARTIE C / §.3.3 permet de synthétiser les contributions actuelles des affluents au Rhône, autant en charriage qu'en matière en suspension.

2.5.4 Une incision du lit complétée par les extractions dans le Rhône

Au-delà du tarissement des apports en provenance de ses affluents, le Rhône lui-même a subi des extractions massives dans son lit et sa plaine alluviale, comme démontré en partie §.2.4.4. Ces extractions se sont mises en place pour l'essentiel à partir des années 1950 à 1970, c'est-à-dire après les principaux effets d'incision liés aux aménagements Girardon, et de façon plutôt concomitante avec les aménagements CNR, qui ont parfois bénéficié de la fourniture en matériaux. Peu d'extractions ont été menées dans des linéaires de (futurs) Vieux Rhône courants, déjà taris et pavés du fait de l'incision. Les extractions se sont focalisées sur les retenues et queues de retenues, dont certaines recevaient justement les derniers apports liés à l'incision post-aménagement Girardon, ou des apports d'affluents.

Depuis la thèse de Parrot (2015), il est considéré que la part de ces extractions dans l'incision du lit de 0,46 m sur la période post-aménagement est 0,14 m en moyenne à l'aval de Lyon (cf. Figure 45). Ce calcul est basé sur un volume total de 12,5 hm³ de sédiments enlevés. Ce chiffre est tiré du bilan des extractions établi dans l'EGR sur la période 1970-1998.

Or, la partie §.2.4.4 a montré que les extractions en aval de Lyon pourraient atteindre 49,9 hm³ au maximum, soit 4 fois plus que la donnée EGR. Aussi, à ce stade, la valeur de 0,14 m d'incision due aux extractions apparaît largement sous-estimée ; l'incision réellement due aux extractions pourrait être, en ordre de grandeur, 4 fois supérieure et ainsi se rapprocher de l'incision totale de 0,46 m. Toutefois, une analyse plus fine serait à mener en fonction de la localisation des sites d'extractions afin de vérifier qu'ils ont effectivement contribué à l'incision du lit du Rhône (certaines extractions correspondaient à des dragages énergétiques dans des chenaux de restitution d'usine). Quoiqu'il en soit, cette analyse complémentaire tendrait à montrer que l'impact hydraulique des aménagements de la concession CNR sur l'évolution du lit a été très faible par rapport au rôle joué par les extractions.

Le fleuve a donc connu au cours de cette période une réduction drastique des apports grossiers externes et une consommation de son propre stock en lit mineur.

Ultérieurement, les aménagements CNR n'ont certes pas favorisé la continuité via les barrages en réduisant la capacité de charriage dans les retenues, mais ils ont aussi ralenti l'incision dans les Vieux Rhône – jusqu'à la stopper pour la plupart des RCC du fait du pavage – en réduisant la fréquence des débits morphogènes comme le développe la partie suivante.

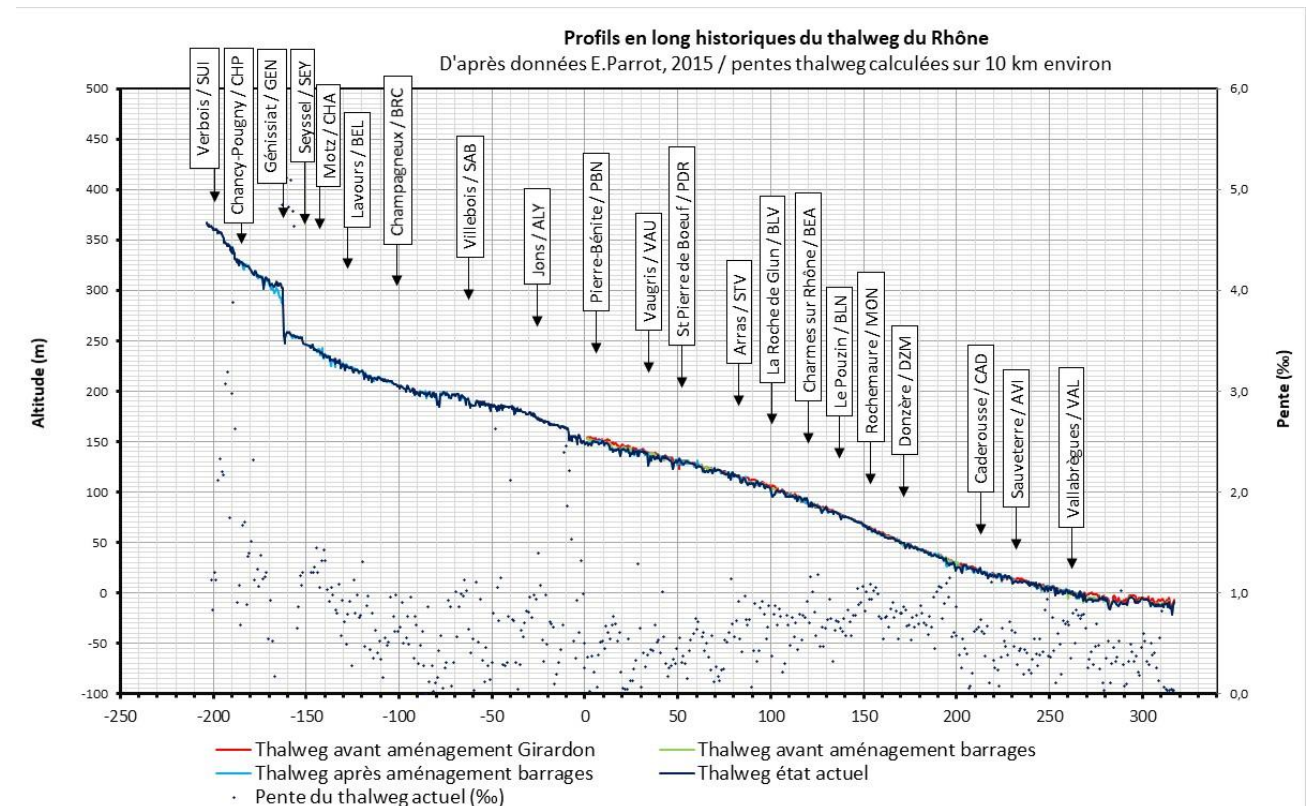


Figure 43 : Profils en long historiques du thalweg du Rhône

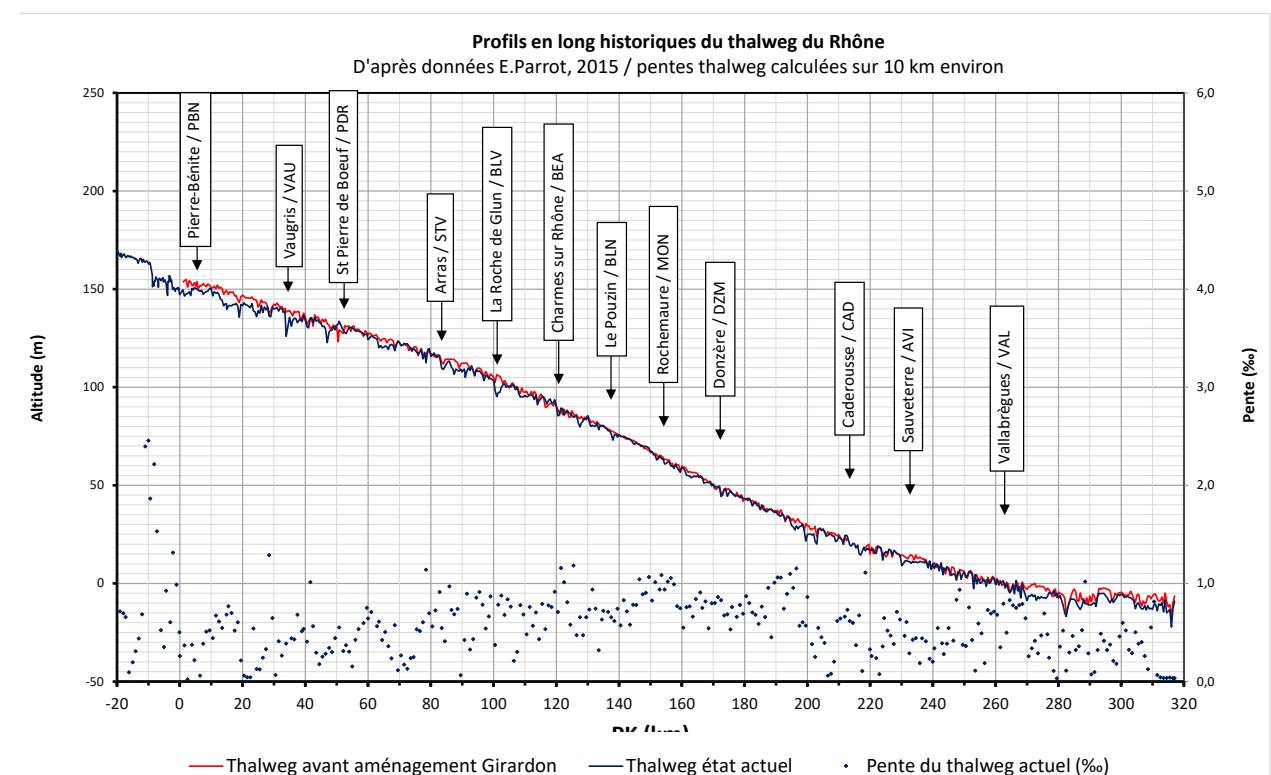


Figure 44 : Profils en long historiques du thalweg du Rhône (zoom sur le Rhône aval)

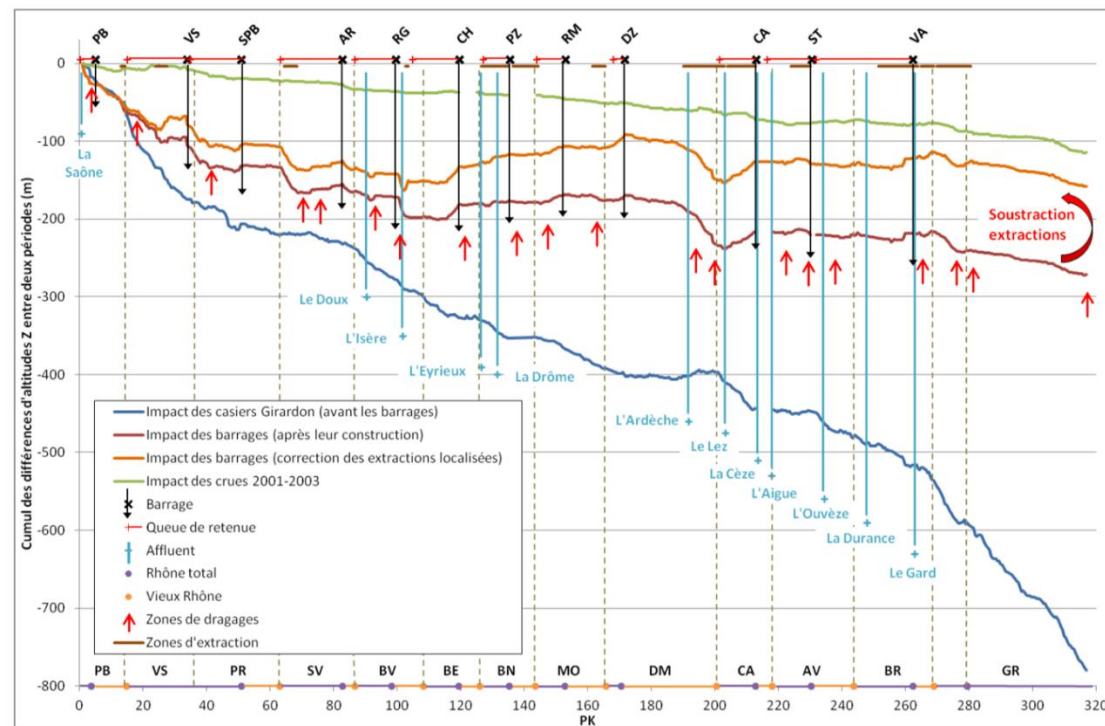


Figure 45 : Cumul altimétrique de l'incision du lit du Rhône à l'aval de Lyon pour la période pré-aménagement et post aménagement CNR (source : Parrot, 2015)

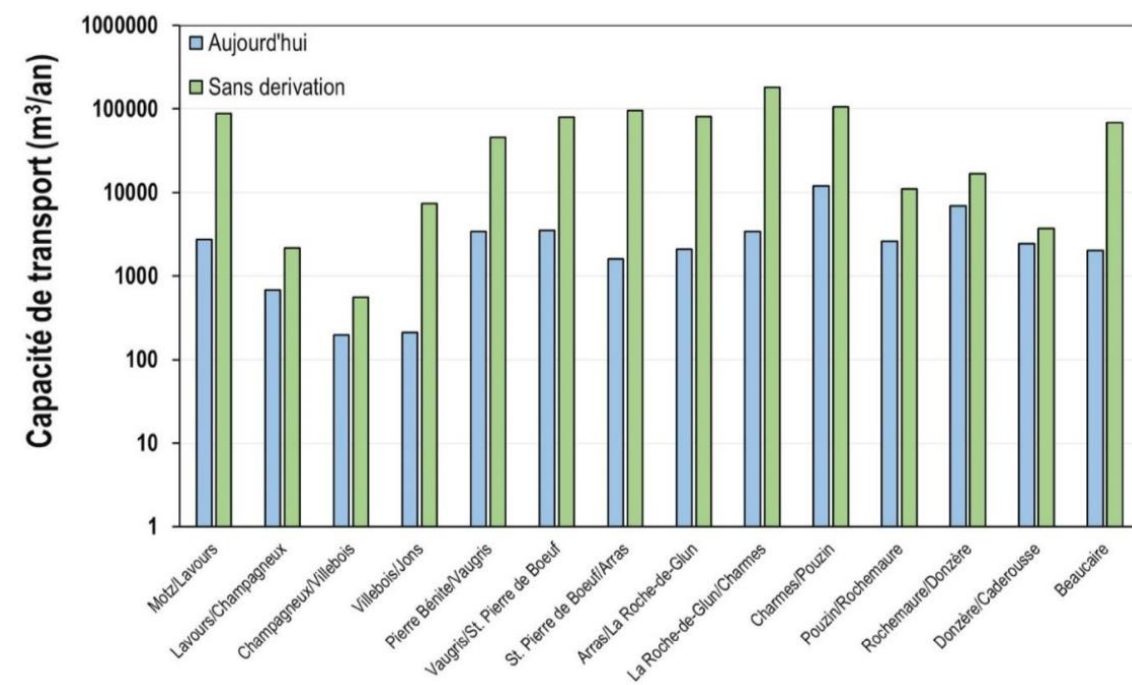


Figure 46 : Capacités de transport par RCC avant et après aménagements CNR (source : OSR4-Evolutions morphodynamiques du chenal sur le long-terme, 2017)

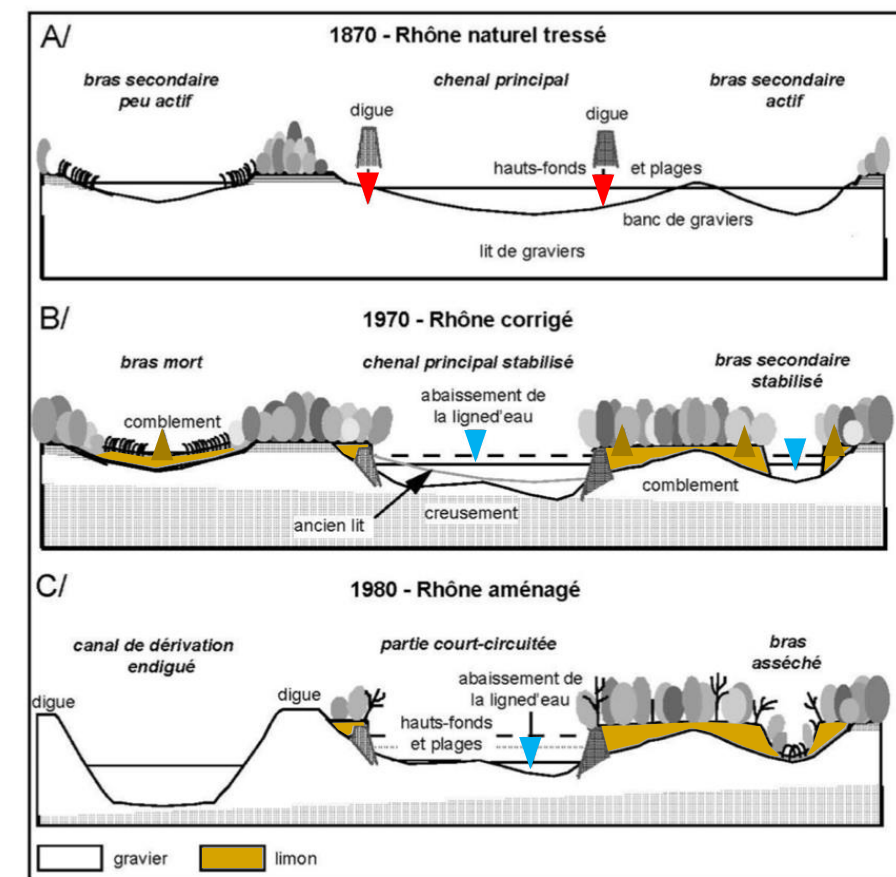


Figure 47 : Schémas de l'évolution morphologique du Rhône depuis le milieu du 19^{ème} siècle (source : en haut, Parrot, 2015 repris de Persat et al., 1995 ; en bas, CNR / C. Mora)

2.5.5 Des aménagements hydroélectriques réduisant les capacités de charriage

Les effets des aménagements hydroélectriques du Rhône sur son transport solide sont globalement bien connus (EGR, 2000 ; OSR4, 2017). L'impact de ces aménagements sur le transit des graviers est lié à deux grands facteurs : la perturbation du régime des pentes dans les retenues et la perturbation du régime des débits dans les tronçons court-circuités.

Si on décline le transit des graviers dans un aménagement type « en feston » du Rhône, on peut identifier quatre types de secteurs : la retenue, le barrage de retenue, le Rhône court-circuité, la restitution. Les rôles de ces tronçons sur le fonctionnement hydrosédimentaire sont rappelés ci-après.

Par la suite, dans la PARTIE C, ces questions vont être approfondies et associées à des indicateurs quantifiés, notamment à travers les estimations des diamètres maximums remobilisables et les capacités de charriage annuelles moyennes (§.5.1.).

► La retenue

Bien que ces ouvrages soient équipés de vannes de fond mobiles qui permettent l'évacuation des sédiments accumulés derrière le barrage, il est globalement admis que l'effet retenue des barrages perturbe le transit de la charge grossière (dont la taille est supérieure aux sables grossiers, c'est-à-dire 2 mm).

En effet, la réduction des pentes au niveau des retenues ralentit, voire stoppe, la circulation des matériaux grossiers. Cet effet de barrage sur la pente est d'autant plus important que les débits sont faibles. Ces diminutions de pente se réduisent en cas de crue quand les débits d'équipements des canaux usiniers sont dépassés, grâce à l'ouverture progressive des vannes du barrage.

Globalement, la réduction de la pente qui assure les forces tractrices dans les retenues a diminué de 2 à 3 fois les contraintes de cisaillement et de 10 à 15 fois les capacités de transport dans les retenues (OSR4, 2017). Au final, les capacités de franchissement de la charge grossière sont donc très réduites. Toutefois, il est important de garder à l'esprit que seule une connaissance précise de la granulométrie et de la stratigraphie du lit dans les retenues permettrait de juger précisément de la transparence des ouvrages.

La formule de calcul de charriage peut avoir son importance également : dans l'OSR4, la formule de Recking, intégrant les sables, est utilisée ; ainsi, en apparence, les volumes charriés ne sont pas négligeables, mais la part de matériaux grossiers est très faible. Dans l'EGR, la formule de Lefort n'intègre pas les sables et les volumes charriés sont négligeables ; un calcul montre que la retenue de Vaugris pourrait transiter seulement 1/6 du charriage annuel tous les 5 à 10 ans (soit 5 000 m³). Aussi, le ratio précédent, de 10 à 15 fois moins que la capacité avant aménagement, est en réalité bien plus élevé pour les matériaux grossiers.

Une analyse fine des processus en jeu au niveau de la retenue de Bourg-lès-Valence (OSR4 ; Dépret et al., 2017) indique que le transit d'une charge grossière (ici les sédiments curés au niveau de la confluence du Doux) au travers de la retenue est peu réaliste sans un changement des consignes de gestion des ouvrages. La simulation d'une chasse liée à une crue cinquantennale (Q50) indique qu'au minimum ¼ de la charge réinjectée resterait piégée dans la retenue. En ce qui concerne la charge plus fine (sables et limons), les bilans sédimentaires réalisés par comparaisons des données bathymétriques montrent que cette fraction granulométrique est, en revanche, exportée vers l'aval par les crues les plus importantes.

► Le barrage de retenue

Lorsque le débit du Rhône dépasse le débit d'équipement de la dérivation, les vannes du barrage sont progressivement ouvertes. L'ouverture des vannes de fond permettrait la chasse des matériaux déposés à l'amont immédiat du barrage. Il serait cependant abusif de parler alors de « transparence du barrage » (EGR, 2000).

En effet, tant qu'il demeure une perte de charge au barrage, la pente amont est inférieure à la pente naturelle, et ne permet qu'un transit partiel des graviers jusqu'au barrage. Ce n'est que lorsque que la perte de charge au barrage devient négligeable que l'on peut véritablement parler de transparence totale.

L'absence de perte de charge est théoriquement atteinte pour une crue centennale mais des différences significatives demeurent y compris pour des crues exceptionnelles : par exemple, si les barrages de Vaugris (12-VAU), de Beauchastel (16-BEA) ou de Donzère (19-DZM) sont transparents ou quasiment en crue exceptionnelle, les pertes de charges sont encore de 3,10 m en Chautagne (05-CHA), de 3 m à Brégnier-Cordon

(07-BRC), de 3,80 m à Péage de Roussillon (13-PDR), de 1,60 m à Baix-Logis-Neuf (17-BLN), et de 2 m à Montélimar (18-MON) (EGR - V3D1A1, 2000, p.43 ;).

Dans tous les cas, sur des périodes courtes, l'ouverture des vannes de fond permettrait l'évacuation des sédiments accumulés devant le barrage, mais pas le transit de toute la charge de fond stocké dans la retenue en amont.

► Le Rhône court-circuité

Du fait des dérivations, dont le débit d'équipement aux usines est supérieur au module du Rhône, la fréquence des débits morphologiquement actifs est fortement diminuée, ce qui réduit d'autant la capacité de transport dans les RCC. En outre, une partie des RCC est sous l'influence de la retenue aval, même en forts débits. Les effets de la réduction de la pente motrice se cumulent alors à la réduction des débits.

D'après l'OSR4 (2017), du fait de l'écêtement des crues les plus fréquentes dans les RCC, les capacités de transport actuelles sont entre 15 et 25 fois inférieures à la situation avant aménagement (OSR4 ; Vázquez-Tarrío, 2018).

Les ratios précédents sont également à nuancer en fonction de la granulométrie retenue et de la formule de transport solide utilisée. L'EGR (2000) indique par exemple que pour le RCC de Donzère-Mondragon, pour un aménagement où la dérivation est proportionnellement plus faible qu'ailleurs (ce qui signifie un impact moindre sur la capacité de charriage du RCC), la capacité de charriage résiduelle représente 6% de la capacité avant aménagement (soit un ratio de 17).

► La restitution

A l'aval de la restitution, le Rhône retrouve tout son débit. En revanche, les apports solides sont limités à la capacité de transit dans le RCC, puisque la prise d'eau du canal d'amenée est conçue pour éviter toute entrée de graviers dans la dérivation. En théorie, on attendrait un « effet d'eau claire », conduisant à une érosion progressive du lit. En réalité, la restitution a toujours lieu dans le remous de la retenue aval (sauf en aval de Vallabrègues dans le Palier d'Arles). La puissance érosive du débit restitué est donc limitée par la faiblesse de la pente motrice.

2.5.6 Des aménagements hydroélectriques favorisant les dépôts de fines

Dans un fleuve comme le Rhône avant aménagement, le rôle des matériaux fins et sableux sur la morphologie du lit était peu structurant, en dehors de secteurs de faible pente comme l'ombilic des Basses Terres sur Sault-Brénaz ou la Camargue. Les secteurs enlimonés ou ensablés pouvaient être repris par érosion latérale, à mesure que le Rhône développait des mobilités latérales.

Les travaux de fixation du lit, notamment pour la navigation, ont supprimé la capacité de divagation du Rhône, et donc de remobilisation des limons déposés sur les marges boisées. Les crues débordantes continuent de déposer des matières en suspension, mais ces dépôts ne peuvent plus être remis en mouvement par déplacement du bras vif : seul l'écoulement de surface peut assurer un certain autocurage, mais uniquement dans l'axe des lônes si elles ont conservé une capacité d'écoulement suffisante. Sur le reste du lit moyen boisé, les dépôts ne peuvent plus être repris. L'exhaussement des marges boisées, notamment des casiers Girardon, a donc pris dès la fin du 19^{ème} siècle un caractère irréversible. Ce processus de colmatage s'autoentretient : le dépôt de fines favorise le développement de la végétation, qui à son tour piège les sédiments fins.

Cet exhaussement inéluctable a 2 principales conséquences : la réduction de la capacité d'écoulement des crues ; la disparition de milieux alluviaux humides au profit de formations plus sèches. Les bancs vifs peuvent se voir également enlimoner, ce qui conduit la CNR à procéder à des opérations de charriage sur ces bancs.

Si l'aménagement CNR a ralenti les processus de sédimentation dans les Vieux Rhône en réduisant la fréquence des crues débordantes, il a augmenté les phénomènes de sédimentation de fines et sables dans les retenues, surtout en aval d'affluents tributaires en MES (Arve, Fier, Saône, Isère, Durance) et dans des secteurs de surlargeur. Les phénomènes sont étroitement liés à l'occurrence des petites crues et événements de chasse qui favorisent les accumulations, et à l'occurrence des crues exceptionnelles comme 2002-2003 qui sont en mesure de remobiliser les accumulations. Les bilans sédimentaires de la PARTIE C / §.4.2 viendront préciser ces phénomènes qui présentent un enjeu pour la sûreté des ouvrages et le respect des usages socio-économiques.

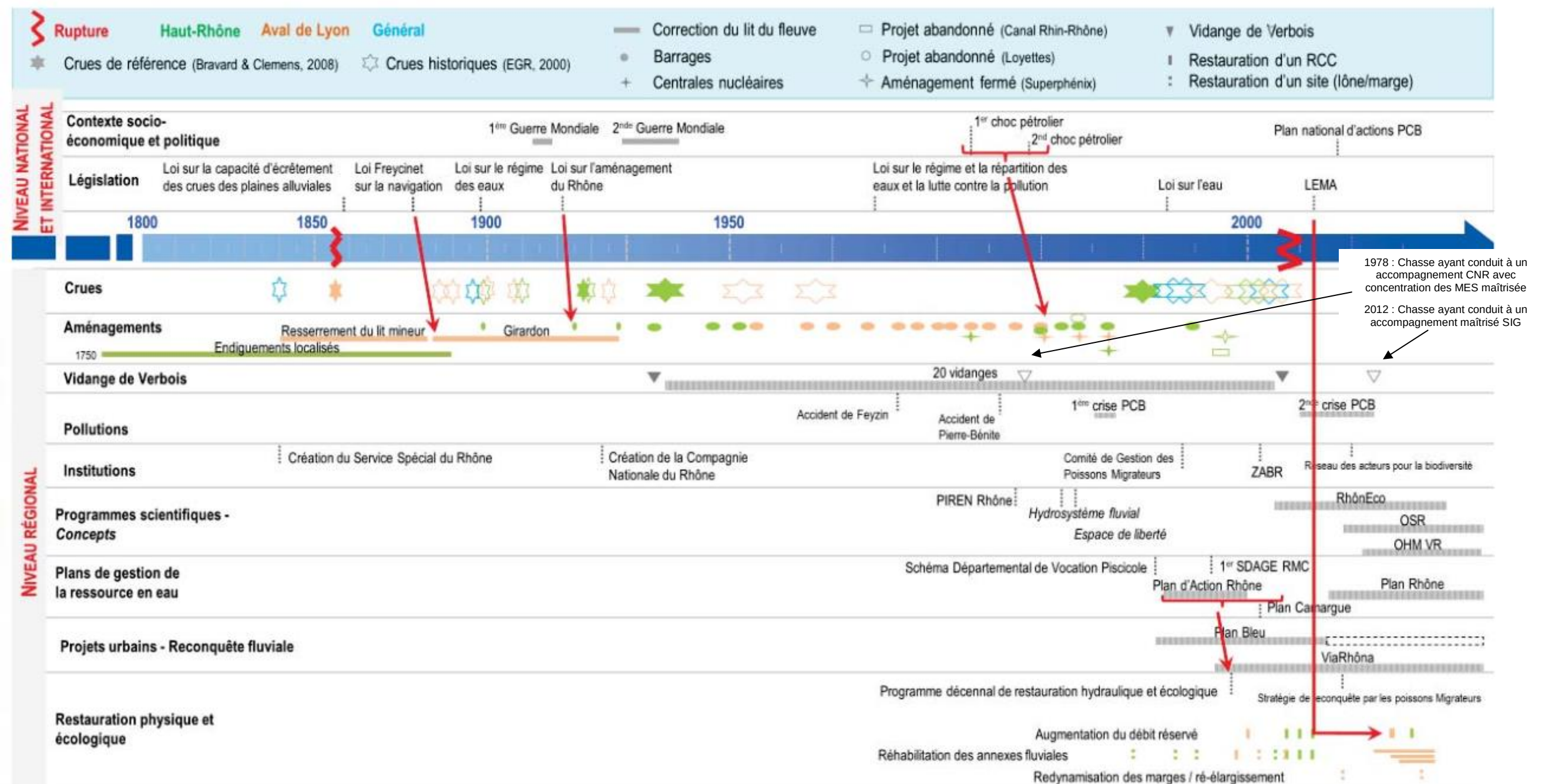
2.5.7 Un contexte sociétal en perpétuelles évolutions

Les aménagements du Rhône présentés dans les parties précédentes se sont développés dans des contextes sociétaux, économiques, réglementaires en perpétuelles évolutions. Les besoins et les attentes des populations et des acteurs économiques ont fortement évolué depuis les premiers aménagements qui cherchaient à dompter les colères du fleuve jusqu'aux considérations écologiques et énergétiques actuelles.

Ces problématiques sont résumées par une maquette de frise chrono-systémique établie dans le cadre de l'Observatoire Hommes-Milieus (OHM) en 2017.

Figure 48 : Maquette de frise chrono-systémique complétée (d'après OHM, 2017)

http://ohm-vallee-du-rhone.in2p3.fr/images/pdf/43-WEB_FicheSyntheseOHMVR_Arnaud_2018_DRM.pdf



PARTIE C. PROCESSUS HYDROSÉDIMENTAIRES ACTUELS



1. Fonctionnement hydrologique et hydraulique

La connaissance de l'hydrologie du Rhône est essentielle pour bien comprendre le fonctionnement hydrosédimentaire.

L'hydrologie du fleuve en crue est relativement bien connue grâce aux études réalisées par le passé (EGR, 2000), ainsi qu'aux études plus récentes qui ont actualisé la connaissance : étude DREAL pour l'actualisation de l'hydrologie des crues du Rhône (Hydroconsultant-IRSTEA, 2018).

Pour les étiages et débit moyens, les études de référence sont l'EGR (2000 et l'étude de la gestion quantitative du fleuve Rhône à l'étiage réalisée par BRLi (2014) pour l'Agence de l'Eau.

Par la suite, l'état des connaissances en hydrologie est rappelé pour les débits caractéristiques suivants :

- Module et débit semi-permanent ;
- Etiage ;
- Plus hautes eaux navigables ;
- Crues historiques, crues de référence, crues caractéristiques.

La partie se termine avec un volet sur les impacts du changement climatique et sur le rôle hydraulique des ouvrages.

1.1 Hydrologie caractéristique en étiage et module

1.1.1 Module et débit semi-permanent

► Fonctionnement courant du Rhône

Le bassin du Rhône est soumis à deux influences climatiques : le climat océanique aux pluies abondantes de la saison froide, le climat méditerranéen aux violentes pluies d'automne.

La variété des climats et régions drainées confère au Rhône un régime complexe qui regroupe trois composantes : glaciaire, nivale et pluviale. Par cette triple alimentation, les apports du Rhône sont diversifiés et abondants toute l'année, ce qui lui donne un régime saisonnier assez régulier qui présente des nuances tout au long de son cours (Le Rhône en 100 questions ; Bravard et al., 2010) :

- Le Rhône à l'amont du lac Léman, fortement marqué par les glaciers alpins, présente un régime glaciaire avec des apports maximaux pendant les mois de juin, juillet et août ;
- Le Rhône Alpestre, le Haut Rhône français ainsi que l'Isère ont un régime nivo-glaciaire aux hautes eaux d'été, le Rhône alpestre ayant aussi un régime glaciaire ;
- La Saône et l'Ain ont un régime océanique avec de hautes eaux hivernales dues aux pluies et de basses eaux estivales. L'influence nivale de l'Ain gonfle les débits printaniers du fleuve ;
- Les affluents méditerranéens du Rhône aval connaissent de sévères étiages estivaux et des crues rapides en automne ;
- Le Rhône aval présente un régime hydrologique inverse de celui de son cours supérieur avec de hautes eaux de printemps et d'automne et de basses eaux en été et en hiver.

La plus faible variabilité mensuelle du régime du Rhône français est constatée à Lyon avec une amplitude variant de 80 à 115 % par rapport au module annuel. La plus forte est mesurée à la sortie du Léman avec une amplitude comprise entre 75 et 150 %. Elle est de 65 à 120 % à l'embouchure.

Par son module interannuel le Rhône se positionne au 48^e rang mondial. Toutefois son débit spécifique, rapporté à la superficie de bassin versant, le classe à égalité avec de grands fleuves tels que l'Amazonie. Les situations d'étiage extrêmes sont rares grâce à la diversité des apports et en particulier grâce au tribut estival des glaciers alpestres.

► Effets du Lac Léman

Le Léman a deux influences majeures sur le Rhône :

- La décantation des eaux alpestres chargées en sédiments ;
- La modulation des débits par l'amortissement des crues estivales et le soutien des étiages hivernaux.

Le niveau du lac Léman est régulé depuis 1884, d'abord avec la construction du Pont de la Machine, puis avec la mise en service, en 1995, du barrage de Seujet à Genève. L'objectif premier est de diminuer les risques de crues. Il s'agit d'abaisser la cote du lac au début du printemps afin de stocker sans dommage la crue de fonte estivale, dont les débits peuvent dépasser la capacité d'évacuation du Rhône à Genève égale à 560 m³/s au niveau du barrage du Seujet.

Le processus de régulation du lac est encadré essentiellement par des textes suisses (hors France) :

- L'acte intercantonal de 1984. Il conserve la correction et la régularisation de l'écoulement des eaux du lac entre les cantons de Genève, de Vaud et du Valais. Il fixe les niveaux minimum et maximum du Léman à 371,70 msm (correspondance NGF) et 372,30 msm ;
- Le règlement de 1997 sur la manœuvre de l'ouvrage de régulation du niveau du lac Léman à Genève. Il fixe des niveaux cibles pour chaque période de l'année afin en particulier d'abaisser le niveau du lac en hiver, pour qu'il puisse recevoir les eaux de fonte estivale sans rehaussement excessif ;
- Les modalités d'application de ce texte. Elles fixent le domaine de régularisation des niveaux du lac ainsi que le débit minimum sortant du lac : 100 m³/s du 1er mai au 30 septembre, 50 m³/s du 1er octobre au 30 avril.

En aval du Seujet, le Haut Rhône est alimenté par des affluents dont l'Arve, cours d'eau majoritairement français, qui rejoint le Rhône à Genève 10 km en aval du lac Léman. À 20 km en aval du Seujet se trouve le barrage suisse de Verbois, puis, dans la zone où le Rhône sert de frontière, le barrage de Chancy-Pougny.

► Valeurs du module et du débit semi-permanent

Le débit semi-permanent est le débit moyen journalier dépassé six mois dans l'année, ou débit représentant la valeur Q50% sur une courbe des débits classés.

Le module interannuel est la moyenne des débits moyens annuels, ces débits étant eux-mêmes évalués en faisant la moyenne des débits journaliers. Les modules ont été estimés sur le Rhône lors de l'EGR (2000). Ces valeurs qui font référence ont été utilisés dans la présente étude (cf. Tableau 8).

A noter que les modules ont été actualisés à l'aide de l'étude BRLi (2014). Les modules sont en légère baisse sur le Rhône aval, étant entendu qu'il s'agit plus d'une précision sur les débits qu'une baisse réelle. Ils sont en légère hausse sur le Haut-Rhône.

La répartition entre Petit Rhône et Grand Rhône est supposée égale à 10% pour le premier et 90% pour le second pour les débits moyens.

On notera que plusieurs transferts avec des bassins versants externes peuvent influencer le débit du Rhône :

- L'aménagement hydroélectrique de Montpezat en Ardèche (19-DZM), connecté à la Fontaulière, affluent de la rivière Ardèche, induit un apport d'environ 200 hm³/an depuis le bassin de la Loire vers l'Ardèche, affluent du Rhône, avec des débits de l'ordre de 6 à 10 m³/s d'octobre à mars et de 2 à 3 m³/s en été ;
- A contrario, l'aménagement hydroélectrique de la Durance (21-AVI) dérive actuellement vers l'étang de Berre, situé en dehors du bassin, un volume moyen de 900 hm³/an. Cette dérivation représente un débit exporté moyen compris entre 25 et 50 m³/s pour les mois de septembre à mai, et de l'ordre de 10 m³/s pour les mois de juin, juillet et août (BRLi, 2014) ;
- Le canal d'irrigation Bas-Rhône-Languedoc (23-ARL) soutire des débits qui sortent du bassin versant, avec un débit moyen annuel de 5,2 m³/s ;
- Les captages de Nîmes-Beaucaire (22-VAL) alimentent des communes hors bassin versant, mais leur production annuelle moyenne est relativement négligeable pour l'hydrologie du Rhône (environ 0,5 m³/s en moyenne annuelle).

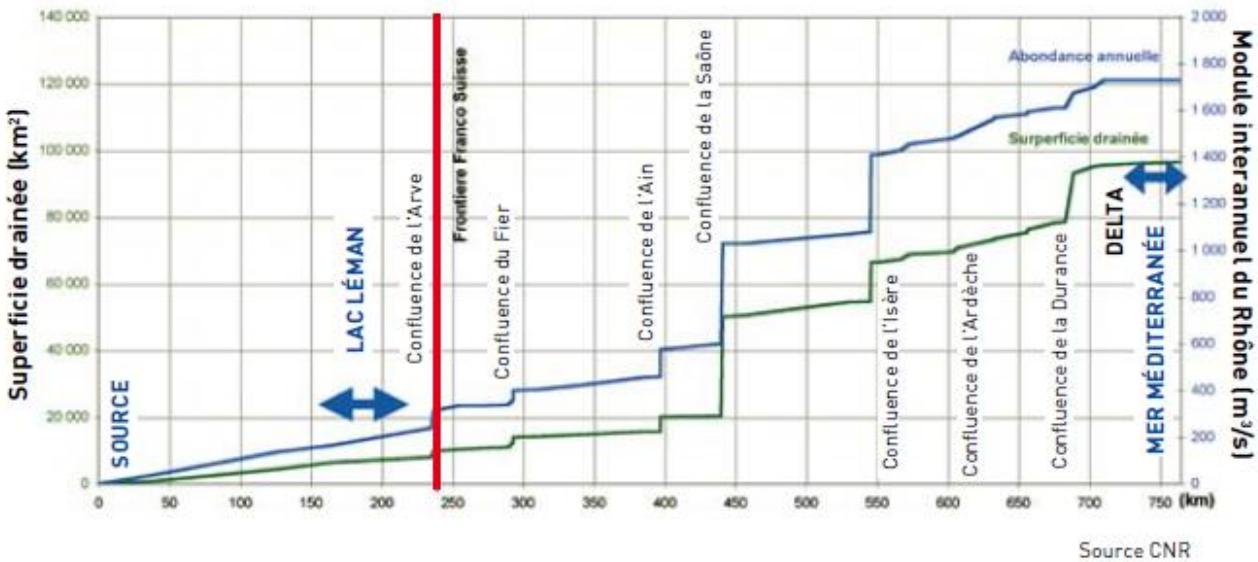


Figure 49: Evolution du module interannuel (le Rhône en 100 questions)

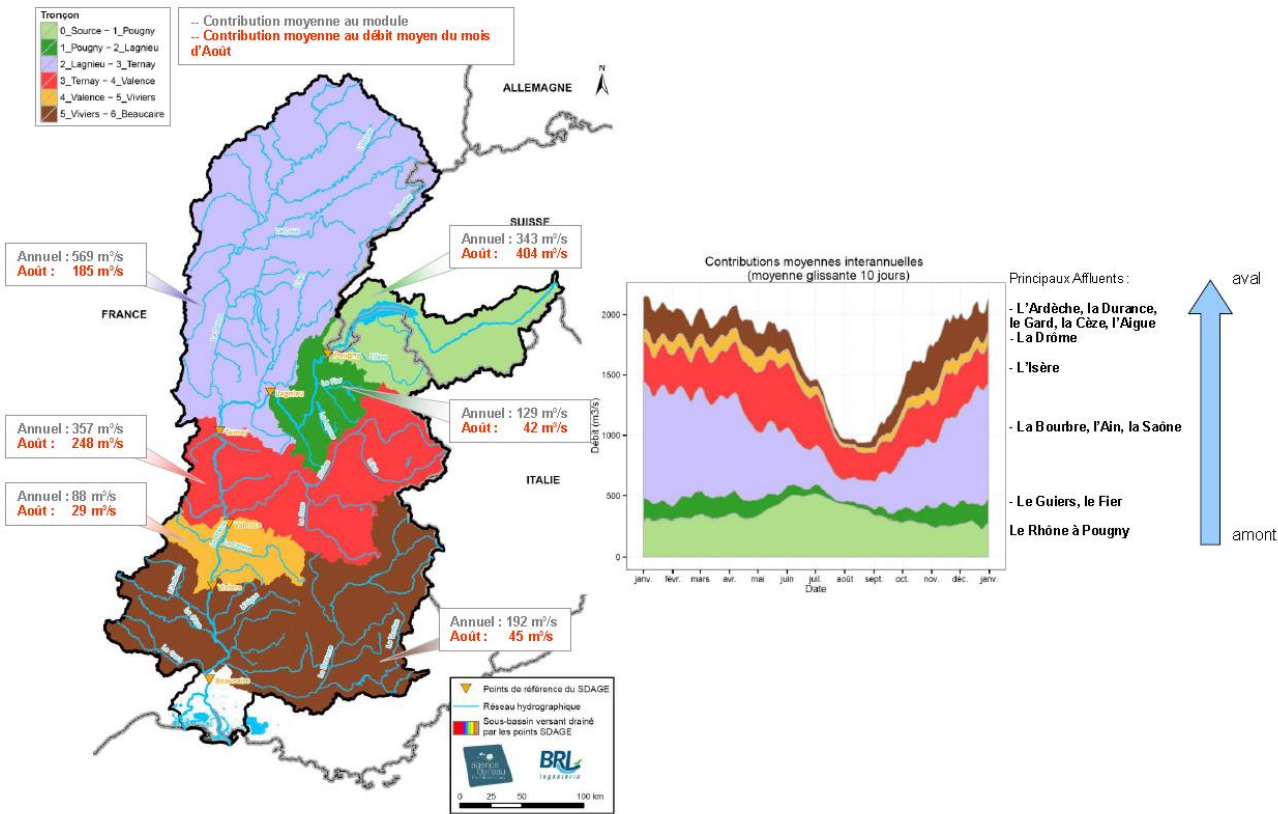


Figure 50: Contribution des affluents dans le régime hydrologique du fleuve (BRLi, 2014)

Tableau 8 : Synthèse des débits semi-permanents et module par UHC

N°UHC	UHC	Ouvrage	Etiage (m³/s)		Module (m³/s)		
			VCN10 moyen (EGR, 2000)	VCN10 moyen (d'après BRLi, 2014)	Q semi-permanent (CNR)	Module (EGR, 2000)	Module (d'après BRLi, 2014)
01-SUI	Suisse (Seujet)	Seujet				241	
01-SUI	Suisse (Verbois)	Verbois				330	343
02-CHP	Chancy-Pougny	Chancy-Pougny		153		330	343
03-GEN	Génissiat	Génissiat	120	153		330	343
04-SEY	Seyssel	Seyssel	140	179	340	330	343
05-CHA	Chautagne	Motz	155	198	315	335	348
06-BEL	Belley	Lavours	160	204	350	400	416
07-BRC	Brégnier Cordon	Champagneux	165	210	380	400	416
08-SAB	Sault-Brénaz	Villebois	175	217	400	441	458
09-VUL	Saint-Vulbas	-	175	217	400	450	472
10-ALY	Ain-Lyon	Jons	260	322	400	590	619
11-PBN	Pierre-Bénite	Pierre-Bénite	220	273	550	590	619
12-VAU	Vaugris	Vaugris	320	398	820	1 030	1 041
13-PDR	Péage de Roussillon	St-Pierre-de-Bœuf	320	398	835	1 030	1 041
14-STV	Saint-Vallier	Arras	340	423	840	1 030	1 041
15-BLV	Bourg-lès-Valence	La-Roche-de-Glun	340	423	850	1 030	1 041
16-BEA	Beauchastel	Charmes-sur-Rhône	500	578	1 350	1 400	1 398
17-BLN	Baix Logis Neuf	Le Pouzin	560	647	1 390	1 500	1 498
18-MON	Montélimar	Rochemaure	560	647	1 360	1 500	1 498
19-DZM	Donzère Mondragon	Donzère	590	619	1 400	1 500	1 486
20-CAD	Caderousse	Caderousse	530	556	1 300	1 600	1 585
21-AVI	Avignon	Avignon + Sauveterre	565	686	1 360	1 600	1 585
22-VAL	Vallabrègues	Vallabrègues	565	686	1 320	1 700	1 678
23-ARL	Palier d'Arles	-	565	686	1 360	1 700	1 678
24-GRH	Grand Rhône	-			1 224	1 530	1 510
25-PRH	Petit Rhône	-			136	170	168

en italique : valeur interpolée

1.1.2 Etiages

► Dynamique des étiages du Rhône

Les étiages sont décrits dans le « Le Rhône en 100 questions » (Bravard et al., 2010) à partir des données de l'EGR (2000). Ils ont été actualisés en 2014 pour les stations repères du Rhône dans le cadre l'étude de la gestion quantitative du fleuve Rhône à l'étiage pour l'Agence de l'Eau (BRLi, 2014).

Les étiages du Haut Rhône, qui étaient hivernaux en Suisse, ont été atténués par la gestion des réservoirs d'altitude. Dans le bassin français les étiages ne sont jamais extrêmes grâce à la modulation artificielle du Léman qui soutient les débits pendant la saison froide. Les étiages du Rhône aval sont rarement extrêmes puisque la faiblesse des apports d'une partie du bassin est compensée par l'abondance relative due à une autre partie du territoire rhodanien.

L'apparition d'une situation d'étiage sur le Rhône est progressive. Elle est observée de la fin de l'été au début de l'automne et fait suite à une sécheresse estivale. Le tribut des glaciers alpestres empêche les étiages extrêmes d'apparaître avant la mi-septembre. Un étiage hivernal secondaire, moins marqué, peut se produire de janvier à février, suite aux effets d'un automne sec et à l'arrivée du froid et de la neige.

Le contraste souligné entre les différentes zones climatiques du bassin versant se retrouve dans le régime des affluents qui connaissent des basses eaux décalées. Ce décalage atténue les étiages du Rhône lui-même.

Selon la courbe du régime moyen, les plus basses eaux du Rhône surviennent en hiver sur ses tronçons les plus amont, en octobre entre la sortie du Léman et la confluence avec l'Ain et en août pour le tronçon situé entre cette confluence et l'embouchure.

Le bassin amont contribue remarquablement au débit estival. Alors que sa surface ne représente que 8 % du bassin, la zone située entre la source et la confluence avec l'Arve (à l'aval de la sortie du Léman) représente par exemple, en moyenne, 40 % du débit du Rhône à Beaucaire pendant le mois d'août (Figure 50).

Le contraste souligné entre les différentes zones climatiques du bassin versant se retrouve dans le régime des affluents qui connaissent des basses eaux décalées. Ce décalage atténue les étiages du Rhône lui-même.

Selon la courbe du régime moyen, les plus basses eaux du Rhône surviennent en hiver sur ses tronçons les plus amont, en octobre entre la sortie du Léman et la confluence avec l'Ain et en août pour le tronçon situé entre cette confluence et l'embouchure.

► Débits d'étiages caractéristiques

Les débits d'étiage sont définis par le VCN10, correspondant au plus petit débit glissant sur 10 jours d'une année hydrologique.

La synthèse des débits d'étiages (VCN10) par UHC est présentée dans le Tableau 8.

1.1.3 Plus hautes eaux navigables (PHEN)

La notion de PHEN est issue d'une volonté initiale de développer la navigation sur le Rhône et d'assurer sa navigabilité 355 jours par an, dans le respect d'une vitesse maximale du courant appréciée à 2 m/s environ. Dans l'histoire moderne de la navigation sur le Rhône, la navigation a été totalement interdite à une seule occasion, lors de la crue de décembre 2003, du fait de l'importance de la crue, des difficultés de navigation associées (vitesse du courant, balises moins visibles) et des flottants (bois mort, etc.) apportés en quantité par les affluents.

Cette notion de PHEN a évolué au cours des dernières années du fait de la question des risques associés et a été remplacée par la RNPC (restriction de navigation en période de crue). En effet, l'atteinte d'un niveau d'alerte RNPC (ex-PHEN) n'interdit pas strictement la navigation marchande, qui peut prolonger son parcours sous sa responsabilité tout en respectant les consignes de sécurité. En effet, les risques de navigation en hautes eaux portent sur le tirant d'air pour les ponts, ainsi que sur le tirant d'eau à proximité du barrage de dérivation après que le plan d'eau de retenue a basculé autour du point de réglage (cf. §.1.4.2).

Chaque équipage peut consulter les conditions de navigation en temps réel sur l'application InfoRhône de la CNR (communication CNR).

On notera que pour les UHC de Chautagne et de Belley, le débit de 1 100 m³/s est un débit de l'ordre d'une crue annuelle, très supérieur à la valeur de débit dépassé 10 jours par an. La navigabilité est donc assurée plus que 355 jours par an.

Tableau 9: Débits correspondant aux plus hautes eaux navigables par UHC (source CNR)

N°	Code	N°UHC	UHC	Ouvrage	PHEN
01	SUI	01-SUI	Suisse (Seujet)	Seujet	ND
01	SUI	01-SUI	Suisse (Verbois)	Verbois	ND
02	CHP	02-CHP	Chancy-Pougny	Chancy-Pougny	ND
03	GEN	03-GEN	Génissiat	Génissiat	760
04	SEY	04-SEY	Seyssel	Seyssel	760
05	CHA	05-CHA	Chautagne	Motz	1 100
06	BEL	06-BEL	Belley	Lavours	1 100
07	BRC	07-BRC	Brégnier Cordon	Champagneux	850
08	SAB	08-SAB	Sault-Brénaz	Villebois	940
09	VUL	09-VUL	Saint-Vulbas	-	ND
10	ALY	10-ALY	Ain-Lyon	Jons	ND
11	PBN	11-PBN	Pierre-Bénite	Pierre-Bénite	1 450
12	VAU	12-VAU	Vaugris	Vaugris	2 700
13	PDR	13-PDR	Péage de Roussillon	St-Pierre-de-Bœuf	2 700
14	STV	14-STV	Saint-Vallier	Arras	2 700
15	BLV	15-BLV	Bourg-lès-Valence	La-Roche-de-Glun	2 780
16	BEA	16-BEA	Beauchastel	Charmes-sur-Rhône	3 400
17	BLN	17-BLN	Baix Logis Neuf	Le Pouzin	3 630
18	MON	18-MON	Montélimar	Rochemaure	3 540
19	DZM	19-DZM	Donzère Mondragon	Donzère	3 580
20	CAD	20-CAD	Caderousse	Caderousse	3 580
21	AVI	21-AVI	Avignon	Avignon + Sauveterre	3 650
22	VAL	22-VAL	Vallabrègues	Vallabrègues	4 100
23	ARL	23-ARL	Palier d'Arles	-	4 100
24	GRH	24-GRH	Grand Rhône	-	ND
25	PRH	25-PRH	Petit Rhône	-	ND

1.2 Hydrologie caractéristique en crues

1.2.1 Dynamique des crues du Rhône

D'une manière générale le bassin du Rhône est soumis aux deux influences des climats océanique et méditerranéen. Cette double influence induit 4 grands types de crues (Le Rhône en 100 questions ; Bravard et al., 2010).

L'origine et l'importance des pluies et de leur ruissellement déterminent l'ampleur de la crue. On identifie donc :

- **les crues océaniques** : elles se produisent entre octobre et mars à la faveur de pluies amenées par les vents d'Ouest et intéressent principalement les bassins de la Saône, du Rhône alpestre, du Rhône supérieur et, dans une moindre mesure, de l'Isère. La régularité et la durée de ces précipitations sont à l'origine des fortes crues dites océaniques (type février 1990) ;
- **les crues cévenoles** : elles se forment presque exclusivement sur les bassins du rebord oriental du Massif Central, lors d'épisodes pluvieux qui prennent un caractère d'une extrême violence en septembre – octobre (type crue de septembre 2002 sur Gard, Cèze et Rhône aval). Elles relèvent autant de l'intensité des précipitations que de la morphologie des bassins compacts et plutôt imperméables ;
- **les crues méditerranéennes** : ces crues se différencient des crues cévenoles par leur apparition plus tardive (type novembre 1994, décembre 2003). L'extension spatiale des pluies peut concerner autant les Alpes du Sud que le couloir rhodanien ou les Cévennes. Certaines pluies méditerranéennes remontent jusqu'à la Saône et l'Ain ;
- **les crues généralisées** : elles affectent la globalité du bassin du Rhône et sont issues de l'enchaînement de plusieurs épisodes pluvieux océaniques et méditerranéens. Les pluies peuvent être simultanées (par exemple octobre 1840, mai 1856, octobre 1993, janvier 1994, novembre 2002). Pour provoquer une grande crue généralisée du Rhône, le bassin doit avoir reçu au préalable de grandes quantités d'eau.

Les crues exceptionnelles sont souvent dues à l'enchaînement de fortes pluies océaniques qui créent une crue importante sur le Rhône en amont de Valence puis de pluies méditerranéennes produisant des crues sur les affluents au Sud. Les crues méditerranéennes rapides peuvent alors être concomitantes avec la crue sur le fleuve provenant de l'amont.



Figure 51: Inondation à Avignon le 3 décembre 2003 (Dauphiné Libéré / P.Deleuil)

► Influence des affluents sur les crues du Rhône

Les grandes crues du Rhône résultent de la conjonction de crues même moyennes sur les affluents. Il est cependant très improbable que les crues de tous les affluents soient concomitantes avec celle du fleuve en raison de la géographie et des climats du bassin (Le Rhône en 100 questions ; Bravard et al., 2010).

La particularité des crues fortes à très fortes du Rhône trouve donc son origine dans la puissance de certains affluents comme l'Ain, la Saône, l'Ardèche et la Durance qui sont capables de générer localement une crue du fleuve et dans l'accumulation des débits des autres affluents (SAFEGE, 2014).

Ces affluents présentent différents régimes de crues (océaniques au nord bassin versant et cévenols / méditerranéens au sud) représentatifs de la diversité hydrologique présentes sur le bassin du Rhône.

Plusieurs affluents du Rhône présentent des ouvrages hydroélectriques disposant de capacités importantes (supérieure à 100 millions de m³) tels que la retenue de Vouglans sur l'Ain, Tignes sur l'Isère, Monteynard sur le Drac, Serre-Ponçon et Sainte-Croix sur la Durance.

L'incidence des ouvrages de retenue sur les crues des affluents dépend directement des paramètres suivants :

- La surface du bassin versant intercepté par l'ouvrage qui correspond au maximum à 30% de la totalité des bassins de l'Ain et de la Durance ;
- La capacité de stockage de la retenue dont le niveau est maintenu à des valeurs hautes afin de satisfaire les différents usages (production hydro-électrique, irrigation, eau potable, loisirs, etc.) ;
- L'importance de la crue au regard des dimensions de l'ouvrage. Dans la plupart des cas on observe un impact significatif en crue décennale et plus limité en crue centennale et supérieure.

Ainsi, suivant la configuration des ouvrages, une incidence locale peut être constatée sur les affluents. Elle reste marginale pour ce qui concerne le Rhône, surtout dans le cas de crues de période de retour supérieure au siècle.

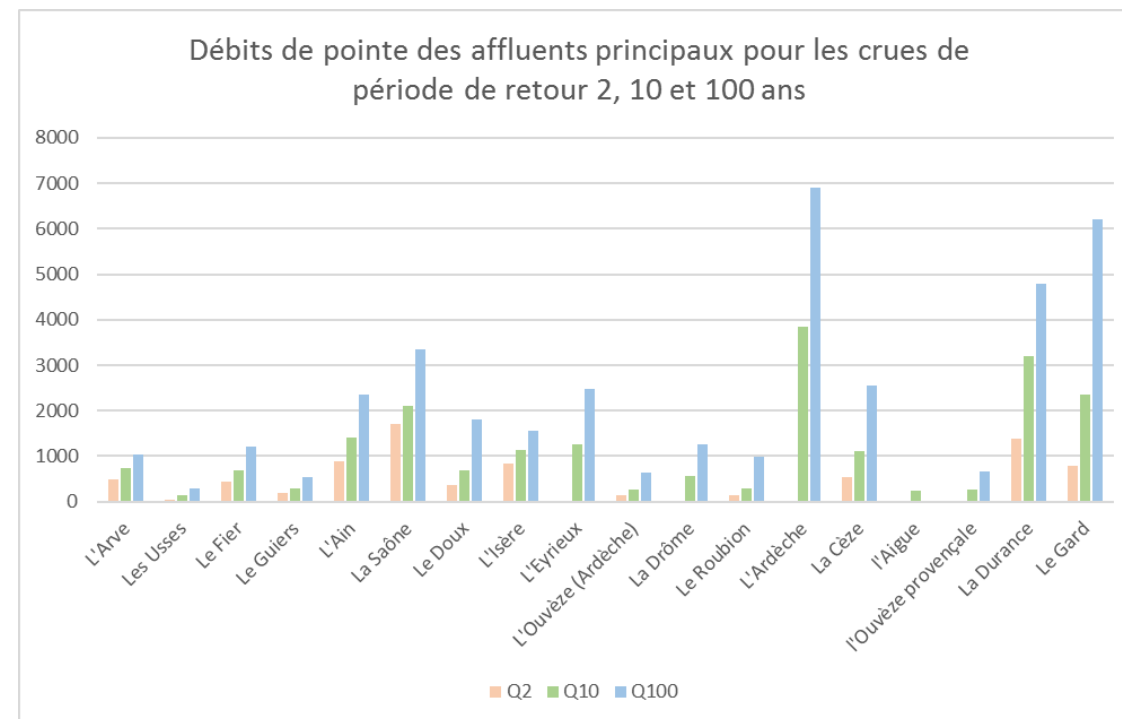


Figure 52: Synthèse des débits de pointe des affluents majeurs du Rhône (d'après EGR, 2000)

► Propagation des crues du Rhône

Les crues du Rhône présentent des dynamiques de propagation différentes selon les secteurs considérés.

Sur le Haut Rhône en aval du Léman, les affluents alpins réagissent rapidement aux précipitations lorsque les terrains sont saturés. La crue se forme en une demi-journée après les épisodes de pluies. On note cependant que la plaine de Chautagne et le lac du Bourget écrètent jusqu'à 500 m³/s sur un débit de crue de 3 000 m³/s.

A l'aval de Lyon, la crue semi-rapide du Rhône amont et la crue lente de la Saône se rassemblent. Avant d'arriver à Valence, l'Isère et les affluents venant du Massif Central apportent chacun une nouvelle composante à la crue du Rhône en fonction des précipitations qu'ils ont reçues.

En descendant la vallée, la dynamique de la crue, tributaire des réactions des affluents, se complexifie. On distingue trois principales configurations.

- La première voit les crues formées entre Lyon et Valence s'atténuer vers l'aval quand les bassins des affluents ont été faiblement arrosés ;
- La configuration qui produit des crues généralisées correspond à des apports régulièrement répartis le long du linéaire. C'est la crue d'octobre 1993 et celle de mai 1856, avec toutefois un phénomène plus complexe comprenant plusieurs ondes de crue ;
- La dernière configuration correspond à une production prépondérante des affluents du cours aval. Elle peut s'observer à partir de débits faibles du Rhône à Lyon, la crue se formant essentiellement dans le cours aval (scénario des crues de 2002 et 2003). Les crues des affluents sont souvent décalées dans le temps mais elles contribuent à augmenter les débits propagés.

Sur le cours du Rhône aval, en dehors des crues qui se propagent sans renforcement depuis Lyon-Valence en pratiquement deux jours, les réactions se manifestent dans le Rhône en une douzaine d'heures après les épisodes de pluie.

Globalement, pour l'ensemble du bassin, la formation des crues du Rhône s'opère dans des délais inférieurs à la journée. Les événements de crue importants, qui peuvent se dérouler sur plus d'une semaine, sont quant à eux des épisodes avec plusieurs pics de crue.

► Rôle des zones d'expansion de crues

Les zones d'expansion de crue ont un rôle majeur pour la prévention des crues sur le Rhône. Elles sont notamment présentes lorsque la plaine du Rhône s'élargit, ce qui le cas des secteurs de Chautagne et du Lac du Bourget (05-CHA), du marais de Lavours (06-BEL), des Basses Terres du Dauphiné ou plaines de Brangues, le Bouchage et St-Benoît (07-BRC), le confluent de l'Ain et l'île de Miribel Jonage (10-ALY), ou des plaines inondables en aval de Donzère (19-DZM) jusqu'en Camargue (24-GRH, 25-PRH).

Pour illustrer ces zones d'expansion de crues, la largeur du fond de vallée représentée sur la Figure 10 ou les zones inondables sur les cartes F des UHC citées précédemment peuvent être consultées.

Plus particulièrement, il est reconnu que les zones d'expansion de crue situées en amont de Lyon sont utiles dans la protection de l'agglomération contre les crues. La loi du 25 mai 1858, promulguée deux ans après la crue majeure de 1856, interdit toute modification des réservoirs naturels d'expansion des crues à l'amont des grandes agglomérations. Si le fleuve était endigué dans les traversées des plaines inondables du Haut-Rhône, on augmenterait de plus de 1 000 m³/s une crue forte à Lyon estimée à 4 500 m³/s (source : SHR / Territoire Rhône). Ce phénomène d'écèlement sur le Haut Rhône permet également d'éviter l'effet d'accumulation avec les crues de la rivière d'Ain.

Le principe général des consignes d'exploitation des ouvrages CNR en crue est de retrouver un fonctionnement aussi naturel que possible. L'objectif est de solliciter les grands bassins naturels d'écèlement des crues que sont les Marais de Chautagne, le Lac du Bourget et le Marais de Lavours, afin que la propagation de la crue soit naturelle tant au niveau du temps de propagation que des hauteurs d'eau (SHR / www.haut-rhone.com).

Par exemple, les plaines inondables des Basses Terres (07-BRC), d'une superficie de 2 300 ha, sont situées sur deux départements, l'Isère et l'Ain, sur les communes des Avenières, du Bouchage, Brangues, Aoste et Saint-Benoît. Sur ce secteur, les ouvrages sont gérés par le Syndicat Intercommunal de Défense contre les

Eaux du Haut-Rhône (SIDCEHR). Les crues les plus importantes ont eu lieu en 1856 (crue centennale), 1910, 1918, 1928, 1944 et 1990 (crue centennale). Au-delà d'un débit de 1 600 m³/s, le dispositif de protection s'efface pour noyer la plaine et ainsi protéger l'agglomération lyonnaise en participant à l'écèlement de la crue.

Les conditions de mise en eau de cette grande plaine inondable se sont vues modifiées par la réalisation des aménagements de la CNR dans les années 1980. Avant ces aménagements, une partie importante du territoire des communes de Brangues, Le Bouchage, Les Avenières et Saint-Benoît se trouvait à un niveau tel que les crues du Rhône, à partir d'un débit de l'ordre de 1 000 à 1 200 m³/s, les submergeaient fréquemment. Il fut donc édifié en 1988 des digues en rive droite et gauche pour protéger la plaine jusqu'à un débit de 1600 m³/s, tandis que deux stations de pompage étaient construites, équipées de vannes de garde pour respecter l'obligation de champ d'expansion des crues. La plaine est inondée pour une crue inférieure à la crue décennale par ouverture de vannes situées à l'extrémité aval de la ZEC et ensuite par surverse au-dessus des digues. Au-delà de la crue décennale, la plaine joue pleinement son rôle de zone d'expansion des crues.

Le SIDCEHR doit également, avec ses aménagements, procéder au noyage de la dernière zone d'expansion des crues avant la ville de Lyon au-delà du débit de submersion. Inversement, lors de la décrue, il doit faciliter le ressuyage des plaines, régler le niveau d'eau dans les casiers en fonction des saisons et des cultures et favoriser la conservation des zones humides des plaines protégées.

1.2.2 Crues historiques depuis le 15^{ème} siècle

L'étude de la fréquence des crues du Rhône aval depuis le 15^{ème} siècle a été synthétisée par Raccasi (2008). Entre la fin du 16^{ème} siècle et les années 1850, le Rhône connaît une longue période de crues débordantes, avec des niveaux supérieurs à 4 m au-dessus de l'étiage des échelles d'Arles (Pichard, 1995 ; Pichard, 1999) (Figure 53). L'auteur les met en relation avec la crise climatique du Petit Age Glaciaire, entre le 16^{ème} et le 19^{ème} siècle.

A partir du 16^{ème} siècle, plusieurs périodes présentent une répétition d'événements de crue qui ont surtout touché le Rhône aval et la Camargue : vers 1580 et 1755 et également entre 1840 et 1856. Toutefois, on dispose de peu d'éléments sur les périodes marquées par les crues de 1580 et de 1755 (le Rhône en 100 questions ; Bravard et al, 2010).

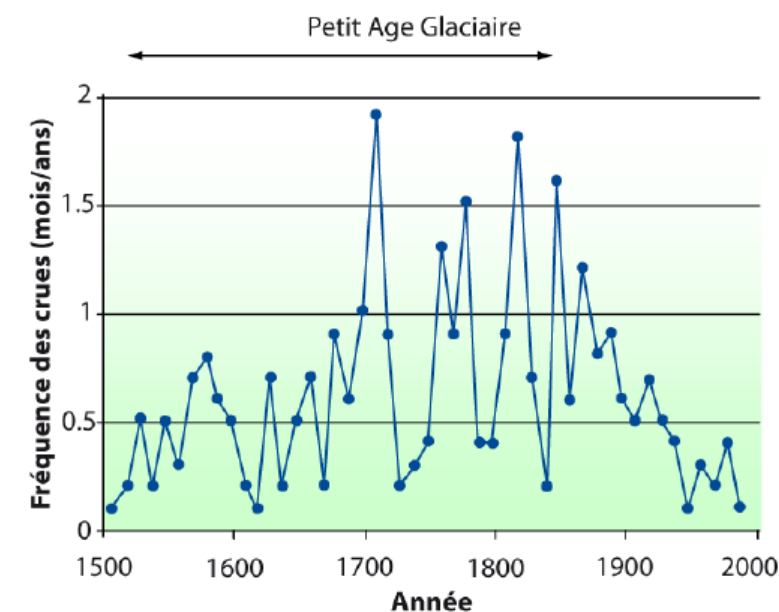


Figure 53: Evolution de la fréquence décennale des plus fortes crues à Arles depuis le 15^{ème} siècle (Raccasi, 2008)

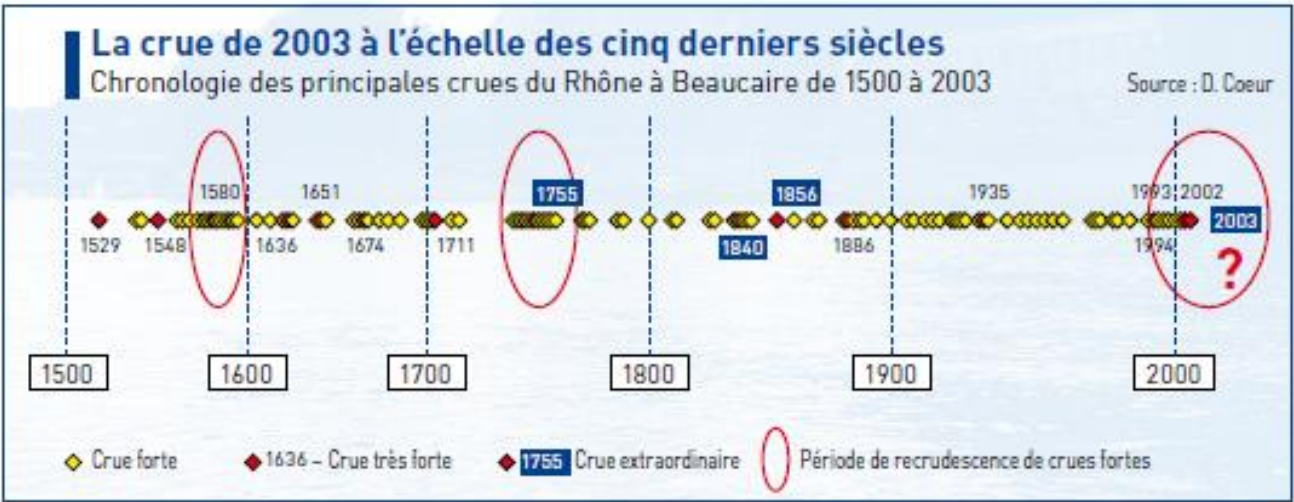


Figure 54: Chronologie des crues importantes du Rhône depuis le 16^{ème} siècle (le Rhône en 100 questions ; Bravard et al., 2010)

1.2.3 Crues récentes depuis le 19^{ème} siècle

► Haut-Rhône

Sur le Haut-Rhône, les crues historiques récentes sont synthétisées dans le Tableau 10. Le secteur du Haut-Rhône est essentiellement soumis aux crues généralisées et océaniques. Les crues méditerranéennes et cévenoles touchent plus particulièrement le sud du bassin rhodanien.

Les événements de 1944 et 1990 sont les deux seuls que l'on retrouve avec des débits historiques très importants sur l'ensemble des stations du Haut-Rhône.

Tableau 10: Les crues historiques du Haut-Rhône (PPRI de Chautagne, 2015)

Dates	SEYSEL	LE FIER	CHAUTAGNE	PONT DE LA LOI
Octobre 1816	254.60 m			
Mai 1856	254.55 m			
Janvier 1910	2200 m³/s			
Novembre 1944	Crue exceptionnelle	Crue exceptionnelle	Crue exceptionnelle	Crue exceptionnelle
Février 1990	1800 m³/s	910 m³/s	2850 m³/s	2700 m³/s
Décembre 1991			1800 m³/s	1520 m³/s
Novembre 1992		490 m³/s	2140 m³/s	2000 m³/s
Octobre 1993		360 m³/s	2110 m³/s	2030 m³/s
Février 1995		485 m³/s	1910 m³/s	1880 m³/s
Février 1999		410 m³/s	1530 m³/s	1480 m³/s

► Rhône aval

Sur le Rhône aval, les crues sont davantage soumises aux phénomènes cévenols et méditerranéens que la partie amont.

Sur la période 1840-1856, outre les crues exceptionnelles de 1840 et 1856, les crues d'octobre 1841 et novembre 1843 ont causé également des dégâts considérables dans les digues ; la crue de 1843 a été amplifiée par une forte crue de la Durance : 4 400 m³/s estimés à Bonpas. Sur cette période, deux crues majeures et deux crues fortes ont sérieusement endommagé les digues de Camargue et provoqué à chaque fois l'inondation d'une grande partie de ce territoire, auxquelles s'ajoutent une dizaine de crues relativement importantes.

Sur la période 1993-2003, le Rhône a connu en octobre 1993 et janvier 1994 deux crues fortes alors que pendant près de quarante ans les riverains n'avaient pas eu à faire face à des inondations, excepté sur d'autres secteurs (par exemple février 1990 et novembre 1992 sur le Haut Rhône).

Entre 1993 et 2003, le Rhône aval a connu une crue majeure en décembre 2003 et quatre crues fortes :

- Octobre 1993 (crue générale – Saône et Haut Rhône) ;
- Janvier 1994 (méditerranéenne extensive – crue forte de la Durance) ;
- Septembre 2002 (crue très forte des Gardons et de la Cèze – cévenole atypique) ;
- Novembre 2002 (crue générale) ;
- Décembre 2003 (crue méditerranéenne extensive).

► Synthèse

Le Tableau 12 et le Tableau 12 synthétisent les crues historiques et leurs débits de pointe pour le Haut-Rhône et le Rhône aval.

La Figure 55 ci-dessous illustre les maximums annuels à la station de Beaucaire depuis 1840.

La partie §.461.2.4 décrit dans le détail les principales crues historiques.

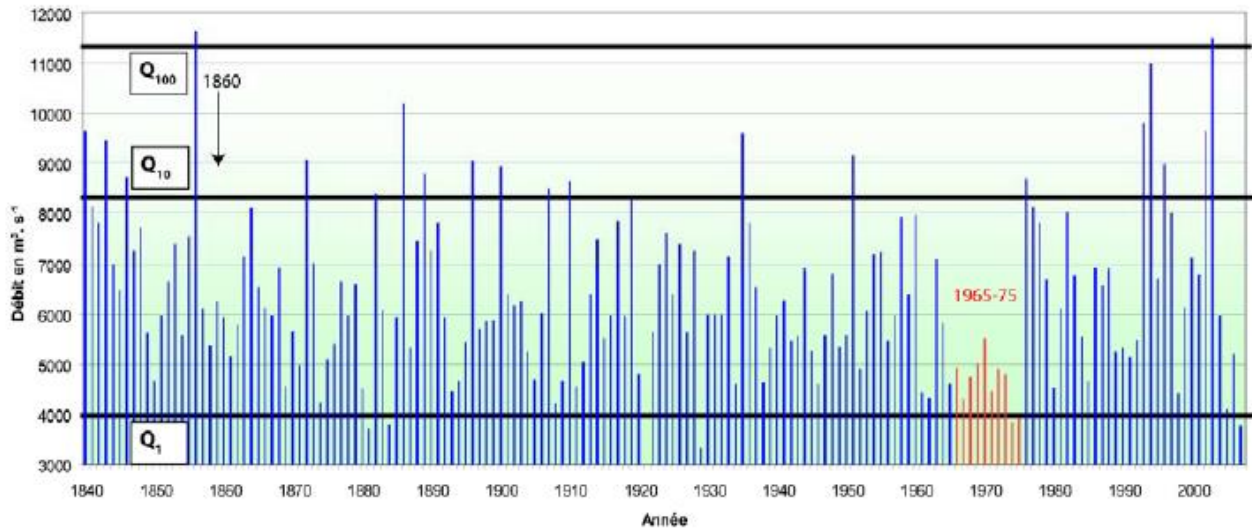


Figure 55: Chronique des débits maximums annuels à Beaucaire depuis 1840 (source CNR)

1.2.4 Description des principales crues historiques

La crue de novembre 1840 : plus grosse crue connue

La crue des 3 et 4 novembre 1840 serait la plus forte crue connue en débit de pointe sur le Rhône (cf. Tableau 12). Il existe relativement peu de données sur cette crue étant donnée le peu de stations hydrométriques à cette époque. Néanmoins, il s'agit d'une crue générale très exceptionnelle. Le coefficient d'écoulement est estimé entre 50 et 60% d'après Pardé (1925).

La crue a été générée par deux phases : 1) des averses méditerranéennes et une pluie océanique ; 2) de nouvelles averses méditerranéennes. Le cumul de pluie s'est donc déroulé en deux vagues, de façon très importante et concentrée sur 8 jours. Les pluies étaient océaniques au nord, méditerranéennes et généralisées au sud.

Les débits de pointe de crue sont donnés à 13 000 m³/s à Valence, ce qui est le débit maximal connu, avec une décroissance dans le sud (9 715 m³/s à Beaucaire). La crue à Valence était donc bien supérieure à celle de 1856 ; à Tournon, le niveau d'eau était supérieur de 0,70 m à celui de 1856. Les volumes de crue sont remarquables : 11 milliards de m³ à Valence, 13 à Avignon et 15 à Beaucaire.

La crue de mai 1856 : crue historique du Rhône aval

La crue de mai 1856 est un exemple parfait de crue généralisée ; elle a affecté l'ensemble du bassin du Rhône, soumis à des pluies océaniques au nord et méditerranéennes au sud ; la concomitance quasi-généralisée des apports des affluents, Isère et Durance en particulier, conduisit à des combinaisons désastreuses. Pardé écrivit ainsi : « la crue de 1856 fut la plus simple et la plus brutale des crues généralisées du Rhône ; [...] par les désastres engendrés, elle compte parmi les plus terribles des cataclysmes qui aient dévasté les rives des fleuves français ». (Le Rhône en 100 questions, ZABR, 2010). Cet épisode a entraîné la rupture de nombreuses levées dans la basse vallée et dans le delta.

Les débits de pointe de crue sont donnés à 8 300 m³/s à Valence, 9 500 m³/s à Viviers et 12 500 m³/s à Beaucaire.

Les volumes des pointes de crue dues à la crue des 28 au 30 mai 1856 sont de l'ordre de 3 milliards de m³ à Givors, 4,7 milliards de m³ à Valence et 5,5 milliards de m³ à Avignon. Le volume total de la crue à Beaucaire est estimé entre 12,5 milliards de m³ (SAFEGE, 2014) et 14 milliards de m³ (EGR, 2000 ; fiches crues historiques, V1D3A1).

On notera que la crue de 1856 modélisée aux conditions actuelles d'écoulement est la crue de référence pour la prise en compte du risque inondation dans la vallée du Rhône.

La crue de novembre 1944 : crue historique sur le Rhône amont

La crue de novembre 1944, si elle ne constitue pas la plus forte crue océanique connue, est néanmoins caractéristique de la formation d'une crue océanique sur le Haut Rhône. Les pluies n'ont en effet pas été exceptionnelles, mais elles ont succédé à deux mois fortement pluvieux ayant engendré des débits soutenus avant la crue sur l'ensemble des affluents du Haut Rhône, de la Saône et même de l'Isère.

La crue fut centennale au droit de la confluence de l'Ain – elle sert de crue de référence en amont de Lyon - et un peu plus que décennale entre la confluence de l'Ain et Valence. En aval la crue s'atténue progressivement par manque de soutien des affluents méditerranéens (EGR, rapport V1D2A1).

La crue de février 1990 : crue de référence sur le Rhône amont

La crue de février 1990 sur le Haut Rhône est une crue océanique qui s'est produite après un épisode pluvieux pratiquement ininterrompu de 1 mois totalisant près de 500 mm sur les massifs du Jura et des Alpes du Nord, et 100 à 200 mm ailleurs.

La crue de février 1990 fut provoquée par une perturbation océanique touchant la partie septentrionale du bassin par le Nord-Ouest. Il s'ensuivit de fortes chutes de neige jusqu'à 400 m d'altitude, puis à la faveur d'un redoux important lié à la bascule de vent au Sud-Ouest, des pluies abondantes et une forte fusion nivale. Pendant 48 à 72 heures, des pluies continues et abondantes dépassant 200 mm tombent sur les reliefs du Jura et des Préalpes. Les crues sont décennales sur l'Arve, le Fier, les Usses, et pratiquement centennale sur l'Ain. La crue du Rhône fut centennale sur le Haut-Rhône en amont de l'Ain, ce qui en fait la crue de référence. Malgré l'importance de la crue sur l'Ain, la crue à Lyon présente une période de retour environ trentennale. Elle continue de s'atténuer en aval : sa période de retour est de 10 ans à Ternay et inférieure à 2 ans à Beaucaire (EGR, rapport V1D2A1).

Tableau 11: Débits de pointe de crues historiques du Haut Rhône

Source : Le Rhône en 100 questions

Date	Débit (m³/s)	Hauteur d'eau (m)	Lieu	Observations
3 et 4/11/1840	13 000 9 715	- -	Lagnieu Perrache	
30/05/1856	1 800 - -	- - -	Bognes Lagnieu Perrache	
23 au 25/12/1918	1 920 2 100 3 900	- - -	Bognes Lagnieu Perrache	
16/02/1928	2 025 4 150	- -	Lagnieu Perrache	
25 au 27/11/1944	2 400 4 250	- -	Lagnieu Perrache	
26/02/1957	3 700	-	Perrache	
16/02/1990	2 445	-	Lagnieu	

Tableau 12: Débits de pointe de crues historiques du Rhône aval

Sources : d'après SAFEGE, 2014 ; Maillet, 2005, Le Rhône en 100 questions, 2010

Date	Débit (m³/s)	Hauteur d'eau (m)	Lieu	Observations
3 et 4/11/1840	13 000 9 715	6,7 -	Valence Beaucaire	Débit estimé, période de retour = 300 ans Plus forte crue connue. Suite à 4 averses méditerranéennes torrentielles en 8 jours
31/05/1856	8 300 9 500 12 500	- - 7	Valence Viviers Beaucaire	Nombreuses brèches dans les digues.
10 au 22/11/1886	6 620 10 200	- 5,77	Valence Beaucaire	Après une semaine pluvieuse
31/10/1896	7 400 9 060	- 6,11	Valence Beaucaire	
26/12/1918	6 100	5,54	Valence	
17/02/1928	6 480	5,66	Valence	
8 au 12/11/1935	5 470 6 000 9 600	5,20 - -	Valence Viviers Beaucaire	Inondation d'Avignon
06/01/1936	5 830	5,40	Valence	
26/11/1944	6 620	5,75	Valence	
22 et 23/11/1951	- 6 660 9 200	4,77 - -	Valence Viviers Beaucaire	Suite à des apports cévenols
19/01/1955	6 300	5,70	Valence	
28/02/1957	5 680	5,40	Valence	
18/05/1983	5 690	4,70	Valence	
1er au 12/10/1993	6 700 7 715 8 200 9 800	5,30 - - -	Valence Viviers Avignon Beaucaire	Dégâts importants sur les zones non aménagées par la CNR. Période de retour = 30 ans à Valence et Beaucaire, 80 ans à Viviers
7 et 8/01/1994	5 380 7 590 8 500 11 000	4,48 - - -	Valence Viviers Avignon Beaucaire	Période de retour = 100 ans. Des ruptures de digues en secteur nord Vaucluse qui créent un vaste champ d'inondation entre le Rhône et la dérivation de Donzère Mondragon. Le débit de l'Ardèche (environ 1000 m³/s) est écrêté dans cette poche. La crue de la Durance est estimée à 2800 m3/s.
8 et 9/09/2002	10 500	-	Beaucaire	
16 et 17/11/2002	6 620 7 580 10 200	5,22 - -	Valence Viviers Beaucaire	
3 et 4/12/2003	8 000 11 500		Viviers Beaucaire	Crue majeure due aux affluents méditerranéens en aval de Valence

► La crue d'octobre 1993

Les précipitations d'abord centrées sur la partie méridionale du bassin se sont ensuite étendues en amont de Lyon, touchant la Saône et le Jura. De ce fait la crue d'octobre 1993 constitue l'exemple type d'un événement méditerranéen extensif provoquant une crue généralisée sur le Rhône. La période de retour de la crue pratiquement décennale en amont de la confluence de l'Isère, est amplifiée très sensiblement en aval par les apports de crues moyennes des principaux affluents méditerranéens (Isère, Drôme, Roubion, Ouvèze, Eyrieux, Ardèche, Durance).

Les débits de pointe de la crue sur le Rhône sont respectivement de 6 700 m³/s à Valence (période de retour 35 ans), 7 700 m³/s à Viviers (période de retour de 80 ans) et 9 800 m³/s à Beaucaire (période de retour 25 ans) (EGR, rapport V1D2A1).

► La crue de janvier 1994

La crue de janvier 1994 a succédé à des pluies tombant fin décembre début janvier, intéressant la partie amont du bassin versant, puis des pluies méditerranéennes (du 5 au 7 janvier) sur la partie aval. Les précipitations cumulées en 7 jours sont importantes sur les bassins de la Durance et de l'Eyrieux (occurrences respectives : 20 et 5 ans) moins significatives sur le reste du bassin versant. Ces pluies ont provoqué des crues modérées sur le Rhône supérieur, augmentant sensiblement son débit qui était encore très élevé fin décembre.

La crue du Rhône, un peu supérieure à une crue biennale en aval de la confluence de la Saône, s'est amplifiée progressivement en aval de chaque affluent méditerranéen (Drôme, Durance mais aussi Ardèche et Eyrieux) pour se transformer en une crue redoutable à Beaucaire de période de retour supérieur à 70 ans (débit proche de 11 000 m³/s) (EGR, rapport V1D2A1).

► La crue de mars 2001

La pluviométrie du mois de mars 2001 a été exceptionnelle du fait d'une succession presque continue de jours de pluie. Les précipitations étaient réparties sur l'ensemble des bassins du Rhône, de la Saône et de l'Ain. Le pic de la crue a eu lieu du 22 au 24 mars. Les débits du Rhône et de la Saône en mars 2001 correspondent à une période de retour comprise entre 20 et 30 ans.

► La crue de septembre 2002

Considéré comme un épisode cévenol extrême sur le Rhône aval, la crue des 8 et 9 septembre 2002 a principalement touché quatre bassins : Vidourle, les Gardons d'Alès et d'Anduze, le Gardon et la Cèze avec des précipitations de plus de 200 mm à 600 mm, des débits de pointe estimés à 6 000 m³/s sur le Gardon à Remoulins et à 2 500 m³/s sur la Cèze ; le Rhône atteint 10 500 m³/s à Beaucaire (SYMADREM, 2015).

► La crue de novembre 2002

Le Rhône atteint 10 200 m³/s à Beaucaire le 17 novembre 2002 dans le cadre d'une crue générale et suite à un mois de novembre très pluvieux sur l'ensemble du quart sud-est de la France.

► La crue de décembre 2003

De type méditerranéen, elle résulte d'un événement pluvieux très important en étendue et en quantité ayant affecté l'ensemble du bassin versant de Lyon à la mer. Le cumul des apports au Rhône a donc été très élevé, très brutal et relativement simultané, ce qui explique la rapide montée des eaux du Rhône à Valence et les débits exceptionnels du Rhône à partir de Viviers. La réaction forte de l'Ardèche (maxi de 2 500 m³/s à Vallon Pont d'Arc) a fortement contribué aux très hauts niveaux constatés à Avignon.

De plus, en fin d'événement, la vidange lente des champs d'expansion des crues fortement sollicités lors de cet épisode ainsi que la réaction tardive de la Durance ont largement contribué aux débits exceptionnels constatés à Beaucaire (<https://www.symadrem.fr/organisation-du-symadrem/notre-mission/les-crues-historiques/>).

Le débit a été estimé à 11 500 m³/s le 3 décembre à Beaucaire, ce qui en fait la troisième crue la plus forte connue après 1840 et 1856. Ce débit a été validé en juillet 2005 par une conférence de consensus qui a réuni des experts internationaux. Il correspond à une période de retour légèrement supérieure à la crue centennale (DREAL, 2009).

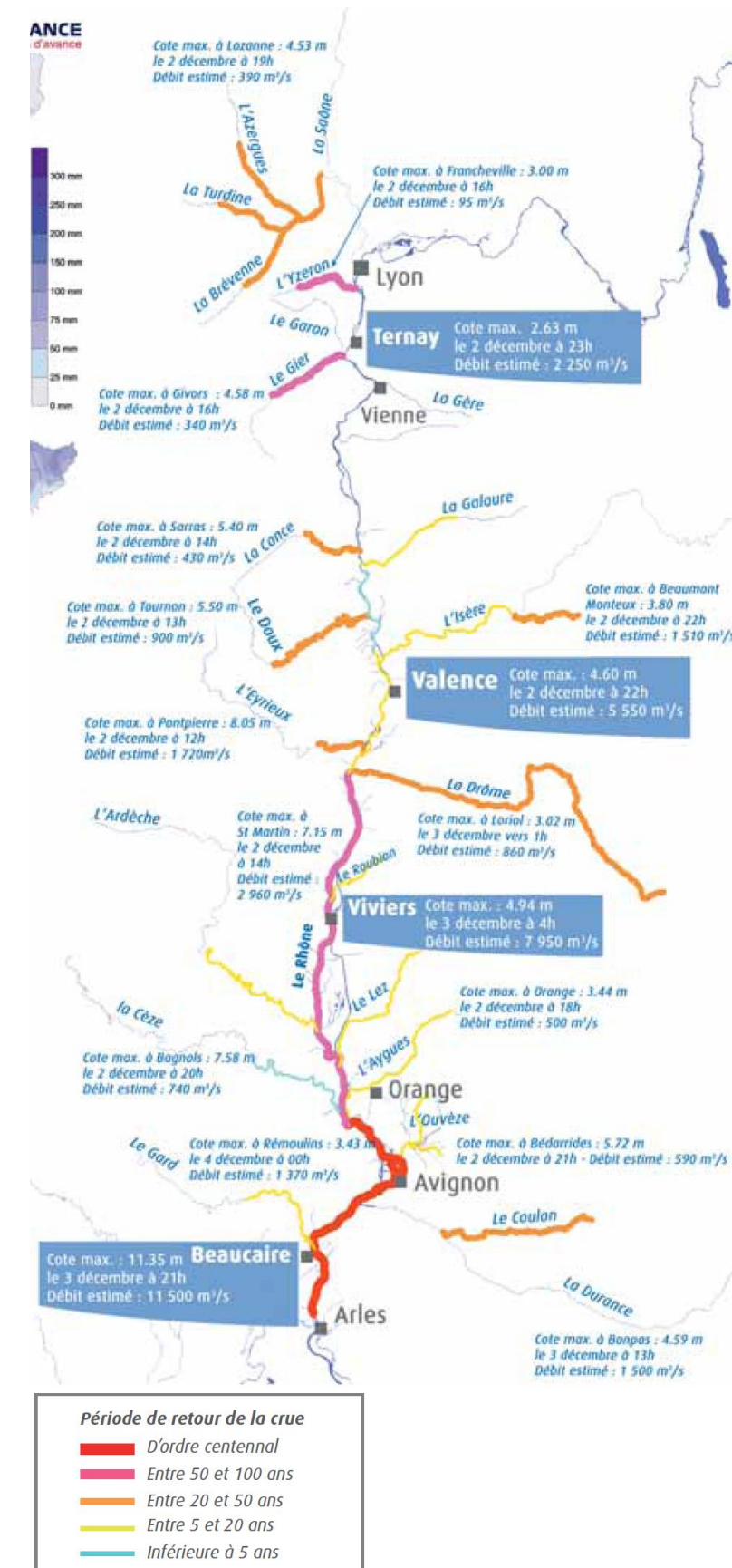


Figure 56 : Extrait de la plaquette DREAL de 2009 : la crue du Rhône de décembre 2003

1.2.5 Crues de référence et crues caractéristiques

► Crues de référence

La crue de référence correspond, d'après les circulaires ministérielles du 24 janvier 1994, du 30 avril 2002 et du 21 janvier 2004 à « la plus forte crue connue, ou si cette crue est plus faible qu'une crue centennale, cette dernière ». Elle est utilisée pour l'élaboration des PPRI.

En amont de Lyon, la crue de référence est ajustée selon les secteurs :

- du barrage de Génissiat jusqu'à la confluence de l'Ain : crue de 1990,
- de l'Ain jusqu'à Lyon : crue de 1944.

En aval de Lyon, dans la liste des grandes crues qui ont affecté le Rhône à l'aval de Lyon, l'événement de mai 1856 constitue le record depuis 1840, date des premières observations bien documentées ; elle est notamment supérieure aux crues de 1840 et 2003 dans la basse vallée et le delta. Au titre de la plus forte crue connue, elle constitue donc la « crue de référence » en aval de Lyon :

- à l'aval de Lyon : crue de 1856 avec les aménagements actuels.

Les autres crues historiques connues peuvent être des « références » en termes d'inondation du Rhône, mais pas au sens réglementaire. On privilégie alors le terme de crues « caractéristiques » pour les qualifier. C'est notamment le cas de :

- la crue de mars 2001 en amont de l'Isère,
- la crue novembre 2002 entre l'Isère et Viviers,
- la crue décembre 2003 en aval de Viviers.

Les valeurs des crues de référence connues aux stations sont données dans le Tableau 13.

► Crues caractéristiques

En 2000, le volet hydrologique de l'étude globale sur le Rhône (EGR), réalisé par SAFEGE (2000), a permis de fournir les valeurs des quantiles de crue (périodes de retour 10, 100 et 1000 ans) sur le cours principal du Rhône et ses affluents. Cette étude, actualisée en 2014 sur les stations de Viviers et Beaucaire, était jusqu'à récemment l'étude hydrologique de référence sur les caractéristiques de crues.

En 2018, la DREAL Auvergne-Rhône-Alpes a fait réaliser une importante étude d'actualisation de l'hydrologie de référence mené par le bureau d'études Hydro-Consultant et l'IRSTEA (aujourd'hui INRAe).

Dans le delta de la Camargue en aval de Beaucaire, et notamment pour les branches des Grand Rhône et Petit Rhône, les débits de pointe des crues Q10, Q100 et Q1000 ont été calculés à partir des débits de crues DREAL réactualisés (Hydro-Consultant / IRSTEA, 2018), et en tenant compte de la répartition de débit établie par BCEOM (2003).

► Synthèse de l'étude Hydro Consultant / IRSTEA

La première phase de l'étude a porté sur la collecte, l'analyse et la critique des données hydrométriques, à partir d'un important travail de consultation des archives : CNR, archives départementales du Rhône, de la Drôme, de l'Hérault, travaux d'historiens (G. Pichard, E. Roucaute, M. Pardé). Le travail a été mené pour 12 stations sur le Rhône : Pougny, Bognes, Seyssel, Châteaufort, Brens, Lagnieu, Lyon, Ternay, Valence, Viviers, Chusclan, Beaucaire.

Après reconstitution des données, analyse des sources d'incertitude, estimation des courbes de tarage, l'étude a permis de réviser les estimations des caractéristiques théoriques de crue. La méthode se développe autour d'un schéma classique de l'estimation statistique des quantiles de crue, selon les étapes suivantes :

- 1- Constitution des échantillons de crue : prise en compte de l'incertitude sur les débits par la déclinaison des échantillons en 500 variations ;
- 2- Ajustement d'une loi statistique aux échantillons : estimation des paramètres de loi avec incertitude ; confrontation de deux lois statistiques : Gumbel et GEV. La loi GEV (Generalized Extreme Value) s'avèrera la plus pertinente ;
- 3- Extrapolation des quantiles de période de retour cible : combinaison de l'ensemble des incertitudes affectant les résultats, test de sensibilité sur la prise en compte des données anciennes dans le processus d'estimation.

Un scénario de propagation des crues d'amont en aval a été proposé. Pour cela, les apports des affluents ont été ajustés afin de maintenir les quantiles estimés aux stations principales du Rhône. Les répartitions de débit dans les différents ouvrages hydrauliques et canaux de dérivation sont déterminées par les règles de gestion d'ouvrage fournis par l'opérateur. Les zones d'écêtement des crues sont considérées opérantes et entraînent une réduction du débit proportionnellement au débit d'entrée sur le fleuve ou ses dérivations.

Il est à noter qu'un tel scénario a une probabilité bien plus faible que la période de retour considérée car il suppose que l'ensemble des tronçons du fleuve connaissent une crue d'égale intensité au même moment.

Ainsi, des profils en longs des débits des différents tronçons du Rhône (Rhône total, retenues, canaux usiniers et Rhône court-circuités) ont été établis (cf. Figure 59 et Figure 60).

Ces profils en long permettent notamment de mettre en évidence le rôle des plaines de Chautagne et du lac du Bourget (PK145 à PK130 du Haut Rhône) dans la réduction des débits de crues réduisant ainsi le risque inondable en aval. De même, la large plaine inondable du secteur de Donzère joue un rôle important sur le laminage des crues en amont de la confluence avec l'Ardèche (PK190 du Rhône aval).

On retiendra que :

- ce travail d'actualisation conduit à légèrement majorer les débits de pointe de crue décennale : par exemple, +4,8% à Lyon, +3,0% à Beaucaire ; et localement dans des proportions plus importantes : +16,8% à Seyssel, probablement du fait d'un ajout important de données dans la chronique ;
- inversement, les débits de pointe de crue exceptionnelle (Q1000) sont minorés : par exemple, -6,1% à Bognes, -1,9% à Lyon, -2,3% à Beaucaire ; et parfois dans des proportions importantes : -11,3% et -12,8% à Brens et Lagnieu ; -14,6% à Ternay ; -12,5% à Viviers ;
- pour la crue rare (Q100), les débits de pointe évoluent différemment selon les secteurs : en légère hausse sur le Haut-Rhône (0 ; +2,0% ; +7,7%), à Lyon (+2,6%) et à Beaucaire (+1,5%) ; en baisse en amont de Lyon (-3,7% ; -4,2%), et entre Lyon et Beaucaire (-2,8 à -6,5%).

Station	Etude EGR (2000)	Etude Hydro-Consultant & IRSTEA (2018)	Ajout (années)
Pougny	1925-1998	1925-2016	+18
Bognes	1904-1998	1853-2015	+68
Seyssel	1958-1993	1841-2016	+140
Châteaufort		1953-2016	
Brens	1953-1998	1953-2016	+18
Lagnieu	1891-1998	1891-2016	+18
Lyon	1900-1998	1840-2015	+77
Ternay	1895-1998	1840-2016	+73
Valence	1855-1998	1855-2016	+18
Viviers	1910-1998	1910-2016	+18
Chusclan		1950-2015	
Beaucaire	1840-1998	1816-2016	+42

Figure 57: Bilan de la collecte des données aux stations hydrométriques entre l'étude Hydro-Consultant (2018) et l'EGR (2000)

Etude EGR (2000) selon Loi de Gumbel					Etude Hydro-Consultant & IRSTEA (2018) selon Loi GEV régionale			
Station	Echantillon	Q10	Q100	Q1000	Echantillon	Q10	Q100	Q1000
Pougny	1925-1998	1 180	1 470	1 800	1925-2016	1 230	1 500	1 700
Bognes	1904-1998	1 450	1 920	2 375	1853-2015	1 510	1 920	2 230
Seyssel	1958-1993	1 430	1 940	2 450	1841-2016	1 670	2 090	2 390
Châteaufort					1953-2016	2 140	2 710	3 120
Brens	1953-1998	1 720	2 150	2 570	1953-2016	1 760	2 070	2 280
Lagnieu	1891-1998	1 810	2 400	2 970	1891-2016	1 880	2 300	2 590
Lyon	1900-1998	3 120	4 230	5 310	1840-2015	3 270	4 340	5 210
Ternay	1895-1998	4 445	5 890	7 310	1840-2016	4 440	5 510	6 240
Valence	1855-1998	5 620	7 510	9 310	1855-2016	5 740	7 300	8 520
Viviers	1910-1998	6 100	8 120	10 100	1910-2016	6 180	7 730	8 840
Chusclan					1950-2015	7 010	9 060	10 830
Beaucaire	1840-1998	8 400	11 300	14 160	1816-2016	8 650	11 470	13 830

Ecart estimation (valeur absolue)					Ecart estimation (%)			
Station		Q10	Q100	Q1000		Q10	Q100	Q1000
Pougny		50	30	- 100		4,2%	2,0%	-5,6%
Bognes		60	-	- 145		4,1%	0,0%	-6,1%
Seyssel		240	150	- 60		16,8%	7,7%	-2,4%
Châteaufort								
Brens		40	- 80	- 290		2,3%	-3,7%	-11,3%
Lagnieu		70	- 100	- 380		3,9%	-4,2%	-12,8%
Lyon		150	110	- 100		4,8%	2,6%	-1,9%
Ternay	-	5	- 380	- 1 070		-0,1%	-6,5%	-14,6%
Valence		120	- 210	- 790		2,1%	-2,8%	-8,5%
Viviers		80	- 390	- 1 260		1,3%	-4,8%	-12,5%
Chusclan								
Beaucaire		250	170	- 330		3,0%	1,5%	-2,3%

Figure 58: Actualisation des débits caractéristiques aux stations hydrométriques (d'après Hydro-Consultant, 2018)

1.2.6 Synthèse des débits caractéristiques dans les UHC

Les différents débits caractéristiques à l'entrée de chaque UHC sont synthétisés dans le tableau ci-dessous pour les crues Q2, Q5, Q10, Q100 et Q1000.

Ces débits ont été reportés dans chacune des fiches UHC. Elles ont été complétées de valeurs affectées à chaque tronçon homogène (TH), ce qui était possible grâce aux détails de répartition de débits de l'étude Hydro-Consultant / IRSTEA (2018).

Tableau 13: Synthèse des débits caractéristiques et de référence dans les UHC (m³/s)

Crues caractéristiques (m³/s)											
N°UHC	UHC	Ouvrage	PHEN	Q2	Q5	Q10	Q100	Q1000	Crue référence*	Station	Année crue référence
01-SUI	Suisse (Seujet)	Seujet	ND	ND	ND	600	650	ND			
01-SUI	Suisse (Verbois)	Verbois	ND	ND	1 000	1 050	1 250	1 450	1 310		
02-CHP	Chancy-Pougny	Chancy-Pougny	ND	950	1 130	1 230	1 500	1 700	1 530	Pougny	1990
03-GEN	Génissiat	Génissiat	760	1 120	1 360	1 510	1 920	2 240	1 940	Bogne	1990
04-SEY	Seyssel	Seyssel	760	1 120	1 360	1 510	1 920	2 240	2 040	Seyssel	1990
05-CHA	Chautagne	Motz	1 100	1 240	1 510	1 670	2 090	2 390	3 260	Chateaufort	1990
06-BEL	Belley	Lavours	1 100	1 400	1 605	1 700	2 000	2 186	2 280	Brens	1990
07-BRC	Brégnier Cordon	Champagneux	850	1 400	1 625	1 750	2 070	2 286	2 380		1990
08-SAB	Sault-Brénaz	Villebois	940	1 414	1 707	1 872	2 303	2 589	2 370		1990
09-VUL	Saint-Vulbas	-	ND	1 426	1 747	1 922	2 393	2 696	2 470	Lagnieu	1990
10-ALY	Ain-Lyon	Jons	ND	2 251	2 897	3 302	4 393	5 296	4 210	Pont Morand	1944
11-PBN	Pierre-Bénite	Pierre-Bénite	1 450	2 251	2 882	3 272	4 333	5 206	6 100	Ternay	1856
12-VAU	Vaugris	Vaugris	2 700	3 296	4 066	4 508	5 608	6 372	7 470		1856
13-PDR	Péage de Roussillon	St-Pierre-de-Bœuf	2 700	3 296	4 066	4 508	5 608	6 372	7 470		1856
14-STV	Saint-Vallier	Arras	2 700	3 323	4 098	4 545	5 658	6 345	7 660		1856
15-BLV	Bourg-lès-Valence	La-Roche-de-Glun	2 780	3 367	4 152	4 605	5 741	6 540	7 900	Valence	1856
16-BEA	Beauchastel	Charmes-sur-Rhône	3 400	4 204	5 164	5 743	7 302	8 520	8 260		1856
17-BLN	Baix Logis Neuf	Le Pouzin	3 630	4 480	5 495	6 094	7 650	8 800	8 530		1856
18-MON	Montélimar	Rochemaure	3 540	4 547	5 575	6 179	7 734	8 868	8 600	Viviers	1856
19-DZM	Donzère Mondragon	Donzère	3 580	4 547	5 575	6 179	7 734	8 868	8 600		1856
20-CAD	Caderousse	Caderousse	3 580	5 148	6 293	7 010	9 063	10 821	9 800	Chusclan	1856
21-AVI	Avignon	Avignon + Sauveterre	3 650	5 250	6 541	7 202	9 347	11 175	10 120		1856
22-VAL	Vallabrègues	Vallabrègues	4 100	5 928	7 504	8 480	11 229	13 524	12 500	Beaucaire	1856
23-ARL	Palier d'Arles	-	4 100	6 016	7 640	8 646	11 473	13 828	12 780		1856
24-GRH	Grand Rhône	-	ND	5 414	6 876	7 568	9 591	9 717	8 980		1856
25-PRH	Petit Rhône	-	ND	602	764	995	1 528	1 688	1 560		1856

* valeurs calculées aux stations hydrométriques (Hydro-consultant, 2018)

ND : non déterminé

en italique : valeur interpolée

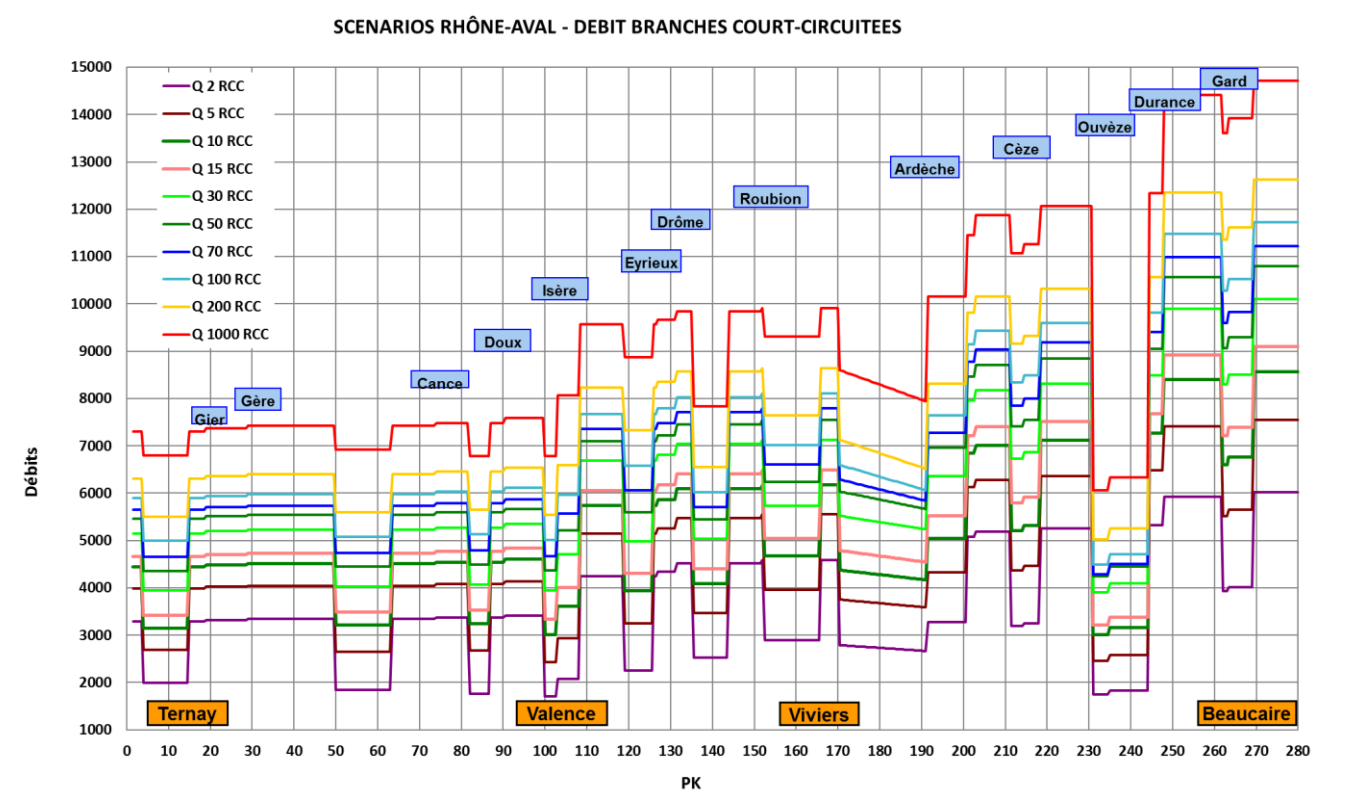
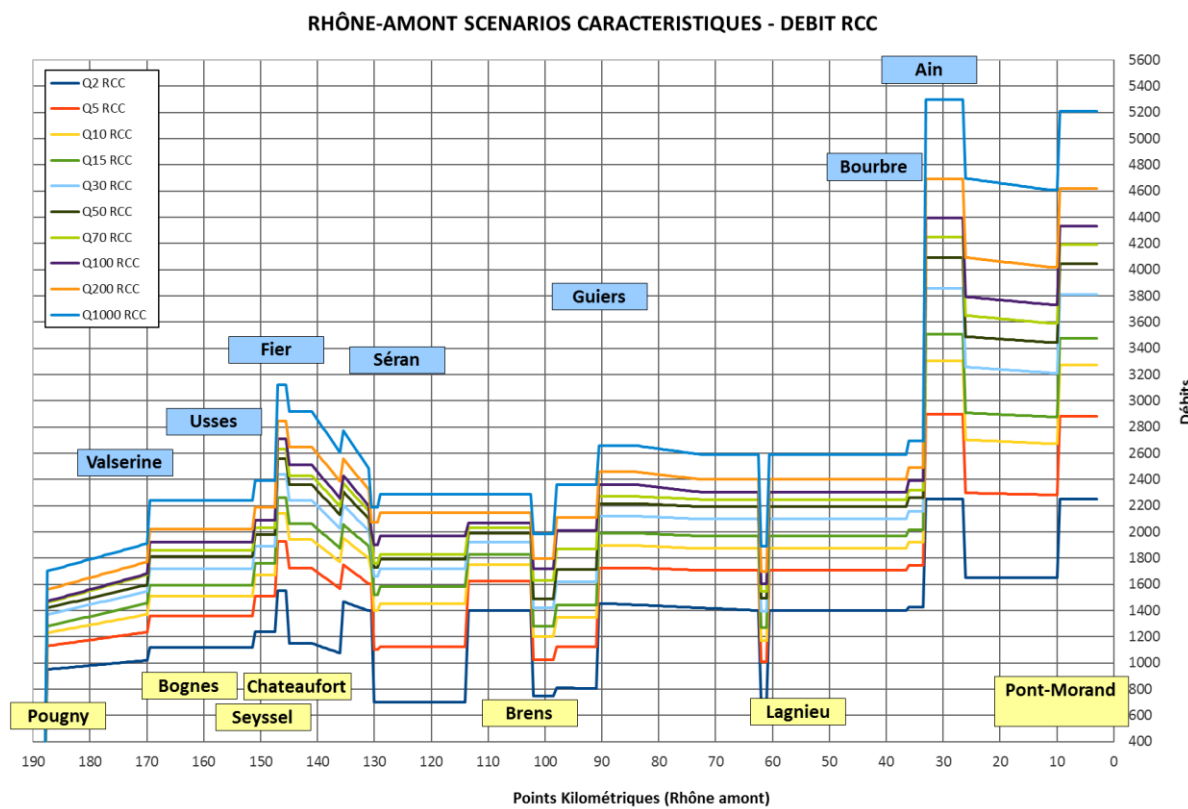
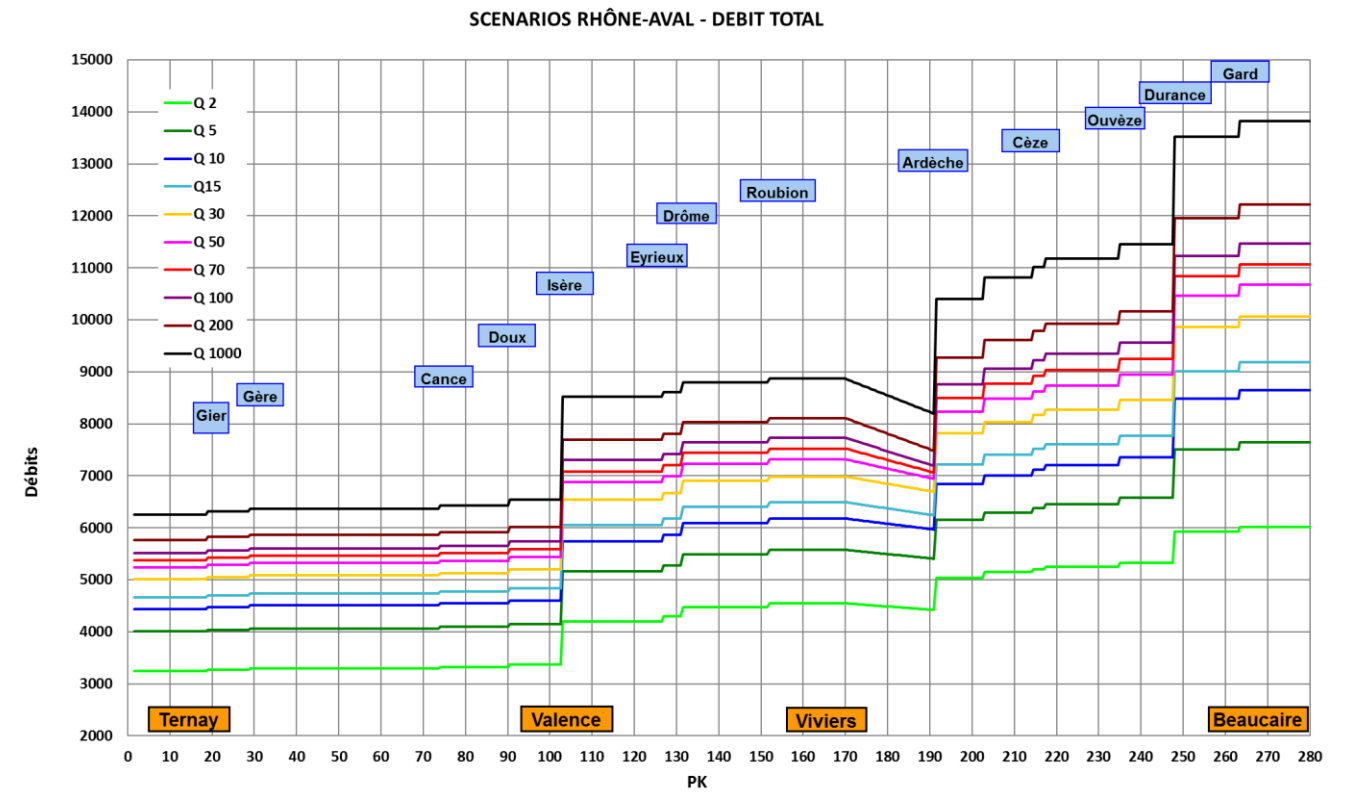
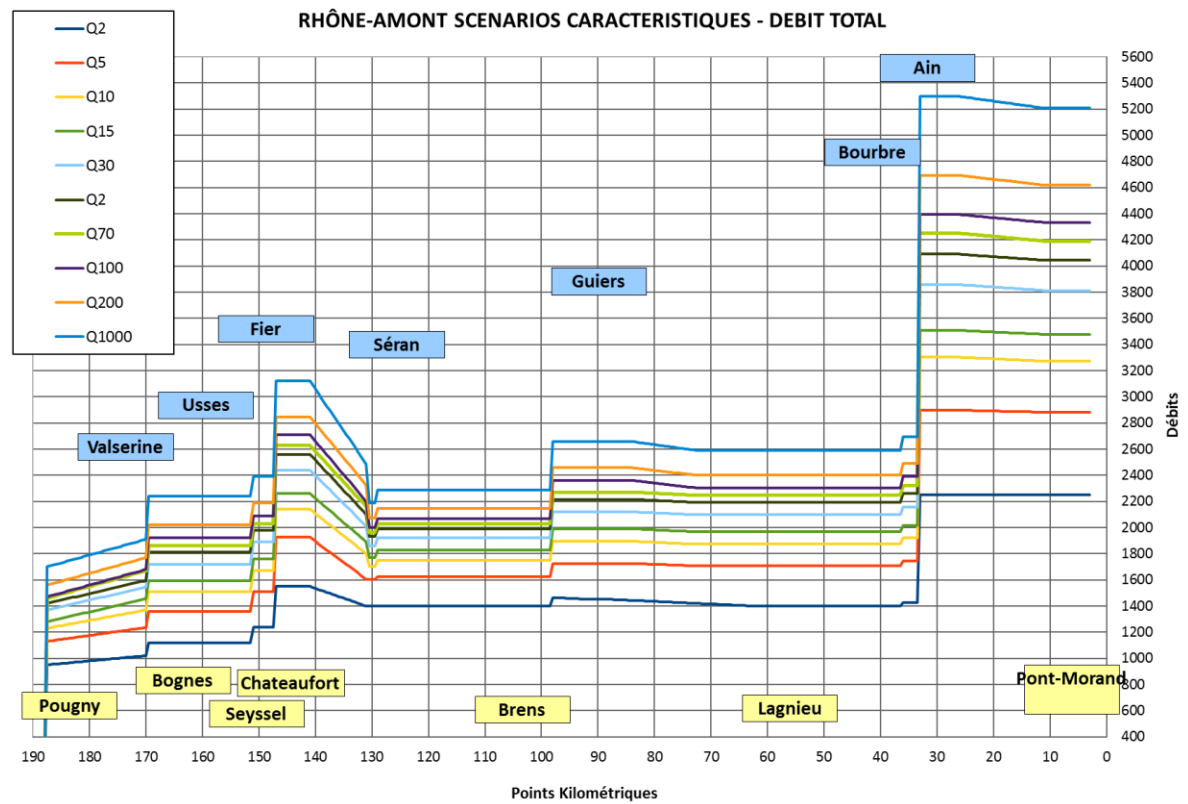


Figure 59: Evolution des débits de crue dans le Rhône amont (Rhône total et Rhône court-circuité)

Figure 60: Evolution des débits de crue le long du Rhône aval (Rhône total et Rhône court-circuité)

1.3 Impact du changement climatique

1.3.1 Impacts historiques du changement climatique

La relative rareté des crues importantes depuis un siècle et demi permet difficilement d'évaluer l'évolution de l'importance des crues : les records du 19^{ème} siècle n'ont pas été dépassés sur le Rhône en aval de Lyon. Les tests statistiques réalisés sur la série de Beaucaire, de 1920 à 2000, ne montrent pas de tendance significative à une aggravation des pointes de crue. A contrario, comme le démontre l'étude Hydroconsultant (2018) pour la DREAL (cf. 1.2.5), les débits extrêmes ont été revus à la baisse sur le fleuve. Le seul changement détecté correspond à une date plus précoce d'occurrence des crues de la saison janvier-juillet, qui est à relier à l'augmentation des températures (Le Rhône en 100 questions, Bravard et al., 2010)

Une analyse des débits menée à l'échelle nationale conclut à l'absence d'évolution générale significative. Cependant, des changements locaux existent. En région alpine, les étiages d'hiver sont moins sévères du fait d'une fonte nivale plus précoce, et les écoulements d'origine glaciaire en hausse dans les Alpes du Nord.

Sur le Rhône proprement dit, des discontinuités interannuelles peuvent être identifiées dans le régime hydrologique. Les plus anciennes semblent imputables aux actions humaines. Les autres, plus nombreuses, se concentrent autour de 1940 et de 1970. En matière de crues, la période 1940-1970 serait une phase de relative accalmie. Les années post-1970 seraient plus riches en épisodes de crue à l'image de la fin du 19^{ème} siècle avant l'aménagement du fleuve. Sur un tel système, où le débit est naturellement complexe et perturbé par la gestion humaine, il est difficile d'isoler la part éventuellement due à l'évolution du climat.

Zampieri et al. (2015) ont étudié l'évolution des débits de fleuves européens de 1921 à 2008. Il en ressort une tendance à l'avancement du pic du débit printanier d'environ 22 jours (+/- 4 jours) par siècle pour le Rhône à Beaucaire. Cette tendance à long terme serait majoritairement expliquée par une avancée de la date des précipitations printanières et l'augmentation de la part des précipitations liquides. La variabilité temporelle serait corrélée à la date de début de fonte. L'avancement de la date de fonte est estimé à environ 5 jours (+/- 1 jour) par siècle (*in* AERMC, 2016).

1.3.2 Impacts futurs du changement climatique

Les évolutions futures sont tirées de deux principales sources : étude de la gestion quantitative et des débits du Rhône en période de basses eaux (BRLi, 2014) ; bilan actualisé des connaissances sur le changement climatique (AERMC, 2016).

Les travaux et conclusions portent avant tout sur les débits moyens et les débits d'étiage. En effet, les tendances d'évolution sur les crues ne sont pas marquées ni convergentes à ce stade.

► Débits moyens et d'étiage

Globalement, les différents travaux de simulation hydrologique sous scénario de changement climatique, menés par la communauté scientifique, amènent à deux conclusions majeures :

- on peut s'attendre, dans les décennies à venir, à des changements de l'hydrologie des cours d'eau en France, dont le Rhône, en particulier : une accentuation importante des étiages estivaux ; un décalage dans le temps des ondes de fonte des cours d'eau de régime nival ou glacio-nival, qui deviendraient plus précoces.
- en revanche, il n'est pas possible de quantifier ces changements, dans l'état des connaissances actuelles, compte tenu des incertitudes.

Les incertitudes sont principalement de deux ordres :

- l'incertitude sur les déterminants du climat futur (quelles émissions futures de gaz à effet de serre ? quelle variabilité du climat ? etc.) ;
- l'incertitude associée aux différentes modélisations qui font passer de ces déterminants à des débits futurs possibles : les modèles climatiques et hydrologiques ne permettent pas de reproduire suffisamment bien les phénomènes naturels pour pouvoir simuler des évolutions hydrologiques en contexte futur avec finesse et fiabilité. C'est pour cette raison que les différents travaux existants peuvent conduire à des projections de débits très différentes sur un même cours d'eau.

Le Rhône suisse, à l'amont du Léman, a été étudié dans le cadre du projet ACQWA (<https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/centre-ressources/projets-recherche-onerc/acqwa-evaluer-les-impacts-du-climat-sur-la-quantite-et-la>). Son régime hydrologique, fortement dépendant des glaciers et du manteau neigeux, pourrait évoluer à l'horizon 2050 vers :

- une augmentation des débits au printemps, due à une fonte des neiges plus précoce associée à des précipitations hivernales plus importantes ;
- une baisse des débits estivaux (juillet-septembre), conséquence du décalage de l'onde de fonte et de l'évolution des glaciers ;
- pour les autres mois de l'année, les signaux (hausse ou baisse) divergent selon les simulations.

La gestion des retenues valaisannes et celle du lac Léman pourraient être modifiée, en conséquence des changements de l'hydrologie du Rhône et des affluents de régime nival ou glacio-nival. Leurs effets sur l'hydrologie du Rhône pourraient alors évoluer.

Le Rhône français a fait l'objet de simulations dans le cadre du projet Explore 2070 (<https://professionnels.ofb.fr/fr/node/44>). Ces simulations font ressortir les signaux suivants :

- **le Rhône pourrait connaître une baisse marquée de ses débits estivaux.** Cette baisse pourrait s'étendre sur la période de mai-juin à octobre-novembre. Compte tenu des régimes hydrologiques des différents affluents intermédiaires, et de leur sensibilité au changement climatique, il est possible que cette baisse soit plus marquée à l'aval qu'à l'amont du bassin. Ruiz-Villanueva et al. (2015) projettent une sévérité des étiages principalement dans le scénario où les débits estivaux provenant de la Suisse seraient divisés par deux pour 2100. Ceci est un point important car il a été estimé qu'environ 40% du débit du Rhône à Beaucaire provient de ses apports Suisses (Sivade et al., 2014) ;
- **on ne peut pas dégager de tendance sur les débits en hiver** : certaines simulations projettent une hausse, d'autres une baisse des débits. Cela est dû notamment aux fortes incertitudes sur l'évolution des précipitations ;
- **au printemps, la situation est également nuancée** :
 - sur le Haut Rhône (tronçon Pougny-Lagnieu), le décalage et la modification de l'onde de fonte pourrait induire une hausse des débits printaniers.
 - sur le Rhône aval, cet effet se combine à une forte incertitude sur les précipitations. Aussi, les apports intermédiaires de l'Ain et de la Saône notamment sont très incertains. En outre, les débits de l'Isère pourraient baisser à cette période sous l'effet d'une fonte plus précoce. En conséquence, il est difficile de dégager une tendance sur les débits du Rhône aval au printemps.
- **la plupart des simulations projettent une baisse de la ressource moyenne annuelle sur le Rhône.** Des résultats parfois contrastés des différentes études se dégagent tout de même une tendance à la **diminution du module du Rhône qui serait comprise entre 10 et 40 %**.

Les plus grands affluents français du Rhône ont fait l'objet de simulations dans le cadre du projet Explore 2070.

L'Ain et la Saône, de régime pluvial, pourraient voir leurs débits estivaux baisser. Cette baisse pourrait s'étendre plus largement pour les mois de mai à novembre. En revanche, les projections divergent sur les débits hivernaux : des baisses ou des hausses des débits sont simulées selon les modèles. Cette incertitude très forte sur les débits hivernaux se retrouve pour un très grand nombre de cours d'eau français, et est due notamment aux fortes incertitudes sur l'évolution des précipitations. Les simulations projettent également une baisse de la ressource moyenne annuelle de ces cours d'eau.

L'Isère pourrait connaître une onde de fonte plus précoce : l'onde de fonte actuellement centrée sur mai-juin pourrait se déplacer vers le mois d'avril ; ce qui pourrait induire une diminution des débits de mai-juin et une modification de la gestion des ouvrages de stockage sur le bassin versant. De plus, les simulations projettent une baisse des débits estivaux (juillet-août-septembre). De nombreuses simulations projettent une baisse des débits de l'Isère sur la majeure partie de l'année, et une baisse de la ressource moyenne annuelle. Ces modifications pourraient induire des changements pour la gestion des ouvrages de stockage.

La Durance pourrait également connaître une onde de fonte plus précoce et moins élevée, induisant une baisse des débits printaniers ; ainsi qu'une baisse des débits estivaux. Ces changements pourraient induire une modification dans la gestion des ouvrages de stockage et transfert.

En conclusion, en hiver, la neige ne perdurera qu'en haute montagne ; son stock plus faible et une fonte avancée provoqueront des écoulements des rivières alpines plus irréguliers. Une plus grande évaporation tout au long de l'année diminuera le débit annuel et plus notablement les étiages estivaux de nombreuses rivières, suscitant inévitablement des tensions sur la ressource en eau entre usagers.

Plusieurs inconnues demeurent. Elles concernent l'évolution de l'occupation du sol, de la végétation, des activités humaines qui se modifieront, sans qu'on sache actuellement de quelle manière. Il ne semble pas que les incertitudes de modélisation hydrologique soient les plus importantes. L'incertitude qui pèse est celle de l'évolution climatique, puis celle liée aux stratégies d'adaptation (Le Rhône en 100 questions ; Bravard et al., 2010)

Le changement climatique sera d'un ordre de grandeur suffisant pour provoquer des changements sensibles dans l'économie naturelle de l'eau (Figure 61).

► Hautes eaux et crues

Les projections sur les crues sont à prendre avec précaution. C'est sur ces phénomènes que les incertitudes sont les plus importantes. En effet, les crues extrêmes dépendent fortement des projections des précipitations extrêmes qui à ce jour sont très incertaines (Dumas et al., 2013 ; Giuntoli et al., 2015). Les résultats des modèles peuvent donner des orientations à la hausse comme à la baisse selon les hypothèses retenues.

Globalement, l'évolution des régimes de crues et des débits moyens tendent à montrer un glissement des régimes à dominante nivale vers des régimes mixtes à dominante nivo-pluviale, ce qui est cohérent avec les tendances passées.

En dehors de ces éléments de certitude, les incertitudes sont marquées selon l'échelle d'analyse (*in* AERMC, 2016) :

- A l'échelle européenne, aucun signal majeur sur les crues extrêmes ne ressort de l'analyse des tendances passées (Madsen et al., 2014) ;
- A l'échelle des Alpes, il n'y a pas de tendances sur les crues nivales. Les régimes glaciaires sont fortement affectés par une augmentation des crues liées à la fonte. Les régimes glaciaire et pluvio-nival ont leur saison de fonte avancée (sans augmentation de la durée). Les résultats d'Explore 2070 projettent une baisse des crues décennales de la Durance, de l'Isère et des rivières pyrénéennes de 10 à 30%, et un avancement d'environ 15 jours de la date moyenne des épisodes.
- A l'échelle française, l'étude de Dumas et al. (2013) projette pour le Rhône une probabilité d'occurrence des crues centennales divisée par deux à l'horizon 2050. Ruiz-Villanueva et al. (2015) annoncent une possible augmentation des crues extrêmes du Rhône en amont de Lyon sans le quantifier du fait des trop fortes incertitudes. D'autres conclusions sont opposées :
 - des travaux réalisés à l'échelle européenne montrent une tendance significative à l'augmentation de la valeur du débit centennal (Q100) du Rhône. Il pourrait augmenter de 50% pour la fin du siècle sous le scénario A1B (Rojas et al., 2012) ;
 - Les travaux d'Alfieri et al (2015) montrent également une augmentation de la valeur des crues centennales du Rhône mais plus limitée, d'environ +30 % pour la fin du siècle sous le scénario RCP 8.5.

En conclusion, les tendances d'évolution des débits de crue ne sont pas confirmées à ce stade. Cela signifie que les mesures de gestion pratiquées localement au niveau des ouvrages (notamment la gestion du marnage du lac Léman, la gestion des grands réservoirs sur le Rhône ou ses affluents) garderont un poids significatif dans la gestion des événements de crues.

Pour la question du fonctionnement hydrosédimentaire, très tributaires des hautes eaux et des crues, en dehors d'une baisse des contributions de crues printanières sur les affluents du sud des Alpes (en particulier sur la Durance), il est difficile d'anticiper des évolutions pour l'axe Rhône. La variabilité des phénomènes de crues restera le paramètre explicatif principal.

Vulnérabilité au changement climatique pour l'enjeu disponibilité en eau

V 20 août 2013

Incidences du changement climatique sur les déséquilibres quantitatifs superficiels en situation d'étiage (compte tenu des aménagements actuels)

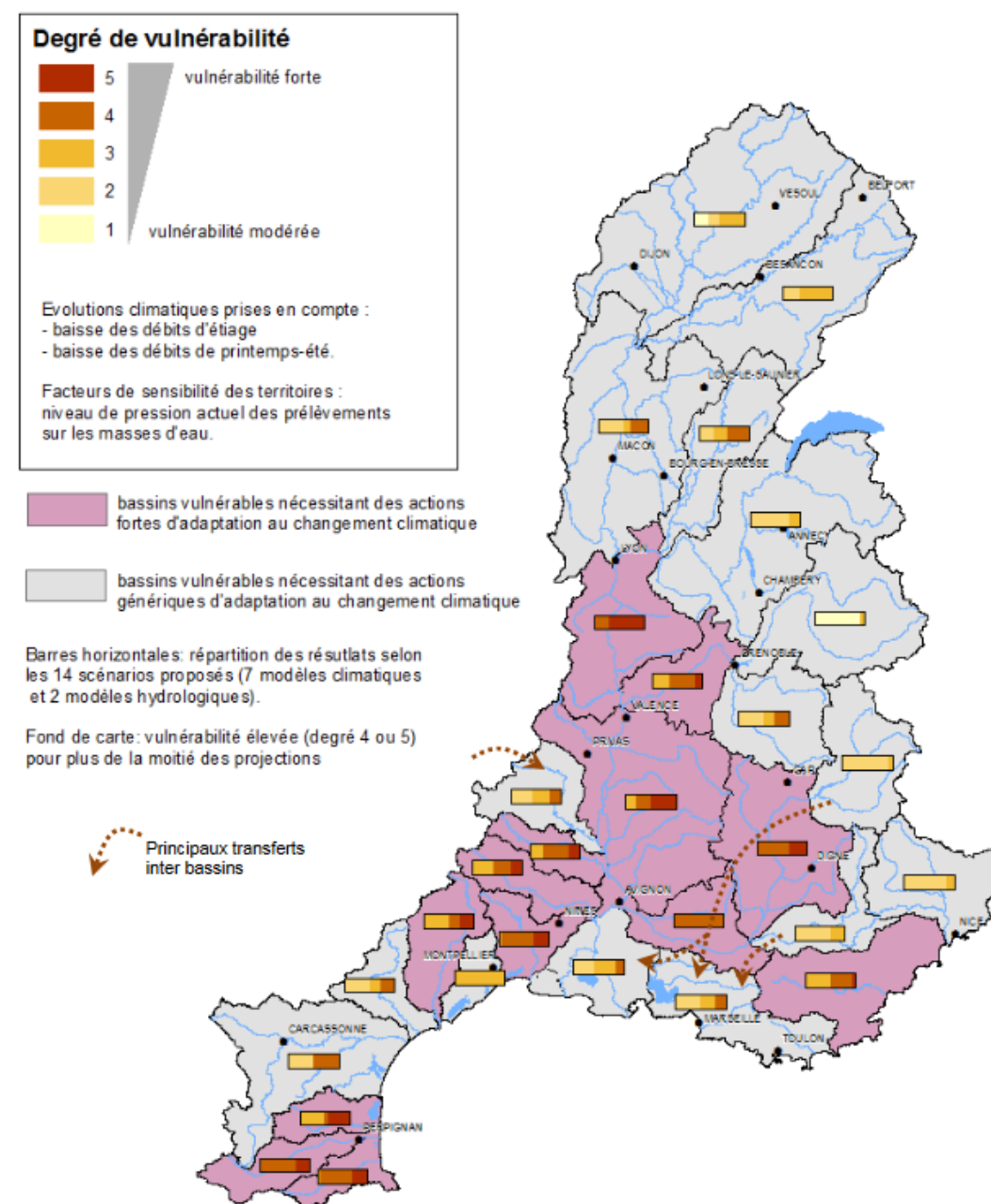


Figure 61: Vulnérabilité au changement climatique pour l'enjeu disponibilité en eau (Etude de la caractérisation des vulnérabilités du bassin du Rhône-Méditerranée aux incidences du changement climatique dans le domaine de l'eau, Agence de l'eau 2013)

1.4 Rôle hydraulique des ouvrages hydroélectriques

Il existe trois types d'ouvrages hydroélectriques sur le Rhône : des barrages-réservoirs, dont le seul représentant est Génissiat ; des ouvrages au fil de l'eau (Verbois, Chancy-Pougny, Seyssel, Vaugris) et des barrages de dérivation vers des usines-écluses, intégrés dans un aménagement dit « en feston ».

Le barrage-réservoir est sensible à la sédimentation et l'enjeu principal pour le barrage de Génissiat est de ne pas aggraver le comblement de la retenue ; ce volet est décrit dans la Mission 4. La partie qui suit est consacrée aux autres ouvrages, notamment en feston, dont la configuration a des incidences sur le fonctionnement hydrosédimentaire.

1.4.1 Schéma type d'un ouvrage à dérivation

Le schéma type des aménagements hydroélectriques et de navigation du Rhône est appelé « aménagement en feston », sur le principe d'une dérivation vers une centrale hydroélectrique et d'un retour des débits dérivés dans le cours initial. Ainsi, ce type d'aménagement comprend (d'après Le Rhône en 100 questions, Bravard et al., 2010 ; actualisé ; cf. Figure 62 et Figure 63) :

- Un barrage de retenue (à hauteur ajustable) construit sur le cours naturel du fleuve, qui crée une retenue contenue par des endiguements latéraux, ou « barrages latéraux » au sens de la sûreté des ouvrages. Les retenues sur le Rhône ont une longueur de 4 à 24 km et une largeur de 200 à 500 m ;
- Un canal de dérivation à faible pente sur lequel sont installées la centrale hydroélectrique et l'écluse pour la navigation. Les canaux de dérivation ont une longueur de 2,1 à 29,1 km et une largeur de 80 à 220 m ;
- Des contre-canaux qui longent les endiguements pour drainer les terres agricoles et assurer l'équilibre piézométrique des nappes. Ils permettent aussi de collecter les eaux percolant à travers les digues qui ne sont pas, par choix technique, étanches.
- Tous les aménagements réalisés sur le Rhône respectent ce schéma-type en feston hormis les aménagements de Vaugris et de la partie amont du Haut-Rhône plus encaissée : Verbois, Chancy-Pougny, Génissiat et Seyssel. L'usine de Génissiat est intégrée dans le barrage de moyenne chute. Le barrage et l'usine des autres ouvrages sont accolés l'un à l'autre, avec une écluse en plus pour Vaugris.

1.4.2 Répartition de débits

► Principes généraux

Le mode de gestion des ouvrages répond aux objectifs d'aménagement du Rhône et tient compte des choix de leur conception, de leurs caractéristiques et des conditions d'écoulement du fleuve. Une consigne d'exploitation est établie pour chaque aménagement et approuvée par les autorités de tutelle.

Le mode de gestion est basé principalement sur la régulation des niveaux des plans d'eau en fonction des débits entrants de chacun des aménagements.

La consigne d'exploitation définit pour chaque aménagement des lois hauteur/débit $Q(H)$ à respecter en des points de contrôle précis de la retenue appelés « points de réglage ». La détermination de ces points et des lois $Q(H)$ associées font l'objet d'études hydrauliques tenant compte des caractéristiques de la retenue ainsi que des conditions d'écoulement.

Chaque retenue possède un ou deux points de réglage. La régulation du plan d'eau est assurée par l'usine tant que le débit du Rhône est inférieur à son débit d'équipement. Au-delà, c'est le barrage qui s'ouvre progressivement et qui assure la continuité de la régulation. Pour les forts débits, il en résulte un effet de basculement du plan d'eau (Le Rhône en 100 questions, Bravard et al., 2010).

► Débits et régimes réservés

En situation courante, représentée par le débit semi-permanent (dépassé 50% du temps), le canal usinier dérive l'essentiel du débit : 1,1 à 2,3 fois le module selon les unités (Tableau 14).

Le Rhône initial, ou Vieux Rhône, reçoit le complémentaire de débit sous forme de débit réservé constant (5 à 100 m³/s) ou sous forme de régime réservé fluctuant selon les saisons : 20 à 60 m³/s pour le régime le moins élevé (08-SAB) ; 80-150 m³/s pour le plus élevé (07-BRC). Les exceptions avec les débits réservés les plus faibles sont Génissiat, Seyssel et Avignon (RCC de Villeneuve).

Toutes les données sont récapitulées dans le Tableau 14.

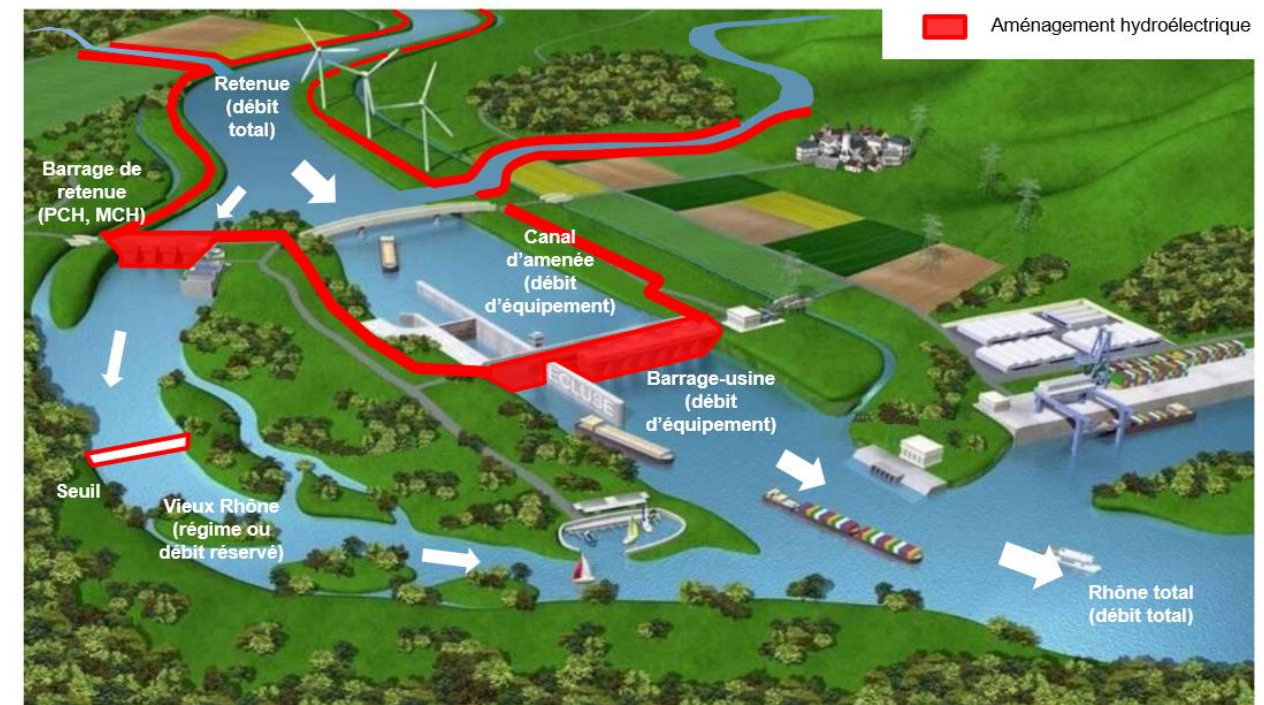


Figure 62: Schéma type d'une répartition des débits liquides en débit semi-permanent

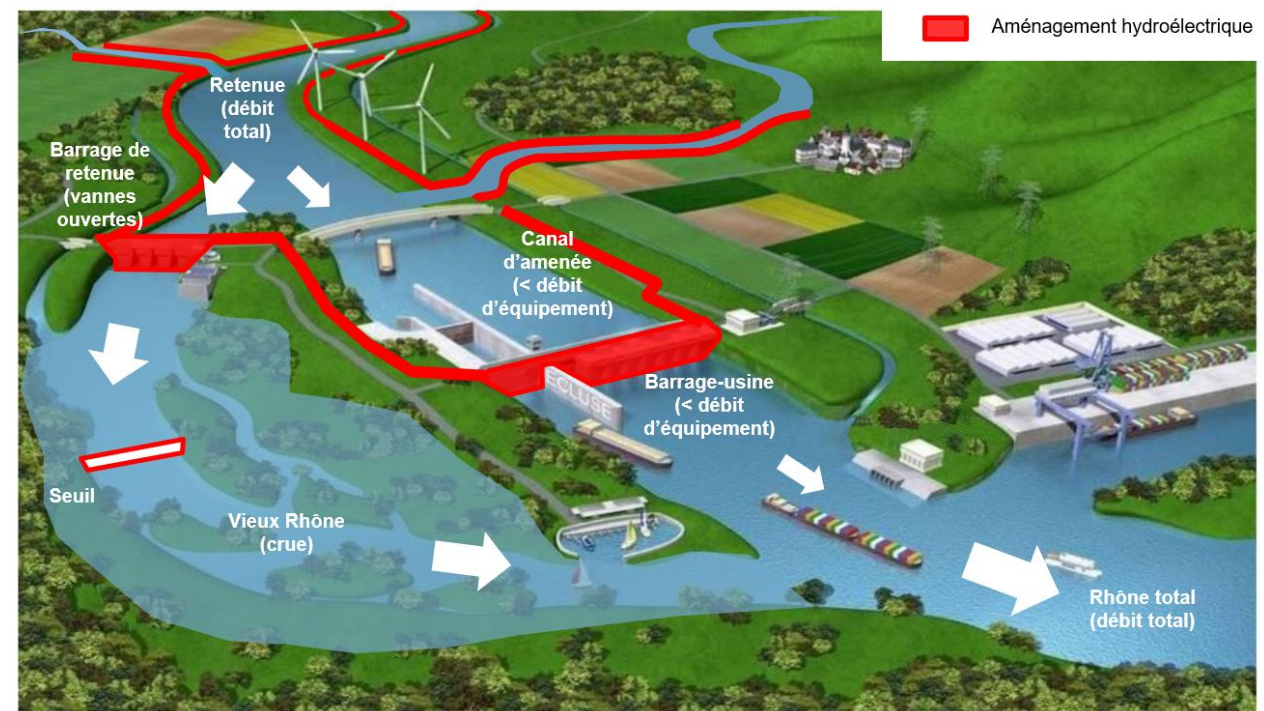


Figure 63: Schéma type d'une répartition des débits liquides en crue (exemple représentatif pour une crue décennale Q10)

En crues

En crues, dès que le débit d'équipement des groupes de la centrale hydroélectrique est dépassé, les organes mobiles du barrage de retenue commencent à être ouvert. Le pilotage des organes mobiles est réalisé à partir du suivi de 2 points de réglages :

- le premier est situé à distance dans la retenue, il sert à gérer les débits courants et les petites crues (Q2, Q5). Ce point de réglage est localisé au niveau du pivot des lignes d'eau pour les débits semi-permanents et les mêmes petites crues (Q2, Q5) ;
- le second est situé à proximité du barrage de retenue, il sert à gérer les écoulements en crues au passage du barrage de retenue (Q10 et supérieures).

À l'amont du barrage le niveau s'abaisse et l'on pourrait croire à une vidange de la retenue alors que s'amorce la crue. En réalité il n'en est rien, le niveau à l'amont du point de réglage monte progressivement dans le respect de deux principes fondamentaux, à savoir la croissance progressive du volume de la retenue en fonction du débit et la non-aggravation des niveaux observés avant aménagement dans les zones non protégées contre les inondations (voir exemples figures 1 et 2).

De même, le basculement du plan d'eau conduit à l'abaissement du niveau à l'amont de l'usine et à l'exhaussement de son niveau aval. La chute disparaît progressivement et le débit turbiné baisse avec l'intensité de la crue. Cependant, sauf exception, l'usine reste en fonctionnement, non plus dans un objectif de production hydroélectrique, mais seulement pour soulager le Vieux-Rhône d'une partie du débit. Pour certaines usines du Haut Rhône, le débit est réduit, voire annulé, pour permettre aux principales zones d'expansion des crues de conserver leur rôle d'écêtement (marais de Lavours et de la Chautagne, plaine de Pierrelatte...). (Le Rhône en 100 questions, Bravard et al., 2010).

La gestion des ouvrages est assurée par une conduite automatique locale par aménagement (PA : Poste Aménagement), qui est surveillée et contrôlée par le Centre de Téléconduite du Rhône (CTR). Celui-ci, basé à Lyon, assure la coordination et la surveillance du bon fonctionnement des installations de l'ensemble de la chaîne.

Tableau 14: Synthèse des débits des équipements hydroélectriques

N°UHC	UHC	Ouvrage	Débits d'équipement (m³/s)						
			Régime / débit réservé antérieur	Régime / débit réservé actuel	Valeur maximal du régime / débit réservé	Valeur max / module	Débit d'équipement	Qéquip/Qmodule	Module à l'entrée de l'usine
01-SUI	Suisse (Seujet)	Seujet	-	-	-	-	550	2,3	241
01-SUI	Suisse (Verbois)	Verbois	-	-	-	-	620	1,9	330
02-CHP	Chancy-Pougny	Chancy-Pougny	-	-	-	-	600	1,8	330
03-GEN	Génissiat	Génissiat	5	5	5	1,5%	750	2,3	330
04-SEY	Seyssel	Seyssel	5	5	5	1,5%	600	1,7	360
05-CHA	Chautagne	Motz	10-20	50-70	70	21%	700	1,8	400
06-BEL	Belley	Lavours	25-60	60-100	100	25%	640	1,6	400
07-BRC	Brégnier Cordon	Champagneux	>25	80-150	150	38%	700	1,8	400
08-SAB	Sault-Brénaz	Villebois	20-60	20-60	60	14%	700	1,6	450
09-VUL	Saint-Vulbas	-	-	-	-	-	-	-	450
10-ALY	Ain-Lyon	Jons	30-60	30-60	60	10%	640	1,1	590
11-PBN	Pierre-Bénite	Pierre-Bénite	10-20	100	100	17%	1 380	1,3	1 030
12-VAU	Vaugris	Vaugris	-	-	-	-	1 400	1,4	1 030
13-PDR	Péage de Roussillon	St-Pierre-de-Bœuf	10-20	50-125	125	12%	1 600	1,6	1 030
14-STV	Saint-Vallier	Arras	5-10	56	56	5%	1 650	1,6	1 030
15-BLV	Bourg-lès-Valence	La-Roche-de-Glun	10-20	72	72	7%	1 800	1,3	1 400
16-BEA	Beauchastel	Charmes-sur-Rhône	10-20	74,5	74,5	5%	2 100	1,5	1 400
17-BLN	Baix Logis Neuf	Le Pouzin	10-20	74,5	74,5	5%	2 100	1,4	1 500
18-MON	Montélimar	Rochemaure	15-60	75,4	75,4	5%	1 800	1,2	1 500
19-DZM	Donzère Mondragon	Donzère	60	75,4	75,4	5%	1 980	1,3	1 500
20-CAD	Caderousse	Caderousse	5	78	78	5%	2 280	1,4	1 600
21-AVI	Avignon	Avignon + Sauveterre	5	17,5	17,5	1%	2 400	1,5	1 600
22-VAL	Vallabrègues	Vallabrègues	10	84	84	5%	2 200	1,3	1 700
23-ARL	Palier d'Arles	-	-	-	-	-	-	-	-
24-GRH	Grand Rhône	-	-	-	-	-	-	-	-
25-PRH	Petit Rhône	-	-	-	-	-	-	-	-

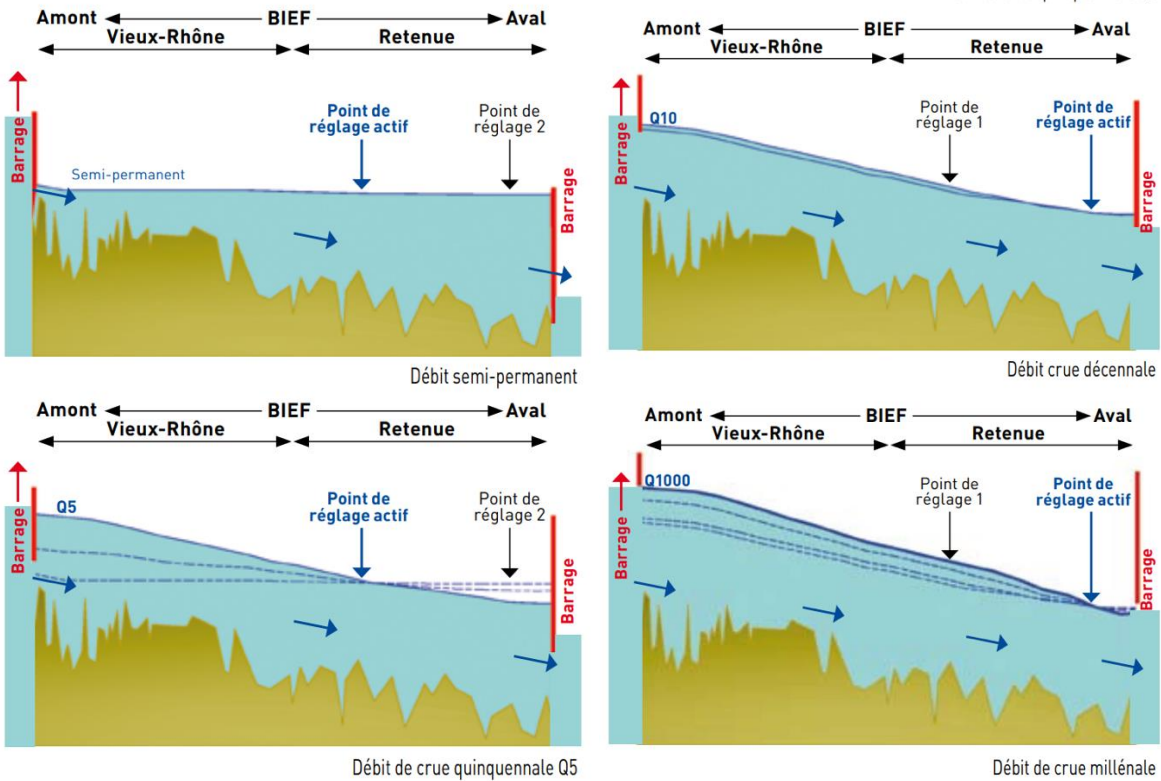


Figure 64 : Principe de l'effacement des ruptures de charge hydraulique sur les ouvrages CNR en fonction des niveaux de crue (source : Le Rhône en 100 questions, 2010)

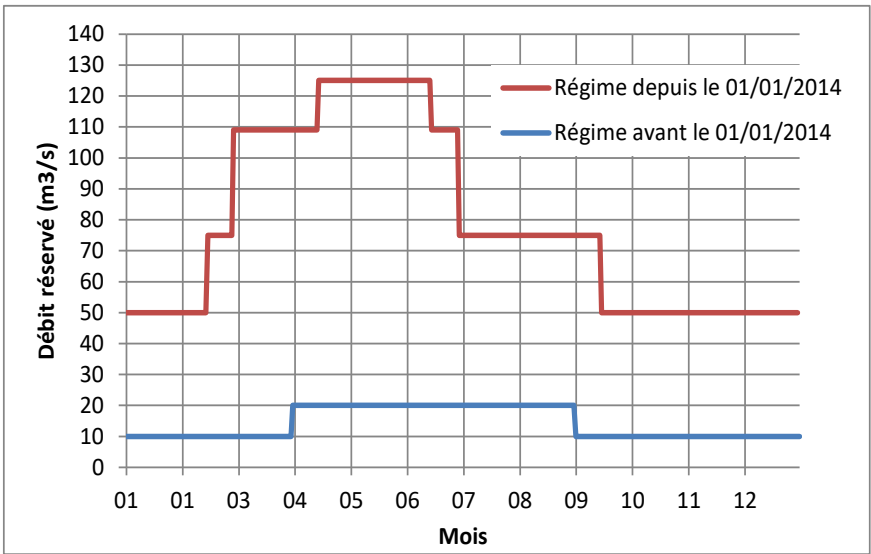


Figure 65: Exemple de régime réservé et modifié du Vieux-Rhône : UHC#13-PDR de Péage de Roussillon

► Courbes de débits classés

Pour chaque retenue et Rhône court-circuité, une courbe des débits classés a été attribuée à partir des stations hydrométriques du linéaire du Rhône (cf. §. 1.1).

Deux approches sont possibles pour estimer les débits classés dans les Vieux Rhône :

- Approche théorique : les dernières études ayant établi des courbes de débit classés (EGR, 2000 ; Vázquez-Tarrío, 2018) se sont basées sur une répartition théorique des débits au niveau du barrage de dérivation, selon les consignes de gestion de chaque ouvrage ;
- Approche opérationnelle : la CNR dispose de mesure de niveau d'eau dans les Vieux Rhône pour le pilotage de ses ouvrages, en lien avec les points de réglages dans les retenues (cf. § précédent) ; ces niveaux d'eau peuvent être transformés en débit. Cependant, les courbes de tarage associées sont moins précises que celles du Rhône total, ce qui ne permet pas d'obtenir une courbe des débits classés avec une incertitude inférieure à 10%. Il reste donc un travail de validation pour que les données puissent être utilisées.

L'approche théorique a donc été privilégiée, tout au moins dans l'affichage des débits. Toutefois, les données de la CNR montrent que les débits dans les Vieux Rhône sont plus élevés que selon les lois théoriques. Cela est lié au fait que l'exploitation quotidienne des groupes hydroélectriques conduit en réalité, notamment du fait de la maintenance de ces groupes, à suspendre des groupes hydroélectriques et à déverser plus souvent dans les Vieux Rhône.

Le phénomène est plus marqué sur le Haut Rhône du fait de la présence de 2 groupes sur les usines de Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon et Sault-Brénaz (cf. Tableau 6). Lorsqu'un groupe est en maintenance, seul le deuxième peut subvenir et la part de débit déversée dans le Vieux Rhône est importante. Pour le Rhône aval, la présence de 4 groupes en amont de l'Isère et 6 groupes en aval conduit à des déversés plus proches des courbes théoriques.

La Figure 67 illustre ces écarts entre la courbe théorique (orange) et la courbe réelle (verte), si celle-ci est supposée validée. Pour le cas extrême de Chautagne (05-CHA), la fréquence des déversés est de 5% du temps dans le cas théorique, et elle serait de l'ordre de 15% dans la réalité, soit 3 fois plus.

On notera que les régimes et débits réservés ont été relevés entre 1999 et 2014 sur la plupart des tronçons court-circuités du Rhône (cf. Figure 65). Les courbes de débits classés de chaque UHC fournies par CNR peuvent intégrer les anciennes répartitions de débit. Aussi, les courbes de débits classés établies dans les fiches UHC ont été ajustées sur la base d'une approche théorique de la restitution des débits réservés.

Ces courbes de débits classés mettent en évidence que les Vieux-Rhône fonctionnent en régime/débit réservé en moyenne entre 83% du temps [100% moins 17 %] d'après les répartitions de débits théoriques, et en moyenne 77% du temps [100% moins 23%] d'après les débits réels non validés de la CNR. Les déversés auraient donc lieu 1,6 fois plus souvent que la répartition théorique des débits ne l'indique.

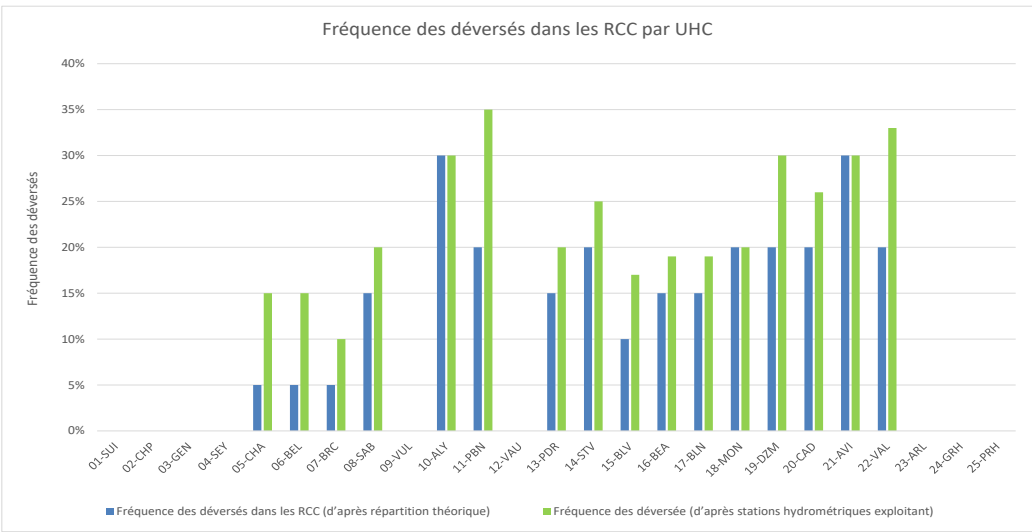


Figure 66 : Fréquence des déversées dans les Vieux-Rhône (d'après données théoriques et CNR)

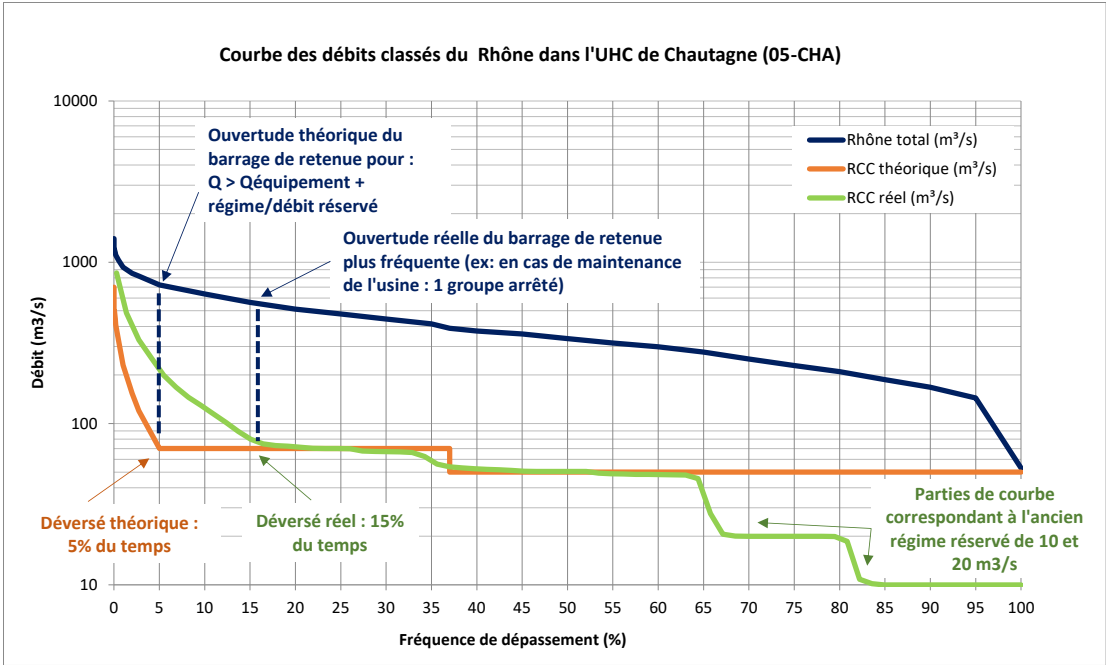


Figure 67 : Exemple de courbes de débits classé pour Chautagne (données théoriques et CNR)

Tableau 15 : Fréquence des déversées dans les tronçons court-circuités par UHC (données théoriques et CNR)

N°UHC	Nom UHC	Ouvrage	Fréquence des déversés dans les RCC (d'après répartition théorique)	Fréquence des déversée (d'après stations hydrométriques exploitant)	Facteur d'augmen-tation des déversés
01-SUI	Suisse (Seujet)	Seujet			
01-SUI	Suisse (Verbois)	Verbois			
02-CHP	Chancy-Pougny	Chancy-Pougny			
03-GEN	Génissiat	Génissiat			
04-SEY	Seyssel	Seyssel			
05-CHA	Chautagne	Motz	5%	15%	3,0
06-BEL	Belley	Lavours	5%	15%	3,0
07-BRC	Brégnier Cordon	Champagneux	5%	10%	2,0
08-SAB	Sault-Brénaz	Villebois	15%	20%	1,3
09-VUL	Saint-Vulbas	-			
10-ALY	Ain-Lyon	Jons	30%	30%	1,0
11-PBN	Pierre-Bénite	Pierre-Bénite	20%	35%	1,8
12-VAU	Vaugris	Vaugris			
13-PDR	Péage de Roussillon	St-Pierre-de-Bœuf	15%	20%	1,3
14-STV	Saint-Vallier	Arras	20%	25%	1,3
15-BLV	Bourg-lès-Valence	La-Roche-de-Glun	10%	17%	1,7
16-BEA	Beauchastel	Charmes-sur-Rhône	15%	19%	1,3
17-BLN	Baix Logis Neuf	Le Pouzin	15%	19%	1,3
18-MON	Montélimar	Rochemaure	20%	20%	1,0
19-DZM	Donzère Mondragon	Donzère	20%	30%	1,5
20-CAD	Caderousse	Caderousse	20%	26%	1,3
21-AVI	Avignon	Villeneuve	30%	30%	1,0
22-VAL	Vallabrègues	Vallabrègues	20%	33%	1,7
23-ARL	Palier d'Arles	-			
24-GRH	Grand Rhône	-			
25-PRH	Petit Rhône	-			
MOYENNE			17%	23%	1,6

► Comparatif entre les débits équipés pour chaque ouvrage et le module du Rhône

Un comparatif a été réalisé entre le module du Rhône et le débit d'équipement de chaque ouvrage le long du Rhône (Figure 68).

L'analyse de ces données indique qu'une tendance globale à la baisse entre l'amont et l'aval du ratio entre le débit équipé de chaque ouvrage et le module du Rhône au droit de chaque ouvrage : 1,6 à 2,3 sur le Haut Rhône ; 1,2 à 1,6 sur le Bas Rhône. On notera que l'ouvrage le plus faiblement équipé est aussi le plus ancien : celui de Cusset, avec un débit d'équipement proche du module. Les ouvrages les plus récents sur le Haut Rhône ont tendance à avoir un débit d'équipement plus élevé.

Ainsi, les débits de hautes eaux sont plus fréquemment exploités sur le Haut-Rhône qu'en aval de Lyon. Ceci est cohérent avec l'analyse de la fréquence des déversés (cf. Tableau 15 ; Figure 66).

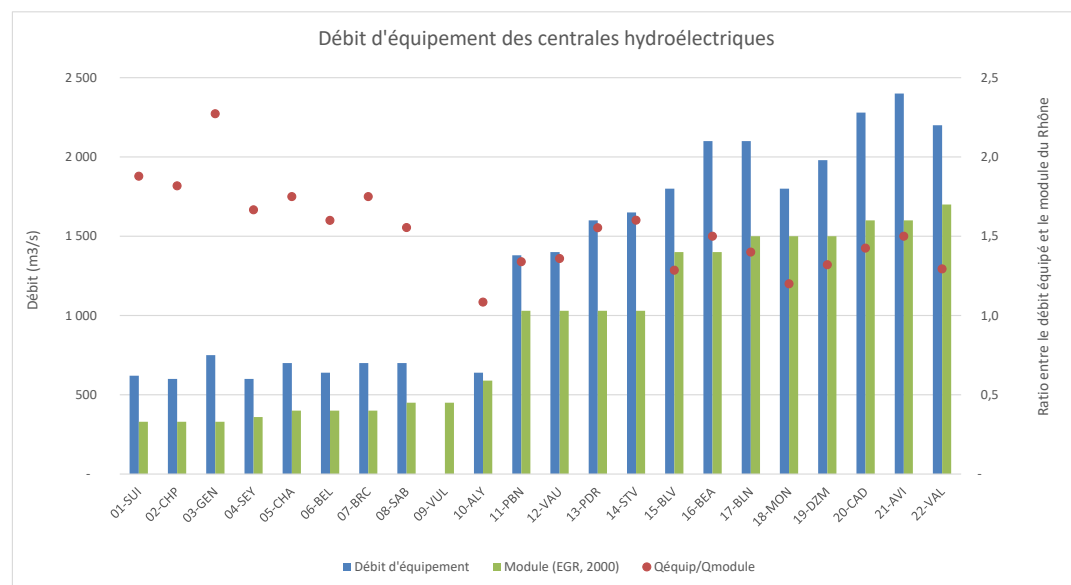


Figure 68: Comparaison entre le débit d'équipement et le module du Rhône

1.4.3 Lignes d'eau

► Données exploitées

Les lignes d'eau exploitées par la suite sont issues du modèle MAGE développé par l'IRSTEA (aujourd'hui INRAE), dans le cadre des travaux scientifiques de l'OSR, entre Pougny (02-CHP) et Arles (23-ARL). Ce modèle a fait l'objet d'ajustement en parallèle de la présente étude, notamment au niveau du calage des consignes de gestion en crues des barrages du Haut-Rhône. Ce travail a permis d'actualiser les travaux de Vázquez-Tarrío de 2018 en une version de 2020.

Cependant, le modèle MAGE, construit initialement pour l'étude des transferts de polluants et de MES (module MAGE-ADIS) n'est pas complètement adapté à la modélisation en crue. En effet, le modèle a été construit en 1D et l'inondation au-delà du lit mineur n'est pas représentée.

Il a donc été convenu avec le SECTECH de l'étude de n'afficher les résultats de lignes d'eau que pour Q2 sur le Haut-Rhône, et pour Q2 et Q10 pour le Rhône aval. Les lignes d'eau supérieures sont considérées comme non validées à ce stade. Pour les calculs de charriage annuel de Vázquez-Tarrío utilisés par la suite, l'incidence est négligeable car l'essentiel du transport solide est réalisé pour les débits inférieurs ou égaux à Q2 ; les courbes de débits classés qui servent de base au calcul sont justement construites avec des débits inférieurs à Q2.

Pour le débit semi-permanent (Q50%), les lignes d'eau de modèles hydrauliques locaux établis par la CNR ont été utilisées. Etant donné que les lignes d'eau sont positionnées dans un repère de PK différent de celui du modèle MAGE (cf. PARTIE A / §.3.5), il a été nécessaire de procéder à des recalages d'abscisses à partir de points durs connus (barrages, seuils).

Les lignes d'eau en territoire suisse n'ont pas été exploitées. En synthèse, les lignes d'eau qui ont été exploitées pour les différentes occurrences de crues sont les suivantes :

- Semi-permanent : modélisation CNR ;
- Biennale : modélisation INRAE sous le logiciel MAGE ;
- Décennale : modélisation INRAE sous le logiciel MAGE uniquement pour le Rhône aval.

Ces lignes d'eau sont illustrées sur la Figure 69 (secteur de Péage de Roussillon) et la Figure 72 (ensemble du Rhône). Sur cette dernière figure la ligne d'eau pour Q10 est conservée à titre indicatif.

Les lignes d'eau MAGE existantes pour des crues supérieures à Q10 n'ont pas été exploitées.

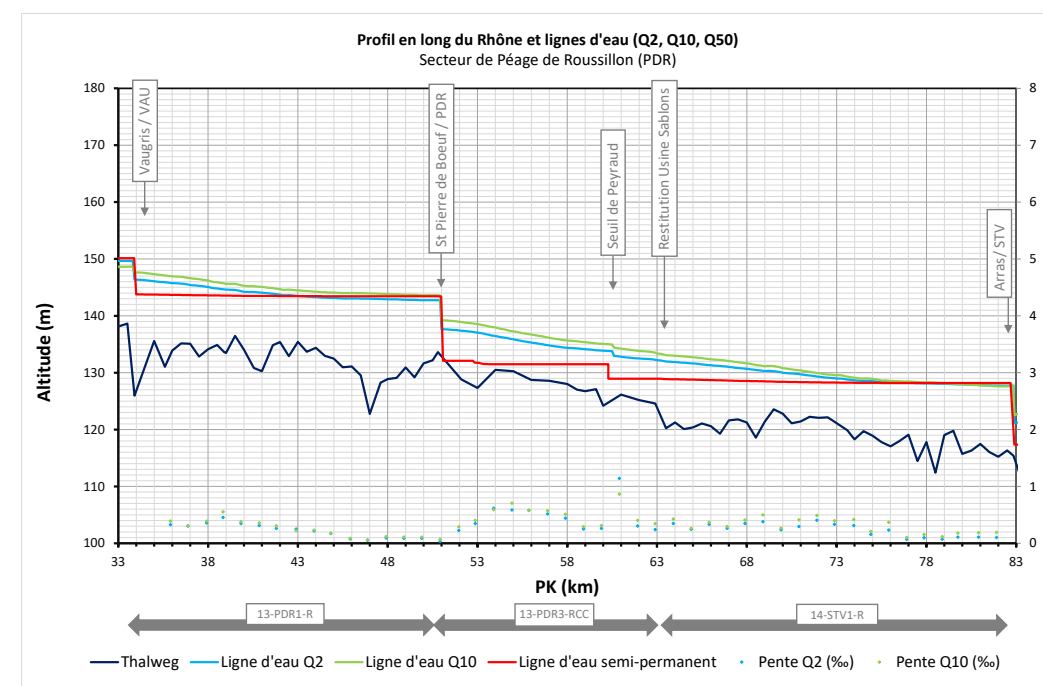


Figure 69: Lignes d'eau sur l'UHC de Péage de Roussillon

► Longueurs de remous et pertes de charge

Principaux ouvrages hydroélectriques

La longueur du remous et la perte de charge au passage d'un barrage, notamment en période de crues, sont des indicateurs simples et utiles pour l'appréciation de la continuité sédimentaire. En effet, si en crue un barrage ne produit plus de perte de charge suite à l'ouverture des vannes, alors la longueur de remous en amont est nulle et une pente d'écoulement proche de la situation avant aménagements se rétablit au sein de la retenue. Ainsi, une continuité sédimentaire similaire à celle qui existerait sans la présence de l'ouvrage devrait pouvoir s'observer.

Les différents ouvrages CNR, ainsi que la retenue de Jons (EDF), soit 19 barrages génèrent un remous hydraulique total d'une longueur de 287,7 km en régime semi-permanent. La crue biennale est généralement un bon indicateur hydrologique en termes d'activité morphodynamique, car sur une rivière non perturbée, elle peut être associée à une crue morphogène. Dans l'hypothèse d'une telle crue biennale sur tout le Rhône, la longueur totale de remous diminue fortement (110 km) mais reste importante pour certains ouvrages : par

exemple, Génissiat, Sault-Brénaz, St-Vallier, Montélimar, Caderousse, Vallabrègues conservent une longueur de remous supérieure à 7 km pour Q2.

La Figure 70 établit un graphique des pertes de charge pour Q2 en fonction des longueurs de remous. Une gradation des ouvrages apparait entre les ouvrages qui s’effacent presque pour Q2 (10-ALY) et des ouvrages continuent à présenter un long remous (supérieur à 7 km) et une forte perte de charge (4 à 7 m) (08-SAB, 14-STV, 18-MON, 20-CAD, 22-VAL). Entre ces deux groupes, les effets des retenues sont importants, y compris pour le groupe vert (05-CHA, 06-BEL, 07-BRC, 19-DZM) pour lequel les pertes de charges sont de 3 à 5 m et les longueurs de remous de 1,5 à 3,5 m).

Les ouvrages CNR, ainsi que les aménagements de Jons-Cusset gérés par EDF, génèrent une chute artificielle cumulée de 275,92 m en régime semi-permanent soit 86% du dénivelé total entre le barrage de Génissiat et le débouché en mer. Le Rhône est donc un fleuve fortement exploité avec une ligne d’eau modifiée sur un très grand linéaire.

Ouvrages sur les portions de Rhône court-circuité

Les ouvrages secondaires ayant des impacts sensibles sur les lignes d’eau ont été répertoriés dans le Tableau 16. Les hauteurs de chute et longueurs de remous sont issues des lignes d’eau CNR en débit semi-permanent et des lignes en crue Q2 d’après le modèle MAGE (cf. Tableau 16).

Les ouvrages les plus impactants en termes de hauteur de chute sont les seuils de Yenne, des Molottes et de Peyraud. Ces seuils ont des hauteurs de chutes supérieurs à 2 m en régime semi-permanent et présentent des remous conséquents de plusieurs kilomètres au sein des Rhône court-circuités (jusqu’à 6,5 km en régime semi-permanent pour le seuil de Peyraud). Leur influence sur la ligne d’eau est cependant fortement réduite dès la crue biennale. Les seuils de Yenne et de Peyraud restent impactant en crue biennale (Q2) ce qui signifie qu’ils ne peuvent être totalement transparents au transport solide par charriage.

Tableau 16: Impacts hydrauliques des ouvrages secondaires sur les lignes d’eau du Rhône

UHC	Seuils secondaire	Hauteur de chute en régime semi permanent (m)	Hauteur de chute (Q2) (m)	Longueur du remous hydraulique en régime semi-permanent (km)	Longueur du remous hydraulique en régime Q2 (km)
05-CHA	Seuil des Iles	0,7	0,5	1,9	0,3
05-CHA	Seuil Salomon	0,3	1,3*	0,6	0,2
06-BEL	Seuil Fournier	0,9	0,3	2,6	0,5
06-BEL	Seuil de Lucey	1,1	0	0,5	0
06-BEL	Seuil de Yenne	3,2	1,7	1,3	1,2
07-BRC	Seuils des Molottes	2,2	0,5	1,5	0,1
09-VUL	Seuil du Grand-Sault	1,5	0,4	1,1	0,5
09-VUL	Seuil de Pérolrière	0,3	0,2	0,4	0,4
10-ALY	Seuil PK14	0,6	1,2	1,5	0
10-ALY	Seuil PK9	0,3	0	0	0
10-ALY	Seuil TEO	2,3	0,5	0	0
13-PDR	Seuil de Peyraud	2,6	0,9	6,5	2,0
22-VAL	Seuil de Beaucaire	2,0	2,4	6,0	0

* valeur basée sur le modèle MAGE, qui semble surestimée et demande à être vérifiée.

L’inventaire ci-dessus n’inclut pas les seuils sur les affluents dans les zones de confluences. Toutefois, ces ouvrages sont décrits dans les fiches UHC.

Tableau 17: Longueur des remous hydrauliques des ouvrages sur le Rhône

N°UHC	Nom UHC	Longueur de remous en débit demi-permanent (km)	Longueur de remous pour Q2 (km)	Perte de charge pour Q2 (m)	Perte de charge pour une crue exceptionnelle (m). A droite : crue considérée (d'après EGR, 2000)	
01-SUI	Suisse (Seujet)	ND	ND	ND	ND	ND
01-SUI	Suisse (Verbois)	ND	ND	ND	ND	ND
02-CHP	Chancy-Pougny	ND	ND	ND	ND	ND
03-GEN	Génissiat	22,5	17,5	42	ND	ND
04-SEY	Seyssel	6,8	4,5	5,4	ND	ND
05-CHA	Chautagne	5,5	3,0	4,8	3,1	1990
06-BEL	Belley	4,7	1,5	3,0	≈ 1,5	1990
07-BRC	Brégnier Cordon	7,5	3,5	3,6	3,0	1990
08-SAB	Sault-Brénaz	21,4	8,5	4,2	> 3	1990
09-VUL	Saint-Vulbas	-	-	-	-	-
10-ALY	Ain-Lyon	4,1	0,6	1,6	ND	ND
11-PBN	Pierre-Bénite	10,0	5,2	2,1	1,0	1983
12-VAU	Vaugris	22,7	5,5	3,5	0,0	1983
13-PDR	Péage de Roussillon	16,9	5,9	5,1	3,8	1983
14-STV	Saint-Vallier	22,4	7,3	6,7	≈ 2,5	1983
15-BLV	Bourg-lès-Valence	15,5	3,5	8,8	ND	ND
16-BEA	Beauchastel	19,2	3,8	7,0	0,0	1993
17-BLN	Baix Logis Neuf	15,6	5,5	6,0	1,6	1993
18-MON	Montélimar	15,4	7,0	6,7	> 2	1994
19-DZM	Donzère Mondragon	10,6	2,2	3,5	0,6	1994
20-CAD	Caderousse	19,9	8,0	5,8	ND	ND
21-AVI	Avignon	19,1	6,0	7,8	ND	ND
22-VAL	Vallabrègues	28,0	11,0	4,4	> 1	1988
23-ARL	Palier d’Arles	-	-	-	-	-
24-GRH	Grand Rhône	-	-	-	-	-
25-PRH	Petit Rhône	-	-	-	-	-
TOTAL		287,7	110,0	132,0		
MOYENNE		29,1	10,7	11,7		

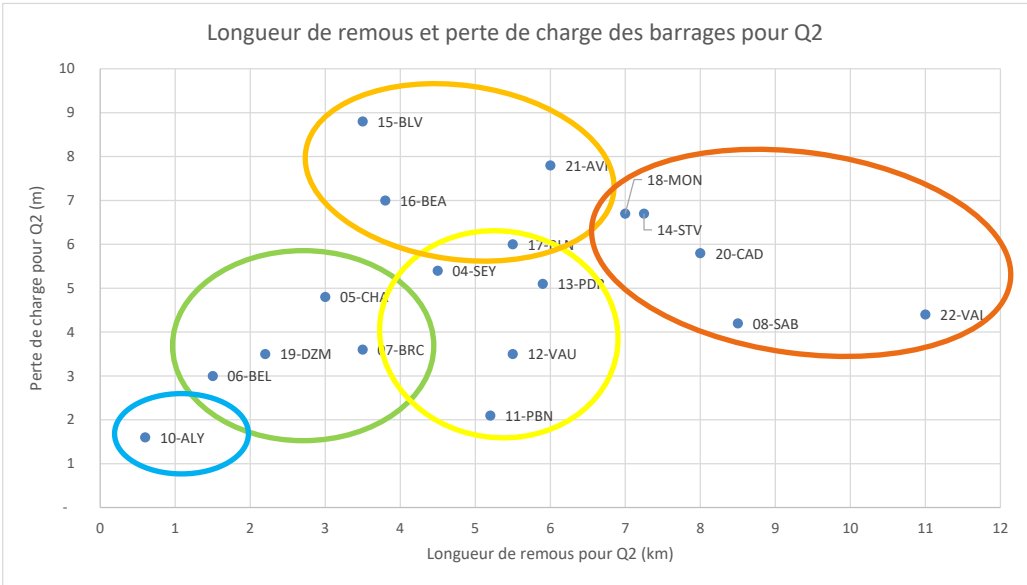


Figure 70: Cartographie des barrages de retenue en fonction des longueurs de remous et pertes de charge en crue biennale (Q2) (hors Génissiat et ouvrages suisses)

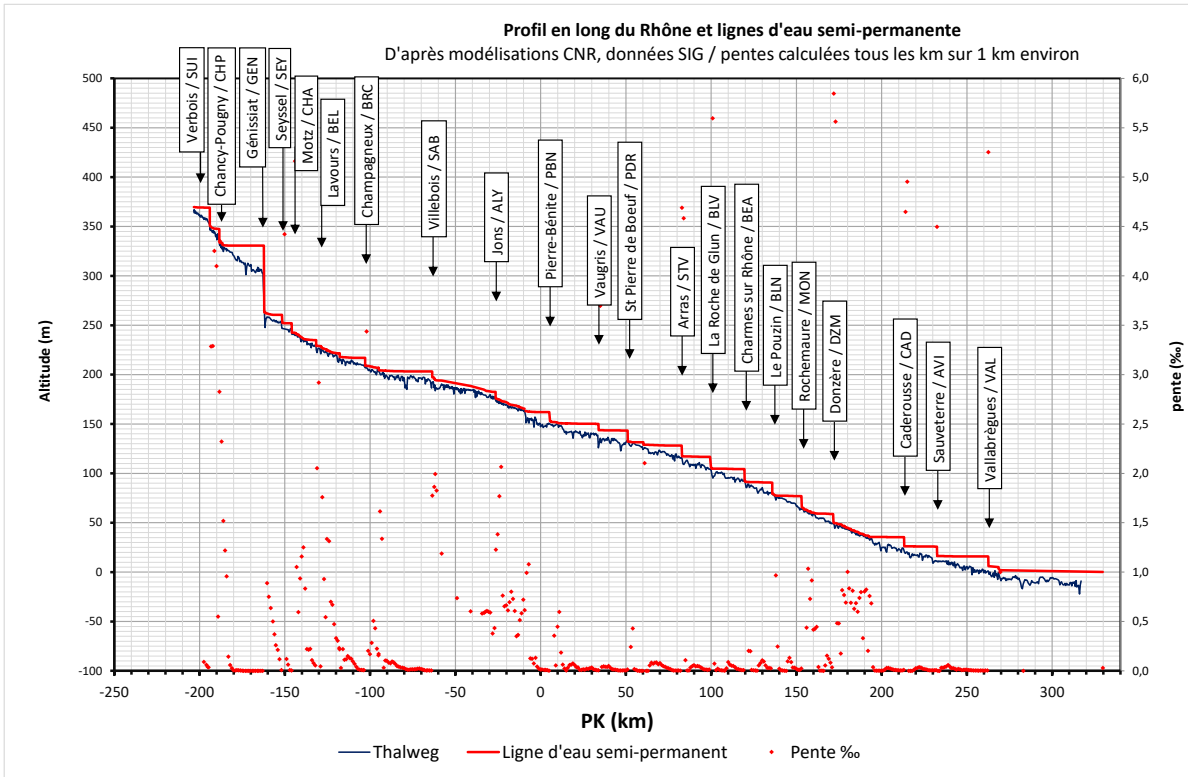


Figure 71: Profil en long de la ligne d'eau semi-permanente

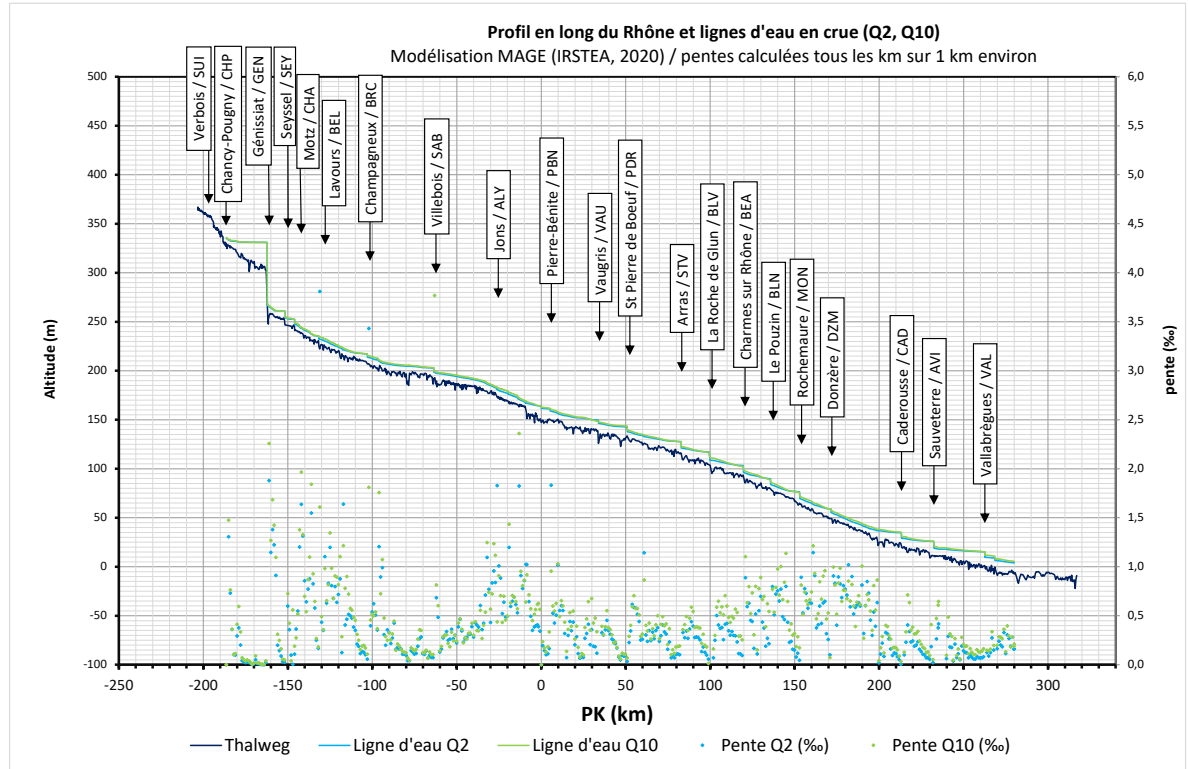


Figure 72: Profil en long des lignes d'eau Q2 et Q10

► Effets des retenues

Lors des crues, les barrages jouent un rôle mineur dans l'écêtement lorsque l'on compare les volumes réellement stockés lors des crues par les différents barrages et les volumes totaux des crues (ZABR, le Rhône en 100 questions, 2010). Ainsi, le volume stocké par le barrage de Vallabrègues pour la crue centennale (9 millions de m³) ne représente que 0,3% du volume de la crue de 2003 (3 500 millions de m³) (cf. Tableau 18 et Tableau 19). Suite aux crues de 2002 et 2003, les expertises ont montré que les retenues ne pouvaient être utilisées efficacement pour écrêter les crues, sauf à abaisser préventivement les retenues, solution qui ne présente pas de faisabilité (navigation, production hydroélectrique, anticipation, etc.) (Figure 73).

La comparaison des niveaux et des lignes d'eau en crues relevés entre le 20^{ème} siècle et aujourd'hui ne montre pas une évolution notable sur l'ensemble du Rhône, sauf pour certains secteurs précis : les niveaux de la crue de 1856 resteraient comparables à ceux atteints pour des débits équivalents aujourd'hui, à l'exception de secteurs qui avaient subi avant les aménagements de la CNR un fort exhaussement du lit majeur du Rhône, notamment les plaines de Donzère-Pierrelatte, Printegarde et Codolet (ZABR, le Rhône en 100 questions, 2010).

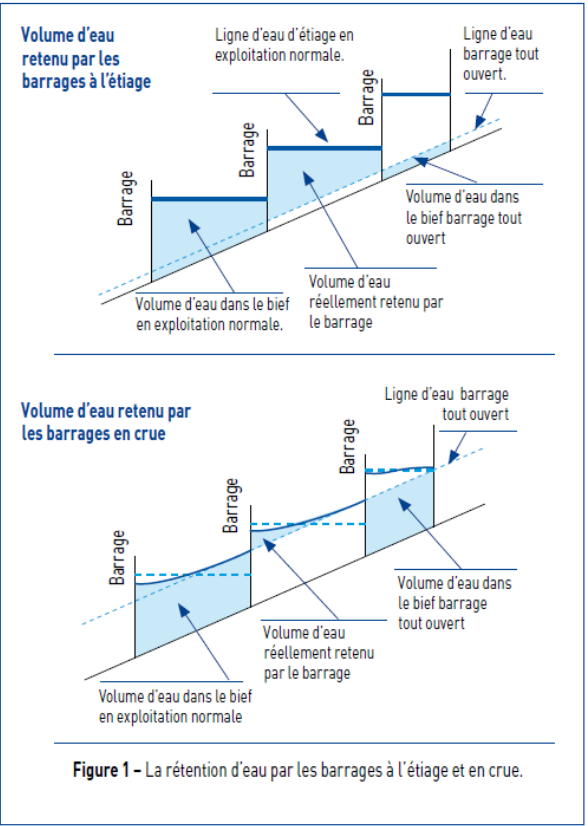


Figure 73: Schéma de principe de la rétention d'eau par les différentes retenues du Rhône (ZABR, le Rhône en 100 questions, 2010)

Tableau 18: Volume des crues en millions de m³ écoulés (le Rhône en 100 questions, 2010)

Octobre 93		Janvier 94		Septembre 02		Novembre 02		Décembre 03	
2 jours	6 jours	2 jours	6 jours	2 jours	6 jours	2 jours	6 jours	2 jours	6 jours
2300	4000	2200	3900	1300	1700	1600	3900	1900	3500

Tableau 19: Volumes d'eau retenus par les barrages à l'étiage (le Rhône en 100 questions, 2010)

Chute	Génissiat	Seyssel	Chautagne	Belley	Brégnier-Cordon	Sault-Brénaz	Pierre-Bénite	Vaugris	Péage-de-Roussillon
Millions de m³	53	6	12	16	17	33	20	15	42
Chute	Saint-Vallier	Bourg-lès-Valence	Beauchastel	Baix-le-Logis-Neuf	Montélimar	Donzère-Mondragon	Caderousse	Avignon	Vallabrègues
Millions de m³	35	25	30	40	45	20	47	34	82

Source CNR

1.4.4 Fonctionnement par éclusées

► Mise en œuvre des éclusées sur le Rhône

Les éclusées sont utilisées par les gestionnaires de barrages afin d'optimiser leur production hydroélectrique.

Les ouvrages amont du Haut-Rhône (Verbois, Chancy-Pougny, Génissiat) permettent d'initier et d'accompagner des séries d'éclusées. L'ouvrage de Seyssel a vocation à régulariser les débits en aval de Génissiat, et permet de prolonger les éclusées sur les autres ouvrages du Haut-Rhône jusqu'à Sault-Brénaz. Le marnage maximal dans la retenue de Génissiat est de 5,70 m ; il est de 1,50 m dans les retenues de Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon, Sault-Brénaz en aval.

Sur le Rhône aval, les éclusées sont initiées depuis la retenue de Pierre-Bénite ou depuis celle de Montélimar, jusqu'à l'usine de Vallabrègues ; le marnage maximal dans les retenues du Rhône aval est généralement de 0,75 à 1 m.

► Liens avec les sédiments

Les éclusées induisent des variations de débits avec des rythmes variables à la journée ou à la semaine (cf. Figure 74). Sur une section de Rhône total, le débit peut passer en quelques minutes d'une valeur plancher proche du débit réservé (plus les apports intermédiaires) à une valeur de quelques centaines de m³ qui correspond au débit turbiné. Pour l'exemple ci-dessous de Pont de la Loi en aval de la Chautagne (05-CHA), le débit peut donc passer de 100 m³/s à 400 m³/s environ puis baisser quelques heures après. Sur le Haut-Rhône les fluctuations sont importantes du fait du rôle joué par les retenues en amont et parce que les usines sont équipées de 2 groupes seulement (en général 350 m³/s par groupe). Sur le Rhône aval, les fluctuations sont proportionnellement plus faibles.

Les éclusées peuvent influencer sur le transport de matières en suspension (fines, sables) sans modifier les flux annuels en transit. Elles peuvent toutefois affecter les habitats aquatiques par colmatage du substrat, ce qui est un enjeu écologique.

Par ailleurs, les éclusées ne sont pas de nature de modifier significativement le fonctionnement par charriage et les formes alluviales du Rhône. En effet, d'une part les Vieux Rhône ne sont pas concernés par les éclusées, car les débits d'éclusées sont générés par stockage dans les retenues et transitent dans les canaux de dérivation. D'autre part, sur le trajet des éclusées, le charriage ne pourrait s'opérer qu'entre la restitution d'un canal usinier et la retenue en aval, dans une portion de Rhône total. Or, la plage de débit utilisée, située entre le débit réservé et le débit d'équipement de l'usine (qui vaut entre 1 et 2 fois le module), n'est pas en mesure de remobiliser la charge de fond. Aussi, globalement, les éclusées ne sont pas un facteur à intégrer dans l'analyse du fonctionnement hydrosédimentaire.

(Pont de la Loi (CNR)) Graphiques des DEBITS en m³/s , dernière valeur 366 m³/s

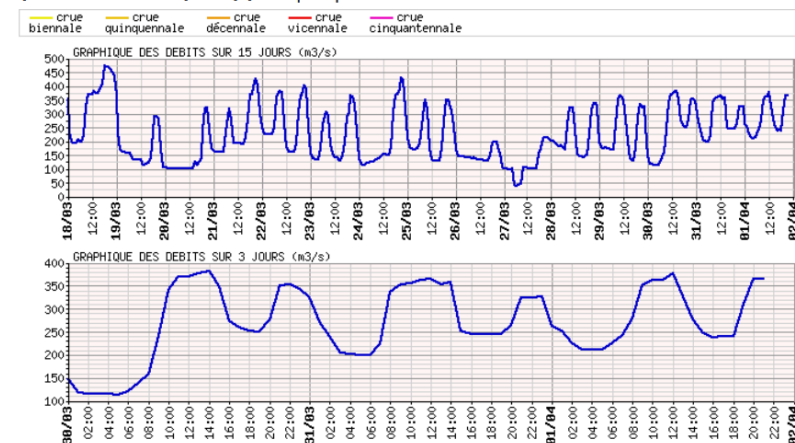


Figure 74: Exemple d'hydrogramme influencé par des éclusées (Pont de la Loi, Chautagne / Hydreel2)

Ceci étant dit, les éclusées peuvent avoir un impact sur des habitats construits sur les formes alluviales tels les bancs de graviers, les plages proches des berges et les zones de berges. Lorsque le débit varie, le niveau d'eau varie et peut entraîner des impacts sur la vie aquatique, notamment piscicole (frayères, échouage, dérive forcée, stress, etc.). Il s'agit d'un enjeu écologique qui est décrit dans le rapport de Mission 3.

En effet, une étude ECOGEA (2020) a visé à évaluer les risques éco-morphologiques associés au fonctionnement par éclusée de certains aménagements hydroélectriques (cf. Figure 75). Le but étant d'objectiver, conjointement avec un indicateur d'altération hydrologique, les risques d'impacts écologiques associés à ce mode de gestion. La caractérisation des pressions hydrologiques a permis d'identifier les cours d'eau « à risque » vis-à-vis du fonctionnement par éclusées.

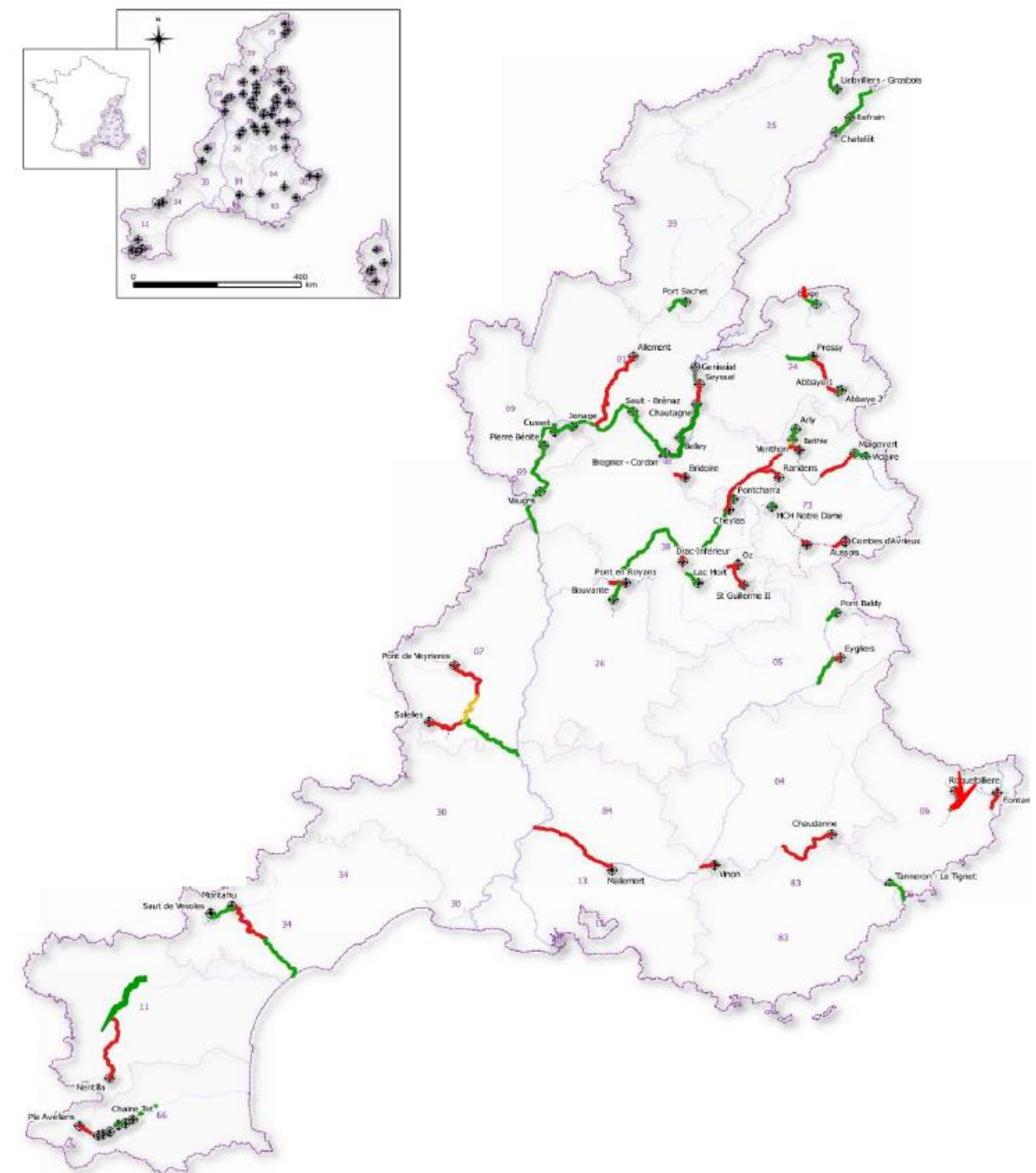


Figure 75: Linéaires avec des régimes d'éclusées étudiés dans l'étude ECOGEA (2020)

2. Mécanismes de transport sédimentaire

2.1 Définitions sur les modes de transport sédimentaire

Le Rhône est susceptible de transporter toutes les tailles de granulométrie de matériaux (fins, sables, grossiers). Le transport sédimentaire s'effectue de manière différenciée en fonction de la puissance des écoulements et de la taille des particules.

La granulométrie utilisée est celle qui avait été utilisée dans la thèse de Parrot (2015) : adaptation de la granulométrie de Wentworth (Gradistat, Blott & Pye, 2001). La granulométrie proposée par Malavoi (2001) d'après Wentworth, utilisée par ailleurs, est également rappelée.

On distingue 3 modes de transport solide, avec leur propre mécanisme (cf. Figure 77 et Tableau 20) :

- **Le transport par charriage (bedload) :**

Le charriage correspond au transport sédimentaire où les particules sont en contact direct avec le fond du lit ; on y inclut généralement le roulement et le glissement de particules ainsi que la saltation qui correspond à de petits sauts. Le transport se fait donc sur le fond du lit – on parle également de charge de fond – avec des vitesses de transport très faibles mais avec des concentrations pouvant être très élevées. On associe généralement à ce mode de transport les particules les plus grossières : les galets, les graviers et les sables généralement ans leur composante la plus grossière. Sous certaines conditions hydrauliques, la fraction sableuse peut être intégrée dans le transport par charriage.

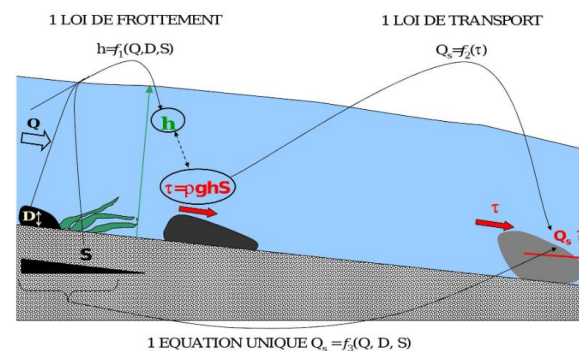


Figure 76: Le charriage (Q_s) est dépendant du débit liquide (Q), de la pente (S) et du diamètre du sédiment (D) (Recking, 2010)

- **La suspension graduée (suspended load of bed material):**

La suspension graduée (ou de fond) désigne l'ensemble des sédiments se déplaçant sur la colonne d'eau en équilibre direct avec l'hydrodynamique locale tout en conservant un contact avec le fond ; on y inclut les particules faisant des sauts pouvant être très longs car maintenues par la turbulence de l'écoulement. Ce mode de transport implique des concentrations beaucoup plus faibles que pour le charriage et diminuant rapidement en s'éloignant du fond mais des vitesses de particules s'approchant de la vitesse du courant. On associe généralement les sables à ce mode de transport, et les limons grossiers sous certaines conditions hydrauliques. Tout comme pour le charriage, il est possible d'établir des relations d'équilibre entre le flux solide et des conditions hydrosédimentaires données (caractéristiques du lit d'une rivière, contraintes hydrodynamiques).

- **La suspension uniforme (washload) :**

La suspension uniforme correspond au transport sédimentaire se faisant de façon homogène sur la colonne d'eau. Les forces de gravité s'exerçant sur ces particules sont bien inférieures aux forces de diffusion turbulente ; les particules n'ont ainsi quasiment aucun contact avec le fond de la rivière. Il est impossible d'établir une relation d'équilibre entre le flux solide et les conditions hydrosédimentaires locales ; ce mode de transport est directement lié aux apports amont provenant de l'érosion dans le réseau-hydrographique, du lessivage plus ou moins efficace des versants lors d'un événement pluvieux ou d'un apport brutal lié à des phénomènes naturels (laves torrentielles, glissement de terrain, etc.) ou artificiels (manœuvre d'ouvrage, chasse de barrage, etc.). Ce mode de transport est classiquement associé aux particules les plus fines (argiles et limons).

Par la suite, les mécanismes de transport solide analysés en deux catégories : d'une part, le transport par charriage et d'autre part le transport des matières en suspension. En effet, la distinction entre les deux modes de transport par suspension est encore au stade de développement scientifique et ne peut être valorisée dans le cadre de la présente étude.

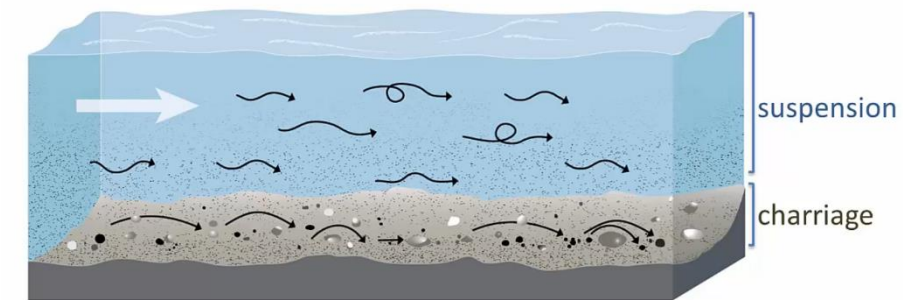


Figure 77: La dichotomie charriage-suspension (MOOC Des rivières et des hommes, UGA)

2.2 Echelles granulométriques

Dans le cadre de l'étude, la granulométrie utilisée est celle de la thèse de Parrot (2015) : adaptation de la granulométrie de Wentworth (Gradistat, Blott & Pye, 2001) (cf. Tableau 20). La granulométrie proposée par Malavoi (2001) d'après Wentworth est également utilisée lorsque les données sont moins précises.

Tableau 20 : Classes granulométriques utilisées (classifications de Malavoi d'après Wentworth, et de Gradistat / Blott & Pye, 2001)

Descripteur (Malavoi, 2001)	Descripteur (Blott & Pye, 2001)	Taille en mm	Taille en μm	Modes de transport solide
Pierre grossière (PG)	Petit Bloc	[128 ; 256]		CHARRIAGE SUSPENSION GRADUÉE SUSPENSION UNIFORME
Pierre fine (PF)	Galet	[64 ; 128]		
Caillou grossier (CG)	Gravier très grossier	[32 ; 64]		
Caillou fin (CF)	Gravier grossier	[16 ; 32]		
Gravier grossier (GG)	Gravier moyen	[8 ; 16]		
Gravier fin (GF)	Gravier fin	[4 ; 8]		
	Gravier très fin	[2 ; 4]		
Sable (S)	Sable très grossier	[1 ; 2]	[1000 ; 2000]	
	Sable grossier	[0,500 ; 1,000]	[500 ; 1000]	
	Sable moyen	[0,250 ; 0,500]	[250 ; 500]	
	Sable fin	[0,125 ; 0,250]	[125 ; 250]	
Sable très fin	Sable très fin	[0,063 ; 0,125]	[63 ; 125]	
	Limon très grossier	[0,032 ; 0,063]	[32 ; 63]	
	Limon grossier	[0,016 ; 0,032]	[16 ; 32]	
	Limon moyen	[0,008 ; 0,016]	[8 ; 16]	
Limon fin	Limon fin	[0,004 ; 0,008]	[4 ; 8]	
	Limon très fin	[0,002 ; 0,004]	[2 ; 4]	
Argile (A)	Argile	< 0,002	< 2	

2.3 Mécanismes de transport solide observés sur le Rhône

Sur le Rhône, les mécanismes de transport solide sont bien sûr dépendants des conditions hydrologiques, mais ils sont surtout dépendants des modes de gestion des ouvrages de la vallée.

Deux situations caractéristiques peuvent se présenter :

- **En conditions semi-permanente (débit annuel médian) (cf. Figure 78).**

Avec ce type de conditions, les flux de transport solide sont limités : le charriage peut être considéré comme nul ; même si les débits courants sont localement susceptibles de réagencer les sédiments, ils ne sont pas en mesure de générer des flux sur des linéaires continus.

A contrario, le transport solide des matières en suspension (MES) existe pour tout débit et donne le caractère plus ou moins turbide de la colonne d'eau ; c'est la concentration en matière en suspension qui va évoluer en fonction du débit et les phénomènes hydrosédimentaires en amont (chasse, crue d'affluent, crue généralisée, etc.).

En débit semi-permanent, la concentration est faible, elle est constituée en grande partie de suspension uniforme (ou wash load). Les flux sédimentaires sont globalement proportionnels aux débits liquides et ceux-ci transitent en priorité dans les canaux usiniers, le reste du débit étant constitué des débits et régimes réservés dans les portions de Rhône court-circuités ;

- **En conditions de crues (cf. Figure 79).**

Dans ces conditions, la proportion de matières en suspension, arrachés aux berges, au lit ou fournies par les affluents va augmenter dans la colonne d'eau.

S'il s'agit de hautes eaux, d'une crue limitée en ampleur ou d'une crue d'un affluent, et tant que le débit d'équipement d'une usine hydroélectrique ne sera pas dépassé, la répartition de débit entre le canal usinier et le RCC, illustrée pour le débit semi-permanent (Figure 78), sera conservée.

Si les débits augmentent, les vannes du barrage de retenue vont s'ouvrir et laisser progressivement plus de débits transiter dans les RCC. En général, à partir d'une crue biennale (Q2), il passe plus de débit côté RCC que côté usine. Les flux de matières en suspension suivent la même logique et sont progressivement de plus en plus importants du côté du Rhône court-circuité.

Au-delà d'un certain seuil de débit liquide, lorsque la force tractrice du courant est supérieure à la force de résistance de chaque particule sédimentaire, le transport solide par charriage peut se déclencher : la charge de fond aura tendance à se remobiliser en premier lieu là où les conditions de pente et de force tractrice sont les plus élevées, c'est-à-dire dans les portions de Vieux Rhône courant. Si les débits continuent à augmenter, le charriage va pouvoir se développer sur des linéaires plus continus des Vieux Rhône, puis dans une certaine mesure dans les queues de retenue, et en dernier lieu dans les retenues elles-mêmes. Le charriage au sein des retenues et sur l'ensemble de leur linéaire n'est théoriquement possible que lorsque le barrage de retenue est totalement effacé, permettant à la ligne d'eau en amont d'être similaire à des conditions sans barrages.

Pour une crue biennale (Q2), comme démontré en partie §.1.4.3, ces conditions de transparence d'ouvrages et de continuité sédimentaire ne sont pas observées, quels que soient les ouvrages. Elles sont plus favorables en crues exceptionnelles (Q100 et supérieures) mais restent partielles comme indiqué dans le Tableau 16.

Ainsi, l'étude du charriage sur le Rhône est très complexe : il s'agit d'un phénomène qui, en dehors des sections de Rhône total, dépend de la gestion des barrages, puis des conditions hydrauliques associées et enfin, comme développé par la suite, de la granulométrie en place dans le lit du Rhône, ou apportée par les affluents.

Les parties qui suivent visent donc à analyser successivement :

- Les stocks sédimentaires en place dans le lit et ses marges ;
- Les bilans sédimentaires au cours du temps et par tronçon homogènes
- La dynamique et les flux sédimentaires, calculés et validés dans la mesure du possible avec les bilans sédimentaires.

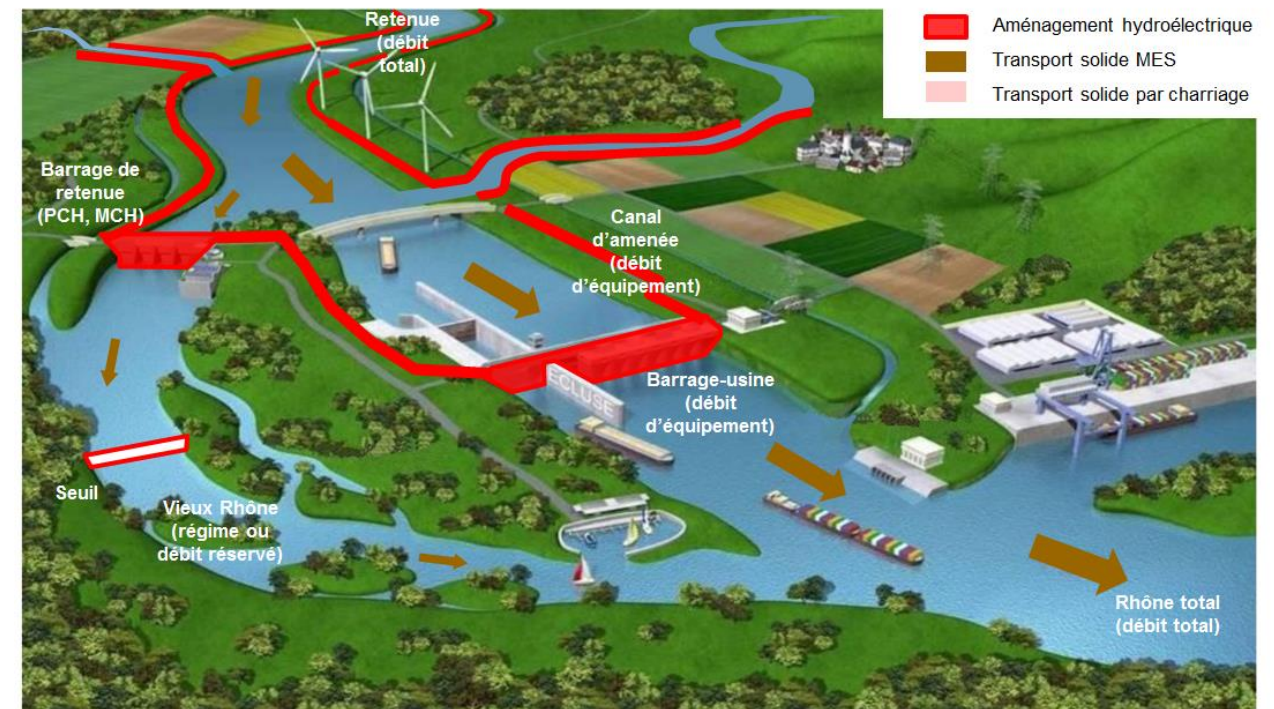


Figure 78: Schéma type d'une répartition des débits solides en débit semi-permanent

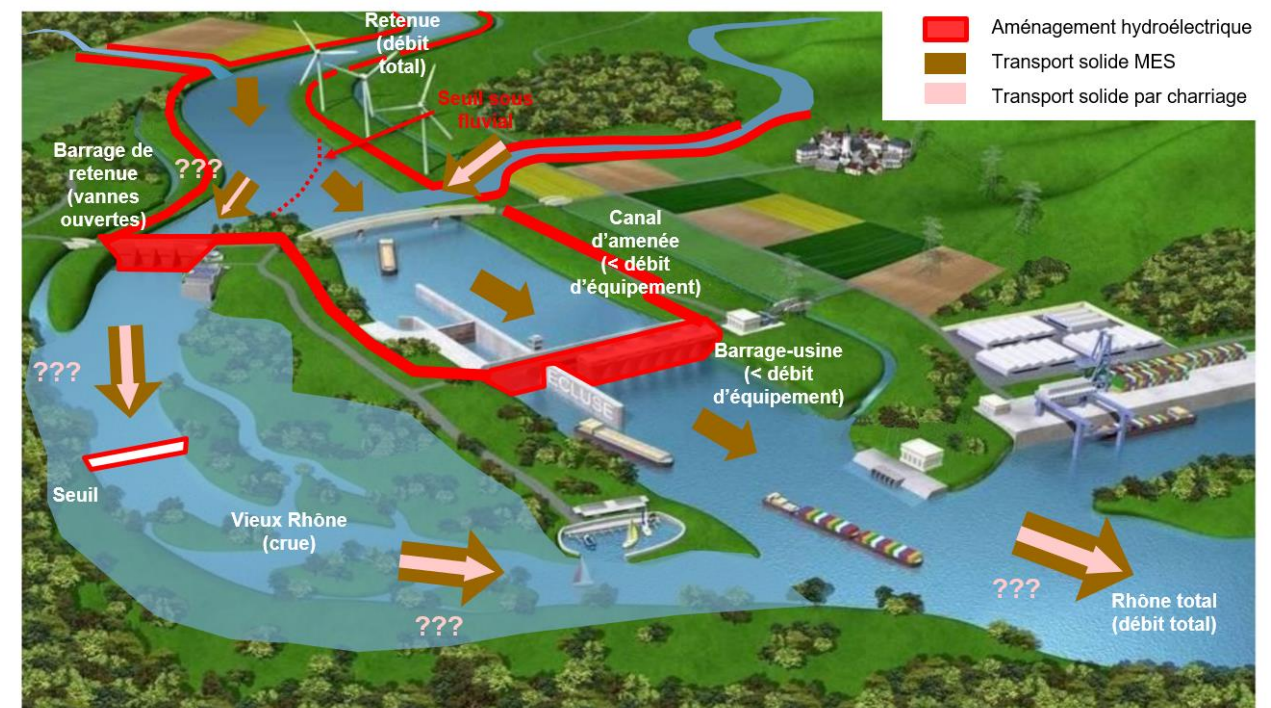


Figure 79: Schéma type d'une répartition des débits solides en crue

3. Stocks sédimentaires

3.1 Stocks sédimentaires dans l'espace alluvial

Les stocks sédimentaires accumulés dans l'espace alluvial au cours des âges sont présents à plusieurs échelles, qui peuvent être interprétés à partir des travaux de Bravard et al. (Cartographie du paléo-environnement de la plaine alluviale du Rhône, 2008) :

1. Dans l'emprise de l'espace balayé historiquement par le fleuve depuis la fin de période pléistocène (-11 000 BP) et qui correspond globalement au fond de vallée ;
2. Dans l'emprise des bandes actives antérieures à 1860 ;
3. Dans l'emprise de l'espace actif au début du 19^{ème} siècle avant les premiers aménagements ayant modifié la morphologie et représenté par la bande active en 1860. Cette emprise correspond aujourd'hui au lit mineur actuel majoré par des espaces protégés par les aménagements Girardon.

Ces 3 espaces ont été cartographiés en plan dans les Cartes B de chaque fiche UHC à partir des données de Bravard et al. (2008) et la figure ci-dessous (Bravard et al., 2008) illustre ces espaces en coupe transversale.

Aujourd'hui et à l'échelle de la gestion du fleuve, seuls les stocks compris dans l'espace actif du 19^{ème} siècle sont concernés par les dynamiques fluviales, bien que certains stocks plus anciens pourraient être, à l'occasion de certains types d'action de restauration, remobilisés artificiellement.

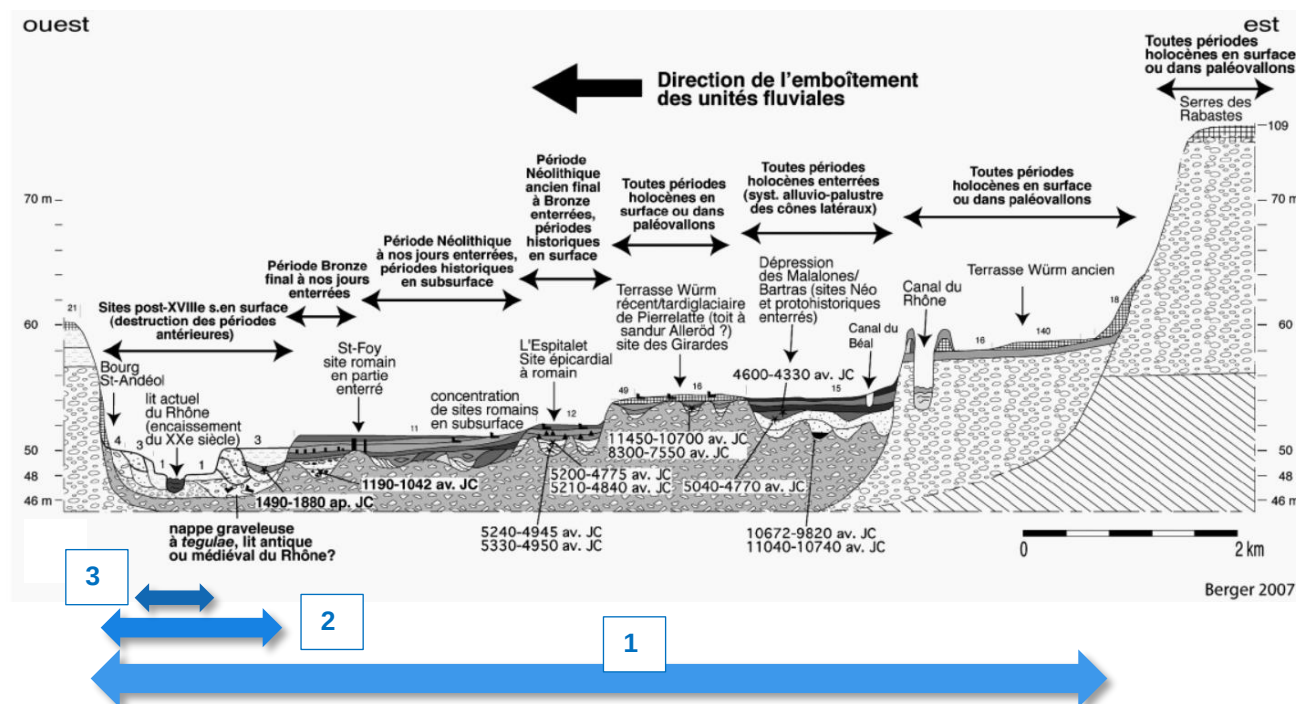


Figure 80: Coupes interprétatives simplifiées du fonctionnement du Rhône à l'Holocène (source Bravard et al., 2008)

La dynamique de sédimentation dans le lit moyen et le lit majeur du Rhône a été très bien étudiée dans le cadre de l'OSR avec les premiers travaux de JP. Bravard synthétisés dans le Schéma Directeur de réactivation de la Dynamique Fluviale par Gaydou (OSR2), puis affinés et complétés par les travaux de l'axe II de la 4^e programmation de l'OSR.

Ces résultats ont permis de mieux comprendre l'historique des rythmes de sédimentation en lien avec les différentes phases d'aménagement mais aussi de caractériser les stocks de matériaux piégés dans le lit

moyen. Toutefois, ces dernières analyses n'ont pas été établies de manière systématique à l'échelle du corridor et seuls les secteurs de Pierre-Bénite, Péage-de-Roussillon et de Donzère-Mondragon ont été étudiés dans le détail. Les éléments présentés ci-après ne peuvent pas être donc simplement transposés à l'ensemble des secteurs du Rhône, notamment le Haut Rhône ; toutefois, ils permettent une bonne compréhension des processus de formation du lit majeur en aval de Lyon, en lien avec les aménagements pour la navigation et l'hydroélectricité.

3.1.1 Une forte variabilité des conditions de sédimentation

L'analyse diachronique de l'évolution des bandes actives montrent une diminution importante de l'ordre 40% des surfaces fonctionnelles initiales (1860) jusqu'à la moitié du 20^{ème} siècle, traduisant un fort impact des travaux de rectification pour la navigation (aménagements Girardon). Cette tendance a connu une certaine stabilisation à la veille de la construction des aménagements hydroélectriques concomitantes aux phases d'extraction et qui ont provoqué une seconde réduction des surfaces fonctionnelles (~20%). Les évolutions récentes sont très faibles et indiquent une stabilisation, pour ne pas dire une fixation, de ces dynamiques. Si ces tendances sont similaires entre les différentes UHC, les vitesses de disparitions de ces surfaces sont bien moins importantes par exemple sur Pierre Bénite et Péage-de-Roussillon (respectivement 0,009 et 0,08 ha.an⁻¹.km⁻¹) que sur Donzère-Mondragon (0,2 ha.an⁻¹.km⁻¹).

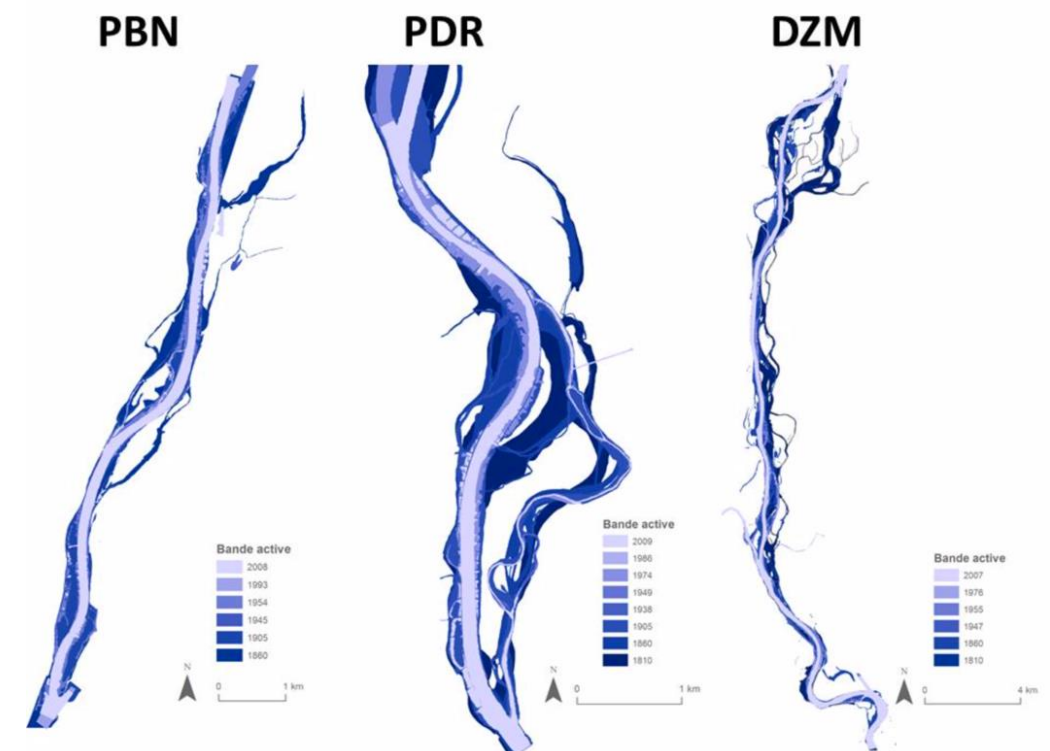


Figure 81: Évolution diachronique des bandes actives de PBN, PDR et DZM (source : OSR4, 2018)

Verticalement, ces stocks grossissent lentement. Les résultats des calculs de vitesse moyenne de sédimentation depuis 1860 sont de l'ordre de 1 à 2 cm / an. A titre de comparaison, cette valeur se rapproche des niveaux bas de sédimentation observés dans les annexes fluviales, qui présentent de très fortes variabilités spatiales et temporelle et qui peuvent atteindre les 10 cm / an (Riquier, 2015). Cette hétérogénéité s'observe également sur d'autres compartiments du lit mineur et majeur (champs d'épis, casiers Girardon, « plaine jeune », « plaine ancienne »). Une analyse par site et par date met en valeur, par exemple, un maximum de sédimentation au début du 20^{ème} siècle pour Péage de Roussillon, et plus ancien encore pour Donzère-Mondragon, tandis qu'il date de la moitié du 20^{ème} siècle pour Pierre-Bénite.

divergentes au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle. Les conditions influençant la sédimentation sont multiples (forces tractrices au droit du casier, fréquence de mise en eau, temporalité des ajustements par rapport à la mise en service des aménagements hydroélectriques) et aucune n'explique à elle seule le remplissage des casiers. La topologie même de l'ouvrage joue sur les conditions de sédimentation avec des phénomènes complexes induisant des dépôts de type variés.

3.1.2 Caractérisation volumétriques et granulométriques des marges alluviales

► Volume et nature des sédiments dans les marges alluviales

La nature des stocks alluviaux diffère en fonction des unités des compartiments alluviaux. Le lit majeur est essentiellement composé de sédiments fins (type limons de débordement) alors que les champs d'épis du lit mineur présentent des faciès granulométriques graveleux. En ce qui concerne les casiers, qui ont été étudiés par des mesures au géo-radar et de nombreux prélèvements à la tarière, ils présentent des stratifications verticales non graduées et hétérogènes et en termes de granulométrie. D'une manière générale, ils sont composés d'une masse sédimentaire limono-sableuse qui vient coiffer la nappe de graviers/galets du Petit Âge Glaciaire. Des analyses géomatiques ont été réalisées pour quantifier ces deux ensembles granulométriques sur plusieurs UHC. Les différences d'épaisseurs et de volumes entre UHC sont liées aux conditions de sédimentation et à des effets de taille de l'UHC. Les épaisseurs importantes de graviers sur l'UHC#11-PBN de Pierre-Bénite sont liées à une rapide déconnection des stocks du 20^{ème} par incision, alors que l'importance des volumes de de l'UHC#19-DZM de Donzère-Mondragon s'expliquent par la taille du Vieux Rhône.

Des différences notables sont aussi observables entre unités morphologiques, avec de faibles volumes de graviers pour les champs d'épis par exemple. Toutefois, ces stocks restent très intéressants du point de vue opérationnel de la restauration car plus facilement accessible en raison des volumes de sédiments associés moins importants.

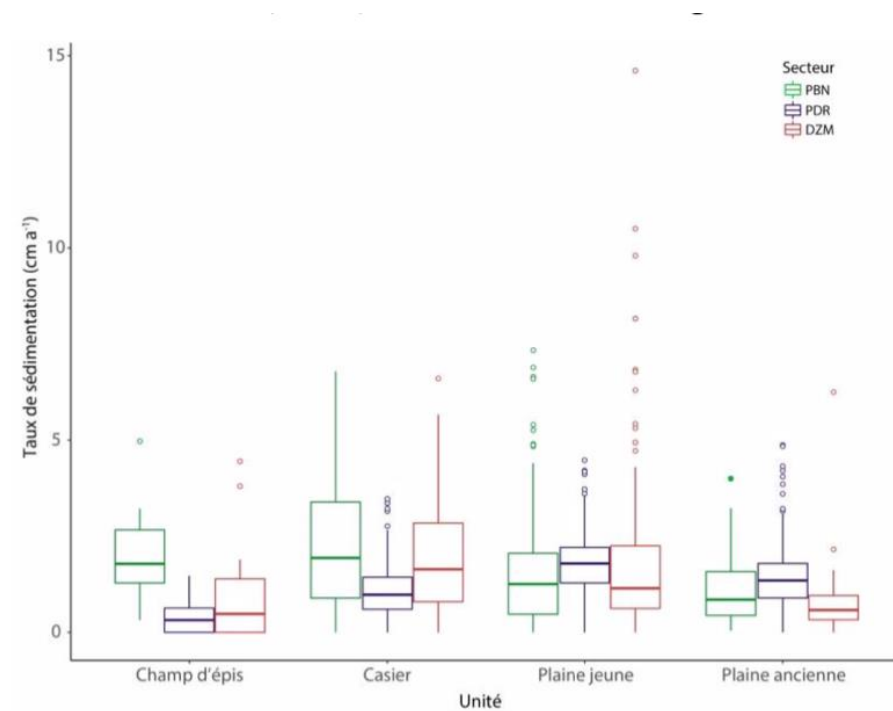


Figure 82 : Variabilité spatiale de la sédimentation par unité et par UHC (Source : OSR4, 2018)

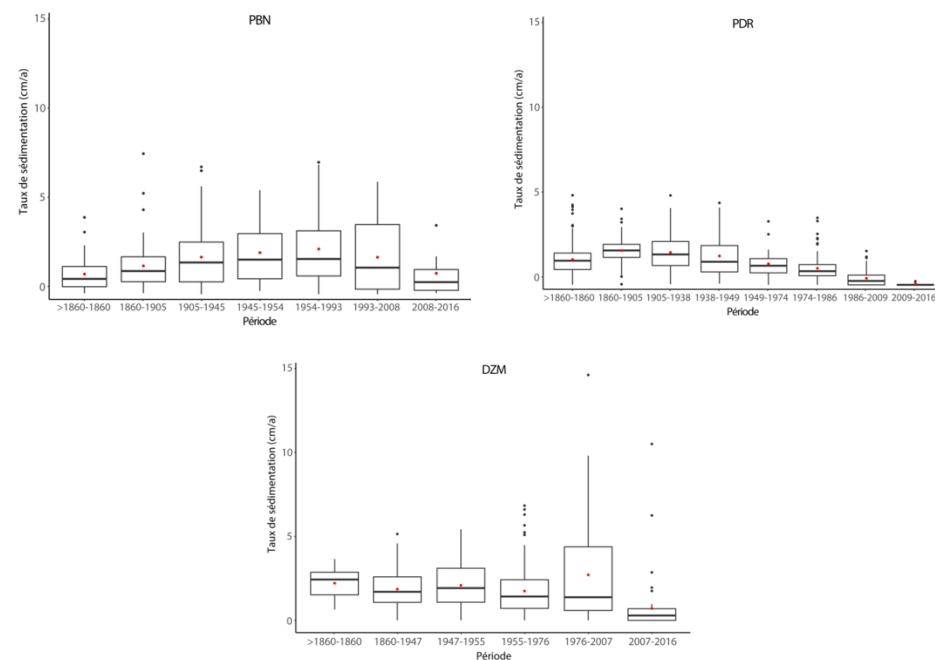


Figure 83 : Variabilité temporelle de la sédimentation (Source : OSR 4, 2018)

Une analyse² de la sédimentation des casiers va aussi dans le sens d'une évolution assez différenciée en fonction des UHC. Ainsi par exemple, si les niveaux d'atterrissement des casiers étaient relativement homogènes pour ces 4 UHC dans les années 1940, les trajectoires de remplissage semblent avoir été

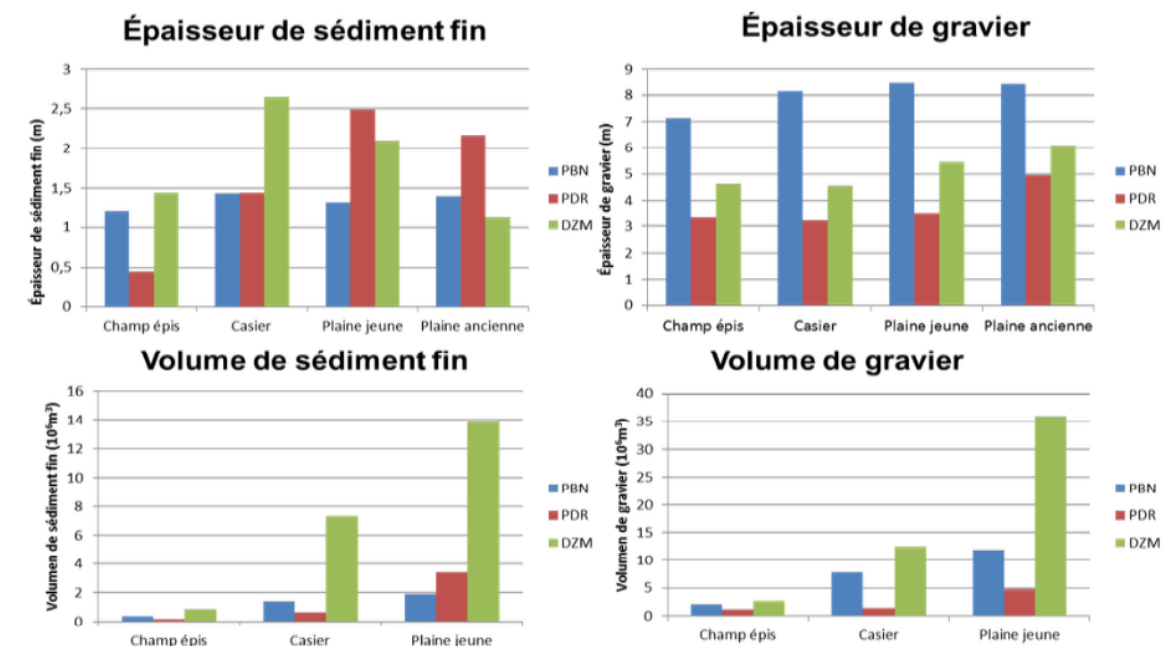


Figure 84 : Caractérisation granulométrique et volumétrique des stocks par UHC (Source : OSR 4, 2018)

² Incluant en plus des Vieux Rhône de PBN, PDR et DZM, celui de MON.

► Granulométrie des sédiments dans les marges alluviales

Nous ne disposons pas aujourd'hui sur l'ensemble du corridor de caractérisation granulométrique fine des stocks de sédiment piégés dans les différents compartiments.

La granulométrie des champs d'épis a été dressée par des mesures de type Wolman fait sur des bancs dans le cadre de la thèse Parrot (2015).

En ce qui concerne la granulométrie du matériel piégé dans les casiers, les données disponibles (plusieurs carottages ont été effectués sur les marges des RCC de PBN, PDR et DZM dans le cadre des travaux de l'OSR ; OSR4, action II.2/3/4, rapport n°2) montrent que les remplissages sont hétérogènes, constitués essentiellement de sédiments limono-sableux, avec des passées graveleuses. Ces mesures ont été réalisées sur des marges relativement anciennes, mais des mesures établies sur des unités plus jeunes peuvent présenter des résultats assez différents.

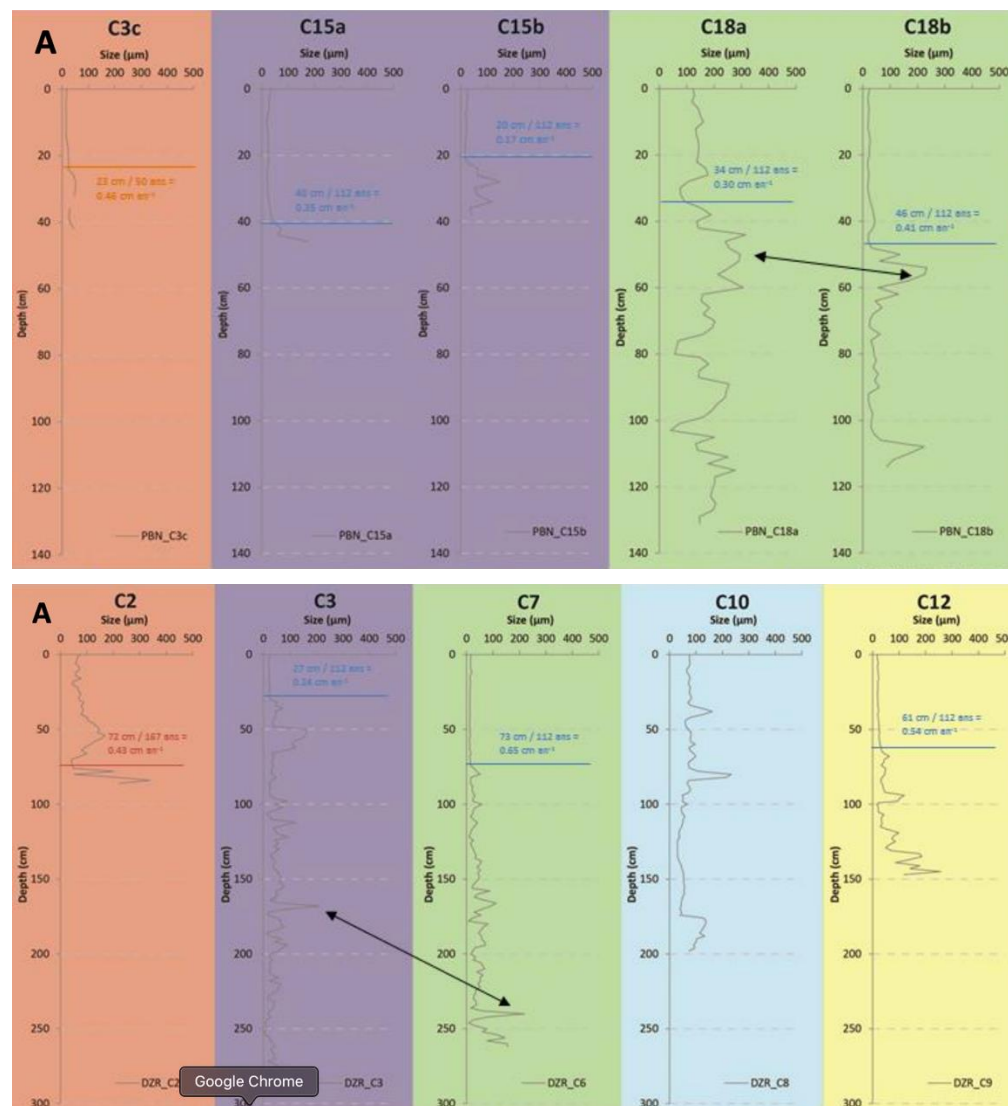


Figure 85 : Profils granulométriques des carottages réalisés sur les marges de PBN (en haut) et DZM (en bas) (Source : OSR4, action II.2/3/4 ; 2018)

Ainsi, par exemple, les données de la CNR issus des travaux de restauration de l'île des Gravieres, dans l'UHC3-PDR de Péage de Roussillon, et qui correspondent à des prélèvements à la pelle mécanique à 1 m de profondeur (leur localisation précise n'est pas connue) donne une granulométrie moyenne (D50) d'environ 11,7 mm. Le D90 est de 35,2 mm. La fraction sableuse représente 20 % du volume total des échantillons, et 40 % sont des graviers. Le reste est constitué de graves supérieures à 15-20 mm.

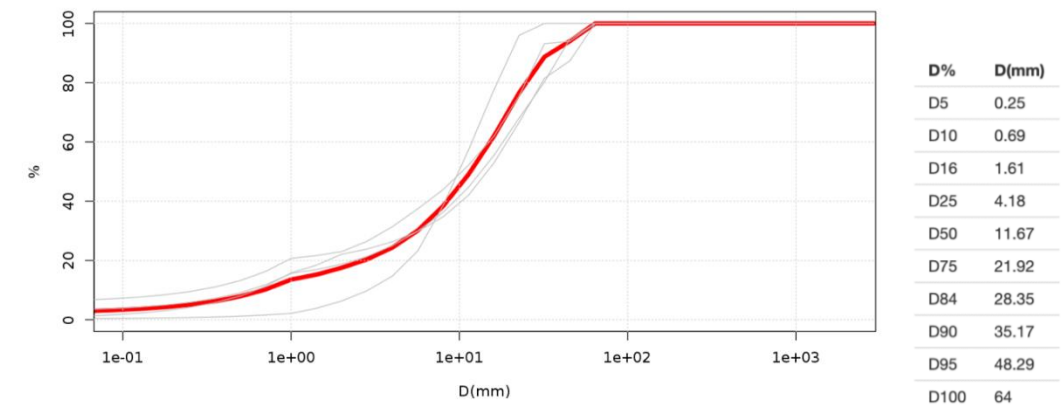


Figure 86 : Granulométrie moyenne des sédiments extraits sur les marges de l'île des Gravieres (Source : GEOPEKA d'après les données FAM Y ; 2017)

Ce type de résultats et leurs écarts par rapport aux données établies sur les marges anciennes par carottage correspond probablement à la charge de fond qui a été piégée dans les différentes unités de sédimentation mises en place lors de la première vague d'aménagement du fleuve (ouvrages de correction fluviale). Ce constat souligne le fait que les bancs aujourd'hui exondés (banc d'Arcoules, banc de Limony) ont la composition granulométrique de la charge de fond avant leur mise hors d'eau et qu'ils n'ont subi que des remaniements marginaux depuis la mise en service de l'aménagement CNR.

3.1.3 Pollution des stocks sédimentaires

La crise de PCB est venue durablement marquer les esprits. En effet, la disparition de la pêche professionnelle, les interdictions de consommation des pêches de loisirs ont mis la problématique des pollutions sur le devant la scène médiatique rhodanienne. Par voie de conséquence, la problématique de la remobilisation des marges a été longtemps conditionnée à celle de la qualité des sédiments piégés dans les anciens casiers Girardon. L'OSR s'est attaché à comprendre la géo-histoire des pollutions sur le Rhône et les études scientifiques ont montré l'historicité de ces pollutions, liées aux Trente Glorieuses, âge d'or de l'industrie (1946-1975).

Le flux de pollution tend aujourd'hui à se tarir et les sédiments pollués stockés se retrouvent dans les zones de sédimentation active au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle. Les analyses des pollutions réalisées sur des carottages sédimentaires (OSR2), faites dans des milieux très connectés au chenal et sur lesquelles des profils d'âge ont été élaborés, montrent que les niveaux de contamination sont liés à l'histoire des flux plus qu'à l'histoire de la sédimentation. Les teneurs en métaux, notamment Cu, Zn et Pb (c'est également le cas des PCB), sont très abondantes dans les années 1970 et décroissent ensuite.

Toutefois, les mesures réalisées sur les sédiments fins des stocks de la plaine alluviale et des casiers montrent que dans certains cas une grande partie de la sédimentation est antérieure aux travaux de rectification et donc vierge de polluant. Dans d'autre cas, comme à Pierre-Bénite ou Péage de Roussillon, la sédimentation se fait de manière concomitante avec le flux de pollution. La pollution des années 1970 se retrouve alors plutôt en surface (sur les 20 premiers centimètres environ) en raison des faibles niveaux de sédimentation. Généralement, dans ces cas, les seuils de quantification SQF ne sont pas dépassés.

A l'échelle du corridor³, une différence assez nette est visible au niveau des contaminations entre les UHC localisée à l'aval de Lyon et celle situées plus au sud. En effet, sur Pierre-Bénite (11-PBN) ou Péage-de-Roussillon (13-PDR), la présence du Zn, Pb et Cu est significativement plus importante qu'à Montélimar (18-MON) ou Donzère-Mondragon (19-DZM), où ce sont les flux de Ni qui ressortent plus nettement, probablement en raison du fond géochimique des Cévennes.

³ Le Haut Rhône n'a pas été étudié dans les travaux de l'OSR 4 sur les niveaux de contamination des stocks sédimentaires

3.2 Granulométrie du lit et des bancs du Rhône

Le Rhône, fleuve « torrent », présente, en comparaison avec les autres grands fleuves français (Loire, Seine, Garonne), un faciès granulométrique particulièrement grossier.

Seules les sections françaises du Rhin peuvent s'en rapprocher de ce point de vue, mais contrairement à son cousin du nord-est, le Rhône a la spécificité d'une quasi absence d'affinement granulométrique jusqu'à son delta, en raison de la proximité permanente du Massif Central et des Alpes et des apports des affluents.

Si ce portrait général est facile à dresser, l'analyse fine du gradient granulométrique du Rhône n'a été possible que récemment en raison des difficultés de recueil des données.

3.2.1 Des données longtemps parcellaires et difficiles à recueillir

En effet, pendant longtemps les seules données granulométriques disponibles provenaient soit de travaux réalisés dans le lit du fleuve soit d'études scientifiques localisées.

Dans le second cas, les données ont été produites généralement selon des protocoles normés et décrits, mais elles ne sont pas exploitables pour une étude globale du fleuve en raison de leur dispersion géographique et de l'importance des secteurs ne faisant l'objet d'aucune description.

Pour ce qui concerne des données provenant de travaux, il s'agit essentiellement de prélèvements faits dans la masse des alluvions, parfois à plusieurs mètres de profondeur à l'occasion de terrassement, soit à des sédiments extraits des retenues dans le cadre de dragages. Ces informations présentent donc des méthodologies d'acquisitions différentes, ce qui en rend la synthèse difficile, même si l'EGR (2000) en a exploité les principaux résultats.

Les premières études avec des mesures longitudinales systématiques qui ont été réalisées à l'échelle d'un tronçon sont les travaux menés par Poinart et Bravard (Poinart et al., 1989) sur le canal de Miribel-Jonage, où une cinquantaine de mesures Wolman⁴ ont été faites sur les bancs exondés. Dix ans plus tard, en 1999, la première série de mesures dans le chenal est établie sur le bas Rhône, au niveau du delta (Arnaud-Fassetta, 2003).

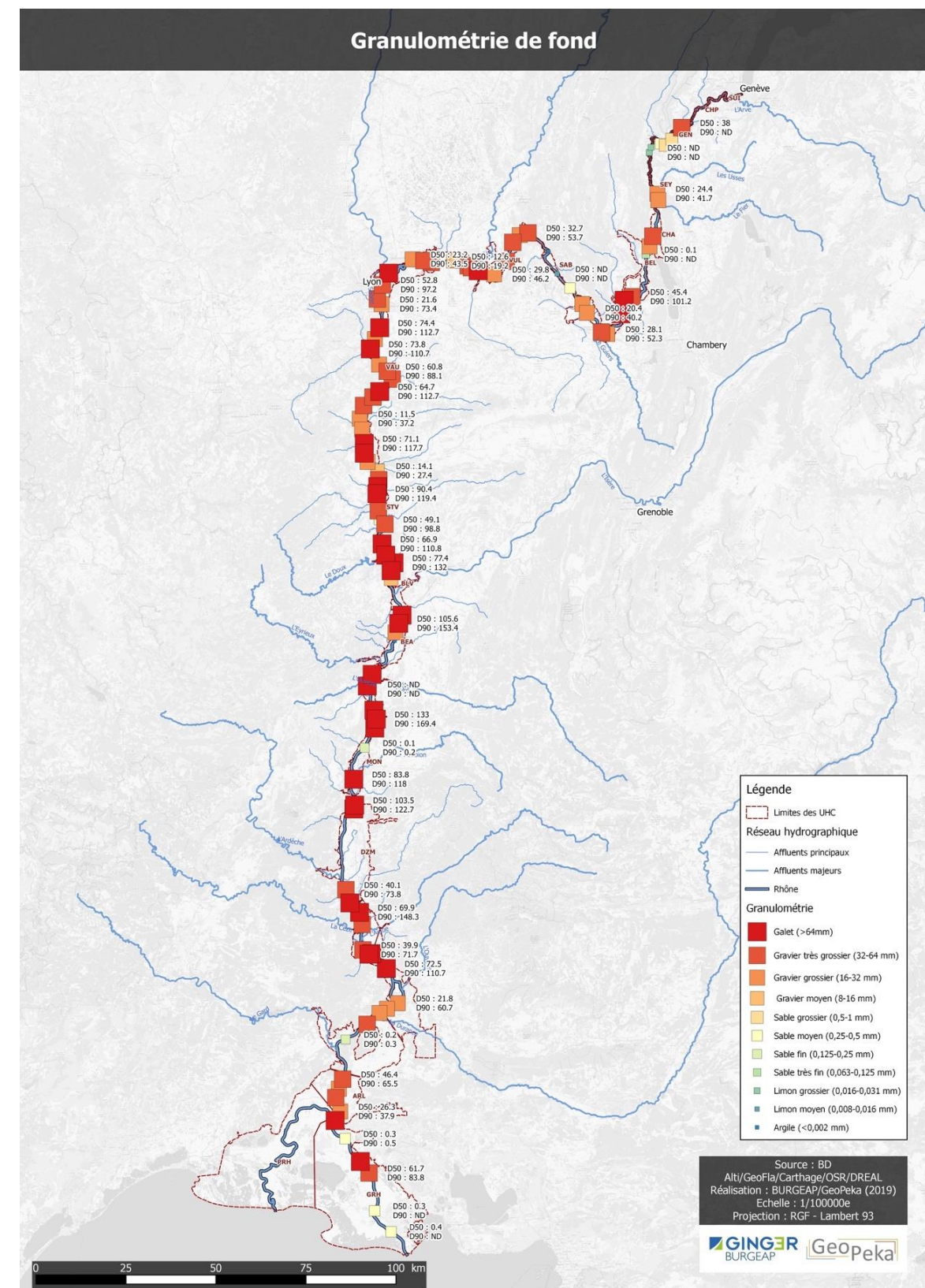
La description granulométrique rigoureuse du fond chenal dans un système de la taille du Rhône est en soi un enjeu technique. La campagne de mesure de 1999 n'a été possible que grâce à la granulométrie majoritairement sableuse du chenal et l'utilisation de moyens nautiques.

Il faudra encore attendre dix années pour que les premiers jeux de données à l'échelle de l'ensemble du linéaire soient disponibles.

Dans un premier temps, les travaux de Montané (2009) permettent de dresser un premier gradient de la granulométrie des bancs du Rhône. Le lancement de l'OSR permettra rapidement d'organiser une vaste campagne de mesures, avec l'aide technique de la CNR, qui permettra d'établir, en 2012-2013, le premier profil granulométrique du chenal du Rhône français. Ces données seront exploitées et valorisées dans la thèse de Parrot (2015) (cf. Carte 7). L'échelle de granulométrie utilisée pour cette thèse est une adaptation de la granulométrie de Wentworth (Gradistat, Blott & Pye, 2001) (cf. Tableau 20). Pour les grandeurs caractéristiques, sont utilisés le D30, le D50, le D84, le D90 (diamètres non dépassés respectivement par 30, 50, 84, 90% du panel granulométrique) et le Dm (diamètre moyen).

Les mesures donneront ensuite lieu à des développements techniques et méthodologiques pour la réalisation de mesures par imagerie qui n'ont, en revanche, toujours pas été déployées sur une large échelle.

On pourra signaler que l'étude hydrosédimentaire du Rhône entre l'Ain et Pierre-Bénite réalisée par BURGEAP pour la Métropole de Lyon entre 2017 et 2020 a permis de renouveler un profil en long granulométrique entre l'affluent principal du Haut-Rhône et la traversée de l'agglomération lyonnaise. Ces données ont pu être exploitées dans les fiches UHC#10-ALY du secteur Ain-Lyon et UHC#11-PBN de Pierre-Bénite.



Carte 7 : Granulométrie de masse en fond de lit le long du Rhône (d'après données Parrot, 2015)

⁴ Le protocole Wolman est une granulométrie de type comptage / grille fait sur une centaine de particule : cf. WOLMAN, M. Gordon. A method of sampling coarse river-bed material. EOS, Transactions American Geophysical Union, 1954, vol. 35, no 6, p. 951-956.

3.2.2 Un faible gradient granulométrique longitudinal marqué par la pente

La synthèse de données de la CNR établie dans l'EGR amène à la conclusion de l'absence d'organisation longitudinale claire dans la granulométrie des sédiments (cf. Tableau 21).

Le rôle des alluvionnements locaux et des apports secondaires ainsi que la variabilité des résultats issus de méthodes de mesures différentes sont soulignés dans ce constat. De plus, pour expliquer cette variabilité, l'étude souligne les rôles des barrages : pavage par vannage vers l'aval (ou downstream winnowing) et l'effet retenue favorisant le piégeage des fines. Le Tableau 21 présente une synthèse de ces résultats qui indiquent un affinement de la granulométrie jusqu'à Lyon puis grossissement de la taille des alluvions jusqu'à la basse vallée du Rhône (Montélimar). Enfin, une décroissance de la granulométrie est à nouveau constatée à l'approche du delta.

Ces résultats sont tout à fait cohérents avec les 22 mesures établies par Montané (2009) sur l'ensemble du linéaire du Rhône, y compris en amont du lac Léman. Ce dernier a montré que le gradient granulométrique du D90 de ces mesures correspondait à une régression linéaire exponentielle. Une analyse par régression a permis également de montrer que la pente de tronçon, plus que la distance à la source, expliquait, à elle seule 81 % de ce modèle.

Si le rôle de la pente dans le gradient granulométrique a été mis en valeur, il n'en reste pas moins que le nombre d'observations utilisées dans les travaux de Montané (22 mesures pour 800 km, soit une mesure tous les 36 km) reste faible pour analyser un système de la taille du Rhône. De plus, les écarts au modèle sont parfois importants : c'est le cas pour les points (de 1 à 6) localisés sur le Rhône suisse mais aussi pour certaines stations de mesure sur la Rhône à l'aval de Lyon. Les résidus sont expliqués par Montané par des conditions locales qui laisse entendre une forte une forte variabilité spatiale des résultats.

3.2.3 Une forte variabilité spatiale de la granulométrie

La campagne de mesures granulométriques réalisée en 2010-2011 par l'OSR a permis d'apporter des éclaircissements intéressants sur cette question de la variabilité spatiale des résultats. La granulométrie du chenal a été décrite de manière quasi-exhaustive (hormis les secteurs non navigables par l'embarcation utilisée pour les prélèvements) avec un triple prélèvement dans le talweg.

En moyenne, un point de mesure tous les 5 km a été réalisé ce qui a permis de comprendre globalement l'influence de différents facteurs. Si, dans un premier temps, ces mesures mettent en évidence une assez bonne correspondance des résultats avec les données des études antérieures (cf. Figure 88), le constat d'une forte variabilité d'amont en aval et l'absence de décroissance longitudinale claire s'impose.

Tableau 21 : Synthèse longitudinale des données granulométriques (source : EGR, 2000)

Secteur	diamètre moyen (mm)	diamètre de surface (mm)	commentaire
Génissiat	50	70	apports de l'Arve et des autres affluents ; fraction grossière importante par reprise des dépôts fluvioglaciaires
Chautagne	40	56	décroissance par tri granulométrique lié à une tendance au dépôt et à l'exhaussement du lit
amont Sault-Brenaz	20	28	poursuite de cette tendance jusqu'à interruption complète du transit des graviers
Lyon	40	56	recharge sédimentaire par l'Ain et reprise des terrasses fluvioglaciaires
amont Isère	45	63	même alimentation + apports latéraux ; léger accroissement de la granulométrie (apports grossiers des affluents rive droite)
Montélimar	55	77	forte pente avec capacité de transport excédentaire qui favorise un tri granulométrique marqué avec une évacuation préférentielle des alluvions plus fines
amont Durance	35	49	réduction de la taille des sédiments par tri granulométrique dans un contexte d'alluvionnement du lit avant aménagement
entrée delta	20	28	réduction de la taille des sédiments par tri granulométrique dans un contexte d'alluvionnement du lit avant aménagement

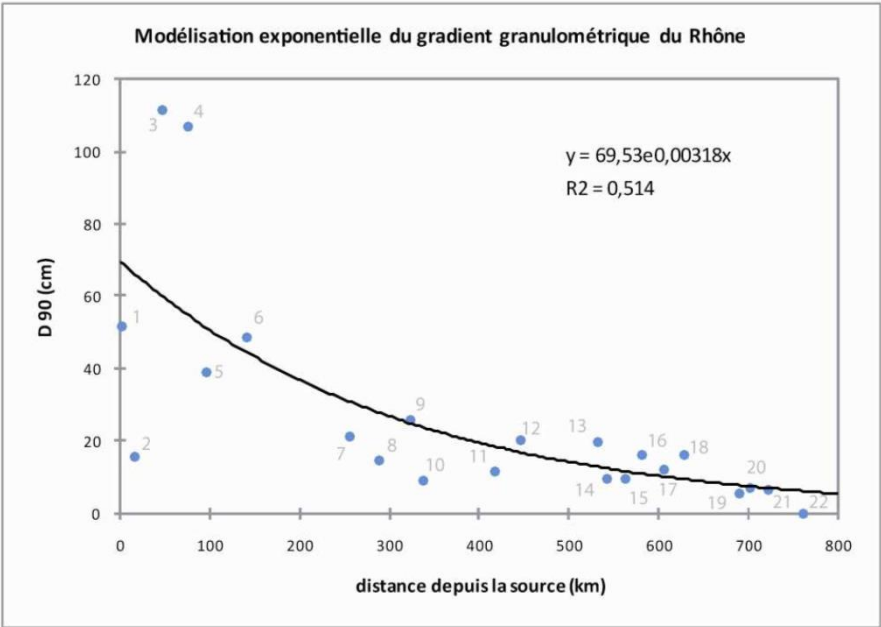


Figure 87 : Modélisation exponentielle du gradient granulométrique du Rhône (source : Montané, 2009)

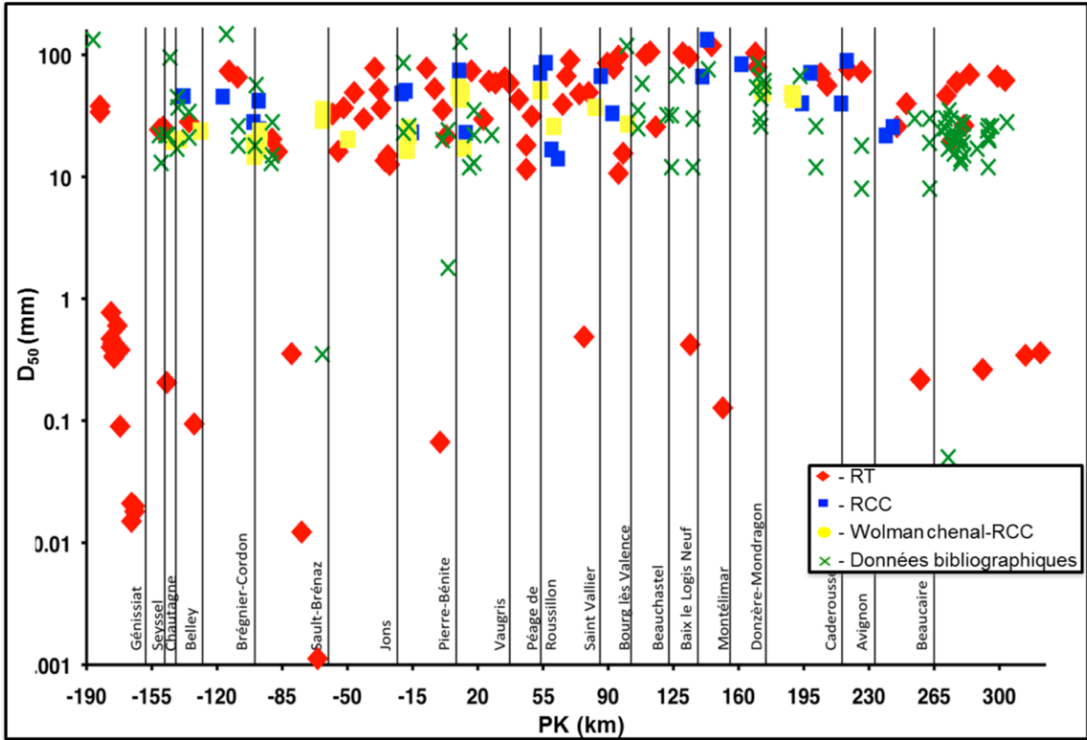


Figure 88 : Comparaison des résultats de la campagne granulométrique OSR avec les études antérieures (source : Parrot, 2015)

Influencée par les aménagements...

Le détail spatial montre donc une très forte variabilité locale qui s'explique essentiellement par l'anthropisation du fleuve.

Les constats sur les rôles des aménagements établis dans l'EGR ont été confirmés. En première approche, la comparaison des courbes granulométriques moyennes (cf. Figure 89) des sections de Rhône total et des Vieux Rhône indique clairement les processus de pavage de ces derniers. Ce résultat est d'autant plus marqué que l'histogramme « Rhône total » intègre les données de certains points qui diffèrent radicalement en résultats, avec une taille de particules très inférieure, correspondant aux mesures faites dans les retenues à proximité des ouvrages hydroélectriques.

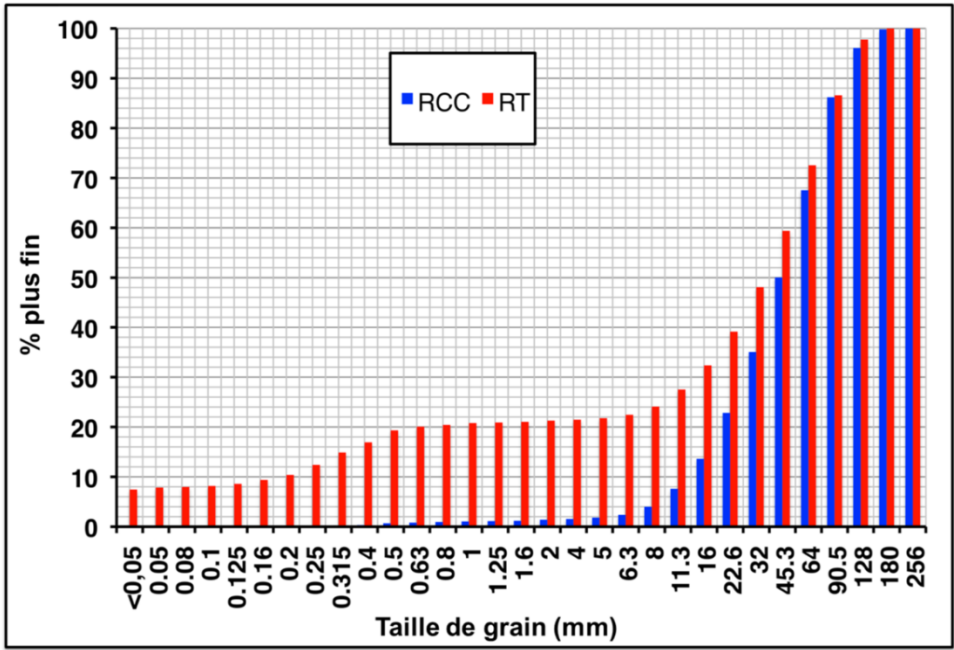
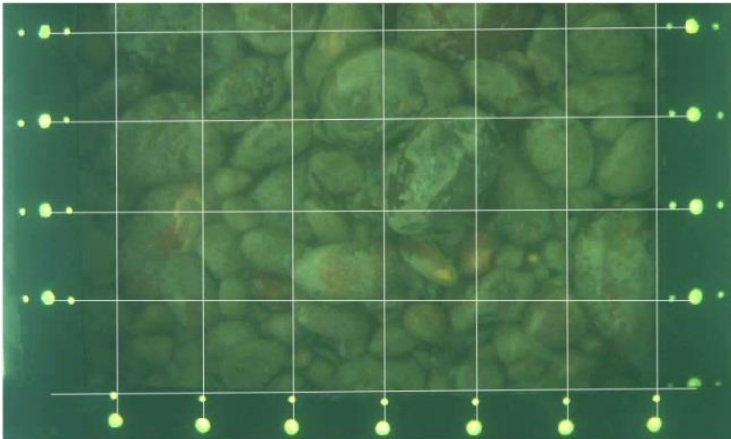


Figure 89 : Histogramme des fréquences cumulées moyenne par classes granulométriques des sédiments du chenal des sections de Rhône total (RT) et de Rhône Court-Circuité (RCC) (source : Parrot, 2015)

...et dans une certaine mesure, par les apports intermédiaires ?

Il est tentant d'expliquer une partie de la variabilité locale par les apports des affluents. Le rôle des tributaires du Rhône dans la complexité du gradient granulométrique est ainsi avancé dans l'EGR, mais l'influence des apports secondaires n'est pourtant pas si simple à mettre en avant. Deux raisons principales viennent expliquer ce constat :

- D'une part, l'impossibilité d'un échantillonnage assez fin spatialement pour bien encadrer les confluences en raison de la non-navigabilité de ces secteurs (localisés souvent dans le Vieux Rhône) ;
- Et surtout, les extractions de matériaux réalisées en amont dans les affluents pour éviter que ces matériaux ne parviennent jusque dans le chenal de navigation.



Plutôt que le « rafraîchissement granulométrique » provoqué par des nouveaux apports, l'analyse détaillée de la campagne des mesures met en avant les apports de fines des grands affluents (Arve, Fier, Guiers, Saône, Isère, Durance), stockés dans les retenues.

Seul l'Ain a un effet notable sur la diminution du D50 via une recharge du fleuve, tari par son passage au travers des verrous glaciaires dont le remplissage n'est pas achevé (UHC#07-BRC, UHC#08-SAB). Ce constat est également dressé pour certains affluents du Bas Rhône comme le Lez, la Cèze ou l'Ardèche. Si les 5 000 m³/an apportés par la Cèze peuvent avoir un effet sur le gradient granulométrique du fleuve, les données d'extraction et les aménagements réalisés (seuil des Jardins à l'amont de Bollène) sur le Lez remettent en question les changements de granulométrie suspectés. Quant à l'Ardèche, ses apports effectifs (3 000 m³/an) n'ont semble-t-il pas d'incidence notable sur le gradient longitudinal en raison de la similitude des compositions granulométriques dans le RCC de Donzère Mondragon (UHC#19-DZM).

Tableau 22 : Effets des affluents sur le gradient granulométrique du Rhône (source : Parrot, 2015)

Affluent	Dynamique sédimentaire observée principalement dans l'EGR (2000a5)	Organisation granulométrique pertinente à l'aval des affluents
Arve	Transporterait des sables et des matières en suspension (MES) et serait déficitaire en gravier (capacité de transport < 10 000 m³/an)	Fines dans la retenue de Génissiat
Fier	-Apporte une part importante de MES : 4 ^{ème} fournisseur de MES après la Durance, l'Isère et l'Arve et se positionne avant la Saône (Launey, 2014) -Ne charrie plus de graviers depuis le début du 20 ^{ème} s.	Sables et limons dans la retenue de Chautagne
Guiers	Peu perturbé, transporte peu de sédiments, entre 10 000 et 20 000 m³/an par charriage et 100 000 t/an en suspension	Fines dans la retenue de Sault-Brénaz
Ain	Serait la dernière source de graviers du Haut-Rhône et rechargerait le tronçon entre l'Ain et Miribel	Diminution des D50 vers l'aval
Saône	Alimenterait majoritairement le Rhône par des apports en suspension et de faibles quantités de sable par roulage	Fines dans retenue de Pierre-Bénite : échantillons très hétérogènes (fines+grossiers) qui font ressortir une granulométrie grossière
Doux	Peu d'apports en suspension et transit limité des graviers puisqu'il provient d'un bassin cristallin	Passages de galets à graviers à l'aval de la confluence
Isère	Ne recharge plus le Rhône en graviers. Le transit de 3 Mt/an de matières en suspension est réalisé en période de chasse par les retenues de Basse Isère, mais est interrompu en fonctionnement ordinaire	Faible quantité de sédiments fins 8 km plus à l'aval au niveau du barrage de Beauchastel.
Eyrieux	Présente un très faible charriage des galets et des apports en suspension de l'ordre de 40 000 t/an	Granulométrie grossière à l'aval
Drôme	Serait encore une des dernières sources de recharge sédimentaire, avec un charriage limité, disponible à moyen terme	Granulométrie grossière à l'aval et fines à l'amont du barrage de Baix-le Logis Neuf
Ardèche	Les apports se réduiraient à des graviers moins grossiers (D50=36-66mm)	Diminution de la taille des grains 2,5 km à l'aval de la confluence puis augmentation au point suivant
Lez	Le Lez apporterait des graviers moyens au Rhône	Diminution du D50 jusqu'à l'amont du barrage de Caderousse
Cèze	Transporterait des graviers, transit qui se réduirait naturellement par un exhaussement dans la plaine terminale du cours d'eau	Diminution du D50 à l'aval
Aygues	Le transit résiduel de petits graviers serait limité mais les apports de limons resteraient importants.	Présence de galets
Ouvèze	Le transit des graviers est très limité, les apports de limons seraient conséquents	Fines et grossiers dans la retenue d'Avignon
Durance	N'apporte plus de graviers au Rhône mais la majorité des apports en suspension qui se font en Basse Durance (1,2 Mt/an en 2000) atteindrait le Rhône	Fines en amont du barrage de Vallabrègues
Gard	N'apporterait que la part la plus petite des graviers au Rhône	Graviers à galets à l'aval

3.2.4 Une granulométrie sous influence de l'histoire et de la variabilité des pentes

Les mesures faites dans le cadre de l'OSR ne concernent pas la partie suisse du bassin versant. De ce fait la décroissance de la taille des sédiments vers l'aval est moins nettement visible, avec une relative stabilité des valeurs sur le Haut-Rhône, et un grossissement progressif de la taille des particules sur le Rhône médian et le bas Rhône. Cet effet, déjà visible, dans les données synthétisées dans l'EGR est analysé plus finement, sur la base des premiers constats de Montané (2009), dans les travaux de thèse de Parrot (2015). Cette dernière montre comment la granulométrie est déterminée par la pente, notamment la pente historique (avant aménagement CNR).

Les nouvelles lignes d'eau n'ont pas modifié la composition des fonds hormis en favorisant des dépôts sablo-argileux à l'amont des barrages. Ainsi, le gradient granulométrique actuel est un héritage qui a été scellé par les aménagements de la seconde moitié du 20^{ème} siècle.

Figure 90 : Granulométrie héritée et pavée dans la traversée de Lyon / retenue de Pierre-Bénite (11-PBN) (photographie sous-fluviale ; BURGEAP, 2017)

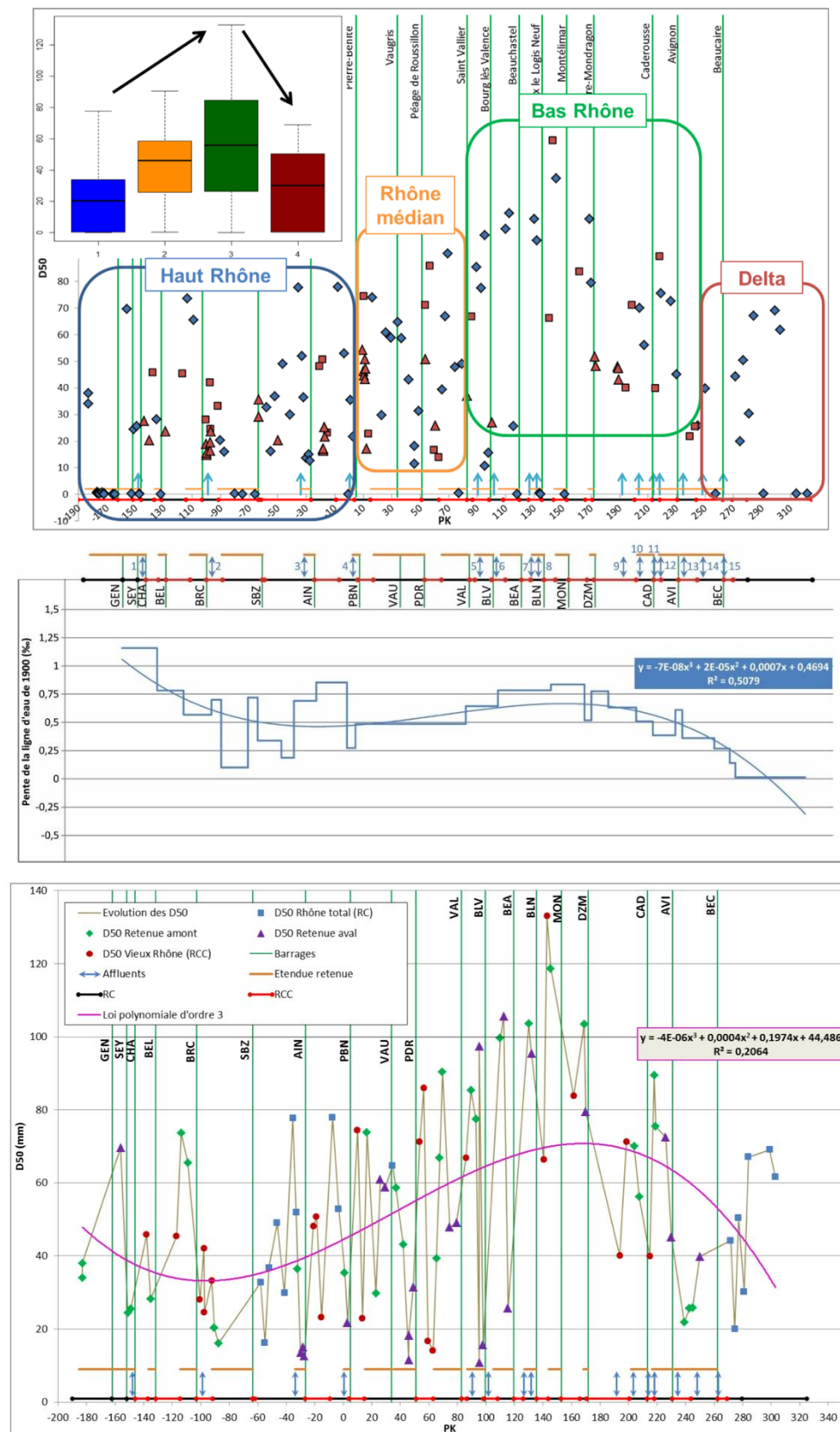


Figure 91 : Gradient granulométrique longitudinal et pente du lit avant aménagement (source Parrot, 2015)

Ce poids de l'histoire du fleuve et de son aménagement se lit également dans les analyses granulométriques de type Wolman réalisées sur les bancs (surface et sub-surface) et dans le chenal (surface) des Vieux Rhône en vue d'étudier les phénomènes de pavage.

Il a été démontré que les sections court-circuitées les plus fortement pavées sont celle de Pierre-Bénite et de Donzère-Mondragon, à l'opposé des sections du Haut-Rhône dont le ratio « D50 surface / D50 sub-surface » reste inférieur au seuil de pavage (< 3). Ces observations montrent, d'après Parrot (2015), que les lits en aval de Lyon sont figés, avec des stocks secondaires non mobilisables et un transport sédimentaire qui ne serait plus actif. Sur le Haut Rhône, un transport résiduel permettrait un moindre pavage. D'après différences seraient à mettre en parallèle avec les travaux de rectification fluviale du 19^{ème} siècle, en amont de Lyon, qui auraient eu un effet, via la chenalisation induite, sur la composition gran des fonds. A cet effet, peut être ajouté celui des extractions d'alluvions qui ont poursuivi l'inc favorisé le pavage (cf. §.2.5.4). Les ouvrages hydroélectriques se seraient alors sur-imposés préexistant, tout renforçant les effets (absence d'apport amont, effet d'eau claire et lessivage matériaux graveleux restant en surface).

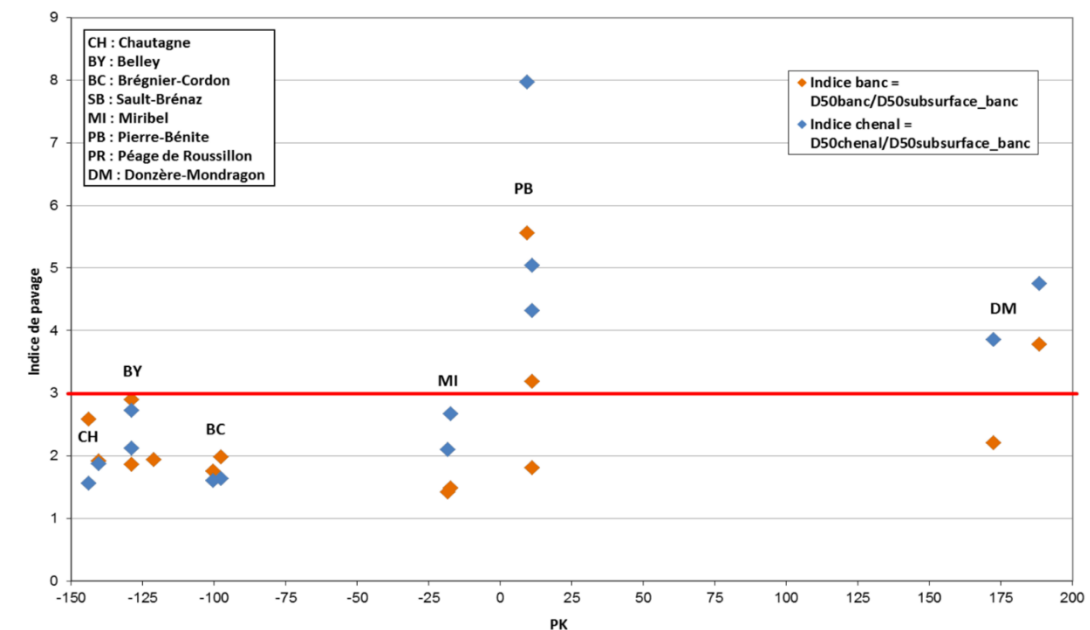


Figure 92 : Indice de pavage sur les sections de Rhône Court-Circuité (RCC) (source Parrot, 2015)

La granulométrie du Rhône est donc marquée par le temps long. Elle semble, comme nous venons de le voir, fixe et figée dans le temps. Toutefois, la variabilité temporelle de la granulométrie du Rhône est une question qui reste aujourd'hui ouverte. Les données dont nous disposons à l'heure actuelle ne nous permettent pas d'avancer qu'elle ne change pas dans un temps plus court, ou en fonction de l'hydrologie et des crues. Le seul jeu de données qui permette une analyse diachronique de la composition des fonds du Rhône est issu des campagnes de mesures d'Arnaud- Fassetta et Brousse (Arnaud-Fassetta, 2003 ; Brousse, 2010) au niveau du delta du Rhône. Or, ces données montrent une évolution avec une disparition des graviers qui est probablement imputables à un recouvrement par des apports amont sableux et une augmentation de processus de floculation en lien avec la remontée du coin salé. Le mise en lumière de ces processus, en partie spécifique au fonctionnement deltaïque, pose la question du renouvellement des fonds en lien avec le déplacement de la fraction sableuse, voire sablo-graveleuse.

Des déstockages ont été observés suite aux crues de 2002 et 2003, à la fois dans les retenues où les éléments fins ont été largement remobilisés, et dans certains RCC qui ont montré une évolution de leurs fonds graveleux. Toutefois l'origine de ces évolutions n'est pas connue : apports des affluents, érosions de berge, éventuelle rupture du pavage (la composition et l'épaisseur de la couche de surface n'étant pas caractérisées) ? si la question peut se poser pour des événements hydrologiques exceptionnels comme 2002 et 2003, le travail de Parrot (2015) montre qu'il est hautement probable que les niveaux de rupture de pavage ne soient pas atteints pour les crues les plus courantes (Q2, Q5, Q10).

3.3 Contribution sédimentaire des affluents

3.3.1 Apports par le Lac Léman

Le lac Léman constitue une rupture majeure dans la continuité sédimentaire du Haut-Rhône suisse. Tous les sédiments transités dans le Valais se déposent dans la queue du lac. Les apports sous forme de charriage sont estimés à environ 25 000 m³/an d'après une étude BG-GREN de 2014 pour le canton de Vaud. Ces apports sont susceptibles d'évoluer à l'avenir, plutôt à la baisse, en fonction des aménagements de correction du Rhône.

De même, les sédiments apportés par des affluents du lac (Dranses, Versoix, Hermance, etc.) se déposent sur les marges du lac. Lorsque le Rhône amont est en crue, une part infime des flux solides peut transiter jusqu'à Genève sous forme de particules en suspension.

Le Rhône initie donc son parcours dans Genève avec des flux solides nul en charriage et négligeables en MES.

3.3.2 Typologie des affluents

Le Rhône a pu compter historiquement sur de nombreux affluents pour le fournir en sédiments fins, sableux et grossiers entre Genève et la Méditerranée, ce qui ne l'empêchait pas d'avoir des points naturels de rupture de continuité sédimentaire comme au niveau des Basses Terres du Dauphiné où le remplissage de l'ombilic glaciaire ne s'est pas achevé (cf. PARTIE B / §.1.2).

Comme développé en partie §.3.6, les affluents sont distingués en 4 catégories :

- **Les affluents majeurs (rang 1)** : il s'agit de 18 affluents identifiés dès l'EGR (2000) comme des contributeurs importants au fonctionnement alluvial (d'amont en aval) : Arve, Les Usses, Fier, Guiers, Ain, Saône, Doux, Isère, Eyrieux, Ouvèze (ardéchoise), Drôme, Roubion, Ardèche, Cèze, Aigues, Ouvèze (provençale ou drômoise), Durance, Gardon ;
- **Les affluents principaux (rang 2)** : il s'agit de 52 affluents de plus de 10 km extraits de la BD Carthage, avec ou sans action de gestion sédimentaire ;
- **Les affluents secondaires (rang 3)** : il s'agit de 25 affluents de moins 10 km qui font l'objet d'interventions sédimentaires par la CNR inscrite dans l'arrêté d'autorisation de 2011 (PGPOD CNR, 2009) ;
- **Les affluents mineurs (rang 4)** : 146 cours d'eau restants issus de la BD Carthage.

Pour tous les affluents précédents (241 au total), la BD Carthage permettait de ne retenir que le linéaire principal. En complément, la couche « masse d'eau » a été utilisée pour identifier les masses d'eau des affluents du Rhône, et faire apparaître le chevelu complet du réseau hydrographique du SDAGE. Les autres éléments du réseau hydrographique (canaux, contre-canaux, lînes, etc.), cartographiés par ailleurs (carte B, carte C), ne sont pas intégrés dans l'analyse des affluents.

3.3.3 Contribution en matières en suspension (MES)

► Méthodologie

Contrairement à l'hydrologie, le réseau hydrographique à l'échelle du bassin est très peu équipé en turbidimètre, ce qui ne permet d'avoir qu'une connaissance parcellaire des flux réels (cf. Figure 93). Toutefois, des estimations sont possibles à partir de l'hydrologie et des données, plus ou moins parcellaire, de concentration en MES. Ce travail a été fait notamment dans le cadre de l'EGR (2000), puis ultérieurement dans le cadre de l'OSR.

Historiquement, seules les stations SORA en Arles (gérée par l'IRSN) et la bouée de mesure MESURHO (installée sur la balise Roustan Est à l'embouchure du fleuve) permettaient de disposer d'une information en continu. Depuis 2009, l'OSR a permis l'installation d'une seconde station permanente à Jons (amont de Lyon).

En ce qui concerne les affluents, les plus gros contributeurs sont aujourd'hui équipés de mesures des MES en continu, soit en raison de cette problématique pour les exploitants d'ouvrages hydroélectriques (Arve, Isère, Ardèche, Durance), soit en raison de l'importance de l'affluent (Saône).

Pour les affluents de taille plus modeste, l'OSR a travaillé avec un système basé sur de l'instrumentation continue temporaire (réseau de turbidimètres mobiles). Le bouclage du bilan de l'OSR donne des résultats cohérents avec 19 % d'apports non jaugés pour environ 21 % de surface de bassin non instrumentée.

La compilation de ces données avec les données l'EGR nous permettent d'avoir aujourd'hui une vision assez fidèle de l'origine des flux de MES.

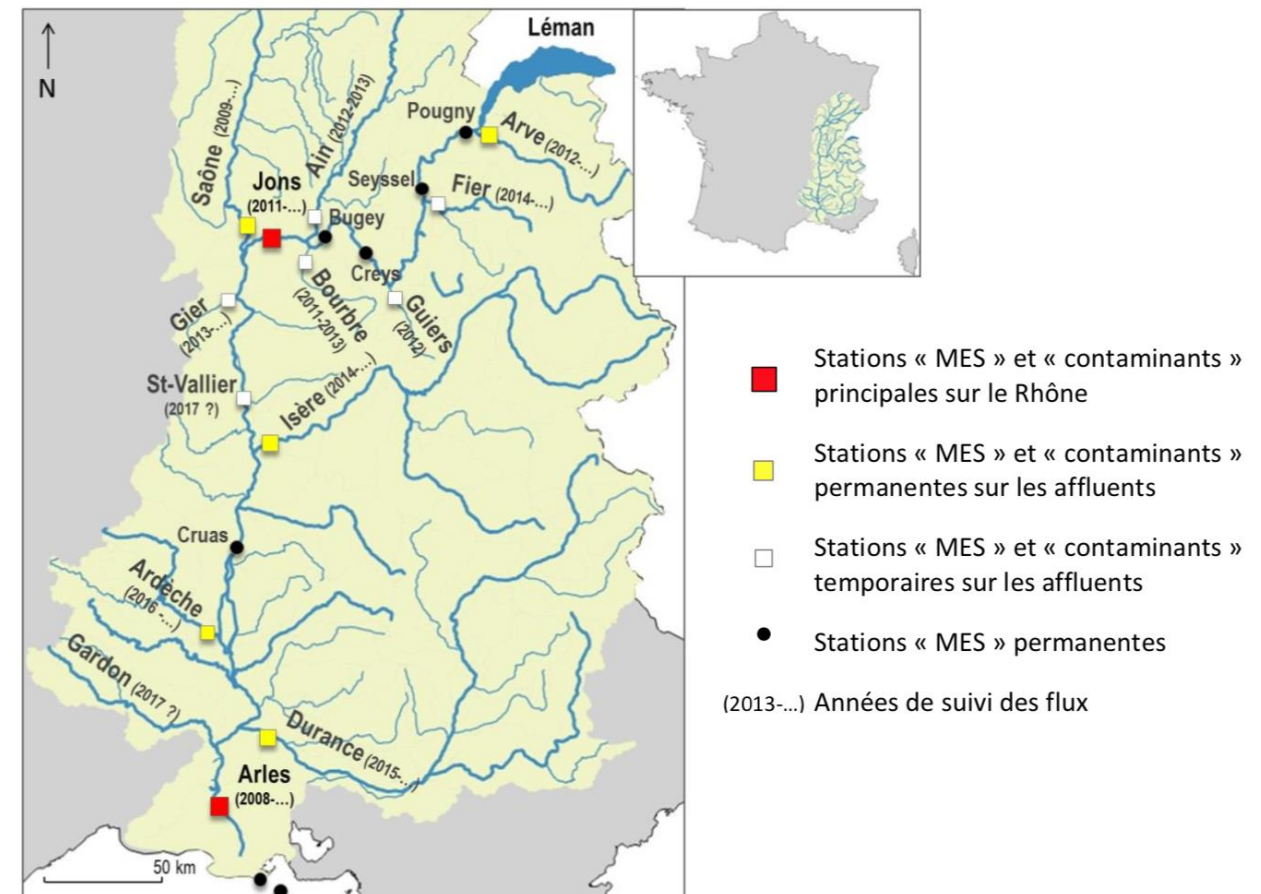


Figure 93 : Réseau de mesures turbidimétriques sur le bassin du Rhône (Source : OSR 4 III.1, 2017)

► Apports des principaux affluents

A l'échelle du bassin, l'apport en MES des principaux affluents est estimé à environ 6 Mt / an. Sur ce volume global, deux affluents majeurs se distinguent nettement et cumulent 64 % des apports : la Durance (34%) et l'Isère (30%) (cf. Figure 94). Les autres contributeurs principaux sont plus modestes avec l'Arve (9,5%), la Saône (5,5%), la Drôme et l'Ardèche charriant respectivement une proportion équivalente de matière fines (3,3%).

La répartition des apports par sous-ensembles régionaux montre la prédominance de la rive gauche avec les Alpes et une quasi équipartition entre affluents septentrionaux et méridionaux (cf. Figure 95). Le massif cévenol et Nord-Ardéchois apporte, quant à lui, une proportion globalement équivalente aux plaines du nord-est (bassin de la Saône).

Il est important de noter que ces valeurs moyennes sont très variables d'une année à l'autre, en fonction des l'hydrologie des sous-bassins versants. Ainsi, par exemple, sur la période 2011-2016, la contribution de la Durance a varié de 3% (2012) à 58 % (2016).

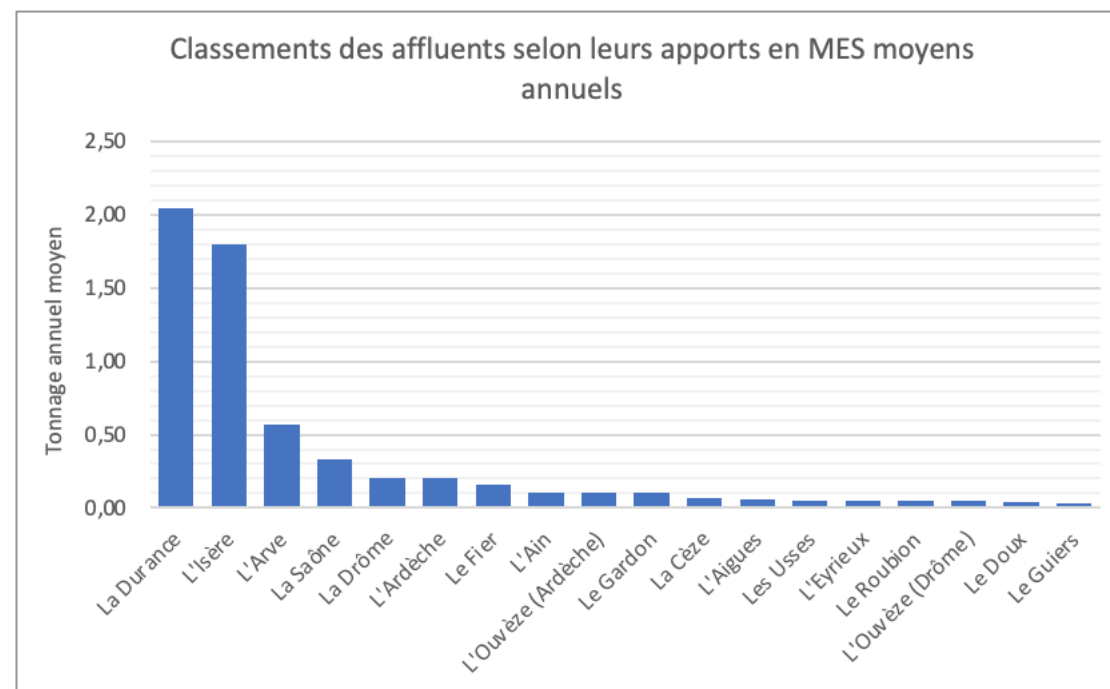


Figure 94 : Classement des affluents du Rhône selon leurs apports en MES (d'après EGR, 2000, et OSR4)

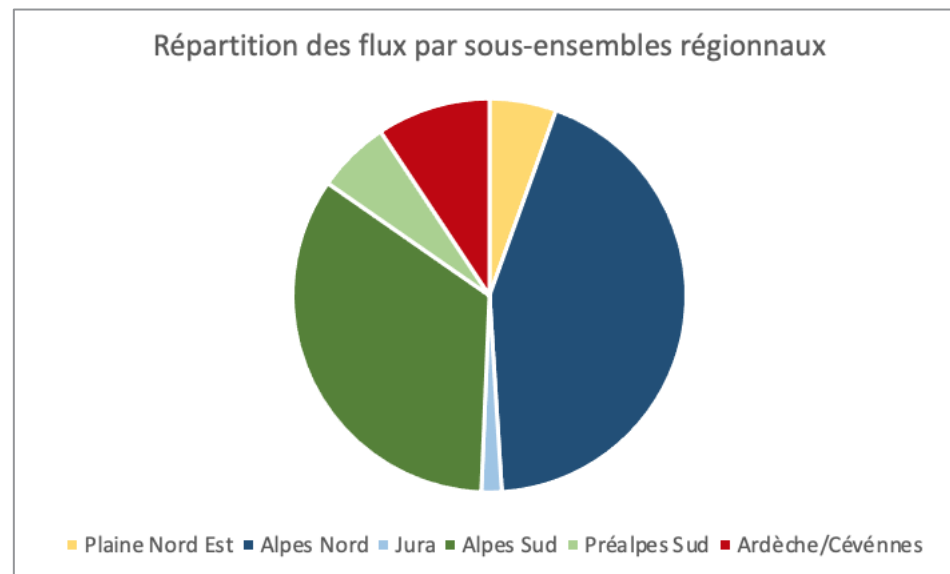


Figure 95 : Origine des MES du Rhône par sous-ensembles régionaux

Les apports des affluents en MES étaient estimés, en moyenne, à près de 15 Mt / an. L'EGR estime en 2000 que le flux est de 10 Mt/an, contre 20 Mt/an en 1950 et 30 Mt au milieu du 19^{ème} siècle (étude de Surell en 1847) et au début du 20^{ème} siècle (Pardé, 1925). Cette réduction drastique s'explique par une série de facteurs qui ont été largement étudiés (notamment Raccasi, 2008) : fin du Petit Âge Glaciaire, déprise agricole, colonisation végétale spontanée et les reboisements RTM sur les têtes de bassin, aménagement des grands barrages réservoirs sur les affluents, etc.

Ces modifications ont touché inégalement les sous-ensembles régionaux, avec une baisse de la part des Alpes et Préalpes du Sud plus importante que pour Alpes du Nord, où les effets de la recolonisation végétale ont été probablement moins marqués. Les données compilées montrent une diminution absolue pour tous les sous-bassins sauf pour les affluents ardéchois (Doux, Eyrieux, Ardèche) (cf. Figure 96).

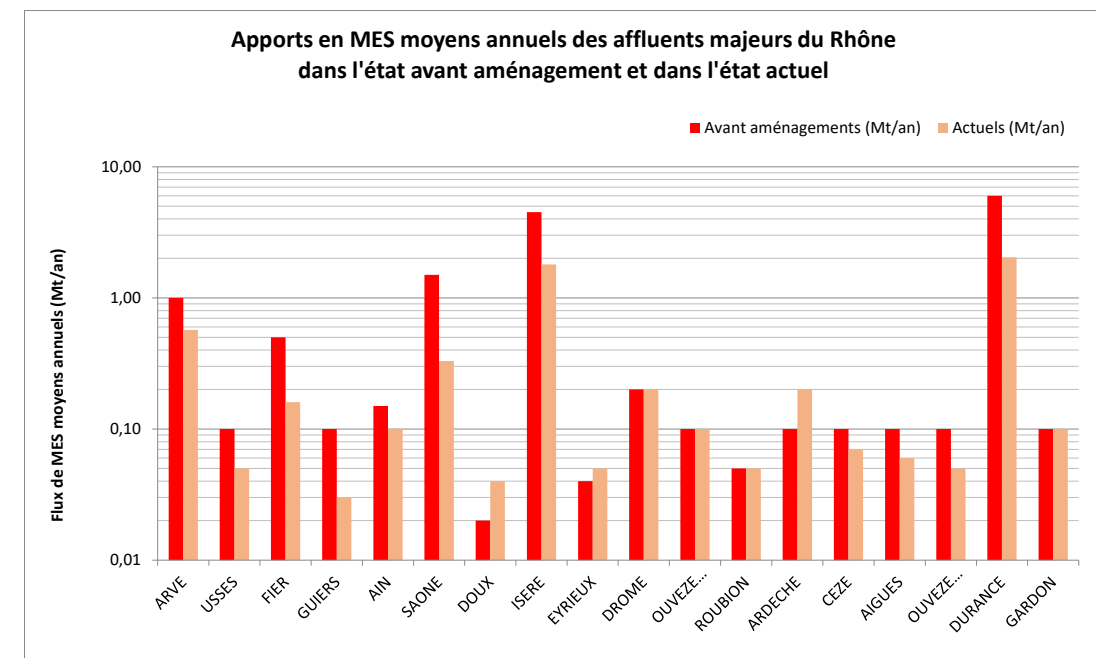


Figure 96 : Contributions passées et actuelles en MES pour les affluents majeurs (d'après EGR, 2000, et OSR4)

3.3.4 Contribution des affluents en sable

► Méthodologie

En ce qui concerne l'estimation des apports sableux des affluents, très peu de données sont disponibles pour dresser une synthèse à l'échelle du Rhône.

En effet, cette fraction granulométrique n'a pas été spécifiquement étudiée dans le cadre de l'EGR et les récents développements de l'OSR (mesures de flux de sables, modèle GTM appliqué aux flux de charriage) ne traite que de l'axe Rhône.

Par ailleurs, les données granulométriques issues d'opérations de dragages aux affluents n'ont jamais été exploitées globalement. On dispose en effet d'analyses granulométriques systématiques de la fraction fines et sableuses réalisées en préalable aux opérations de dragage aux confluences. La donnée macro de cette granulométrie, qui est répertoriée dans la base de données dragage de la CNR, associe les sables aux sédiments fins (cf. rapport M4. §3.4.4).

Toutefois partant du principe que les MES sont généralement entraînés dans le flux des crues, il est possible de penser que les sédiments fins dragués aux confluences sont pour une large partie des sables. Pour certains cours d'eau (cas de l'Eyrieux ou du Gier par exemple), la fraction sableuse est même prépondérante par rapport à la charge grossière qui est parfois bloquée plus en amont dans des ouvrages et/ou par les ruptures de pente imposées par la vallée du Rhône.

3.3.5 Contribution des affluents en charriage

► Méthodologie

Le volet C2 des fiches UHC vise à récapituler les contributions hydrologiques et sédimentaires des affluents, avec notamment une distinction entre les apports en sédiments fins et grossiers à la confluence.

La démarche menée pour analyser les contributions des affluents « majeurs » et « principaux », soit 70 affluents, est la suivante :

- **Identification du rang** de l'affluent, de la rive concernée, du tronçon homogène (TH) exutoire,
- **Collecte et analyse des études** des affluents sur le fonctionnement physique : en priorité études hydro- ou géo-morphologiques, mais également études hydrologiques, hydrauliques, hydrogéologiques ou hydroécologiques. Ainsi plus de 150 références d'études ont été analysées ;
 - **Extraction d'indicateurs** géographiques (bassin versant) et hydrologiques (module, débits de crue Q2, Q10, Q100), et de données plus qualitatives sur l'état du bassin versant (occupation du sol, production sédimentaire), les pressions anciennes ou actuelles (extractions, endiguements, barrages, seuils) ou la gestion actuelle ;
 - **Extraction des données sur les apports sédimentaires** : granulométrie (D50 ou Dm, etc.), capacité de charriage théorique ou validée, etc. ;
- **Bilan des actions de dragage** menées à chaque confluence à partir des analyses menées en Mission 4 (et reportées en section H1 de chaque fiche UHC) et éventuellement des études propres aux affluents :
 - **Actions de gestion** sur la période 1995-2018, volume total dragué (volume en m³ pour x opérations), et classes de granulométrie concernées (grossier, fins) après données fournies par les exploitants ;
 - **Granulométrie des sédiments apportés**. Les opérations de dragage, pour les bases de données CNR, VNF, EDF, Gd Lyon, etc., font référence à deux grandes catégories de sédiments : grossiers et fins. Cette distinction est étroitement liée aux techniques de dragage : drague aspiratrice pour sédiments fins, pelle mécanique pour sédiments grossiers. Dans l'esprit des questionnaires, le terme « grossier » peut inclure des sables car la technique utilisée pour draguer des sédiments graveleux et sableux sur un même site est identique. Inversement, si les sédiments sont fins et sableux, ils seront gérés avec une drague aspiratrice ; aussi, les données doivent être analysées avec précaution en l'absence de données granulométriques précises des volumes prélevés. A partir de ces éléments et du contexte du bassin versant, le panel granulométrique des apports de l'affluent est apprécié selon les principales classes (L : limons, S : sables ; G : grossiers) : par exemple LS pour limons-sables, GS pour grossiers-sables, etc.
 - **Comparaison des volumes de dragage en matériaux grossiers** avec les capacités ou flux de charriage éventuellement fournis dans les études sur l'affluent – sous réserve d'une vérification de la pertinence et de la validité de ces calculs ;
 - **Estimation du volume annuel moyen en grossiers**, hors sables, apporté par l'affluent (en m³/an). Les sables ne sont pas comptés dans les apports par charriage (sauf pour la fraction composant la matrice des sédiments grossiers) du fait des difficultés inhérentes aux estimations : en effet, d'une part les formules de capacités de transport solide utilisées dans les études locales d'affluents, comme Lefort (1991) ou Meier-Peter-Muller (1948), n'intègrent pas les sables dans le charriage ; d'une part, les sables sont généralement associés aux sédiments fins dans les opérations de dragages, ce qui ne permet pas de valider les calculs. Les formules plus récentes de Lefort (2007) ou de Recking (2013) pourraient donner le transport solide total mais leur utilisation est encore limitée dans les études d'affluents.

L'estimation du volume moyen annuel en grossiers peut être relativement précise (d'après étude et volumes de dragage) ou approximative (par exemple, qu'une partie des sédiments atteint le Rhône sans dragage, ou lorsque la part de sables est importante dans les dragages à la pelle mécanique).

Dans ces dernier cas, les estimations sont réalisées à dire d'expert ou d'après un ordre de grandeur dépendant du type de bassin versant obtenu par débit solide spécifique (m³.an⁻¹.km⁻²) ; cette approximation est signalée par le symbole « ≈ » devant le chiffre.

Les apports sont ajustés en fonction de la part des sédiments grossiers qui peut atteindre le Rhône directement et ne pas faire l'objet de dragage. Par exemple, si les sédiments sont systématiquement fins sur la partie aval de la confluence, y compris en profondeur, alors cela signifie que tous les apports grossiers sont gérés par les dragages et que l'estimation de ces apports grossiers pourra être jugée fiable ; dans le cas contraire, une partie des flux rejoint directement le Rhône, l'estimation est alors un minorant des apports grossiers par l'affluent.

En résumé, pour chaque affluent « majeur » ou « principal », les grandeurs suivantes sont estimées (Figure 97) :

- AT : apports grossiers actuels en entrée d'UHC (AT = AD + AS) ;
- AD : apports grossiers directs au Rhône ;
- AS : apports stockés ;
- RH : apports grossiers dragués et restitués au Rhône ;
- RHE : gestion mixte (apport au Rhône ou gestion à terre) au cas par cas ;
- DE : gestion à terre : réutilisation ou revalorisation ;
- B : apports grossiers actuels au Rhône (directs et restitution de dragage) (B = AD + RH) ;
- TD : volume total dragué (TD = RH + RHE + DE). Un écart entre AS et TD indique une tendance au dépôt ou au déficit sur la période considérée ;

Pour les affluents majeurs, les grandeurs suivantes sont ajoutées :

- A : apports grossiers avant aménagements ;
- B/A : ratio entre les apports actuels et les apports avant aménagement.

Les données détaillées figurent en Annexe 3.

Dans les fiches UHC, les cours d'eau « secondaires », sauf cas particulier, font l'objet d'une analyse réduite à partir des éventuelles études existantes et actions de dragages menées aux confluences. Les affluents « mineurs » ne disposent pas d'information systématique et sont supposés – sauf exception qui serait développée – contribuer de façon négligeable au transport solide.

Lorsque la donnée existe, d'autres descriptions sont fournies : volumes d'extractions dans le bassin versant affluent, rôle du réseau hydrographique propre à l'affluent ; caractère épisodique des apports sédimentaires. Ils sont synthétisés sur les cartes et tableaux ci-après.

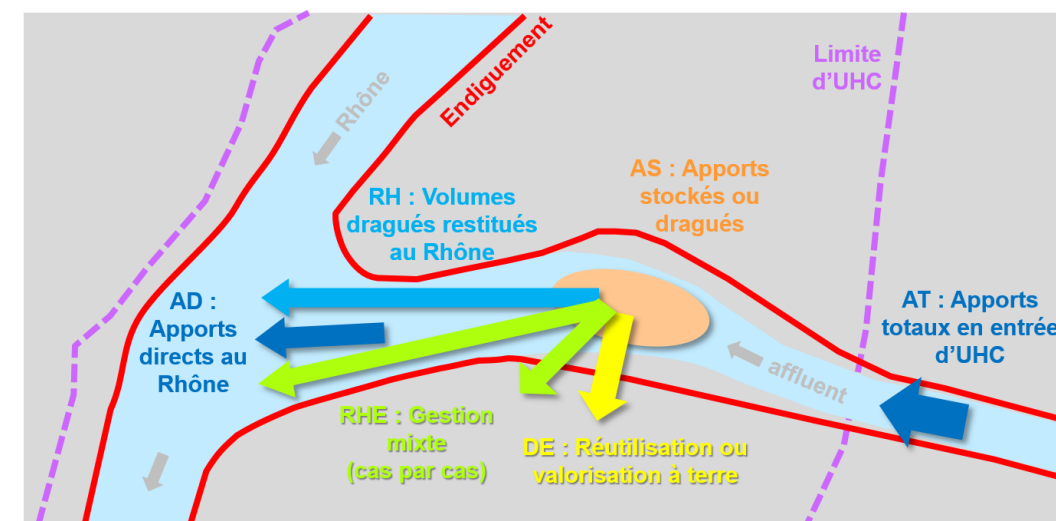


Figure 97 : Schéma de principe du bilan sédimentaire des affluents

► Synthèse sur les contributions des affluents en charge de fond (hors sables)

A partir de la méthodologie précédente appliquée sur des données 1995-2018, les apports des affluents en charge de fond (hors sables) ont été estimés pour tous les affluents majeurs et principaux du Rhône (70 affluents). Les tableaux en Annexe 3 récapitulent ces données, ainsi que celles collectées pour l'ensemble des affluents (241 affluents).

Le Tableau 23 synthétise les données par UHC, qui sont illustrées par la Figure 99 :

- Les apports des affluents à l'approche des confluences sont de 150 995 m³/an. Sur ce volume, environ la moitié (72 237 m³/an / 48%) est constituée d'apports directs au Rhône (AD) et le reste est stocké (78 758 m³/an / 52%) ;
- A comparer de ces 78 758 m³/an stockés, 85 535 m³/an ont été dragués, soit 9% de plus, ce qui signifie que les pièges à sédiments ont été plus dragués qu'ils ne se sont remplis sur la période 1995-2018. Cela peut s'expliquer par l'occurrence de crues avant la période considérée (par exemple 1993) qui avaient contribué à accumuler des sédiments aux confluences ;
- La plupart des confluences font l'objet de dragage dans les UHC. Seuls les apports de l'Ain et de l'Ardèche ne sont pas dragués parmi les affluents majeurs, et il faut aller chercher de petits affluents pour trouver d'autres cours d'eau non dragués : par exemple l'Allondon (3 000 m³/an) et la Loire (1 000 m³/an) dans la retenue de Chancy-Pougny (02-CHP), la Valserine (1 000 m³/an) dans la retenue de Génissiat (03-GEN), et toute une série d'autres petits cours d'eau : l'Annaz, la Bourbre, le Saluant, le Dolon, ruisseau de Limony, la Véore, ruisseau de Frayol (ou de Lorobouire), la Petite Berre ; la situation de l'Escoutay (5 000 m³/an / 18-MON) a évolué au cours des années : les dragages ne sont plus réalisés à la confluence, mais dans le chenal navigable que ses apports contraignent.
- En prenant ces 85 535 m³/an dragués, 41 800 m³/an (soit 49%) sont systématiquement restitués au Rhône ; 31 159 m³/an (36%) sont restitués ou stockés à terre selon les cas ; 9 449 m³/an (11%) a été géré à terre, et le reste n'a pas de destination connue (3 127 m³/an / 4%) ;
- Les apports totaux au Rhône, directs et issus de dragages (AD+RH), sont donc a minima, c'est-à-dire sans compter les volumes de type RHE, de 114 037 m³/an. Le devenir des sédiments est illustré par UHC sous forme d'histogramme (Figure 99) et de cartographie (Carte 8).

Aujourd'hui, les trois plus gros contributeurs au charriage du Rhône sont l'Ain (35 000 m³/an), l'Arve (20 000 m³/an), la Drôme (20 000 m³/an) (cf. Figure 98). Ils représentent au total 75 000 m³/an, soit 66 % des apports totaux au Rhône, sur les 114 037 m³/an d'apports total des affluents.

La Figure 99 illustre la répartition de ces apports et dans quelle mesure il existe un déséquilibre dans la localisation de ces apports, entre les UHC qui reçoivent des apports significatifs, notamment pour les 3 affluents précédents, et les UHC qui ne reçoivent aucun apport grossier. Par ailleurs, comme il sera montré plus loin, la continuité de ces apports sur le linéaire du Rhône est très limitée : à ce jour les apports de l'Arve sont stockés dans la retenue de Verbois (01-SUI) ; les apports de l'Ain transitent dans l'UHC#10-ALY jusqu'à Lyon, et les apports de la Drôme ont souvent été réinjectés à proximité dans la retenue du Pouzin (17-BLN).

La Figure 101 et le Tableau 24 déclinent les mêmes informations centrées sur les 18 affluents majeurs. Ceux-ci contribuent actuellement à 111 500 m³/an à l'approche des confluences, soit 74% des apports de tous les affluents. Les apports au Rhône directs ou après dragage sont de 94 097 m³/an, soit 83% des apports totaux.

Avant l'aménagement hydroélectrique de son bassin versant, le plus gros pourvoyeur de charge graveleuse était la Durance, qui apportaient au Rhône plus que l'apport actuel de l'ensemble des affluents (200 000 m³/an). Les apports en sédiments grossiers par les affluents ont été divisés par 7 depuis la situation avant aménagements (14% des cumuls initiaux). Certains cours d'eau (Durance, Isère, le Fier) présentent des apports nuls (ou négligeables) au Rhône alors qu'ils fournissaient annuellement plusieurs dizaines de milliers de m³. Ce tarissement peut être lié à des processus « naturels » (boisement des versants) mais compte tenu des temps de transferts depuis les têtes de bassins versants, ce sont surtout les retenues d'aménagements hydroélectriques, les endiguements et les extractions qui sont à l'origine des ruptures de continuité sédimentaire.

L'essentiels des apports de charge de fond au Rhône est donc constitué par les bassins pouvant déstocker les accumulations des parties inférieures de leur bassin. Pour le Haut Rhône, c'est le cas de l'Arve, de l'Ain ; des Ussets et de l'Allondon dans une moindre mesure. Pour ce qui est de la Drôme, la totalité du bassin est

potentiellement pourvoyeuse de charge solide, en l'absence de barrage. Une part non négligeable des apports actuels a pour origine les monts ardéchois et les Cévennes : Gier, Cance, Doux, Mialan, Eyrieux, Laveyzon, Escoutay, Ouvèze ardéchoise, Ardèche, Cèze) complétée par quelques affluents de rive gauche : Gère, Varèze, Galaure, Roubion.

Ces différentes contributions sont illustrées sur la Carte 9 (apports totaux / AT) et sur la Carte 10 (apports directs au Rhône / AD)

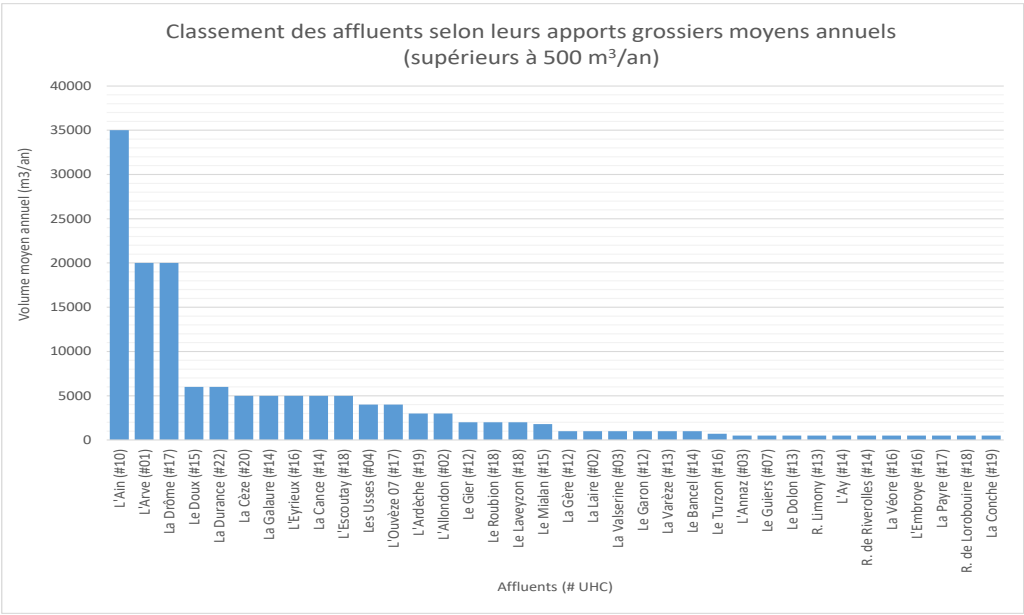


Figure 98 : Classement des affluents du Rhône selon leurs apports en sédiments grossiers (supérieurs à 500 m³/an en moyenne annuelle)

Tableau 23 : Synthèse par UHC des apports sédimentaires grossiers des affluents

		Estimation des apports en sédiments grossiers (hors sables) aux confluences (m³/an)			Volumes grossiers (hors sables) ayant fait l'objet d'un dragage sur 1995-2018 (m³/an)							
UHC	Nb*	Apports directs au Rhône (AD)	Apports stockés et/ou dragués (AS)	TOTAL en entrée d'UHC (AT)	Dragages - Volumes restitués au Rhône (RH)	Dragages - Volume à gestion mixte (à terre et restitution au Rhône) (RHE)	Dragages - Volumes gérés à terre (DE)	Dragages - Volume à destination non déterminée (ND)	TOTAL dragué (TD)	Différentiel (AS - TD) (m³/an)	Apports totaux au Rhône (AD+RH)	Commentaires sur le différentiel
01-SUI	1	10 000	10 000	20 000	10 000	-	-	-	10 000	0	20 000	
02-CHP	2	4 000	-	4 000	-	-	-	-	-	0	4 000	
03-GEN	2	1 500	-	1 500	-	-	-	-	-	0	1 500	
04-SEY	4	766	3 634	4 400	3 634	-	-	-	3 634	0	4 400	
05-CHA	2	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	
06-BEL	3	-	210	210	-	-	-	210	210	0	0	
07-BRC	6	500	-	500	-	-	-	-	-	0	500	
08-SAB	3	-	200	200	-	-	-	-	-	200	0	Dépôts Brivaz et Pernaz
09-VUL	1	200	-	200	-	-	-	-	-	0	200	
10-ALY	3	35 000	-	35 000	-	-	-	-	-	0	35 000	
11-PBN	2	-	250	250	-	250	-	-	250	0	0	
12-VAU	7	980	2 920	3 900	2 900	-	20	-	2 920	0	3 880	
13-PDR	11	1 400	1 323	2 723	1 040	283	-	-	1 323	0	2 440	
14-STV	11	2 960	10 590	13 550	1 020	9 500	70	-	10 590	0	3 980	
15-BLV	7	3 440	4 510	7 950	4 460	-	50	-	4 510	0	7 900	
16-BEA	4	500	6 200	6 700	500	-	9 147	-	9 647	-3 447	1 000	Dragages Turzon > apports
17-BLN	6	2 797	22 003	24 800	50	21 126	50	-	21 226	777	2 847	Dépôts Payre
18-MON	6	3 000	6 612	9 612	5 915	-	112	2 500	8 527	-1 915	8 915	Dragages Roubion > apports
19-DZM	5	3 500	-	3 500	-	-	-	-	-	0	3 500	
20-CAD	4	1 694	4 306	6 000	4 306	-	-	417	4 723	-417	6 000	Dragages Aigues > apports
21-AVI	2	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	
22-VAL	3	-	6 000	6 000	7 975	-	-	-	7 975	-1 975	7 975	Dragages Gardon > apports
23-ARL	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	
24-GRH	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	
25-PRH	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	
TOTAL	95	72 237	78 758	150 995	41 800	31 159	9 449	3 127	85 535	-6 777	114 037	

* Nombre d'affluents avec apport significatif de sédiments grossiers (hors sables)

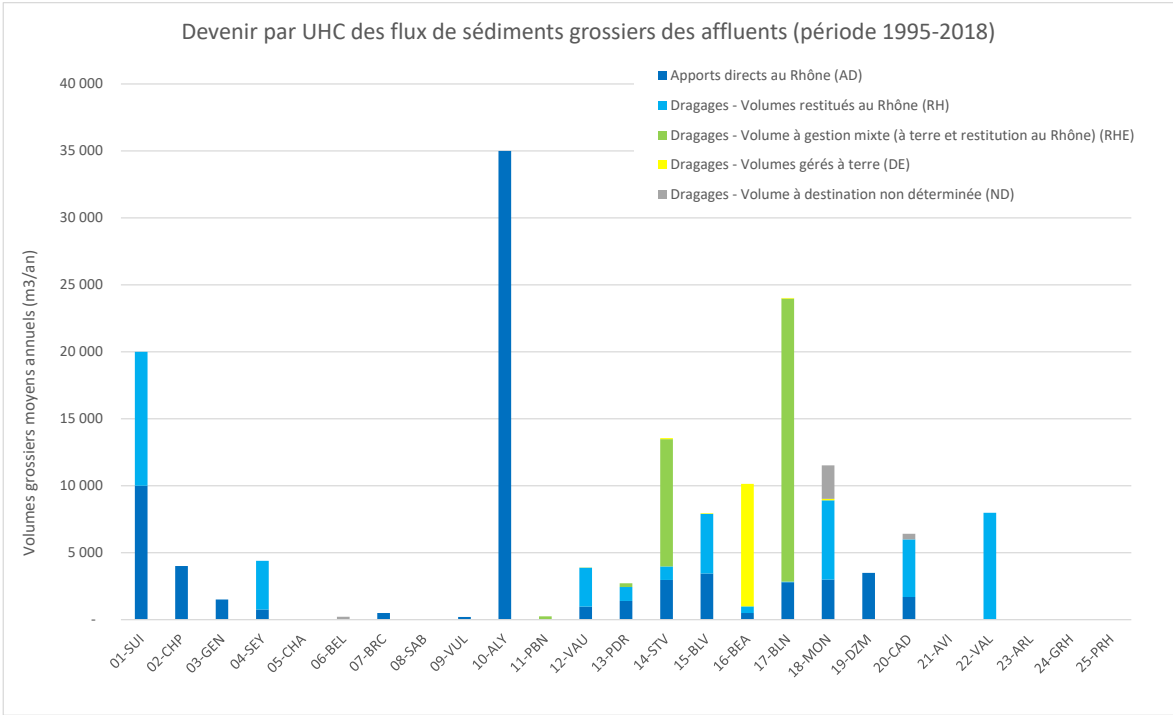


Figure 99 : Bilan des apports grossiers des affluents et de leur devenir (période 1995-2018)

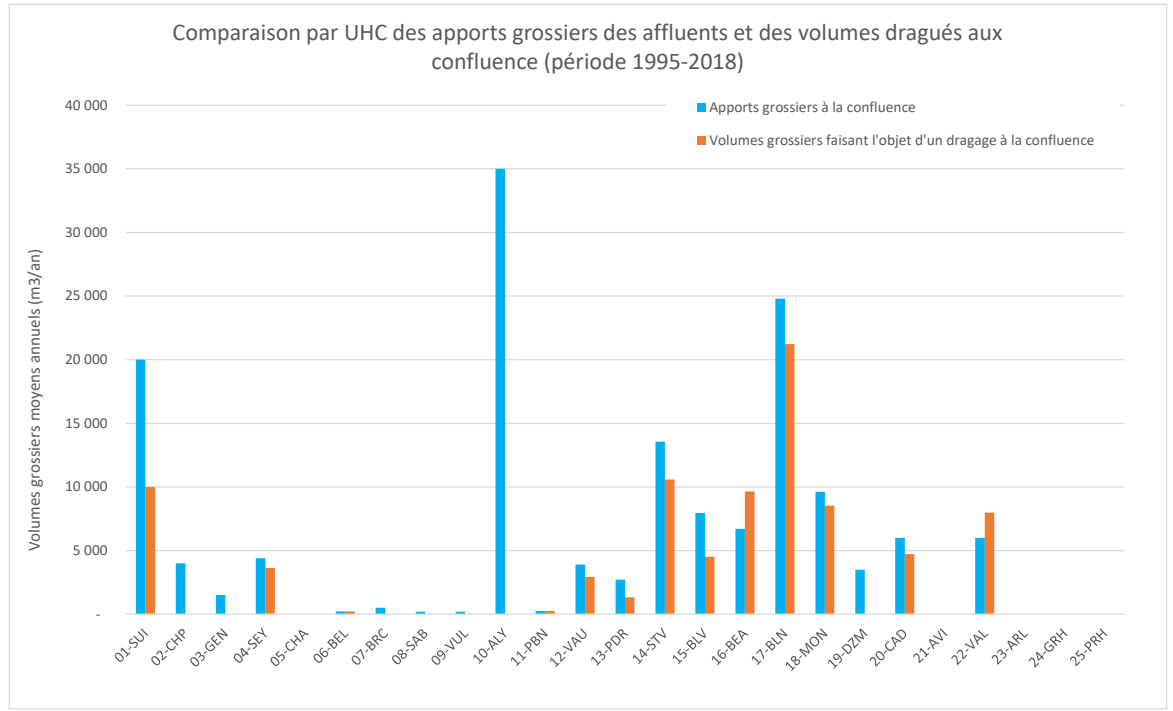
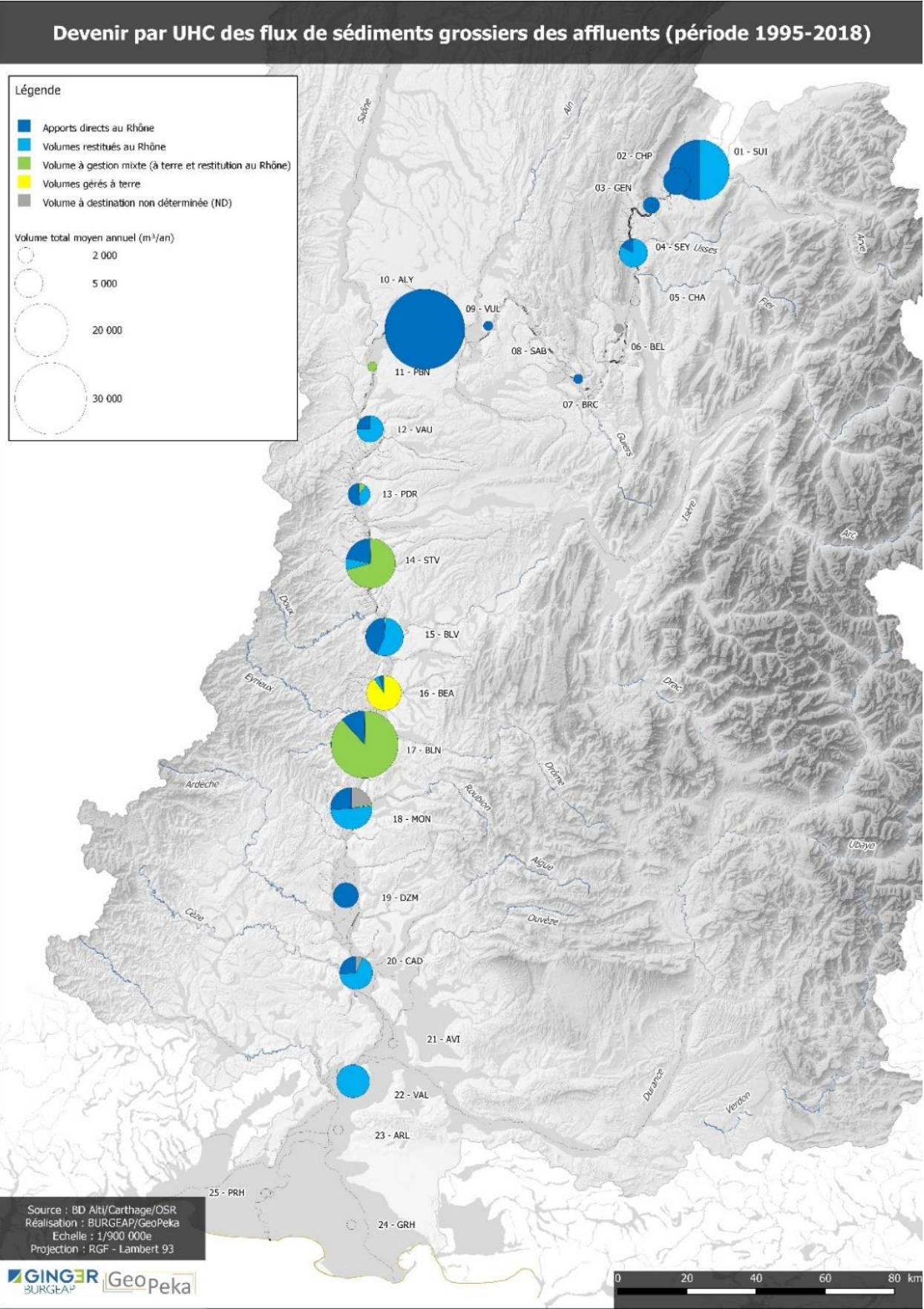


Figure 100 : Bilan des apports grossiers des affluents et des volumes dragués (période 1995-2018)



Carte 8 : Devenir des flux de sédiments grossiers des affluents par UHC (période 1995-2018)

Tableau 24 : Synthèse des apports sédimentaires grossiers des affluents majeurs

			Apports grossiers (m³/an)					
N°	UHC	Affluents majeurs	Avant aménagements (A) (m³/an)	AT : Actuels en entrée d'UHC (m³/an)	AD : Actuels directs au Rhône (m³/an)	RH : Supplémentaires après dragage (m³/an)	AD+RH : Actuels directs et après dragages (B) (m³/an)	% Actuel / avant aménagements (B÷A)
01	SUI	ARVE	100 000	20 000	10 000	10 000	20 000	20%
04	SEY	USSES	20 000	4 000	446	3 554	4 000	20%
05	CHA	FIER	60 000	-	-	-	-	0%
07	BRC	GUIERS	10 000	500	500	-	500	5%
10	ALY	AIN	100 000	35 000	35 000	-	35 000	35%
11	PBN	SAONE	-	-	-	-	-	-
15	BLV	DOUX	8 000	6 000	3 250	2 750	6 000	75%
15	BLV	ISERE	50 000	-	-	-	-	0%
16	BEA	EYRIEUX	20 000	5 000	-	5 000	5 000	25%
17	BLN	DROME	40 000	20 000	-	20 000	3 800	10%
17	BLN	OUVEZE ARDECHOISE	15 000	4 000	2 797	1 203	2 797	19%
18	MON	ROUBION	10 000	2 000	-	2 000	2 000	20%
19	DZM	ARDECHE	15 000	3 000	3 000	-	3 000	20%
20	CAD	CEZE	10 000	6 000	1 694	4 306	6 000	60%
20	CAD	AIGUES	2 000	-	-	-	-	0%
21	AVI	OUVEZE DROMOISE	5 000	-	-	-	-	0%
22	VAL	DURANCE	200 000	6 000	-	6 000	6 000	3%
22	VAL	GARDON	5 000	-	-	-	-	0%
		TOTAL	670 000	111 500	56 687	54 813	94 097	14%

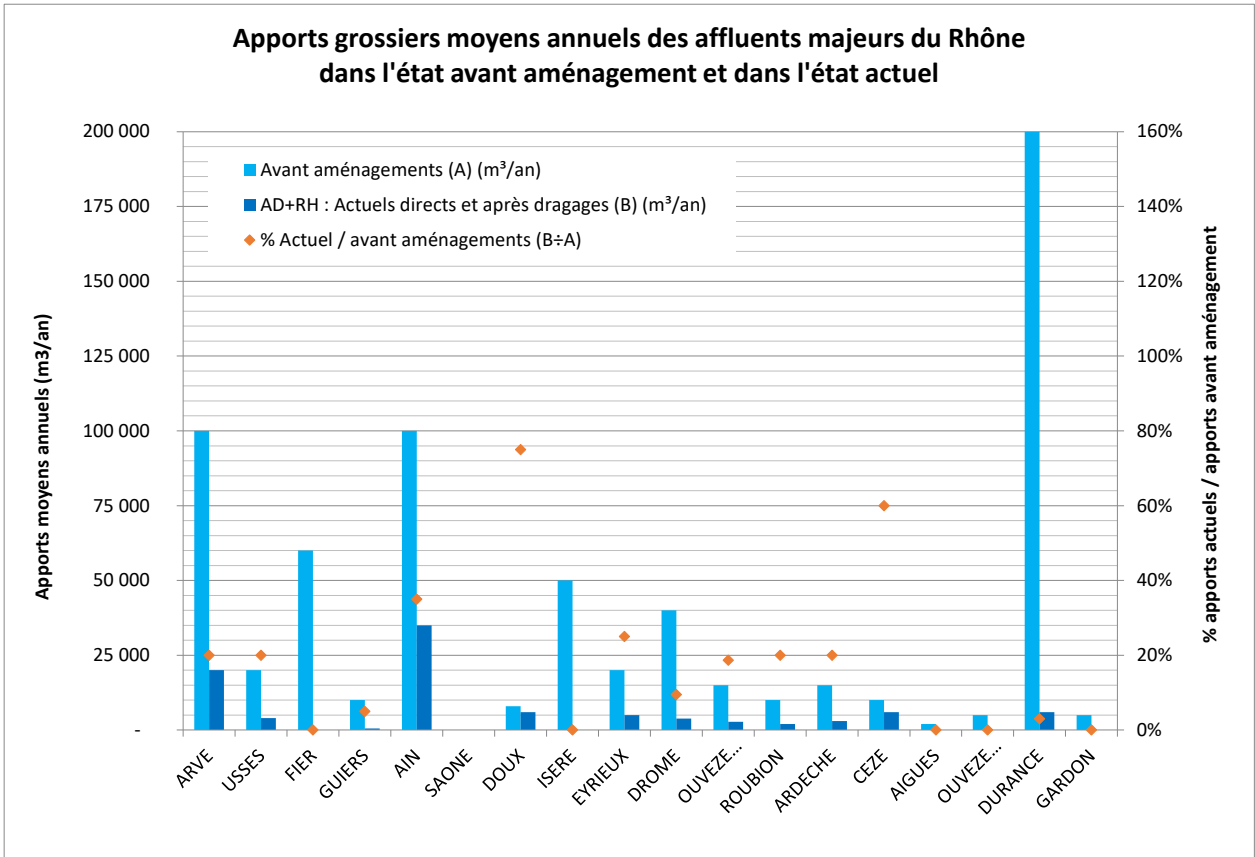
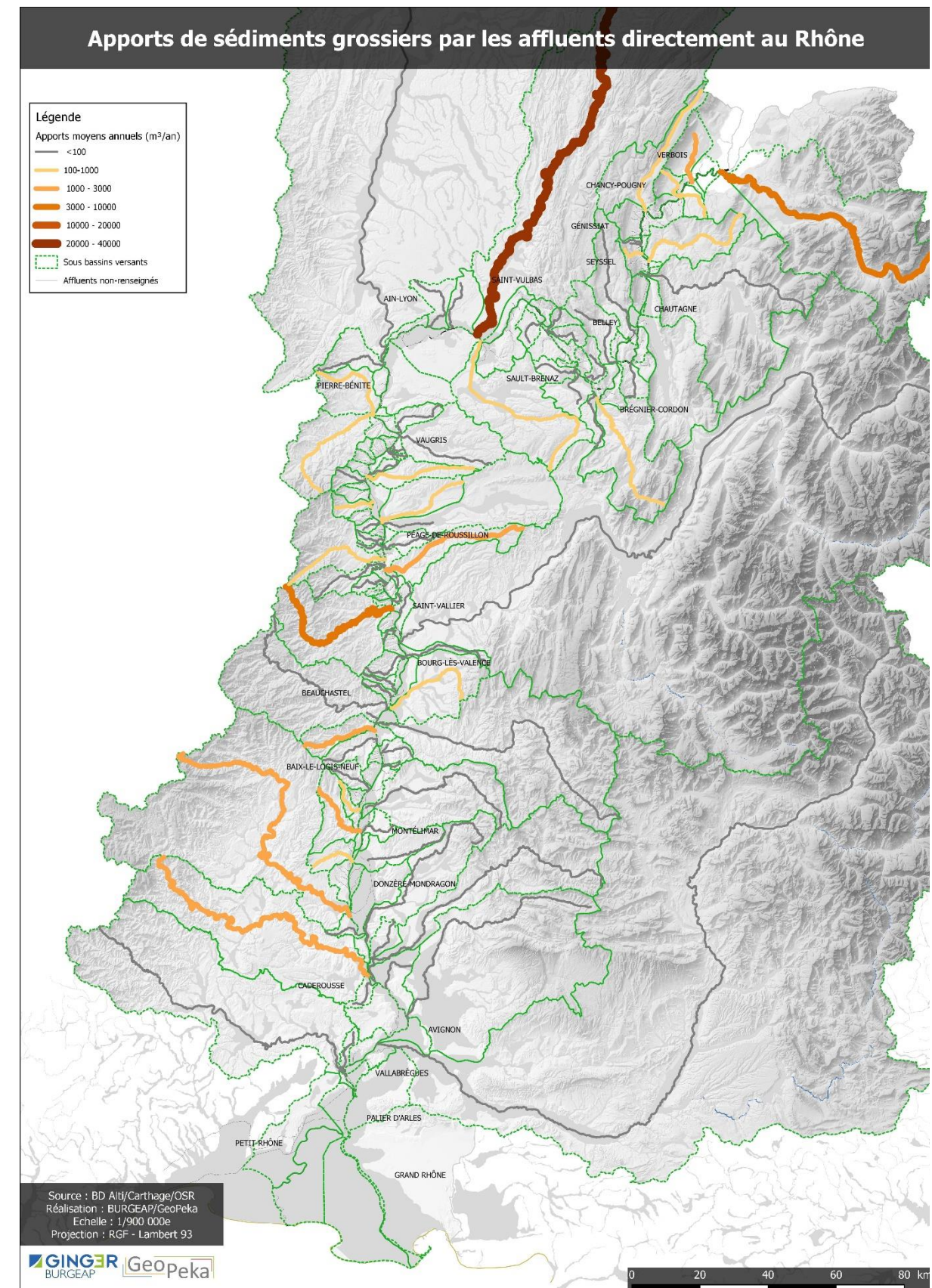
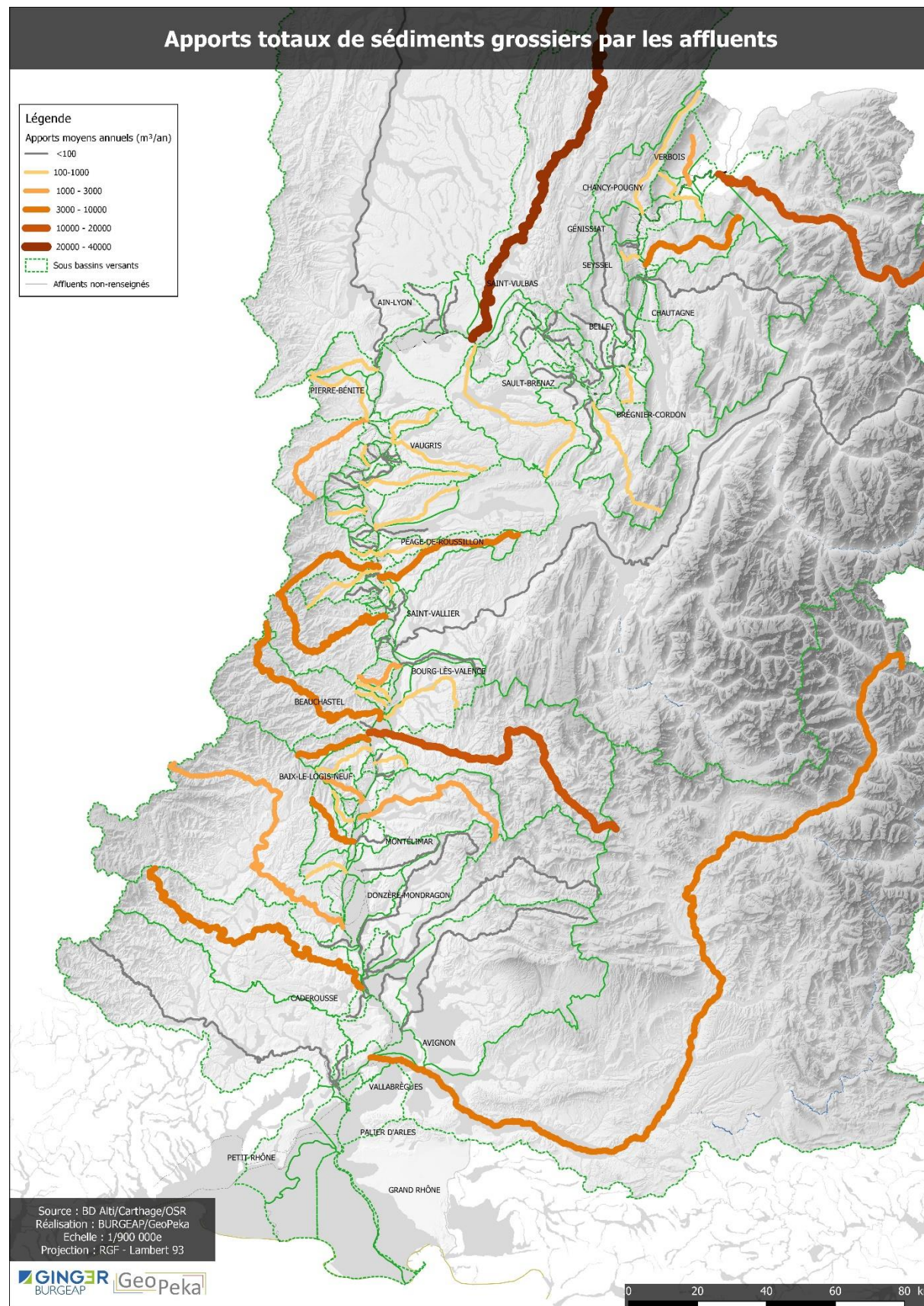


Figure 101 : Contributions passées et actuelles en charriage pour les affluents majeurs



Carte 9 : Apport sédimentaire grossiers des affluents à l'approche de leur confluence, en volume moyen annuel

Carte 10 : Apport sédimentaire grossiers des affluents directement au Rhône, en volume moyen annuel

4. Tendances d'évolution et bilans sédimentaires

4.1 Tendances d'évolution du tracé en plan

4.1.1 Introduction

Avant d'aborder les bilans sédimentaires en partie §.4.2 puis la dynamique hydrosédimentaire en partie §.5, il est intéressant de se pencher sur les tendances d'évolutions du tracé en plan récentes.

En effet, la PARTIE B sur la trajectoire hydromorphologique du Rhône a montré à quel point le Rhône avait été aménagé et corseté depuis le 19^{ème} siècle. L'analyse des évolutions en plans du Rhône a ainsi porté sur de grandes périodes : avant aménagements Girardon, avant aménagement CNR et chenaux dans l'état actuel (données 2013 d'après Gaydou et 2016 d'après Tena). Les cartes correspondantes sont reportées sur les Cartes B des fiches UHC.

Mais le Rhône présente-t-il encore des tendances d'évolution récente de son tracé en plan ?

Le Rhône ayant souvent diagnostic comme un système figé globalement par les aménagements successifs, il n'existe pas beaucoup d'éléments permettant de répondre précisément à cette question. Nous proposons par la suite une analyse simplifiée qui doit nous permettre d'établir une typologie des tronçons et d'être en mesure d'interpréter les résultats des bilans sédimentaires : les bilans sédimentaires sont-ils dus à des évolutions en plans et verticales, ou uniquement à des évolutions verticales ?

4.1.2 Tracé en plan des Vieux Rhône

► Analyse qualitative

Les planches de la page suivante illustrent des situations typiques rencontrées sur le Rhône :

- **Sur l'UHC#05-CHA de Chautagne**, le Vieux Rhône présente de fortes évolutions. Comme illustré par la Figure 112, la migration latérale du méandre de Serrières est de l'ordre de 100 m entre 2005 et 2015 (soit 10 m/an en moyenne), alors que l'hydrologie morphogène est relativement limitée dans ce Rhône court-circuité (entre 1 j/an de charriage en théorie et probablement 7 j/an en réalité ; cf. rapport de Mission 4 / §. Restauration de lâchers morphogènes).
L'endiguement large dans cette UHC, environ 700 m, résulte des anciennes digues paysannes (cf. §.2.4.1). En l'absence d'endiguement contraignant ni de chenalisation du lit pour la navigation, la configuration autorise ainsi des migrations latérales importantes.
En rive droite, l'évolution de ce méandre est susceptible de menacer à terme le canal de restitution de l'usine d'Anglefort qui est à une distance de 400 m environ. En rive gauche, la Via Rhôna installée sur une ancienne digue doit être déplacée en 2021 avec confortement de berge. Ce Vieux Rhône étant susceptible de bénéficier d'action de réinjection sédimentaire, on notera que l'apport d'un flux de sédiments grossiers dans un style fluvial méandrique favorise la mobilité du lit et la diversité des milieux, mais peut également être à l'origine d'une aggravation des risques en augmentant la vitesse de migration d'un méandre.
- **Sur les UHC#06-BEL de Belley et UHC#07-BRC de Brégnier-Cordon**. Comme illustré pour ce Vieux Rhône en Figure 105, il pourrait exister des possibilités de mobilité latérale du lit, similaires à celles observées pour le Vieux Rhône de Chautagne ; cependant, ces Vieux Rhône sont appauvris en sédiments grossiers (absence d'apports) et contraints partiellement par d'anciens aménagements visant à faciliter la navigation (cf. Figure 24) ou seuils de stabilisation des fonds. Il n'est donc pas observé de mobilité latérale.
- **Dans l'UHC#10-ALY** entre l'Ain et Lyon, le Vieux Rhône ou canal de Miribel est très aménagé (cf. Figure 106). Il se distingue à la fois des autres UHC du Haut-Rhône partiellement contraintes, et des UHC du Rhône aval concernées par les casiers et épis et aménagements Girardon. A contrario, le canal de Miribel présente un endiguement linéaire, couplée avec une activité sédimentaire importante liée aux apports de l'Ain. Les endiguements empêchent toute évolution latérale.

- Dans les UHC#11-PBN à 22-VAL, les Vieux Rhône ont systématiquement été chenalisés avec des aménagement Girardon couplant digues submersibles, épis et tenons, afin de favoriser la navigation à la fin du 19^{ème} siècle, et après généralement une première phase d'endiguement du lit majeur (digue paysannes). Ces RCC sont donc très contraints latéralement, ce qui empêche toute mobilité latérale potentielle dans l'état actuel, en dehors des secteurs qui font progressivement l'objet de réactivation des marges (cf. rapport de Mission 4 / PARTIE C / §.2.3).

Pour tous ces linéaires, les phénomènes de mobilité latérale sont très peu nombreux ; ils sont observables de façon limitée lorsqu'il subsiste un minimum de transit par charriage (18-MON, 19-DZM ; cf. Figure 108) avec des enjeux potentiels vers des terres agricoles ou éventuellement vers des gravières, ou lorsque des actions de réactivation des marges alluviales ont été engagées (13-PDR).

A contrario, certaines situations qui pourraient laisser penser à un risque d'érosion latérale du fait de la présence d'un méandre très prononcé sont au contraire très figées : cas du méandre d'Etoile sur le Vieux Rhône de Beauchastel (cf. Figure 107), qui est fixé contre les barrages latéraux du canal d'amenée de Beauchastel.

► Typologie de tronçons

L'analyse précédente permet d'établir une typologie des tronçons court-circuités.

A cette typologie, peuvent être associées des valeurs de puissances spécifiques telles que calculées dans le schéma directeur de réactivation de la dynamique fluviale des marges du Rhône (Gaydou, 2013) (cf. 4.1.3).

Tableau 25 : Typologie de systèmes des Rhône court-circuités en fonction des contraintes d'endiguement

Système	Secteur	Définition	UHC concernées*	Puissances spécifiques observées (W/m²)
Système 1	Haut-Rhône	Les systèmes non contraints	05-CHA	27 [14 ; 34]
Système 2		Les systèmes partiellement contraints	06-BEL, 07-BRC	27 [21 ; 34]
Système 3		Les systèmes contraints par chenalisation étroite et longitudinale	10-ALY	38 [28 ; 76]
Système 4	Rhône aval	Les systèmes contraints par aménagements Girardon	11-PBN, 12-VAU, 13-PDR, 14-STV, 15-BLV, 16-BEA, 17-BLN, 18-MON, 19-DZM, 20-CAD, 21-AVI, 22-VAL	55 [14 ; 87]

* UHC exclues de cette analyse sont : 01-SUI, 02-CHP, 03-GEN, 04-SEY, 08-SAB, 09-VUL, 23-ARL, 24-GRH, 25-PRH.

4.1.3 Puissances spécifiques

La puissance spécifique est un bon indicateur simple de la capacité d'un cours d'eau à présenter une activité sédimentaire et réajuster sa morphologie aux contraintes hydrologiques et morphodynamiques qui lui sont imposées.

Les puissances spécifiques ont été étudiées dans les Vieux Rhône dans le cadre du schéma directeur de réactivation de la dynamique fluviale des marges (Gaydou, 2013). Pour cet indicateur de puissance spécifique, l'ensemble des Vieux Rhône a été étudié en dehors des Vieux Rhône de Sault-Brénaz (08-SAB) et St-Vallier (14-STV) (cf. Figure 102). Les calculs n'ont pas été menés pour les linéaires en Rhône total (09-VUL, 23-ARL, 24-GRH, 25-PRH).

La puissance spécifique d'exprime sous la forme :

$$\omega = \rho \cdot g \cdot Q_{pb} \cdot i \cdot w^{-1}$$

Avec :

- ω : puissance spécifique (W/m²)
- ρ : masse volumique de l'eau (1000 kg/m³)
- g : accélération de la pesanteur (9,81 m.s⁻²)
- Q_{pb} : débit de pleins bords (m³/s)
- i : pente d'énergie de la ligne d'eau (m/m)
- w : largeur plein bord (m)

Pour l'application des calculs dans la situation contemporaine, Gaydou a utilisé le débit biennal (Q2) dans les RCC en l'assimilant au débit de plein bord ; il est obtenu en prenant Q2 pour le Rhône total et en déduisant la valeur du débit d'équipement de l'usine correspondante. La largeur plein bord a été prise comme la somme des largeurs en eau (lit principal, îlons) et de bancs vifs ; cependant, il n'a pas été vérifié si cette largeur correspondait effectivement à l'emprise des zones inondées pour Q2, ce qui est une réserve importante à prendre sur les résultats. La pente utilisée est celle fournie dans l'EGR (2000) pour les crues moyennes à fortes (Q5 à Q150), donc bien différentes de la crue Q2, ce qui est une autre réserve sur les résultats.

Les résultats sont illustrés sur la Figure 102 et la Figure 103. Les valeurs caractéristiques sont reportées dans le Tableau 25.

Bien que les hypothèses prises pour les calculs soient discutables, les résultats restent intéressants pour comparer les RCC entre eux. Ils peuvent être analysés à la lumière des travaux de Brookes (1988) et Wasson (1998), rappelés par Malavoi et Bravard (2010), qui indiquent qu'il existe un seuil de l'ordre de 25-35 W/m² au-dessus duquel la puissance naturelle de cours d'eau peut déclencher des phénomènes d'érosion et de mobilité latérale. Ce seuil évalué sur la base de rivières britanniques est à prendre avec précaution sur les rivières françaises et a fortiori sur un grand fleuve comme le Rhône. Par ailleurs, le seuil réel associé à un tronçon de cours d'eau est dépendant de la nature des berges, il augmente avec la nature cohésive des berges (teneur en argile) et au contraire s'abaisse par exemple à 5 à 10 W/m² lorsque les berges ne sont pas ou peu cohésives (sables grossiers, graves).

Ainsi, si les valeurs absolues des résultats de calcul doivent être pris avec précaution, ce principe de seuil de déclenchement des phénomènes d'érosion est utile pour mieux appréhender le fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau pour chacun des systèmes identifiés précédemment (reportés sur la Figure 102) :

- **Système 1 : les systèmes non contraints** : cette famille comporte en réalité un seul Vieux Rhône, celui de Chautagne. Pour ce système, malgré des puissances spécifiques moyennes de 25 W/m², on observe des évolutions latérales importantes, notamment pour les méandres aval du Vieux Rhône, qui résultent de l'évolution du style fluvial d'un lit en tresses vers un lit à chenal unique méandrique par privation de sédiments grossiers (cf. UHC#05-CHA) ;
- **Système 2 : les systèmes partiellement contraints** : cette famille comporte les autres Vieux Rhône du Haut-Rhône (06-BEL, 07-BRC et potentiellement 08-SAB qui n'a pas été étudié). Pour ces UHC, les puissances spécifiques sont de l'ordre de 35 W/m² pour le Vieux Rhône de Belley et 20 W/m² pour le Vieux Rhône de Brégnier-Cordon, comme pour l'UHC#05 de Chautagne. Cependant, la présence d'anciennes protections latérales, couplé avec la quasi absence d'apport sédimentaire, semble suffire pour ne pas déclencher de mobilité latérale ;
- **Système 3 : le système contraint du canal de Miribel** : Les puissances spécifiques sont de l'ordre de 40-50 W/m², avec 25% des valeurs pouvant atteindre et dépasser 75 W/m² notamment dans le linéaire amont du canal. Ces valeurs sont suffisantes pour entretenir une activité sédimentaire qui se traduit par des flux grossiers estimés à 30 000 m³/an environ en aval du barrage de Jons (BURGEAP, 2017). Cependant, les protections de berge et la configuration rectiligne empêchent toute évolution latérale, en dehors que quelques phénomènes localisés d'érosion de berge (aval seuil PK14) ;
- **Système 4 : les systèmes contraints du Rhône aval** : Les puissances spécifiques sont de l'ordre de 55 W/m², avec une forte variabilité : 25% des valeurs peuvent atteindre et dépasser 87 W/m², alors que 25% peuvent être inférieures à 14 W/m². Malgré des puissances spécifiques relativement élevées, les phénomènes d'érosion de berge sont négligeables sur l'ensemble des linéaires de RCC concernés, du fait des aménagements Girardon en place. Avec les travaux de réactivation des

marges, des phénomènes d'érosion semblent se produire (cas de 13-PDR) ; cependant, l'analyse de la puissance spécifique devrait être réactualisée dans ces situations puisque la largeur plein bord ainsi que les lignes d'eau ont évolué suite aux travaux de restauration. Ainsi, du fait du paramètre largeur pleins bords, la puissance spécifique devrait logiquement évoluer à la baisse par rapport à la situation avant travaux.

En conclusion, on retiendra qu'en dehors d'un secteur comme Chautagne, les évolutions latérales du Rhône dans les RCC sont marginales et cela est avant tout lié au système de contraintes latérales plus qu'à la puissance du fleuve. Les bilans sédimentaires devront avant tout être interprétés en termes d'évolution verticale au sein d'une même section, avec des tendances potentiellement inverses au sein de cette section (incision du thalweg, exhaussement des marges).

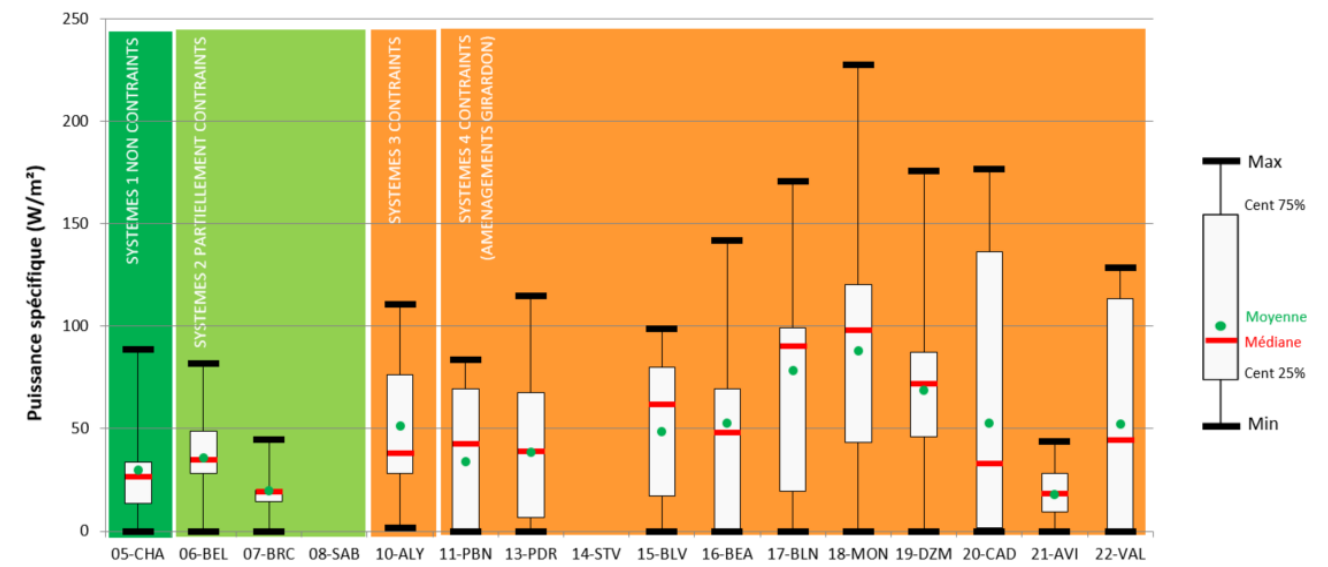


Figure 102 : Puissances spécifiques caractéristiques dans les Vieux Rhône synthétisées par UHC (d'après données Gaydou, 2013)

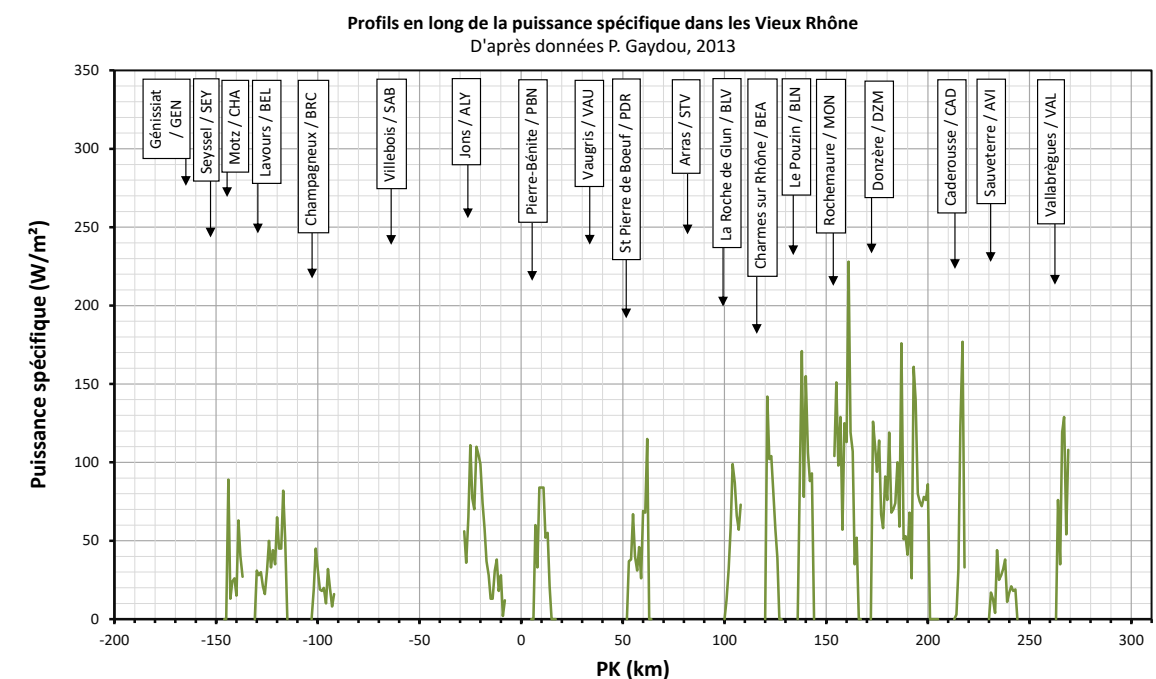


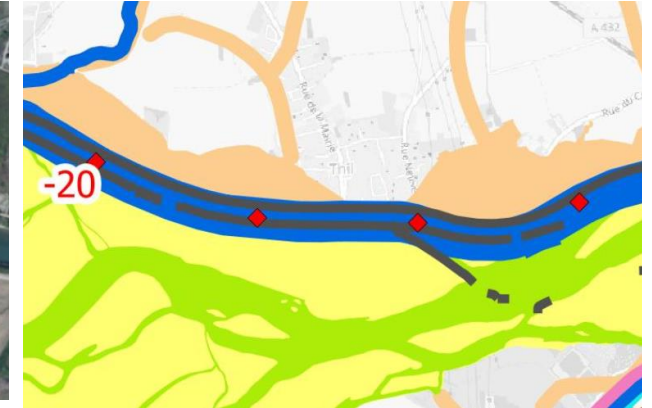
Figure 103 : Puissances spécifiques caractéristiques dans les Vieux Rhône (d'après données Gaydou, 2013)



Extrait de la carte UHC#05-B



Etat actuel (Géoportail)



Extrait de la carte B Historique (cf. fiches UHC)

Figure 106 : Système 3 : Canal de Miribel figé par les aménagements anciens mais aux berges soumises à sollicitations (10-ALY)

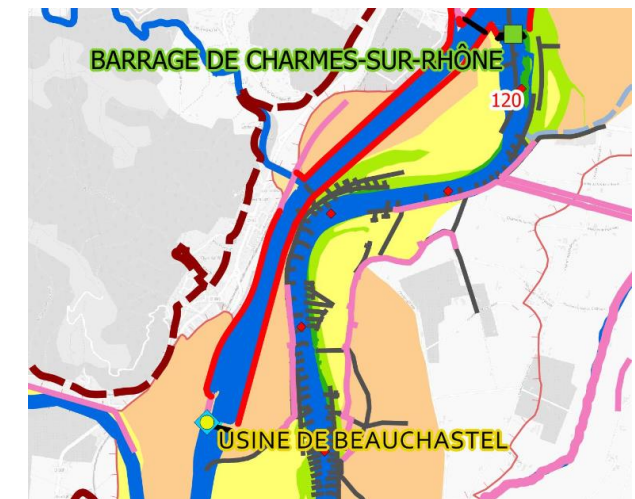


Figure 107 : Système 4 : Méandre d'Etoile totalement fixé dans le RCC de Beauchastel (16-BEA)

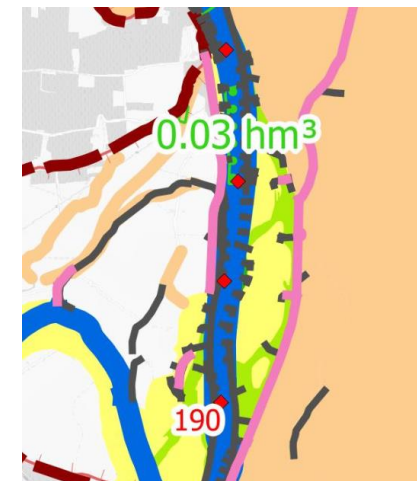
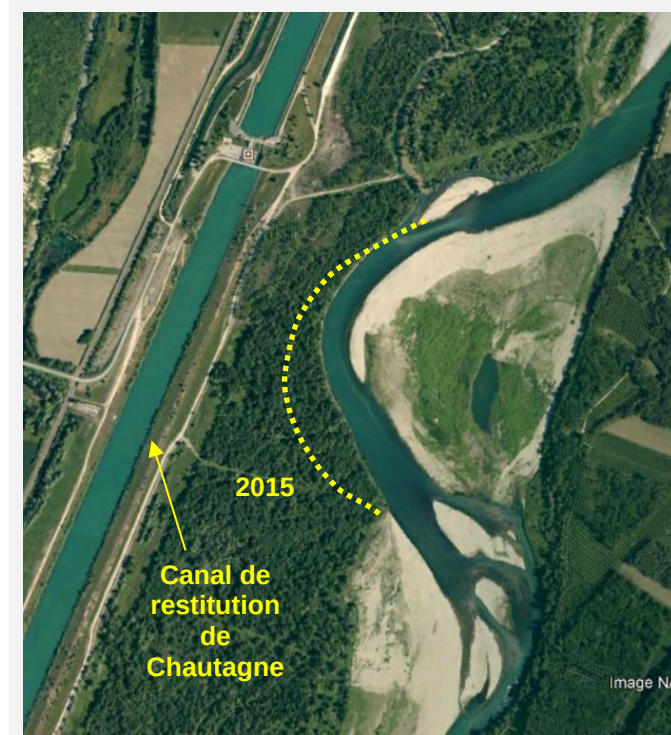


Figure 108 : Système 4 : Banc d'alluvions dans le Vieux Rhône de Donzère, contenu au sein du système d'endiguement des aménagements Girardon (19-DZM)

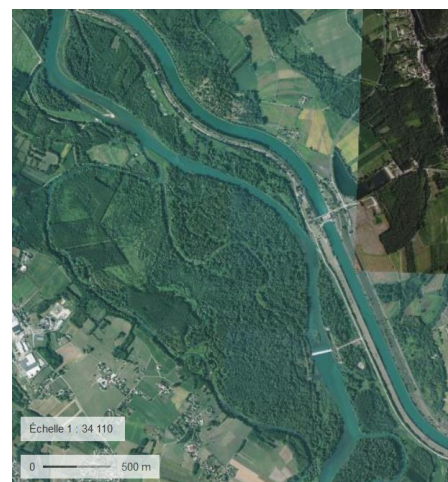


Méandre de Serrières en 2015 (Google Earth)

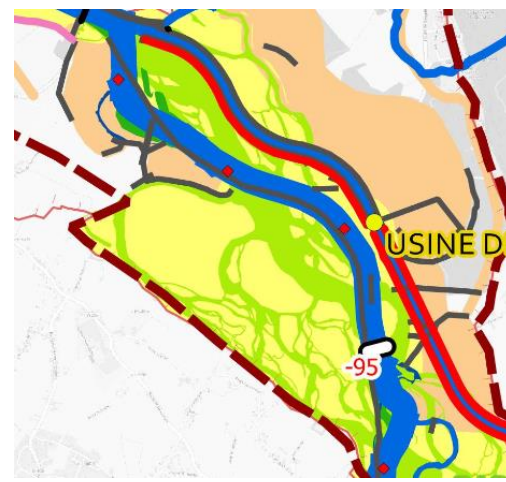


Méandre de Serrières en 2015 (Géoportail)

Figure 104 : Système 1 : Evolution du méandre de Serrières entre 2005 et 2015 (05-CHA)



Etat actuel (Géoportail)



Extrait de la carte UHC#07-B

Figure 105 : Système 2 : Vieux Rhône de Brégnier-Cordon figé par la faiblesse du transport solide et les aménagements anciens (07-BRC)

4.2 Bilans sédimentaires des tronçons homogènes

4.2.1 Méthodologie

Les bilans sédimentaires du Rhône ont été établis pour chacun des tronçons du Rhône dans le volet C3 des fiches UHC. L'objectif de cette partie est d'établir l'équilibre morphologique des tronçons : sont-ils en équilibre, en déficit, en excédent ? et en considérant quelle période ?

Compte tenu des données fournies par l'EGR en 2000 et du changement de pratiques opéré au virage des années 1995-2000 (extractions jusqu'en 1995, opérations d'entretien à partir des années 1995), il a été décidé de retenir comme deux grandes périodes d'analyse : avant 2000 et après 2000. Les données n'étant pas toujours disponibles en 2000 exactement, la date pivot de 2000 est flottante en réalité. De même, les données actuelles s'étalent de 2012 à 2017.

Ultérieurement, la CNR a fourni des bilans bathymétriques des retenues et des RCC établis par Dynamique Hydro (2018-2019) entre la mise en eau des barrages et l'état actuel. Cette donnée vient fournir un bilan sédimentaire global depuis les mises en eau qui peut servir de base par rapport aux obligations de sûreté (barrages latéraux de retenues) et de sécurité (inondations des Vieux Rhône) que la CNR doit respecter dans le cadre des cahiers des charges spéciaux de chaque ouvrage.

Ainsi, les parties C3 de chaque fiche UHC ont permis d'établir des bilans sédimentaires à l'échelle des tronçons homogènes (TH) sur les 3 périodes précédentes (< 2000, > 2000, depuis mise en eau barrages), voire à l'échelle de sous-tronçons intermédiaires (sous-TH) lorsque le fonctionnement sédimentaire le justifiait et que les données existaient. A noter que, dans la présentation du diagnostic, conformément au choix de sectorisation (cf. PARTIE A / §.4.2), l'UHC inclut également la retenue de l'UHC immédiatement en aval, de façon à présenter une cohérence d'analyse de barrage de retenue à barrage de retenue.

► Evolution des pentes

La pente de la ligne d'eau (associée à la pente d'énergie) est un facteur de contrôle important sur la mobilité des sédiments et le transport solide par charriage (éléments grossiers et sableux).

- **La pente initiale** est la pente de la ligne d'eau observée avant les aménagements hydroélectriques. Dans ces conditions, la pente moyenne du fond du lit (passant par les têtes de radiers) était globalement équivalente à la pente moyenne en hautes eaux (supérieures au module) ou en crue. Cette donnée est fournie par l'EGR sur la base de profils en long anciens ; elle est moyennée à l'échelle de grands tronçons ;
- **La pente actuelle** représentative du transport solide ne correspond généralement plus à la pente du fond du lit, d'une part parce que des actions d'extraction ou de dragage ont créé des discontinuités et d'autre part parce que les lignes d'eau sont influencées par les ouvrages aval (retenues, seuils). Ainsi, la pente représentative d'un tronçon homogène n'est pas unique et doit être associée à un débit. Par souci d'homogénéité et de représentativité, nous avons retenu la pente de la ligne d'eau pour la crue biennale (Q2) calculée avec le modèle MAGE (INRAE), qui est une pente parfois non uniforme dans un tronçon homogène (TH), et qui peut donc être affichée sous forme d'intervalle. Les pentes sur les graphiques de la section C des fiches UHC sont calculées sur une distance de l'ordre du kilomètre.
- **Les hauteurs de chute** des ouvrages (barrage de dérivation, usine, seuils), pour différents débits, sont rappelées lorsque l'information est importante vis-à-vis du fonctionnement hydrosédimentaire. Ces données sont synthétisées dans le Tableau 17 de la partie §.1.4.3.

► Bilans sédimentaires

Un bilan sédimentaire permet d'établir la dynamique sédimentaire globale d'un tronçon sur une période donnée en comparant les volumes déposés et les volumes érodés, et en déduisant la balance du tronçon : équilibre (déblais ≈ remblais : ➡), déficit (déblais > remblais : ➡), excédent (déblais < remblais : ➡).

Un bilan sédimentaire est généralement réalisé en analysant l'évolution des sections de profils en travers au cours du temps, et en intégrant cette donnée sur l'interdistance entre les profils. Un bilan sédimentaire peut aussi être réalisé en comparant des modèles numériques de terrain (MNT en 3D) du fond du lit.

L'analyse des bilans sédimentaires est essentielle pour comprendre le fonctionnement historique et actuel ; un lien est fait entre les pressions sur le milieu alluvial (extractions, aménagements hydroélectriques, etc.) et les réponses du milieu alluvial, notamment suite aux crues du Rhône, aux chasses d'ouvrages ou suite à des crues d'affluents. Cette démarche est également essentielle pour mettre en évidence les enjeux actuels et futurs : pour la navigation, pour l'exploitation hydroélectrique, pour la sûreté hydraulique, pour l'écologie, etc. et qui vont déclencher des actions de gestion ou de restauration.

Les données principales utilisées pour chaque période sont les suivantes :

- **1/ Bilan sédimentaire avant 2000**, l'EGR avait établi des bilans sédimentaires qui ont pu être repris selon des tronçons relativement compatibles avec les TH retenus (retenues, RCC) et pour la plupart des UHC (hors 01-SUI et 02-CHP).
- **2/ Bilan sédimentaire depuis 2000**, les données sont hétérogènes car les études n'ont pas été menées avec le même degré de précision et/ou dans le temps imparti à l'étude. Les principales études utilisées sont les suivantes :
 - **Comité technique franco-suisse** sur la gestion sédimentaire du Rhône genevois et du Haut-Rhône français / EKIUM (2014) – Gestion sédimentaire du Haut-Rhône français. Rapport final. UHC concernées : Génissiat (03-GEN) à Sault-Brénaz (09-SAB) ;
 - **CNR / document interne (2015)** – Étude de l'évolution des fonds du Rhône de Lyon à la mer. UHC concernées : Pierre-Bénite (11-PBN) au Palier d'Arles (23-ARL) ;
 - **CNR / Dynamique Hydro (2018-2019) et EKIUM (2017)** – Évolution géomorphologique des biefs et application aux enjeux CNR. UHC concernées : Pierre-Bénite (11-PBN) au Palier d'Arles (23-ARL), soit 13 UHC. Pour la rédaction des présents rapports, 6 UHC étaient disponibles : Péage de Roussillon (13-PDR), Bourg-lès-Valence (15-BLV), Baix-Logis-Neuf (17-BLN), Montélimar (18-MON), Donzère-Mondragon (19-DZM), Vallabrègues (21-VAL), soit 6 UHC ;
 - **Documents spécifiques** – par exemple thèse de Guertault (2015) pour la retenue de Génissiat (03-GEN) ; Etude hydrosédimentaire du Rhône entre l'Ain et Pierre-Bénite pour la Métropole de Lyon (BURGEAP, 2017) ; thèse de G. Maillat (2005) pour l'embouchure du Rhône dans le delta, etc.
- **3/ Bilan sédimentaire depuis la mise en eau de l'ouvrage hydroélectrique**. Il s'agit de données CNR (Dynamique Hydro, 2018-2019) synthétisées sous forme de bilan sédimentaire cumulé par tronçon, pour les retenues et RCC, mais pas pour les canaux usiniers. Un graphique permet de situer l'état des tronçons (déficit, excédent) par rapport à la configuration héritée à la mise en eau des barrages par la CNR. Les graphiques de la Figure 116 et de la Figure 117 illustrent la superposition des situations pour chacune des retenues et chacun des RCC de chaque ouvrage.

Etant donné qu'il s'agit d'un travail mené par la CNR, les résultats ne sont pas disponibles pour les ouvrages exploités par d'autres gestionnaires : Verbois (01-SUI), Chancy-Pougny (02-CHP), St-Jons-Cusset (10-ALY), ni pour les secteurs de Rhône total : Vulbas (09-VUL), Palier d'Arles (23-ARL) et Petit Rhône (25-PRH), sauf pour le Grand Rhône (24-GRH). Toutefois, ces secteurs ont été analysés sur les périodes avant 2000 et depuis 2000, ce qui permet d'avoir des tendances générales.

Les données de détails des études Dynamique Hydro (2018-2019) ont été privilégiées lorsqu'elles étaient disponibles pour l'établissement des bilans sédimentaires par tronçon homogène, à la fois pour la période post-2000 et la période ante-2000 (cf. Figure 112). Il s'agit en effet d'un travail complet, basé sur une comparaison des sections de profils en travers tous les 100 m et par périodes définies par les différentes campagnes bathymétriques ; il est alors possible de traduire les bilans sédimentaires pour les périodes avant 2000, après 2000 et depuis la mise en eau du barrage.

Les données de l'EGR peuvent également être critiquées à la lumière de ce travail plus précis, ainsi que les données historiques sur les extractions (ACTHYS, 2017). Ainsi, les bilans des extractions présentés en PARTIE B / §.2.4.4 ont pu être consolidés à partir de ces bilans sédimentaires.

En l'absence de données Dynamique Hydro, les bilans sédimentaires menés par la CNR (2015) sur le Rhône en aval de Lyon sont utilisés, ainsi que ceux de EKIUM (2014) sur le Haut-Rhône. Les valeurs des bilans sédimentaires selon les tronçons homogènes retenus et selon les périodes retenues (avant et après 2000) sont obtenues par lecture des graphiques fournis dans les études précédentes.

Les résultats sont affichés avec une précision 1 000 m³/an près, voire 500 m³/an.

► Rendus dans les fiches UHC

Pour chaque fiche UHC, un tableau des bilans sédimentaires est établi :

- Les bilans sédimentaires sont donnés en m³/an de façon à disposer d'une donnée homogène permettant des comparaisons entre tronçons homogènes (TH) et UHC. Les bilans négatifs présentent une situation déficitaire (érosion, incision), les bilans positifs sont excédentaires (sédimentation, dépôt) ; comme vu en partie §.4.1, les évolutions sont essentiellement verticales du fait de l'impossibilité pour le Rhône, en dehors du secteur de Chautagne, de développer une mobilité latérale ;
- Ces bilans sédimentaires sont issus de données bathymétriques et intègrent tous les volumes de sédiments « apparents », qu'ils soient grossiers, sableux ou fins ; ils intègrent également les effets des dragages ;
- Des flèches indiquent les tendances globales du tronçon entre des phases d'équilibre (→), de déficit (ou d'érosion) (↘) et d'excédent (ou d'exhaussement) (↗). Ces tendances représentent une synthèse du fonctionnement et sont pondérées selon le contexte et les évolutions les plus récentes.
- Des commentaires sont apportés sur les causes éventuelles d'une évolution de tendance depuis 2000. Par exemple, effets des crues 2002-2003, dragage avec volume important, etc.

Dans la rédaction, une attention particulière est apportée :

- Sur la compréhension des fonctionnements en jeu ;
- Sur les interactions entre la configuration des aménagements et la réponse hydromorphologique ;
- Sur le rôle des crues, notamment sur le Haut-Rhône la crue de 1990, sur le Rhône aval les crues de 1993 à 1995, et de 2001 à 2003. Ainsi, une retenue peut accumuler des sédiments en période calme sur le plan hydrologique, et être déficitaire suite à des crues importantes (type décennale ou supérieure) ;

Dans les rapports de la présente étude, l'unité fréquemment employée pour les volumes en complément du m³ (mètre cube) est le hm³ (hectomètre cube). Ainsi, 1 hm³ est équivalent à 1 million de m³ qui peut s'écrire 10⁶ m³ ou 1 hm³ (1 hectomètre cube). En toute rigueur, l'écriture Mm³ (méga mètre cube) n'est pas correcte car 1 Mm³ équivaut à (10⁶)³ m³=10¹⁸ m³.

Pour se représenter 1 hm³, cela équivaut à :

- un cube de 100 m x 100 m x 100 m, soit 100 m de hauteur sur 1 ha
- 10 m sur une surface de 10 ha
- 1 m sur une surface de 100 ha ou 1 m sur 1 km²
- sur 200 m de large, cela représente 5 m d'épaisseur sur 1 km de Rhône

► Présentation des résultats

Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 26 par bilan avant 2000, depuis 2000. Aucun graphique n'est associé à ces données, toutefois, la Carte 11 et Carte 12 illustrent les tronçons en équilibre, en excédents et en déficit pour chacune des périodes et à l'échelle des tronçons homogènes (TH).

Les résultats comprennent également une synthèse des bilans sédimentaires depuis chacune des mises en eau de barrage pour la retenue d'une part et pour le Vieux Rhône correspondant d'autre part. Les résultats sont mis sous forme de graphique superposé de tous les bilans sédimentaires (Figure 116, zoom en Figure 117) et sous forme de Carte 13

Enfin, pour certains UHC, des bilans précis des tendances récentes ont été établis par Dynamique Hydro (2018-2019) pour le lit mineur et le chenal navigable. Les résultats cartographiques disponibles ont été reportés sur les Cartes C des fiches UHC.

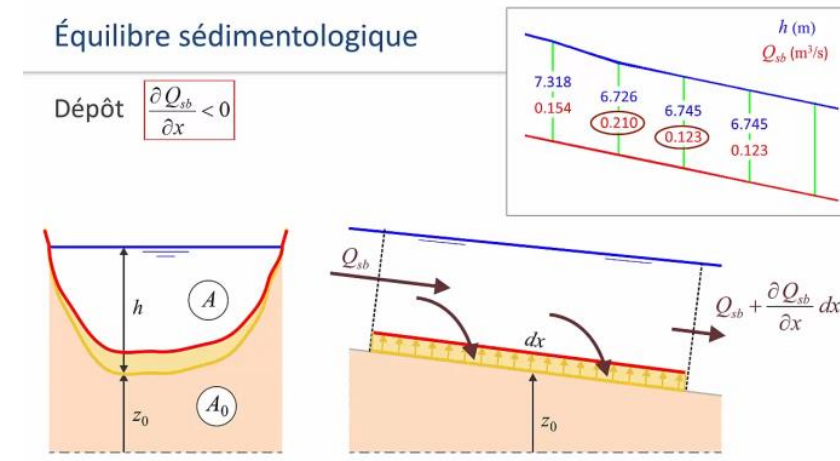


Figure 109 : Principes d'un bilan sédimentaire (MOOC Des rivières et des hommes, UGA)

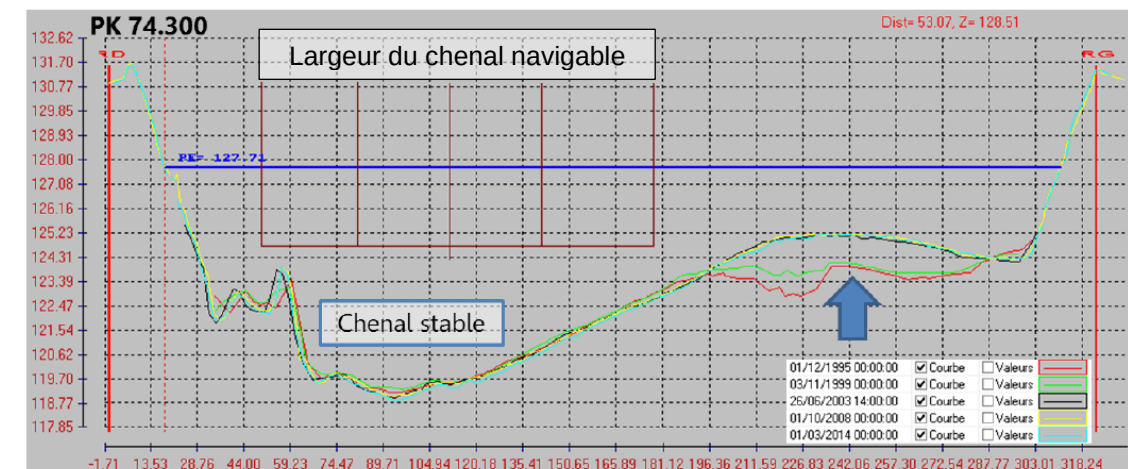


Figure 110 : Exemple de comparaison de profil en travers, avec mise en évidence d'un exhaussement (EKIUM, 2017 ; profil PK74,3 dans la retenue de St-Vallier)

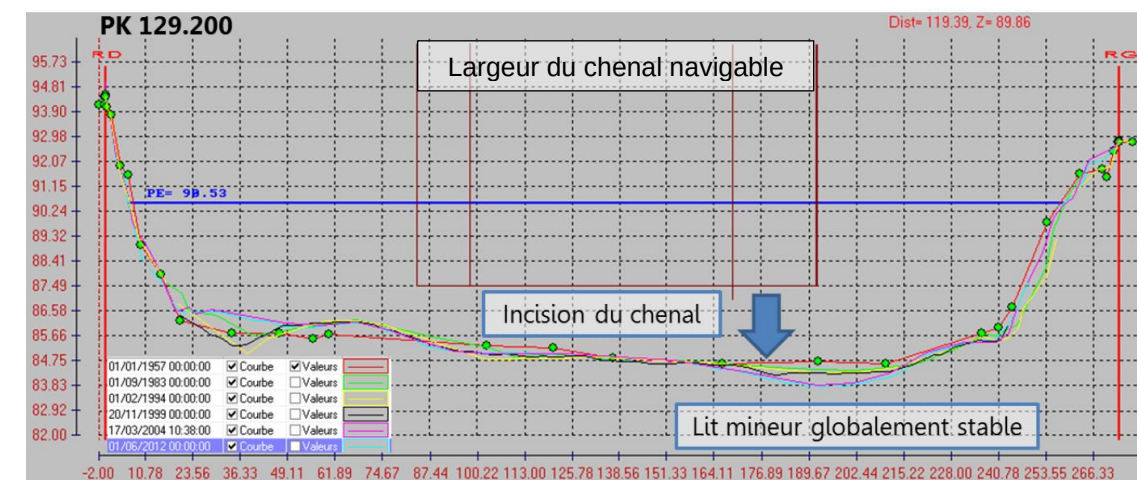


Figure 111 : Exemple de comparaison de profil en travers, avec mise en évidence d'une incision (EKIUM, 2017 ; profil PK129,2 dans la retenue de Logis Neuf)

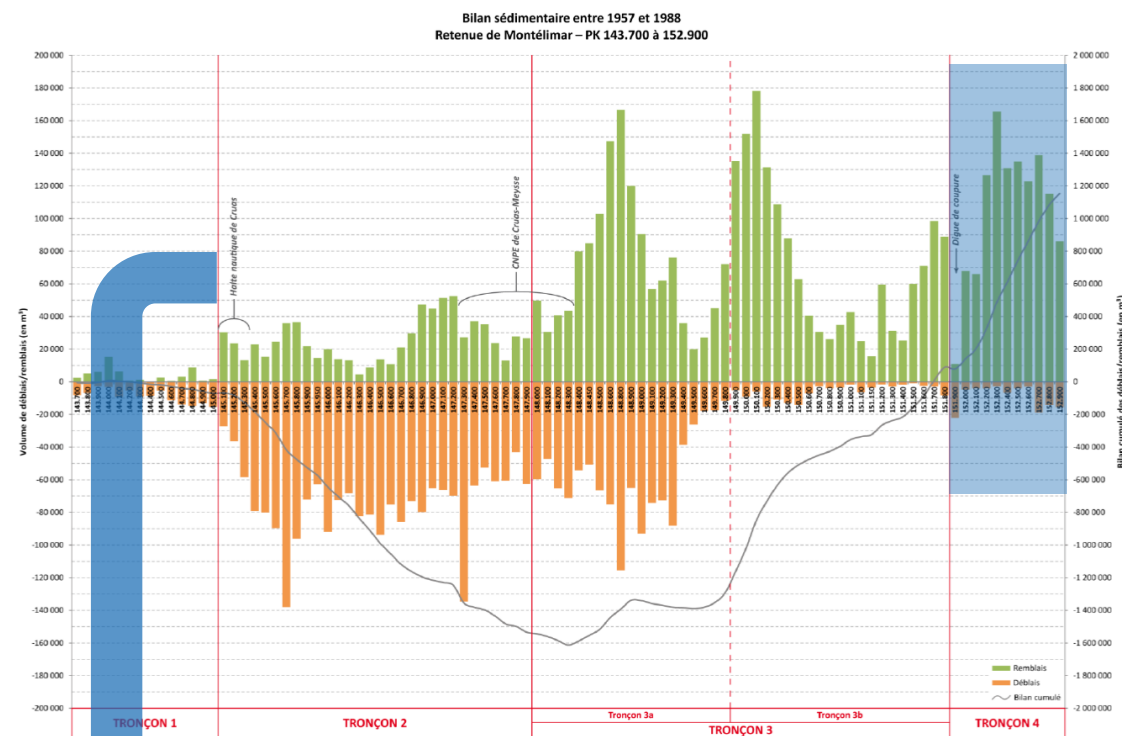


Figure 112 : Exemple de donnée exploitée dans le cadre de l'établissement des bilans sédimentaires (Dynamique Hydro, 2019 ; bilan sédimentaire 1957-1988 de la retenue de Montélimar)

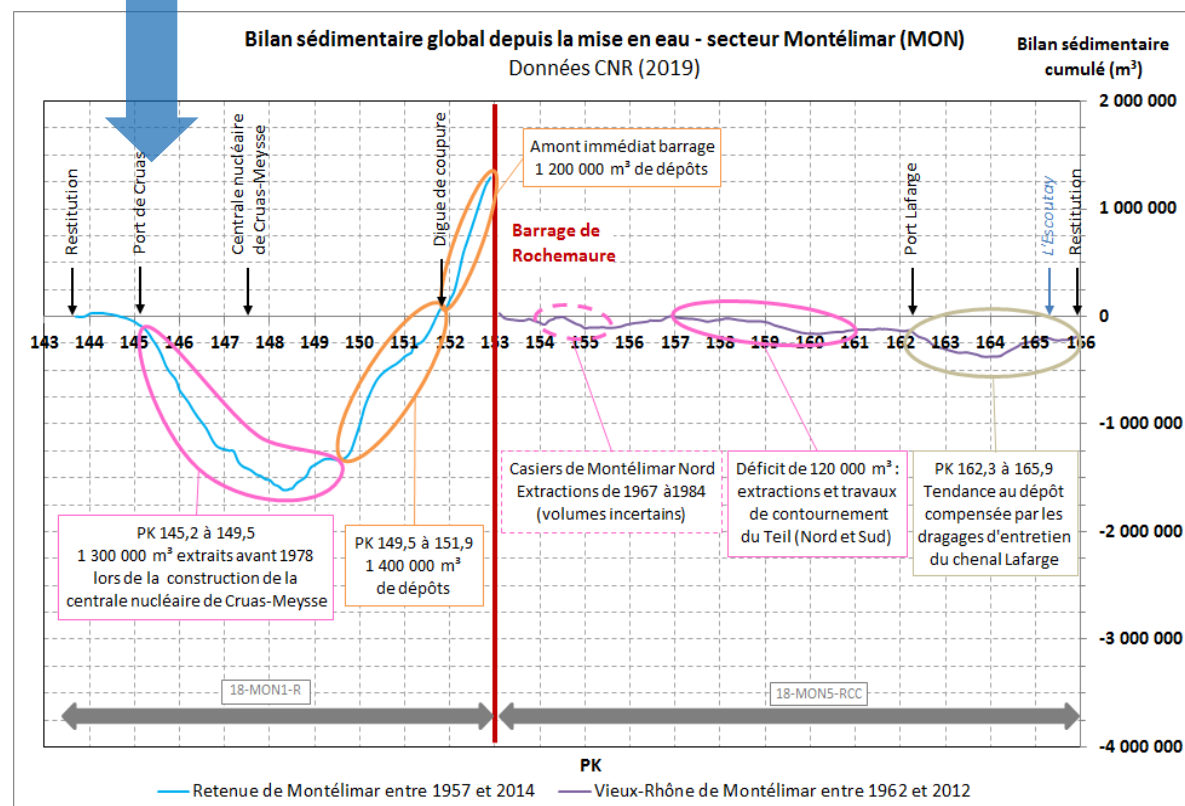


Figure 113 : Exemple de bilan sédimentaire depuis la mise en eau du barrage sur la période 1957-2014 établi à partir des bilans sédimentaires Dynamique Hydro (2019) et présenté dans les fiches UHC (exploitation des bilans sédimentaires comme celui de la Figure 112)

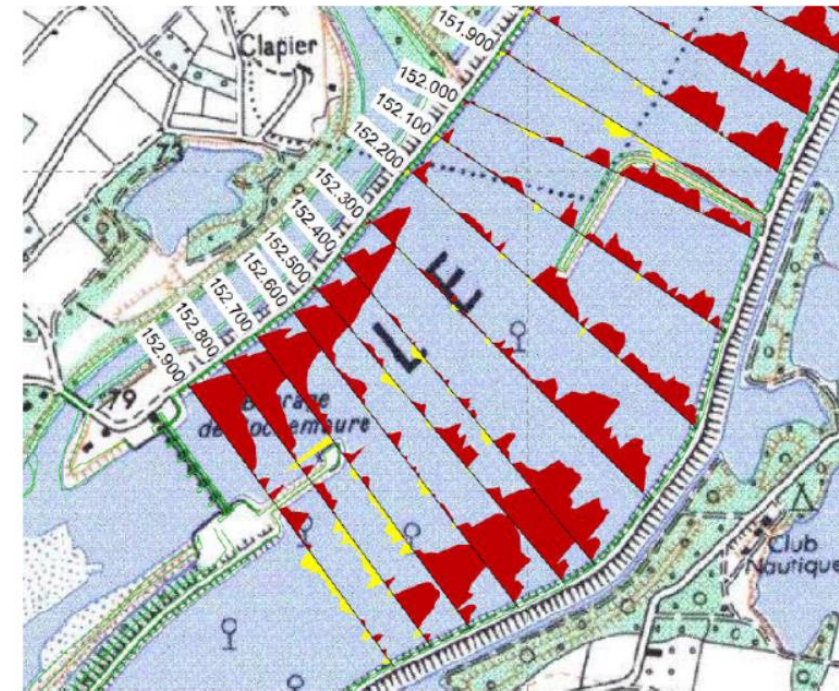


Figure 114 : Exemple de donnée exploitée par Dynamique Hydro pour les bilans sédimentaires (localisation des déblais et remblais entre 1957 et 1988 pour la retenue de Montélimar – PK151,9 à 152,9 – tronçon 4 sur Figure 112)

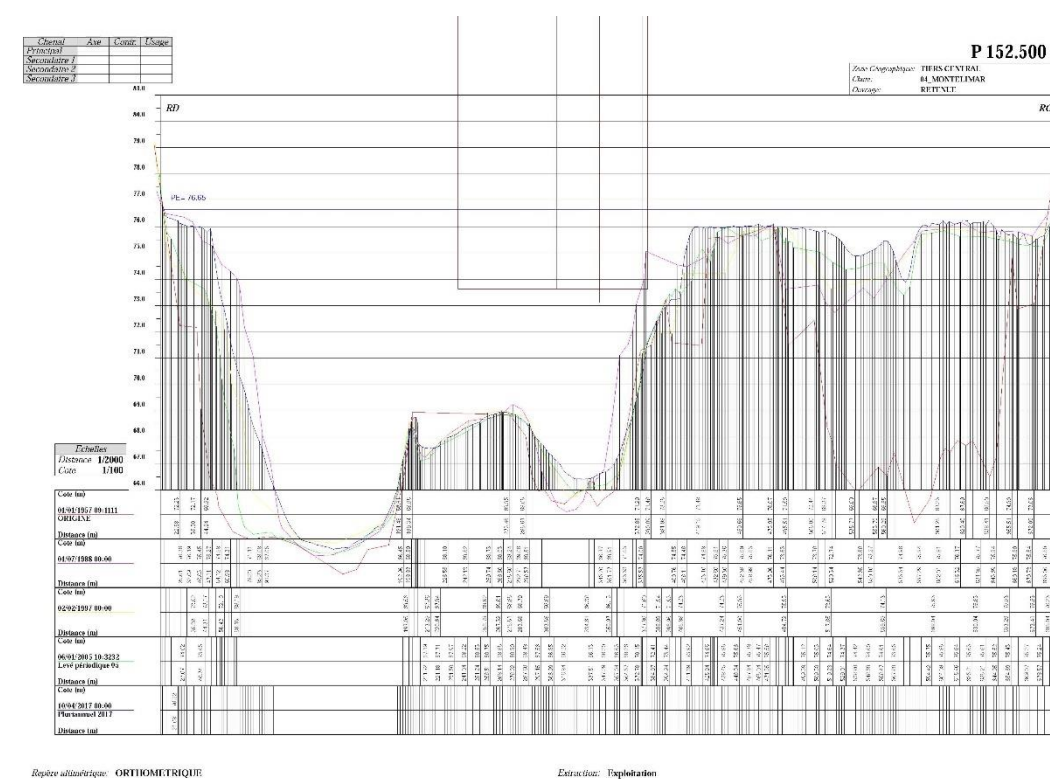


Figure 115 : Exemple de profil en travers exploité par Dynamique Hydro pour les bilans sédimentaires (retenue de Montélimar - PK152,5 – Evolutions entre 1957 et 2017- reporté sur Figure 114)

4.2.2 Synthèse des résultats pour la période avant 2000

Le détail des analyses est présenté dans les fiches UHC, hors texte.

Pour cette période avant 2000, les principales conclusions des bilans sédimentaires sont présentées ci-dessous, avec la Carte 11 en appui.

On note l'influence des extractions de la période avant 1995, autant dans les retenues que dans les RCC, ainsi que l'accumulation des sédiments dans les retenues les moins transparentes (Verbois, Génissiat, Brégnier-Cordon, Beauchastel, Montélimar, Vallabrègues). L'effet des crues telles que 1993-1994-1995 est plus difficile à apprécier sur une longue période incluant des extractions. Toutefois, les retenues de Beauchastel et de Vallabrègues semblent avoir accumulé des sédiments en proportion importante en particulier du fait de ces crues et des apports respectivement de l'Isère et de la Durance, alors que le Grand Rhône a déstocké au-delà de l'effet des extractions.

• Haut-Rhône :

- Dans les retenues : accumulations dans les retenues-réservoirs de Verbois et Génissiat (01-SUI, 03-GEN), dans les retenues de Chautagne (05-CHA), Belley (06-BEL), Brégnier-Cordon (07-BRC) et Sault-Brénaz (08-SAB) ; stabilité de la retenue de Chancy-Pougny (02-CHP) et de Jons (10-ALY) ; déstockage dans la retenue de Seyssel ; effets des extractions en retenue et queue de retenue sur le site de l'Étournal (03-GEN) ;
- Dans les canaux usiniers : accumulations nettes dans le canal de Belley (06-BEL), dans le canal de Brégnier-Cordon (07-BRC) ; accumulation en entrée du canal de Jonage (10-ALY) ; légère accumulation dans le canal de Chautagne (05-CHA) ;
- Dans les RCC : effets des extractions dans les Vieux Rhône de Chautagne (05-CHA), de Belley (06-BEL), le canal de Miribel, le Vieux Rhône de Neyron et dans la fosse de la Feyssine (10-ALY) ; tendance au stockage dans le RCC de Brégnier-Cordon (07-BRC) ;
- Dans le Rhône total : effets des extractions dans l'UHC de St-Vulbas (09-VUL) ;

• Rhône moyen :

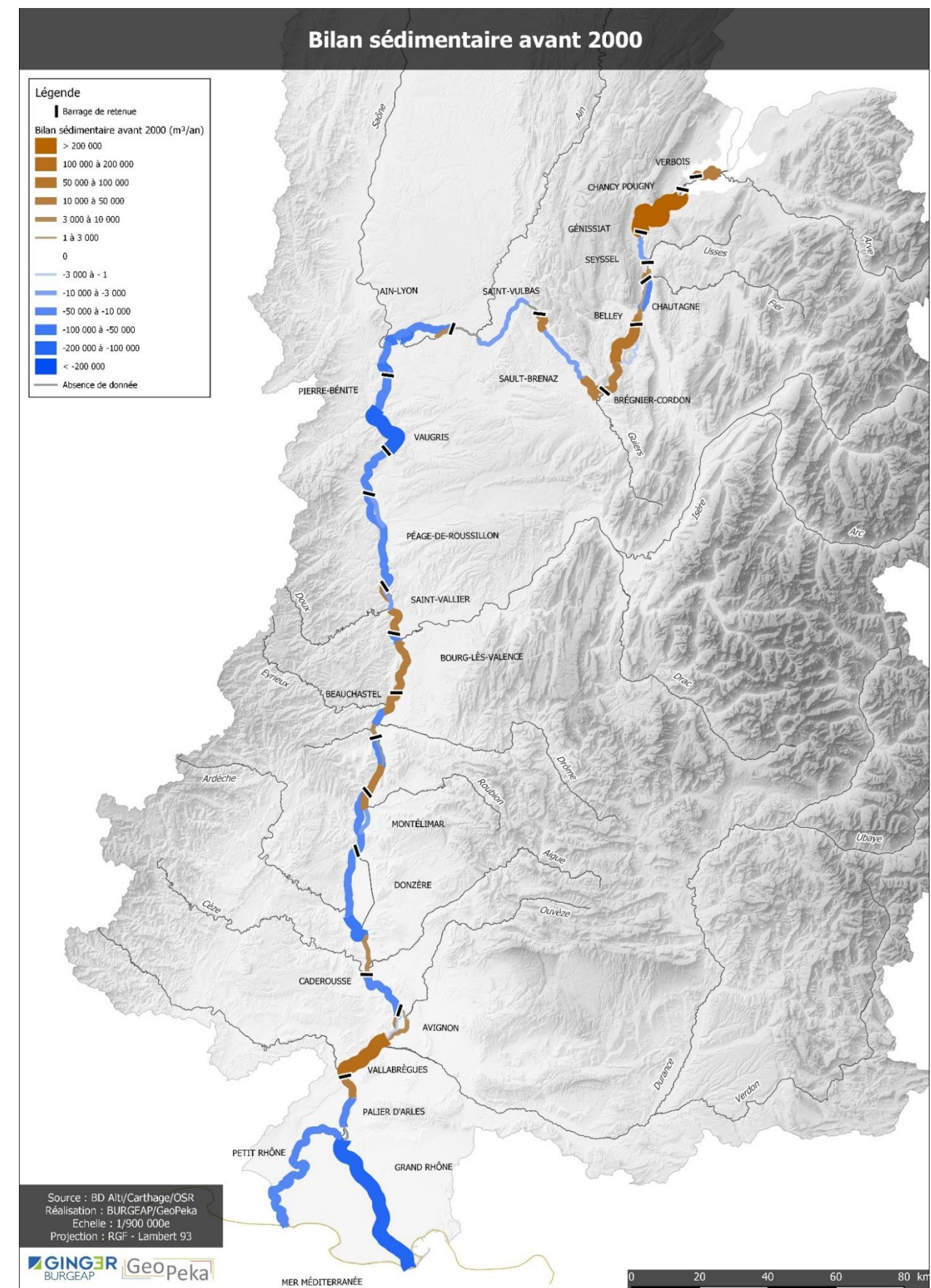
- Dans les retenues : effets des extractions en retenue et queue de retenue dans Pierre-Bénite (11-PBN), Vaugris (12-VAU), Péage-de-Roussillon (13-PDR), St-Vallier (14-STV). Accumulation dans la retenue de Bourg-lès-Valence (15-BLV) ;
- Dans les canaux usiniers : tendance au déstockage dans tous les canaux usiniers ;
- Dans les RCC : effets des extractions dans les Vieux Rhône de Pierre-Bénite (11-PBN), de Péage de Roussillon (13-PDR) ;

• Bas Rhône :

- Dans les retenues : effet des extractions dans la queue de retenue de Logis-Neuf (17-BLN) ; accumulation dans les retenues de Beauchastel (16-BEA) et Montélimar (18-MON), dans une moindre mesure Logis-Neuf (17-BLN), dans la retenue de Donzère (19-DZM) et Avignon (21-AVI), alors que Caderousse a accumulé des sédiments (20-CAD) ;
- Dans les canaux usiniers : tendance au stockage dans le canal de Logis-Neuf (17-BLN), dans la partie amont du canal de Montélimar (18-MON) ; le canal de Donzère-Mondragon est stable (19-DZM) ;
- Dans les RCC : accumulation dans le RCC de Beauchastel (16-BEA), influencé par la retenue de Logis-Neuf (17-BLN), dans le RCC d'Avignon (21-AVI), influencé par la retenue de Vallabrègues (22-VAL) ; effets des extractions dans les Vieux Rhône de Bourg-lès-Valence (15-BLV), Baix-Logis-Neuf (17-BLN), Montélimar (18-MON), Donzère-Mondragon (19-DZM) surtout dans sa partie aval,

• Delta :

- Dans la retenue de Vallabrègues (226VAL) : accumulation importante de sédiments ;
- Dans le Rhône total : déstockage par érosion progressive dans le Palier d'Arles (23-ARL), la diffuence étant en équilibre du fait des dragages d'entretien ; déstockage important dans le Grand Rhône (24-GRH) du fait d'extractions, ainsi que dans une moindre mesure dans le Petit Rhône (25-PRH).



Carte 11 : Bilans sédimentaires par tronçons homogènes avant 2000

4.2.3 Synthèse des résultats pour la période depuis 2000

Pour cette période depuis 2000, les principales conclusions des bilans sédimentaires sont présentées ci-dessous, avec la Carte 12 en appui.

On note l'influence superposée des crues de 2002 et 2003 qui ont déstocké dans le bas Rhône et le delta, alors que l'influence des apports sédimentaires de l'Isère se fait sentir entre Valence et Bollène. Ailleurs, avec l'arrêt des extractions, on note le retour des sédiments sur le Canal de Miribel et la retenue de Vaugris. Les retenues de Verbois, Génissiat continuent à accumuler les sédiments, ainsi que les canaux de Belley et de Brégnier-Cordon.

• Haut-Rhône :

- Dans les retenues : poursuite des accumulations dans les retenues-réservoirs de Verbois et Génissiat (01-SUI, 03-GEN), dans les retenues de Seyssel (04-SEY), de Chautagne (05-CHA), Belley (06-BEL), Brégnier-Cordon (07-BRC) et Sault-Brénaz (08-SAB) ; stabilité de la retenue de Chancy-Pougnny (02-CHP) alors que celle de Jons (10-ALY) a eu tendance à sédimenter ;
- Dans les canaux usiniers : poursuite des accumulations nettes dans le canal de Belley (06-BEL), dans le canal de Brégnier-Cordon (07-BRC), de l'accumulation en entrée du canal de Jonage (10-ALY) ; toujours une légère accumulation dans le canal de Chautagne (05-CHA) ;
- Dans les RCC : le Vieux Rhône de Chautagne (05-CHA) continue à déstocker nettement par absence d'apports amont, dans une moindre mesure pour Belley (06-BEL), alors que le canal de de Miribel, le Vieux Rhône de Neyron et dans la fosse de la Feyssine (10-ALY) sédimenter avec le retour des sédiments issus de l'Ain ; poursuite de la tendance au stockage dans le RCC de Brégnier-Cordon (07-BRC) ;
- Dans le Rhône total : stabilité dans l'UHC de St-Vulbas (09-VUL) ;

• Rhône moyen :

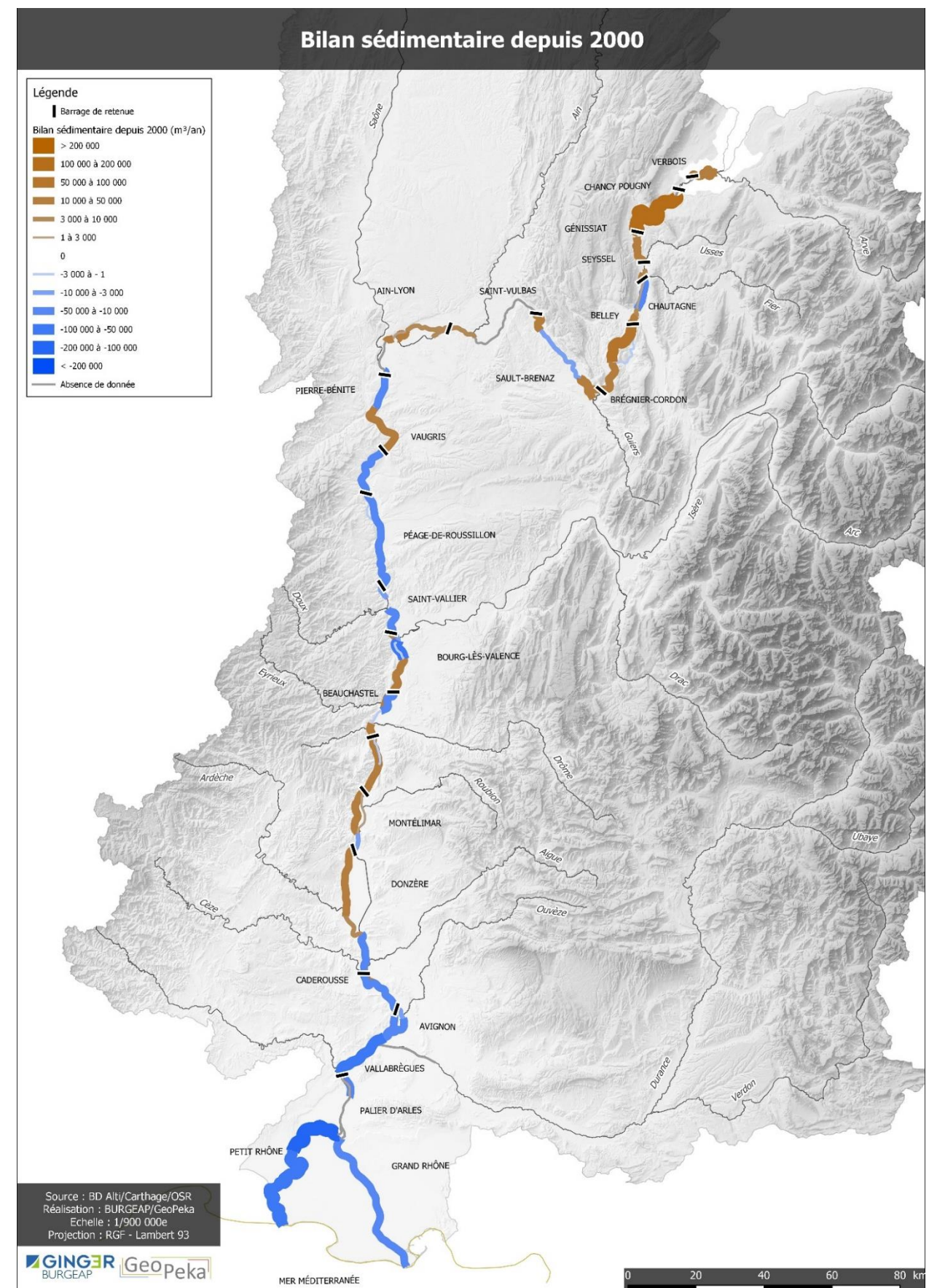
- Dans les retenues : stabilité de la retenue dans Pierre-Bénite (11-PBN) alors que Vaugris sédimente nettement du fait de grandes fosses d'extraction (12-VAU) qui piègent les apports de la Saône notamment ; les retenues de Péage-de-Roussillon (13-PDR), St-Vallier (14-STV) et Bourg-lès-Valence (15-BLV) continuent à déstocker, probablement sous l'effet des crues ;
- Dans les canaux usiniers : poursuite d'une tendance au déstockage dans tous les canaux usiniers ;
- Dans les RCC : stabilité dans les Vieux Rhône de Pierre-Bénite (11-PBN), de Péage de Roussillon (13-PDR), alors que celui de St-Vallier (14-STV) déstocke légèrement ;

• Bas Rhône :

- Dans les retenues : poursuite des accumulations dans les retenues de Beauchastel (16-BEA), Baix-Logis-Neuf (17-BLN), Montélimar (18-MON), sous l'influence des apports sédimentaires de l'Isère, alors que les retenues de Donzère (19-DZM), Caderousse (20-CAD) et Avignon (21-AVI) ont déstocké, probablement du fait des crues de 2002-2003 ;
- Dans les canaux usiniers : légère tendance au déstockage dans le canal de Logis-Neuf (17-BLN), alors que le canal de Montélimar (18-MON) sédimente ; le canal de Donzère-Mondragon est toujours stable (19-DZM) ; le canal de Caderousse (20-CAD) présente une tendance à la sédimentation ;
- Dans les RCC : si les RCC de Beauchastel (16-BEA) et d'Avignon (21-AVI) ont déstocké du fait de dragages dans leur partie aval, les autres RCC sont en phase nette de stockage : Logis-Neuf (17-BLN), Montélimar (18-MON), Donzère-Mondragon (19-DZM), malgré quelques dragages (chenal navigable Lafarge sur 18-MON)

• Delta :

- Dans la retenue de Vallabrègues (22-VAL) : déstockage importante de sédiments suite aux crues de 2002 et 2003, malgré les apports de la Durance ;
- Dans le Rhône total : pour le Palier d'Arles (23-ARL), les données manquent, mais il est probablement toujours en déstockage par érosion progressive. En aval, le déstockage se poursuit dans le Grand Rhône (24-GRH), et surtout dans le Petit Rhône (25-PRH) par les effets des crues de 2002 et 2003 (plus d'érosion que d'apport).



Carte 12 : Bilans sédimentaires par tronçons homogènes depuis 2000

4.2.4 Synthèse des résultats pour la période depuis les mises en eau de barrages

Pour cette période des situations depuis les mises en eau, les principales conclusions des bilans sédimentaires sont présentées ci-dessous, avec la Carte 13 en appui.

Les situations sont très disparates, notamment pour les retenues, car les bilans sédimentaires vont cumuler des phases de fort déficit dû aux extractions ou aux crues (notamment dans le bas Rhône), avec des phases d'accumulations dues aux configurations propres des retenues mais également au retour des sédiments grossiers (Ain) ou aux apports sablo-limoneux de l'Isère et de la Durance. Chaque retenue ou chaque tronçon de RCC a répondu différemment au cours du temps, en fonction de son comportement en crue et des apports sédimentaire auquel il est soumis. Toutefois, on retiendra les retenues les plus sensibles à la sédimentation (Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon, Beauchastel, Montélimar, Caderousse, Vallabrègues) et les RCC les plus déficitaires (Pierre-Bénite, Bourg-lès-Valence, Montélimar, Donzère-Mondragon, Vallabrègues).

- **Haut-Rhône :**

- Dans les retenues : forte accumulation dans les retenues-réservoirs de Verbois (tendance non cartographiée) et Génissiat (01-SUI, 03-GEN) ; accumulations nettes dans les retenues de Chautagne (05-CHA) malgré un dragage important en 2008-2009, Belley (06-BEL), Brégnier-Cordon (07-BRC) et Sault-Brénaz (08-SAB) sur tout le linéaire de la retenue ; stabilité de la retenue de Chancy-Pouigny (02-CHP), de la retenue de Seyssel (04-SEY) alors que celle de Jons (10-ALY) a eu tendance à sédimenter (tendance non cartographiée) ;
- Dans les canaux usiniers, l'information n'a pas été traitée. Toutefois, les analyses sur les périodes avant 2000 et après 2000 montrent des accumulations nettes dans les canaux de Belley (06-BEL) et de Brégnier-Cordon (07-BRC), en entrée du canal de Jonage (10_ ALY), avec une légère accumulation dans le canal de Chautagne (05-CHA) ;
- Dans les RCC : les effets des extractions l'emportent dans les Vieux Rhône de Chautagne (05-CHA), de Belley (06-BEL), alors qu'il y a une tendance au stockage dans le RCC de Brégnier-Cordon (07-BRC) ; le Vieux Rhône de Neyron et la fosse de la Feyssine (10-ALY) n'ont pas été analysés (globalement en excédent) alors que canal de Miribel connaît un retour à l'équilibre ;
- Dans le Rhône total : l'UHC de St-Vulbas (09-VUL) n'a pas été traité, mais la situation est probablement proche de l'équilibre après le comblement des fosses d'extraction.

- Rhône moyen :

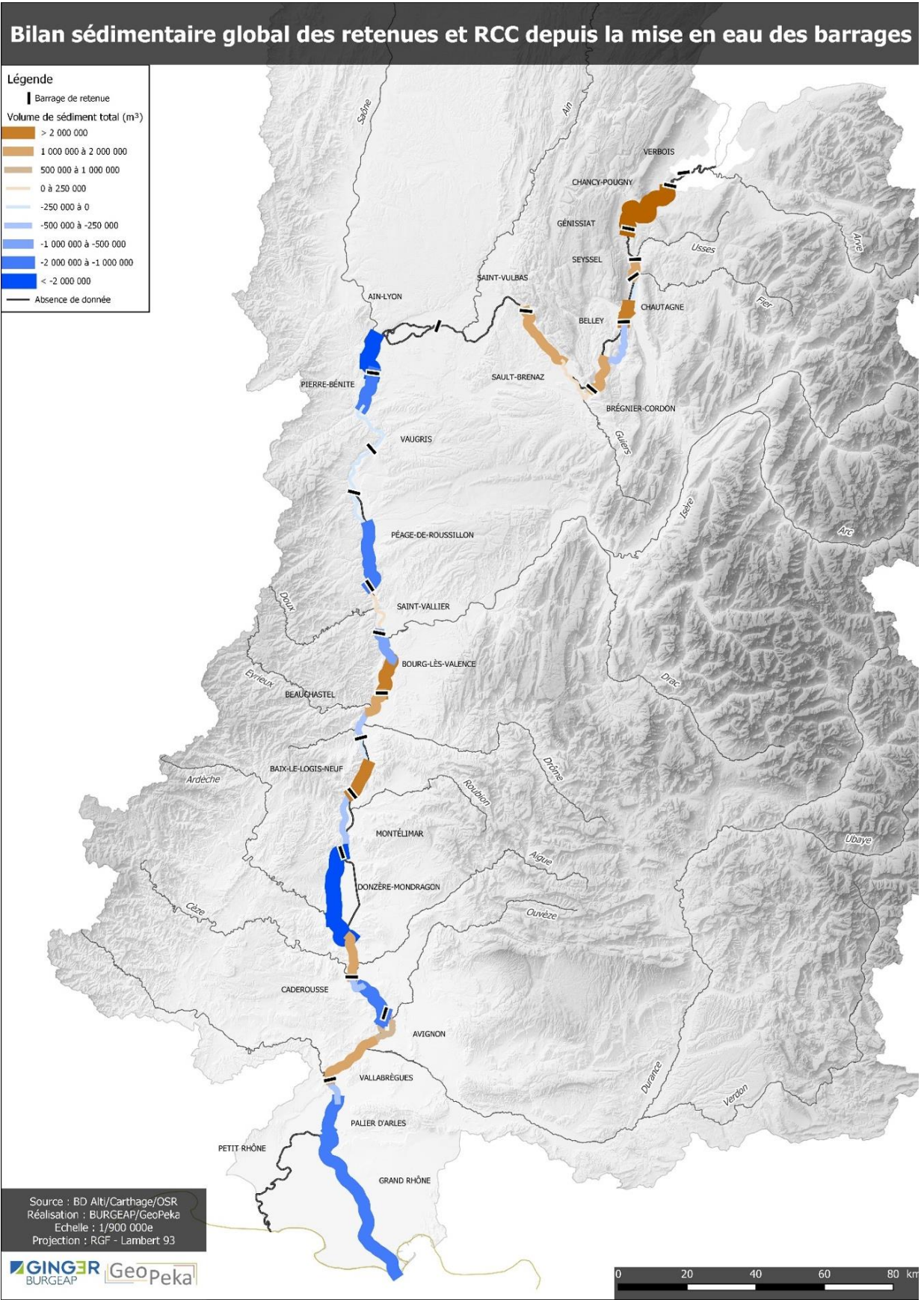
- Dans les retenues : les effets des extractions en retenue sont encore nets dans Pierre-Bénite (11-PBN), Vaugris (12-VAU), Péage-de-Roussillon (13-PDR), St-Vallier (14-STV), alors que la retenue de Bourg-lès-Valence (15-BLV) est en léger excédent ;
- Dans les canaux usiniers : les analyses précédentes permettent de déduire une poursuite de tendance au déstockage dans tous les canaux usiniers ;
- Dans les RCC : très fort déficit dans le Vieux Rhône de Pierre-Bénite (11-PBN), alors que les RCC de Péage de Roussillon (13-PDR) et St-Vallier (14-STV) sont en léger déficit ;

- **Bas Rhône :**

- Dans les retenues : les retenues de Beauchastel (16-BEA) et Montélimar (18-MON) sont marquées par l'influence des apports sédimentaires de l'Isère, alors que Baix-Logis-Neuf (17-BLN) a été gérée par dragages. En aval, les retenues sont très différenciées : Donzère (19-DZM), et Avignon (21-AVI) ont déstocké, probablement du fait des crues de 2002-2003, alors que Caderousse (20-CAD) a globalement sédimenté, tout comme Vallmabrègues (22-VAL) ;
- Dans les canaux usiniers : cf. tendances pour les périodes avant 2000 / après 2000 ;
- Dans les RCC : le RCC de Donzère (19-DZM) est en net déficit, dans une moindre mesure pour Bourg-lès-Valence (15-BLV), Logis-Neuf (17-BLN), Montélimar (18-MON), Caderousse (20-CAD). Seuls les RCC de Beauchastel (16-BEA) et d'Avignon (21-AVI) sont en léger excédent ;

- **Delta :**

- La retenue de Vallabrègues (22-VAL) a finalement accumulé des sédiments de la Durance malgré le déstockage suite aux crues de 2002 et 2003 ;
- Dans le Rhône total : le Palier d'Arles (24-GRH) est en net déficit, tout comme le Grand Rhône (24-GRH), et a priori le Petit Rhône (25-PRH) présente un bilan négatif également.



Carte 13 : Bilans sédimentaires par retenues et RCC depuis la mise en eau des barrages

Tableau 26 : Résultats des bilans sédimentaires par tronçons homogènes

Cours d'eau	TH	Bilan sédimentaire avant 2000 (m³/an)	Bilan sédimentaire depuis 2000 (m³/an)	Bilan sédimentaire depuis mise en eau MIN (m³)	Bilan sédimentaire depuis mise en eau MAX(m³)	Bilan sédimentaire depuis mise en eau TOTAL (m³)	Année début	Année fin	Bilan sédimentaire depuis mise en eau (m³/an)
Le Rhône	01-SUI1-R	0	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	01-SUI2-R	0	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	01-SUI4-R	44 000	19 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	01-SUI5-RT	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	02-CHP1-R	0	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	02-CHP2-RT	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	03-GEN1-R	370 000	172 000	-131 735	9 095 615	9 095 615	1984	2017	275 625
Le Rhône	03-GEN2-RT	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	04-SEY1-R	-8 500	15 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	04-SEY3-RT	0	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	05-CHA1-R	10 000	10 000	24 253	848 005	848 005	1987	2016	29 242
Le Rhône	05-CHA3-R	15 000	15 000	24 253	848 005	848 005	1987	2016	29 242
Dérivation de Chautagne	05-CHA4-CU	2 000	2 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	05-CHA5-RCC	-27 000	-13 000	-177 240	75 351	-38 504	1983	2018	-1 100
Le Rhône	05-CHA6-RT	5 000	5 000	8 880	1 232 106	1 232 106	1984	2018	36 238
Le Rhône	06-BEL1-R	30 000	30 000	8 880	1 232 106	1 232 106	1984	2018	36 238
Dérivation de Belley	06-BEL2-CU	100 000	100 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	06-BEL3-RCC	-2 000	-2 000	-271 460	178 493	-271 460	1970	2019	-5 540
Le Rhône	07-BRC1-R	27 000	27 000	10 105	878 290	878 290	1987	2018	28 332
Dérivation de Brégnier-Cordon	07-BRC2-CU	23 000	23 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	07-BRC3-RCC	0	0	-44 057	137 681	25 706	1990	2017	952
Le Rhône	07-BRC5-RCC	17 000	17 000	-44 057	137 681	25 706	1990	2017	952
Le Rhône	07-BRC6-RT	-4 000	-4 000	-44 057	137 681	25 706	1990	2017	952
Le Rhône	08-SAB1-RT	-5 000	-5 000	-157 627	801 335	801 335	1993	2016	34 841
Le Rhône	08-SAB2-R	41 000	41 000	-157 627	801 335	801 335	1993	2016	34 841
Dérivation de Saulz-Brénaz	08-SAB3-CU	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	08-SAB4-RCC	ND	ND	-44 057	137 681	25 706	1990	2017	952
Le Rhône	08-SAB5-RT	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	09-VUL1-RT	-9 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	10-ALY1-R	ND	6 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Canal de Jonage	10-ALY3-R	4 500	10 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Canal de Jonage	10-ALY4-CU	0	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Canal de Miribel	10-ALY5-RCC	-35 000	7 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Canal de Miribel	10-ALY6-RCC	-20 000	2 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Vieux Rhone	10-ALY7-RCC	-50 000	20 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	10-ALY8-RT	-50 000	10 500	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	11-PBN1-R	-16 000	ND	-2 683 150	-700	-2 683 150	1968	2011	-62 399
Le Rhône	11-PBN3-R	-51 000	ND	-2 683 150	-700	-2 683 150	1968	2011	-62 399
Dérivation de Pierre Bénite	11-PBN4-CU	-11 000	-11 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	11-PBN5-RCC	-42 000	-500	-1 803 980	70	-1 803 980	1968	2010	-42 952
Le Rhône	12-VAU1-R	-112 000	20 000	-1360300	-146700	-146700	1980	2012	-4 584
Le Rhône	13-PDR1-R	-13 000	-23 000	-1360300	-146700	-146700	1980	2012	-4 584
Dérivation de Péage de Roussillon	13-PDR2-CU	-6 000	-11 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	13-PDR3-RCC	-12 000	-1 000	-70241	42010	-4992	1969	2012	-116
Le Rhône	14-STV1-R	-36 000	-29 000	-1890575	179900	-1039775	1974	2014	-25 994
Dérivation de Saint Vallier	14-STV2-CU	-7 000	-4 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	14-STV3-RCC	12 000	-9 000	34 629	131 957	131 957	1976	2011	3 770
Le Rhône	15-BLV1-RT	-8 000	0	34 629	131 957	131 957	1976	2011	3 770
Le Rhône	15-BLV3-R	13 000	-11 000	-368 194	244 890	244 890	1969	2011	5 831
Dérivation de Bourg lès Valence	15-BLV4-CU	1 000	-7 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Dérivation de Bourg lès Valence	15-BLV6-CU	24 000	-51 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	15-BLV7-RCC	-38 000	8 000	-1 237 307	-20 808	-982 324	1969	2013	-22 326
Le Rhône	15-BLV8-RCC	0	-1 000	-1 237 307	-20 808	-982 324	1969	2013	-22 326
Le Rhône	16-BEA1-R	39 000	25 000	-197 280	1 554 010	1 554 010	1969	2013	35 318
Le Rhône	16-BEA2-RCC	25 000	-15 000	-27 231	568 971	568 971	1963	2012	11 612
Dérivation de Beauchastel	16-BEA3-CU	10 000	30 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	17-BLN1-R	-14 000	-2 000	-890 078	-16 392	-438 476	1957	2013	-7 830
Le Rhône	17-BLN3-R	9 000	29 000	-890 078	-16 392	-438 476	1957	2013	-7 830
Dérivation de Baix le Logis Neuf	17-BLN5-CU	ND	-1 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	17-BLN6-RCC	-13 000	14 000	-59 311	32 154	-45 783	1962	2014	-880
Le Rhône	18-MON1-R	19 000	40 000	-1 612 038	1 290 928	1 290 928	1957	2014	22 648
Dérivation de Montélimar	18-MON2-CU	13 000	3 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Dérivation de Montélimar	18-MON4-CU	-5 000	3 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	18-MON5-RCC	-12 000	18 000	-426 310	-22 000	-257 548	1962	2012	-5 151
Le Rhône	19-DZM1-R	-10 000	-8 000	-636 745	22 114	-419 108	1957	2012	-7 620
Dérivation de Donzère-Mondragon	19-DZM2-CU	0	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	19-DZM3-RCC	-31 000	18 000	-3 566 286	-8 276	-3 551 870	1953	2012	-60 201
Le Rhône	19-DZM5-RCC	-72 000	8 000	-3 566 286	-8 276	-3 551 870	1953	2012	-60 201
Le Rhône	20-CAD1-R	10 000	-46 000	-623 900	848 000	848 000	1977	2012	24 229
Dérivation de Caderousse	20-CAD2-CU	ND	16 500	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	20-CAD3-RCC	-10 000	-31 000	-309 022	16 105	-306 222	1985	2009	-12 759
Le Rhône	21-AVI1-R	-17 000	-28 000	-1 097 424	126 088	-1 097 424	1977	2009	-34 295
Bras de Villeneuve	21-AVI2-R	-15 000	-4 000	-1 097 424	126 088	-1 097 424	1977	2009	-34 295
Bras de Villeneuve	21-AVI3-CU	-1 000	-13 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Bras de Villeneuve	21-AVI4-RCC	6 000	-5 000	-4 354	312 849	311 402	1988	2009	14 829
Bras d'Avignon	21-AVI5-RCC	3 000	-3 000	-4 354	312 849	311 402	1988	2009	14 829
Bras d'Avignon	21-AVI7-RCC	6 000	-10 000	-4 354	312 849	311 402	1988	2009	14 829
Le Rhône	22-VAL1-R	102 000	-52 000	-941 786	593 062	593 062	1970	2016	12 893
Le Rhône	22-VAL3-RCC	29 000	2 000	-647 064	-8 784	-296 580	1970	2015	-6 591
Dérivation de Vallabrègues	22-VAL5-CU	ND	-14 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Le Rhône	23-ARL1-RT	-35 000	ND	-1 614 025	49 206	-1 614 025	1974	2011	-43 622
Le Petit Rhône	23-ARL2-PRH	0	ND	-1 614 025	49 206	-1 614 025	1974	2011	-43 622
Le Rhône	23-ARL3-GRH	ND	ND	-1 614 025	49 206	-1 614 025	1974	2011	-43 622
Le Grand Rhône	24-GRH1	-145 000	-30 000	-1 056 719	0	-1 056 719	1974	2011	-28 560
Le Petit Rhône	25-PRH1	-39 000	-105 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Rhône	25-PRH2	-35 000	-95 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Canal usinier									
Vieux Rhône ou RCC									

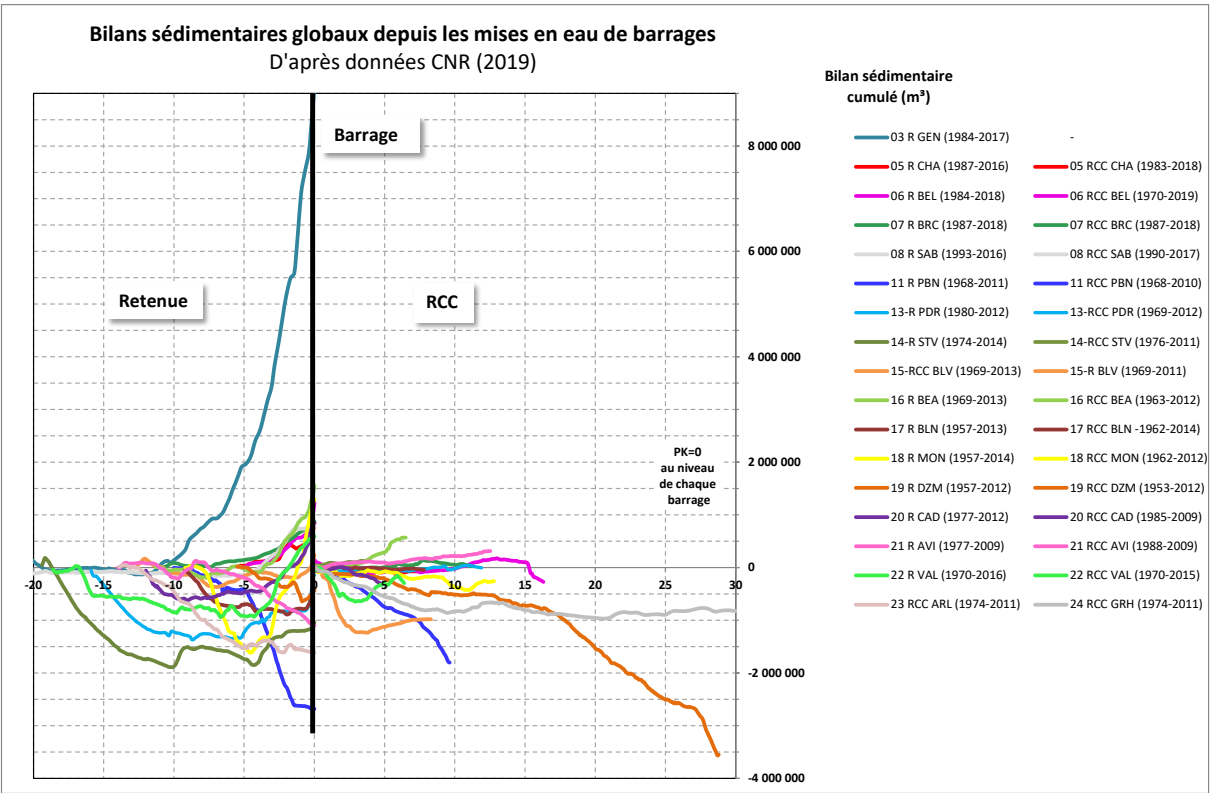


Figure 116 : Bilans sédimentaires par retenue et RCC depuis la mise en eau de chaque barrage

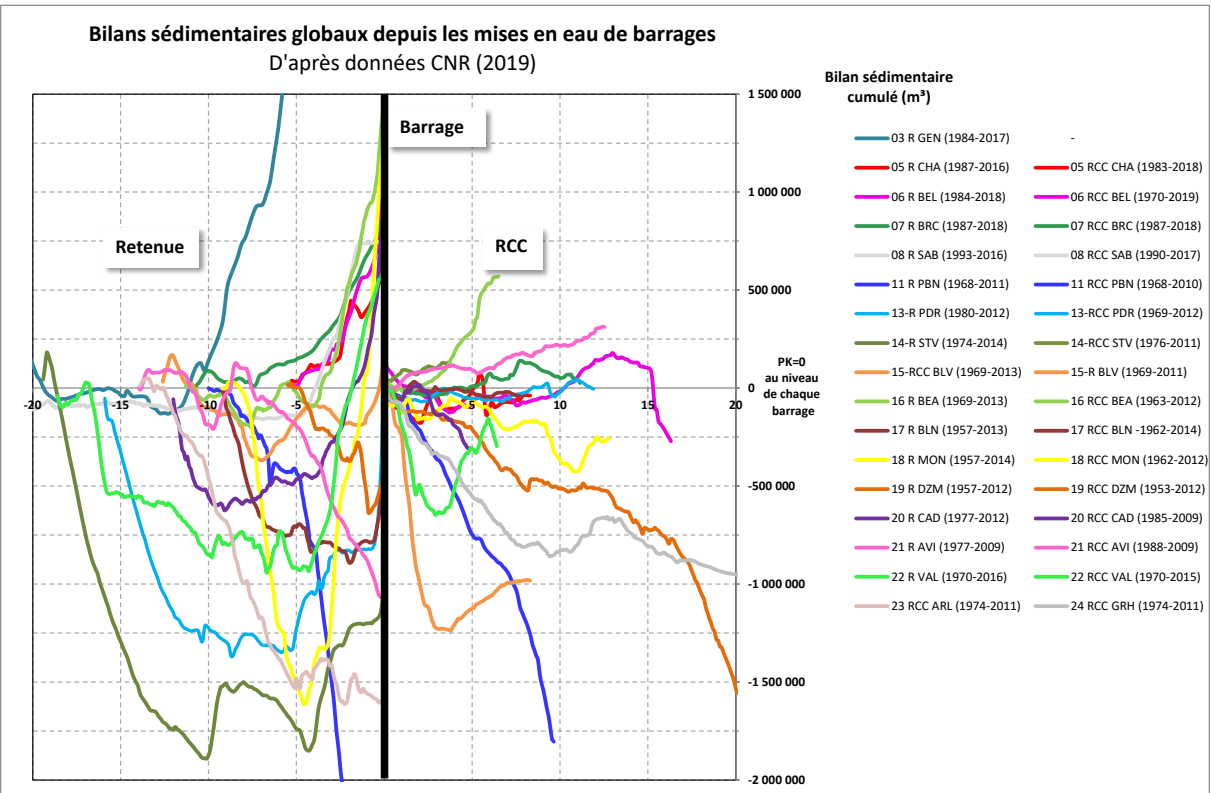


Figure 117 : Bilans sédimentaires par retenue et RCC depuis la mise en eau de chaque barrage (zoom)

Le travail mené par Dynamique Hydro (2018-2019) et mentionné précédemment a permis d'identifier les tendances d'évolution du lit mineur et du chenal navigable, dans les biefs dont les études nous ont été communiquées : Péage de Roussillon (13-PDR), Bourg-lès-Valence (15-BLV), Baix-Logis-Neuf (17-BLN), Montélimar (18-MON), Donzère-Mondragon (19-DZM), Vallabrègues (21-VAL).

Des cartes peuvent être établies à partir des bilans sédimentaires précis et localisés qui ont été établis. Le fait que le travail ait été réalisé sur une partie du linéaire et à une échelle différente du schéma directeur ne permet pas son exploitation directe dans le cadre de l'étude. Toutefois, il s'agit d'une approche intéressante pour la gestion sédimentaire future et qui mérite d'être mentionnée pour information à ce stade.



4.3 Apports à la mer et devenir des sédiments fluviaux

4.3.1 Caractérisation et évolution des apports à la mer

Les apports du Rhône en sédiment représentent jusqu'à 94 % des apports solides du Golfe du Lion. Essentiellement composée de matières en suspension (90%), les apports annuels à la mer sont très variables d'une année à une autre (facteur de 4 à 5 sur une période décennale) et sont compris, depuis la moitié du 19^{ème} siècle entre 2-3 millions de tonnes et 14-15 millions de tonnes par an (Boudet, 2017).

Les données les plus récentes (OSR4, 2018 ; Figure 118) montrent des flux variants entre 3 et 9 millions de tonnes, avec une moyenne de 6 millions de tonnes par an, au niveau de la station d'Arles. Globalement, ces flux ont fortement diminué, il était estimé à environ 17 Mt/an au 19^{ème} siècle par Surell (1847) et environ à 10 Mt/an au début du 20^{ème} siècle (Antonelli, 2002). L'EGR avait retenu la valeur moyenne annuelle de 15 Mt/an à Arles. Lors de la crue de 2003, les flux de MES totaux sont estimés entre 3,1 et 5,3 Mt/an.

Cette diminution des apports est liée aux évolutions climatiques (diminution de la fréquence des crues), à la déprise agricole et aux reboisements sur les têtes de bassin, ainsi qu'aux multiples ouvrages (barrages, réservoirs, casiers de sédimentation) construits le Rhône et ses affluents.

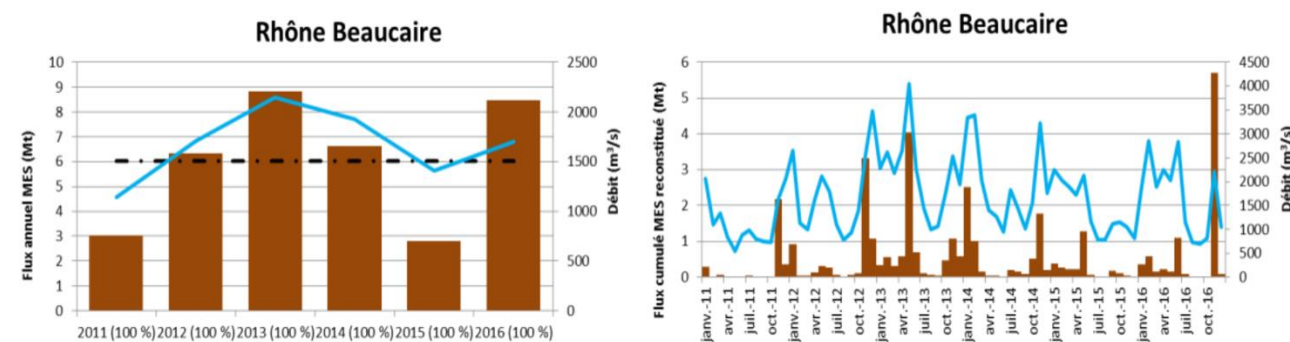


Figure 118 : Variabilité des apports en MES à Beaucaire à une échelle annuelle (gauche) et une échelle mensuelle (droite) (OSR, 2018)

Au regard de prélèvements granulométriques réalisés dans le chenal du Grand Rhône, il semblerait qu'aucun gravier ne parviennent à la mer (Antonelli, 2002 ; Arnaud-Fassetta et al., 2003). Historiquement, cette fraction restait bloquée dans le Palier d'Arles et son accumulation participait aux débordements, voire à la création de défluviation comme celle du Petit Rhône. Depuis la chenalisation du lit au 19^{ème} siècle, les graviers peuvent poursuivre plus en aval, jusqu'à la diffuence Petit Rhône / Grand Rhône où une grande partie est draguée.

Actuellement, le chenal du Grand Rhône est composé de sable de 63 à 500 µm. Les sables grossiers (200-500 µm) pourraient composer jusqu'à 20 % du charriage (Antonelli, 2002), et les fractions plus fines se déplacent selon des processus de suspension gradué entre 4,5 et 6 m de profondeur (Launay, 2017).

Depuis les années 2010, les graviers dragués à la diffuence sont réinjectés en aval d'Arles. Il existe donc une nouvelle possibilité de flux de graviers vers l'aval, probablement limitée à l'amont du seuil de Terrin : actuellement les matériaux supérieurs à 5 mm se déposent générant un exhaussement visible sur les bathymétries. D'après les calculs théoriques de remobilisation (Vázquez-Tarrío, 2018), des matériaux de taille 10-20 mm pourraient transiter en crue au-delà du seuil de Terrin (PK294) à condition que le lit se comble en amont et qu'une pente d'équilibre se reconstitue.

Les calculs n'ont pas été menés en aval du PK307 mais il est peu probable que de tels graviers soient en mesure d'atteindre le littoral (PK330) où les pentes d'écoulement continuent de s'abaisser.

4.3.2 Distribution spatiale des apports à la mer

La morphologie des embouchures de fleuve sont variables du flux sédimentaires (volumes, granulométrie) et des forçages dominants (marées, vagues, processus fluviaux). Dans le cas du Rhône, l'embouchure est de type dominé par la houle et secondairement par les processus fluviaux.

Dans un premier temps, il faut savoir que les sédiments les plus fins (limons) sont exportés assez loin en mer en raison de la forte stratification eaux douces/eaux salées limite les processus de floculation et de sédimentation (Figure 120). Ces particules fines sont à l'origine du prodelta (cf. Figure 119). Avec les crues les plus importantes, le jet fluvial peut exporter des sédiments en mer sur de longues distances et avoir une incidence directe sur plus de la moitié de la surface du plateau continental (ce qui soulève la question de la qualité physico-chimique des sédiments expulsés).

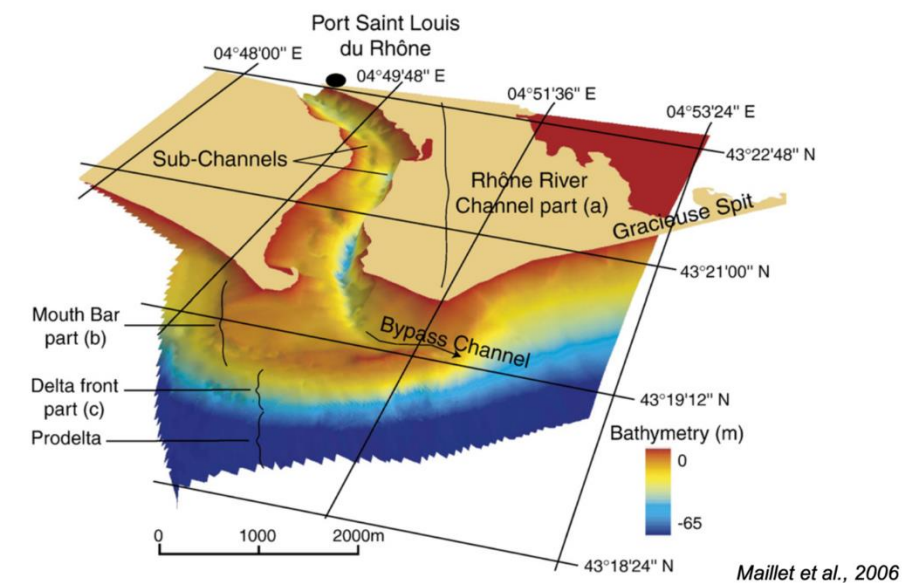


Figure 119 : Vue 3D de l'embouchure du Grand Rhône (Maillet, 2005)

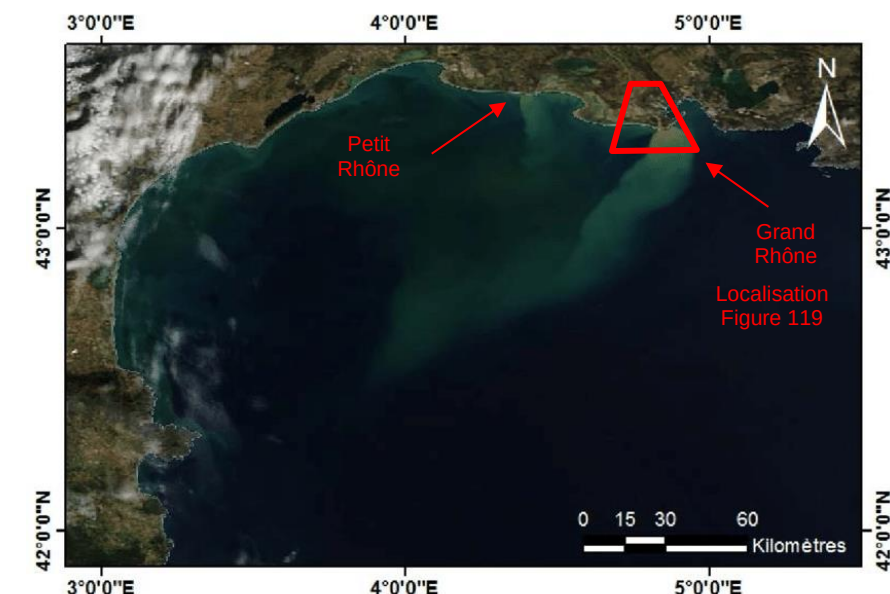
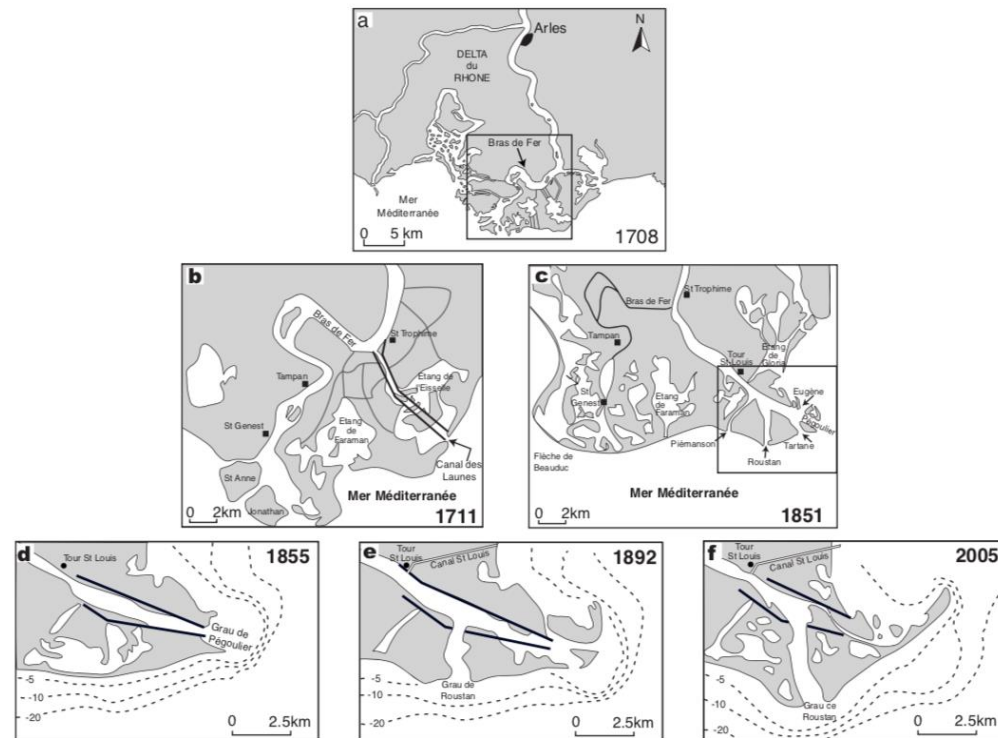


Figure 120 : Panaches de crue du Grand Rhône et du Petit Rhône dans le Golfe du Lion le 20 février 2014 (Mauffrey, 2015)

Les sables, quant à eux, viennent directement nourrir le front deltaïque (« delta front part » sur Figure 119) qui affleure à 6-8 m sous l'eau.

La formation de la barre d'embouchure a été minutieusement détaillée dans les travaux de la thèse de Maillet (2005). Cette barre est située au droit de l'embouchure, à des profondeurs de quelques mètres (« mouth bar part » sur Figure 119). Sa dynamique est liée à l'évolution des bras d'embouchure depuis plus de 300 ans. Au début du 18^{ème} siècle, une défluvation amène le Rhône à abandonner le Bras de Fer à la faveur du grau du Pégoulie, qui sera par la suite aménagé. A la fin du 19^{ème} siècle (1892), ce dernier est à son tour abandonné pour le grau de Roustan, embouchure actuelle du Rhône (Figure 121). Ce nouveau chenal traversait alors une lagune, déconnectée de la mer et du fleuve initial ; il s'est donc petit à petit incisé, ce qui a provoqué une chasse sédimentaire vers l'aval, avec une avancée très importante du trait de côte sur la mer.



Évolution du tracé en plan des bras et des graus du Rhône depuis le 18^{ème} siècle (Maillet, 2005)

De 1934 à 1962, le chenal se stabilise, même si le trait de côte continue à avancer encore régulièrement, formant ainsi une barre d'embouchure. Un début d'érosion est observé à la fois à l'intérieur de l'embouchure, sous l'effet de l'allongement du profil du fleuve, et également dans la partie ouest de l'embouchure qui bénéficie pourtant des apports de la dérive littorale (Sabatier et Suanez, 2001). Cette tendance à l'érosion se généralise progressivement en 1988, 1995, puis 2003, à l'ensemble des zones littorales (ouest et est) ainsi qu'à l'intérieur de la barre d'embouchure. Seuls le sommet de la barre d'embouchure et le front deltaïque restent en accumulation constante jusqu'en 2003.

La crue de 2003 a conduit à une accumulation sédimentaire de 7,81 hm³ à l'embouchure (d'après des bathymétries jusqu'à la profondeur -20 m), ce qui représente un dépôt moyen de 0,88 m³/m² (Maillet, 2005 ; Figure 122). L'érosion autour de l'embouchure étant de 1,22 hm³, le bilan global des apports est de l'ordre de 6,6 hm³. Ce bilan sédimentaire témoigne de l'accrétion du lobe deltaïque mais masque des processus plus complexes.

Un suivi de l'embouchure entre mars 2012 et février 2013 (OSR2, 2015) montre un bilan positif de 0,15 m³ (pour des bathymétries jusqu'à -8 m) alors que le Rhône a connu pendant cette période 4 crues annuelles et 4 tempêtes annuelles.

Au final, à une phase d'érosion (1988-2003) se succède une période d'accrétion (post-2003).

Ces alternances et les processus sous-jacents sont liés aux combinaisons complexes entre forçage fluviaux et marins. Ils ont été précisés grâce à une modélisation hydro-sédimentaire du secteur (Boudet, 2017).

Par exemple, les crues les plus importantes génèrent un « jet fluvial » capable d'exporter les sédiments vers le large (vers des profondeurs rapidement supérieures à 30 m). L'exportation du transport solide est accentuée par la formation d'un poulie au niveau de l'embouchure, qui réduit sa largeur du chenal, la divisant par deux, et augmente les vitesses à son passage (cf. Figure 123).

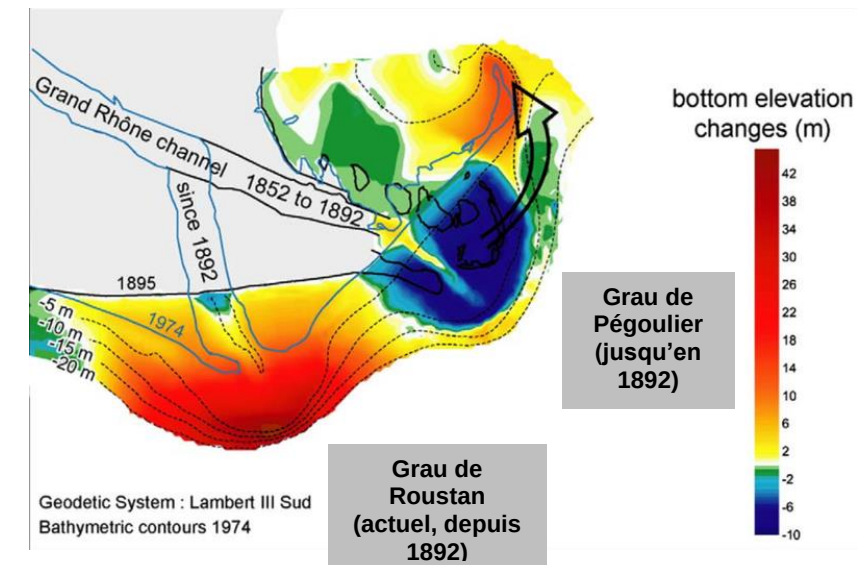


Figure 121 : Évolution topo-bathymétrique des graus du Pégoulie et de Roustan depuis le début du 20^{ème} siècle (Sabatier, 2009)

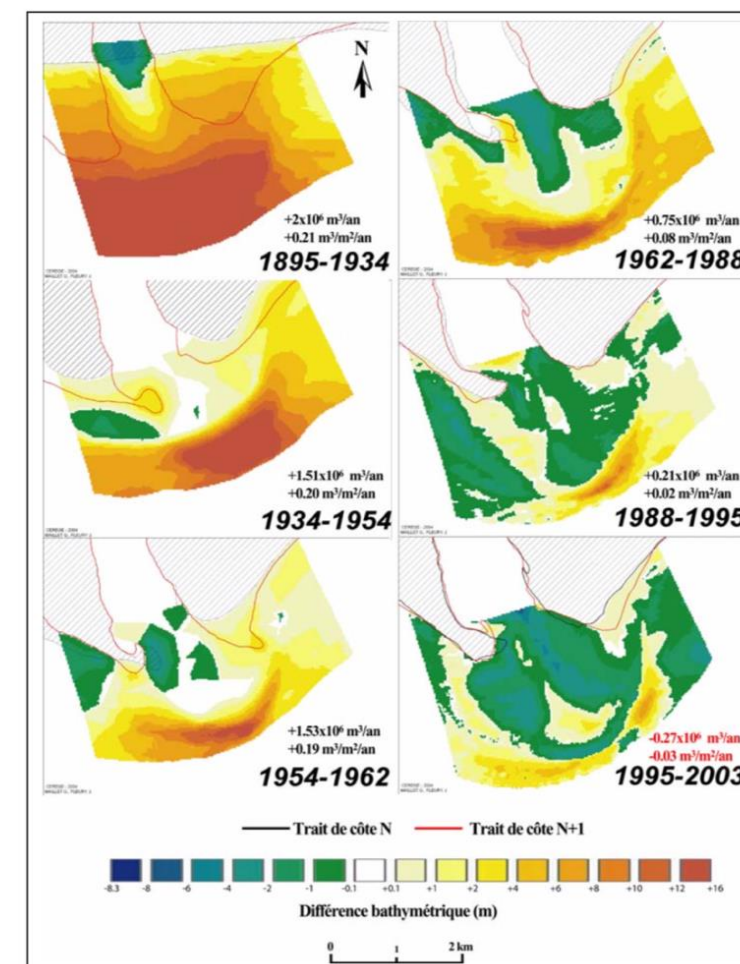


Figure 122 : Évolution morphologique de la barre d'embouchure depuis le début du 20^{ème} siècle (Maillet, 2005)

Le fait que le Grand Rhône ait historiquement été aménagé et chenalisé accentue également la diffusion des sédiments vers le large. En effet, les aménagements successifs du Grand Rhône entre Arles et le littoral depuis le Moyen-Age ont systématiquement conduit à repousser son lit actif vers l'est, en condamnant progressivement les défluviations et des chenaux internes au delta : Rhône de St-Ferréol à partir du 13^{ème} siècle, Rhône d'Ulmét au 15^{ème} siècle, Rhône du Grand Passon (Moyen-Âge), Rhône de Bras de Fer (fonctionnel de 1586 à 1711), pour aboutir en 1711 au Grand Rhône sur son linéaire actuel, uniquement modifié à l'exutoire en 1982 au niveau du bras de Roustan. L'exutoire du Grand Rhône se retrouve aujourd'hui concentré sur une portion très abrupte du pro-delta, plus profonde qu'à hauteur des embouchures du Petit Rhône, du Bras de Fer ou du Grand Passon plus actifs par le passé (Figure 124). En transitant par le Grand Rhône, les sédiments ont donc moins de capacité à recharger efficacement le front deltaïque par rapport à d'autres secteurs du littoral.



Figure 123 : L'embouchure du Rhône partiellement fermée par un poulie (Géoportail)

L'importance du débit nécessaire à une exportation au-delà la barre d'embouchure dépend de la direction des vagues : dans le cas de vagues WSW un débit de 2 000 m³/s peut suffire, mais il faut un débit décennal (7 800 m³/s) dans le cas d'un flux marin SE ou SSW. Cette différence est liée au fait que le jet fluvial est peut-être contrecarré par des vagues (« wave blocking ») et que la houle pénètre partiellement dans la linéaire aval du Grand Rhône. Dans tous les cas, ces événements restent rares (<5%) dans les événements enregistrés. Les apports au niveau du lobe deltaïque sont redistribués alentours notamment en direction des plages annexes (Napoléon et Piémanson). Toutefois, deux éléments ont été démontré par ces travaux :

- la réalimentation des plages n'est pas directe, mais se produit par des processus en relais, eux-mêmes dépendant des conditions marines ;
- l'évolution de la barre d'embouchure n'est pas uniquement lié aux apports fluviaux mais aussi secondairement par le pro-delta fossile du Pégoulie.

4.3.3 Interaction des apports pro-deltaïques avec l'évolution littorale

L'interaction des flux de sédiments du Rhône avec l'évolution du littoral en Camargue, qui connaît par endroit des reculs significatifs, mérite d'être abordé. A une échelle plus large et sur le temps long (1895-1974), trois zones connaissent une érosion littorale marquée (cf. Figure 125 ; Figure 126) :

- le secteur de la Petite Camargue (localisé de part et d'autre de l'embouchure du Petit Rhône) ;
- le secteur de Faraman (entre la pointe de Beauduc et l'embouchure actuelle du Rhône) ;
- le secteur du Pégoulie (à l'Est de l'embouchure du grand Rhône)

Si la réduction des apports fluviaux est certaine, son rôle dans les déficits constatés sur les plages du littoral de Camargue reste à démontrer. Ainsi, par exemple, le bilan sédimentaire fait sur le temps long (1876-2004) sur le Petit Rhône par Raccasi (2008) montre que les apports à la mer (38 000 m³/an) sont négligeables par rapport aux circulations littorales de part et d'autre du grau d'Orgon (entre 0,3 et 0,7 hm³/an vers l'Espinette et entre 0,1 et 0,3 hm³/an vers Beauduc). Les principales sources d'alimentation des cellules excédentaires sont les pro-deltas fossiles du Petit Rhône et du bras de St Ferréol d'une part, du bras de Fer et du grau du Péroulier d'autre part.

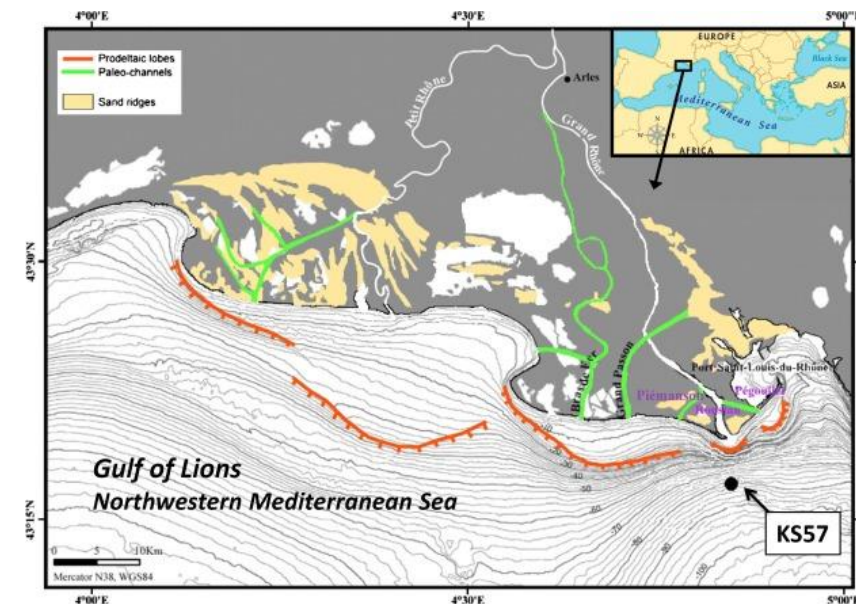


Figure 124 : Paléomorphologie et bathymétrie du front deltaïque (Cossa et al, 2018)

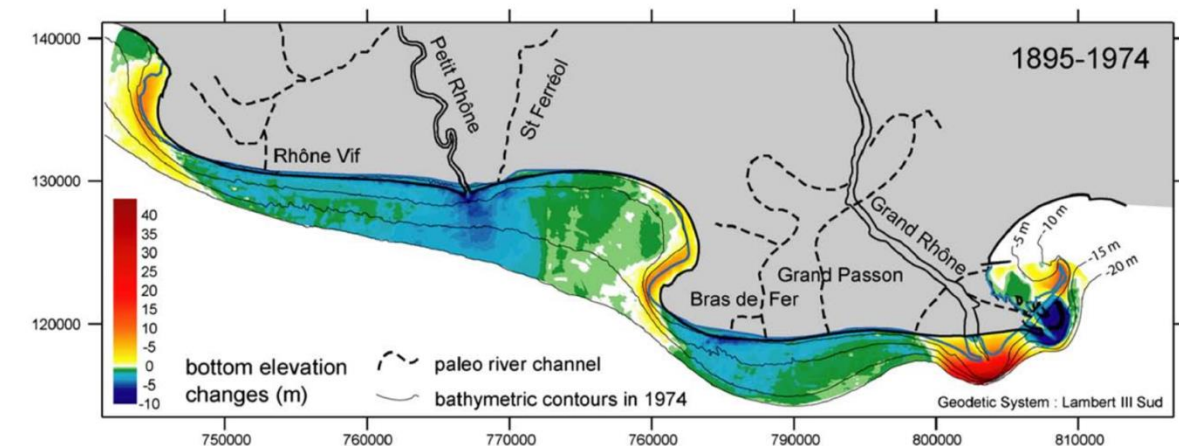


Figure 125 : Zones d'érosion et d'accrétion du littoral du delta établies par comparaison bathymétrique entre 1895 et 1974 (Sabatier et al, 2009)

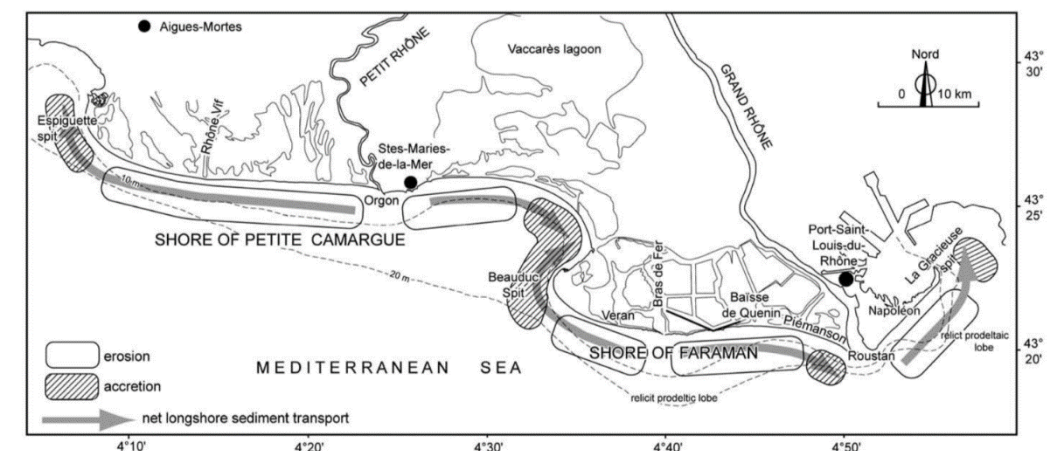


Figure 126 : Zonage d'érosion et d'accrétion du littoral du delta (Sabatier et Suanez, 2003)

Enfin, les estimations proposées pour la situation avant aménagement hydroélectrique sont des estimations théoriques, qui ne peuvent être validées avec les données contemporaines. Il s'agit donc d'ordres de grandeur à utiliser avec précaution.

5. Dynamique et flux sédimentaires

5.1 Dynamique des sédiments grossiers

5.1.1 Méthodologie

La dynamique des sédiments grossiers a été analysée dans chacune des fiches UHC, au sein du volet C4.

Ce volet est complémentaire du volet précédent sur les bilans sédimentaires (C3 / §.4) et vient donner des éléments de compréhension sur la dynamique du charriage des éléments grossiers en termes de remobilisation de particules et de capacité de charriage annuelle moyenne, en mettant en lumière les effets des aménagements passés (endiguements, extractions, aménagements hydroélectriques). Le diagnostic fonctionnel est mené au sein de chaque tronçon homogène (TH), au sein d'une unité hydrographique cohérente (UHC), ainsi que le long des biefs, de barrage de retenue à barrage de retenue.

Les sédiments grossiers sont identifiés par des classes et des grandeurs granulométriques caractéristiques :

- Pour les classes granulométriques**, la granulométrie utilisée est celle qui avait été utilisée dans la thèse de Parrot (2015) : adaptation de la granulométrie de Wentworth (Gradistat, Blott & Pye, 2001). La granulométrie proposée par Malavoi (2001) d'après Wentworth, utilisée par ailleurs, est également rappelée (cf. §.2.2 ; Tableau 20).
- Pour les grandeurs caractéristiques**, on utilise généralement le D30, le D50, le D84, le D90 (diamètres non dépassés respectivement par 30, 50, 84, 90% du panel granulométrique) et le Dm (diamètre moyen). L'EGR (2000) disposait de données granulométriques par grands tronçons, établies par des mesures historiques de la CNR, et caractéristiques de la situation avant aménagement (cf. §.3.2.1). Vázquez-Tarrío (2018, 2020) disposait des données granulométriques acquises dans le cadre de la thèse de Parrot (2015), en fond de lit et sur bancs (306 prélèvements entre l'amont de Génissiat et la mer, réalisés entre août 2012 et septembre 2013 ; cf. 3.2.1 / Carte 7).

L'approche sur la dynamique des sédiments est menée à la fois pour la situation avant aménagement et pour la situation actuelle. Les données disponibles sont issues de l'EGR (2000) et des travaux de Vázquez-Tarrío (2018) dans le cadre de l'OSR4, et qui ont été actualisés en 2020 pour le Haut-Rhône.

Pour la situation avant aménagement hydroélectrique

- Le débit de début d'entraînement** avant aménagement est fourni par l'EGR (2000) à partir d'un calcul de remobilisation des particules représentatives (D50) (cf. Tableau 27). L'hypothèse sous-tendue pour ce calcul est que le Rhône présentait avant aménagement un équilibre entre la charge solide en mouvement et le stock alluvial composant le lit. La connaissance du débit de début d'entraînement permet, à partir de la courbe des débits classés du Rhône total et du RCC, d'estimer le nombre de jours de transport solide par année avant aménagements (cf. Figure 127).
- La capacité de charriage annuelle moyenne** est estimée à l'aide d'une formule de transport solide appliquée aux différents débits de la courbe des débits classés. L'EGR a utilisé la formule de transport solide de SOGREAH / Lefort (1991) et une granulométrie de Wolman représentative par grands tronçons. Vázquez-Tarrío (2018, 2020) a utilisé la formule de Recking (2013), retenue après tests de plusieurs méthodes, et la granulométrie de masse en fond du lit par prélèvement à la drague. A noter que la formule de transport solide de Recking simule un charriage total (sédiments grossiers et sables) et n'utilise pas la notion de débit de début d'entraînement qui est présente dans la formule de Lefort.

On rappellera que les calculs donnent une « capacité » de charriage et non pas forcément un charriage réellement observé. En effet, un calcul de capacité suppose que le transport solide s'opère à saturation, en échanges avec le fond du lit ; cela suppose que la rivière peut effectivement disposer des matériaux dans le lit pour subvenir au processus de charriage. Les estimations de capacité devraient donc faire l'objet d'une validation pour être affichées comme des flux de charriage.

Tableau 27 : Débits de début d'entraînement et fréquences de transport des graviers (d'après EGR, 2000, et formule de Lefort)

N°UHC	Nom UHC	Débit de début d'entraînement dans la partie courante du RCC	Fréquence de charriage avant aménagement (jours/an)	Fréquence de charriage actuelle (jours/an)	Ratio
01-SUI	Suisse (Seujet)	-	-	-	-
01-SUI	Suisse (Verbois)	-	-	-	-
02-CHP	Chancy-Pougny	-	-	-	-
03-GEN	Génissiat	-	-	-	-
04-SEY	Seyssel	-	-	-	-
05-CHA	Chautagne	392	139	1,1	126
06-BEL	Belley	406	153	2,2	70
07-BRC	Brégnier Cordon	422	146	2,6	56
08-SAB	Sault-Brénaz	-	-	-	-
09-VUL	Saint-Vulbas	-	-	-	-
10-ALY	Ain-Lyon*	440	225	22,0	-
11-PBN	Pierre-Bénite	1 880	47	2,2	21
12-VAU	Vaugris	-	-	-	-
13-PDR	Péage de Roussillon	1 746	58	4,7	12
14-STV	Saint-Vallier	1 639	66	4,7	14
15-BLV	Bourg-lès-Valence	1 757	58	1,1	53
16-BEA	Beauchastel	1 918	84	4,0	21
17-BLN	Baix Logis Neuf	1 830	95	4,7	20
18-MON	Montélimar	1 747	110	11,0	10
19-DZM	Donzère Mondragon	1 566	135	11,0	12
20-CAD	Caderousse	1 365	183	14,6	13
21-AVI	Avignon	-	-	-	-
22-VAL	Vallabrègues	1 297	200	15,7	13
23-ARL	Palier d'Arles	-	-	-	-
24-GRH	Grand Rhône	-	-	-	-
25-PRH	Petit Rhône	-	-	-	-

Sources données : EGR (2000), excepté :

* La valeur de 440 m³/s est donnée par Petit et al. (1996), elle a été confirmée entre 350 et 500 m³/s selon secteurs par BURGEAP (2017). L'occurrence d'un débit de 350 m³/s est de 28j/an sur 1992-2006 (BURGEAP, 2017). Pour 440 m³/s, l'occurrence de 40j/an donnée par Petit est corrigée à 22 j/an

Pour la situation après aménagement hydroélectrique

- Le débit de début d'entraînement** après aménagement est donné par l'EGR (2000) à partir du même calcul de remobilisation des particules représentatives (D50). En effet, l'EGR suppose que la granulométrie en transit est identique avant et après aménagement. Par contre, la fréquence du débit de début d'entraînement est réduite dans les RCC du fait du débit dérivé vers le canal usinier. La connaissance du débit de début d'entraînement permet, à partir de la courbe des débits classés du Rhône total et du RCC, d'estimer le nombre de jours de transport solide par année avant aménagements (cf. Figure 127, Tableau 27).
- Capacité moyenne annuelle de charriage :**
 - La capacité de charriage annuelle moyenne s'exprime en m³/an** et provient de 2 sources de données : EGR (2000) et d'après les calculs de Vázquez-Tarrío (2018), actualisés en 2020 pour le Haut-Rhône. Ces 2 sources considèrent d'une part les pentes de lignes d'eau en crue modifiées par les aménagements et d'autre part l'évolution de l'hydrologie dans les tronçons court-circuités (cf. courbes des débits classés / Figure 127). Un Rhône court-circuité voit ainsi sa capacité de charriage annuelle chuter simplement par la diminution des débits morphogènes (débits supérieurs au seuil de mise en mouvement) ; cette capacité peut encore diminuer si la granulométrie pris en considération est plus grossière (phénomène de pavage) ;

- **L'EGR (2000)** avait calculé une capacité de charriage moyenne par grands tronçons, avec une granulométrie moyenne représentative de la charge de fond ;
 - **Vázquez-Tarrío (2018, 2020)** a réalisé un travail plus fin avec une densité de 1 pt/100 m dans le Haut-Rhône et 1 pt/500 m dans le Rhône aval ; par ailleurs, la granulométrie utilisée dans les calculs est celle observée en fond de lit dans chaque tronçon, qui est potentiellement différente de celle qui est réellement en transit (en cas de lit pavé par exemple). Ainsi, la capacité de charriage annuel estimée caractérise la « capacité de charriage par remobilisation de la charge de fond locale » ;
- Cette hypothèse de calcul est importante car le calcul mené répond à l'objectif précédent et ne permet pas dans l'absolu d'évaluer une « capacité de charriage du tronçon considéré basé sur une granulométrie en transit ». Cette hypothèse peut avoir 2 incidences qui seront prises en compte dans les interprétations :
- Dans les RCC dont la granulométrie de fond de lit est pavée ou montre une tendance au pavage, la granulométrie sera grossière et la capacité de charriage calculée pourra être sous-estimée par rapport à l'emploi d'une granulométrie qui serait en transit, ou « travelling bedload » (apportée par un affluent par exemple) ;
 - Dans les retenues dont la granulométrie est fine (sables, limons), la capacité de charriage estimée sera représentative pour ces matériaux fins mais ne sera pas adaptée pour mettre en évidence le piégeage dans la retenue des matériaux grossiers provenant de l'amont.
- **Les estimations sont des estimations théoriques non validées.** Il est donc nécessaire de prendre en considération les intervalles de confiance (borne inférieure, borne supérieure sur le graphique) et d'utiliser les résultats avec précaution. Aussi, au vu de ces résultats, de ceux de l'EGR et de notre propre expertise, nous proposons une valeur caractéristique de la capacité de charriage total représentative pour chaque tronçon homogène (TH) ;
 - **Grâce aux travaux de Recking (2016) sur le modèle GTM (Generalized Threshold Model)**, une capacité de charriage annuelle peut être répartie par fractions granulométriques. Ainsi, Vázquez-Tarrío a adapté le modèle GTM et ses paramètres de calibration au Rhône afin de quantifier les capacités de charriage par classes de taille granulométrique. Le flux total est décomposé en flux de sables (< 2mm), de graviers fins-moyens (2-16 mm), de graviers grossiers et cailloux (>16 mm). Bien que les valeurs des capacités de charriage totales ne soient pas validées, cette analyse reste intéressante pour identifier les discontinuités pour chacune des classes granulométriques, notamment pour les flux grossiers qui conditionnent la structuration et la diversité du lit.

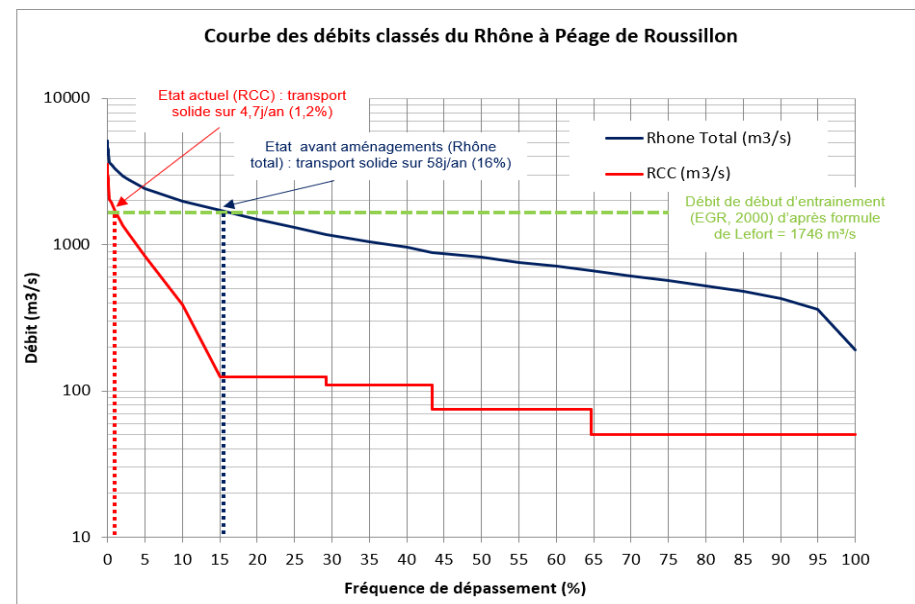


Figure 127 : Courbe de débits classés à Péage de Roussillon pour le Rhône total et courbe théorique pour le RCC de Roussillon (d'après données aux stations hydrométriques et loi de répartition de débits au barrage de retenue)

• Le diamètre maximal remobilisable (Dmax)

- Le Dmax remobilisable correspond à la taille maximale des particules sédimentaires remobilisables pour des conditions hydrauliques données, en l'occurrence pour les crues Q2, Q5, Q10. Il est issu d'un calcul basé d'une part sur la pente d'énergie et le rayon hydraulique, qui donne accès à la contrainte de cisaillement, et d'autre part la contrainte critique de Shields pour les conditions de débit précédentes.
- Les calculs de contrainte de cisaillement ont été calculés par Vázquez-Tarrío et al. (OSR, 2018, 2020) sur la base des résultats du modèle numérique MAGE ; ces contraintes permettent de calculer la valeur de Dmax pour Q2, Q5 et Q10, en faisant des hypothèses sur la valeur de la contrainte critique (paramètre de Shields). Deux valeurs sont prises pour ce paramètre, ce qui permet de définir une fourchette de résultats : 0,03 est une valeur communément retenue pour une granulométrie homogène peu compactée (Parker, 2003) ; 0,06 est une valeur relativement élevée caractérisant un lit à granulométrie étendue, avec des matériaux imbriqués, compactés et/ou présentant une tendance au pavage ;
- Les calculs sont menés à partir des résultats des modélisations hydrauliques sous le logiciel MAGE de l'INRAE. Compte tenu des hypothèses de construction du modèle (1D), celui-ci ne représente pas de façon satisfaisante les zones inondables et lignes d'eau sur le Haut-Rhône et seuls les résultats pour Q2 sont affichés entre Seyssel et Lyon. Sur le Rhône aval, les résultats pour Q2, Q5, Q10 sont affichés, et ceux de Q5 et Q10 doivent être pris avec réserve dans les Vieux Rhône, notamment dans leur linéaire courant amont ;
- Cette analyse du Dmax permet d'identifier les discontinuités potentielles dans le transit sédimentaire et les tailles de particules concernées sous forme de classes granulométriques (sables, graviers / cf. classification Gradistat) plus que sous forme de valeurs précises.
- Les analyses sont menées à l'échelle des tronçons homogènes (TH) de l'UHC, en intégrant le TH amont de l'UHC située immédiatement en aval. Les tronçons homogènes (TH) sont également éventuellement re-segmentés en sous-tronçons.
- Dans un cas idéal de lit équilibré entre la charge de fond et la charge en transit, le Dmax issu du calcul précédent pour le débit de plein bord (généralement de l'ordre de Q2 pour une rivière non aménagée) devrait être d'un ordre de grandeur similaire au diamètre maximal observable dans la granulométrie du fond de lit, dont une valeur proche est par définition le D90 de chaque point de suivi granulométrique. Ainsi, il peut être pertinent par la suite de comparer les valeurs de Dmax calculées avec les D90 observables dans le lit.

Les calculs de Dmax sont menés selon les principes suivants :

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

Et avec :

- τ : contrainte de cisaillement (N/m²) fournie par Vázquez-Tarrío (2018, 2020)
- 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 : critère de Shields critique
- R_h : rayon hydraulique (m) estimé à partir de la géométrie et des lignes d'eau MAGE
- i : pente d'énergie de la ligne d'eau (m/m) estimée à partir des lignes d'eau MAGE

Compte tenu des incertitudes sur le critère de Shields et en l'absence de données de validation, les calculs ont été interprétés en termes d'ordres de grandeur. Pour une lecture adaptée des graphiques, l'ordre de grandeur qui en est extrait est lu entre les courbes $\theta = 0,03$ et $\theta = 0,06$ pour un même débit, en adaptant selon l'état morphologique du lit : par exemple, on préférera une valeur plus proche de $\theta = 0,03$ lorsque le charriage est avéré et continu comme pour le canal de Miribel (10-ALY) et une valeur plus proche de $\theta = 0,06$ dans un RCC présentant une tendance au pavage.

5.1.2 Taille maximale des particules remobilisables

► Analyse globale des résultats de Dmax

La taille maximale des particules remobilisables, ou diamètre maximal remobilisable (Dmax), a été estimée à partir des travaux de Vázquez-Tarrio (2018, complété en 2020) sur les forces tractrices (cf. Figure 128). Comme vu précédemment les lignes d'eau pour Q5 et Q10 ont été écartées sur le Haut-Rhône.

La Figure 128 développe les valeurs de Dmax sur l'ensemble du linéaire du Rhône. Cette vue d'ensemble apporte les éléments de commentaires suivants :

- Le profil en long montre une extrême variabilité des résultats, sans tendance significative entre l'amont et l'aval. Le profil en long est marqué par des fluctuations et des discontinuités sédimentaires liées en particulier aux retenues des ouvrages hydroélectriques : classiquement, pour la crue biennale (Q2) ou des crues supérieures (Q5, Q10), des particules de type graviers (20 à 40 mm) peuvent être remobilisées dans les RCC, avant que dans la retenue située en aval, la capacité de mobilisation de ces particules chute, généralement à moins de 10 mm.
- Le profil en long montre l'effet majeur de grandes retenues comme celle de Génissiat (03-GEN), Sault-Brénaz (08-SAB) ou encore les retenues de Champagnieux (07-BRC), de Bourg-lès-Valence (15-BLV), de Montélimar (18-MON), de Caderousse (20-CAD), Avignon (21-AVI) ou Vallabrègues (22-VAL) qui semblent avoir les incidences les plus marquées sur les continuités sédimentaires.
- A contrario, certains secteurs présentent des valeurs de mobilisation de particules relativement élevées, comme les linéaires entre Chancy-Pougny et Génissiat (03-GEN) (40 à 90 mm), en aval de la confluence avec l'Ain (10-ALY) jusqu'à l'entrée de Lyon (40 à 80 mm). Certains Vieux Rhône du bas Rhône présente également une mobilisation soutenue pour des particules de 30 à 50 mm comme sur Montélimar (18-MON) ou Donzère-Mondragon (19-DZM). On notera l'augmentation locale du Dmax dans le Palier d'Arles, qui démontre la capacité de ce secteur à évoluer en érosion progressive, sous le dernier barrage de la chaîne hydroélectrique (barrage de Vallabrègues / 22-VAL) ; dans le même registre, le RCC de Chautagne montre des valeurs de Dmax relativement élevées pour Q2 (40 à 60 mm) qui sont en cohérence avec le transport solide et le déstockage de ce tronçon.
- Au-delà de la présence et des effets des retenues, ce profil en long des Dmax est à rapprocher des pentes moyennes du Rhône qui se retrouvent majorées entre St-Vallier (14-STV) et Donzère-Mondragon (DZM) comme analysées en partie §.3.2.4 (cf. Figure 91). Dans une certaine mesure, ce profil en long des Dmax illustre les secteurs naturels de discontinuité sédimentaire issus du passé géomorphologique de la vallée : anciens ombilics glaciaires des Basses Terres du Haut-Rhône (07-BRC, 08-SAB), influence de la remontée du niveau marin sur le delta (23-ARL, 24-GRH) et la confluence avec la Durance (21-AVI). Les aménagements et leurs retenues sont venus amplifier ces héritages. A contrario, la zone de divagation de Miribel Jonage n'apparaît pas comme une zone de ralentissement des flux sédimentaires, ce qui peut s'expliquer par l'aménagement chenalisé et encaissé du canal de Miribel qui facilite la remobilisation des sédiments.
- Une analyse détaillée est rédigée dans chacune des fiches UHC. Une analyse représentative plus fine est illustrée plus loin, à l'appui du travail de Dépret et al. (2019) dans le cadre de l'OSR4.

► Comparaison avec la granulométrie en place

Comme indiqué précédemment, un lit fluvial idéalement en équilibre entre la charge de fond en transit et la composition du fond devrait présenter une convergence entre les valeurs calculées pour Dmax avec une crue biennale (Q2) et les D90 observés sur site. Pour mémoire, cette hypothèse vient du fait que la capacité pleins bords d'un cours naturel est de l'ordre de la crue annuelle à biennale (Malavoi & Bravard, 2010).

La Figure 128 superpose les valeurs calculées de Dmax avec les granulométries de fond de lit exploitées par Parrot (2015) et Vázquez-Tarrio (2018, 2020) (valeurs de D50 et D90). Visuellement, le graphique montre que la plupart des points de valeurs D90 sont supérieurs, voire très supérieurs (facteur 3 et plus) par rapport au Dmax calculé pour Q2. Cela signifie donc que pour des crues biennales (Q2), le Rhône, en particulier dans ses sections court-circuitées, n'est pas en mesure de remobiliser la granulométrie en place. Des écarts à cette conclusion sont bien sûr observable UHC par UHC, selon leurs conditions propres (cf. fiches UHC).

Les estimations de Dmax pour la crue décennale (Q10) sur le Rhône en aval de Lyon (lorsque les résultats du logiciel MAGE en aval de Lyon sont considérés comme fiables) montrent que le Dmax calculé pour de telles conditions hydrauliques ne permet pas d'atteindre non plus les valeurs de D90. Cette analyse, quoique incomplète compte tenu des lignes d'eau disponibles, démontre que pour la plupart des secteurs, il est nécessaire d'observer une crue très supérieure à la crue décennale pour que l'écoulement soit en mesure de remobiliser la granulométrie en place. Ce constat rejoint les analyses de granulométries menées par Parrot (2015) et qui concluent à la configuration pavée du panel granulométrique du lit des Vieux Rhône (cf. §.3.2.4 ; cf. Figure 92).

Afin d'analyser plus précisément les constats précédents, une corrélation a été menée entre les Dmax calculés et la granulométrie observée sur site (D50 et D90). S'il existait une parfaite corrélation entre les 2 types de grandeur, le Dmax devrait être du même ordre de grandeur que le D90 de la granulométrie en place ; ainsi la corrélation entre ces deux grandeurs devrait être représentée par la courbe $y=f(x)=x$.

Or, en dehors de quelques exceptions, l'analyse confirme que, même pour la crue décennale, la très grande majorité des matériaux en place dans le lit est plus grossière que le Dmax, avec des facteurs parfois importants :

- Pour le calcul avec Q2 : pour le D90, ratio de 3 à 6 ; pour le D50, ratio de 2 à 4 ;
- Pour le calcul avec Q10 : pour le D90, ratio de 2,5 à 5 ; pour le D50, ratio de 1,5 à 3 ;

Ces calculs et corrélations confirment ainsi la tendance au pavage des lits des Vieux Rhône déjà mise en évidence par Parrot (2015) (cf. Figure 92) avec une comparaison des granulométries de surface et de sub-surface.

Par la suite, les analyses sont menées sur deux UHC très différenciées, afin de préciser les enseignements.

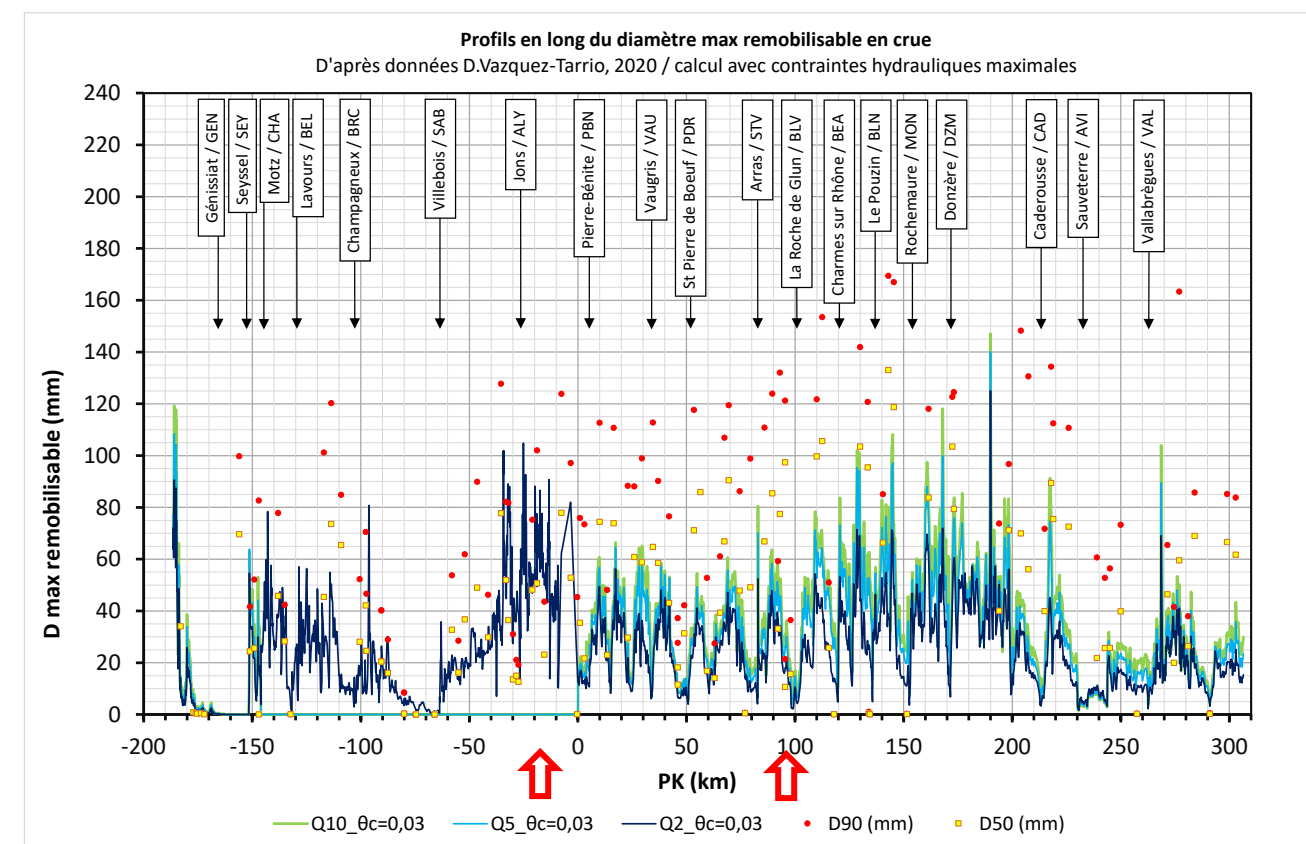


Figure 128 : Profil en long du Dmax remobilisable et comparaison avec la granulométrie en place

Les 2 flèches rouges localisent les 2 cas particuliers de Bourg-lès-Valence et Jons / Canal de Miribel étudiés par la suite

Dépret démontre ainsi que dans le cas d'une réinjection sédimentaire au sein de la retenue, pour des matériaux issus d'un dragage sur le Doux qui débouche en queue de retenue, 75 % des volumes clapés ne seraient pas remobilisables pour une crue cinquantennale (Q50). Ce constat est confirmé par la granulométrie héritée au sein de la retenue, avec des valeurs de D90 supérieures à 120 mm qui ne peuvent être remobilisées (cf. Figure 130). Par ailleurs, Dépret démontre que la continuité sédimentaire pourrait potentiellement être améliorée dans les retenues en procédant à un abaissement préalable du niveau de la retenue (cote de 114 mNGF au lieu de 117,1 mNGF au PK98,3). Dans le cadre du scénario 1 qui est le scénario le plus efficace, les précédentes tailles maximales de particules seraient relevées de 2 à 18 mm en Q2 et de 14 à 56 mm pour Q50, ce qui serait toutefois insuffisant pour remobiliser toutes les particules réinjectées. Par ailleurs, les impacts de l'abaissement du plan d'eau sur les usages, notamment sur l'hydroélectricité et la navigation aurait à être analysés pour préciser la faisabilité de l'action.

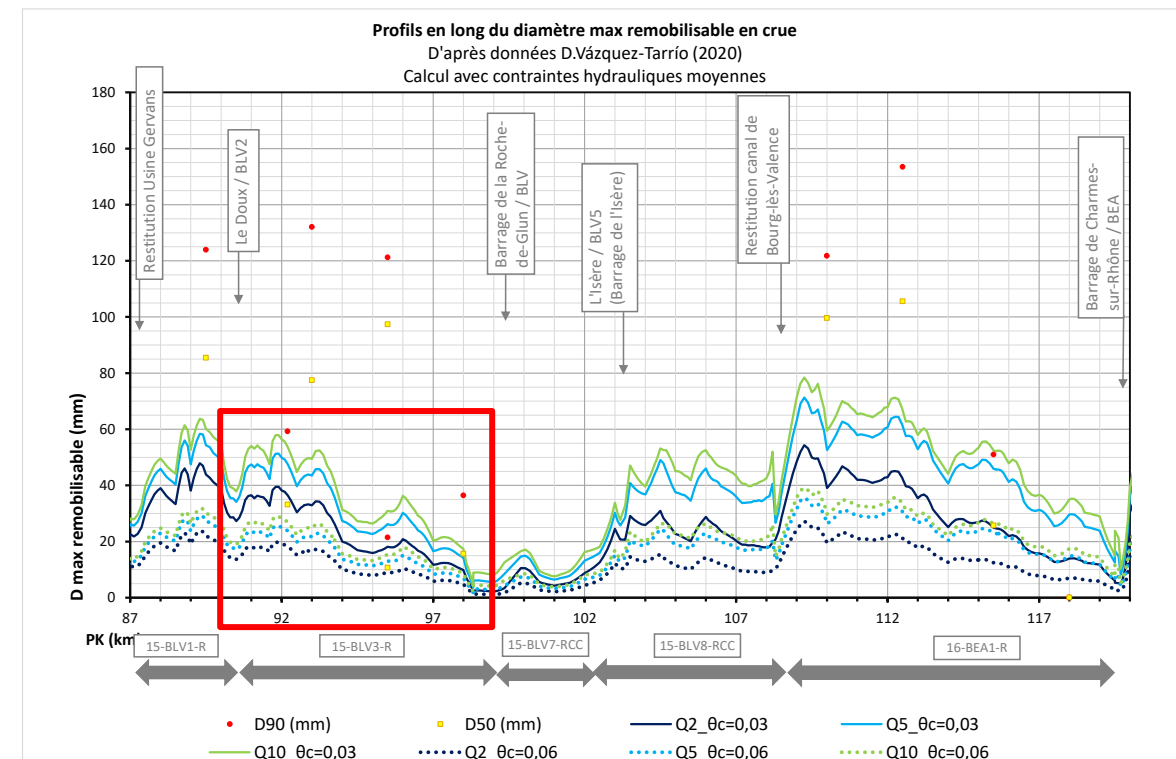
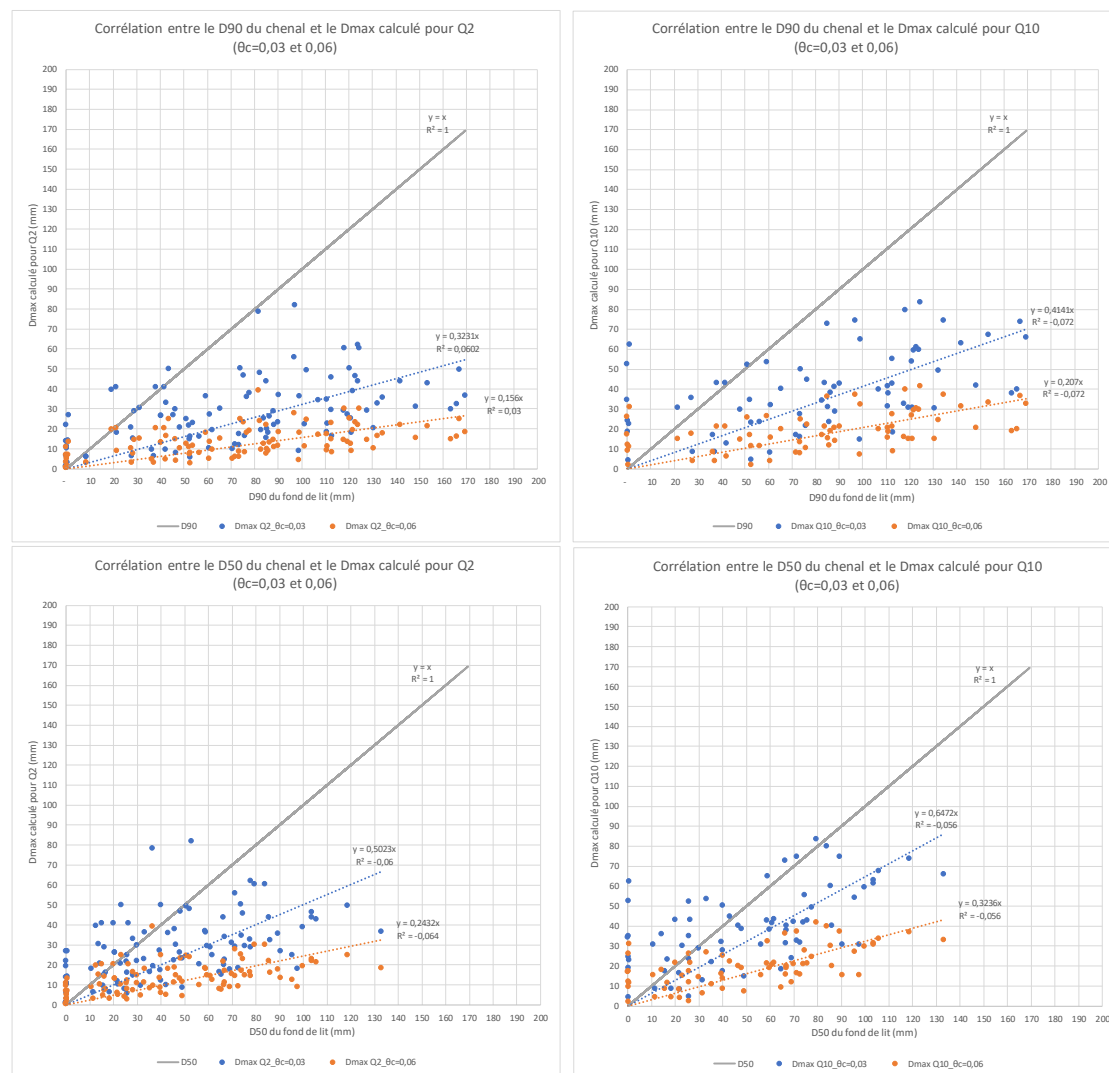


Figure 130 : Profil en long du diamètre maximal remobilisable (Q2, Q5, Q10) pour Bourglès-Valence (le cadre correspond à l'emprise de la Figure 131 et montre la cohérence des calculs)

Figure 129 : Corrélations entre la granulométrie in situ (D50, D90) et les Dmax calculés pour Q2-Q10

► Exemple d'analyses locales différenciées

Deux exemples différenciés sont pris pour illustrer un premier cas de discontinuité sédimentaire à travers les travaux de Dépret et al. (2019) pour la retenue de Bourglès-Valence (15-BLV) qui ont été reproduits dans le cadre de la présente étude et développés pour l'ensemble des UHC, et à travers un second cas au contraire de relative continuité sédimentaire sur le canal de Miribel Jonage (10-ALY).

• Cas de la retenue de Bourglès-Valence

Les calculs de mobilité (cf. Figure 130) montrent qu'à l'approche de la confluence avec le Doux, les particules inférieures à 30 mm en Q2 et à 40-50 mm en Q10 sont remobilisées. En aval du Doux, le Rhône perd progressivement sa capacité de remobilisation jusqu'au barrage de La-Roche-de-Glun (PK99,5). Ainsi, d'après les forces tractrices calculées par Vázquez-Tarrio (2018), les sédiments de taille inférieure à quelques millimètres pour Q2 et à 10 mm pour Q10 sont piégés progressivement dans la retenue.

Ces résultats sont cohérents avec les calculs de Dépret et al. (2019 ; cf. Figure 131) réalisés dans des conditions similaires et qui donnent des ordres de grandeurs cohérents : 1 à 2 mm en Q2 ; 10 à 14 mm pour Q50 en fonction du panel granulométrique (au PK99,1, avec $\theta_c=0,03$). On notera que les calculs pour Q50 issus de MAGE doivent être pris avec précaution (cf. §.5.1.1). Les mesures granulométriques in situ indiquent que la retenue est principalement constituée de graviers moyens (D50=11 mm) à très grossiers (D50=97 mm) sans logique de diminution de la taille du diamètre (Parrot, 2015) et sans possibilité de remobilisation.

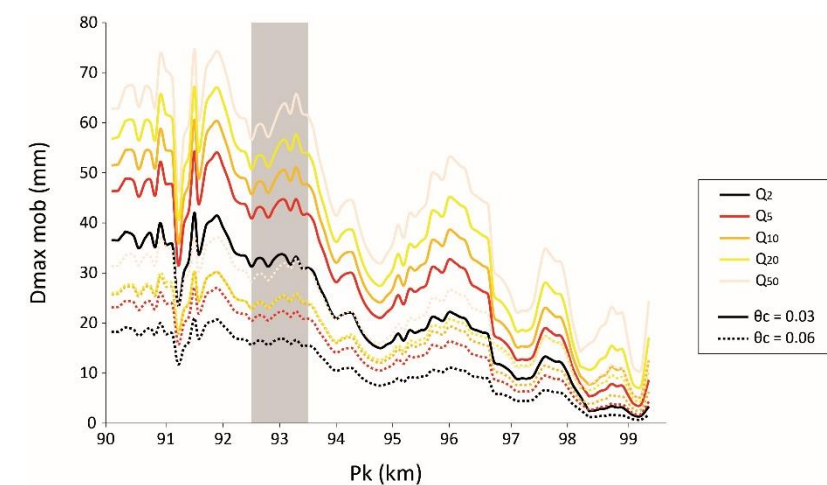


Figure 131 : Profil en long du diamètre maximal remobilisable (Q2 à Q50) pour Bourglès-Valence (Dépret et al, 2019)

Cas de la retenue de Jons et du canal de Miribel

Dans le Canal de Miribel (ALY5 et ALY6), la continuité des particules inférieures à 40 mm est assurée en crue biennale (Q2) (cf. Figure 132), y compris au passage du barrage de Jons et ce, jusqu'à la fosse de la Feyssine (ALY8). Par tronçons, des particules d'une taille supérieure à 50-60 mm peuvent transiter. En effet, le caractère chenalisé du Canal de Miribel favorise la migration des sédiments vers l'aval. Les valeurs de Dmax sont relativement proches des D90 observés dans le canal (43 à 102 mm), ce qui tend à valider les calculs et à confirmer la continuité sédimentaire au sein du canal de Miribel.

La continuité sédimentaire au passage du barrage de Jons et dans sa retenue n'est pas démontrée par le graphique ci-dessous pour toutes les granulométries car les calculs sont menés avec une pente d'écoulement correspondant aux vannes fermées. Or, d'après les bilans sédimentaires de BURGEAP (2017) et les suivis de transpondeurs RFID de l'OSR5 (2020 / cf. Figure 133), la retenue de Jons est globalement transparente aux sédiments et permet de faire transiter de l'ordre de 30 000 m³/an de matériaux grossiers (> 2 mm).

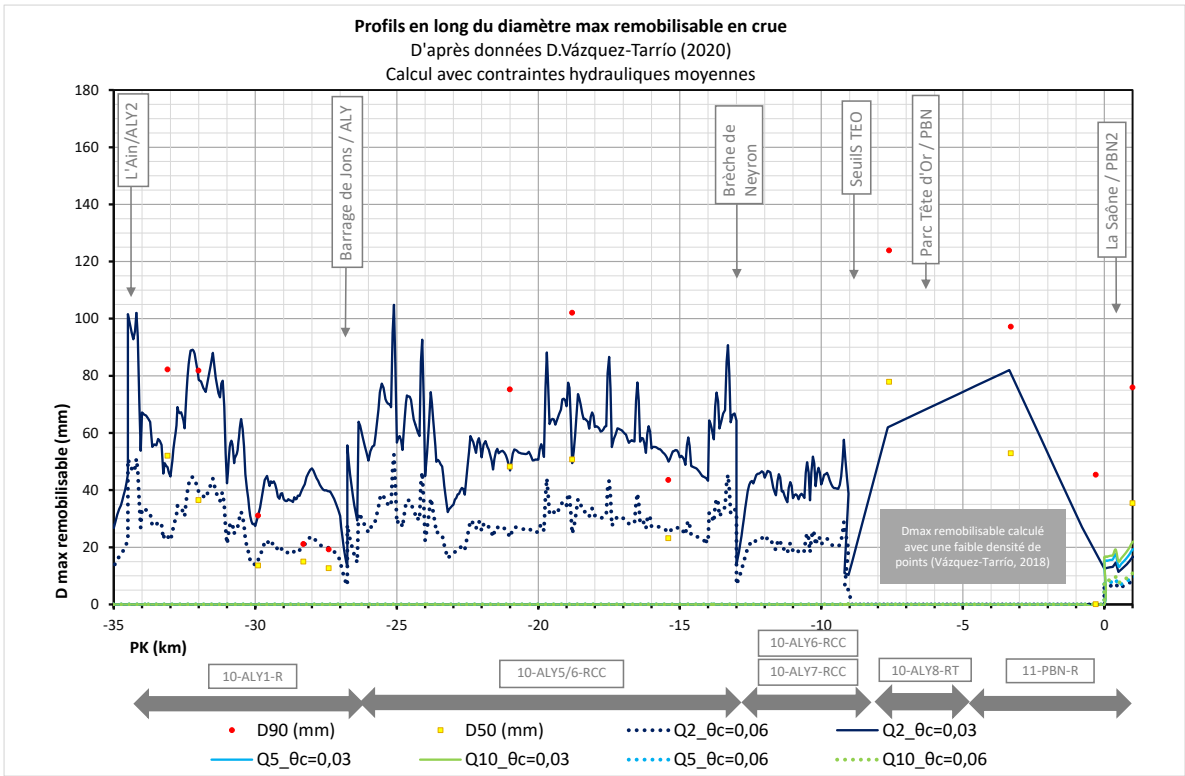


Figure 132 : Profil en long du diamètre maximal remobilisable (Q2) pour Jons / Canal de Miribel

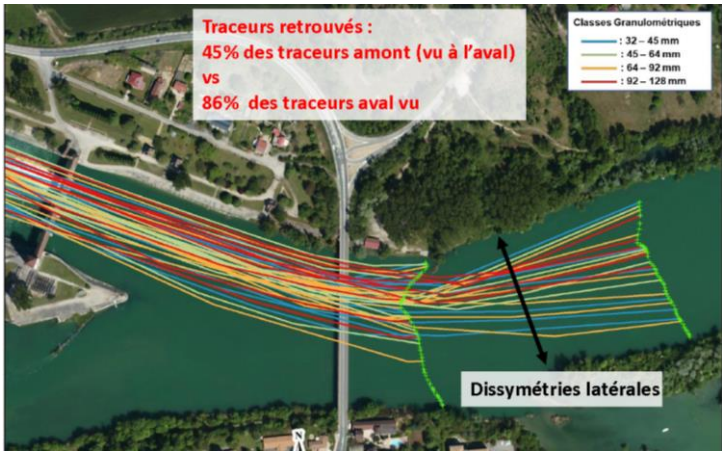


Figure 133 : Trajectoire des transpondeurs RFID à travers la retenue et le barrage de Jons (OSR5)

Détermination des Dmax à l'approche des barrages de retenue

Les valeurs de Dmax ayant été calculées sur l'ensemble du linéaire du Rhône (hors secteur suisse et Seyssel), il est possible de prolonger le travail de Dépret et al. (2019) sur l'ensemble des retenues afin de déterminer la taille maximale qui serait en mesure de franchir les barrages de retenues dans les conditions actuelles de gestion des ouvrages. L'analyse est restreinte au domaine de validité du modèle hydraulique MAGE, à savoir Q2 pour le Haut-Rhône, Q2 et Q10 pour le Rhône aval.

Comme Dépret, le Dmax minimal est observé en amont immédiat du barrage de retenue, pour Q2 et Q10. Chaque valeur est lue sur les graphiques Dmax fournis dans les fiches UHC.

Un Dmax moyenné sur les 3 km aval de la retenue est également évalué. Cette valeur permet de relativiser l'estimation ponctuelle au droit du barrage. Elle permet également de calculer un ratio qui est assimilé à la décroissance du Dmax (en mm/km) entre cette valeur moyenne sur 3 km et la valeur en amont immédiat du barrage. Plus le gradient est faible, plus la retenue présente un Dmax homogène dans les 3 derniers km (cas de Sault-Brénaz où le Dmax est faible et le reste) ; inversement, un gradient élevé montre une chute de la mobilité à l'approche du barrage.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 31 et la Figure 134.

Au final, cette analyse permet de mieux hiérarchiser les retenues entre elles par rapport à la l'analyse globale présentée au début de la partie §.5.1.2. Le classement est réalisé dans le Tableau 28 en fonction du Dmax en Q2 en amont immédiat du barrage. Le Dmax moyen sur les 3 km amont au barrage pour Q2 est ajouté en parallèle et permet d'apprécier qu'en dehors de quelques nuances, le classement en amont immédiat du barrage est respecté.

Le barrage de Jons (10-ALY) se confirme comme étant le barrage le plus transparent sur l'ensemble du fleuve ; il présente des Dmax de l'ordre du double des barrages qui suivent dans le classement (Pierre-Bénite, Baix-Logis-Neuf, Donzère-Mondragon).

A l'inverse, la retenue de Génissiat est connue pour ne faire transiter que les sables de l'ordre de 100 µm (0,1 mm). Les retenues de Sault-Brénaz, Avignon, Bourg-lès-Valence, Belley, Vallabrègues et Champagneux apparaissent comme les moins transparentes et ne peuvent transiter mieux que du sable grossier (2-3 mm) pour une crue biennale (Q2).

Tableau 28 : Classement des retenues en fonction du Dmax en Q2 en amont immédiat du barrage

Classement	UHC	Ouvrage	Dmax en amont immédiat du barrage pour Q2 (mm)	Dmax moyen sur les 3 km amont au barrage pour Q2 (mm)
1	10-ALY	Jons	15	40
2	11-PBN	Pierre-Bénite	8	20
3	17-BLN	Le Pouzin	7	20
4	19-DZM	Donzère	7	18
5	12-VAU	Vaugris	6	15
6	16-BEA	Charmes-sur-Rhône	5	12
7	20-CAD	Caderousse	5	11
8	05-CHA	Motz	4	15
9	13-PDR	St-Pierre-de-Bœuf	4	8
10	14-STV	Arras	4	10
11	18-MON	Rochemaure	4	12
12	07-BRC	Champagneux	3	9
13	22-VAL	Vallabrègues	3	8
14	06-BEL	Lavours	2	7
15	15-BLV	La-Roche-de-Glun	2	10
16	21-AVI	Avignon + Sauveterre	2	9
17	08-SAB	Villebois	1	1
18	03-GEN	Génissiat	0,1	0,1

Non étudiés : 01-Seujet-Verbois, 02-Chancy-Pougny, 04 - Seyssel

Tableau 29 : Evaluation des Dmax dans les retenues à l'approche des barrages pour Q2 et Q10

N°UHC	UHC	Ouvrage	Dmax remobilisable en crue à l'approche du barrage (mm)				Décroissance en mm/km pour Q2 (C-A)/3km	Décroissance en mm/km pour Q10 (D-B)/3km
			A- En amont immédiat du barrage pour Q2	B- En amont immédiat du barrage pour Q10	C- En moyenne sur les 3 km amont au barrage pour Q2	D- En moyenne sur les 3 km amont au barrage pour Q10		
01-SUI	Suisse (Seujet)	Seujet	ND	ND	ND	ND	ND	ND
01-SUI	Suisse (Verbois)	Verbois	ND	ND	ND	ND	ND	ND
02-CHP	Chancy-Pougny	Chancy-Pougny	ND	ND	ND	ND	ND	ND
03-GEN	Génissiat	Génissiat	0,1	ND	0,1	ND	1,0	ND
04-SEY	Seyssel	Seyssel	ND	ND	ND	ND	ND	ND
05-CHA	Chautagne	Motz	4	ND	15	ND	3,7	ND
06-BEL	Belley	Lavours	2	ND	7	ND	1,7	ND
07-BRC	Brégnier Cordon	Champagneux	3	ND	9	ND	2,0	ND
08-SAB	Sault-Brénaz	Villebois	1	ND	1	ND	0,0	ND
09-VUL	Saint-Vulbas	-	-	-	-	-	-	-
10-ALY	Ain-Lyon	Jons	15	ND	40	ND	8,3	ND
11-PBN	Pierre-Bénite	Pierre-Bénite	8	12	20	26	4,0	4,7
12-VAU	Vaugris	Vaugris	6	9	15	35	3,0	8,7
13-PDR	Péage de Roussillon	St-Pierre-de-Bœuf	4	6	8	10	1,3	1,3
14-STV	Saint-Vallier	Arras	4	7	10	17	2,0	3,3
15-BLV	Bourg-lès-Valence	La-Roche-de-Glun	2	10	10	20	2,7	3,3
16-BEA	Beauchastel	Charmes-sur-Rhône	5	10	12	27	2,3	5,7
17-BLN	Baix Logis Neuf	Le Pouzin	7	21	20	35	4,3	4,7
18-MON	Montélimar	Rochemaure	4	8	12	28	2,7	6,7
19-DZM	Donzère Mondragon	Donzère	7	20	18	45	3,7	8,3
20-CAD	Caderousse	Caderousse	5	8	11	18	2,0	3,3
21-AVI	Avignon	Avignon + Sauveterre	2	3	9	16	2,3	4,3
22-VAL	Vallabrègues	Vallabrègues	3	4	8	19	1,7	5,0
23-ARL	Palier d'Arles	-	-	-	-	-	-	-
24-GRH	Grand Rhône	-	-	-	-	-	-	-
25-PRH	Petit Rhône	-	-	-	-	-	-	-

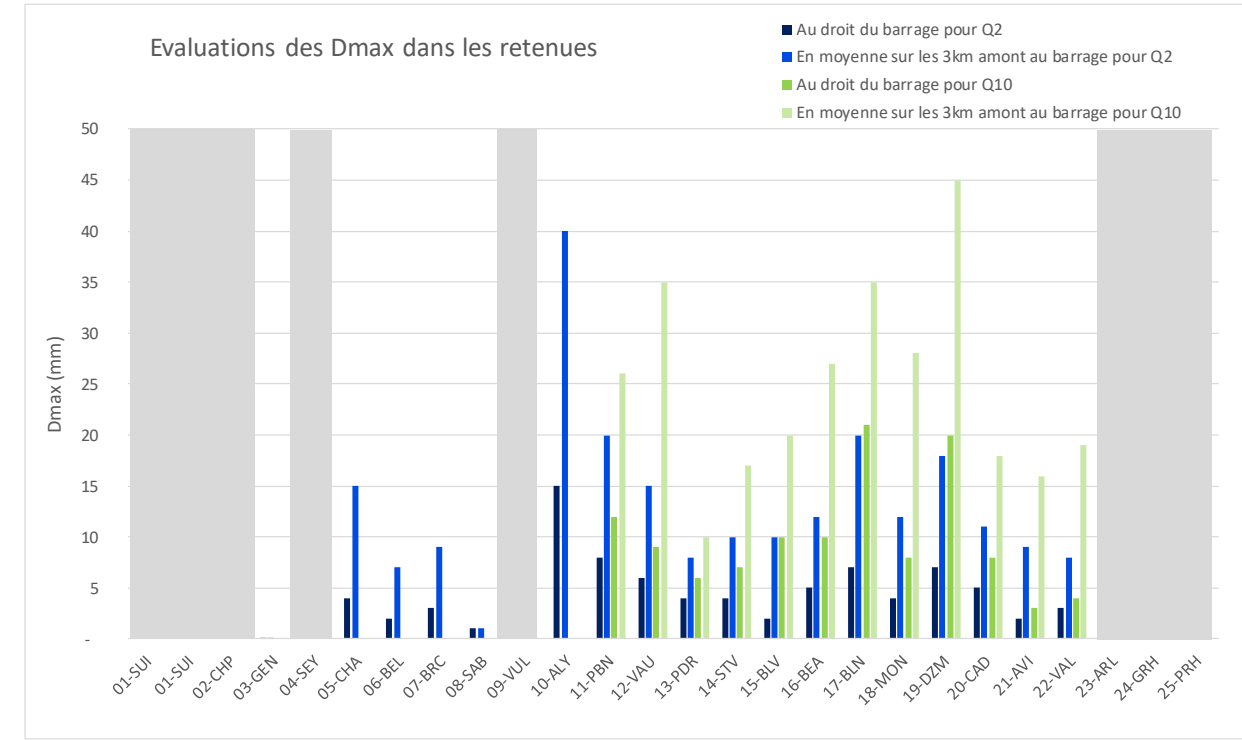


Figure 134 : Evaluation des Dmax dans les retenues à l'approche des barrages pour Q2 et Q10

5.1.3 Capacité de charriage moyenne annuelle

Analyse globale des résultats de capacité de charriage moyenne annuelle

Les résultats de capacité de charriage en moyenne annuelle ont été repris des travaux de Vázquez-Tarrío (2018, 2020) dans le cadre de l'OSR4. Comme expliqué en partie §.5.1.1, les calculs menés répondent à un objectif d'estimation de la « capacité de charriage par remobilisation de la granulométrie en place » et doivent être interprétés avec précaution. Des valeurs représentatives par tronçon ont été extraites de l'analyse et sont synthétisées dans le Tableau 31, avec également les résultats du modèle GTM.

La Figure 135 illustre les profils en long de la capacité de charriage moyenne annuelle, avec la capacité représentative par tronçon homogène (trait rouge), et les bornes supérieures et inférieures des calculs. La Figure 136 illustre la même donnée avec les flux de matériaux grossiers (> 2 mm), sans axe logarithmique de façon à bien faire ressortir les UHC qui présentent encore une activité sédimentaire en charge de fond.

Cette vue d'ensemble apporte les éléments de commentaires suivants :

- Comme pour les valeurs du Dmax, le profil en long montre une extrême variabilité des résultats sur le linéaire. Le profil en long est marqué par des fluctuations et des ruptures de capacité de charriage liées en particulier aux retenues des ouvrages hydroélectriques. Cette complexité s'est traduite dans la difficulté à affecter une valeur représentative et constante par tronçon homogène (TH). Ainsi, classiquement, un tronçon de RCC peut transiter de l'ordre de quelques milliers de m³ par an (11-PBN, 13-PDR) et jusqu'à 30 000 m³/an environ (canal de Miribel / 10-ALY ; RCC de Donzère / 19-DZM), avant que dans la retenue située en aval, la capacité de charriage chute à des valeurs théoriques de l'ordre de quelques centaines à quelques milliers de m³ par an, après avoir connu un maximum en aval de la restitution (10 000 à 20 000 m³/an). Dans tous les cas, ces valeurs absolues sont à prendre avec précaution car le calcul moyenné sur l'année, à partir de la courbe des débits classés, considère que les vannes du barrage de retenue ne sont jamais ouvertes ; les résultats obtenus seraient donc a priori des minorants des capacités réelles s'il est pris en considération l'ouverture occasionnelle du barrage lors de hautes eaux ou de crues.
- Le profil en long montre l'effet majeur des retenues de Verbois (01-SUI) (non étudiée), de Génissiat (03-GEN) qui rompt toute capacité de charriage, ainsi que des retenues de Lavours (06-BEL), de Champagneux (07-BRC), de Bourg-lès-Valence (15-BLV), et de Vallabrègues (22-VAL). On voit apparaître ici des retenues sensibles déjà identifiées pour le calcul de Dmax, sans toutefois identifier les retenues de Sault-Brénaz (08-SAB), de Montélimar (18-MON), de Caderousse (20-CAD), Avignon (21-AVI) qui sont également connues pour être sensibles à la sédimentation. Cela peut provenir du fait, comme expliqué dans la méthodologie, que les calculs de capacité de charriage ont été réalisés au sein de la retenue avec la granulométrie en place, et si celle-ci est fines, elle peut conduire à surestimer la capacité de charriage, ce qui impose donc des précautions dans l'analyse des résultats. A contrario, une retenue comme Jons (et probablement Chancy-Pougny) est transparente.
- Certains secteurs présentent des valeurs de capacité de charriage relativement élevées, comme les linéaires entre Chancy-Pougny et la queue de retenue de Génissiat (03-GEN) ou dans la retenue de Seyssel (jusqu'à 50 000 m³/an), en aval de la confluence avec l'Ain (10-ALY) (jusqu'à 35 000 m³/an), dans le Palier d'Arles (20 000 à 25 000 m³/an).
- Certains Vieux Rhône du bas Rhône présente également une capacité de charriage soutenue comme sur Beauchastel (16-BEA), Baix-Logis-Neuf (17-BLN), Montélimar (18-MON) ou Donzère-Mondragon (19-DZM) où les capacités atteignent 20 000 à 30 000 m³/an. Les capacités de charriage dans les RCC de Pierre-Bénite (11-PBN), Péage-de-Roussillon (13-PDR), St-Vallier (14-STV) peuvent atteindre plus puissivement 5 000 à 10 000 m³/an sur des tronçons réduits. Les RCC de Caderousse (20-CAD), d'Avignon (21-AVI) et de Vallabrègues (22-VAL), sauf sursaut local, présentent une capacité de charriage très faible de quelques milliers de m³/an. Sur le Haut-Rhône.
- Sur les RCC du Haut-Rhône, la situation est très disparate entre un RCC de Chautagne (05-CHA) où la capacité de charriage peut être bien calée sur les observations bathymétriques, de l'ordre de 7 000 m³/an, alors que les RCC de Belley (06-BEL) et de Brégnier-Cordon (07-BRC) n'ont pas de schéma continu et plafonnent au mieux et localement à des valeurs de 2 000 à 5 000 m³/an.
- On notera que le secteur de Rhône total de St-Vulbas (09-VUL) présente en théorie une capacité de charriage de l'ordre de 10 000 m³/an, mais le charriage réel ne s'effectue probablement pas à saturation du fait de l'absence de fourniture en matériaux grossiers depuis l'amont, sinon par

quelques érosions latérales et une légère incision du lit. Les apports du Rhône au droit de la confluence de l'Ain sont, en l'état actuel, tout au plus de quelques milliers de m³/an en charriage.

- Enfin, on peut noter le rôle parfois important de certaines queues de retenue qui récupèrent de la capacité de charriage au niveau des restitutions du fait des apports des débits turbinés. Cela se traduit par une forte capacité de charriage sur quelques kilomètres si le remous de la retenue aval n'est pas très prononcé. C'est le cas par exemple des queues de retenue de Péage de Roussillon (13-PDR / 10 000 m³/an), St-Vallier (14-STV / 15 000 m³/an), Bourg-lès-Valence (15-BLV / 10 000 m³/an, Donzère (19-DZM / 30 000 m³/an), Caderousse (20-CAD / 8 000 m³/an).
- Au-delà de ces considérations, le profil en long de capacité de charriage en moyenne annuelle démontre une nouvelle fois la discontinuité des configurations sur le Rhône, et met en exergue des grands tronçons avec des capacités de charriage majorées, toutefois entrecoupés par l'effet des retenues : en amont de Génissiat ; linéaire entre l'Ain et Lyon ; linéaire entre Beauchastel et Donzère-Mondragon, Palier d'Arles et possiblement Grand Rhône (où les calculs n'ont pas été menés).

► Résultats du modèle GTM et discussion

Comme expliqué en partie §.5.1.1, les travaux de Recking (2016) sur le modèle GTM (Generalized Threshold Model) permettent de calculer la répartition de la capacité de charriage moyenne annuelle selon les fractions granulométriques.

Dans les fiches UHC, le détail est donné sous forme de profil en long de capacité de charriage pour toutes ces classes granulométriques. Sur la Figure 136, les capacités de charriage grossiers (hors sables) ont été agglomérées afin de bien montrer la part de sable et la part de graviers-cailloux dans la capacité de charriage. Plus loin (cf. 5.2.3), cette méthode permet de réaliser une première quantification des flux moyens annuels de sables sur l'ensemble du continuum rhodanien.

La Figure 136 montre que la part des sables dans le charriage est très significative, entre 60 et 90% en général. Ainsi, lorsqu'il a été dit précédemment pour la capacité de charriage totale qu'un tronçon de RCC pouvait transiter de l'ordre de quelques milliers de m³ par an jusqu'à 30 000 m³/an environ, la part des matériaux grossiers diminue fortement : de négligeable à quelques centaines de m³ par an, jusqu'à 10 000 m³/an environ pour les RCC les plus compétents.

D'après ces résultats, le canal de Miribel (10-ALY) transiterait donc de l'ordre de 10 à 12 000 m³/an, le Vieux Rhône de Donzère-Mondragon de l'ordre de 8 000 m³/an et Palier d'Arles de l'ordre de 4 000 m³/an. Cependant, à ce stade, ces valeurs doivent être prises avec précaution car elles ne sont pas totalement validées par des observations de terrain. En effet :

- pour le canal de Miribel, les études les plus récentes (BURGEAP, 2017) confirment d'après un bilan sédimentaire complet que le charriage en éléments grossiers (avec une part de sables intégrée dans la matrice) serait de l'ordre de 30 000 m³/an, ce qui est 2,5 à 3 fois supérieur à l'estimation par le modèle GTM ;
- pour le RCC de Donzère-Mondragon, le RCC accumule depuis 2000 environ 26 000 m³/an, en grande partie dans les anciennes fosses d'extraction en aval de Pont-Saint-Esprit. Dans ces accumulations, il existe probablement une part non négligeable de matériaux fins, non intégrée dans le calcul de charriage ; aussi, même si l'ordre de grandeur est similaire à la capacité de charriage (30 000 m³/an), cette valeur de 26 000 m³/an contient une part significative de fines et de sables, probablement de l'ordre de 50%. Dans ce cas, les flux seraient supérieurs d'environ 2 fois l'estimation par le modèle GTM ;
- pour le Palier d'Arles, les dragages à la diffuence Petit Rhône / Grand Rhône qui portent essentiellement sur des graviers (20 mm) tendraient à démontrer que les apports sont de l'ordre de 40 000 m³/an en moyenne, soit 10 fois plus que l'estimation précédente.

Inversement, estimer qu'un RCC transite environ 1 000 m³/an en sédiments grossiers en moyenne annuelle, pour une capacité de charriage totale de 6 000 m³/an, comme ce serait le cas pour le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon, pourrait être un résultat plausible dans la mesure où le suivi RFID de la réinjection opérée sur ce RCC montre qu'il faut une crue quinquennale, donc un événement relativement peu fréquent, pour mobiliser toutes les granulométries réinjectées.

Cette analyse montre qu'à ce stade, les estimations de la répartition des matériaux grossiers par le modèle GTM sont encore au stade expérimental et ne peuvent être validées. Il est possible que les paramétrages opérés pour le modèle GTM donnent une part trop importante aux sables, et qu'il faille les ajuster en fonction de la nature du charriage (plutôt grossier, plutôt sableux) qui varie selon les tronçons considérés.

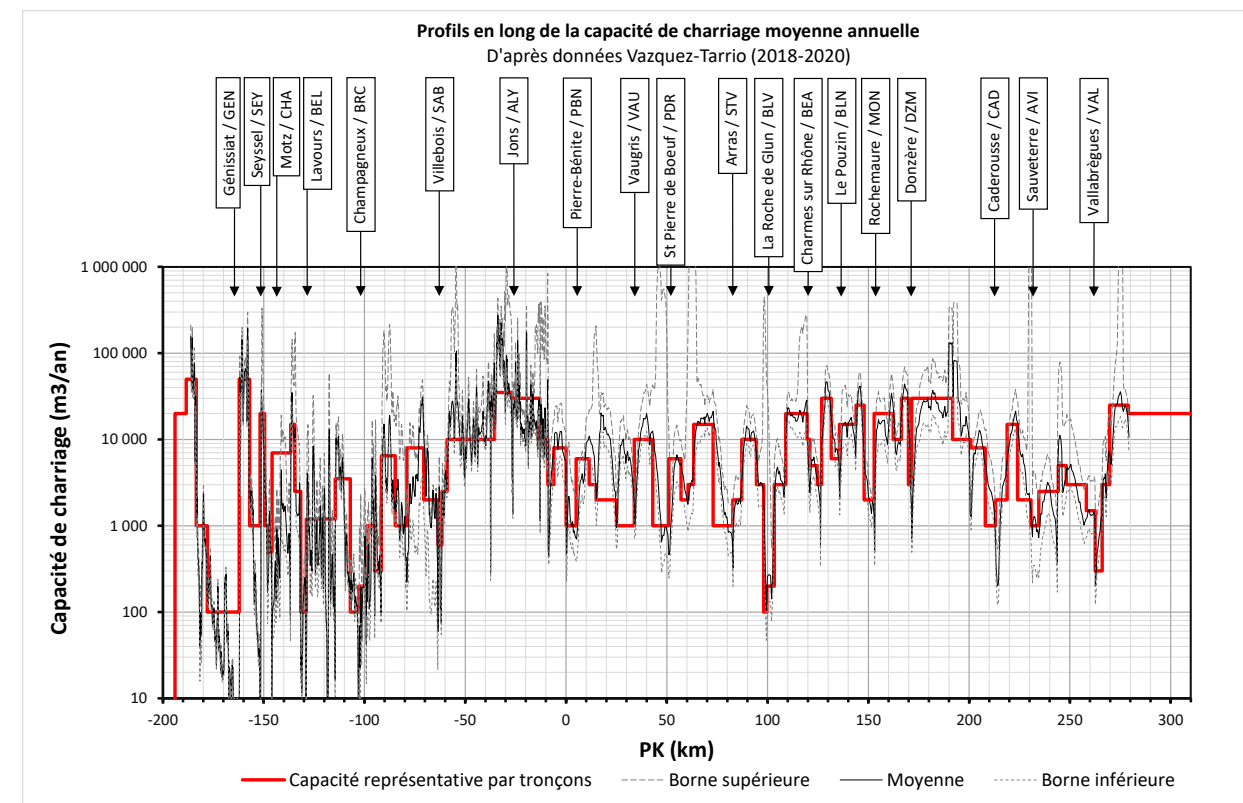


Figure 135 : Profil en long de la capacité de charriage moyenne annuelle

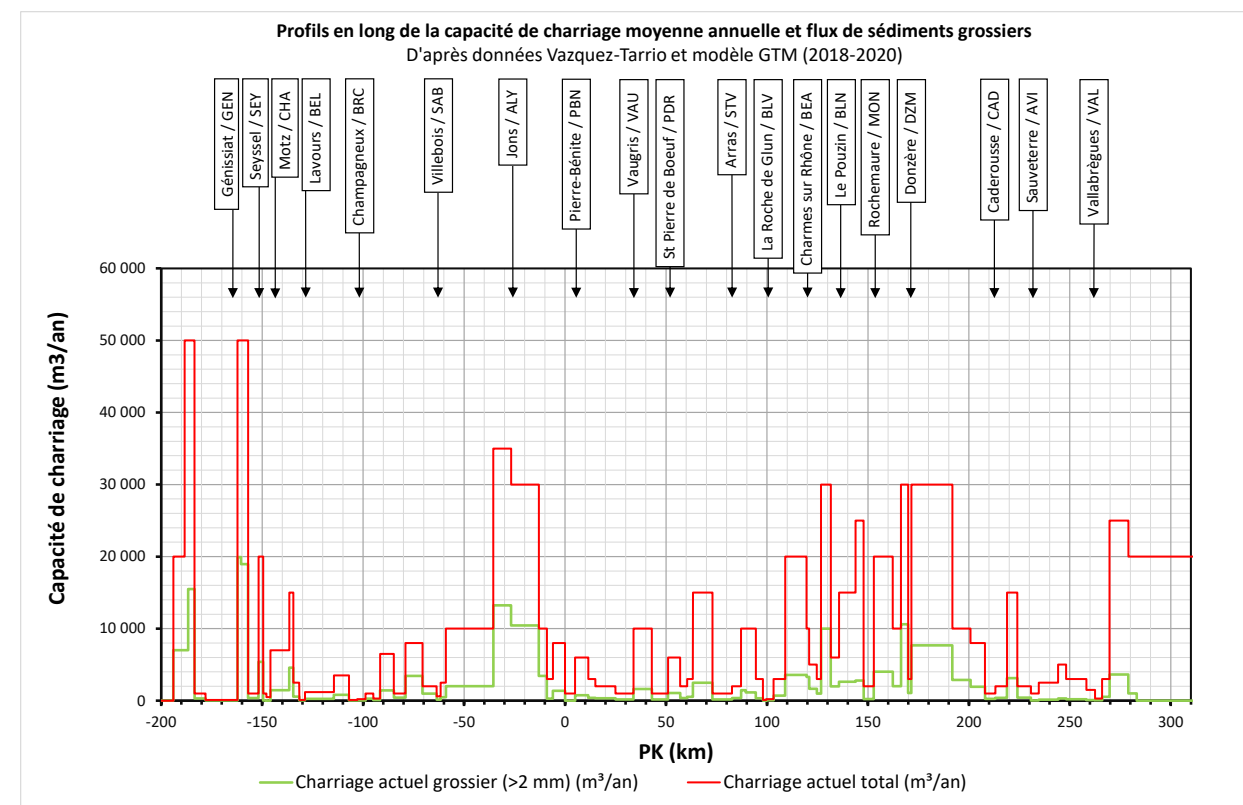


Figure 136 : Profil en long de la capacité de charriage moyenne annuelle et part des sédiments grossiers (> 2 mm) dans cette capacité

Par ailleurs, on peut rappeler que les calculs de capacités de charriage en moyenne annuelle sont basés sur la granulométrie en place pour chaque section, et que du fait de cette hypothèse de calcul, le résultat obtenu est une « capacité de charriage par remobilisation de la charge de fond locale ». Si la granulométrie est grossière du fait d'un pavage du lit, la capacité de charriage résultante sera minorée par rapport à un transit sédimentaire qui serait généré par les apports d'un affluent et qui « roulerait » sur la couche pavée (travelling bedload) sans s'y maintenir en fin de crue.

Ainsi, sous cette hypothèse, il est possible que les calculs de capacité de charriage soient sous-estimés dans les Vieux Rhône (à granulométrie grossière) et surestimés dans les retenues (à granulométrie fine). Les répercussions seraient similaires sur les résultats du modèle GTM.

Les calculs de sensibilité des résultats menés par Vázquez-Tarrío prennent tout leur sens (cf. graphiques de capacité de charriage dans les fiches UHC). Ils montrent que les bornes inférieures et supérieures des résultats sont fréquemment inférieures de 50% et supérieures de 200 % respectivement par rapport à la médiane.

Ainsi, comme dans toute estimation de transport solide, les résultats obtenus doivent être pris avec précaution sans plus d'éléments de validation. Les estimations pourront faire à l'avenir l'objet d'améliorations et de validations. Dans l'immédiat, les interprétations sont basées en grande partie sur l'expertise du bureau d'études et sur l'analyse relative des tronçons entre eux.

► Synthèse des capacités de charriage avant aménagements

Les capacités de charriage moyennes annuelles avant aménagement ont été estimées d'une part dans l'EGR (2000) sur la base de la formule de transport solide de Lefort (1991) qui n'inclut que les matériaux grossiers non sableux (> 2 mm), et d'autre part par Vázquez-Tarrío (2018) à partir de la formule de transport solide de Recking (2013) qui inclut le charriage total avec les sables.

Compte tenu de la connaissance du Rhône au début du 19^{ème} siècle, des incertitudes propres aux calculs de transport solide, et de la situation particulière au sortir du Petit Age Glaciaire qui a majoré la production sédimentaire, nous avons tenté d'affecter à chaque tronçon homogène et chacun des 18 affluents majeurs une valeur de charriage avant aménagements. Les valeurs affectées l'ont été dans l'esprit de l'EGR (2000), avec un charriage hors sables, qui permet de s'affranchir des choix de granulométries réalisés par Vázquez-Tarrío. Du coup, rigoureusement, les résultats qui sont illustrés par le profil en long de la Figure 137 ne sont pas totalement comparables.

Toutefois, si ces incertitudes sont mises de côté, les résultats pour la situation avant aménagements montrent que :

- Le transport solide par charriage le long du Rhône n'avait rien de continu entre Genève et la Méditerranée. Cela résulte de discontinuités naturelles expliquées en PARTIE B / §.1.2, et qui portent sur 3 principaux facteurs : des ombilics glaciaires dont le remplissage alluvionnaire n'était pas achevé sur le Haut-Rhône, des apports significatifs d'affluents (Arve, Ain, Isère, Durance), le rehaussement du fond marin depuis la dernière glaciation qui a contribué à former le delta du Rhône et diminué les pentes en aval de Donzère-Mondragon ;
- Ces flux historiques étaient globalement corrélés avec la pente du lit : faible dans les ombilics du Haut-Rhône ou dans le delta, plus élevés dans le Bas Rhône à mesure que les affluents contribuaient à ce charriage ;
- Sur le Haut-Rhône, les flux démarraient à 100 000 m³/an environ avec les apports de l'Ain (01-Sui), se prolongeaient dans les gorges de Génissiat (03-GEN), avant de chuter dans les Basses Terres de Brégnier-Cordon, provoquant ainsi des dépôts, des tris granulométriques et des divagations du lit (cf. fiche UHC#07-BRC). Un sursaut de capacité de charriage existait probablement au passage du verrou rocheux de Sault-Brénaz (08-SAB) mais sans se traduire par un charriage réellement majoré. Le Rhône total de St-Vulbas (09-VUL) présentait a priori les mêmes caractéristiques qu'actuellement, avec de l'ordre de 10 000 m³/an en capacité de charriage ;
- L'Ain contribuait à hauteur de 100 000 m³/an environ, et ses flux étaient progressivement amortis dans la zone de divagation de Miribel-Jonage pour tomber à environ 20 000 m³/an dans la traversée de Lyon. Le différentiel entre ces 2 valeurs représente donc du stockage ; sous ces hypothèses, un calcul d'ordre de grandeur peut montrer que l'accumulation de sédiments sur l'île de Miribel Jonage a été en moyenne de 3 à 4 m depuis la dernière glaciation, ce qui est une valeur plausible ;

- La capacité de charriage de 20 000 m³/an est prolongée en aval de Lyon et augmente progressivement avec la pente et la contribution des affluents (Doux, Isère qui contribuait entre 50 000 et 100 000 m³/an environ, Eyrieux, Drôme, etc.). Le maximum de la capacité de charriage était probablement observé dans l'UHC de Donzère-Mondragon, avec 350 000 m³/an ;
- En aval de Donzère, la pente s'est réduite fortement sous l'influence de la remontée du niveau marin et de la confluence de la Durance ; la capacité de charriage déclinait à 140 000 m³/an environ, malgré les apports de l'Ardèche et de la Cèze. Ce différentiel amont aval s'est donc traduit par des dépôts et des divagations, dans les Rhône de Donzère, Caderousse et Avignon. Ce flux de 140 000 m³/an se maintenait en aval, augmentait localement avec les apports du Gardon pour se stabiliser à 150 000 m³/an dans le Palier d'Arles. Les estimations n'ont pas été menée plus en aval : on peut toutefois faire l'hypothèse que la capacité de charriage continuait à décliner dans le delta, y compris au sein du Palier d'Arles, pour être à l'origine d'accumulations dans le lit et de défluviations caractéristiques d'un fonctionnement deltaïque.

Sous réserve des incertitudes mentionnées précédemment, si on compare les résultats avant / après aménagements, la situation actuelle présente des capacités de charriage qui ne représentent plus que 5 à 15% des capacités de charriage avant aménagement, soit 6 à 20 fois moins. On observe des exceptions locales, telles que :

- le secteur en amont de Génissiat (50%, mais sans que la charge sédimentaire soit réellement disponible) ;
- le Rhône de St-Vulbas (100%) où a priori les capacités de charriage n'ont pas évolué (ce qui ne signifie pas que le charriage a lieu à saturation dans l'état actuel) ;
- le Rhône de Miribel (30-35%), et ce taux aurait tendance à augmenter vers l'aval puisque le flux actuel de 30 000 m³/an dans le canal de Miribel est potentiellement supérieur à ce qui traversait dans Lyon avant aménagements (20 000 m³/an).

L'ensemble des résultats de capacité de charriage, avant aménagements et dans l'état actuel, avec estimation de la part des sables, est synthétisé dans le Tableau 31, ainsi que sur la Carte 16 et la Carte 17.

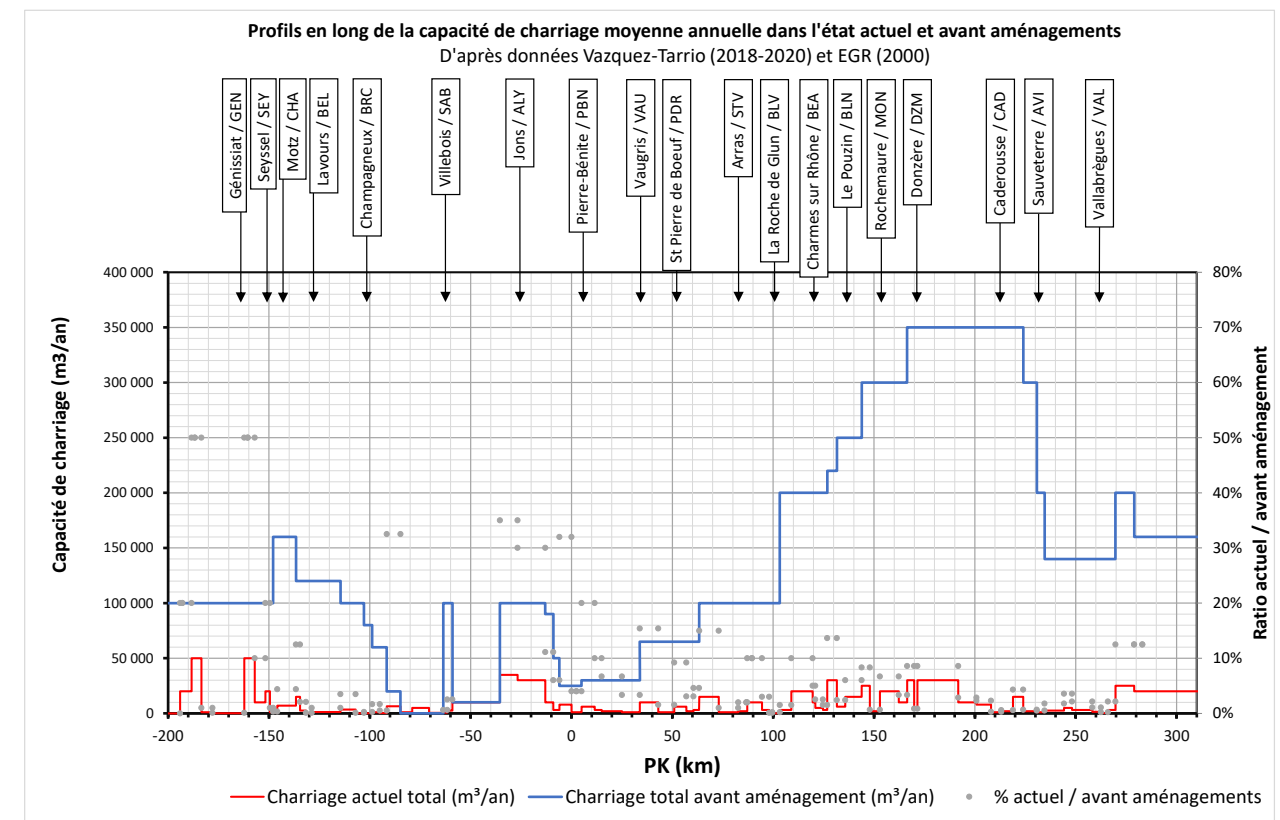
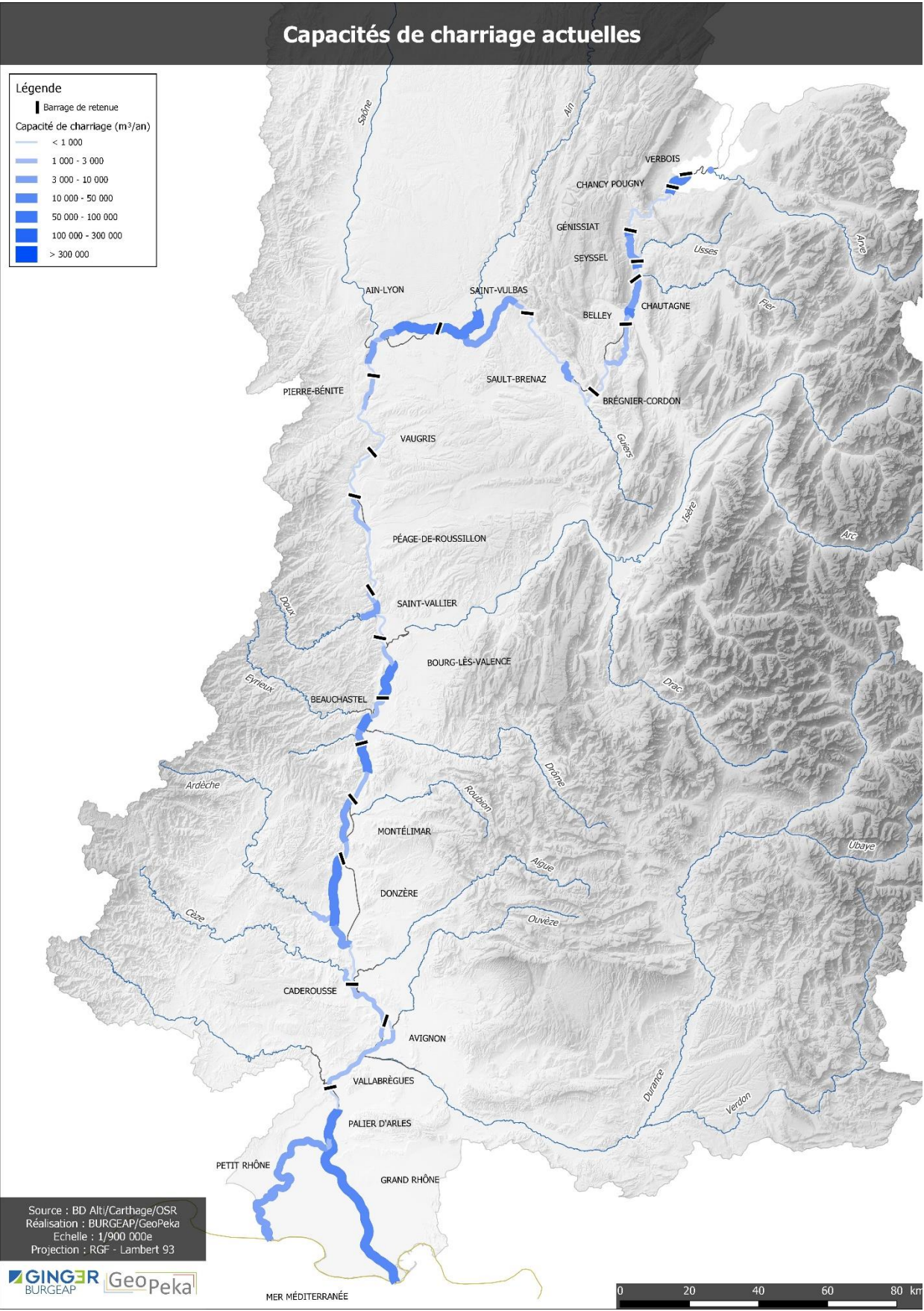
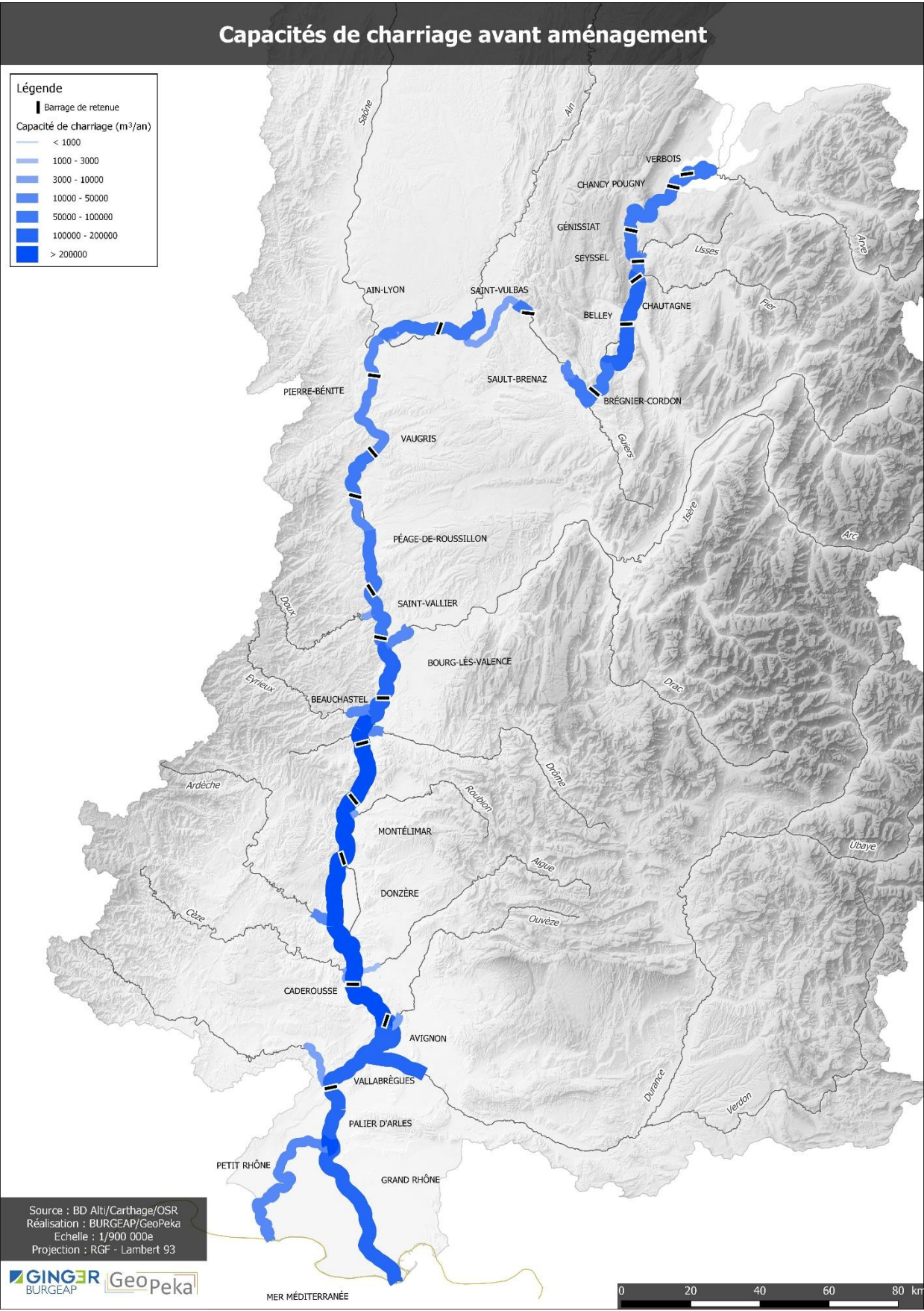


Figure 137 : Profil en long de la capacité de charriage moyenne annuelle avant /après aménagements



Carte 16 : Capacité de charriage moyenne annuelle par tronçons homogènes avant aménagements

Carte 17 : Capacité de charriage moyenne annuelle par tronçons homogènes après aménagements

► Evolution des capacités de charriage dans les retenues et les RCC

Les estimations précédentes permettent d'actualiser les travaux de Vázquez-Tarrío (2018) sur l'évolution des capacités de charriage après aménagements dans les retenues et dans les RCC. Ces travaux ont été illustrés par la Figure 46.

Les données actualisées sont récapitulées dans le Tableau 30 et illustrées par la Figure 138. Les analyses n'ont pas été menées pour les ouvrages du Seujet, de Verbois (01-SUI) et de Chancy-Pougny (02-CHP).

Les résultats montrent que :

- La capacité de charriage moyenne annuelle dans les retenues est en moyenne de 5 000 m³/an ; elle ne représente plus que 3,3 % en moyenne de la capacité de charriage avant aménagement (soit 30 fois moins), et ce taux tombe à 1,8% (soit 55 fois moins) si on retire la retenue de Jons dont la transparence au charriage a été démontrée ; cette évolution est due à l'abaissement des pentes dans les retenues du fait de l'implantation du barrage de retenue ;
- Dans les RCC, la capacité de charriage moyenne annuelle est en moyenne de 7 000 m³/an ; elle ne représente plus que 4,6% en moyenne de la capacité de charriage avant aménagement (soit environ 20 fois moins), et ce taux tombe à 3,5% (soit 30 fois moins) si on retire le canal de Miribel (RCC de Jons-Cusset) dont le transit est resté significatif en lien avec les apports de l'Ain et la transparence du barrage de Jons ; cette évolution est due à l'évolution à la baisse de l'hydrologie dans les RCC du fait de la diversion des débits, et notamment à une moindre occurrence de débits morphogènes.

Tableau 30 : Evolution des capacités de charriage dans les retenues et RCC après aménagements

					Capacité de charriage en moyenne annuelle (m³/an)				
N°	Code	N°UHC	UHC	Ouvrage	Valeur représentative avant aménagement	Retenue (actuel)	%	RCC (actuel)	%
01	SUI	01-SUI	Suisse (Seujet)	Seujet	ND	ND	ND		
01	SUI	01-SUI	Suisse (Verbois)	Verbois	ND	ND	ND		
02	CHP	02-CHP	Chancy-Pougny	Chancy-Pougny	ND	ND	ND		
03	GEN	03-GEN	Génissiat	Génissiat	100 000	100	0,1%		
04	SEY	04-SEY	Seyssel	Seyssel	100 000	10 000	10,0%		
05	CHA	05-CHA	Chautagne	Motz	160 000	500	0,3%	7 000	4,4%
06	BEL	06-BEL	Belley	Lavours	120 000	2 500	2,1%	1 200	1,0%
07	BRC	07-BRC	Brégnier Cordon	Champagneux	80 000	100	0,1%	300	0,4%
08	SAB	08-SAB	Sault-Brenaz	Villebois	1 000	500	50,0%	600	60,0%
09	VUL	09-VUL	Saint-Vulbas	-					
10	ALY	10-ALY	Ain-Lyon	Jons	100 000	35 000	35,0%	30 000	30,0%
11	PBN	11-PBN	Pierre-Bénite	Pierre-Bénite	25 000	1 000	4,0%	3 000	12,0%
12	VAU	12-VAU	Vaugris	Vaugris	30 000	1 000	3,3%		
13	PDR	13-PDR	Péage de Roussillon	St-Pierre-de-Bœuf	65 000	1 000	1,5%	2 000	3,1%
14	STV	14-STV	Saint-Vallier	Arras	100 000	1 000	1,0%	2 000	2,0%
15	BLV	15-BLV	Bourg-lès-Valence	La-Roche-de-Glun	100 000	100	0,1%	200	0,2%
16	BEA	16-BEA	Beauchastel	Charmes-sur-Rhône	200 000	20 000	10,0%	3 000	1,5%
17	BLN	17-BLN	Baix Logis Neuf	Le Pouzin	250 000	6 000	2,4%	15 000	6,0%
18	MON	18-MON	Montélimar	Rochemaure	300 000	2 000	0,7%	10 000	3,3%
19	DZM	19-DZM	Donzère Mondragon	Donzère	350 000	3 000	0,9%	30 000	8,6%
20	CAD	20-CAD	Caderousse	Caderousse	350 000	1 000	0,3%	2 000	0,6%
21	AVI	21-AVI	Avignon	Avignon + Sauveterre	300 000	2 000	0,7%	2 000	0,7%
22	VAL	22-VAL	Vallabrègues	Vallabrègues	140 000	1 500	1,1%	300	0,2%
23	ARL	23-ARL	Palier d'Arles	-					
24	GRH	24-GRH	Grand Rhône	-					
25	PRH	25-PRH	Petit Rhône	-					
Moyenne					151 000	5 000	3,3%	7 000	4,6%
Moyenne (hors Jons)					171 000	3 000	1,8%	6 000	3,5%

Figure 138 : Evolution des capacités de charriage dans les retenues et RCC après aménagements

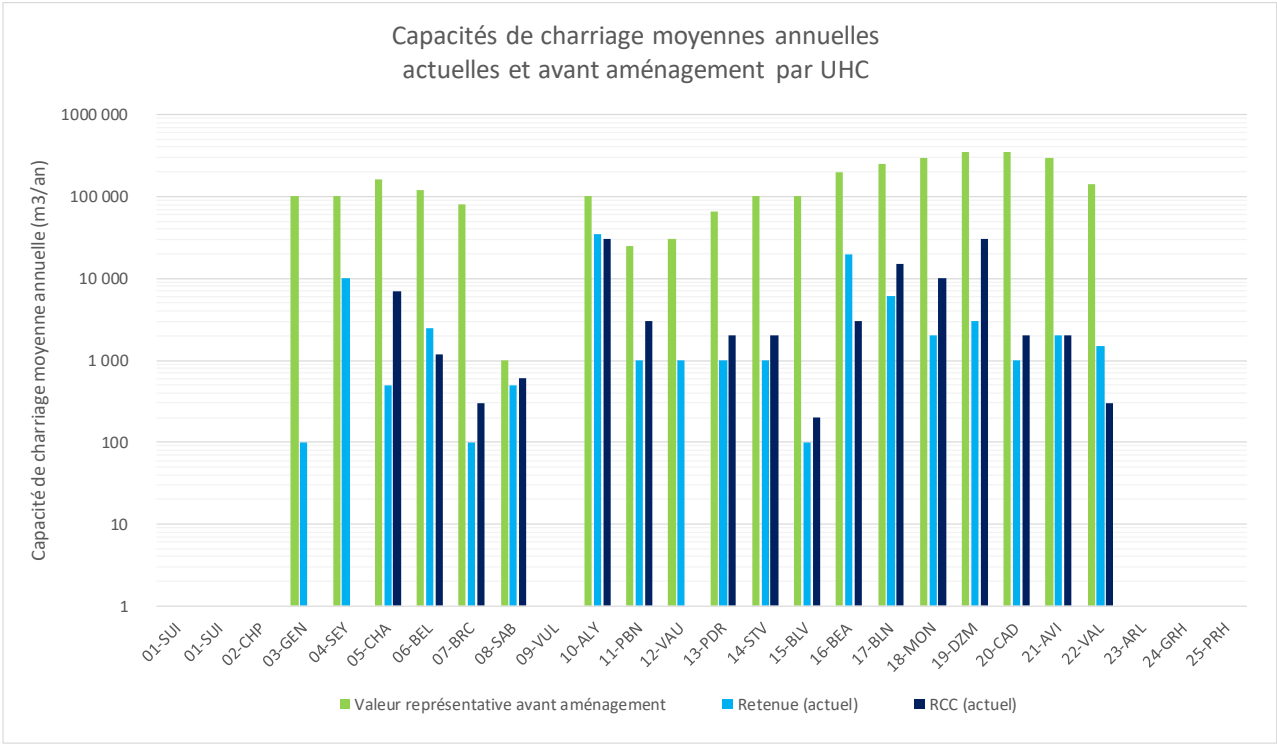


Tableau 31 : Résultats de flux de MES, de capacités de charriage total, de charriage en sables, pour les situations avant et après aménagement (adapté à partir de données initiales de l'EGR, 2000 et de l'OSR4, 2018-2020)

Cours d'eau	Code	TH	TH complet	MES (Mt/an) avant aménagement (1)	MES actuel (Mt/an) (2)	Charriage avant aménagement (m³/an) (1)	Charriage avant aménagement (m³/an) (3)	Charriage avant aménagement (m³/an) (valeur retenue)	Charriage actuel (m³/an) (valeur retenue par TH) (pour affluent : apport direct au Rhône)	Valeur affichée dans fiche UHC (m³/an) (pour affluent : apport total)	% sables par TH (d'après modèle GTM¹)	Charriage en sables (m³/an)
Le Rhône	R	SUI1	01-SUI1-R	0	0	0	0	0	0	0		
Le Rhône	R	SUI2	01-SUI2-R	0	0	0	0	0	0	0		
L'Arve	A	SUI3	01-SUI3-A	1,00	0,57	100 000		100 000	10 000	20 000		
Le Rhône	R	SUI4	01-SUI4-R	1,00	0,57			100 000	0	≈ 15 000 à 0	65%	-
Le Rhône	RT	SUI5	01-SUI5-RT	1,00	0,57			100 000	20 000	≈ 20 000	65%	13 000
Le Rhône	R	CHP1	02-CHP1-R	1,00	0,57			100 000	20 000	≈ 20 000	65%	13 000
Le Rhône	RT	CHP2	02-CHP2-RT	1,00	0,57	88 632		100 000	50 000	≈ 50 000	65%	32 500
Le Rhône	R	GEN1	03-GEN1-R	1,00	0,57	88 632		100 000	100	50 000 à 100	69%	69
Le Rhône	RT	GEN2	03-GEN2-RT	1,00	0,57	88 632		100 000	50 000	50 000	60%	30 056
Le Rhône	R	SEY1	04-SEY1-R	1,00	0,57	60 024		100 000	10 000	50 000 à 10000	62%	6 208
Les Usses	A	SEY2	04-SEY2-A	0,10	0,05	20 000		20 000	446	4 000		
Le Rhône	RT	SEY3	04-SEY3-RT	1,10	0,57	88 632	90 000	100 000	20 000	20 000	73%	14 599
Le Rhône	R	CHA1	05-CHA1-R	1,10	0,57	190 660	90 000	100 000	1 000	1 000	96%	961
Le Fier	A	CHA2	05-CHA2-A	0,50	0,16	60 000	60 000	60 000	0	0		
Le Rhône	R	CHA3	05-CHA3-R	1,60	0,73	190 660	90 000	160 000	500	500	100%	500
Dérivation de Chautagne	CU	CHA4	05-CHA4-CU		0,73				0	0		
Le Rhône	RCC	CHA5	05-CHA5-RCC	1,60		164 170	90 000	160 000	7 000	7 000	79%	5 553
Le Rhône	RT	CHA6	05-CHA6-RT	1,60	0,73	120 507	90 000	120 000	15 000	15 000	69%	10 411
Le Rhône	R	BEL1	06-BEL1-R	1,60	0,73	120 507	90 000	120 000	2 500	2 500	78%	1 948
Dérivation de Belley	CU	BEL2	06-BEL2-CU		0,73				0	0		
Le Rhône	RCC	BEL3	06-BEL3-RCC	1,60		143 688	2 200	120 000	1 200	100 à 1 200	78%	942
Le Rhône	R	BRC1	07-BRC1-R	1,60	0,73	108 600	2 200	100 000	100	3 500 à 100	76%	76
Dérivation de Brégnier-Cordon	CU	BRC2	07-BRC2-CU		0,73				0	0		
Le Rhône	RCC	BRC3	07-BRC3-RCC	1,60		95 388	600	80 000	200	200	82%	164
Le Guiers	A	BRC4	07-BRC4-A	0,10	0,03	10 000	10 000	10 000	500	500		
Le Rhône	RCC	BRC5	07-BRC5-RCC	1,70		95 388	600	60 000	300	1 000 à 300	73%	219
Le Rhône	RT	BRC6	07-BRC6-RT	1,70	0,73	95 388	600	20 000	6 500	6 500	78%	5 065
Le Rhône	RT	SAB1	08-SAB1-RT	1,70	0,73	138 931	600	0	1 000	1 000 à 5 000	57%	570
Le Rhône	R	SAB2	08-SAB2-R	1,70	0,73	5 802	600	1 000	500	500	52%	258
Dérivation de Sault-Brénaz	CU	SAB3	08-SAB3-CU		0,73				0	0		
Le Rhône	RCC	SAB4	08-SAB4-RCC	1,70		137 284	10 000	100 000	600	600	78%	467
Le Rhône	RT	SAB5	08-SAB5-RT	1,70	0,73	137 284	10 000	100 000	2 500	2 500	81%	2 034
Le Rhône	RT	VUL1	09-VUL1-RT	1,70	0,73	137 284	10 000	10 000	10 000	10 000	80%	7 980
Le Rhône	R	ALY1	10-ALY1-R	1,85	0,73	137 284	100 000	100 000	35 000	30000 à 40 000	67%	23 431
L'Ain	A	ALY2	10-ALY2-A	0,15	0,10	100 000	100 000	100 000	35 000	35 000		
Canal de Jonage	R	ALY3	10-ALY3-R		0,73				0	10 000 à 0		
Canal de Jonage	CU	ALY4	10-ALY4-CU		0,73				0	≈ 0		
Canal de Miribel	RCC	ALY5	10-ALY5-RCC	1,85		137 284		100 000	30 000	30 000	65%	19 548
Canal de Miribel	RCC	ALY6	10-ALY6-RCC	1,85		139 579		90 000	10 000	10 000	66%	6 568
Le Vieux Rhone	RCC	ALY7	10-ALY7-RCC	1,85		139 579		10 000	0	20 000 à 0		
Le Rhône	RT	ALY8	10-ALY8-RT	2,00	0,73	139 579		50 000	3 000	3 000	90%	2 708
Le Rhône	R	PBN1	11-PBN1-R	2,00	0,73	30 814	45 000	25 000	8 000	8 000	83%	6 626
La Saône	A	PBN2	11-PBN2-A	1,50	0,33	0	0	0	0	0		
Le Rhône	R	PBN3	11-PBN3-R	3,50	1,06	30 814	45 000	25 000	1 000	1 000	99%	985
Dérivation de Pierre Bénite	CU	PBN4	11-PBN4-CU		1,06				0	0		
Le Rhône	RCC	PBN5	11-PBN5-RCC	3,50		37 559	45 000	30 000	3 000	6 000 à 3000	87%	2 620
Le Rhône	R	VAU1	12-VAU1-R	3,50	1,07	33 593	70 000	30 000	1 000	2 000 à 1 000	83%	828
Le Rhône	R	PDR1	13-PDR1-R	3,50	1,07	67 483	80 000	65 000	1 000	10 000 à 1 000	84%	839
Dérivation de Péage de Roussillon	CU	PDR2	13-PDR2-CU		1,07				0	0		
Le Rhône	RCC	PDR3	13-PDR3-RCC	3,50		98 383	80 000	65 000	2 000	6 000 à 2 000	82%	1 646
Le Rhône	R	STV1	14-STV1-R	3,50	1,13	109 379	80 000	100 000	1 000	15 000 à 1 000	83%	834
Dérivation de Saint Vallier	CU	STV2	14-STV2-CU		1,13				0	0		
Le Rhône	RCC	STV3	14-STV3-RCC	3,50		109 379	80 000	100 000	2 000	2 000	82%	1 642
Le Rhône	RT	BLV1	15-BLV1-RT	3,50	1,18	109 379	18 000	100 000	10 000	10 000	85%	8 541
Le Doux	A	BLV2	15-BLV2-A	0,02	0,04	8 000	8 000	8 000	3 250	6 000		
Le Rhône	R	BLV3	15-BLV3-R	3,52	1,22	114 540	18 000	100 000	100	10 000 à 100	88%	88
Dérivation de Bourg lès Valence	CU	BLV4	15-BLV4-CU		1,22				0	0		
L'Isère	A	BLV5	15-BLV5-A	4,50	1,80	50 000	50 000	50 000	0	0		
Dérivation de Bourg lès Valence	CU	BLV6	15-BLV6-CU		3,02				0	0		
Le Rhône	RCC	BLV7	15-BLV7-RCC	3,52		114 540	80 000	100 000	200	200	77%	154
Le Rhône	RCC	BLV8	15-BLV8-RCC	8,02		114 540	80 000	200 000	3 000	3 000	76%	2 280
Le Rhône	R	BEA1	16-BEA1-R	8,02	3,02	196 581	80 000	200 000	20 000	20 000	82%	16 394
Le Rhône	RCC	BEA2	16-BEA2-RCC	8,02		196 581	180 000	200 000	3 000	10 000 à 3 000	67%	2 009
Dérivation de Beauchastel	CU	BEA3	16-BEA3-CU		3,02				0	0		
L'Eyrieux	A	BEA4	16-BEA4-A	0,04	0,05	20 000	20 000	20 000	0	15 000		
Le Rhône	R	BLN1	17-BLN1-R	8,06	3,09	196 581	180 000	220 000	30 000	30 000	66%	19 916
La Drôme	A	BLN2	17-BLN2-A	0,20	0,20	40 000	40 000	40 000	0	20 000		
Le Rhône	R	BLN3	17-BLN3-R	8,26	3,29	261 026	180 000	250 000	6 000	6 000	67%	4 020
L'Ouvèze (Ardèche)	A	BLN4	17-BLN4-A	0,10	0,10	15 000	15 000	15 000	2 797	4 000		
Dérivation de Baix le Logis Neuf	CU	BLN5	17-BLN5-CU		3,39				0	0		
Le Rhône	RCC	BLN6	17-BLN6-RCC	8,36		493 643	105 000	250 000	15 000	15 000	82%	12 354
Le Rhône	R	MON1	18-MON1-R	8,36	3,39	336 738	105 000	300 000	2 000	25 000 à 2 000	89%	1 774
Dérivation de Montélimar	CU	MON2	18-MON2-CU		3,39							

5.2 Transit des sables et des sédiments fins

5.2.1 Rappels sur les notions de transport sableux et fin

Les sédiments sableux sont complexes à analyser. Sur le fleuve Rhône, la fraction la plus grossière du panel sableux (1 à 2 mm) se déplace généralement sous forme de charriage. La partie la plus fine (63 µm à 1 mm) se déplace généralement en suspension, et fait partie de la « suspension graduée » (cf. §.2.2 / Tableau 20).

La limite entre le charriage et la suspension graduée, ici définie à 1 mm n'est pas figée ; elle dépend des conditions hydrauliques, y compris au sein d'une même rivière comme le Rhône. Par exemple, dans un Vieux Rhône courant en crue, le seuil de 1 mm semble relativement pertinent ; pour un écoulement torrentiel d'un affluent, tous les sables peuvent être suspension, ce qui relève le seuil 2 mm ou plus. Inversement, dans une retenue, le seuil de charriage peut s'abaisser. Il a par exemple été démontré que les sables de l'Isère (300 à 500 µm) pouvaient se mouvoir par charriage dans le tronçon en amont de la confluence avec le canal de Bourg-lès-Valence (15-BLV).

Les sédiments appelés « fins » sont transportés en suspension et sont mesurés à travers les concentrations en MES (matières en suspension). Ces sédiments incluent des argiles, des limons ainsi qu'une partie de sables, selon les conditions hydrauliques comme vu précédemment. Le transport par suspension comprend le transport en suspension qui interagit avec le fond (« suspension graduée ») et la part en suspension qui n'interagit pas avec le fond du lit (« suspension uniforme » ou « wash load ») et qui est plutôt constituée d'argiles et limons fins.

Les MES se mesurent à partir de relevés de turbidité et on sait que pour de telles mesures, tous les sables ne sont pas mesurés (cf. Mission 4 / accompagnement des APAVER par la retenue de Génissiat). Ainsi, les sables sont souvent appelés « les passagers clandestins du transport soide » qui sont situés à l'interface de la suspension et du charriage, et peuvent échapper dans une certaine proportion aux mesures de MES et aux mesures de charriage.

5.2.2 Méthodologie

Pour chacune des fiches UHC, le transit des sables et des fins a été analysé dans les volets C5, et ce, à partir des connaissances existantes. Cette partie C5 vient en complément de la section C4 sur les sédiments grossiers.

Les études de référence sur les MES sont portées par l'OSR à travers des mesures expérimentales et suivies de stations. Les travaux de l'OSR4 (Rapport OSR III.3, 2018) permettent notamment de synthétiser les contributions des principaux affluents (Arve, Fier, Bourbre, Saône, Gier, Isère, Ardèche, Durance) et de les corrélérer avec les flux mesurés dans le Rhône aux différentes stations de suivi, notamment Jons (amont Lyon) et Arles (cf. localisation des stations : Figure 93).

Pour les sédiments sableux, les modes de transport sont plus complexes, et évoluent entre charriage et suspension graduée selon les conditions hydrauliques. Les protocoles de mesures sont émergents et sont déployés pour l'instant sur des sites particuliers :

- Chasses suisses et accompagnement de ces chasses (APAVER) (stations des Rippes et de Bognes en amont et aval de Génissiat) ;
- Chasse de la basse Isère (travaux de l'INRAE) ;
- Autres suivis ponctuels dans le cadre de l'OSR4 : station de Perrache à Lyon ; station de Barcarin sur le Bas-Rhône.

Des travaux sont en cours dans le cadre de la thèse de Guillaume Dramais (INRAE) dont les travaux n'ont pas pu être valorisés dans le présent rapport. Toutefois, quelques courbes de tarage commencent à être disponibles en différents points du Rhône (cf. Figure 139).

Pour la part des sables transportée par charriage, le modèle GTM développé pour le calcul de la capacité de charriage annuelle par fraction granulométrique permet d'estimer les flux annuels moyens en sables. Ce travail étant disponible pour l'ensemble du Rhône entre la retenue de Génissiat et le Grand Rhône, il est possible d'apprécier de façon théorique la continuité sédimentaire pour les sables transportés par charriage et les points de blocage potentiels.

Toutefois les incertitudes soulevées sur les résultats du modèle GTM (cf. §.5.1.3) conduisent à considérer ces estimations comme non validées et à prendre les résultats avec précaution. Par ailleurs, comme illustré sur la Figure 79, une part des flux sableux transite par les canaux usiniers (comm.pers. S.Reynaud) et ne sont pas considérés dans les estimations pour les Vieux Rhône.

5.2.3 Capacités de charriage pour les sables

Le modèle GTM développé par Recking (2016) a été utilisé dans le cadre des travaux de Vázquez-Tarrío.

Les résultats extraits pour les sables sont récapitulés dans le Tableau 31 et illustrés par les Carte 18 et Carte 19.

Pour les tronçons homogènes qui n'ont pas été étudiés par Vázquez-Tarrío (01-SUI, 02-CHP, 24-GRH, 25-PRH), une proportion de sables a été estimée afin de calculer la capacité de charriage.

Sous réserve de la prise en compte des incertitudes citées précédemment, les commentaires suivants peuvent être apportés :

- Le taux de sable présente une tendance globalement croissante d'amont en aval, entre des valeurs qui débutent à 50-60% et qui atteignent 100% dans le delta. Toutefois, certains résultats interrogent : retenue de Génissiat avec seulement 69% de sables, ce résultat étant lié au fait que quelques portions de retenue pourraient charrier des graviers ; retenue de Sault-Brénaz avec une très faible proportion de sables sur des valeurs totale de capacité qui sont très faibles (500 à 1000 m³/an). Dans le canal de Miribel, la proportion de sables serait de 50-60% ce qui paraît élevé par rapport à ce qui est réellement transité et observé (quasi absence de bancs de sable, sauf dans la traversée de Lyon). Le reste des valeurs sur le Rhône aval semble globalement cohérent ;
- Pour la capacité de charriage en sables en année moyenne, les valeurs sont logiquement élevées dans les tronçons à fort charriage total, comme le canal de Miribel, le Rhône entre Bourg-lès-Valence et Donzère, le Grand Rhône. Toutefois, les résultats de capacités de charriage dans les retenues sont à prendre avec précaution car le calcul ne prend pas en compte l'ouverture des vannes en hautes eaux ou crues, et on sait que l'essentiel des sables est remobilisé pour ce type de conditions.

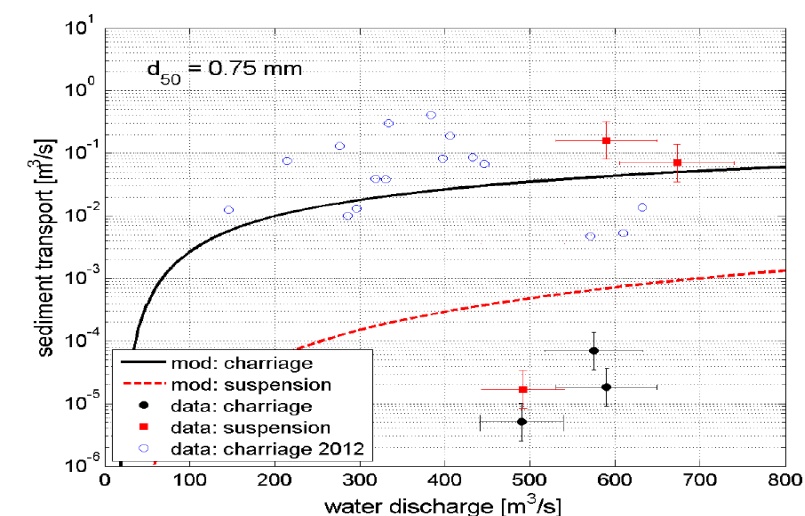
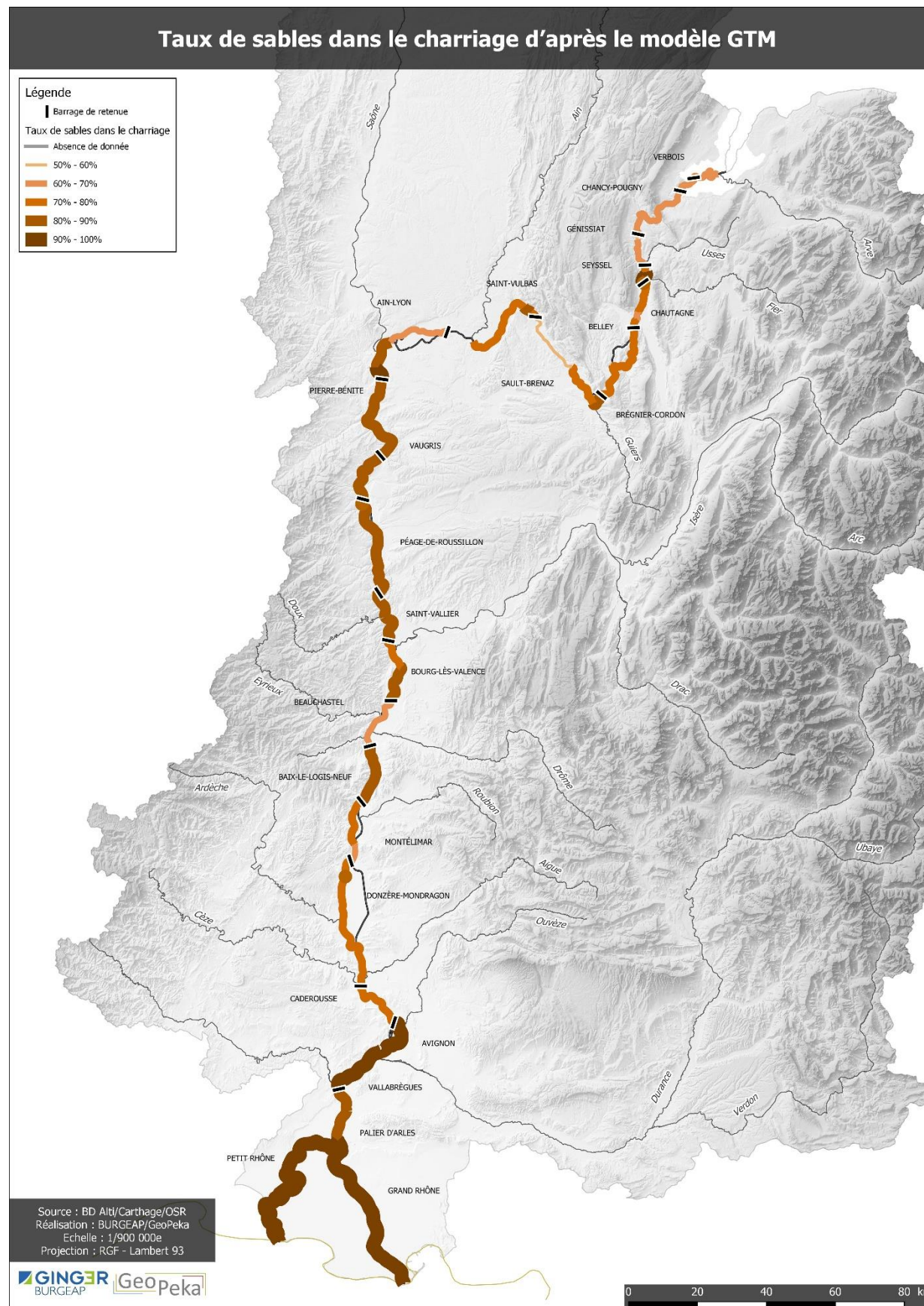
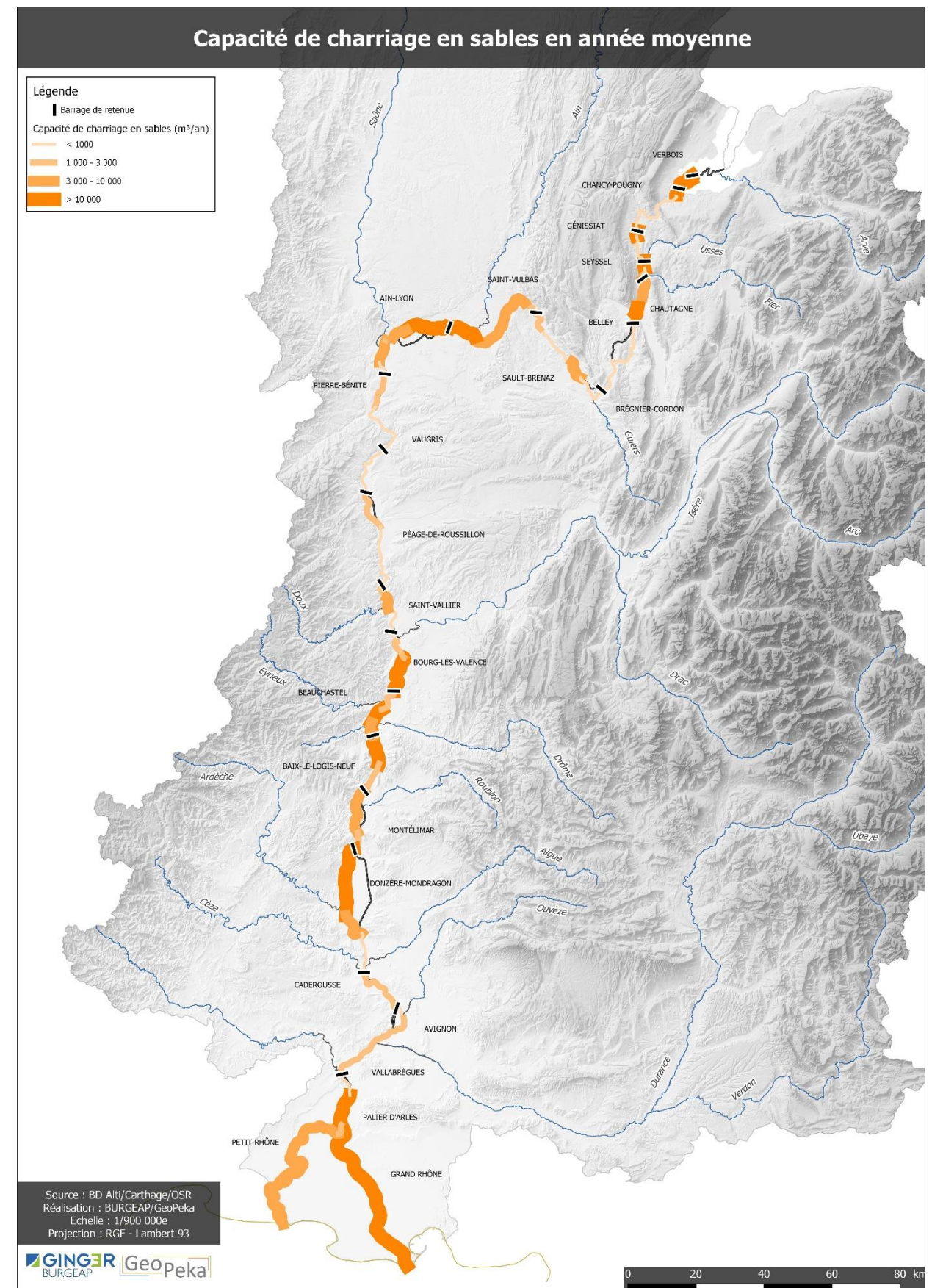


Figure 139 : Courbe de tarage sédimentaire estimée à Bognes superposées avec les mesures sur site (OSR I.1, 2017)

Les mesures expérimentales ont été faites lors des APAVER de 2012 et 2016 (modèle estimé pour un diamètre $d_{50}=0,75$ mm correspond à la moyenne des échantillons par charriage, le diamètre médian des échantillons en suspension est plus fin, i.e. $d_{50}=0,08$ mm) (donnée intégrée dans la fiche UHC#03-GEN)



Carte 18 : Proportion de sable dans le modèle de charriage GTM par tronçon homogène



Carte 19 : Capacité de charriage moyenne annuelle en sables par tronçon homogène

5.2.4 Transit des matières en suspension

► État avant aménagement

Le transport des matières en suspension avant aménagement a fait l'objet de nombreuses études, notamment par le passé au niveau de la station d'Arles (cf. §.4.3.1). Une synthèse des apports est disponible dans l'EGR (2000) pour l'axe Rhône et pour ses principaux affluents.

Les flux de MES ont été interprétés pour chacun des tronçons homogènes du Rhône et ses 18 affluents majeurs. Les résultats sont compilés dans le Tableau 31, le profil en long de la Figure 140 et la Carte 20.

Globalement, et contrairement aux flux de charriage, le transit des MES montre une croissance progressive entre la confluence de l'Arve, où le Rhône bénéficiait d'un apport de 1 Mt/an, et Arles où la valeur moyenne des estimations passées peut être ajustée à 15 Mt/an. Les flux en aval d'Arles sont partagés proportionnellement au Petit Rhône (10%) et au Grand Rhône (90%). Les contributions de la Saône (1,5 Mt/an), de l'Isère (4,5 Mt/an) et de la Durance (6 Mt/an) sont les plus significatives ; elles représentent 80% des flux de MES du Rhône en Arles.

► État actuel

Pour la situation actuelle, les données de l'EGR (2000) sont une bonne base également. Elles ont été complétées et précisées depuis par les travaux de l'OSR à partir des stations sur le Rhône (Jons, Arles) et sur les affluents : Arve, Fier, Bourbre, Saône, Gier, Isère, Ardèche, Durance.

Dans le cadre de l'OSR4, un bilan actualisé des flux de matières en suspension et micropolluants associés a été réalisé sur le bassin du Rhône sur la période 2011-2016.

► Sur le Haut Rhône (source : OSR4, 2018)

Sur la période 2011-2016, le flux de MES moyen interannuel du Rhône à Jons est de 0,73 Mt (Figure 141). Le principal contributeur au flux de MES est l'Arve (78% en moyenne sur la période), suivie du Fier (23%), puis de la Bourbre (5%). Ces résultats, obtenus à partir de données mesurées, confirment les estimations de Launay (2014), identifiant l'Arve et le Fier comme les principaux contributeurs au flux de MES du Rhône à Jons.

Le bilan de flux de MES moyen interannuel est globalement équilibré sur la période 2011-2016, mais on peut observer des excédents en 2013, 2014 et 2015, les apports des affluents étant supérieurs aux flux mesurés à Jons. Cet écart peut signifier que des dépôts de MES ont lieu dans le réseau hydrographique à l'échelle annuelle (notamment dans les réservoirs de barrages hydroélectriques). En 2012 et 2016, le bilan est déficitaire, ce qui peut s'expliquer par les chasses de barrages suisses réalisées en juin 2012 et mai 2016 qui ont libéré un stock de MES mesurés dans le Rhône à Jons, mais ne provenant pas des affluents. Ces résultats confirment également les observations de Launay (2014), qui évaluait à 0,2 Mt la quantité de MES pouvant être stockés dans le réseau annuellement, et constatait un rétablissement à l'équilibre par les chasses de barrages.

Les mesures sur l'Ain qui ont fait l'objet par le passé d'une campagne courte (bilan des apports : 0,1 Mt/an), sont à développer à l'avenir pour préciser la contribution de cet affluent important pour le Haut-Rhône.

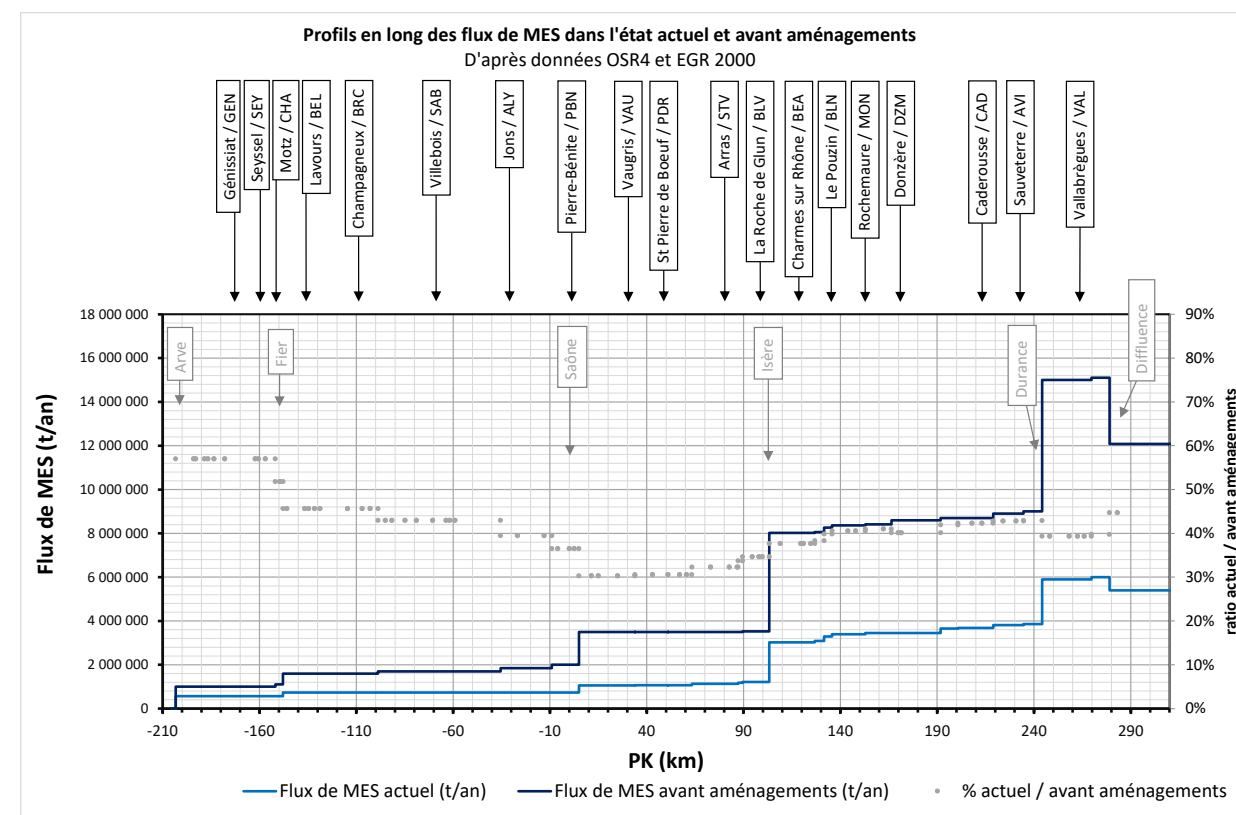


Figure 140 : Profil en long des flux de MES dans l'état actuel et avant aménagements

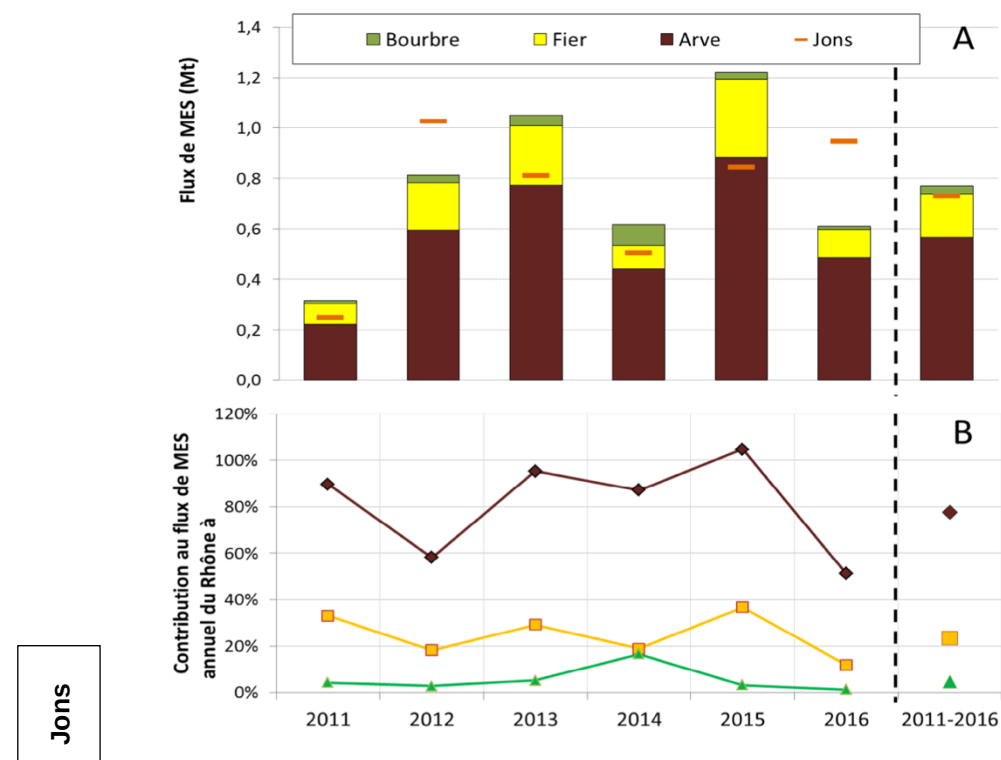


Figure 141 : Bilan de flux de MES annuels et moyens interannuels sur le bassin du Haut Rhône entre 2011 et 2016 (OSR4, 2018)

Du Léman à la mer (source : OSR4, 2018)

Sur la période 2011-2016, le flux de MES moyen interannuel du Rhône à Beaucaire est de 6,0 Mt.

Le principal contributeur au flux de MES est la Durance (34 % en moyenne sur la période), suivie de l'Isère (30 %), du Haut-Rhône (11 %) et de la Saône (6 %). La contribution de la Durance est particulièrement variable, avec un flux qui varie de 0,3 Mt en 2012 (contribuant à 5 % du flux de MES à Beaucaire), à 4,9 Mt en 2016 (contribution de 58 %).

La contribution du Gier peut être considérée comme négligeable, avec un flux de MES moyen annuel de 0,01 Mt et n'excédant pas 0,1 Mt. Ces résultats sont en accord avec les observations de Launay (2014), identifiant l'Isère et la Durance comme les principaux contributeurs au flux de MES du Rhône à Beaucaire.

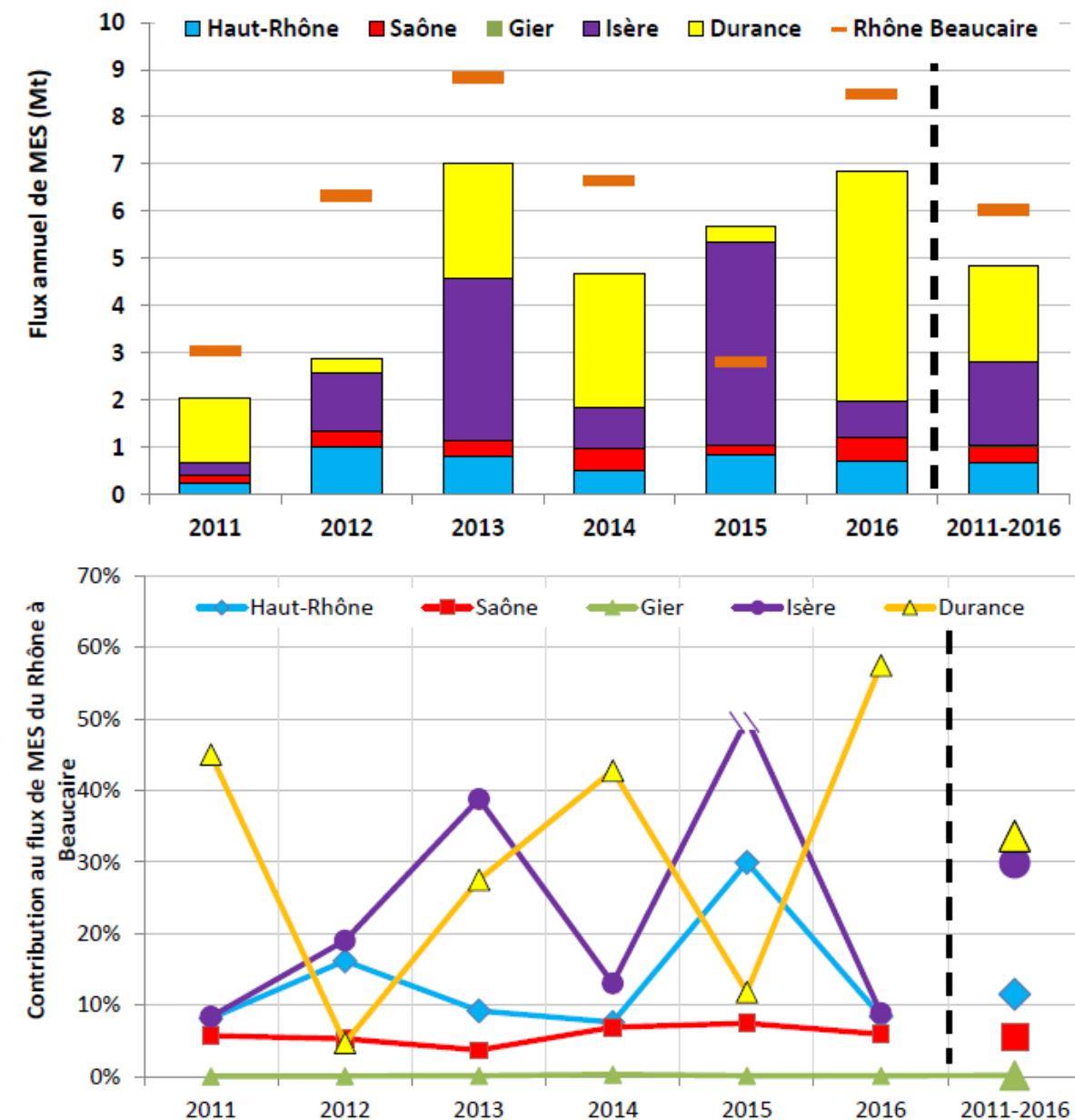


Figure 142 : Bilan de flux de MES annuels et moyens interannuels du Léman à la Mer 2011 et 2016 (OSR4, 2018)

L'année 2015 représente un cas particulier avec un bilan excédentaire, la somme des apports des affluents représentant approximativement le double du flux de MES mesuré à Beaucaire (2,8 Mt). Cet excédent est principalement attribuable à l'Isère dont la crue de mai 2015 et la chasse associée ont occasionné une importante charge en MES (près de 4 Mt) (cf. Figure 33), qui n'a probablement pas été véhiculée jusqu'à Beaucaire. Ainsi, les 2,9 Mt de MES manquant à l'embouchure du Rhône pourraient donc avoir été stockées dans le réseau hydrographique entre les deux stations au cours de cet événement.

Au final, le bouclage du bilan montre qu'en moyenne environ 1/5 des volumes (1,2 Mt/an) mesurés à Arles est produit en aval de Givors, Isère et Durance exclues. Cette part peut provenir des affluents intermédiaires (ils drainent près de 21% du bassin), notamment des affluents méridionaux de rive droite : la part des cours d'eau cévenols est estimés à environ 10 %. Ces apports peuvent aussi avoir pour origine des déstockages du lit, naturels (crues) ou artificiels (curages avec remise en suspension).

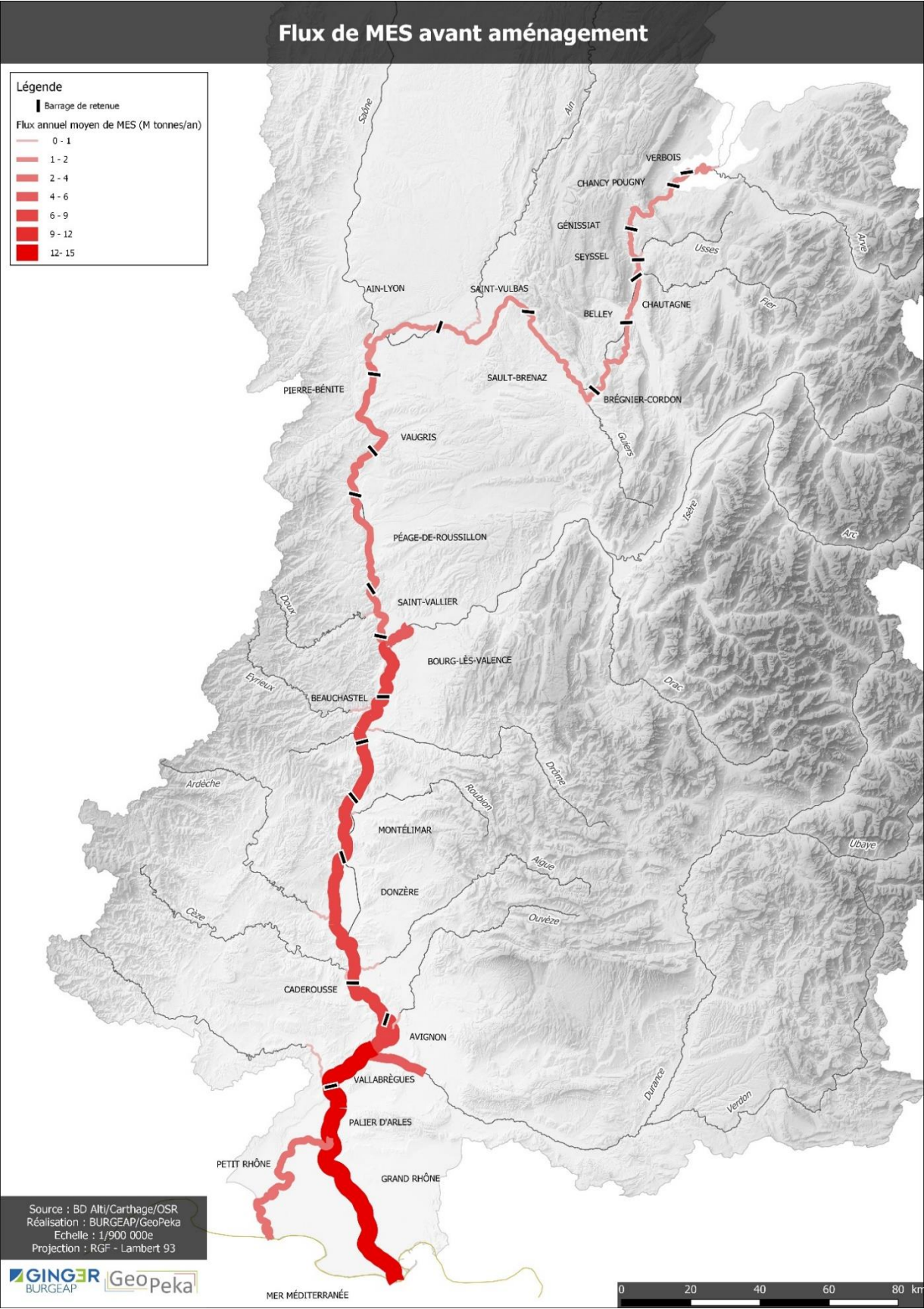
Les flux de MES ont été interprétés pour chacun des tronçons homogènes du Rhône et ses 18 affluents majeurs. Les résultats sont compilés dans le Tableau 31, le profil en long de la Figure 140 et la Carte 21.

Vision globale du transit en MES dans l'état actuel

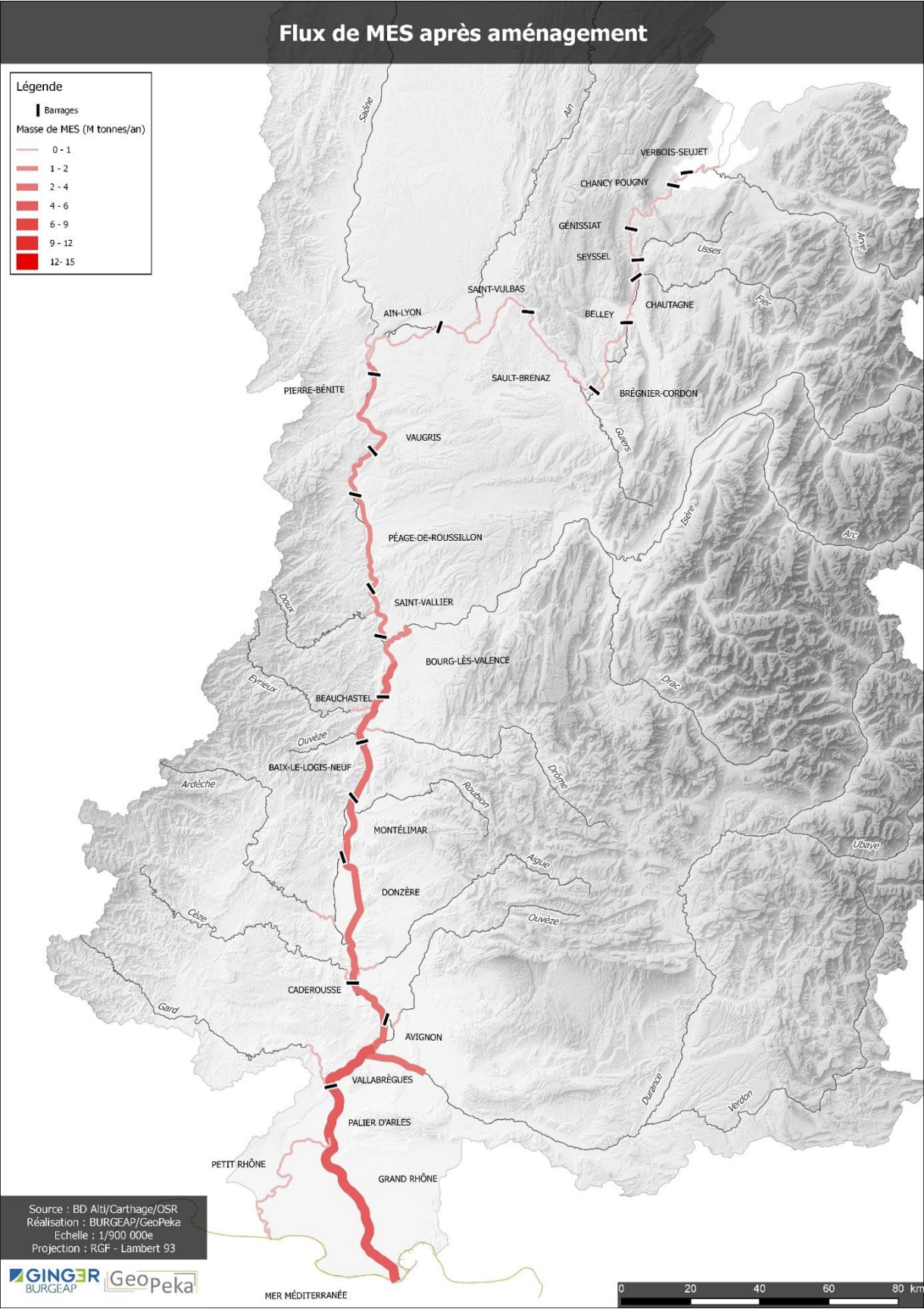
Globalement, les MES montrent une croissance progressive entre la confluence de l'Arve, où le Rhône bénéficie d'un apport moyen annuel de 0,57 Mt/an, et Arles où la valeur moyenne des estimations peut être ajustée à 6 Mt/an.

Les contributions de l'Isère (1,8 Mt/an) et de la Durance (2,04 Mt/an) sont toujours les plus significatives ; la Saône a perdu en influence (0,33 Mt/an) et se voit doubler par l'Arve (0,57 Mt/an). Ces 4 cours d'eau contribuent à environ 79% des flux de MES du Rhône en Arles.

Les contributions en MES représentent aujourd'hui environ 40% de leur valeur avant aménagement, ce taux étant plus élevé pour l'Arve (57%), plus faible pour le Fier et la Saône qui font descendre la proportion globale à 30% à Lyon, alors que l'Isère, accompagnée des affluents cévenols, fait remonter ce taux à 40% sur le reste du linéaire.



Carte 20 : Flux de MES en moyenne annuelle par tronçons homogènes avant aménagements



Carte 21 : Flux de MES en moyenne annuelle par tronçons homogènes après aménagements

5.3 Synthèse des flux grossiers, sableux et fins

Le graphique ci-dessous compile les données de capacité de charriage et de flux de MES en moyenne annuelle, et à l'échelle des tronçons homogènes (TH).

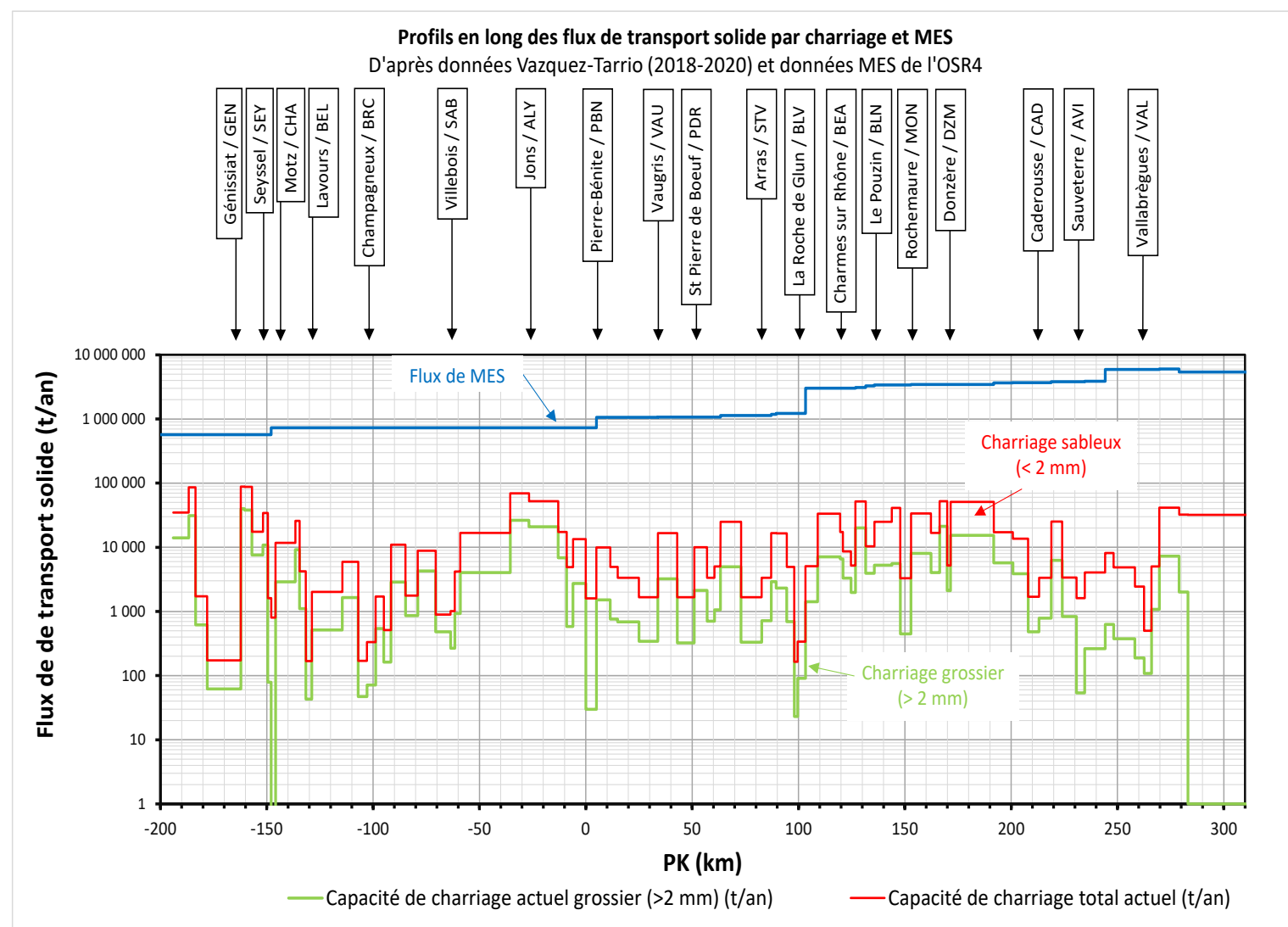
On notera que, autant les MES sont issus de « flux observés », autant le charriage est exprimé sous forme de « capacité de charriage » et ne peut directement être associé à des flux validés. Les valeurs énoncées doivent être appréciées avec précaution compte tenu des incertitudes soulevées dans les parties précédentes, notamment dans le volet discussion de la partie §.5.1.3.

De ce graphique, on peut retenir les constats suivants :

- Les flux de MES sont croissants d'amont en aval, et la contribution majeure des affluents que sont l'Arve, la Saône, l'Isère et la Durance est confirmée ;
- Les flux de sables semblent prépondérants dans le charriage, ce qui n'est pas corrélé aux observations dans les tronçons où le charriage est marqué, comme sur le canal de Miribel. Les estimations avec le modèle GTM de Recking (2016) devront être améliorées et validées avec plus d'observations de terrain ;
- Les estimations de capacité de charriage total et de charriage grossier (> 2 mm) montrent une forte discontinuité sur le linéaire du fleuve :
 - Le profil en long est marqué par des fluctuations et des ruptures de capacité de charriage liées en particulier aux retenues des ouvrages hydroélectriques ;
 - Classiquement, un tronçon de RCC peut transiter en charriage total de l'ordre de quelques milliers de m³ par an (11-PBN, 13-PDR) et jusqu'à 30 000 m³/an environ (canal de Miribel / 10-ALY ; RCC de Donzère / 19-DZM). En considérant la fraction grossière (> 2 mm), les valeurs précédentes chutent car le modèle GTM estime que la proportion de sable est élevée (50 à 90 %). Ainsi, les valeurs précédentes deviennent respectivement « négligeables à quelques centaines de m³ par an », et « jusqu'à 10 000 m³/an environ » pour les RCC les plus compétents.
 - En général, une retenue présente un sursaut de capacité de charriage à la restitution située en amont, du fait du retour des débits turbinés, et ce, avant que la capacité de charriage ne chute dans la partie aval de la retenue à des valeurs théoriques de quelques centaines à quelques milliers de m³ par an.
 - Le profil en long montre l'effet majeur de plusieurs retenues qui piègent les sédiments plus que d'autres : en priorité les retenues de Verbois (01-SUI), de Génissiat (03-GEN), de Lavours (06-BEL), de Champagneux (07-BRC), de Sault-Brénaz (08-SAB), de Bourg-lès-Valence (15-BLV) et de Montélimar (18-MON). En seconde priorité, les retenues de Chautagne (05-CHA), de Caderousse (20-CAD), d'Avignon (21-AVI) et de Vallabrègues (22-VAL). A contrario, les retenues de Chancy-Pougny et de Jons sont transparentes y compris au charriage grossier ; les retenues du Pouzin (17-BLN) et de Donzère (19-DZM) seraient parmi les plus transparentes en cas de crues décennale ou supérieure.

- Ce fonctionnement montre que les sédiments, lorsqu'ils sont présents et mobiles dans les Vieux Rhône, y transitent de façon poussive. En aval, ils peuvent être remobilisés dans les queues de retenues. Cependant, rapidement, ils sont sujets à sédimentation, dans la queue de retenue ou la partie aval du Vieux Rhône pour les grossiers, jusqu'au barrage de retenue pour les sables et les limons.
- La capacité des retenues à remobiliser ces sédiments accumulés n'est pas expliquée par le calcul de capacité de charriage en moyenne annuelle ; il serait nécessaire de réaliser un calcul similaire pour différents niveaux de crues (Q2, Q5, Q10, Q30, Q100). Cette remobilisation ne s'opère que pour des crues exceptionnelles, éventuellement décennales pour certains ouvrages comme Le Pouzin (17-BLN) ; les processus sont relativement méconnus et très inégaux selon les retenues compte tenu des pertes de charges et des longueurs de remous résiduels et propres à chaque ouvrage. A ce stade de connaissance, les valeurs de Dmax estimées en partie §.5.1.2 sont les plus pertinentes pour hiérarchiser les retenues entre elles.

Figure 143 : Profil en long des flux de transport solide par charriage et MES



PARTIE D. SYNTHESE



Tableau 32 : Synthèse des connaissances à approfondir

Thématique à approfondir (§ correspondant)	Intérêts des approfondissements	Méthodes à prévoir
Granulométrie (§.3.2)	Compléments de données dans certains secteurs non analysés. Actualisation et densification de la donnée afin de mieux apprécier les évolutions longitudinales de la granulométrie	Actualisation et densification des sondages granulométriques de 2012-2013 (utilisés pour la thèse de Parrot, 2015)
Contribution sédimentaire des affluents en MES (§.3.3 ; §.5.2.4)	Préciser et actualiser les contributions des affluents dans la balance MES du bassin versant	Estimation et/ou actualisation des flux MES des affluents, notamment sur l'Ain qui est relativement méconnu par rapport à d'autres affluents
Contribution sédimentaire des affluents en charriage (§.3.3)	Préciser et actualiser les contributions des affluents et leurs évolutions à l'avenir	Estimations et/ou actualisation des flux en charge de fond des affluents, notamment : - en matériaux grossiers pour les principaux contributeurs : Arve, Ain, Drôme, etc. - en anticipation d'un éventuel retour de sédiments après comblement de fosses d'extraction : Ardèche, Gardon Les mesures pourraient être réalisées à partir de suivis bathymétriques rapprochés, de prélèvements de charriage in situ et/ou de mesures hydrophones/géophones.
Bilan sédimentaires (§.4.2)	Actualiser et préciser les bilans sédimentaires de certains tronçons mal connus (notamment certains Vieux Rhône, Grand Rhône, Petit Rhône). Intégration des données Dynamique Hydro depuis 2019.	Suivis et comparaisons bathymétriques Suivis des profils en long thalweg et profils moyens
Analyse de la transparence effective de certaines retenues (§.5.1.2)	S'il a été démontré que la retenue de Jons est transparente au charriage, les autres retenues ne présentent pas les mêmes processus, sauf peut-être pour certaines retenues (Le Pouzin, Donzère) et pour des crues décennales ou supérieures	Suivi bathymétrique fréquent, mesures granulométriques en retenue, transpondeurs RFID, stations hydrophone/géophone
Capacité de charriage moyenne annuelle calculée avec granulométrie en transit (§.5.1.3)	L'utilisation de la granulométrie de fond de chaque profil a permis de calculer la « capacité de charriage par remobilisation des matériaux de fond ». L'intégration d'une granulométrie en transit, homogène par tronçon, permettrait de mieux appréhender le transit réel et le devenir de matériaux réinjectés	Calcul de capacités de charriage avec granulométrie des bancs d'alluvions ou des apports d'affluents. Etablissement de profils en long de ces capacités de charriage
Modèle GTM de capacité de charriage par fraction granulométrique (§.5.1.3)	Les paramètres du modèle GTM de capacité de charriage pourraient être adaptés en fonction des UHC afin de mieux caractériser la répartition des flux par classes granulométriques.	Adaptation / calage des paramètres du modèle GTM en fonction des caractéristiques de chaque UHC.
Capacité de charriage en crue (complément à §.5.1.3)	Permettrait d'évaluer la capacité des retenues à remobiliser les sédiments accumulés lors des crues, question à laquelle les calculs de capacité de charriage en moyenne annuelle ne peuvent répondre	Calcul de capacité maximale de charriage et/ou de volume remobilisé pour des crues de différentes intensités (Q2, Q5, Q10, Q30, Q100).
Flux de sables sur l'axe Rhône (§.5.2.3)	Préciser et valider les flux de sables qui sont méconnus sur l'ensemble du linéaire.	Mesures de transport de sables, bilans sédimentaires, sur des événements et/ou en moyenne annuelle, à partir de prélèvements, de mesures ADCP, suivis bathymétriques, etc.

1. Introduction

Le rapport de Mission 2 consiste en une compilation de très nombreux éléments de synthèse existants, complétés et approfondis dans le cadre de l'étude à la lumière de données nouvelles sur l'état et le fonctionnement hydrosédimentaire du fleuve.

Pour les approches thématiques, nous renvoyons le lecteur vers les principales synthèses développées dans le corps du rapport :

- PARTIE A : Sectorisation du fleuve Rhône
 - §.4 : Sectorisation retenue
- PARTIE B : Trajectoire hydromorphologique du Rhône
 - §.2.5 : Chronologie et rôles des aménagements sur la morphologie du fleuve
- PARTIE C : Processus hydrosédimentaires actuels
 - §.3.2 : Granulométrie du lit et des bancs du Rhône,
 - §.3.3 : Contribution sédimentaire des affluents,
 - §.4.2 : Bilans sédimentaires des tronçons homogènes,
 - §.4.3 : Apports à la mer et devenir des sédiments fluviaux,
 - §.5.1.2 : Taille maximale des particules remobilisables,
 - §.5.1.3 : Capacité de charriage moyenne annuelle,
 - §.5.2.3 : Capacités de charriage pour les sables,
 - §.5.2.4 : Transit des matières en suspension.

Pour cette dernière PARTIE D, nous proposons de synthétiser le fonctionnement sédimentaire en le décrivant sous quatre angles complémentaires :

- Une synthèse des connaissances à approfondir ;
- L'historique du continuum sédimentaire, vu à travers les aménagements successifs du fleuve ;
- Le récit des flux grossiers (et sableux) actuels du Rhône et de ses affluents entre Genève et la Méditerranée, en lien avec les principales pratiques de gestion qui sont opérées sur les sédiments grossiers (cf. Mission 4) ;
- Une synthèse quantifiée et graphique des altérations du fonctionnement hydrosédimentaire, par unités hydrographiques cohérentes (UHC).

On rappellera que le rapport de Mission 2 serait incomplet sans le rapport de Mission 3 qui synthétise des enjeux et le rapport de Mission 4 qui établit un retour d'expérience des actions de gestion et de restauration. Des renvois sont faits entre rapports et le lecteur pourrait s'y reporter autant que de besoin.

2. Synthèse des connaissances à approfondir

A travers le travail de synthèse du présent rapport de Mission 2 ainsi que dans l'élaboration des fiches UHC, nous avons identifié plusieurs sujets qui mériteraient d'être développés à l'avenir pour approfondir ou actualiser la connaissance hydrosédimentaire.

A ce stade, ces sujets sont simplement identifiés par thématiques. Ces éléments viendront ultérieurement alimenter la Phase 2 et notamment la Mission 9 sur la mise à jour du Schéma directeur.

Par contre, l'aménagement de barrages sur le Fier a coupé ses apports qui était estimés à 60 000 m³/an depuis le début du 20^{ème} siècle : Motz en 1919, et Vallières en 1928 ;

3. Historique du continuum sédimentaire

Dans cette partie, nous proposons de combiner la connaissance des aménagements historiques avec l'évolution du fonctionnement hydrosédimentaire du Rhône et de ses affluents.

Il s'agit ainsi d'un récit historique sur le continuum sédimentaire du Rhône qui se base sur les données synthétisées dans le présent rapport de Mission 2.

- **Jusqu'au début au 19^{ème} siècle**, les évolutions morphologiques du Rhône sont essentiellement naturelles, liées aux événements hydrologiques, à la production sédimentaire des bassins versants, alors que le Petit Age Glaciaire entre dans cette dernière phase. Les flux sédimentaires ne sont pas perturbés par des obstacles entre Genève et la mer Méditerranée. Il existe toutefois des ruptures de continuité sédimentaire naturelles, liées à des remplissages d'ombilics glaciaires, à des zones de divagation / tressage, ou aux effets du relèvement du niveau marin. Parmi ces secteurs, on peut citer notamment : les Basses Terres du Dauphiné (07-BRC), l'île de Miribel-Jonage / (10-ALY), les îles d'Avignon (21-AVI). Dans le delta du Rhône, les premiers aménagements cherchent à endiguer le Rhône pour limiter ses défluviations et conduire ses sédiments sur le littoral ; depuis le Moyen Age, le bras du Grand Rhône a peu à peu été consolidé dans son rôle de drain principal ;
- **A partir des années 1870**, les aménagements Girardon (à partir de 1883) et autres travaux de chenalisation pour améliorer la navigation ont initié une concentration de la lame d'eau et une incision du lit mineur (-1,81 m en moyenne) qui ont modifié la morphologie du lit et le comportement du transport solide : en même temps que la capacité de charriage au sein du lit mineur était augmentée, une partie des matériaux transportés était piégée dans les casiers latéraux ; dans une certaine mesure, ce nouveau fonctionnement a dû conduire à des déséquilibres sédimentaires, avec dans certains secteurs un tarissement de la charge de fond en transit, et d'autres secteurs des excédents en accumulation. Les flux sédimentaires du Rhône à cette époque sont mal connus. Toutefois, on peut dire que les affluents encore peu aménagés pouvaient continuer à approvisionner le fleuve ;
- **Jusqu'en 1899, aucun aménagement hydroélectrique n'est présent**, en dehors du barrage de la Machine à Genève construit en 1884 à l'emplacement de l'actuel barrage du Seujet en sortie du lac Léman. En 1899 : le canal de Jonage, dérivation du Rhône vers l'usine de Cusset (10-ALY) est créé, alors que le canal de Miribel est aménagé depuis 1847 pour tenter d'améliorer la navigation (ce qui sera effectif quelques années seulement). La dérivation du canal de Jonage, même si elle réduit son activité, n'empêche pas le déséquilibre sédimentaire du canal de Miribel : celui-ci s'incise de 2 à 3 m en quelques décennies, ce qui a pour conséquence d'augmenter sa capacité de charriage et de mener des sédiments de l'Ain jusqu'à l'entrée de Lyon. Le canal de Miribel n'est plus utilisé pour la navigation et devient un tapis roulant à cailloux. Dès que la mécanisation a été possible, vers 1920 environ, il est très probable que, dans la traversée de Lyon, des dragages aient pu être initiés pour protéger l'agglomération des risques d'inondation majorés provoqués par les accumulations de sédiments.
- **En 1924, l'ouvrage de Chancy-Pougny (02-CHP) est créé**. Cet ouvrage recevait les apports solides de l'Arve a priori très conséquents (100 000 à 200 000 m³/an en charriage selon les estimations / fiche UHC#01-SUI). La maîtrise du comblement de l'ouvrage devait être obtenue par des mises en transparence très fréquentes en crues et des chasses ;
- **En 1937, suite à l'incision du canal de Miribel, le barrage de retenue de Jons (10-ALY) est créé pour mieux dériver les eaux vers l'usine de Cusset**. A partir de cette date et jusqu'en 1983, une partie des flux grossiers s'engagera dans le canal de Jonage et fera l'objet de dragages réguliers, avec clapage des sédiments devant le barrage de Jons, en direction du canal de Miribel ;
- **En 1943, le barrage de Verbois est mis en service (01-SUI)**. Ce barrage fait l'objet de chasses biennales dès sa création, coordonnées avec Chancy-Pougny (02-CHP), afin d'éviter son comblement par les sédiments de l'Arve. Le comblement est tout de même de 120 000 m³/an jusqu'en 1960, ce qui correspond à 1/3 des apports actuels de l'Arve (actuellement 360 000 m³/an, par MES et charriage). Depuis la création de la retenue de Verbois, tous les matériaux grossiers de l'Arve s'y sont stockés avec un rythme compris entre 100 000 et 20 000 m³/an (rythme actuel). Jusqu'en 1948 et la création du barrage de Génissiat, la Chautagne et les linéaires aval n'auront pas été privés de sédiments par les barrages de Verbois et de Chancy-Pougny ; en effet, les temps de transfert sont trop longs pour que l'effet des deux ouvrages amont se soit fait ressentir en une vingtaine d'année.

- **En 1948, le barrage de Génissiat est mis en service (03-GEN), puis celui de Seyssel en 1951**. Le barrage de Génissiat, présentant une chute d'eau de 64,5 m et une retenue de 23 km de longueur, va retenir les sédiments fins et grossiers (provenant d'affluents intermédiaires), et va commencer à se combler sur un rythme de plus de 400 000 m³/an jusqu'en 1970 malgré les premiers essais d'accompagnement des chasses suisses (cf. fiche UHC#03-GEN et rapport de Mission 3). Ainsi, la présence des barrages suisses, des barrages de Génissiat et de Seyssel, couplés à ceux du Fier, fait qu'à partir de 1948, le Rhône de Chautagne encore non aménagé ne reçoit plus d'apports grossiers, excepté de la part des Usses, soit au maximum 20 000 m³/an, au lieu de l'ordre de 160 000 m³/an avant 1924 ;
- **Après 1945-1950 et la reconstruction d'après-guerre**, le rôle des aménagements hydroélectriques du Rhône va se superposer avec celui des extractions dans le lit du fleuve, qui ont probablement commencé plus tôt dans la traversée de Lyon, et avec les conséquences des aménagements sur les affluents (barrages, extractions, endiguements). Entre 1954 et 1995, ce sont en effet 55,9 millions de m³ de granulats (effectifs et potentiels) qui ont été extraits du Rhône, en priorité dans les retenues (Vaugris, Pierre-Bénite, Péage de Roussillon, Vallabrègues, etc.), dans les queues de retenue, notamment au niveau des restitutions d'usines (dragages énergétiques), et dans les Vieux Rhône (Donzère-Mondragon, etc.). Ces extractions ont participé au développement de la vallée en fournissant des déblais pour les endiguements CNR, les centrales nucléaires (CNPE), etc. En considérant des flux de charriage moyens qui oscillaient entre 100 000 et 350 000 m³/an (moyenne 150 000 m³/an) selon les secteurs, ces extractions ont donc privé le Rhône de 150 à 550 ans d'années de charriage. Pendant la période très active (1971-1985), le volume d'extraction annuel équivalait sur le Rhône aval à 10 fois le transit annuel. L'incision du lit va se poursuivre (-0,46 m en moyenne) et l'étude a montré qu'elle est essentiellement due aux volumes d'extraction précédents. L'aménagement des ouvrages CNR ne va pas renverser les processus puisque les apports en charge de fond seront bloqués, mais il va diminuer l'activité sédimentaire des Vieux Rhône, et généraliser le pavage du lit en lessivant les derniers matériaux de petite taille remobilisables.
- **En 1952, le premier ouvrage du Rhône aval est mis en service à Donzère-Mondragon (19-DZM)**. Au niveau de cet ouvrage, les flux grossiers représentaient au 19^{ème} siècle avant aménagements de l'ordre de 350 000 m³/an (valeur maximale du linéaire du Rhône) et étaient constitués des apports du Rhône en aval de Lyon (100 000 m³/an), des apports de l'Isère (50 000 à 100 000 m³/an) qui doubleraient ceux du Rhône, des apports de plusieurs affluents intermédiaires (Eyrieux / 20 000 m³/an, Drôme / 40 000 m³/an, Ouvèze / 15 000 m³/an, Escoutay, Roubion, etc.). En réalité, dès 1952, les flux par charriage au sein du Rhône étaient probablement inférieurs à ces valeurs du fait des aménagements Girardon qui avaient bloqué une partie de la charge de fond sur les marges et qui avaient provoqué un pavage progressif du lit. Par ailleurs, les aménagements sur les affluents avaient déjà produit leurs effets : par exemple, les barrages de la basse vallée de l'Isère ont été mis en service entre 1922 et 1963, ce qui a rapidement contribué, avec les extractions dans le bassin versant de l'Isère, à limiter les apports grossiers au Rhône. Quoiqu'il en soit, les flux de charriage du Rhône au droit de Donzère vont drastiquement être interrompu par blocage des apports résiduels amont et par extractions : de 1954 à 1994, on constate des extractions de 2 à 2,9 hm³ dans la retenue (soit 50 000 à 72 500 m³/an) ; dans le Vieux Rhône de Donzère, les extractions s'élèvent entre 3,2 et 3,9 hm³ entre 1969 et 1991, soit entre 145 000 à 177 000 m³/an. Ainsi, à partir de 1952, l'ouvrage de Donzère est devenu un point de rupture majeur du charriage. De son côté, le Vieux Rhône de Donzère ne pouvait plus être alimenté par l'Ardèche dont les apports étaient piégés dans des fosses d'extraction en amont de la restitution ;
- **En 1957, l'ouvrage de Montélimar (18-MON) est mis en service**. Des extractions sont engagées dès 1958 dans la retenue, pour un total de 2 hm³ jusqu'en 1991, soit 60 000 m³/an en moyenne, ce qui a contribué à soutirer une grande partie, sinon la totalité, du stock grossier présent. En parallèle, des extractions sont menées dans le Vieux Rhône, transformant ainsi le site de Montélimar en un autre point de discontinuité charriage ;
- **En 1960, l'ouvrage de Baix-Le-Logis-Neuf (17-BLN) est mis en service à son tour**. Cet ouvrage bénéficiait des apports sédimentaires du Rhône depuis l'amont (qui devaient commencer à être impactés par les extractions dans Lyon et ses alentours), et des apports d'affluents de proximité : la Drôme, Eyrieux, et l'Ouvèze qui pouvaient encore apporter de l'ordre de 50 000 m³/an. Les premières extractions n'ont eu lieu qu'à partir de 1976, soit 16 ans après la mise en eau, ce qui est tardif et peut s'expliquer par des stockages dans la retenue, mais plus probablement par des extractions en amont qui limitaient les arrivées. Notamment, il est identifié des extractions dans la Drôme dans les années

1960, notamment pour la construction de l'A7, puis extractions à partir de 1971 sur Bourg-lès-Valence.

- **Ainsi, en 1960, seuls 9 aménagements hydroélectriques sur 22 ont été construits sur le Rhône : Verbois et Machine (01-SUI), Chancy-Pougny (02-CHP), Génissiat (03-GEN), Seyssel (04-SEY), Jons-Cusset (10-ALY), Baix-Le-Logis-Neuf (17-BLN), Montélimar (18-MON), Donzère-Mondragon (19-DZM).** Cependant, avec ces ouvrages, cumulés avec les aménagements sur les affluents et les extractions, les flux de charriage sont déjà fortement altérés.

L'état des flux en 1960 peut être interprété ainsi :

- **Le Haut-Rhône en amont de l'Ain** ne reçoit plus que les apports grossiers d'affluents de moyenne taille en aval de Génissiat : pour partie ceux des Usses (20 000 m³/an) et ceux Guiers (10 000 m³/an), probablement déjà réduits par des extractions dans leur propre bassin versant (nombreuses extractions dans les Usses, extractions sur le Guiers au Pont-de-Beauvoisin). Il existe par ailleurs des carriers installés sur le Rhône en plusieurs sites et qui profitent des phénomènes d'érosion progressive : au Pont de la Loi (05-CHA / 06-BEL), amont pont de Groslee (07-BRC). Les flux alimentant le secteur de Brégnier-Cordon sont donc négligeables, et malgré de travaux de chenalisation du Rhône pour la navigation, les sédiments grossiers ne vont pas plus loin que le défilé de Malarage (actuelle queue de retenue de Sault-Brénaz). Ainsi, depuis la dernière période glaciaire, le site de Sault-Brénaz, qui sera aménagé en 1986, n'aura jamais vu transiter de sédiments grossiers ;
- **le Haut-Rhône aval** bénéficie d'apports de l'Ain estimés à 100 000 m³/an avant aménagement, et qui sont probablement en régression à partir de 1960 avec les aménagements de barrages en amont (à partir de 1931) et du fait d'extractions. Dès son entrée dans le canal de Miribel, le Rhône fait l'objet d'extractions massives dès 1950 en plusieurs sites, jusque dans la traversée de Lyon. Le transit de flux grossiers dans l'agglomération de Lyon, initialement de 20 000 m³/an, est en cours d'extinction, et il ne se réactivera pas avant la mise en eau du barrage de Pierre-Bénite (1966) ;
- **sur le Rhône médian**, le fleuve peut compter sur quelques apports grossiers, probablement inégaux du fait des extractions subies dans les bassins versants, grâce à des affluents moyens : Garon, Gier, Sévenne, Gère, Varèze, Galaure, Ay, Cance, le plus important d'entre eux étant le Doux (8 000 m³/an). Suite aux aménagements de la basse Isère, les apports en charriage de cet affluent au Rhône sont probablement déjà nuls en 1960 ;
- **sur le Rhône inférieur :**
 - **les aménagements hydroélectriques de Baix-le-Logis-Neuf, Montélimar et Donzère-Mondragon sont fonctionnels**, et constituent de par leur présence et les extractions réalisées, une discontinuité sédimentaire importante, bien que les apports du Rhône amont et des affluents s'amenuisent pour les mêmes raisons (extractions dans les bassins versants et les linéaires aval des affluents) ;
 - **plus en aval, les contributions au Rhône des principaux affluents sont laissées libres :** Cèze (10 000 m³/an avant aménagements), Aigues (2 000 m³/an ; dont les apports ont toujours été très faibles), Ouvèze (5 000 m³/an), Gardon (5 000 m³/an) et surtout Durance (200 000 m³/an). Cependant, ces cours d'eau commencent à faire l'objet d'extractions dans leurs bassins versants ; la Durance est par ailleurs équipée d'ouvrages hydroélectriques à partir de 1959. Aussi, les apports réels en 1960 vont peu à peu décroître (la valeur actuelle de tous ces affluents est de 12 000 m³/an en cumulé). Le Rhône lui-même ne fait pas encore l'objet d'extractions massives, celles-ci vont démarrer dans les années 1970 avec les aménagements des barrages hydroélectriques du Rhône Inférieur.
- **Ainsi, à partir de 1960, lorsque vont se construire les 13 ouvrages suivants, le Rhône a un fonctionnement par charriage déjà très altéré sur l'ensemble de son linéaire** par la conjugaison des effets des premiers aménagements hydroélectriques, des extractions qui vont prélever sur chaque UHC jusqu'à 10-20 ans d'apports sédimentaires avant aménagements, et par l'aménagement des bassins versants affluents (extractions, barrages, endiguements). L'aménagement du Rhône va se poursuivre, dans des conditions de moindres contraintes sédimentaires :
 - sur le Rhône médian : Beauchastel (1960), Pierre-Bénite (1966), Bourg-lès-Valence (1968), St-Vallier (1971), Péage-de-Roussillon (1977), Vaugris (1979) ;
 - sur le Rhône inférieur : Vallabrègues (1970), Avignon (1973), Caderousse (1975) ;

- et avec des extractions sur chaque site, qui aident notamment à la construction des plateformes des CNPE de Bugey (09-VUL, 1972), St-Alban (13-PDR, 1986), Cruas-Meysses (18-MON, 1983), Tricastin (19-DZM, 1980) ;
- **Enfin, les derniers aménagements du Haut-Rhône** seront réalisés dans des contextes sédimentaires également très pauvres en sédiments grossiers : Chautagne (1980), Belley (1982), Brégnier-Cordon (1983), Sault-Brénaz (1986). Ces ouvrages auront peu d'incidences à l'échelle globale sur les flux de charriage, sinon à l'échelle des RCC dont l'hydrologie est modifiée, réduisant l'activité sédimentaire.

4. État actuel des flux grossiers du Rhône et de ses affluents

A la lumière de la trajectoire historique et des fonctionnements hydrosédimentaires, il est possible de dresser un bilan actuel des flux sédimentaires grossiers du Rhône sur l'ensemble de son linéaire.

Si le continuum sédimentaire n'a jamais existé, même au 19^{ème} siècle, du Léman à la Méditerranée, les connaissances synthétisées dans le présent travail offrent aujourd'hui une vision d'ensemble et détaillée du dit-continuum sédimentaire du Rhône.

Pour les données détaillées et les sources, nous proposons de se référer aux fiches UHC correspondantes.

► Sur le Haut Rhône

En Suisse, un Rhône torrentiel parcourt le Valais avant de se jeter dans le lac Léman alors qu'il est capable de transiter une charge de fond de 25 000 m³/an environ. A Genève, le Rhône recommence son cours avec de l'eau claire au sortir du lac Léman et du barrage du Seujet (01-SUI). C'est l'Arve qui est son premier affluent et qui lui propose une charge sédimentaire de 20 000 m³/an environ. Cependant, ces apports grossiers sont piégés dès la Jonction, dans la retenue du barrage de Verbois (01-SUI) et doivent être dragués pour être clapés plus loin dans la retenue. Les limons et sables sont remobilisés par les APAVER (abaissement partiel du barrage de Verbois) qui visent, tous les 4 ans environ, à les évacuer de la retenue et les faire transiter plus en aval, aidés en cela par les mises en transparence des ouvrages de Chancy-Pougny, de Génissiat et Seyssel.

Entre le barrage de Chancy-Pougny (02-CHP) et la retenue du barrage de Génissiat (03-GEN), les capacités de charriage sont relativement importantes (env. 50 000 m³/an), et les apports intermédiaires ne représenteraient que de l'ordre de 5 000 m³/an (Allondon, Laire, Annaz). Les apports de l'Allondon, qui se jette dans la retenue, semblent pouvoir transiter dans la retenue de Chancy-Pougny lors des accompagnements d'APAVER. Le fleuve connaît donc une tendance à l'incision dans ce secteur courant, comme en témoigne la construction au début des années 2000 d'un seuil au niveau du pont de Pougny.

Plus en aval, la retenue du réservoir de Génissiat bloque tout transit de la charge grossière, même pendant les APAVER (03-GEN) et les crues. La queue de retenue correspond au site naturel de l'Etournel qui accumule progressivement l'essentiel des matériaux grossiers apportés de l'amont, sachant que la taille de gravier maximale actuellement observée au pont Carnot (APAVER de 2016, donnée IRSTEA) est de 10-20 mm environ. Le site de l'Etournel accumule également des sables et limons qui recomposent en permanence la morphologie du Rhône et de ses annexes.

La gestion actuelle de la retenue de Génissiat lors des accompagnements d'APAVER permet d'évacuer des sables fins, mais les tailles supérieures, y compris les sables grossiers, s'accumulent dans la retenue et ne transitent pour l'instant pas au-delà de Valserhône (PK172).

En aval du barrage de Génissiat (03-GEN), dans les gorges du Rhône, les pentes élevées confèrent à nouveau une forte compétence aux écoulements qui ne déstabilisent toutefois pas le lit en raison du pavage et des affleurements du substratum. La retenue de Seyssel (04-SEY) est globalement transparente car la capacité de charriage élevée dans la partie amont (10 000 à 50 000 m³/an) dépasse la fourniture via le barrage de Génissiat qui est limitée aux sables fins. Toutefois, sans mise en transparence lors des accompagnements d'APAVER, les matériaux sableux ont tendance à s'accumuler en amont du barrage.

La remobilisation attestée, par le passé, de sédiments issus du dragage de la confluence des Usses et clapés dans la retenue, indique qu'une partie de la charge solide peut franchir l'ouvrage. Cependant, sous le barrage, si les capacités de charriage restent importantes (20 000 m³/an), elles diminuent progressivement et sévèrement vers la confluence avec le Fier et la retenue de Chautagne (05-CHA) et ont conduit, ces dernières décennies, à draguer des volumes importants (notamment en 2008-2009).

En aval du barrage de Chautagne (05-CHA), alors que les pentes de l'ordre de 1‰ favorisent la dynamique alluviale, le manque d'apports grossiers entraîne un export des stocks alluviaux en place, à hauteur d'environ 7 000 m³/an, et ce résultat est bien corrélé avec le déstockage topo-bathymétrique du RCC (environ 13 000 m³/an en tout, matériaux fins compris). Ce RCC a bénéficié d'une réinjection de 15 000 m³ en 2016 dans sa partie amont, et il a été démontré que l'ensemble du cortège granulométrique (jusqu'à 90 mm) pouvait être mobile en crue décennale (Q10). Le transport solide se maintient jusqu'à la restitution puis devient plus faible au niveau du pont de la Loi où le fleuve dépose progressivement de son transport solide (dépôt d'environ 3000 à 5000 m³/an au Pont de la Loi), jusqu'à l'intérieur de la retenue de Lavours (06-BEL), qui ne permet in fine que le transit du sable.

Dans le Vieux Rhône de Belley (06-BEL), le transport est discontinu, influencé par plusieurs seuils (Fournier, Lucey, Yenne) ; il se génère par des déstockages et des érosions progressives, en l'absence d'apports amont. Si les capacités de charriage sont encore partiellement effectives (1 000 à 2 000 m³/an) en aval du seuil Fournier, celui de Yenne, bloque la charge grossière qui devient anecdotique à l'entrée dans la retenue de Brégnier-Cordon (07-BRC), en raison de l'absence d'affluents significatifs et d'une ancienne fosse d'extraction en amont de la restitution. Historiquement, la plaine de Brégnier-Cordon (07-BRC) était comme la plaine de Chautagne ou le marais de Lavours, un secteur de rupture des capacités de transport solide, anciens ombilics glaciaires progressivement remplis par les apports amont. Le secteur entre le pont d'Evieu et le pont de Groslée correspond au secteur le plus contemporain de cette rupture de la charge de fond, conduisant à l'absence de flux grossiers dans ce qui est aujourd'hui la retenue de Sault-Brénaz.

Dans le Vieux Rhône de Brégnier-Cordon (07-BRC), les capacités de transport résiduelles (quelques centaines de m³/an) sont du même ordre de grandeur que les apports supposés du Guiers (500 m³/s). En aval de la restitution du canal de fuite et jusque dans la retenue de Sault-Brénaz (08-SAB), le transport solide peut devenir en théorie plus important (environ 6 500 m³/an) mais il concerne essentiellement des sables. Dans les conditions actuelles d'état de la retenue de Sault-Brénaz, en cours de sédimentation, aucun matériau plus gros que le sable n'est en mesure de franchir le barrage de Villebois.

Le Rhône total de St-Vulbas (09-VUL) présente en théorie une capacité de charriage de l'ordre de 10 000 m³/an, mais le charriage réel ne s'effectue probablement pas à saturation du fait de l'absence de fourniture en amont et des cicatrices d'anciennes extractions au droit du CNPE du Bugey. Les apports du Rhône amont au droit de la confluence de l'Ain sont, dans la configuration actuelle, tout au plus de quelques milliers de m³/an en charriage.

L'Ain (10-ALY) est confirmé comme le principal contributeur du Rhône en matériaux grossiers, avec de l'ordre de 30 000 à 40 000 m³/an (hors sables) qui ne nécessitent pas de dragage à la confluence. En effet, la retenue de Jons (10-ALY) s'avère transparente aux apports grossiers, même si des phénomènes de stockage temporaire lui sont associés. Dans les facteurs pouvant expliquer cette transparence sédimentaire, peuvent être listés des facteurs extraits des analyses précédentes :

- l'ouvrage a très peu d'effet de retenue en amont. Le remous en débit semi-permanent est de 2 km. Le relèvement de la ligne d'eau semi-permanente est seulement de 2 à 3 m par rapport à la situation 1860, pour un ouvrage qui présente aujourd'hui une chute de 6,50 m ;
- L'ouvrage n'a quasiment aucun impact en crue : pour une crue biennale (Q2), la perte de charge résiduelle est de 1,50 m et le remous est inférieur à 500 m ; l'ouvrage est transparent pour Q10. Par ailleurs, il n'existe pas ou peu d'enjeu hydraulique autour de la retenue en amont ;
- D'anciens aménagement de chenalisation sont encore présents dans la retenue (type aménagements Girardon) et sont des facteurs favorisant la reprise et le transit des sédiments ;
- La retenue de Jons n'est pas aménagée ni gérée pour la navigation. Il n'existe donc pas de contraintes sur les niveaux d'eau (hauteur de mouillage) ou sur les vitesses d'écoulement (2 m/s au maximum) ;
- L'équipement de l'ouvrage est limité : en effet, le débit d'équipement de la centrale de Cusset est de 640 m³/s, soit une valeur proche du module de 590 m³/s. C'est le ratio d'équipement le plus faible de vallée (1,08 contre 1,5 en moyenne) ; il implique donc des déversés plus fréquents dans le RCC et ainsi une ouverture des vannes plus fréquente, en mesure de faciliter le transit des sédiments.

Au barrage de Jons (10-ALY), une partie des flux entre dans le canal de Jonage (historiquement environ 10 000 m³/an, actuellement plutôt de l'ordre de 4 000 à 5 000 m³/an suite à la saturation du canal), et le reste, environ 30 000 m³/an, peut alimenter le canal de Miribel. Ce canal, issu de travaux au 19^{ème} siècle pour la navigation, et exposé à de nombreuses extractions jusque dans les années 1990, est proche d'avoir retrouvé une continuité sédimentaire complète, même s'il reste très incisé par rapport à sa situation du milieu du 19^{ème} siècle. Le canal semble être le siège de bouffée de charriage liées au franchissement épisodiques du barrage de Jons et de phénomènes de tris granulométriques au sein de la section chenalisée qui ne peut respirer

qu'en variations altimétriques. La configuration chenalisée et rectiligne favorise le transit qui se propage jusqu'à la diffuence de la brèche de Neyron, où le flux se partage :

- 20 000 m³/an environ entrent dans le delta de Neyron et le Vieux Rhône de Neyron, anciens lieux d'extractions de granulats. Les anciennes fosses du delta ont fini de se remplir dans les années 2005, et les flux alimentent régulièrement le Vieux Rhône qui fait l'objet de dragages depuis les années 2013 afin de préserver les installations des champs captants de Crépieux Charmy (Métropole de Lyon), conçues et installées dans une configuration sans charriage ;
- Le reste du flux (10 000 m³/an) poursuit dans le canal de Miribel aval et se dépose dans l'ancienne fosse d'extraction de la Feyssine (sous les seuils de Caluire à hauteur du périphérique TEO) dont le comblement n'est pas complet (environ 250 000 m³ en 2019 sur un volume initial estimé entre 0,6 et 0,8 hm³, compensation hydraulique des aménagements du BPNL et de la Cité Internationale).

En aval de cette fosse, le Rhône pénètre dans la queue de retenue de Pierre-Bénite (11-PBN) qui traverse Lyon. Actuellement, il n'existe pas d'indice de poursuite de la charge de fond en aval de la fosse de la Feyssine. Par contre, le sable transite à saturation, et sous une à deux décennies, les premiers graviers pourraient commencer à pénétrer dans Lyon où, en théorie, ils pourraient transiter jusqu'à hauteur de Perrache, sans toutefois être en mesure d'atteindre le barrage de Pierre-Bénite.

► Sur le Rhône Moyen

Le Vieux Rhône de Pierre-Bénite (11-PBN) ne bénéficie d'aucun apport grossier. Les apports de la Saône, le plus grand affluent du Rhône, uniquement sablo-limoneux, combinés avec les extractions de granulats dans Lyon, ont favorisé une très forte incision historique de ce RCC. La capacité de charriage dans ce Vieux Rhône pavé est résiduelle, croissante vers l'aval jusqu'à 6 000 m³/an avant de décroître vers la restitution du fait d'anciennes fosses d'extractions. La retenue de Vaugris (12-VAU) a fait l'objet de très nombreuses extractions dans les années 1990 ; de plus, sa capacité de charriage est très faible (1 000 m³/an), elle piège totalement les quelques apports des affluents influencés par le remous et qu'il faut draguer (Garon, Gier, Sévenne, Gère).

Au passage du barrage de Vaugris, le Rhône ne bénéficie pas d'apports autres que sableux ; la queue de retenue de St-Pierre-de-Bœuf (13-PDR) présente une certaine capacité de charriage (10 000 m³/an) qui mobilise les sables et les dépose dans la retenue plus en aval, dans les méandres des Roches de Condrieu ou vers la prise d'eau du CNPE de St-Alban, à mesure que la capacité décroît (1 000 m³/an). La retenue de St-Pierre-de-Bœuf reçoit de nombreux petits apports sablo-graveleux d'affluents de petite taille tels que la Varèze pour le plus important (1 000 m³/an), la Valencize, l'Arbuel, le Vérin, l'Aleau, le Reynard (quelques centaines de m³/an au total), qui sont bloqués à la confluence ou piégés dans la retenue.

Le Vieux Rhône de Roussillon (13-PDR) ne bénéficie pas d'apports grossiers amont, la confluence de la Varèze étant trop éloignée du barrage de St-Pierre-de-Boeuf. Il présente une capacité de charriage au maximum de 6 000 m³/an, qui décroît vers l'aval sous l'influence du seuil de Peyraud, transparent à hauteur de 2 000 m³/an environ. Une réinjection réalisée en 2017 pour un volume de 7 000 m³ en tête du RCC a montré que les sédiments avaient commencé à être remobilisés pour une crue biennale (Q2) et que l'ensemble des tailles s'est mobilisé pour une crue quinquennale (Q5), et ce sur plusieurs centaines de mètres.

En entrant dans la queue de retenue de St-Vallier (14-STV), le Rhône retrouve de la capacité de charriage (jusqu'à 15 000 m³/an) qui lessive les apports de sables et incise la partie aval du RCC de Roussillon. Toutefois, rapidement la retenue présente une capacité de charriage faible (1 000 à 2 000 m³/an) qui n'est pas capable de remobiliser les nombreux apports grossiers des affluents dragués et clapés : le Bancel (1 000 m³/an), la Cance (4 à 5 000 m³/an), l'Ay (500 m³/an), la Galaure (4 à 6 000 m³/an), soit de l'ordre de 10 000 à 12 000 m³/an.

Le Vieux Rhône de St-Vallier (14-STV) ne bénéficie donc pas non plus d'apports grossiers amont, sa capacité limitée à 2 000 m³/an environ lui permet d'évacuer les sables, et sa courte distance le confond rapidement avec la queue de retenue de Bourg-lès-Valence (15-BLV) où la capacité de charriage remonte à 10 000 m³/an à la restitution. Une nouvelle fois, cette capacité diminue fortement en aval de la confluence avec le Doux dont les apports estimés à 6 000 m³/an ne peuvent être remobilisés, même quand ils sont dragués puis clapés dans la retenue comme en 2012-2013. Le dernier tronçon de la retenue, en aval immédiat de la prise d'eau du canal usinier a tendance à fortement s'ensabler.

Le Vieux Rhône de Bourg-lès-Valence (15-BLV), comme ses prédécesseurs, ne reçoit pas d'apports grossiers amont. Il est très incisé suite à d'anciennes fosses d'extraction que les seuls apports sableux ne peuvent combler. Cette partie aval du RCC de capacité 3 000 m³/an reçoit également les apports sableux en crue ou en chasse de l'Isère par le barrage de l'Isère. Les apports grossiers du Mialan (1 800 m³/an), dans la partie aval du RCC, se perdent vite dans la retenue de Beauchastel, avec ou sans dragage.

► Sur le Bas Rhône

La retenue de Beauchastel (16-BEA) présente potentiellement une capacité de charriage total importante (20 000 m³/an) qui est probablement surévaluée du fait de granulométries sableuses intégrées dans les calculs. Néanmoins, dans son chenal principal, elle arrive effectivement à évacuer les apports sableux liées aux crues et chasses de l'Isère, mais ses marges accumulent des sédiments fins qu'il est nécessaire de draguer.

Le Vieux Rhône de Beauchastel (16-BEA) démarre son linéaire sans apports grossiers, et tombe rapidement sous l'influence lentique de la retenue du Pouzin (17-BLN). Les apports de la Véore, négligeables (500 m³/an) se perdent dans le Vieux Rhône profond, et les apports du Turzon (700 m³/an) et de l'Embroye (500 m³/an), confluent avec le canal usinier sans profiter au RCC.

A la restitution de l'usine de Beauchastel (16-BEA), le Rhône reçoit les apports sableux et graveleux (5 000 m³/an) de l'Eyrieux qui sont généralement clapés dans la retenue après dragage. Un peu plus en aval, toujours dans la retenue du Pouzin (17-BLN), le Rhône reçoit les apports de la Drôme dont les contributions sédimentaires sont en très grande partie bloquées dans un piège à sédiments conçu en deux parties pour retenir les matériaux grossiers en amont (20 000 m³/an), et les matériaux plus fins en aval. La retenue du Pouzin présente une capacité de charriage plutôt élevée à la restitution de Beauchastel (30 000 m³/an) qui permet de remobiliser les matériaux de l'Eyrieux ainsi que les matériaux de la Drôme qui par le passé ont régulièrement été clapés dans ce secteur ayant fait l'objet d'extractions. Cependant, la capacité de charriage diminue à l'approche du barrage du Pouzin (environ 6 000 m³/an), ce qui favorise les dépôts, y compris les 3 000 m³/an d'apports latéraux de l'Ouvèze ardéchoise en amont immédiat du barrage. Au final, la retenue du Pouzin (17-BLN) présente une contradiction : les faibles capacités de charriage moyen annuel font que les sédiments s'accumulent, en priorité entre la Drôme et le barrage, et nécessitent une intervention de dragage ; inversement, d'après les lignes d'eau et pertes de charge pour les crues décennales et supérieures, l'ouvrage devrait être en partie transparent à une fraction de charriage, non caractérisée à ce jour.

Le Vieux Rhône de Baix-le-Logis-Neuf (17-BLN) pourrait donc bénéficier d'apports grossiers amont, tout au moins en crues décennales et supérieures. Sa capacité de charriage (15 000 m³/an) est élevée dans sa partie courante, où le substratum rocheux a toujours affleuré. Ce RCC est caractéristique de l'augmentation de la pente naturelle moyenne du Rhône dans ce secteur et jusqu'à Donzère-Mondragon. A ce niveau, les apports de la Payre (500 m³/an) sont imperceptibles. A la restitution de l'usine de Logis-Neuf, le Rhône gagne encore en capacité de charriage (25 000 m³/an), avant de pénétrer dans la large retenue de Montélimar (18-MON) où il perd très fortement ses capacités de charriage (2 000 m³/an), ce qui favorise la sédimentation des grossiers mais aussi des sables et des fines.

Le Vieux Rhône de Montélimar (18-MON) ne bénéficie pas d'apports grossiers par le barrage de Rochemaure ; les apports d'un affluent rive droite qui conflue sous le barrage (Lavézon ; 2 000 m³/an) sont gérés dans un piège à sédiments qui reçoit beaucoup moins d'apports que par le passé. Avec une capacité de charriage de 20 000 m³/an, le Vieux Rhône peut remobiliser les apports du Frayol (ou Lorobouire ; 500 m³/an) et mais peine à remobiliser les apports de l'Escoutay (5 000 m³/an), dont la confluence est sous l'influence du remous du barrage de Donzère (19-DZM), et qui obstruent le chenal navigable de la cimenterie Lafarge. Ce chenal navigable, installé sur la partie aval du Vieux Rhône doit être dragué à hauteur d'environ 6 000 m³/an en moyenne, ce qui correspond à une valeur minimale des apports amont, dont une partie est probablement issue d'un déstockage par érosion régressive. Les apports du Roubion (2 000 m³/an) n'atteignent pas le Rhône, ils sont généralement clapés dans le canal usinier, en amont de la confluence, dans un secteur en dépression du fait du recoupement d'une ancienne terrasse alluviale par le canal.

La retenue de Donzère (19-DZM), qui reçoit des apports grossiers de l'Escoutay et un transport solide résiduel dans le Vieux Rhône de Montélimar (10 000 m³/an au total en théorie) reprend de la capacité de charriage à la restitution (30 000 m³/an) avant une forte décroissance au barrage de Donzère (3 000 m³/an). Cette retenue a fait l'objet d'extractions par le passé qui conduisent à ce que son bilan sédimentaire soit toujours en déficit, même si elle reste sensible à la sédimentation en amont du barrage. Toutefois, les conditions d'écoulement en crue exceptionnelle (comme par exemple celles de 2002 ou 2003) assureraient a priori une certaine transparence à la retenue.

Le Vieux Rhône de Donzère (19-DZM) ne reçoit donc pas d'apports grossiers sous le barrage de Donzère. Sa capacité de charriage est potentiellement élevée (30 000 m³/an) et explique l'apparition de seuils rocheux sur son linéaire en déficit. Le Vieux Rhône reçoit peu d'apports d'affluents : 500 m³/an par la Conche dans sa partie amont, 3 000 m³/an dans son tiers aval par l'Ardèche, où la capacité de charriage baisse à 10 000 m³/an environ. Le linéaire a donc fonctionné historiquement en érosion régressive, favorisé par les extractions à hauteur et en aval de Pont-Saint-Esprit, dont les fosses accumulent aujourd'hui le transit résiduel par charriage, tout en bloquant son transfert vers l'aval.

La retenue de Caderousse (20-CAD) démarre avec une capacité de charriage de 8 000 m³/an en aval de la restitution du canal de Mondragon, mais sans apports grossiers. Puis, cette capacité de charriage tombe à 1 000 m³/an à l'approche du barrage de Caderousse, ce qui favorise les dépôts de sable dans cette longue retenue. Le Vieux Rhône de Caderousse ne reçoit pas d'apports grossiers par le barrage de retenue, mais peut bénéficier des apports grossiers de la Cèze (6 000 m³/an). Cependant, sa capacité de charriage de 2 000 m³/an environ est insuffisante pour transiter les matériaux de la Cèze dont une partie est draguée au droit du seuil de la confluence.

En aval de la restitution de Caderousse, le Rhône n'a pas d'affluents ; il augmente sa capacité de charriage (15 000 m³/an), mais celle-ci ne peut porter que sur des sables. Elle chute de nouveau dans la retenue d'Avignon (21-AVI) (2 000 m³/an), ce qui favorise les dépôts de sables dans les branches des usines de Sauveterre et d'Avignon.

Le barrage de Villeneuve (21-AVI) permet la reprise des sables dans la retenue, mais le Vieux Rhône de Villeneuve (2 000 m³/an) ne reçoit pas plus d'apports grossiers. Le bras d'Avignon ne reçoit pas d'apports grossiers non plus (1 000 à 2 500 m³/an), l'Ouvèze provençale étant tarie dans son linéaire aval. Ainsi, seuls les sables transitent en aval de l'UHC d'Avignon, avec une faible capacité malgré la restitution (1 500 m³/an).

La retenue de Vallabrègues (22-VAL) bénéficie des apports de la Durance dont les apports grossiers sont limités à 6 000 m³/an et sont réinjectés dans la retenue après dragage. Ils sont supérieurs à ce que la retenue peut transiter (1 500 m³/an), celle-ci étant très sensible à la sédimentation de sables dans sa partie aval, malgré d'anciennes extractions sur l'essentiel du linéaire.

Le Vieux Rhône de Vallabrègues (22-VAL) ne reçoit pas d'apports grossiers depuis la retenue et sa capacité de charriage, influencée par le seuil de Beaucaire en aval, va en décroissant (3 000 à 300 m³/an). S'il a reçu historiquement des apports du Gardon, ce dernier est actuellement tari et un retour des sédiments devrait être effectif sous 2 à 3 décennies suite au comblement d'anciennes fosses d'extractions dans son linéaire aval.

► Dans le delta du Rhône

Le Palier d'Arles (23-ARL) s'initie en aval de Beaucaire sans apports de sédiments grossiers ni depuis la retenue, ni depuis le Gardon, alors que sa capacité de charriage, liée à une pente naturelle sans influence d'une retenue, est relativement élevée (25 000 m³/an). Le linéaire fonctionne donc en érosion progressive, ce qui favorise la production de matériaux grossiers (20 mm) et leur dépôt à la difffluence Petit / Grand Rhône.

Des dragages ont lieu à cette difffluence et devant le port d'Arles-Nord afin d'assurer des profondeurs de mouillage de navire fluvio-maritimes (4,50 m). Plus en aval dans le Grand Rhône (24-GRH) peut transiter environ 20 000 m³/an (estimation toutefois imprécise et considérant une très grande proportion de sables). Ainsi, les matériaux de dragage qui sont clapés en aval d'Arles sont susceptibles de poursuivre leur trajet, tout au moins jusqu'au seuil de Terrin, qui marque une rupture dans le profil en long.

Du côté du Petit Rhône (25-PRH), la capacité de charriage porte également essentiellement sur du sable ; elle est plus grande sur le linéaire camarguais (5 000 m³/an) qu'au droit de la difffluence (2 000 m³/an) où peu de sables arrivent à pénétrer y compris en crue ; le Petit Rhône fonctionne donc en déstockage, a tendance à inciser dans ses méandres alors que les radiers sableux et ségonnaux ont tendance à sédimenter.

Les apports sédimentaires du Grand Rhône et du Petit Rhône au littoral se font essentiellement par suspension même si la fraction 200-500 µm semble se mouvoir par charriage. Les embouchures sont de type dominé par la houle et secondairement par les processus fluviaux. Les sables viennent directement nourrir le front deltaïque qui affleure à 6-8 m sous l'eau. Les sédiments les plus fins (limons) sont exportés assez loin en mer en raison de la forte stratification eaux douces/eaux salées qui limite les processus de floculation et de sédimentation ; ces particules fines sont à l'origine du prodelta. Avec les crues les plus importantes, le jet fluvial peut exporter des sédiments en mer sur de longues distances (vers des profondeurs rapidement supérieures à 30 m).

Le littoral en Camargue connaît par endroit des reculs significatifs : le secteur de la Petite Camargue (localisé de part et d'autre de l'embouchure du Petit Rhône) ; le secteur de Faraman (entre la pointe de Beauduc et l'embouchure actuelle du Rhône) ; le secteur du Pégoulie (à l'Est de l'embouchure du Grand Rhône). L'interaction des déficits avec l'évolution flux de sédiments du Rhône n'est ni univoque ni directe. Si la réduction des apports fluviaux depuis le 19^{ème} siècle est certaine, son rôle dans les déficits constatés sur les plages du littoral de Camargue reste à démontrer. Par exemple, on sait que les apports à la mer du Petit Rhône sont négligeables par rapport aux circulations littorales de part et d'autre de son grau (entre 0,3 et 0,7 hm³/an vers l'Espinette et entre 0,1 et 0,3 hm³/an vers Beauduc). Les principales sources d'alimentation des cellules excédentaires restent des pro-deltas fossiles (Petit Rhône, bras de St Ferréol, bras de Fer, grau du Péroulier).

Le transport de graviers par charriage s'est presque arrêté. Au 19^{ème} siècle, le transit par charriage atteignait naturellement près de 350 000 m³/an dans le Bas Rhône. Aujourd'hui, il ne dépasse guère 40 à 50 000 m³/an dans le meilleur des cas.

Ce transport par graviers se caractérise aujourd'hui par :

- **la suppression des apports de graviers de nombreux affluents**, conséquence des extractions de granulats, des endiguements et des aménagements hydroélectriques ;
- **la sévère limitation du transit de la charge de fond dans les retenues**, conséquence de la faiblesse des pentes motrices même en crue. La capacité de charriage a été diminuée d'un facteur 30 à 55 en moyenne dans les retenues. Les retenues ont globalement tendance à accumuler les sédiments, y compris les sédiments sableux et fins, et malgré les manœuvres de vannes lors des crues ; il faut des crues supérieures à la crue décennale ou des crues exceptionnelles pour déstocker dans les retenues (les crues de 2002 et 2003 auraient ainsi produit l'équivalent de 30 années de dragages dans les retenues du bas Rhône) ;
- **la forte réduction des débits morphologiquement actifs dans les tronçons court-circuités**, du fait des dérivations. La capacité de charriage a été diminuée d'un facteur 20 à 30 en moyenne dans les Vieux Rhône ; ceux-ci ne sont généralement plus en capacité de remobiliser leur fond de lit, même en crue exceptionnelle ; toutefois, en cas d'apport d'un affluent, il peut exister une charge de fond qui roule sur un fond pavé (ou travelling bedload) ;
- **la forte évolution de la granulométrie** qui s'est affinée dans les retenues et accrue dans les RCC présentant ainsi un caractère pavé, particulièrement dans certaines UHC comme Pierre-Bénite ou Donzère-Mondragon. La capacité de charriage a été diminuée d'un facteur 10 à cause de cette seule évolution de la granulométrie de surface ;
- **les fosses d'extraction réalisées en plusieurs points** qui sont autant de point d'interruption durable du transit des graviers ;
- **A l'échelle d'une UHC**, le schéma général de la capacité de charriage est une réduction progressive dans la retenue, très faible au passage des barrages, qui augmente dans les Vieux Rhône avec un effet de pavage au pied des ouvrages ; la capacité de charriage diminue progressivement le long du RCC avec l'influence de la retenue aval, avant d'augmenter à la restitution de l'usine (effet de l'hydrologie), puis de baisser à nouveau dans la retenue qui suit en aval. Les réponses sont cependant variables selon les biefs. Par exemple, en aval de Champagneux (07-BRC), la capacité de charriage est très faible non pas parce que le site est naturellement avec une faible capacité, mais parce que le RCC est sous l'influence du barrage de Villebois (08-SAB) ou d'un seuil (Molottes) ;

Pris isolément, chacun de ces facteurs aurait été susceptible de provoquer un déséquilibre important du système. Le cumul de ces facteurs conduit à un blocage quasi-total du système. Le constat global est ainsi celui de la stabilité. La réduction de la capacité de transit sur le Rhône a finalement été accompagnée de la réduction des apports.

En réalité, ce constat doit être affiné car les apports sédimentaires totaux des affluents sont encore de 150 000 m³/an, dont 111 500 m³/an par les 18 affluents majeurs. Ces valeurs ne sont pas du même ordre de grandeur que les 670 000 m³/an qu'apportaient les affluents majeurs avant les aménagements, mais ce sont des valeurs loin d'être négligeables par rapport aux capacités de charriage des tronçons les plus actifs du Rhône (40 à 50 000 m³/an).

A une échelle macro, en croisant la localisation des apports et les capacités de charriage, on peut constater que les situations de déséquilibre viennent en grande partie d'une inadéquation entre les apports sédimentaires des affluents et les capacités de charriage des tronçons récepteurs du Rhône.

A cet effet, finalement, 3 types de situations peuvent être observées :

- Situation 1 : les apports d'affluents sont supérieurs aux capacités de charriage du Rhône ;
- Situation 2 : les capacités de charriage du Rhône sont supérieures aux apports des affluents ;
- Situation 3 : les apports d'affluents sont globalement en adéquation avec les capacités de charriage du Rhône

Le graphique de la Figure 145 illustre les situations qui suivent pour l'ensemble du fleuve Rhône.

Nota : Dans les analyses qui suivent, on notera que les apports en charriage des affluents ont été raisonnés en matériaux grossiers uniquement, hors sables (cf. §.3.3.5). Pour le fleuve, les capacités de charriage évaluées théoriquement et non validées incluent les sables, mais avec des incertitudes de calculs (cf. volet

5. Résumé du fonctionnement hydrosédimentaire actuel

Le fonctionnement sédimentaire actuel du Rhône résulte de la trajectoire d'aménagement historique présentée dans la partie §.3 précédente. Les conclusions générales de l'EGR (2000), du Rhône en 100 Questions (Bravard et al, 2020) ou de l'OSR4 (2018) restent en grande partie valables et sont actualisées avec les connaissances actuelles.

► Contexte

Le transport des sédiments du fleuve a été modifié par les évolutions climatiques, par les extractions massives, par les aménagements successifs du fleuve (chenalisation au 19^{ème} siècle pour la navigation, hydroélectricité au 20^{ème} siècle), par l'évolution propre de ses affluents (barrages réservoirs, etc.) et par l'occupation des sols de son bassin versant.

Le linéaire est maintenant fragmenté en séries d'ouvrages hydroélectriques tous les 15 à 40 km, en systèmes indépendants ou quasiment. Il existe 3 types d'aménagement : des barrages-réservoirs (Génissiat), des barrages au fil de l'eau (Verbois, Chancy-Pougny, Seyssel, Vaugris), et des aménagements en dérivation, dits « en feston », qui sont majoritaires.

Dans le fonctionnement sédimentaire, il convient de distinguer d'une part la charge de fond (sédiments grossiers), dont la mobilité s'est considérablement réduite, et d'autre part les sédiments fins qui circulent encore avec une relative abondance. Le Rhône transporte différemment les sédiments selon leur taille.

► Transport solide par suspension

Les sédiments fins (sables fins, limons, argiles) sont transportés en suspension dans la masse du flot : ils se déplacent à la vitesse de l'eau, et ne mettent que quelques jours pour rejoindre la mer depuis leurs montagnes d'origine. Le transport de sédiments fins s'est réduit depuis un siècle, mais reste important, de l'ordre de 6 Mt/an de MES contre 15 Mt/an avant les aménagements. Le transport des sédiments fins n'est vraiment perturbé que par les grands barrages réservoirs du bassin versant (Serre-Ponçon, Vouglans, Drac, etc.) ou le seul grand réservoir du linéaire (Génissiat).

Les barrages de basse chute (la plupart des aménagements du Rhône, les retenues de la moyenne Durance, etc.) ne perturbent guère le passage des sédiments fins. Les contributions les plus importantes en MES sont celles de l'Arve, de la Saône, de l'Isère et de la Durance. Les apports de l'Arve se diffusent lors des crues mais également tous les 3 à 4 ans lors des APAVER (abaissement partiel de la retenue de Verbois) accompagnés par les ouvrages CNR du Haut-Rhône. Les apports de la Saône ne sont pas influencés et suivent le régime des crues et hautes eaux. Les apports de l'Isère ont lieu en grande partie sous forme de chasses (ouvrages de la Basse Isère / cf. Mission 4) et se diffusent ensuite sur le linéaire du bas Rhône, produisant des dépôts sur les zones terrestres. Les apports de la Durance résultent à la fois des mises en transparence des ouvrages de la chaîne hydroélectrique, mais aussi de quotas gérés à l'usine de Mallemort pour contrôler les impacts des restitutions dans l'Etang de Berre.

Aujourd'hui, avec la faiblesse des flux de graviers, ce sont les limons qui façonnent la plaine alluviale du Rhône. Avant les aménagements du 19^{ème} siècle, le Rhône disposait d'un lit très mobile façonné par les graviers. Les éventuels dépôts de sédiments fins sur les berges étaient repris au gré des crues par érosion latérale. Avec la raréfaction des apports de graviers et sa chenalisation, le lit du fleuve est aujourd'hui figé, sans possibilité de mobilité latérale, excepté sur de rares tronçons comme dans la plaine de Chautagne. Les dépôts de sédiments fins sur les berges se produisent comme avant, mais ne sont plus repris latéralement (sauf lors de crues exceptionnelles). Ils tendent donc à s'accumuler sur les marges alluviales.

► Transport solide par charriage

Les sédiments grossiers (galets, graviers et sables grossiers) se déplacent par charriage. C'est un transport lent en moyenne (de l'ordre de 0,5 à 1 km/an), facilement interrompu dès que la pente diminue. Les graviers issus du massif du Mont-Blanc n'ont pas encore atteint la mer depuis les dernières glaciations, car le Rhône n'a pas fini de réalluvionner les espaces dégagés par les glaciers qui atteignaient Lyon.

discussion dans le §.5.1.3). Au vu de quelques éléments de validation, il est possible que les valeurs affichées soient sous-estimées. Si les évaluations chiffrées de l'analyse doivent être prises avec précautions, les tendances relatives sont globalement bien réelles et serviront de base pour la Phase 2.

► Situation 1 : les apports d'affluents sont supérieurs aux capacités de charriage du Rhône :

Ce type de situation peut se présenter dans des retenues, les canaux usiniers ou des Vieux Rhône sous l'influence de retenues. Les principales situations rencontrées sont les suivantes :

- l'Arve (20 000 m³/an) dans la retenue de Verbois (01-SUI),
- l'Allondon (3 000 m³/an) dans la retenue de Chancy-Pougny (02-CHP),
- Les Usses (4 000 m³/an) dans la retenue de Seyssel (04-SEY),
- Le Gier, le Garon, La Gère (3 500 m³/an), dans la retenue de Vaugris (12-VAU),
- La Galaure, la Cance, l'Ay, etc. (12 000 m³/an) dans la retenue de St-Vallier (14-STV),
- Le Doux (6 000 m³/an) dans la retenue de Bourg-lès-Valence (15-BLV),
- La Drôme, l'Eyrieux et l'Ouvèze Ardéchoise (29 000 m³/an) dans la retenue de Baix-Logis-Neuf (17-BLN),
- L'Escoutay (5 000 m³/an) dans le Vieux Rhône de Montélimar (18-MON), sous l'influence de la retenue de Donzère ;
- Le Roubion (2 000 m³/an) sous l'influence du canal de Montélimar (18-MON) ;
- La Cèze (6 000 m³/an), dans le Vieux Rhône de Caderousse (20-MON), sous l'influence de la retenue d'Avignon ;
- La Durance (6 000 m³/an), dans la retenue de Vallabrègues (22-VAL).

Ainsi, en dehors de l'Ain, la totalité des 20 affluents les plus producteurs (soit pour environ 96 000 m³/an) voit ses apports aboutir dans un tronçon du Rhône de capacité de charriage insuffisante.

Pour quelques exceptions, il est possible qu'une partie des volumes puissent transiter (cas de l'Allondon, de l'Escoutay, de l'Ouvèze Ardéchoise), mais globalement, ce type de situation conduit systématiquement à des excédents de sédiments puisque les apports ne peuvent être remobilisés à la confluence ou par le Rhône. Ainsi, des enjeux de sûreté et/ou des enjeux socio-économiques peuvent se déclencher et nécessiter des opérations de gestion (dragages, chasse ; cf. Mission 3 et Mission 4).

► Situation 2 : les capacités de charriage du Rhône sont supérieures aux apports des affluents :

Ce type de situation est plus rare et se rencontre dans certains Vieux Rhône ou potentiellement dans des portions de Rhône total :

- Cas du Rhône total entre le barrage de Chancy-Pougny et la queue de retenue de Génissiat (03-GEN), où la capacité de charriage est de l'ordre de 50 000 m³/an et les apports limités à 4 500 m³/an (Allondon, Laire, Annaz) si la retenue de Chancy-Pougny est confirmée comme transparente. En aval, ces apports viennent alimenter le site naturel de l'Etournel et se perdent dans la queue de retenue de Génissiat ;
- Cas du Vieux Rhône de Chautagne (05-CHA) qui ne reçoit pas d'apports d'affluents significatifs et qui a une capacité de charriage de l'ordre de 7 000 m³/an ;
- Cas du Vieux Rhône de Belley (06-BEL) dont la capacité de charriage est limitée (1000 à 2000 m³/an) mais qui ne reçoit pas d'apports avant sa partie finale (Flon et Méline, environ 200 m³/an) ;
- Cas du Rhône total de St-Vulbas (09-VUL) qui ne reçoit pas d'affluents significatifs et qui a une capacité de charriage potentielle de 10 000 m³/an ;

- Cas des Vieux Rhône de Pierre-Bénite (aucun apport), de Péage-de-Roussillon (apports de 1700 m³/an), St-Vallier (aucun apport), Bourg-lès-Valence (aucun apport sauf le Mialan en limite aval / 1 700 m³/an) dont les faibles capacités restent supérieures aux rares apports ;
- Cas du Vieux Rhône de Montélimar (18-MON) qui a une capacité de 20 000 m³/an (10 000 m³/an dans sa partie aval), mais ne bénéficie que de 3 500 m³/an d'apports (Conche, Ardèche) ;
- Cas du Vieux Rhône de Donzère (19-DZM) qui a une capacité de charriage de 30 000 m³/an (10 000 m³/an dans sa partie aval), mais ne bénéficie que d'un maximum 2 000 m³/an d'apports dans sa partie amont (si les dragages du Laveyzon lui sont restitués) ;

Ce type de situation conduit à des déficits de sédiments, est généralement à l'origine d'enjeux écologiques, et peut déclencher des opérations de restauration (cf. Mission 3 et Mission 4).

► Situation 3 : les apports d'affluents sont globalement en adéquation avec les capacités de charriage du Rhône

Ce type de situation, comme cela était le cas avant tout aménagement, est finalement extrêmement rare puisqu'il ne concerne quasiment plus qu'un seul affluent, la rivière d'Ain :

- L'Ain (10-ALY) apporte donc un flux de charriage de 30 à 40 000 m³/an qui se déverse dans la retenue du barrage de Jons, mais cet ouvrage étant transparent et les fosses d'extractions du canal de Miribel étant comblée, la charge de fond peut poursuivre sa course jusqu'à l'entrée de Lyon (où elle déclenche des enjeux de sûreté et d'usages socio-économiques).
- Dans une certaine mesure, les apports du Guiers (500 m³/an) sont en phase avec la capacité de charriage du RCC de Brégnier-Cordon (07-BRC), mais ces volumes sont faibles et produisent des effets limités sur la morphologie du Vieux Rhône.

Dans la Situation 3, au-delà de l'adéquation entre les apports sédimentaires et les capacités de charriage, la continuité sédimentaire est favorisée par la transparence des barrages de retenues.

A ce titre, l'ouvrage de Jons (10-ALY) est remarquable car il ne nécessite aucune opération de dragage dans la retenue. Pourtant, pour ce barrage qui a été le premier ouvrage construit sur le Rhône français en 1937, après la mise en service de l'usine de Cusset en 1899, les apports sédimentaires sont les plus significatifs du linéaire : en effet, les flux grossiers hors sables sont de 30 à 40 000 m³/an (en très grande partie en provenance de l'Ain) et les apports en sédiments fins sont en moyenne annuelle de 0,73 Mt/an (en grande partie en provenance de l'Arve et du Fier).

Dans les facteurs pouvant expliquer cette transparence sédimentaire, peuvent être listés des facteurs extraits des analyses précédentes : faible perte de charge du barrage pour Q2, faible longueur de remous, absence de navigation et de contrainte de vitesse d'écoulement, anciens aménagements type Girardon au sein de la retenue qui favorisent le transit, fréquents déversés au barrage du fait d'un niveau d'équipement hydroélectrique équivalent au module.

Chaque critère précédent a son importance et ne peut expliquer à lui seul l'efficacité du transit sédimentaire. C'est ainsi la somme des différents facteurs qui est efficace et qui rend l'ouvrage totalement transparent aujourd'hui.

► Introduction vers les rapports de Mission 3 et 4

Dans les Situations 1 et 2 précédentes, les déséquilibres morphologiques peuvent être à l'origine d'enjeux sédimentaires, portant sur l'écologie, la sûreté-sécurité, les usages socio-économiques. Même dans la situation 3 en apparence en équilibre morphologique, des enjeux sédimentaires peuvent se déclarer, par exemple pour le fonctionnement écologique : le canal de Miribel tend actuellement vers un équilibre sédimentaire mais sa configuration chenalisée ne lui assure pas pour autant un état écologique optimisé (uniformité des habitats, drainage de la nappe alluviale, etc.).

Les enjeux sédimentaires, s'ils sont avérés et suffisants, peuvent déclencher des opérations de gestion (dragages, chasses) ou de restauration. Ces sujets sont traités respectivement dans les rapports de Mission 3 (enjeux) et de Mission 4 (REX des actions de gestion et de restauration).

Cette analyse amène aux principales conclusions suivantes :

- Sur le Haut Rhône, les UHC les plus perturbées sont notamment celles de Suisse (01-SUI) et de Génissiat (03-GEN) du fait de la sédimentation dans les retenues ; de Chautagne (05-CHA), Belley (06-BEL) et Brégnier-Cordon (07-BRC) du fait du stockage dans les retenues et du déficit dans les RCC. L'UHC de Seyssel (04-SEY) est influencée par un fonctionnement initial en gorges ; celle de Sault-Brénaz (08-SAB) est assez peu altérée en référence à l'absence de charriage avant aménagements, et celle de St-Vulbas (09-VUL) est très peu altérée du fait de l'absence d'aménagement. Enfin, l'UHC de l'Ain à Lyon (10-ALY) est dans une situation intermédiaire avec des flux grossiers en transit mais des discontinuités en limite aval ;
- Sur le Rhône Moyen, un premier groupe d'UHC est relativement homogène (11-PBN à 14-STV), perturbé par la présence des ouvrages et des confluences où la continuité sédimentaire est rompue.
- Sur le Bas Rhône à partir de l'UHC de Bourg-lès-Valence (15-BLV), les altérations sont majorées du fait d'un impact des ouvrages sur la continuité des sables issus de l'Isère, et du fait de la situation de plusieurs confluences avec charriage (Doux, Eyrieux, Drôme, Ouvèze, Roubion, Ardèche, Cèze, etc.).
- Sur le delta, les UHC sont moins altérées, sauf en équilibre géomorphologique pour le Palier d'Arles (23-ARL) et le Petit Rhône (25-PRH) du fait essentiellement de l'absence d'ouvrages hydroélectriques.

Le Tableau 33 ci-dessous récapitule les notes de chaque critère et les scores calculés.

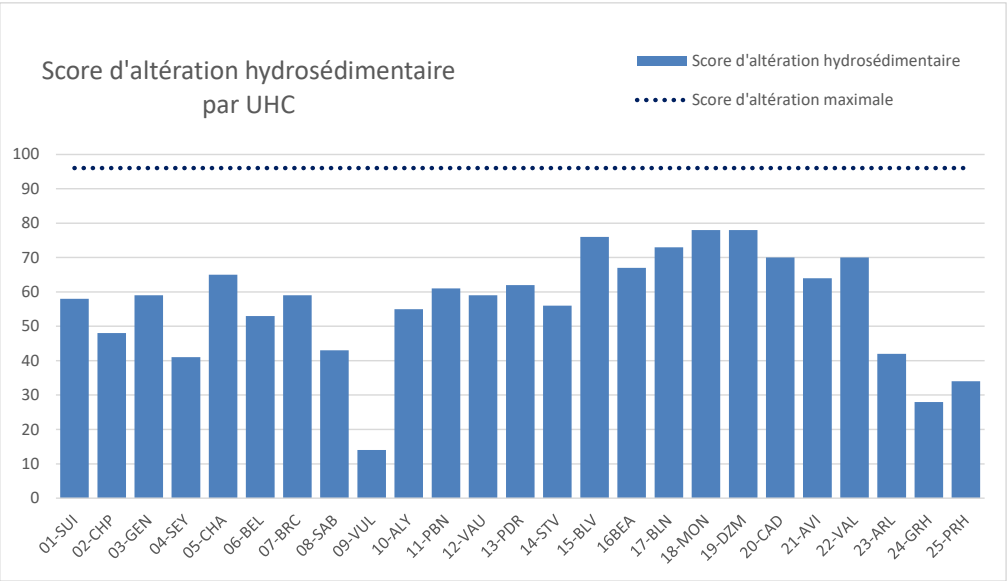
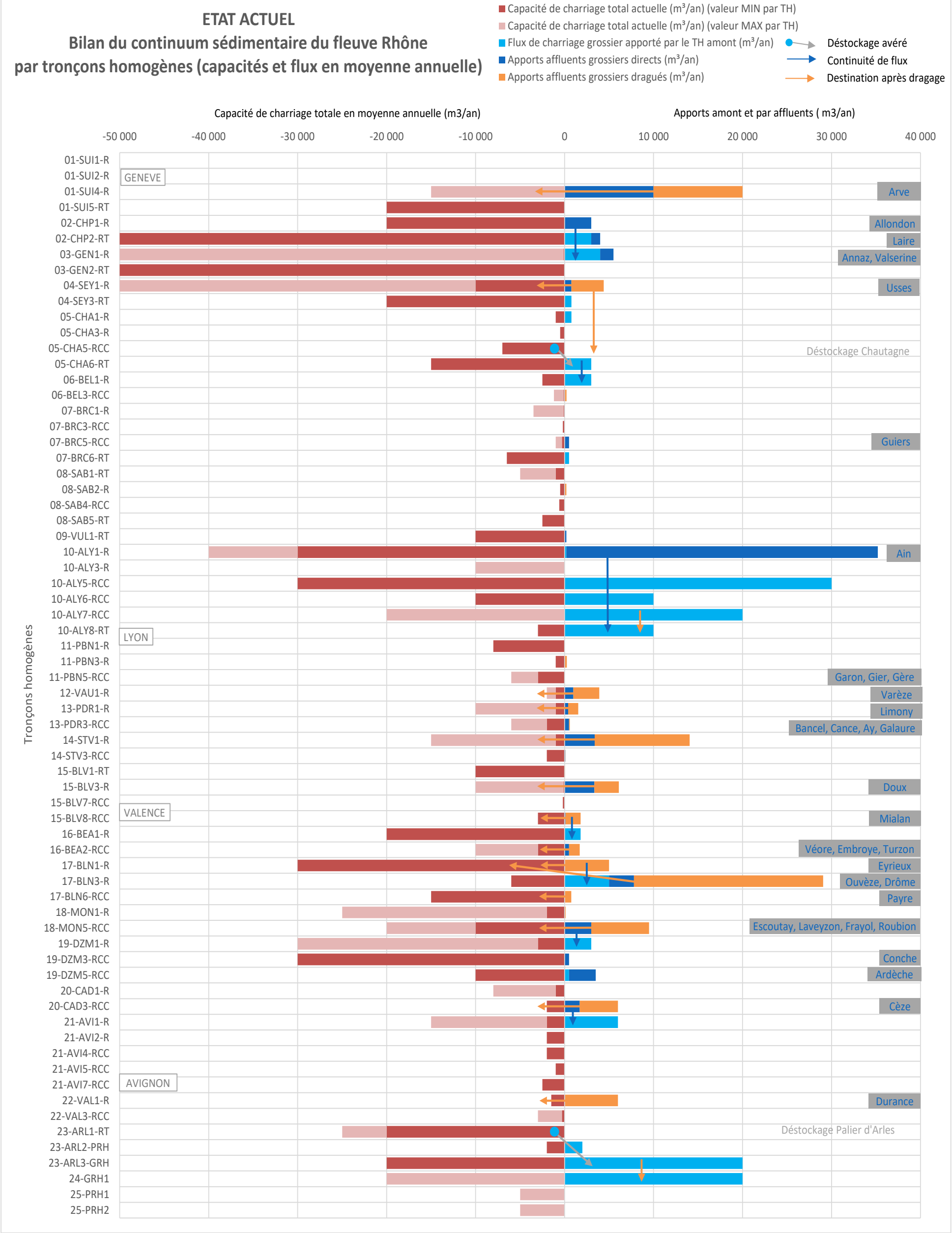


Figure 144 : Synthèse des scores d’altération hydrosédimentaire par UHC

Tableau 33 : Synthèse des scores d’altération hydrosédimentaire

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	SUI	CHP	GEN	SEY	CHA	BEL	BRC	SAB	VUL	ALY	PBN	VAU	PDR	STV	BLV	BEA	BLN	MON	DZM	CAD	AVI	VAL	ARL	GRH	PRH
Altération hydrosédimentaire																									
C1- Hydrologie - hydrologie fonctionnelle en crue	3	2	2	3	3	3	3	3	0	2	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0
C1- Hydrologie - hydrologie fonctionnelle en régime semi-perm.	1	2	3	3	2	2	1	2	2	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0
C1- Hydrologie - échanges nappe-rivière	2	1	2	1	3	3	2	1	0	2	2	2	3	1	2	2	2	3	3	2	2	2	3	2	2
C2- Morphologie - continuité sédimentaire pour les affluents	3	3	1	0	2	3	2	2	0	1	1	3	3	3	4	3	4	4	4	4	2	4	1	0	0
C3- Morphologie - équilibre géomorphologique	3	4	3	4	1	4	1	3	1	2	4	4	3	2	4	2	3	3	4	2	2	3	4	3	4
C3- Morphologie - continuité sédimentaire latérale	3	0	1	0	0	1	2	3	2	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4
C4- Morphologie - continuité sédimentaire pour les grossiers	3	4	3	4	2	4	3	3	1	1	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	1	1
C5- Morphologie - continuité sédimentaire pour les sables	3	3	2	4	2	2	2	3	0	2	2	2	2	1	3	3	3	4	3	3	3	2	1	1	1
C5- Morphologie - continuité sédimentaire pour les fines	3	2	2	3	2	2	2	2	1	0	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0



CARTES

Carte 1 : Réseau hydrographique du Rhône et de ses affluents.....	11
Carte 2 : Sectorisation en UHC.....	15
Carte 3 : Paléo-morphologie de la vallée du Rhône (d'après Bravard et al., 2008)	19
Carte 4 : Principaux aménagements pour l'hydroélectricité	30
Carte 5 : Principaux aménagements pour la navigation	30
Carte 6 : Localisation des zones d'extraction historiques du Rhône aval (d'après ACTHYS, 1954-1995)	33
Carte 7 : Granulométrie de masse en fond de lit le long du Rhône (d'après données Parrot, 2015)	65
Carte 8 : Devenir des flux de sédiments grossiers des affluents par UHC (période 1995-2018).....	73
Carte 9 : Apport sédimentaire grossiers des affluents à l'approche de leur confluence, en volume moyen annuel.....	75
Carte 10 : Apport sédimentaire grossiers des affluents directement au Rhône, en volume moyen annuel.....	75
Carte 11 : Bilans sédimentaires par tronçons homogènes avant 2000	82
Carte 12 : Bilans sédimentaires par tronçons homogènes depuis 2000	83
Carte 13 : Bilans sédimentaires par retenues et RCC depuis la mise en eau des barrages	84
Carte 14 : Tendance d'évolution du lit mineur du Rhône.....	86
Carte 15 : Tendance d'évolution du chenal navigable du Rhône	86
Carte 16 : Capacité de charriage moyenne annuelle par tronçons homogènes avant aménagements	98
Carte 17 : Capacité de charriage moyenne annuelle par tronçons homogènes après aménagements	98
Carte 18 : Proportion de sable dans le modèle de charriage GTM par tronçon homogène	102
Carte 19 : Capacité de charriage moyenne annuelle en sables par tronçon homogène	102
Carte 20 : Flux de MES en moyenne annuelle par tronçons homogènes avant aménagements	105
Carte 21 : Flux de MES en moyenne annuelle par tronçons homogènes après aménagements	105

TABLEAUX

Tableau 1 : Sectorisation du Rhône d'après les masses d'eau du SDAGE RM	8
Tableau 2 : Sectorisation du Rhône d'après SYRAH	8
Tableau 3 : Sectorisation en Unités Hydrographiques Cohérentes (UHC)	14
Tableau 4 : Sectorisation en UHC et Tronçons Homogènes (TH).....	15
Tableau 5 : Chronologie des aménagements hydroélectriques de la vallée du Rhône	29
Tableau 6 : Listes et caractéristiques des chutes CNR sur le Rhône en 2019	29
Tableau 7 : Volume d'extraction dans le Rhône par UHC entre 1954 et 1995.....	33
Tableau 8 : Synthèse des débits semi-permanents et module par UHC.....	41
Tableau 9: Débits correspondant aux plus hautes eaux navigables par UHC (source CNR)	42
Tableau 10: Les crues historiques du Haut-Rhône (PPRI de Chautagne, 2015).....	45
Tableau 11: Débits de pointe de crues historiques du Haut Rhône	46
Tableau 12: Débits de pointe de crues historiques du Rhône aval	46
Tableau 13: Synthèse des débits caractéristiques et de référence dans les UHC (m³/s)	49
Tableau 14: Synthèse des débits des équipements hydroélectriques	54
Tableau 15 : Fréquence des déversées dans les tronçons court-circuités par UHC (données théoriques et CNR)	55
Tableau 16: Impacts hydrauliques des ouvrages secondaires sur les lignes d'eau du Rhône	57
Tableau 17: Longueur des remous hydrauliques des ouvrages sur le Rhône	57
Tableau 18: Volume des crues en millions de m³ écoulés (le Rhône en 100 questions, 2010)	58

Tableau 19: Volumes d'eau retenus par les barrages à l'étiage (le Rhône en 100 questions, 2010)	58
Tableau 20 : Classes granulométriques utilisées (classifications de Malavoi d'après Wentworth, et de Gradistat / Blott & Pye, 2001).....	60
Tableau 21 : Synthèse longitudinale des données granulométriques (source : EGR, 2000)	66
Tableau 22 : Effets des affluents sur le gradient granulométrique du Rhône (source : Parrot, 2015).....	67
Tableau 23 : Synthèse par UHC des apports sédimentaires grossiers des affluents	72
Tableau 24 : Synthèse des apports sédimentaires grossiers des affluents majeurs.....	74
Tableau 25 : Typologie de systèmes des Rhône court-circuités en fonction des contraintes d'endiguement.....	76
Tableau 26 : Résultats des bilans sédimentaires par tronçons homogènes	85
Tableau 27 : Débits de début d'entraînement et fréquences de transport des graviers (d'après EGR, 2000, et formule de Lefort)	90
Tableau 28 : Classement des retenues en fonction du Dmax en Q2 en amont immédiat du barrage	94
Tableau 29 : Evaluation des Dmax dans les retenues à l'approche des barrages pour Q2 et Q10.....	95
Tableau 30 : Evolution des capacités de charriage dans les retenues et RCC après aménagements	99
Tableau 31 : Résultats de flux de MES, de capacités de charriage total, de charriage en sables, pour les situations avant et après aménagement (adapté à partir de données initiales de l'EGR, 2000 et de l'OSR4, 2018-2020)	100
Tableau 32 : Synthèse des connaissances à approfondir	108
Tableau 33 : Synthèse des scores d'altération hydrosédimentaire	115

FIGURES

Figure 1 : Exemple de superposition de couches pour la construction du périmètre d'étude (secteur de la confluence avec la Drôme).....	7
Figure 2 : Principe de sectorisation de barrage à barrage dans le cadre de l'OSR4 (action I.4)	9
Figure 3 : Exemple de rendu de profil en long de barrage à barrage (bief de St-Vallier)	9
Figure 4 : Exemple de localisations de PK « Rhône » sur le bief de Péage de Roussillon (PDR)	10
Figure 5 : Exemple de de profils en travers MAGE sur le bief de Péage de Roussillon (PDR) (OSR)	10
Figure 6 : Illustration d'une sectorisation type en tronçons homogènes	13
Figure 7 : Illustration de la sectorisation en UHC (en haut) et TH (en bas) (UHC#13-PDR - Péage de Roussillon).....	14
Figure 8 : Bassin versant du Rhône (d'après le Rhône en 100 questions, 2010)	17
Figure 9 : Succession d'ombilics glaciaires sur le Haut-Rhône (in EKIUM, 2014)	18
Figure 10 : Profil en long des largeurs de plaine et de bande active en 1860 (source : Bravard, 2009)	19
Figure 11 : Phases d'évolution du style fluvial du Rhône depuis l'Age du Bronze (Bravard, 2005)	19
Figure 12 : Documents topo-bathymétriques historiques disponible sur le Rhône (Talaska, 2014)	20
Figure 13 : Le bateau hydrographique « Frédéric Mistral » (CNR).....	20
Figure 14 : Exemple de bathymétrie 3D sur le bras d'Avignon (CNR)	21
Figure 15 : Exemples de zone de régulation du transport solide au niveau de Charmes sur Rhône (en haut) et aval de Beaucaire (en bas). A droite carte d'Etat-Major (milieux du 19 ^{ème} siècle ; à gauche la carte topographique des années 1950/60 qui montre les effets de travaux de rectification (Source : Géoportail IGN).....	21
Figure 16 : Illustration du tracé en plan du Rhône dans la plaine de Miribel-Jonage en 1860 (Source SEGAPAL)	22
Figure 17 : Localisation des tronçons en tresse actuels et disparus sur une partie du bassin du Rhône (Source : AERMC, 2019).....	22
Figure 18 : Ancienne digue paysanne dans la plaine de Péage de Roussillon (13-PDR) qui supporte aujourd'hui la RD4 entre Sablons et Salaise (Google)	22
Figure 19 : Géomorphologie du delta et anciens tracés abandonnés (CEREGE, 2007 ; in Raccasi, 2008)	23
Figure 20 : Aménagements entre Beaucaire et Arles (Palier d'Arles) vers 1960 (Géoportail, IGN).....	23

Figure 21 : Construction des casiers dits « Girardon » (in ACTHYS, 2017).....	24
Figure 22 : Schéma type d'un mauvais passage (n°1) et d'un bon passage (n°2) (Girardon, 1894, in CNR, 2016)	24
Figure 23 : Les ouvrages de correction fluviales : digues submersibles, épis plongeurs, tenons, et casiers « Girardon » (source GeoPeka)	24
Figure 24 : Localisation des secteurs sur le Haut Rhône ayant fait l'objet de travaux de correction (source Bravard, 2017)	24
Figure 25 : Réduction des hauts fonds suite aux travaux de correction. A haut, extrait d'un rapport de l'ingénieur chef H. Girardon ; en bas, synthèse chronologique du nombre de hauts fonds en fonction des tirants d'eau (source : en haut, ACTHYS 2017 ; en bas, Bethemont & Bravard, 2016)	25
Figure 26 : Barrage de Chancy-Pougny mis en service en 1925 (ww2.sig-ge.ch).....	25
Figure 27 : Barrage de Verbois mis en service entre 1943 (ww2.sig-ge.ch)	25
Figure 28 : Les premiers aménagements hydroélectriques du Rhône : la Centrale Hydraulique de la jonction de la Valserine, le Pont de la Machine (début 20 ^{ème} siècle) et l'usine de Cusset (début 20 ^{ème} siècle) (source : en haut à gauche, Archive Départementale de l'Ain ; en haut à droite collection BGE, Centre d'iconographie genevoise ; en bas : http://industrialheritage.eu)	26
Figure 29 : Schéma de l'aménagement du Rhône tel qu'envisagé par les précurseurs (non daté).....	26
Figure 30 : Endiguement large dans la retenue de Baix-Le-Logis-Neuf, en aval de la Drôme, ayant créé des hauts fonds à l'origine de la roselière de Printegarde (remonterletemps.ign.fr)	27
Figure 31 : Endiguement large autour de la bande active dans la retenue de Belley favorisant l'émergence de hauts fonds (remonterletemps.ign.fr)	27
Figure 32 : Construction de l'aménagement de Donzère-Mondragon / 19-DZM (source : à gauche, Wikipédia ; à droite, Patrimoine numérique)	27
Figure 33 : Charge de fond retenue dans des épis Girardon avant les premiers aménagements hydroélectriques (en haut : en amont de la confluence avec le Lavézon ; en bas : au droit de l'ancien pont de Rochemaure / 18-MON) (IGN, 1949)	28
Figure 34 : Le Rhône au pont du Robinet en amont du futur barrage de Donzère mis en service en 1952 (IGN, 1949)	28
Figure 35 : Évolution de la morphologie de la confluence de la Durance entre 1947 et 1967 suite aux extractions et premiers aménagements sur ce cours d'eau, et avant la mise en eau de la retenue de Vallabrègues (1970)	28
Figure 36 : Aménagement type sur le Rhône	29
Figure 37 : Bacs d'alluvions dans la traversée de Lyon et extractions vers 1947 et 1955	31
Figure 38 : Cartographie et chronologie des extractions en aval de Lyon entre 1954 et 2010 (source : ACTHYS, 2017)	32
Figure 39 : Prélèvements de sédiments dans le Rhône entre 1954 et 2010 (source : ACTHYS, 2017) - Localisation (en haut à gauche) ; Volumes annuels (en haut à droite) ; Volume par site (en bas)	32
Figure 40 : Prélèvements de sédiments dans le Rhône entre 1954 et 2010 (source : ACTHYS, 2017)	32
Figure 41 : Comparaison des volumes d'extraction estimés par l'EGR et ACTHYS avec les volumes consolidés dans le cadre de la présente étude (SDGS)	33
Figure 42 : Principales zones d'incision sur les rivières des Alpes du Nord (Peiry, 1994)	34
Figure 43 : Profils en long historiques du thalweg du Rhône	35
Figure 44 : Profils en long historiques du thalweg du Rhône (zoom sur le Rhône aval)	35
Figure 45 : Cumul altimétrique de l'incision du lit du Rhône à l'aval de Lyon pour la période pré-aménagement et post aménagement CNR (source : Parrot, 2015)	36
Figure 46 : Capacités de transport par RCC avant et après aménagements CNR (source : OSR4-Evolutions morphodynamiques du chenal sur le long-terme, 2017).....	36
Figure 47 : Schémas de l'évolution morphologique du Rhône depuis le milieu du 19 ^{ème} siècle (source : en haut, Parrot, 2015 repris de Persat et al., 1995 ; en bas, CNR / C. Mora).....	36
Figure 48 : Maquette de frise chrono-systémique complétée (d'après OHM, 2017)	38
Figure 49: Evolution du module interannuel (le Rhône en 100 questions)	41
Figure 50: Contribution des affluents dans le régime hydrologique du fleuve (BRLi, 2014)	41
Figure 51: Inondation à Avignon le 3 décembre 2003 (Dauphiné Libéré / P.Deleuil)	43
Figure 52: Synthèse des débits de pointe des affluents majeurs du Rhône (d'après EGR, 2000)	43
Figure 53: Evolution de la fréquence décennale des plus fortes crues à Arles depuis le 15 ^{ème} siècle (Raccasi, 2008)	44

Figure 54: Chronologie des crues importantes du Rhône depuis le 16 ^{ème} siècle (le Rhône en 100 questions ; Bravard et al., 2010)	45
Figure 55: Chronique des débits maximums annuels à Beaucaire depuis 1840 (source CNR).....	45
Figure 56 : Extrait de la plaquette DREAL de 2009 : la crue du Rhône de décembre 2003	47
Figure 57: Bilan de la collecte des données aux stations hydrométriques entre l'étude Hydro-Consultant (2018) et l'EGR (2000)	49
Figure 58: Actualisation des débits caractéristiques aux stations hydrométriques (d'après Hydro-Consultant, 2018)	49
Figure 59: Evolution des débits de crue dans le Rhône amont (Rhône total et Rhône court-circuité)	50
Figure 60: Evolution des débits de crue le long du Rhône aval (Rhône total et Rhône court-circuité)	50
Figure 61: Vulnérabilité au changement climatique pour l'enjeu disponibilité en eau (Etude de la caractérisation des vulnérabilités du bassin du Rhône-Méditerranée aux incidences du changement climatique dans le domaine de l'eau, Agence de l'eau 2013).....	52
Figure 62: Schéma type d'une répartition des débits liquides en débit semi-permanent	53
Figure 63: Schéma type d'une répartition des débits liquides en crue (exemple représentatif pour une crue décennale Q10)	53
Figure 64 : Principe de l'effacement des ruptures de charge hydraulique sur les ouvrages CNR en fonction des niveaux de crue (source : Le Rhône en 100 questions, 2010)	54
Figure 65: Exemple de régime réservé et modifié du Vieux-Rhône : UHC#13-PDR de Péage de Roussillon	54
Figure 66 : Fréquence des déversées dans les Vieux-Rhône (d'après données théoriques et CNR)	55
Figure 67 : Exemple de courbes de débits classé pour Chautagne (données théoriques et CNR)	55
Figure 68: Comparaison entre le débit d'équipement et le module du Rhône	56
Figure 69: Lignes d'eau sur l'UHC de Péage de Roussillon	56
Figure 70: Cartographie des barrages de retenue en fonction des longueurs de remous et pertes de charge en crue biennale (Q2) (hors Génissiat et ouvrages suisses)	57
Figure 71: Profil en long de la ligne d'eau semi-permanente.....	58
Figure 72: Profil en long des lignes d'eau Q2 et Q10	58
Figure 73: Schéma de principe de la rétention d'eau par les différentes retenues du Rhône (ZABR, le Rhône en 100 questions, 2010)	58
Figure 74: Exemple d'hydrogramme influencé par des éclusées (Pont de la Loi, Chautagne / Hydoreel2).....	59
Figure 75: Linéaires avec des régimes d'éclusées étudiés dans l'étude ECOGEA (2020)	59
Figure 76: Le charriage (Qs) est dépendant du débit liquide (Q), de la pente (S) et du diamètre du sédiment (D) (Recking, 2010)	60
Figure 77: La dichotomie charriage-suspension (MOOC Des rivières et des hommes, UGA).....	60
Figure 78: Schéma type d'une répartition des débits solides en débit semi-permanent	61
Figure 79: Schéma type d'une répartition des débits solides en crue	61
Figure 80: Coupes interprétatives simplifiées du fonctionnement du Rhône à l'Holocène (source Bravard et al., 2008).....	62
Figure 81: Évolution diachronique des bandes actives de PBN, PDR et DZM (source : OSR4, 2018)	62
Figure 82 : Variabilité spatiale de la sédimentation par unité et par UHC (Source : OSR4, 2018)	63
Figure 83 : Variabilité temporelle de la sédimentation (Source : OSR 4, 2018)	63
Figure 84 : Caractérisation granulométrique et volumétrique des stocks par UHC (Source : OSR 4, 2018)	63
Figure 85 : Profils granulométriques des carottages réalisés sur les marges de PBN (en haut) et DZM (en bas) (Source : OSR4, action II.2/3/4 ; 2018)	64
Figure 86 : Granulométrie moyenne des sédiments extraits sur les marges de l'île des Gravières (Source : GEOPEKA d'après les données FAMY ; 2017)	64
Figure 87 : Modélisation exponentielle du gradient granulométrique du Rhône (source : Montané, 2009)	66
Figure 88 : Comparaison des résultats de la campagne granulométrique OSR avec les études antérieures (source : Parrot, 2015)	66
Figure 89 : Histogramme des fréquences cumulées moyenne par classes granulométriques des sédiments du chenal des sections de Rhône total (RT) et de Rhône Court-Circuité (RCC) (source : Parrot, 2015).....	67

Figure 90 : Granulométrie héritée et pavée dans la traversée de Lyon / retenue de Pierre-Bénite (11-PBN) (photographie sous-fluviale ; BURGEAP, 2017).....	67
Figure 91 : Gradient granulométrique longitudinal et pente du lit avant aménagement (source Parrot, 2015)	68
Figure 92 : Indice de pavage sur les sections de Rhône Court-Circuité (RCC) (source Parrot, 2015)	68
Figure 93 : Réseau de mesures turbidimétriques sur le bassin du Rhône (Source : OSR 4 III.1, 2017)	69
Figure 94 : Classement des affluents du Rhône selon leurs apports en MES (d'après EGR, 2000, et OSR4)	70
Figure 95 : Origine des MES du Rhône par sous-ensembles régionaux	70
Figure 96 : Contributions passées et actuelles en MES pour les affluents majeurs (d'après EGR, 2000, et OSR4)	70
Figure 97 : Schéma de principe du bilan sédimentaire des affluents	71
Figure 98 : Classement des affluents du Rhône selon leurs apports en sédiments grossiers (supérieurs à 500 m³/an en moyenne annuelle)	72
Figure 99 : Bilan des apports grossiers des affluents et de leur devenir (période 1995-2018)	73
Figure 100 : Bilan des apports grossiers des affluents et des volumes dragués (période 1995-2018)	73
Figure 101 : Contributions passées et actuelles en charriage pour les affluents majeurs	74
Figure 102 : Puissances spécifiques caractéristiques dans les Vieux Rhône synthétisées par UHC (d'après données Gaydou, 2013)	77
Figure 103 : Puissances spécifiques caractéristiques dans les Vieux Rhône (d'après données Gaydou, 2013)	77
Figure 104 : Système 1 : Evolution du méandre de Serrières entre 2005 et 2015 (05-CHA)	78
Figure 105 : Système 2 : Vieux Rhône de Brégnier-Cordon figé par la faiblesse du transport solide et les aménagements anciens (07-BRC)	78
Figure 106 : Système 3 : Canal de Miribel figé par les aménagements anciens mais aux berges soumises à sollicitations (10-ALY)	78
Figure 107 : Système 4 : Méandre d'Etoile totalement fixé dans le RCC de Beauchastel (16-BEA).....	78
Figure 108 : Système 4 : Banc d'alluvions dans le Vieux Rhône de Donzère, contenu au sein du système d'endiguement des aménagements Girardon (19-DZM).....	78
Figure 109 : Principes d'un bilan sédimentaire (MOOC Des rivières et des hommes, UGA)	80
Figure 110 : Exemple de comparaison de profil en travers, avec mise en évidence d'un exhaussement (EKIUM, 2017 ; profil PK74,3 dans la retenue de St-Vallier)	80
Figure 111 : Exemple de comparaison de profil en travers, avec mise en évidence d'une incision (EKIUM, 2017 ; profil PK129,2 dans la retenue de Logis Neuf)	80
Figure 112 : Exemple de donnée exploitée dans le cadre de l'établissement des bilans sédimentaires (Dynamique Hydro, 2019 ; bilan sédimentaire 1957-1988 de la retenue de Montélimar)	81
Figure 113 : Exemple de bilan sédimentaire depuis la mise en eau du barrage sur la période 1957-2014 établi à partir des bilans sédimentaires Dynamique Hydro (2019) et présenté dans les fiches UHC (exploitation des bilans sédimentaires comme celui de la Figure 112)	81
Figure 114 : Exemple de donnée exploitée par Dynamique Hydro pour les bilans sédimentaires (localisation des déblais et remblais entre 1957 et 1988 pour la retenue de Montélimar – PK151,9 à 152,9 – tronçon 4 sur Figure 112).....	81
Figure 115 : Exemple de profil en travers exploité par Dynamique Hydro pour les bilans sédimentaires (retenue de Montélimar - PK152,5 – Evolutions entre 1957 et 2017- reporté sur Figure 114)	81
Figure 116 : Bilans sédimentaires par retenue et RCC depuis la mise en eau de chaque barrage.....	85
Figure 117 : Bilans sédimentaires par retenue et RCC depuis la mise en eau de chaque barrage (zoom)	85
Figure 118 : Variabilité des apports en MES à Beaucaire à une échelle annuelle (gauche) et une échelle mensuelle (droite) (OSR, 2018).....	87
Figure 119 : Vue 3D de l'embouchure du Grand Rhône (Maillet, 2005)	87
Figure 120 : Panaches de crue du Grand Rhône et du Petit Rhône dans le Golfe du Lion le 20 février 2014 (Mauffrey, 2015).....	87
Figure 121 : Évolution topo-bathymétrique des graus du Péroulier et de Roustan depuis le début du 20 ^{ème} siècle (Sabatier, 2009).....	88

Figure 122 : Évolution morphologique de la barre d'embouchure depuis le début du 20 ^{ème} siècle (Maillet, 2005).....	88
Figure 123 : L'embouchure du Rhône partiellement fermée par un poulter (Géoportail)	89
Figure 124 : Paléomorphologie et bathymétrie du front deltaïque (Cossa et al, 2018)	89
Figure 125 : Zones d'érosion et d'accrétion du littoral du delta établies par comparaison bathymétrique entre 1895 et 1974 (Sabatier et al, 2009)	89
Figure 126 : Zonage d'érosion et d'accrétion du littoral du delta (Sabatier et Suanez, 2003).....	89
Figure 127 : Courbe de débits classés à Péage de Roussillon pour le Rhône total et courbe théorique pour le RCC de Roussillon (d'après données aux stations hydrométriques et loi de répartition de débits au barrage de retenue).....	91
Figure 128 : Profil en long du Dmax remobilisable et comparaison avec la granulométrie en place	92
Figure 129 : Corrélations entre la granulométrie in situ (D50, D90) et les Dmax calculés pour Q2-Q10.....	93
Figure 130 : Profil en long du diamètre maximal remobilisable (Q2, Q5, Q10) pour Bourg-lès-Valence (le cadre correspond à l'emprise de la Figure 131 et montre la cohérence des calculs)	93
Figure 131 : Profil en long du diamètre maximal remobilisable (Q2 à Q50) pour Bourg-lès-Valence (Dépret et al, 2019)	93
Figure 132 : Profil en long du diamètre maximal remobilisable (Q2) pour Jons / Canal de Miribel	94
Figure 133 : Trajectoire des transpondeurs RFID à travers la retenue et le barrage de Jons (OSR5)	94
Figure 134 : Evaluation des Dmax dans les retenues à l'approche des barrages pour Q2 et Q10.....	95
Figure 135 : Profil en long de la capacité de charriage moyenne annuelle	96
Figure 136 : Profil en long de la capacité de charriage moyenne annuelle et part des sédiments grossiers (> 2 mm) dans cette capacité	96
Figure 137 : Profil en long de la capacité de charriage moyenne annuelle avant /après aménagements.....	97
Figure 138 : Evolution des capacités de charriage dans les retenues et RCC après aménagements.....	99
Figure 139 : Courbe de tarage sédimentaire estimée à Bognes superposées avec les mesures sur site (OSR I.1, 2017).....	101
Figure 140 : Profil en long des flux de MES dans l'état actuel et avant aménagements.....	103
Figure 141 : Bilan de flux de MES annuels et moyens interannuels sur le bassin du Haut Rhône entre 2011 et 2016 (OSR4, 2018).....	103
Figure 142 : Bilan de flux de MES annuels et moyens interannuels du Léman à la Mer 2011 et 2016 (OSR4, 2018)	104
Figure 143 : Profil en long des flux de transport solide par charriage et MES.....	106
Figure 144 : Synthèse des scores d'altération hydrosédimentaire par UHC	115
Figure 145 : Bilan du continuum sédimentaire du fleuve Rhône par tronçons homogènes en moyenne annuelle (capacité moyenne annuelle en charriage total et flux grossiers)	116

ANNEXES



Annexe 1. Base de données des Unités Hydrographiques Cohérentes (UHC)

Cette annexe contient 3 pages.

DONNEES GENERALES ET GEOMETRIQUES

N°	Code	UHC	Aménagement_hydro	Départements	Exploitant	Année_création	Nb complexes	Nb usines	Pente avant aménagement	PKam	PKav	Longueur_axe (km)	Longueur_RCC (km)	Longueur RCC courante en semi-permanent (km)	Longueur RCC courante pour Q2 (km)
01	SUI	Seujet-Verbois	Seujet, Verbois	Suisse	SIG	1943	2	2	2,57 ‰	-205,10	-192,89	15,6	-	-	-
02	CHP	Chancy-Pougny	Chancy-Pougny	01	SFMC	1924	1	1	2,57 ‰	-192,89	-186,72	6,2	-	-	-
03	GEN	Génissiat	Génissiat	01, 73, 74	CNR	1948	1	1	3,0 ‰	-186,72	-160,53	26,2	-	-	-
04	SEY	Seyssel	Seyssel	01, 73	CNR	1951	1	1	3,0 ‰	-160,53	-149,54	10,8	-	-	-
05	CHA	Chautagne	Chautagne	01, 73, 74	CNR	1980	1	1	0,9 à 1,2 ‰	-149,54	-134,59	15,2	9,5	6,9	6,2
06	BEL	Belley	Belley	01, 73	CNR	1982	1	1	0,7 à 0,9 ‰	-134,59	-114,55	20,6	17,7	10,9	8,8
07	BRC	Brégnier-Cordon	Brégnier-Cordon	01, 73, 38	CNR	1983	1	1	0,6 ‰	-114,55	-84,80	29,9	12,3	10,3	0,0
08	SAB	Sault-Brénaz	Sault-Brénaz	01, 38	CNR	1986	1	1	0,15 à 1 ‰	-84,80	-58,98	25,1	2,0	2,0	2,0
09	VUL	Saint-Vulbas	-	01, 38	-	-	-	-	0,3 ‰	-58,98	-35,49	23,9	-	-	-
10	ALY	Ain-Lyon	Jons-Cusset	01, 69	EDF	1899	1	1	1,0 ‰	-35,49	6,04	34,8	18,7	18,7	18,7
11	PBN	Pierre-Bénite	Pierre-Bénite	69	CNR	1966	1	1	0,40 ‰	6,04	15,31	21,5	10,5	1,8	10,5
12	VAU	Vaugris	Vaugris	38,69	CNR	1980	1	1	0,34 ‰	15,31	33,88	18,8	-	-	-
13	PDR	Péage de Roussillon	Péage-de-Roussillon	07, 26, 38, 42	CNR	1977	1	1	0,47 à 0,55 ‰	33,88	63,33	29,3	12,4	1,1	12,4
14	STV	Saint-Vallier	Saint-Vallier	07, 26	CNR	1971	1	1	0,6 ‰	63,33	87,16	23,6	4,5	0,3	4,5
15	BLV	Bourg-lès-Valence	Bourg-lès-Valence	07, 26	CNR	1968	1	1	0,65 ‰	87,16	106,65	22,3	9,8	0,0	9,8
16	BEA	Beauchastel	Beauchastel	07, 26	CNR	1963	1	1	0,7 à 0,8 ‰	106,65	126,79	19,1	7,9	1,0	7,9
17	BLN	Baix-Le-Logis-Neuf	Baix-Le-Logis-Neuf	07, 26	CNR	1960	1	1	0,7 à 0,8 ‰	126,79	143,91	17,7	8,7	1,6	8,7
18	MON	Montélimar	Montélimar	07, 26	CNR	1957	1	1	0,7 à 0,8 ‰	143,91	166,36	23,1	14,0	7,8	14,0
19	DZM	Donzère-Mondragon	Donzère-Mondragon	07, 26, 30, 84	CNR	1952	1	1	0,7 ‰	166,36	200,83	35,2	29,8	21,1	29,8
20	CAD	Caderousse	Caderousse	30, 84	CNR	1975	1	1	0,5 à 0,6 ‰	200,83	218,90	18,3	5,9	0,0	4,0
21	AVI	Avignon	Avignon	30, 84	CNR	1973	1	2	0,4 à 0,5 ‰	218,90	244,17	24,5	13,5	0,0	8,9
22	VAL	Vallabrègues	Vallabrègues	13, 30, 84	CNR	1970	1	1	0,3 ‰	244,17	269,65	25,3	7,1	0,0	7,1
23	ARL	Palier d'Arles	-	13, 30	-	-	-	-	0,2 ‰	269,65	281,74/283,05	16,9	-	-	-
24	GRH	Grand Rhône	-	13, 30	-	-	-	-	0,03 ‰	283,05	329,69	47,5	-	-	-
25	PRH	Petit Rhône	-	13, 30	-	-	-	-	0,02 ‰	281,74	340,68	59,8	-	-	-
TOTAL							22	23							

DONNEES USAGES

N°	Code	Barrage de retenue	PK barrage	PK barrage (OSR)	Longueur du remous (km) semi-permanent	Longueur du remous (km) Q2	Type	Qr_turbiné	Usine	Hauteur de chute (m) (1)	Puissance installée (MW) (1)	Puissance Qr (MW) (1)	Puissance PCH+MCH (MW)	Production moyenne annuelle (GWh)(1)	Ouvrage _secondaire	Ecluse
01	SUI	Verbois	-194,05	-195,33	-	-	Sans dériv	-	Verbois	20,0	106	-	-	491	Barrage du Seujet	Plaisance
02	CHP	Chancy-Pougny	-188,44	-188,20	-	-	Sans dériv	-	Chancy-Pougny	11,0	49	-	-	250	-	-
03	GEN	Génissiat	-162,12	-162,12	22,51	23,00	Sans dériv	-	Génissiat	64,5	420	3	-	1 786	-	-
04	SEY	Seyssel	-151,69	-151,60	6,81	9,38	Sans dériv	-	Seyssel	7,5	45	-	-	166	-	-
05	CHA	Motz	-145,96	-145,98	5,54	5,54	Dérivation	OUI	Anglefort	17,0	90	-	5,8	487	-	Plaisance
06	BEL	Lavours	-131,64	-131,63	4,68	7,64	Dérivation	OUI	Brens-Virignin	20,6	90	-	5	453	Savières (Lac Bourget), Yenne (0,5 MW, 2011)	Plaisance
07	BRC	Champagneux	-102,95	-102,96	7,53	14,95	Dérivation	OUI	Brégnier-Cordon	13,7	70	5,4	-	324	-	-
08	SAB	Villebois	-63,59	-63,59	21,41	39,35	Dérivation	OUI	Porcieu-Amblagnieu	7,5	45	1,3	-	249	-	-
09	VUL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	ALY	Jons	-26,72	-26,74	-	4,09	Dérivation	OUI	Cusset	12,0	63	1,5	-	415	-	-
11	PBN	Pierre-Bénite	5,02	5,22	10,02	0,00	Dérivation	OUI	Pierre-Bénite	9,0	84	-	7,4	528	-	Grand Gabarit
12	VAU	Vaugris	33,88	33,85	22,74	0,00	Sans dériv	-	Vaugris	6,7	72	-	-	332	-	Grand Gabarit
13	PDR	St-Pierre-de-Boeuf	50,98	50,92	16,88	5,90	Dérivation	OUI	Sablons	12,2	160	0,7	-	885	Seuil de Peyraud	Grand Gabarit
14	STV	Arras	82,69	82,84	22,37	7,25	Dérivation	NON	Gervans	11,5	120	-	-	668	-	Grand Gabarit
15	BLV	La-Roche-de-Glun	99,36	99,37	15,46	1,85	Dérivation	NON	Bourg-lès-Valence	11,7	180	-	-	1 082	Barrage de l'Isère	Grand Gabarit
16	BEA	Charmes-sur-Rhône	119,53	119,68	19,16	1,75	Dérivation	OUI	Beauchastel	11,8	192	0,7	-	1 211	-	Grand Gabarit
17	BLN	Le Pouzin	135,57	135,57	15,57	1,21	Dérivation	OUI	Le Logis-Neuf	11,7	215	1	5,7	1 223	-	Grand Gabarit
18	MON	Rochemaure	152,94	153,00	15,37	5,80	Dérivation	OUI	Châteauneuf-du-Rhône	16,5	295	-	6,5	1 628	-	Grand Gabarit
19	DZM	Donzère	171,59	171,54	10,57	1,19	Dérivation	NON	Bollène	22,5	348	-	-	2 032	-	Grand Gabarit
20	CAD	Caderousse	213,10	213,11	19,89	1,34	Dérivation	NON	Caderousse	8,6	156	-	-	843	-	Grand Gabarit
21	AVI	Villeneuve	232,37	232,37	19,08	1,56	Dérivation	NON	Sauveterre + Avignon	9,5	126/52	-	0,7	857	Barrage de Villeneuve	Grand Gabarit
22	VAL	Vallabrègues	262,51	262,56	28,02	0,68	Dérivation	NON	Beaucaire	11,3	210	-	-	1 269	Seuil de Beaucaire	Grand Gabarit
23	ARL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Grand Gabarit
24	GRH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Grand Gabarit
25	PRH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Classe IV

DONNEES MASSES D’EAU

N°	Code	Masse d'eau Rhône et canal	Masse d'eau RCC	Masse d'eau Affluents (Majeur, Principaux, Secondaire, Mineur)	Masse d'eau souterraine
01	SUI	FRDR2000	-	FRDR555D (Arve)	
02	CHP	FRDR2000	-	FRDR547B (L'Allondon) ; FRDR10451 (La Loire)	
03	GEN	FRDR2000	-	FRDR545 (La Valserine) ; FRDR10075 (L'Annaz) ; FRDR10089 (Le Parnant) ; FRDR10894 (Les Ilettes)	
04	SEY	FRDR2000/01	-	FRDR540 (Les Usses); FRDR11030 (La Vézérone) ; FRDR11007 (La Dorches)	FRDG330 (Alluvions Rhône marais de Chautagne et de Lavours)
05	CHA	FRDR2001	FRDR2001A	FRDR530 (Le Fier)	FRDG330 (Alluvions Rhône marais de Chautagne et de Lavours)
06	BEL	FRDR2001	FRDR2001B	FRDR531 (L'Ile de Savière) ; FRDR522B (Le Séran) ; FRDR521 (Le Flon) ; FRDR519 (Le Furans) ; FRDR11746 (La Méline) ; FRDR11747 (La Vézère)	FRDG330 (Alluvions Rhône marais de Chautagne et de Lavours)
07	BRC	FRDR2001/02	FRDR2001C	FRDR515 (Le Guiers) ; FRDR512 (Le Gland) ; FRDR10992A (L'Huert) ; FRDR10992B (La Save) ; FRDR12020 (La Bièvre)	FRDG326 (Alluvions du Rhône de Gorges de la Balme à l'Ile de Miribel)
08	SAB	FRDR2002/03/04	FRDR2004	FRDR511 (La Pernaz) ; FRDR10431 (La Chogne) ; FRDR11027 (La Brivaz), FRDR11738 (Le Fouron)	FRDG326 (Alluvions du Rhône de Gorges de la Balme à l'Ile de Miribel)
09	VUL	FRDR2004	-	FRDR510 (Le Gier) ; FRDR10206 (Ruisseau du Moulin) ; FRDR10800 (Ruisseau d'Amby) ; FRDR11056 (Ruisseau du Girondan) ; FRDR11057 (Le Gier)	FRDG326 (Alluvions du Rhône de Gorges de la Balme à l'Ile de Miribel)
10	ALY	FRDR2004/05	FRDR2005A	FRDR12109 (Le Cotey) ; FRDR11183 (Le ruisseau du Ratapon) ; FRDR10576 (La Sereine)	FRDG338 (Alluvions du Rhône - Ile de Miribel - Jonage)
11	PBN	FRDR2005/06	FRDR2006A	FRDR1807B (La Saône) ; FRDR482B (L'Yzeron) ; FRDR10315 (Ruisseau de l'Ozon)	FRDG384 (Alluvions du Rhône agglomération lyonnaise et extension sud)
12	VAU	FRDR2006	-	FRDR479C (Le Garon) ; FRDR 474 (Le Guiers) ; FRDR2017 (La Sévenne) ; La Gère (FRDR472B)	FRDG395 (Alluvions du Rhône depuis l'amont de la confluence du Gier jusqu'à l'Isère)
13	PDR	FRDR2006	FRDR2006B	FRDR466C (Les Collières) ; FRDR 10256 (Ruisseau de Bassemon) ; FRDR10475 (Le Verin) ; FRDR11943 (Le Saluant) ; FRDR11944 (Le Saluant)	FRDG424 (Alluvions du Rhône de la plaine de Péage-du-Roussillon et île de la Platière)
14	STV	FRDR2006	FRDR2006	FRDR459 (L'Ay) ; FRDR457 (La Galaure) ; FRDR1348 (Ruisseau de l'Ozon) ; FRDR1357 (Ruisseau du Torrenson) ; FRDR1358 (Le Doux)	FRDG395 (Alluvions du Rhône depuis l'amont de la confluence du Gier jusqu'à l'Isère)
15	BLV	FRDR2006/07	FRDR2007A	FRDR459 (L'Ay) ; FRDR1343 (Ruisseau de Bouterne) ; FRDR 312 (L'Isère) ; FRDR10394 (La Barberolle) ; FRDR12062 (Le Doux)	FRDG381 (Alluvions du Rhône du confluent de l'Isère au défilé de Donzère)
16	BEA	FRDR2007	FRDR2007B	FRDR448A (La Véore) ; FRDR 444B (L'Eyrieux) ; FRDR10963 (L'Embroye) ; FRDR11562 (Le Turzon)	FRDG381 (Alluvions du Rhône du confluent de l'Isère au défilé de Donzère)
17	BLN	FRDR2007	FRDR2007C	FRDR438A (La Drôme) ; FRDR130C (L'Ouvèze) ; FRDR1319B (La Payre) ; FRDR12061 (La Tessonne)	FRDG381 (Alluvions du Rhône du confluent de l'Isère au défilé de Donzère)
18	MON	FRDR2007	FRDR2007D	FRDR434 (Le Laveyzon) ; FRDR428A (Le Roubion) ; FRDR427 (L'Escoutay) ; FRDR10875 (Ruisseau du Lorobuire)	FRDG381 (Alluvions du Rhône du confluent de l'Isère au défilé de Donzère)
19	DZM	FRDR2007	FRDR2007E	FRDR434 (Le Laveyzon) ; FRDR409 (Le Lauzon) ; FRDR406A (Le Lez) ; FRDR10638 (La Raille) ; FRDR10065A (La Conche) ; FRDR 10971 (Le Laveyzon)	FRDG382 (Alluvions du Rhône du défilé de Donzère au confluent de la Durance et alluvions de la basse vallée Ar
20	CAD	FRDR2007	FRDR2007	FRDR394B (La Cèze) ; FRDR401B (L'Aigue) ; FRDR10221 (Le Nizon) ; FRDR10478 (Le Rieu)	FRDG382 (Alluvions du Rhône du défilé de Donzère au confluent de la Durance et alluvions de la basse vallée Ar
21	AVI	FRDR2007/08	FRDR2007F-FRDR2008A	FRDR1251 (La Meyne) ; FRDR383 (L'Ouvèze)	FRDG382 (Alluvions du Rhône du défilé de Donzère au confluent de la Durance et alluvions de la basse vallée Ar
22	VAL	FRDR2008	FRDR2008B	FRDR244 (La Durance) ; FRDR377 (Le Gard) ; FRDR10877 (La Brassière) ; FRDR10301 (Le Brianion)	FRDG504 (Limons et alluvions quaternaires du Bas Rhône et de la Camargue)
23	ARL	FRDR2009	-		FRDG504 (Limons et alluvions quaternaires du Bas Rhône et de la Camargue)
24	GRH	FRDR2009/FRDT20	-		FRDG504 (Limons et alluvions quaternaires du Bas Rhône et de la Camargue)
25	PRH	FRDR2009/FRDT19	-		FRDG504 (Limons et alluvions quaternaires du Bas Rhône et de la Camargue)

Annexe 2. Base de données des tronçons homogènes (TH)

Cette annexe contient 4 pages.

DONNEES GEOMETRIQUES

Code_hydro	Code	Cours d'eau	Gestionnaire/c oncessionnaire	TH_court	Longueur (m)	Longueur totale par UHC (m)	Longueur Rhône par CU (m)	Longueur Rhône par RCC (m)	Pk amont	Largeur moyenne en eau minimale (m)	Largeur moyenne en eau maximale (m)	Largeur moyenne en eau	N° UHC	UHC	Am-Av	TH_court	TH_complet	Code	Masse d'eau SDAGE	Nom usuel
V1610000	R	Le Rhône	SIG	SUI1	1 114				-205,1	146,0	373,0	260	01	SUI	01	SUI1	01-SUI1-R	R	FRDR2000	Le Rhône du Léman au barrage du Seujet
V1610000	R	Le Rhône	SIG	SUI2	1 194				-204,2	149,0		113	01	SUI2	01	SUI2	01-SUI2-R	R	FRDR2000	Le Rhône du barrage du Seujet à la confluence de l'Arve
V0--0200	A	L'Arve	SIG	SUI3	368				-203,3	82,0	100,0	91	01	SUI	01	SUI3	01-SUI3-A	A	FRDR555b	L'Arve
V1610000	R	Le Rhône	SIG	SUI4	11 833				-203,3	82,0	364,0	223	01	SUI	01	SUI4	01-SUI4-R	R	FRDR2000	La retenue du barrage de Verbois
V1610000	RT	Le Rhône	SIG	SUI5	1 471	15 980	15 612	15 612	-194,0	107,0	122,0	115	01	SUI	01	SUI5	01-SUI5-RT	RT	FRDR2000	Le Rhône de l'aval du barrage de Verbois à la retenue du barrage de Chancy-Pougny
V1610000	R	Le Rhône	SFMCPC	CHP1	4 500				-192,9	118,0	260,0	189	02	CHP	02	CHP1	02-CHP1-R	R	FRDR2000	La retenue du barrage de Chancy-Pougny
V1610000	RT	Le Rhône	SFMCPC	CHP2	1 700	6 200	6 200	6 200	-188,4	84,0	170,0	127	02	CHP	03	CHP2	02-CHP2-RT	RT	FRDR2000	Le Rhône du barrage de Chancy-Pougny à la retenue du barrage de Génissiat
V1610000	R	Le Rhône	CNR	GEN1	24 598				-186,7	125,0	361,0	243	03	GEN	03	GEN1	03-GEN1-R	R	FRDR2000	La retenue du barrage de Génissiat
V1610000	RT	Le Rhône	CNR	GEN2	1 631	26 229	26 229	26 229	-162,2	45,0	80,0	63	03	GEN	03	GEN2	03-GEN2-RT	RT	FRDR2000	Le Rhône en aval du barrage de Génissiat
V1610000	R	Le Rhône	CNR	SEY1	8 652				-160,5	75,0	283,0	179	04	SEY	04	SEY1	04-SEY1-R	R	FRDR2000	Retenue du barrage de Seyssel
V11-0400	A	Les Ussets	CNR	SEY2	3 000				-151,8	24,0	87,0	56	04	SEY	04	SEY2	04-SEY2-A	A	FRDR540	Les Ussets
V1610000	RT	Le Rhône	CNR	SEY3	2 170	13 822	10 822	10 822	-151,8	80,0	211,0	146	04	SEY	04	SEY3	04-SEY3-RT	RT	FRDR2001	Le Rhône total à Seyssel
V1610000	R	Le Rhône	CNR	CHA1	1 757				-149,5	144,0	343,0	244	05	CHA	05	CHA1	05-CHA1-R	R	FRDR2001	La retenue du barrage de Motz de l'aval du barrage de Seyssel à la confluence avec le Fier
V12-0400	A	Le Fier	CNR	CHA2	1 683				-147,9	39,0	82,0	61	05	CHA	05	CHA2	05-CHA2-A	A	FRDR530	Le Fier
V1610000	R	Le Rhône	CNR	CHA3	1 723				-147,9	337,0	437,0	387	05	CHA	05	CHA3	05-CHA3-R	R	FRDR2001	La retenue du barrage de Motz de la confluence avec le Fier au barrage de Motz
V1265002	CU	Dérivation de Chautagne	CNR	CHA4	9 242				-146,4	83,0	113,0	98	05	CHA	05	CHA4	05-CHA4-CU	CU	FRDR2001	Le canal de Chautagne
V1610000	RCC	Le Rhône	CNR	CHA5	9 495				-146,0	60,0	139,0	100	05	CHA	05	CHA5	05-CHA5-RCC	RCC	FRDR2001A	Le Vieux Rhône de Chautagne
V1610000	RT	Le Rhône	CNR	CHA6	2 202	26 102	14 924	15 177	-136,6	92,0	206,0	149	05	CHA	05	CHA6	05-CHA6-RT	RT	FRDR2001	Le Rhône total de Chautagne
V1610000	R	Le Rhône	CNR	BEL1	2 871				-134,6	186,0	430,0	308	06	BEL	06	BEL1	06-BEL1-R	R	FRDR2001	La retenue du barrage de Lavours
V1--3002	CU	Dérivation de Belley	CNR	BEL2	15 090				-132,0	48,0	344,0	196	06	BEL	06	BEL2	06-BEL2-CU	CU	FRDR2001	Le Canal de Belley
V1610000	RCC	Le Rhône	CNR	BEL3	17 742	35 703	17 961	20 613	-131,6	78,0	145,0	112	06	BEL	06	BEL3	06-BEL3-RCC	RCC	FRDR2001B	Le Vieux Rhône de Belley
V1610000	R	Le Rhône	CNR	BRC1	11 365				-114,5	109,0	358,0	234	07	BRC	07	BRC1	07-BRC1-R	R	FRDR2001	La retenue de Champagnieux
V1--3022	CU	Dérivation de Brégnier-Cordon	CNR	BRC2	8 116				-103,4	82,0	267,0	175	07	BRC	07	BRC2	07-BRC2-CU	CU	FRDR2001	Le Canal de Brégnier-Cordon
V1610000	RCC	Le Rhône	CNR	BRC3	4 583				-102,9	83,0	169,0	126	07	BRC	07	BRC3	07-BRC3-RCC	RCC	FRDR2001C	Le Vieux Rhône de Brégnier-Cordon en amont de la confluence avec le Guiers
V15-0400	A	Le Guiers	CNR	BRC4	2 209				-98,8	28,0	43,0	36	07	BRC	07	BRC4	07-BRC4-A	A	FRDR515	Le Guiers
V1610000	RCC	Le Rhône	CNR	BRC5	7 702				-98,8	62,0	153,0	108	07	BRC	07	BRC5	07-BRC5-RCC	RCC	FRDR2001C	Le vieux Rhône de Brégnier-Cordon en aval de la confluence avec le Guiers
V1610000	RT	Le Rhône	CNR	BRC6	6 258	40 233	25 739	29 908	-91,6	87,0	343,0	215	07	BRC	07	BRC6	07-BRC6-RT	RT	FRDR2002	Le Rhône de Brégnier-Cordon
V1610000	RT	Le Rhône	CNR	SAB1	13 984				-84,8	84,0	285,0	185	08	SAB	08	SAB1	08-SAB1-RT	RT	FRDR2002/2003	Le Rhône amont de Sault-Brenaz
V1610000	R	Le Rhône	CNR	SAB2	6 491				-70,6	214,0	803,0	509	08	SAB	08	SAB2	08-SAB2-R	R	FRDR2003	Retenue du barrage de Villebois
V1635002	CU	Dérivation de Sault-Brenaz	CNR	SAB3	2 151				-63,8	67,0	97,0	82	08	SAB	08	SAB3	08-SAB3-CU	CU	FRDR2004	Canal de Porcieu-Amblagnieu
V1610000	RCC	Le Rhône	CNR	SAB4	2 018				-63,6	68,0	121,0	95	08	SAB	08	SAB4	08-SAB4-RCC	RCC	FRDR2004	Vieux Rhône de Sault-Brenaz
V1610000	RT	Le Rhône	CNR	SAB5	2 604	27 248	25 230	25 097	-61,6	91,0	156,0	124	08	SAB	08	SAB5	08-SAB5-RT	RT	FRDR2004	Le Rhône aval de Sault-Brenaz
V1610000	RT	Le Rhône	VNF	VUL1	23 948	23 948	23 948	23 948	-59,0	103,0	168,0	136	09	VUL	09	VUL1	09-VUL1-RT	RT	FRDR2004	Le Rhône de Saint Vulbas
V1610000	R	Le Rhône	EDF	ALY1	8 944				-35,5	113,0	214,0	164	10	ALY	10	ALY1	10-ALY1-R	R	FRDR2004	Retenue de Jons
V2--0200	A	L'Ain	S3RA	ALY2	11 166				-34,5	32,0	106,0	69	10	ALY	10	ALY2	10-ALY2-A	A	FRDR484	L'Ain
V3005022	R	Canal de Jonage	EDF	ALY3	5 788				-27,0	92,0	112,0	102	10	ALY	10	ALY3	10-ALY3-R	R	FRDR2005	Canal de Jonage amont barrage de Jonage
V3005022	CU	Canal de Jonage	EDF	ALY4	15 165				-21,6	86,0	218,0	152	10	ALY	10	ALY4	10-ALY4-CU	CU	FRDR2005	Canal de Jonage aval barrage de Jonage
V1610000	RCC	Canal de Miribel	VNF	ALY5	13 934				-26,6	62,0	102,0	82	10	ALY	10	ALY5	10-ALY5-RCC	RCC	FRDR2005A	Canal de Miribel amont brèche de Neyron
V1610000	RCC	Canal de Miribel	VNF	ALY6	4 737				-13,0	57,0	64,0	61	10	ALY	10	ALY6	10-ALY6-RCC	RCC	FRDR2005A	Canal de Miribel aval brèche de Neyron
V3000501	RCC	Le Vieux Rhône	VNF	ALY7	4 714				-13,0	32,0	66,0	49	10	ALY	10	ALY7	10-ALY7-RCC	RCC	FRDR2005A	Vieux Rhône de Neyron
V1610000	RT	Le Rhône	VNF	ALY8	2 458	66 906	32 355	34 787	-8,4	133,0	269,0	201	10	ALY	10	ALY8	10-ALY8-RT	RT	FRDR2005	Le Rhône en aval des seuils TEO
V1610000	R	Le Rhône	CNR	PBN1	6 836				-6,0	168,0	185,0	177	11	PBN	11	PBN1	11-PBN1-R	R	FRDR2005	Retenue de Pierre-Bénite dans la traversée de Lyon
U--0000	A	La Saône	CNR	PBN2	10 123				0,8	81,0	192,0	137	11	PBN	11	PBN2	11-PBN2-A	A	FRDR1807B	La Saône
V1610000	R	Le Rhône	CNR	PBN3	4 133				0,8	188,0	301,0	245	11	PBN	11	PBN3	11-PBN3-R	R	FRDR2006	Retenue du barrage de Pierre-Bénite
V30-4002	CU	Dérivation de Pierre Bénite	CNR	PBN4	11 836				3,6	80,0	192,0	136	11	PBN	11	PBN4	11-PBN4-CU	CU	FRDR2006	Canal de Pierre-Bénite
V1610000	RCC	Le Rhône	CNR	PBN5	10 515	43 443	22 805	21 484	5,0	106,0	159,0	133	11	PBN	11	PBN5	11-PBN5-RCC	RCC	FRDR2006A	Vieux Rhône de Pierre-Bénite
V1610000	R	Le Rhône	CNR	VAU1	18 785	18 785	18 785	18 785	15,3	156,0	331,0	244	12	VAU	12	VAU1	12-VAU1-R	R	FRDR2006	Retenue de Vaugris
V1610000	R	Le Rhône	CNR	PDR1	16 883				33,9	180,0	383,0	282	13	PDR	13	PDR1	13-PDR1-R	R	FRDR2006	Retenue du barrage de St-Pierre-de-Boeuf
V3--3002	CU	Dérivation de Péage de Roussillon	CNR	PDR2	11 445				50,5	120,0	195,0	158	13	PDR	13	PDR2	13-PDR2-CU	CU	FRDR2006	Canal de Sablons
V1610000	RCC	Le Rhône	CNR	PDR3	12 421	40 749	28 328	29 304	51,0	81,0	210,0	146	13	PDR	13	PDR3	13-PDR3-RCC	RCC	FRDR2006B	Vieux Rhône de Roussillon
V1610000	R	Le Rhône	CNR	STV1	19 060				63,3	217,0	514,0	366	14	STV	14	STV1	14-STV1-R	R	FRDR2006	Retenue du barrage d'Arras
V3625002	CU	Dérivation de Saint Vallier	CNR	STV2	4 582				82,2	132,0	188,0	160	14	STV	14	STV2	14-STV2-CU	CU	FRDR2006	Canal de Gervans
V1610000	RCC	Le Rhône	CNR	STV3	4 506	28 148	23 642	23 566	82,7	113,0	180,0	147	14	STV	14	STV3	14-STV3-RCC	RCC	FRDR2006	Vieux-Rhône de St-Vallier
V1610000	RT	Le Rhône	CNR	BLV1	3 428				87,2	191,0	232,0	212	15	BLV	15	BLV1	15-BLV1-RT	RT	FRDR2006	Rhône amont Doux
V37-0400	A	Le Doux	CNR	BLV2	4 206				90,4	25,0	146,0	86	15	BLV	15	BLV2	15-BLV2-A	A	FRDR462	Le Doux
V1610000	R	Le Rhône	CNR	BLV3	9 133				90,4	218,0	381,0	300	15	BLV	15	BLV3	15-BLV3-R	R	FRDR2006	Retenue de la Roche de Glun
1002	CU	Dérivation de Bourg-lès-Valence	CNR	BLV4	4 093				97,9	134,0	148,0	141	15	BLV	15	BLV4	15-BLV4-CU	CU	FRDR2006	Canal de Bourg-lès-Valence en amont de l'Isère
W--0000	A	L'Isère	CNR	BLV5	13 111				101,9	78,0	255,0	167	15	BLV	15	BLV5	15-BLV5-A	A	FRDR312	L'Isère
1002	CU	Dérivation de Bourg-lès-Valence	CNR	BLV6	6 316				101,9	173,0	245,0	209	15	BLV	15	BLV6	15-BLV6-CU	CU	FRDR2006	Canal de Bourg-lès-Valence en aval de l'Isère
V1610000	RCC	Le Rhône	CNR	BLV7	3 638				99,6	95,0	160,0	128	15	BLV	15	BLV7	15-BLV7-RCC	RCC	FRDR2007A	Vieux Rhône en amont du barrage de l'Isère
V1610000	RCC	Le Rhône	CNR	BLV8	6 126	50 051	22 970	22 325	102,7	140,0	191,0	166	15	BLV	15	BLV8	15-BLV8-RCC	RCC	FRDR2007A	Vieux Rhône en aval du barrage de l'Isère
V1610000	R	Le Rhône	CNR	BEA1	11 222				108,7	194,0	432,0	313	16	BEA	16	BEA1	16-BEA1-R	R	FRDR2007	Retenue du barrage de Charmes-sur-Rhône
V1610000	RCC	Le Rhône	CNR	BEA2	7 860				119,6	146,0	249,0	198	16	BEA	16	BEA2	16-BEA2-RCC	RCC	FRDR2007B	Vieux Rhône de Beauchastel
V4025002	CU	Dérivation de Beauchastel	CNR	BEA3	7 153				119,1	161,0	173,0	167	16	BEA	16	BEA3	16-BEA3-CU	CU	FRDR2007	Canal de Beauchastel
V41-0400	A	L'Eyrieux	CNR	BEA4	9 667	35 902	18 375	19 082	126,8	19,0	125,0	72	16	BEA	17	BEA4	16-BEA4-A	A	FRDR444b	L'Eyrieux
V1610000	R	Le Rhône	CNR	BLN1	4 970				126,8	164,0	402,0	283	17	BLN	17	BLN1	17-BLN1-R	R	FRDR2007	Retenue du barrage du Pouzin en amont de la Drôme
V42-0400	A	La Drôme	CNR	BLN2	6 891				131,6	39,0	134,0	87	17	BLN	17	BLN2	17-BLN2-A	A	FRDR438a	La Drôme

DONNEES HYDROLOGIQUES

Cours d'eau	TH	SBV	étiage	Q semi-permanent	Qm	Q2	Q5	Q10	Q100	Q1000	Crue référence	Qr	Qdérivé	Qéquip	commentaire
Le Rhône	SUI1				241			600	650						D'après EGR VD1A1
Le Rhône	SUI2														
L'Arve	SUI3	1 985			79	485	620	730	1030	1200					d'après étude morphologique et hydraulique de la retenue de Verbois - Bollaert 2006
Le Rhône	SUI4				330		1000	1050	1250	1400			0	620	SIG - Evaluation des scénarios de gestion sédimentaire pour le Rhône genevois
Le Rhône	SUI5														
Le Rhône	CHP1		153		330	950	1130	1230	1500	1700	1530		0	600	
Le Rhône	CHP2		153			962	1148	1254	1506	1736	1566				
Le Rhône	GEN1		153	120	330	1120	1360	1510	1920	2240	1940		0		étiage absolu (V2-D1-A1)
Le Rhône	GEN2		153			1120	1360	1510	1920	2240	1940				étiage absolu (V2-D1-A1)
Le Rhône	SEY1		179	340	330	1120	1360	1510	1920	2240	1940		0		étiage absolu (V2-D1-A1)
Les Ussets	SEY2	310			4,9	50	-	150	300	-					
Le Rhône	SEY3		179	315	335	1240	1510	1670	2090	2390	2040				Qm= Qm retenbue + Qm Ussets
Le Rhône	CHA1		198	315	335	1240	1510	1670	2090	2390	2040				Qm= Qm retenbue + Qm Ussets
Le Fier	CHA2	1 376			46,1	432	-	691	1221	-					V2-DA4-A3 Q1000+2220
Le Rhône	CHA3			350	400	1550	1925	2140	3120	2970	50 à 70	700			Débit d'étiage de 10 jours cf V2-D1-A4
Dérivation de Chautagne	CHA4					400	200	200	200	200					
Le Rhône	CHA5					1150	1725	1940	2510	2720	2770				
Le Rhône	CHA6					1430	1669	1868	2302	2613	2578				
Le Rhône	BEL1		204	350	400	1400	1605	1700	2000	2186	2230	30 à 60	640		
Dérivation de Belley	BEL2					700	500	300	100	0	100				
Le Rhône	BEL3					700	1105	1450	1970	2186	2200				
Le Rhône	BRC1		210	380	400	1400	1625	1750	2070	2286	2300	80 à 150	700		Q1000= 2800 cf V2-D1-A5 étiage de dix jours
Dérivation de Brégnier-Cordon	BRC2					650	600	550	300	350					
Le Rhône	BRC3					750	1025	1200	1720	1986	1950				
Le Guers	BRC4	614	4	12	18,2	196	-	280	530	-					
Le Rhône	BRC5					804	1125	1345	2010	2358	2200				
Le Rhône	BRC6					1443	1725	1895	2360	2658	2550				
Le Rhône	SAB1		217	400	441	1414	1707	1872	2303	2589	2493				Q1000= 3150 cg V2-D1-A5 étiage de dix jours
Le Rhône	SAB2			400	441	1401	1707	1872	2303	2589	2493				Q1000= 3150 cg V2-D1-A5 étiage de dix jours
Dérivation de Sault-Brénaz	SAB3				450	700	700	700	700	700	700		700		
Le Rhône	SAB4					701	1007	1172	1603	2450	1793				
Le Rhône	SAB5			400		1401	1707	1872	2303	2589	2493				Q1000= 3150 cg V2-D1-A5 étiage de dix jours
Le Rhône	VUL1		217	400	450	1426	1747	1922	2393	2696	2493				Q1000= 3150 cg V2-D1-A5 étiage de dix jours
Le Rhône	ALY1		322	400	450	2251	2897	3302	4393	5296	4293	30 à 60	640		
L'Ain	ALY2	3 765	18		120	900	1200	1410	2360	-					
Canal de Jonage	ALY3					640	640	640	640	640					
Canal de Jonage	ALY4					640	640	640	640	640				550/640	
Canal de Miribel	ALY5		30		126	1651	2297	2702	3793	4696	3693	30 à 60			
Canal de Miribel	ALY6														
Le Vieux Rhone	ALY7		8		50						8 à 15				
Le Rhône	ALY8				590	2251	2882	3272	4333	5206	4233				
Le Rhône	PBN1		273	550	590	2251	2882	3272	4333	5206	4233				
La Saône	PBN2	29 950			470	1700	-	2100	3355	-					
Le Rhône	PBN3				1030	3246	4005	4400	5515	6253	6100	100	1380		
Dérivation de Pierre Bénite	PBN4					1300	1300	1300	900	500	800				
Le Rhône	PBN5					1990	2865	3140	4990	6800	5300				
Le Rhône	VAU1		398	820	1030	3296	4066	4508	5608	6372	6100		0	1400	V2-D1-A9 crue millénaire (7500)
Le Rhône	PDR1		398	835	1030	3296	4066	4700	6100	6919	6100	50 à 125	1600		Cf V2-D1-A11 FLA : inversé Q1000 pour PDR1 et PDR3
Dérivation de Péage de Roussillon	PDR2					1500	1400	1300	900	500	800				
Le Rhône	PDR3					1940	2646	3208	5083	6372	5300				
Le Rhône	STV1		423	840	1030	3323	4098	4545	5658	6345	6100		1650		cf V2-D1-A12
Dérivation de Saint Vallier	STV2					1600	1400	1300	900	700	800				
Le Rhône	STV3					1767	2678	3245	5133	6782	5300				
Le Rhône	BLV1		423		1030	3323	4098	4545	5658	6345	6100				
Le Doux	BLV2	640			8,5	360	-	720	1800	-					
Le Rhône	BLV3			850	1030	3367	4152	4605	5741	6540	6100	100	1800		étiage de 10 jours, crue millénaire de 7500 d'après EGR
Dérivation de Bourg les Valence	BLV4					1656	1720	1600	725	0					
Le Rhône	BLV5	11 800	115	270	329	837	-	1600	3540	6050					EGR 2000 pour les débits de crues
Dérivation de Bourg les Valence	BLV6					2167	2202	2127	1712	1495					
Le Rhône	BLV7					1711	2432	3005	5016	6787	5000				
Le Rhône	BLV8					2081	2942	3615	5965	8071					
Le Rhône	BEA1		578	1350	1400	4204	5164	5743	7302	8520		74,5	2100		étiage de 10 jours Q1000=9500 Cf V2-D1-A10
Le Rhône	BEA2					2248	3244	3943	6577	8867					
Dérivation de Beauchastel	BEA3					2000	1900	1800	1100	700					
L'Eyreux	BEA4	864			20	-	-	1270	2470	-					
Le Rhône	BLN1		647			4299	5277	5863	7421	8616					
La Drôme	BLN2	1 665	2,4	7	18,6	-	-	570	1260	1500					
Le Rhône	BLN3			1390	1500	4480	5495	6094	7650	8800			2100		crue de 1856=8500 m3/s cf V2-D1-A13
L'Ouvèze (Ardèche)	BLN4	123			-	140	-	265	647	-					
Dérivation de Baix le Logis Neuf	BLN5					2000	2001	2002	2007	2011					
Le Rhône	BLN6					2524	3474	4092	6018	7836					
Le Rhône	MON1		647	1360	1500	4547	5575	6179	7734	8868		75,4	1800		V2-D1-A16 Q1000=10 000m3/s
Dérivation de Montélimar	MON2					1633	1520	1415	1016	532					
Le Roubion	MON3	604				151	-	296	992	-					D'après HYDRO CONSULTANT IRSTEA
Dérivation de Montélimar	MON4					1700	1600	1500	1100	600					
Le Rhône	MON5					2891	3955	4679	7009	9315					
Le Rhône	DZM1		619	1400	1500	4547	5575	6179	7734	8868		75,4	1980		V2-D1-A15
Dérivation de Donzère-Mondragon	DZM2					1800	1800	1800	1500	1300					
Le Rhône	DZM3					2791	3755	4379	6609	8615					Pris au barrage de Donzère
L'Ardèche	DZM4	2 430			50	-	-	3850	6900	-					
Le Rhône	DZM5					3276	4332	5044	7640	10150					
Le Rhône	CAD1		556	1300	1600	5148	6293	7010	9063	10821			2280		
Dérivation de Caderousse	CAD2					2028	1944	1853	1178	898					:= CU + Aigues
Le Rhône	CAD3					3248	6361	5316	8495	11264					:= Barrage de Caderousse +Cèze
La Cèze	CAD4	1 363			20	541	-	1106	2563	-					
L'Aigues	CAD5	1 090			6	-	-	250	-	-					
Le Rhône	AV1		686	1360	1600	5250	6541	7202	9347	11175					Bras d'Avignon: 800 m3/s
Bras de Villeneuve	AV2					3500	3900	4100	5100	6000					
Bras de Villeneuve	AV3					3500	3900	4100	5100	6000					
Bras de Villeneuve	AV4			5		1900	2400	2700	4200	5300					Pris après confluence avec le RCC de Villeneuve
Bras d'Avignon	AV5				400	1748	2461	259	3016	4495	6064				
L'Ouvèze (Drôme)	AV6	880													
Bras d'Avignon	AV7				13	-	-								
Le Rhône	VAL1		686	400	1700	5928	7504	8480	11229	13524			2200		
La Durance	VAL2	14 280	84		190	1400	-	3200	4800	-					étiage = débit réservé
Le Rhône	VAL3					4014	5649	6760	10521	13916					
Le Gardon	VAL4	2 100						2293	6200						
Dérivation de Vallabrègues	VAL5					2000	1900	1800	1200	800					
Le Rhône	ARL1		565	1360	1700	6016	7640	8646	11473	13828	5470				étiage sp et Q1000 cf V2-D1-A19
Le Petit Rhône	ARL2		50	136	170	602	764	995	1528	1688					étiage et sp cf V2D1-A20
Le Rhône	ARL3		510	1224	1530	5414	6876	7568	9591	9717					étiage et sp cf V2-D1-A20
Le Grand Rhône	GRH1		510	1224	1530	5414	6876	7568	9591	9717					d'après BCEOM 2003, par interpolation sur débit total
Le Petit Rhône	PRH1		50	136	170	602	764	995	1528	1688					d'après BCEOM 2003, par interpolation sur débit total
Le Petit Rhône	PRH2		50	136	170	602	764	995	1528	1688					d'après BCEOM 2003, par interpolation sur débit total

DONNEES DE TRANSPORT SOLIDE

Cours d'eau	Code	TH	MES (Mt/an) avant aménagement	MES actuel (Mt/an)	Charriage avant aménagement (m³/an) (cf calcul EGR)	Charriage avant aménagement (m³/an) (cf DVT)	Charriage avant aménagement (m³/an) (SDGS)	Charriage actuel (m³/an) (SDGS)	valeur affichée dans fiche UHC (m³/an) (SDGS)	% Sables (GTM)	Sables (m³/an)	Commentaire
Le Rhône	R	01-SUI1-R	0	0	0	0	0	0	0			
Le Rhône	R	01-SUI2-R	0	0	0	0	0	0	0			
L'Arve	A	01-SUI3-A	1,00	0,57	100 000		100 000	15 000	15 000			
Le Rhône	R	01-SUI4-R	1,00	0,57			100 000	0	≈ 15 000 à 0			
Le Rhône	RT	01-SUI5-RT	1,00	0,57			100 000	20 000	≈ 20 000			
Le Rhône	R	02-CHP1-R	1,00	0,57			100 000	20 000	≈ 20 000			
Le Rhône	RT	02-CHP2-RT	1,00	0,57	88 632		100 000	20 000	≈ 50 000			
Le Rhône	R	03-GEN1-R	1,00	0,57	88 632		100 000	100	50 000 à 100	69%	69	
Le Rhône	RT	03-GEN2-RT	1,00	0,57	88 632		100 000	50 000	50 000	60%	30056	
Le Rhône	R	04-SEY1-R	1,00	0,57	60 024		100 000	1 000	50 000 à 1000	62%	621	
Les Usises	A	04-SEY2-A	0,10	0,05	20 000		20 000	4 000	4 000			V3D1A5
Le Rhône	RT	04-SEY3-RT	1,10	0,57	88 632	90 000	100 000	20 000	20 000	73%	14599	
Le Rhône	R	05-CHA1-R	1,10	0,57	190 660	90 000	100 000	1 000	1 000	96%	961	
Le Fier	A	05-CHA2-A	0,50	0,16	60 000	60 000	60 000	0	0			V3D1A5
Le Rhône	R	05-CHA3-R	1,60	0,73	190 660	90 000	160 000	500	500	100%	500	
Dérivation de Chautagne	CU	05-CHA4-CU		0,73				0	0			
Le Rhône	RCC	05-CHA5-RCC	1,60		164 170	90 000	160 000	7 000	7 000	79%	5553	
Le Rhône	RT	05-CHA6-RT	1,60	0,73	120 507	90 000	120 000	15 000	15 000	69%	10411	
Le Rhône	R	06-BEL1-R	1,60	0,73	120 507	90 000	120 000	2 500	2 500	78%	1948	
Dérivation de Belley	CU	06-BEL2-CU		0,73				0	0			
Le Rhône	RCC	06-BEL3-RCC	1,60		143 688	2 200	120 000	100	100 à 1 200	78%	78	
Le Rhône	R	07-BRC1-R	1,60	0,73	108 600	2 200	100 000	100	3 500 à 100	76%	76	
Dérivation de Brégnier-Cordon	CU	07-BRC2-CU		0,73				0	0			
Le Rhône	RCC	07-BRC3-RCC	1,60		95 388	600	80 000	200	200	82%	164	
Le Gulers	A	07-BRC4-A	0,10	0,03	10 000	10 000	10 000	500	500			
Le Rhône	RCC	07-BRC5-RCC	1,70		95 388	600	60 000	300	1 000 à 300	73%	219	
Le Rhône	RT	07-BRC6-RT	1,70	0,73	95 388	600	20 000	6 500	6 500	78%	5065	
Le Rhône	RT	08-SAB1-RT	1,70	0,73	138 931	600	0	1 000	1 000 à 8 000	57%	570	
Le Rhône	R	08-SAB2-R	1,70	0,73	5 802	600	0	2 000	2 000	52%	1033	
Dérivation de Sault-Brénaz	CU	08-SAB3-CU		0,73				0	0			
Le Rhône	RCC	08-SAB4-RCC	1,70	0,73	137 284	10 000	100 000	600	600	78%	467	valeur EGR de 1 044 558 m³/an écartée
Le Rhône	RT	08-SAB5-RT	1,70	0,73	137 284	10 000	100 000	2 500	2 500	81%	2034	
Le Rhône	RT	09-VUL1-RT	1,70	0,73	137 284	10 000	10 000	10 000	10 000	80%	7980	
Le Rhône	R	10-ALY1-R	1,85	0,73	137 284	100 000	100 000	30 000	30 000	67%	20083	
L'Ain	A	10-ALY2-A	0,15	0,10	100 000	100 000	100 000	30 000	30 000			
Canal de Jonage	R	10-ALY3-R		0,73				0	10 000 à 0			
Canal de Jonage	CU	10-ALY4-CU		0,73				0	= 0			
Canal de Miribel	RCC	10-ALY5-RCC	0,15		137 284		100 000	30 000	30 000	65%	19548	
Canal de Miribel	RCC	10-ALY6-RCC	0,15		139 579		90 000	10 000	10 000	66%	6568	
Le Vieux Rhone	RCC	10-ALY7-RCC			139 579		10 000	0	20 000 à 0			
Le Rhône	RT	10-ALY8-RT	2,00	0,73	139 579		50 000	3 000	3 000	90%	2708	
Le Rhône	R	11-PBN1-R	2,00	0,73	30 814	45 000	25 000	8 000	8 000	83%	6626	
La Saône	A	11-PBN2-A	1,50	0,33	0	0	0	0	0			
Le Rhône	R	11-PBN3-R	3,50	1,06	30 814	45 000	25 000	1 000	1 000	99%	985	
Dérivation de Pierre Bénite	CU	11-PBN4-CU		1,06				0	0			
Le Rhône	RCC	11-PBN5-RCC	3,50		37 559	45 000	30 000	3 000	6 000 à 3000	87%	2620	
Le Rhône	R	12-VAU1-R	3,50	1,07	33 593	70 000	30 000	1 000	2 000 à 1 000	83%	828	
Le Rhône	R	13-PDR1-R	3,50	1,07	67 483	80 000	65 000	1 000	10 000 à 1 000	84%	839	
Dérivation de Péage de Roussillon	CU	13-PDR2-CU		1,07				0	0			
Le Rhône	RCC	13-PDR3-RCC	3,50		98 383	80 000	65 000	2 000	6 000 à 2 000	82%	1646	
Le Rhône	R	14-STV1-R	3,50	1,13	109 379	80 000	100 000	1 000	15 000 à 1 000	83%	834	
Dérivation de Saint Vallier	CU	14-STV2-CU		1,13				0	0			
Le Rhône	RCC	14-STV3-RCC	3,50		109 379	80 000	100 000	2 000	2 000	82%	1642	
Le Rhône	RT	15-BLV1-RT	3,50	1,18	109 379	18 000	100 000	10 000	10 000	85%	8541	
Le Doux	A	15-BLV2-A	0,02	0,04	8 000	8 000	8 000	6 000	6 000			
Le Rhône	R	15-BLV3-R	3,52	1,22	114 540	18 000	100 000	100	10 000 à 100	88%	88	
Dérivation de Bourg lès Valence	CU	15-BLV4-CU		1,22				0	0			
L'Isère	A	15-BLV5-A	4,50	1,80	50 000	50 000	50 000	0	0			
Dérivation de Bourg lès Valence	CU	15-BLV6-CU		3,02				0	0			
Le Rhône	RCC	15-BLV7-RCC	3,52		114 540	80 000	100 000	200	200	77%	154	
Le Rhône	RCC	15-BLV8-RCC	8,02		114 540	80 000	200 000	3 000	3 000	76%	2280	
Le Rhône	R	16-BEA1-R	8,02	3,02	196 581	80 000	200 000	20 000	20 000	82%	16394	
Le Rhône	RCC	16-BEA2-RCC	8,02		196 581	180 000	200 000	3 000	10 000 à 3 000	67%	2009	
Dérivation de Beauchastel	CU	16-BEA3-CU		3,02				0	0			
L'Eyrieux	A	16-BEA4-A	0,04	0,05	20 000	20 000	20 000	5 000	5 000			
Le Rhône	R	17-BLN1-R	8,06	3,09	196 581	180 000	220 000	30 000	30 000	66%	19916	
La Drôme	A	17-BLN2-A	0,20	0,20	40 000	40 000	40 000	20 000	20 000			
Le Rhône	R	17-BLN3-R	8,26	3,29	261 026	180 000	250 000	6 000	6 000	67%	4020	
L'Ouvèze (Ardèche)	A	17-BLN4-A	0,10	0,10	15 000	15 000	15 000	3 000	3 000			
Dérivation de Baix le Logis Neuf	CU	17-BLN5-CU		3,39				0	0			
Le Rhône	RCC	17-BLN6-RCC	8,36		493 643	105 000	250 000	15 000	15 000	82%	12354	
Le Rhône	R	18-MON1-R	8,36	3,39	336 738	105 000	300 000	2 000	25 000 à 2 000	89%	1774	
Dérivation de Montélimar	CU	18-MON2-CU		3,39				0	0			
Le Rouillon	A	18-MON3-A	0,05	0,05	10 000	10 000	10 000	2 000	2 000			
Dérivation de Montélimar	CU	18-MON4-CU		3,45				0	0			
Le Rhône	RCC	18-MON5-RCC	8,41		476 186	90 000	300 000	10 000	20 000 à 10 000	80%	7969	
Le Rhône	R	19-DZM1-R	8,60	3,45	476 186	90 000	450 000	3 000	30 000 à 3 000	64%	1931	
Dérivation de Donzère-Mondragon	CU	19-DZM2-CU		3,45				0	0			
Le Rhône	RCC	19-DZM3-RCC	8,60		292 105	140 000	450 000	30 000	30 000	74%	22323	
L'Ardèche	A	19-DZM4-A	0,10	0,20	15 000	15 000	15 000	5 000	5 000			VD1A4 page 47
Le Rhône	RCC	19-DZM5-RCC	8,70		292 105	140 000	450 000	10 000	10 000	71%	7132	
Le Rhône	R	20-CAD1-R	8,70	3,68	368 584	140 000	400 000	1 000	8 000 à 1 000	76%	758	
Dérivation de Caderousse	CU	20-CAD2-CU		3,68				0	0			
Le Rhône	RCC	20-CAD3-RCC	8,70		552 448	19 000	400 000	2 000	2 000	80%	1605	
La Cèze	A	20-CAD4-A	0,10	0,07	10 000	10 000	10 000	6 000	6 000			
L'Aigues	A	20-CAD5-A	0,10	0,06	2 000	2 000	2 000	0	0			
Le Rhône	R	21-AV11-R	8,90	3,81	346 867	19 000	350 000	2 000	15 000 à 2 000	79%	1584	
Bras de Villeneuve	R	21-AV12-R	8,90	3,81	346 867	19 000	300 000	2 000	2 000			
Bras de Villeneuve	CU	21-AV13-CU		3,81			200 000	0	0			
Bras de Villeneuve	RCC	21-AV14-RCC	8,90			19 000	250 000	2 000	2 000			
Le Rhône	RCC	21-AV15-RCC	8,90		135 024	19 000	200 000	1 000	1 000	97%	973	
L'Ouvèze (Drôme)	A	21-AV16-A	0,10	0,05	5 000	5 000	5 000	0	0			
Le Rhône	RCC	21-AV17-RCC	9,00		135 024	19 000	140 000	2 500	2 500	95%	2368	
Le Rhône	R	22-VAL1-R	15,00	3,86	139 524	70 000	140 000	2 000	1 500	94%	1874	
La Durance	A	22-VAL2-A	6,00	2,04	200 000	200 000	200 000	6 000	6 000			
Le Rhône	RCC	22-VAL3-RCC	21,00		139 524	70 000	140 000	300	300 à 3 000	82%	246	
Le Gardon	A	22-VAL4-A	0,10	0,10	5 000	5 000	5 000	0	0			
Dérivation de Vallabrègues	CU	22-VAL5-CU		5,90				0	0			
Le Rhône	RT	23-ARL1-RT	21,10	6,00	196 872	70 000	200 000	20 000	20 000	85%	17087	
Le Petit Rhône	RT	23-ARL2-PRH	4,22	0,60			40 000	2 000	2 000		0	
Le Rhône	RT	23-ARL3-GRH	16,88	5,40			160 000	20 000	20 000		0	
Le Grand Rhône	RT	24-GRH1	16,88	5,40			160 000	20 000	20 000		0	
Le Petit Rhône	RT	25-PRH1	4,22	0,60			40 000	5 000	5 000		0	
Le Petit Rhône	RT	25-PRH2	4,22	0,60			40 000	5 000	5 000		0	

DONNEES DE BILAN SEDIMENTAIRE

Cours d'eau	Code	TH	TH complet	MES (Mt/an) avant aménagement (1)	MES actuel (Mt/an) (2)	Charriage avant aménagement (m³/an) (1)	Charriage avant aménagement (m³/an) (3)	Charriage avant aménagement (m³/an) (valeur retenue)	Charriage actuel (m³/an) (valeur retenue par TH) (pour affluent : apport direct au Rhône)	Valeur affichée dans fiche UHC (m³/an) (pour affluent : apport total)	% sables par TH (d'après modèle GTM)	Charriage en sables (m³/an)
Le Rhône	R	SUI1	01-SUI1-R	0	0	0	0	0	0	0		
Le Rhône	R	SUI2	01-SUI2-R	0	0	0	0	0	0	0		
L'Arve	A	SUI3	01-SUI3-A	1,00	0,57	100 000		100 000	10 000	20 000		
Le Rhône	R	SUI4	01-SUI4-R	1,00	0,57			100 000	0	= 15 000 à 0	65%	
Le Rhône	RT	SUI5	01-SUI5-RT	1,00	0,57			100 000	0	= 20 000	65%	13 000
Le Rhône	R	CHP1	02-CHP1-R	1,00	0,57			100 000	20 000	= 20 000	65%	13 000
Le Rhône	RT	CHP2	02-CHP2-RT	1,00	0,57	88 632		100 000	0	= 50 000	65%	32 500
Le Rhône	R	GEN1	03-GEN1-R	1,00	0,57	88 632		100 000	100	50 000 à 100	69%	69
Le Rhône	RT	GEN2	03-GEN2-RT	1,00	0,57	88 632		100 000	50 000	50 000	60%	30 056
Le Rhône	R	SEY1	04-SEY1-R	1,00	0,57	60 024		100 000	10 000	50 000 à 10000	62%	6 208
Les Ussees	A	SEY2	04-SEY2-A	0,10	0,05	20 000		20 000	446	4 000		
Le Rhône	RT	SEY3	04-SEY3-RT	1,10	0,57	88 632	90 000	100 000	20 000	20 000	73%	14 599
Le Rhône	R	CHA1	05-CHA1-R	1,10	0,57	190 660	90 000	100 000	1 000	1 000	96%	961
Le Fier	A	CHA2	05-CHA2-A	0,50	0,16	60 000	60 000	60 000	0	0		
Le Rhône	R	CHA3	05-CHA3-R	1,60	0,73	190 660	90 000	160 000	500	500	100%	500
Dérivation de Chautagne	CU	CHA4	05-CHA4-CU		0,73				0	0		
Le Rhône	RCC	CHA5	05-CHA5-RCC	1,60		164 170	90 000	160 000	7 000	7 000	79%	5 553
Le Rhône	RT	CHA6	05-CHA6-RT	1,60	0,73	120 507	90 000	120 000	15 000	15 000	69%	10 411
Le Rhône	R	BEL1	06-BEL1-R	1,60	0,73	120 507	90 000	120 000	2 500	2 500	78%	1 948
Dérivation de Belley	CU	BEL2	06-BEL2-CU		0,73				0	0		
Le Rhône	RCC	BEL3	06-BEL3-RCC	1,60		143 688	2 200	120 000	1 200	100 à 1 200	78%	942
Le Rhône	R	BRC1	07-BRC1-R	1,60	0,73	108 600	2 200	100 000	100	3 500 à 100	76%	76
Dérivation de Brégnier-Cordon	CU	BRC2	07-BRC2-CU		0,73				0	0		
Le Rhône	RCC	BRC3	07-BRC3-RCC	1,60		95 388	600	80 000	200	200	82%	164
Le Guiers	A	BRC4	07-BRC4-A	0,10	0,03	10 000	10 000	10 000	500	500		
Le Rhône	RCC	BRC5	07-BRC5-RCC	1,70		95 388	600	60 000	300	1 000 à 300	73%	219
Le Rhône	RT	BRC6	07-BRC6-RT	1,70	0,73	95 388	600	20 000	6 500	6 500	78%	5 065
Le Rhône	RT	SAB1	08-SAB1-RT	1,70	0,73	138 931	600	0	1 000	1 000 à 5 000	57%	570
Le Rhône	R	SAB2	08-SAB2-R	1,70	0,73	5 802	600	1 000	500	500	52%	258
Dérivation de Saut-Brénaz	CU	SAB3	08-SAB3-CU		0,73				0	0		
Le Rhône	RCC	SAB4	08-SAB4-RCC	1,70		137 284	10 000	100 000	600	600	78%	467
Le Rhône	RT	SAB5	08-SAB5-RT	1,70	0,73	137 284	10 000	100 000	2 500	2 500	81%	2 034
Le Rhône	RT	VUL1	09-VUL1-RT	1,70	0,73	137 284	10 000	10 000	10 000	10 000	80%	7 980
Le Rhône	R	ALY1	10-ALY1-R	1,85	0,73	137 284	100 000	100 000	35 000	30000 à 40 000	67%	23 431
L'Ain	A	ALY2	10-ALY2-A	0,15	0,10	100 000	100 000	100 000	35 000	35 000		
Canal de Jonage	R	ALY3	10-ALY3-R		0,73				0	10 000 à 0		
Canal de Jonage	CU	ALY4	10-ALY4-CU		0,73				0	= 0		
Canal de Miribel	RCC	ALY5	10-ALY5-RCC	1,85		137 284		100 000	30 000	30 000	65%	19 548
Canal de Miribel	RCC	ALY6	10-ALY6-RCC	1,85		139 579		90 000	10 000	10 000	66%	6 568
Le Vieux Rhone	RCC	ALY7	10-ALY7-RCC	1,85		139 579		10 000	0	20 000 à 0		
Le Rhône	RT	ALY8	10-ALY8-RT	2,00	0,73	139 579		50 000	3 000	3 000	90%	2 708
Le Rhône	R	PBN1	11-PBN1-R	2,00	0,73	30 814	45 000	25 000	8 000	8 000	83%	6 626
La Saône	A	PBN2	11-PBN2-A	1,50	0,33	0	0	0	0	0		
Le Rhône	R	PBN3	11-PBN3-R	3,50	1,06	30 814	45 000	25 000	1 000	1 000	99%	985
Dérivation de Pierre Bénite	CU	PBN4	11-PBN4-CU		1,06				0	0		
Le Rhône	RCC	PBN5	11-PBN5-RCC	3,50		37 559	45 000	30 000	3 000	6 000 à 3000	87%	2 620
Le Rhône	R	VAU1	12-VAU1-R	3,50	1,07	33 593	70 000	30 000	1 000	2 000 à 1 000	83%	828
Le Rhône	R	PDR1	13-PDR1-R	3,50	1,07	67 483	80 000	65 000	1 000	10 000 à 1 000	84%	839
Dérivation de Péage de Roussillon	CU	PDR2	13-PDR2-CU		1,07				0	0		
Le Rhône	RCC	PDR3	13-PDR3-RCC	3,50		98 383	80 000	65 000	2 000	6 000 à 2 000	82%	1 646
Le Rhône	R	STV1	14-STV1-R	3,50	1,13	109 379	80 000	100 000	1 000	15 000 à 1 000	83%	834
Dérivation de Saint Vallier	CU	STV2	14-STV2-CU		1,13				0	0		
Le Rhône	RCC	STV3	14-STV3-RCC	3,50		109 379	80 000	100 000	2 000	2 000	82%	1 642
Le Rhône	RT	BLV1	15-BLV1-RT	3,50	1,18	109 379	18 000	100 000	10 000	10 000	85%	8 541
Le Doux	A	BLV2	15-BLV2-A	0,02	0,04	8 000	8 000	8 000	3 250	6 000		
Le Rhône	R	BLV3	15-BLV3-R	3,52	1,22	114 540	18 000	100 000	100	10 000 à 100	88%	88
Dérivation de Bourg les Valence	CU	BLV4	15-BLV4-CU		1,22				0	0		
L'Isère	A	BLV5	15-BLV5-A	4,50	1,80	50 000	50 000	50 000	0	0		
Dérivation de Bourg les Valence	CU	BLV6	15-BLV6-CU		3,02				0	0		
Le Rhône	RCC	BLV7	15-BLV7-RCC	3,52		114 540	80 000	100 000	200	200	77%	154
Le Rhône	RCC	BLV8	15-BLV8-RCC	8,02		114 540	80 000	200 000	3 000	3 000	76%	2 280
Le Rhône	R	BEA1	16-BEA1-R	8,02	3,02	196 581	80 000	200 000	20 000	20 000	82%	16 394
Le Rhône	RCC	BEA2	16-BEA2-RCC	8,02		196 581	180 000	200 000	3 000	10 000 à 3 000	67%	2 009
Dérivation de Beauchastel	CU	BEA3	16-BEA3-CU		3,02				0	0		
L'Eyreux	A	BEA4	16-BEA4-A	0,04	0,05	20 000	20 000	20 000	0	15 000		
Le Rhône	R	BLN1	17-BLN1-R	8,06	3,09	196 581	180 000	220 000	30 000	30 000	66%	19 916
La Drôme	A	BLN2	17-BLN2-A	0,20	0,20	40 000	40 000	40 000	0	20 000		
Le Rhône	R	BLN3	17-BLN3-R	8,26	3,29	261 026	180 000	250 000	6 000	6 000	67%	4 020
L'Ouvèze (Ardèche)	A	BLN4	17-BLN4-A	0,10	0,10	15 000	15 000	15 000	2 797	4 000		
Dérivation de Baix le Logis Neuf	CU	BLN5	17-BLN5-CU		3,39				0	0		
Le Rhône	RCC	BLN6	17-BLN6-RCC	8,36		493 643	105 000	250 000	15 000	15 000	82%	12 354
Le Rhône	R	MON1	18-MON1-R	8,36	3,39	336 738	105 000	300 000	2 000	25 000 à 2 000	89%	1 774
Dérivation de Montélimar	CU	MON2	18-MON2-CU		3,39				0	0		
Le Roublon	A	MON3	18-MON3-A	0,05	0,05	10 000	10 000	10 000	0	2 000		
Dérivation de Montélimar	CU	MON4	18-MON4-CU		3,45				0	0		
Le Rhône	RCC	MON5	18-MON5-RCC	8,41		476 186	90 000	300 000	10 000	20 000 à 10 000	80%	7 969
Le Rhône	R	DZM1	19-DZM1-R	8,60	3,45	476 186	90 000	350 000	3 000	30 000 à 3 000	64%	1 931
Dérivation de Donzère-Mondragon	CU	DZM2	19-DZM2-CU		3,45				0	0		
Le Rhône	RCC	DZM3	19-DZM3-RCC	8,60		292 105	140 000	350 000	30 000	30 000	74%	22 323
L'Ardèche	A	DZM4	19-DZM4-A	0,10	0,20	15 000	15 000	15 000	3 000	3 000		
Le Rhône	RCC	DZM5	19-DZM5-RCC	8,70		292 105	140 000	350 000	10 000	10 000	71%	7 132
Le Rhône	R	CAD1	20-CAD1-R	8,70	5,72	368 584	140 000	350 000	1 000	8 000 à 1 000	76%	758
Dérivation de Caderousse	CU	CAD2	20-CAD2-CU		5,72				0	0		
Le Rhône	RCC	CAD3	20-CAD3-RCC	8,70		552 448	19 000	350 000	2 000	2 000	80%	1 605
La Cèze	A	CAD4	20-CAD4-A	0,10	0,07	10 000	10 000	10 000	1 694	6 000		
L'Aigues	A	CAD5	20-CAD5-A	0,10	0,06	2 000	2 000	2 000	0	0		
Le Rhône	R	AVI1	21-AVI1-R	8,90	5,85	346 867	19 000	350 000	2 000	15 000 à 2 000	79%	1 584
Bras de Villeneuve	R	AVI2	21-AVI2-R	8,90	5,85	346 867	19 000	300 000	2 000	2 000		
Bras de Villeneuve	CU	AVI3	21-AVI3-CU		5,85				0	0		
Bras de Villeneuve	RCC	AVI4	21-AVI4-RCC	8,90			19 000	250 000	2 000	2 000		
Bras d'Avignon	RCC	AVI5	21-AVI5-RCC	8,90								

Annexe 3. Base de données des affluents

TH_EX_Name	Nom du TH exutoire
Gest_m3/an	Volume total géré à la confluence sur 1995-2018
Gest_G	Volume grossier géré à la confluence sur 1995-2018
Dest	Destination des volumes dragués (RH : Rhône, DE : gestion à terre, RHE : gestion mixte, ND : non déterminé)
Appo_granu	Granulométrie qualitative des apports
Appo_G_vol	Volume grossier apporté par l'affluent à l'approche de la confluence
ApG_eff	Volume grossier apporté par l'affluent directement au Rhône
ID_ssBV	Identifiant du bassin versant
CODE_ssBV	Code du bassin versant (assemblé pour les petits)
NOM_ssBV	Nom du bassin versant (absent pour les petits)
UHC_2_ssBV	Code UHC du bassin versant
SURF	Superficie de bassin versant en m²
SURF_BV_KM	Superficie de bassin versant en km²
gest/surf	Volume spécifique total géré à la confluence en m³/an/km²
Ap_G/surf	Volume spécifique grossier apporté à la confluence en m³/an/km²

CODE_HYDR O	CLAS SE	TOPONYME	CLASS E2	L	TYPE-AFF	OID	UHC	Nom_UHC	TH_EX_Nom	TH_EX_Code	TH_EX_Type	TH_EX_Nam e	Gest_m3/an	Gest_G	Dest	Appo_granu	Appo_G_vol	ApG_eff	ID_ssBV	CODE_ssBV	NOM_ssBV	UHC_2_ ssBV	SURF	SURF_BV_KM	gest/surf	Ap_G/surf									
V0--0200	1	L'Arve	-1	108129	AFF MAJEUR	1	SUI	#1-SUI	01-SUI3-A	SUI3	A	SUI3-A	10000	10000	RH	SG	20000	10000	61	01-SUI3-A	Arve	SUI	2013833927	2014	5,0	9,9									
V0400500	6	Nant d'Avanchet	-6	1387	MINEUR	1	SUI	#1-SUI	01-SUI4-R	SUI4	R	SUI4-R								59	SUI-RD1-PAFF		SUI	34377619	34										
V0400540	6	Nant d'Avril	-6	4032	MINEUR	1	SUI	#1-SUI	01-SUI4-R	SUI4	R	SUI4-R								59	SUI-RD1-PAFF		SUI	34377619	34										
V0400560	6	Le Châtelet	-6	1853	MINEUR	1	SUI	#1-SUI	01-SUI4-R	SUI4	R	SUI4-R								59	SUI-RD1-PAFF		SUI	34377619	34										
V0400580	6	Nant des Crues	-6	3012	MINEUR	2	CHP	#2-CHP	02-CHP1-R	CHP1	R	CHP1-R								121	CHP-RG1-PAFF	Ain	CHP	8902124	9										
V0410500	4	L'Allondon	-4	17934	PRINCIPAUX	2	CHP	#2-CHP	02-CHP1-R	CHP1	R	CHP1-R	0	0	0	SG	3000	3000	60	FRDR547B	Allondon	CHP	145237143	145	0,0	20,7									
V0420520	4	La Laire	-4	14303	PRINCIPAUX	2	CHP	#2-CHP	02-CHP2-RT	CHP2	T	CHP2-RT	0	0	0	SG	1000	1000	58	FRDR10451	La Laire	CHP	54242144	54	0,0	18,4									
V1000500	4	L'Annaz	-4	12985	PRINCIPAUX	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R	0	0	0	SG	500	500	8	FRDR10075	L'Annaz	GEN	50029657	50	0,0	10,0									
V1000501	6	Bras du Rhône Collonges	-6	1637	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								62	GEN-RD1-PAFF		GEN	29784231	30										
V1000580	5	Nant du Longet	-5	5665	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								122	GEN-RG1-PAFF		GEN	64389932	64										
V1000600	6	Ruisseau de Vosogne	-6	4738	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								122	GEN-RG1-PAFF		GEN	64389932	64										
V1000620	5	Ruisseau de Couvatannaz	-5	5200	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								122	GEN-RG1-PAFF		GEN	64389932	64										
V1000640	5	Le Parnant	-5	5227	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								122	GEN-RG1-PAFF		GEN	64389932	64										
V1001120	6	Ruisseau de l'Essert	-6	1796	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								122	GEN-RG1-PAFF		GEN	64389932	64										
V1001140	6	Ruisseau de la Couvire	-6	1785	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								122	GEN-RG1-PAFF		GEN	64389932	64										
V1001160	6	Ruisseau de Rochefort	-6	2303	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								62	GEN-RD1-PAFF		GEN	29784231	30										
V1001180	6	Ruisseau de Blanchet	-6	1548	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								62	GEN-RD1-PAFF		GEN	29784231	30										
V1001240	6	Ruisseau de Nambin	-6	2348	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								62	GEN-RD1-PAFF		GEN	29784231	30										
V1001260	7	Nant de Fiolaz	-7	2386	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								122	GEN-RG1-PAFF		GEN	64389932	64										
V1010500	3	La Valserine	-3	47596	PRINCIPAUX	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R	0	0	0	SG	1000	1000	22	FRDR545	La Valserine	GEN	360748507	361	0,0	2,8									
V1020500	6	Bief Manant	-6	4746	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								18	GEN-RD2-PAFF		GEN	85366407	85										
V1020520	6	Ruisseau de la Fulie	-6	3151	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								18	GEN-RD2-PAFF		GEN	85366407	85										
V1020540	6	Ruisseau du Poet	-6	3438	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								18	GEN-RD2-PAFF		GEN	85366407	85										
V1020560	6	Ruisseau de la Fontaine des i	-6	3788	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								18	GEN-RD2-PAFF		GEN	85366407	85										
V1020580	6	Ruisseau de la Morte	-6	2611	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								122	GEN-RG1-PAFF		GEN	64389932	64										
V1020600	6	Ruisseau de Cally	-6	2793	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								122	GEN-RG1-PAFF		GEN	64389932	64										
V1021000	6	Ruisseau de Balavent	-6	2880	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								122	GEN-RG1-PAFF		GEN	64389932	64										
V1021020	6	Le Grand Nant	-6	1896	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								122	GEN-RG1-PAFF		GEN	64389932	64										
V1021040	6	Ruisseau du Parc	-6	1652	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN1-R	GEN1	R	GEN1-R								122	GEN-RG1-PAFF		GEN	64389932	64										
V1020620	6	Ruisseau du Monard	-6	3621	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN2-RT	GEN2	T	GEN2-RT								18	GEN-RD2-PAFF		GEN	85366407	85										
V1020640	6	Ruisseau de Brentin	-6	3786	MINEUR	3	GEN	#3-GEN	03-GEN2-RT	GEN2	T	GEN2-RT								18	GEN-RD2-PAFF		GEN	85366407	85										
V---0000	1	Le Rhône	-1	544933	RHONE																														
V1020660	6	Ruisseau de Baud	-6	2487	MINEUR	4	SEY	#4-SEY	04-SEY1-R	SEY1	R	SEY1-R								63	SEY-RG1-PAFF		SEY	9251605	9										
V1020680	5	la Vézéronce	-5	7030	MINEUR	4	SEY	#4-SEY	04-SEY1-R	SEY1	R	SEY1-R								123	SEY-RD1-PAFF	AIN	SEY	63538869	64			0,8	1,6						
V1020700	5	La Dorches	-5	7262	MINEUR	4	SEY	#4-SEY	04-SEY1-R	SEY1	R	SEY1-R								200	80	RH		200	120			123	SEY-RD1-PAFF	AIN	SEY	63538869	64	3,1	3,1
V1020720	6	Combe	-6	6042	MINEUR	4	SEY	#4-SEY	04-SEY1-R	SEY1	R	SEY1-R								123	SEY-RD1-PAFF	AIN	SEY	63538869	64										
V1021120	6	Ruisseau Biez de Blune des L	-6	3325	MINEUR	4	SEY	#4-SEY	04-SEY1-R	SEY1	R	SEY1-R	150	0	RH		100	100	123	SEY-RD1-PAFF	AIN	SEY	63538869	64	2,4	1,6									
V1021140	6	Le Nant Troublé	-6	1583	MINEUR	4	SEY	#4-SEY	04-SEY1-R	SEY1	R	SEY1-R								123	SEY-RD1-PAFF	AIN	SEY	63538869	64										
V1021160	6	Ruisseau du Pissieu	-6	1766	MINEUR	4	SEY	#4-SEY	04-SEY1-R	SEY1	R	SEY1-R								63	SEY-RG1-PAFF		SEY	9251605	9										
V1021180	6	Bief des Pochettes du Rhône	-6	1193	MINEUR	4	SEY	#4-SEY	04-SEY1-R	SEY1	R	SEY1-R								123	SEY-RD1-PAFF	AIN	SEY	63538869	64										
V1021240	6	Ruisseau de Peyssieux	-6	2413	MINEUR	4	SEY	#4-SEY	04-SEY1-R	SEY1	R	SEY1-R								123	SEY-RD1-PAFF	AIN	SEY	63538869	64										
V11-0400	3	Les Ussets	-3	46120	AFF MAJEUR	4	SEY	#4-SEY	04-SEY2-A	SEY2	A	SEY2-A	8325	3554	RH	LG	4000	446	47	04-SEY2-A	Les Ussets	SEY	308859871	309	27,0	13,0									
V1130520	6	Ruisseau de Volage	-6	2727	MINEUR	4	SEY	#4-SEY	04-SEY3-RT	SEY3	T	SEY3-RT								123	SEY-RD1-PAFF	AIN	SEY	63538869	64										
V1130540	6	Ruisseau de Fontaine	-6	2705	MINEUR	4	SEY	#4-SEY	04-SEY3-RT	SEY3	T	SEY3-RT								123	SEY-RD1-PAFF	AIN	SEY	63538869	64										
V1130560	6	Ruisseau de Saint-Nicolas	-6	2938	MINEUR	5	CHA	#5-CHA	05-CHA1-R	CHA1	R	CHA1-R								64	CHA-RD1-PAFF		CHA	5821083	6										
V12-0400	1	Le Fier	-1	72164	AFF MAJEUR	5	CHA	#5-CHA	05-CHA2-A	CHA2	A	CHA2-A	11200	0	RH	LS	0	0	126	05-CHA2-A	Le Fier	CHA	1376377812	1376	8,1	0,0									
V1261260	6	Ruisseau de Brive	-6	1760	MINEUR	5	CHA	#5-CHA	05-CHA3-R	CHA3	R	CHA3-R								66	CHA-RD1-PAFF		CHA	1273333	1										
V1261280	6	Ruisseau de Rhémoz	-6	2203	SECONDAIRE	5	CHA	#5-CHA	05-CHA5-RCC	CHA5	C	CHA5-RCC								5	0	DE		0	0	125	CHAU-RD2-SECONDAIRE	Le Rhémoz	CHA	2442407	2	2,0	0,0		
V1265002	5		-5	9242	CANAUX	5	CHA	#5-CHA	05-CHA5-RCC	CHA5	C	CHA5-RCC																							
V14-0400	6	Le Séran	-3	41802	PRINCIPAUX	6	BEL	#6-BEL	06-BEL2-CU	BEL2	U	BEL2-CU	180	0	RH	LS	0	0	129	FRDR522B	Le Séran	BEL	290261174	290	0,6	0,0									
V1460540		Ousson		8220	SECONDAIRE	6	BEL	#6-BEL	06-BEL2-CU	BEL2	U	BEL2-CU	20	10	ND		10		119	FRDR11415	L'Ousson	BEL	18123203	18	1,1	0,0									
V1470540	6	Ruisseau des Avres	-6	3155	MINEUR	6	BEL	#6-BEL	06-BEL2-CU	BEL2	U	BEL2-CU								11	BRC-RG1-PAFF		BRC	44063413	44										
V1--0210	6	Lône du Rhône	-6	3430	MINEUR	6	BEL	#6-BEL	06-BEL3-RCC	BEL3	C	BEL3-RCC																							
V1330501	6	Bras de Barrage de Savières	-6	1422	CANAUX	6	BEL	#6-BEL	06-BEL3-RCC	BEL3	C	BEL3-RCC																							
V1335002	1	Canal de Savières	-1	4663	CANAUX	6	BEL	#6-BEL	06-BEL3-RCC	BEL3	C	BEL3-RCC																							
V1431200	6	Risseau	-6	3322	MINEUR	6	BEL	#6-BEL	06-BEL3-RCC	BEL3	C	BEL3-RCC								127	FRDR525	Chautagne-Savièr	BEL	608483383	608										
V1440501	6	Lône du Rhône Meline	-6	3214	LONE	6	BEL	#6-BEL	06-BEL3-RCC	BEL3	C	BEL3-RCC								118	BEL-RG2-PAFF		BEL	30256456	30										
V1440520	5	La Méline	-5	12693	SECONDAIRE	6	BEL	#6-BEL	06-BEL3-RCC	BEL3	C	BEL3-RCC								118	BEL-RG2-PAFF		BEL	30256456	30										
V1440520	5	La Méline	-5	12693	SECONDAIRE	6	BEL	#6-BEL	06-BEL3-RCC	BEL3	C	BEL3-RCC								1500	0	ND						117	FRDR11746	La Méline	BEL	33056711	33	45,4	0,0
V1440620	4	Le Flon	-4	14906	PRINCIPAUX	6	BEL	#6-BEL	06-BEL3-RCC	BEL3	C	BEL3-RCC	1000	200	ND	G	200	0	116	FRDR521	Le Flon	BEL	67589740	68	14,8										
V1--3002	4		-4	15090	CANAUX	7	BRC	#7-BRC	07-BRC1-R	BRC1	R	BRC1-R						</																	

► Etude préalable à la réalisation du schéma directeur de gestion sédimentaire du Rhône – Rapport de Mission 2 – Synthèse du fonctionnement hydrosédimentaire

V1610620	5	Ruisseau de Reynieu	-5	7100	MINEUR	8	SAB	#8-SAB	08-SAB1-RT	SAB1	T	SAB1-RT							67	BRC-RG2-PAFF	AIN	BRC	9084681	9			
V1620500	5	La Chogne	-5	5651	MINEUR	8	SAB	#8-SAB	08-SAB1-RT	SAB1	T	SAB1-RT							107	SAB-RG1-PAFF		SAB	64965154	65			
V1620520	4	La Brive	-4	12736	PRINCIPAUX	8	SAB	#8-SAB	08-SAB1-RT	SAB1	T	SAB1-RT	0	0	ND	SG	100	0	108	FRDR11027	La Brive	SAB	46779543	47	0,0	2,1	
V1620620	5	La Pernaz	-5	9963	SECONDAIRE	8	SAB	#8-SAB	08-SAB1-RT	SAB1	T	SAB1-RT	15	0	ND	LSG	100	0	69	FRDR511	La Pernaz	SAB	38418100	38	0,4	0,0	
V1621000	6	Ruisseau du Vert	-6	3770	MINEUR	8	SAB	#8-SAB	08-SAB1-RT	SAB1	T	SAB1-RT							107	SAB-RG1-PAFF		SAB	64965154	65			
V1621100	5	Ruisseau du Moulin	-5	5384	MINEUR	8	SAB	#8-SAB	08-SAB1-RT	SAB1	T	SAB1-RT							109	SAB-RD1-PAFF		SAB	24998831	25			
V16-0401	6	Bras du Fouron au Rhône	-6	1470	LONE	8	SAB	#8-SAB	08-SAB2-R	SAB2	R	SAB2-R															
V1630500	4	Le Furon	-4	10511	PRINCIPAUX	8	SAB	#8-SAB	08-SAB2-R	SAB2	R	SAB2-R	0	0	0	LS	0	0	68	FRDR11738	Le Fouron	SAB	52157323	52	0,0	0,0	
V1630540	5	Le Rhéby	-5	7716	MINEUR	8	SAB	#8-SAB	08-SAB2-R	SAB2	R	SAB2-R							132	SAB-RG6-SSAFF		SAB	12141888	12			
V1631000	6	Ruisseau des Marais	-6	1910	MINEUR	8	SAB	#8-SAB	08-SAB2-R	SAB2	R	SAB2-R							132	SAB-RG6-SSAFF		SAB	12141888	12			
V1630560	6	Le Nérivent	-6	4128	MINEUR	8	SAB	#8-SAB	08-SAB4-RCC	SAB4	C	SAB4-RCC							132	SAB-RG6-SSAFF		SAB	12141888	12			
V1635002	6		-6	2151	CANAUX	8	SAB	#8-SAB	08-SAB5-RT	SAB5	T	SAB5-RT															
V1630580	6	Ruisseau des Tournes	-6	1829	MINEUR	9	VUL	#9-VUL	09-VUL1-RT	VUL1	T	VUL1-RT							71	VUL-RD1-PAFF		VUL	52795034	53			
V1630600	6	Ruisseau de Bénétan	-6	1618	MINEUR	9	VUL	#9-VUL	09-VUL1-RT	VUL1	T	VUL1-RT							70	VUL-RG1-PAFF		VUL	158515082	159			
V1631040	6	Ruisseau de Compierre	-6	1578	MINEUR	9	VUL	#9-VUL	09-VUL1-RT	VUL1	T	VUL1-RT							71	VUL-RD1-PAFF		VUL	52795034	53			
V1631060	6	Ruisseau du Moulin	-6	4033	MINEUR	9	VUL	#9-VUL	09-VUL1-RT	VUL1	T	VUL1-RT							71	VUL-RD1-PAFF		VUL	52795034	53			
V1631080	6	Ruisseau de Blié	-6	1741	MINEUR	9	VUL	#9-VUL	09-VUL1-RT	VUL1	T	VUL1-RT							70	VUL-RG1-PAFF		VUL	158515082	159			
V1631100	6	Le Rioux	-6	1716	MINEUR	9	VUL	#9-VUL	09-VUL1-RT	VUL1	T	VUL1-RT							71	VUL-RD1-PAFF		VUL	52795034	53			
V1631120	6	Ruisseau de Sainte-Colombe	-6	2509	MINEUR	9	VUL	#9-VUL	09-VUL1-RT	VUL1	T	VUL1-RT							70	VUL-RG1-PAFF		VUL	158515082	159			
V1631140	7	Ruisseau de Laye	-7	2990	MINEUR	9	VUL	#9-VUL	09-VUL1-RT	VUL1	T	VUL1-RT							70	VUL-RG1-PAFF		VUL	158515082	159			
V1640500	5	Ruisseau d'Amby	-5	7564	MINEUR	9	VUL	#9-VUL	09-VUL1-RT	VUL1	T	VUL1-RT							70	VUL-RG1-PAFF		VUL	158515082	159			
V1640540	4	Le Girondan	-4	7675	MINEUR	9	VUL	#9-VUL	09-VUL1-RT	VUL1	T	VUL1-RT							70	VUL-RG1-PAFF		VUL	158515082	159			
V1640560	5	La Girine	-5	7306	MINEUR	9	VUL	#9-VUL	09-VUL1-RT	VUL1	T	VUL1-RT							70	VUL-RG1-PAFF		VUL	158515082	159			
V17-0400	2	La Bourbre	-2	72307	PRINCIPAUX	9	VUL	#9-VUL	09-VUL1-RT	VUL1	T	VUL1-RT	0	0	0	LSG	200	200	51	FRDR506C	La Bourbre	VUL	724932680	725	0,0	0,3	
V2--0200	1	L'Ain	-1	189890	AFF MAJEUR	10	ALY	#10-ALY	10-ALY2-A	ALY2	A	ALY2-A	0	0	0	SG	35000	35000	136	10-ALY2-A	L'Ain	ALY	-535547421	3759	0,0	9,3	
V3000501	6	Le Vieux Rhône	-6	4714	RHONE	10	ALY	#10-ALY	10-ALY4-CU	ALY4	U	ALY4-CU															
V3005022	4	Canal de Jonage	-4	20953	CANAUX	10	ALY	#10-ALY	10-ALY4-CU	ALY4	U	ALY4-CU															
V---0000	1	Canal de Miribel	-1	4714	RHONE	10	ALY	#10-ALY	10-ALY5-RCC	ALY5	C	ALY5-RCC															
V3000500	4	Le Cotey	-4	17607	PRINCIPAUX	10	ALY	#10-ALY	10-ALY5-RCC	ALY5	C	ALY5-RCC	0	0	0		0	0	133	FRDR12109	Le Cotey	ALY	137453641	137	0,0	0,0	
V3000560	4	La Sereine	-4	24838	PRINCIPAUX	10	ALY	#10-ALY	10-ALY5-RCC	ALY5	C	ALY5-RCC	0	0	0		0	0	134	FRDR10576	La Sereine	ALY	105452555	105	0,0	0,0	
U---0000	1	La Saône	-1	473334	AFF MAJEUR	11	PBN	#11-PBN	11-PBN3-R	PBN3	R	PBN3-R	0	0	0	L	0	0	45	11-PBN2-A	La Saône	PBN	29391734743	29392	0,0	0,0	
V3010500	3	L'Yzeron	-3	25136	PRINCIPAUX	11	PBN	#11-PBN	11-PBN3-R	PBN3	R	PBN3-R	4200	250	RHE	LSG	250	0	13	FRDR482B	L'Yseron	PBN	141768798	142	29,6	1,8	
V30-4002	4	Le Rhône	-4	11836	CANAUX	11	PBN	#11-PBN	11-PBN3-R	PBN3	R	PBN3-R															
V3021000	6	Ruisseau de Vernières	-6	3122	MINEUR	11	PBN	#11-PBN	11-PBN5-RCC	PBN5	C	PBN5-RCC							10	PBN-RD1-PAFF	AIN		30275895	30			
V3030500	3	Le Garon	-3	31144	PRINCIPAUX	12	VAU	#12-VAU	12-VAU1-R	VAU1	R	VAU1-R	500	100	RH	SG	500	400	30	FRDR479C	Le Giers	VAU	212797564	213	2,3	2,3	
V31-0400	2	Le Gier	-2	40406	PRINCIPAUX	12	VAU	#12-VAU	12-VAU1-R	VAU1	R	VAU1-R	3000	1500	RH	SG	2000	500	50	FRDR474	Le Gier	VAU	414272844	414	7,2	4,8	
V3130520	5	Ruisseau du Morin	-5	6770	MINEUR	12	VAU	#12-VAU	12-VAU1-R	VAU1	R	VAU1-R							167	VAU-RD1-PPAFF		VAU	34595639	35			
V3130540	6	Ruisseau de Gorneton	-6	4344	MINEUR	12	VAU	#12-VAU	12-VAU1-R	VAU1	R	VAU1-R							139	VAU-RG2-PPAFF		VAU	17890199	18			
V3130560	6	Ruisseau du Sifflet	-6	4919	MINEUR	12	VAU	#12-VAU	12-VAU1-R	VAU1	R	VAU1-R							167	VAU-RD1-PPAFF		VAU	34595639	35			
V3130580	4	La Sévenne	-4	21797	PRINCIPAUX	12	VAU	#12-VAU	12-VAU1-R	VAU1	R	VAU1-R	2100	300	RH	LS	300	0	56	FRDR2017	La Sévenne	VAU	70939580	71	29,6	4,2	
V3131000	6	Ruisseau de Bans	-6	2674	MINEUR	12	VAU	#12-VAU	12-VAU1-R	VAU1	R	VAU1-R							167	VAU-RD1-PPAFF		VAU	34595639	35			
V3131040	6	Ruisseau du Seigna	-6	1992	MINEUR	12	VAU	#12-																			

► Etude préalable à la réalisation du schéma directeur de gestion sédimentaire du Rhône – Rapport de Mission 2 – Synthèse du fonctionnement hydrosédimentaire

V3441000	6 Ruisseau de Pégoul	-6	3107 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV1-R	STV1	R	STV1-R							27 STV-RD1-PPAFF		STV	11526853	12		0,0
V3450500	4 Le Bancel	-4	22117 PRINCIPAUX	14 STV	#14-STV	14-STV1-R	STV1	R	STV1-R	3400	1000	RHE	LSG	1000	0	83 FRDR11721	Le Bancel	STV	65350083	65	52,0	15,3
V3450560	5 Ruisseau de Torrenson	-5	9648 SECONDAIRE	14 STV	#14-STV	14-STV1-R	STV1	R	STV1-R	700	300	RHE		300	0	24 FRDR1357	Ruisseau du Torre	STV	14380572	14	48,7	20,9
V3450580	6 La Blache-Belle	-6	4014 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV1-R	STV1	R	STV1-R							99 STV-RG2-PPAFF		STV	20232171	20		
V3451100	6 Ruisseau de Cueil	-6	2190 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV1-R	STV1	R	STV1-R							82 STV-RD2-PPAFF		STV	4314840	4		
V3451200	6 Ruisseau des Traverses	-6	2140 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV1-R	STV1	R	STV1-R							82 STV-RD2-PPAFF		STV	4314840	4		
V35-0400	3 La Cance	-3	41307 PRINCIPAUX	14 STV	#14-STV	14-STV1-R	STV1	R	STV1-R	6000	4000	RHE	LSG	5000	1000	55 FRDR460	La Cance	STV	379825494	380	15,8	13,2
V3530500	3 L'Ay	-3	31764 PRINCIPAUX	14 STV	#14-STV	14-STV1-R	STV1	R	STV1-R	2500	500	RH	LSG	500	0	26 FRDR459	L'Ay	STV	115444084	115	21,7	4,3
V3530740	6 Ruisseau de Sarras	-6	4305 SECONDAIRE	14 STV	#14-STV	14-STV1-R	STV1	R	STV1-R	50	50	DE		50	0	84 STV-RD3-SECONDAIRE	Le Ruisseau de Sai	STV	3453089	3	14,5	14,5
V36-0400	2 La Galaure	-2	56176 PRINCIPAUX	14 STV	#14-STV	14-STV1-R	STV1	R	STV1-R	13000	4200	RHE	LSG	6000	1800	87 FRDR457	La Galaure	STV	238102422	238	54,6	25,2
V3620500	5 Ruisseau de Riverolles	-5	5586 SECONDAIRE	14 STV	#14-STV	14-STV1-R	STV1	R	STV1-R	1200	500	RH		500	0	86 FRDR11786	Ruisseau de Riverolles		14032604	14	85,5	35,6
V3621000	6 Ruisseau de Ponchon	-6	1039 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV1-R	STV1	R	STV1-R							16 STV-RD4-PPAFF		STV	11494127	11		
V3621020	6 Ruisseau de Denis	-6	1835 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV1-R	STV1	R	STV1-R	60	0	DE		0	0	16 STV-RD4-PPAFF		STV	11494127	11	5,2	0,0
V3621040	6 Ruisseau de Limelande	-6	4223 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV1-R	STV1	R	STV1-R							16 STV-RD4-PPAFF		STV	11494127	11		
V3621060	6 Ruisseau de Combs	-6	1241 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV1-R	STV1	R	STV1-R							85 STV-RG3-PPAFF		STV	15276865	15		
V3620620	6 Ruisseau de la Rionne	-6	3537 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV2-CU	STV2	U	STV2-CU							85 STV-RG3-PPAFF		STV	15276865	15		
V3620680	6 Ruisseau de Pévin	-6	3817 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV2-CU	STV2	U	STV2-CU							85 STV-RG3-PPAFF		STV	15276865	15		
V3620540	4 Ruisseau d'Ozon	-4	16730 PRINCIPAUX	14 STV	#14-STV	14-STV3-RCC	STV3	C	STV3-RCC	20	20	DE	SG	100	80	98 FRDR1348	Ruisseau de l'Ozon	STV	33974754	34	0,6	2,9
V3620600	6 Ruisseau de Pizon	-6	2937 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV3-RCC	STV3	C	STV3-RCC							97 STV-RD5- PPAFF		STV	4082943	4		
V3620640	5 Ruisseau de Mazévieux	-5	6793 SECONDAIRE	14 STV	#14-STV	14-STV3-RCC	STV3	C	STV3-RCC	50	0	ND		0	0	95 STV-RD6-SECONDAIRE	Ruisseau de Mazévieux		8094683	8	6,2	ND
V3620660	6 Ruisseau de Gaizard	-6	2406 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV3-RCC	STV3	C	STV3-RCC							96 STV-RD7-PPAFF		STV	8152818	8		
V3620700	5 Ruisseau des Perrets	-5	5849 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV3-RCC	STV3	C	STV3-RCC							96 STV-RD7-PPAFF		STV	8152818	8		
V3621300	6 Ruisseau des Marettes	-6	1302 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV3-RCC	STV3	C	STV3-RCC							97 STV-RD5- PPAFF		STV	4082943	4		
V3621320	6 Ruisseau de Berthollet	-6	1358 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV3-RCC	STV3	C	STV3-RCC							97 STV-RD5- PPAFF		STV	4082943	4		
V3621360	6 Ruisseau de Merdan	-6	2781 MINEUR	14 STV	#14-STV	14-STV3-RCC	STV3	C	STV3-RCC							96 STV-RD7-PPAFF		STV	8152818	8		
V3620720	5 Ruisseau de Tuilière	-5	6481 MINEUR	15 BLV	#15-BLV	15-BLV1-RT	BLV1	T	BLV1-RT							140 BLV-RD1-PPAFF		BLV	10244737	10		
V3620740	5 Ruisseau de Crozes Hermitage	-5	5321 SECONDAIRE	15 BLV	#15-BLV	15-BLV1-RT	BLV1	T	BLV1-RT	50	50	DE		50	0	17 BLV-RG1-SECONDAIRE	Ruisseau de Croze	BLV	7213227	7	6,9	6,9
V3625002	6	-6	4582 CANAUX	15 BLV	#15-BLV	15-BLV1-RT	BLV1	T	BLV1-RT													
V37-0400	2 Le Doux	-2	69760 AFF MAJEUR	15 BLV	#15-BLV	15-BLV3-R	BLV3	R	BLV3-R	5700	2750	RH	SG	6000	3250	35 15-BLV2-A	AIN		630650534	631	9,0	9,5
V3750500	5 Ruisseau du Torras	-5	7529 MINEUR	15 BLV	#15-BLV	15-BLV3-R	BLV3	R	BLV3-R							21 FRDR1343	Ruisseau de la Bo	BLV	51530521	52		
V3750520	4 Ruisseau de la Bouterne	-4	11085 PRINCIPAUX	15 BLV	#15-BLV	15-BLV3-R	BLV3	R	BLV3-R	10	10	RH	S	100	90	21 FRDR1343	Ruisseau de la Bo	BLV	51530521	52	0,2	1,9
V3750560	6 Ruisseau de Chalaix	-6	2520 MINEUR	15 BLV	#15-BLV	15-BLV3-R	BLV3	R	BLV3-R							20 BLV-RD2-PPAFF		BLV	23606002	24		
V3750600	5 Ruisseau des Aurets	-5	6965 MINEUR	15 BLV	#15-BLV	15-BLV3-R	BLV3	R	BLV3-R							20 BLV-RD2-PPAFF		BLV	23606002	24		
V3751000	6 Ruisseau de Greysard	-6	1191 MINEUR	15 BLV	#15-BLV	15-BLV3-R	BLV3	R	BLV3-R							20 BLV-RD2-PPAFF		BLV	23606002	24		
CONTRE C	Le Rhône		7517 CONTRE CANAL	15 BLV	#15-BLV	15-BLV4-CU	BLV4	U	BLV4-CU													
V4010500	3 La Barberolle	-3	30028 PRINCIPAUX	15 BLV	#15-BLV	15-BLV6-CU	BLV6	U	BLV6-CU	0	0	0	LS	0	0	159 FRDR10394	La Barberolle	BLV	56058313	56	0,0	0,0
V3750640	5 Ruisseau de Rioudard	-5	7042 SECONDAIRE	15 BLV	#15-BLV	15-BLV7-RCC	BLV7	C	BLV7-RCC	90	0	RH		0	0	94 BLV-RD3-SECONDAIRE	Ruisseau de Rioud	BLV	7615367	8	11,8	0,0
V3750660	6 Ruisseau de la Verne	-6	2482 MINEUR	15 BLV	#15-BLV	15-BLV7-RCC	BLV7	C	BLV7-RCC							141 BLV-RD3-PPAFF		BLV	23711445	24		
V3751040	6 Ruisseau de Durtail	-6	3002 MINEUR	15 BLV	#15-BLV	15-BLV7-RCC	BLV7	C	BLV7-RCC							141 BLV-RD3-PPAFF		BLV	23711445	24		
W---0000	1 L'Isère	-1	286373 AFF MAJEUR	15 BLV	#15-BLV	15-BLV7-RCC	BLV7	C	BLV7-RCC	25000	0	RH	LSG	0	0	39 15-BLV5-A	L'Isère	BLV	11876122884	11876	2,1	0,0
V4000500	6 Ravin de Sauman	-6	4101 MINEUR	15 BLV	#15-BLV	15-BLV8-RCC	BLV8	C	BLV8-RCC							141 BLV-RD3-PPAFF		BLV	23711445	24		
V4000520	4 Le Mialan	-4	19844 PRINCIPAUX	15 BLV	#15-BLV	15-BLV8-RCC	BLV8	C	BLV8-RCC	2300	1700	RH	SG	1800	100	89 FRDR12062	Le Mialan	BLV	58048574	58	39,6	31,0
V4001040	6 Ruisseau de la Goule	-6	3704 MINEUR	15 BLV	#15-BLV	15-BLV8-RCC	BLV8	C	BLV8-RCC							141 BLV-RD3-PPAFF		BLV	23711445	24		
V4011060	6 L'Epervière	-6	2567 MINEUR	16 BEA	#16-BEA	16-BEA1-R	BEA1	R	BEA1-R							166 BEA-RG1-PPAFF		BEA	46869387	47		
V40-0400	3 La Véore																					

► Etude préalable à la réalisation du schéma directeur de gestion sédimentaire du Rhône – Rapport de Mission 2 – Synthèse du fonctionnement hydrosédimentaire

V45-0400	4	L'Escoutay	-4	22775	PRINCIPAUX	18	MON	#18-MON	18-MON5-RCC	MON5	C	MON5-RCC	2500	2500	ND	SG	5000	2500	90	FRDR427	L'escoutay	MON	169427157	169	14,8	29,5	
V4520501	7	Bras du Rhône	-7	1935	MINEUR	18	MON	#18-MON	18-MON5-RCC	MON5	C	MON5-RCC								147	MON-RD3-PPAFF	MON	12299750	12			
V4521020	6	Ruisseau de la Plaine de Cha	-6	2859	MINEUR	18	MON	#18-MON	18-MON5-RCC	MON5	C	MON5-RCC								147	MON-RD3-PPAFF	MON	12299750	12			
V---2002	1		-1	29081	CANAU	19	DZM	#19-DZM	19-DZM2-CU	DZM2	U	DZM2-CU															
V45-0430	3	La Berre		28245	SECONDAIRE	19	DZM	#19-DZM	19-DZM2-CU	DZM2	U	DZM2-CU	500	0	DE	L	0	0	105	FRDR422	La Berre	DZM	185406073	185	2,7	0,0	
V52-0400	2	Le Lez	-2	74243	PRINCIPAUX	19	DZM	#19-DZM	19-DZM2-CU	DZM2	U	DZM2-CU	21	0	ND	L	0	0	54	FRDR406A	Le Lez	DZM	471596541	472	0,0	0,0	
V4530520	4	La Conche	-4	16669	PRINCIPAUX	19	DZM	#19-DZM	19-DZM3-RCC	DZM3	C	DZM3-RCC	0	0	0	L	500	500	148	FRDR10065A	La Conche	DZM	84256364	84	0,0	5,9	
V4531080	6	Lône de Lascombe	-6	1819	MINEUR	19	DZM	#19-DZM	19-DZM3-RCC	DZM3	C	DZM3-RCC								149	DZM-RG1-PPAFF	DZM	12770025	13			
V4531220	7	Ruisseau de la petite montag	-7	6536	MINEUR	19	DZM	#19-DZM	19-DZM3-RCC	DZM3	C	DZM3-RCC								148	FRDR10065A	La Conche		84256364	84		
V4570500	5	Ruisseau de Tourne	-5	6143	MINEUR	19	DZM	#19-DZM	19-DZM3-RCC	DZM3	C	DZM3-RCC								19	DZM-RD2-PPAFF	DZM	57744962	58			
V4570520	5	Ruisseau de Souchas	-5	6689	MINEUR	19	DZM	#19-DZM	19-DZM3-RCC	DZM3	C	DZM3-RCC								19	DZM-RD2-PPAFF	DZM	57744962	58			
V4570540	6	Fossé de Tave	-6	4858	MINEUR	19	DZM	#19-DZM	19-DZM3-RCC	DZM3	C	DZM3-RCC								168	FRDR10971	La Petite Berre	DZM	28888419	29		
V4570560	4	La Petite Berre	-4	12477	PRINCIPAUX	19	DZM	#19-DZM	19-DZM3-RCC	DZM3	C	DZM3-RCC								168	FRDR10971	La Petite Berre	DZM	28888419	29		
V4571000	6		-6	1878	MINEUR	19	DZM	#19-DZM	19-DZM3-RCC	DZM3	C	DZM3-RCC								19	DZM-RD2-PPAFF	DZM	57744962	58			
V4571020	6	Ruisseau du Lauzas	-6	4056	MINEUR	19	DZM	#19-DZM	19-DZM3-RCC	DZM3	C	DZM3-RCC								19	DZM-RD2-PPAFF	DZM	57744962	58			
V4571040	6	Ruisseau de Pontpierre	-6	2878	MINEUR	19	DZM	#19-DZM	19-DZM3-RCC	DZM3	C	DZM3-RCC								19	DZM-RD2-PPAFF	DZM	57744962	58			
V50-0400	1	L'Ardèche	-1	125079	AFF MAJEUR	19	DZM	#19-DZM	19-DZM4-A	DZM4	A	DZM4-A	0	0	0	SG	3000	3000	41	19-DZM4-A	L'Ardèche	DZM	-1919289248	2376	0,0	1,3	
V51-0400	4	Le Lauzon	-4	15064	PRINCIPAUX	19	DZM	#19-DZM	19-DZM5-RCC	DZM5	C	DZM5-RCC								160	FRDR409	Le Lauzon	DZM	184192615	184		
V5130500	4	L'Arnave	-4	11974	PRINCIPAUX	19	DZM	#19-DZM	19-DZM5-RCC	DZM5	C	DZM5-RCC	0	0	0	LS	0	0	7	FRDR10482	L'Arnave	DZM	35687968	36	0,0	0,0	
V5350700	4	Le Rieu	-4	15825	PRINCIPAUX	20	CAD	#20-CAD	20-CAD1-R	CAD1	R	CAD1-R	0	0	0	L	0	0	91	FRDR10478	Le Rieu	CAD	65447038	65	0,0	0,0	
V53-0400	1	L'Aigues	-1	113743	AFF MAJEUR	20	CAD	#20-CAD	20-CAD2-CU	CAD2	U	CAD2-CU	6500	417	ND	L	0	0	44	20-CAD5-A	L'Aigue	CAD	1023311434	1023	6,4	0,0	
V5480500	4	Le Nizon	-4	11370	PRINCIPAUX	20	CAD	#20-CAD	20-CAD3-RCC	CAD2	C	CAD3-RCC	0	0	0	LS	0	0	152	FRDR10221	Le Nizon		39830504	40	0,0	0,0	
V5485002	5		-5	5607	CANAU	20	CAD	#20-CAD	20-CAD2-CU	CAD2	U	CAD2-CU															
V54-0400	1	La Cèze	-1	128309	AFF MAJEUR	20	CAD	#20-CAD	20-CAD4-A	CAD4	A	CAD4-A	9500	4306	RH	LSG	6000	1694	43	20-CAD4-A	La Cèze	CAD	1362320591	1362	7,0	4,4	
V5480560	4	La Meyne		14961	PRINCIPAUX	21	AVI	#21-AVI	21-AVI1-R	AVI1	R	AVI1-R	0	0	0	L	0	0	34	FRDR1251	La Meyne	AVI	138403475	138	0,0	0,0	
V6210501	4	Bras de Villeneuve	-4	10400	RHONE	21	AVI	#21-AVI	21-AVI3-CU	AVI3	U	AVI3-CU															
V6215002	6	Dérivation d'Avignon		3151	CANAU	21	AVI	#21-AVI	21-AVI3-CU	AVI3	U	AVI3-CU															
V5480501	7			11094	CONTRE CANAL	21	AVI	#21-AVI	21-AVI5-RCC	AVI5	C	AVI5-RCC															
V6--0200	2	L'Ouvèze 84	-2	93482	AFF MAJEUR	21	AVI	#21-AVI	21-AVI7-RCC	AVI7	C	AVI7-RCC	0	0	0	L	0	0	48	21-AVI6-A	L'Ouvèze 84	AVI	1923095211	1923	0,0	0,0	
V7000510	6	La Roubine	-6	9224	MINEUR	22	VAL	#22-VAL	22-VAL1-R	VAL1	R	VAL1-R								29	VAL-RG1-PPAFF	VAL	46752444	47			
V7000520	6	La Brassière	-6	4583	MINEUR	22	VAL	#22-VAL	22-VAL1-R	VAL1	R	VAL1-R								93	FRDR10877	La Brassière		50190211	50		
V7001020	5	Gaudre de Boulbon	-5	5013	MINEUR	22	VAL	#22-VAL	22-VAL1-R	VAL1	R	VAL1-R								29	VAL-RG1-PPAFF	VAL	46752444	47			
X---0000	1	La Durance	-1	320986	AFF MAJEUR	22	VAL	#22-VAL	22-VAL2-A	VAL2	A	VAL2-A	55946	5954	RH	LSG	6000	0	40	22-VAL2-A	La Durance	VAL	14335952050	14336	3,9	0,4	
V71-0400	1	Le Gardon	-1	127599	AFF MAJEUR	22	VAL	#22-VAL	22-VAL3-RCC	VAL3	C	VAL3-RCC	8400	2021	RH	LS	0	0	42	22-VAL4-A	Le Gard	VAL	1999841254	2000	4,2	0,0	
1462	4	Canal d'Irrigation de Remoul	-4	18043	CANAU	22	VAL	#22-VAL	22-VAL4-A	VAL4	A	VAL4-A								42	22-VAL4-A	Le Gard	VAL	1999841254	2000		
V7000540	4	Le Briançon		14752	SECONDAIRE	22	VAL	#22-VAL	22-VAL4-A	VAL4	A	VAL4-A	500	0	RH		0	0	92	FRDR10301	Le Brianion	VAL	34909140	35	14,3	0,0	
V7--3002	4		-4	7752	CANAU	23	ARL	#23-ARL	23-ARL1-RT	ARL1	T	ARL1-RT															
		Fictif				24	GRH	#24-GRH																			
1502	2	Canal d'Irrigation du Bas-Rhône	-2	72842	CANAU	23	PRH	#25-PRH	23-ARL1-RT	ARL1	T	ARL1-RT															
V7300501	1	Petit Rhône	-1	63018	RHONE	25	PRH	#25-PRH	23-ARL1-RT	ARL1	T	ARL1-RT															
1482	2	Branche secondaire du canal du Rhône à Sète	-2	96241	CANAU	25	PRH	#25-PRH	25-PRH1	PRH1		1 PRH1															
					CANAU	25	PRH	#25-PRH	25-PRH1	PRH1		1 PRH1															
1482	2	Canal du Rhône à Sète	-2	96241	CANAU	25	PRH	#25-PRH	25-PRH2	PRH2		2 PRH2															