

Maitre d'ouvrage :

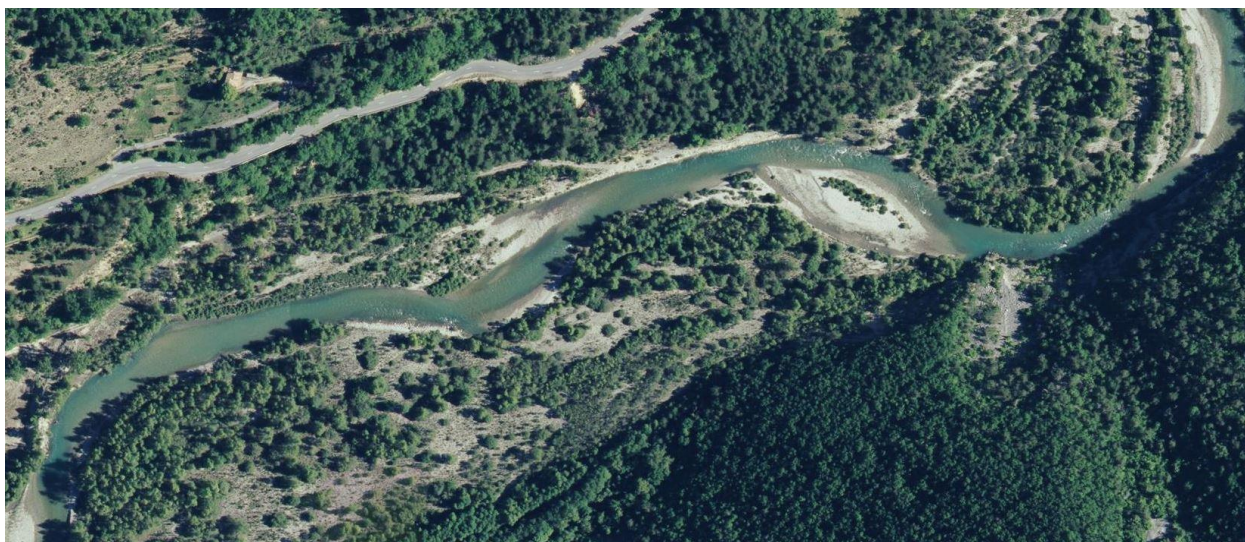
Avec le soutien de :



PLAN DE GESTION DU TRANSPORT SOLIDE ET DES ESPACES DE BON FONCTIONNEMENT DU MOYEN VERDON

Plan de gestion sédimentaire

Juin 2024



SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	2
LISTE DES FIGURES.....	3
LISTE DES TABLEAUX	3
1- Introduction	4
1.1- Cadre et objectifs de l'étude	4
1.2- Contenu du rapport.....	5
2- Bref rappel de la phase 1	5
2.1- Evolutions historiques et récentes.....	5
2.2- Etat actuel.....	6
3- Leviers de restauration.....	7
3.1- Vue d'ensemble et hiérarchisation	7
3.2- Intérêt et faisabilité de la recharge sédimentaire	7
3.2.1- Principes / Cadre général	7
3.2.2- Intérêt pour le Moyen Verdon	8
3.2.3- Faisabilité.....	9
a) Sources potentielles de matériaux	9
b) Contraintes locales	10
c) Bilan sur la faisabilité.....	10
3.2.4- Eléments de dimensionnement.....	11
a) Définition des volumes à injecter	11
b) Sites potentiels d'injection	12
c) Composition granulométrique des matériaux à injecter.....	14
d) Agencement et mobilité des matériaux	15
e) Calendrier des injections	16
3.3- Intérêt et faisabilité des lâchers morphogènes.....	17
3.3.1- Principes	17
3.3.2- Intérêt pour le Moyen Verdon	18
3.3.3- Eléments de dimensionnement.....	19
3.3.4- Faisabilité.....	19
3.4- Intérêt et faisabilité de restaurer un espace de mobilité.....	20
3.4.1- Principe.....	20
3.4.2- Intérêt pour le Moyen Verdon	20
3.4.3- Faisabilité.....	21
a) Restauration intégrale du périmètre morphologique optimal	21
b) Restauration ciblée au droit de quelques sites	21
4- Première proposition de travaux	23
4.1- Portée du projet et objectifs visés.....	23
4.2- Description des travaux.....	23
4.3- Dossiers réglementaires	25
4.4- Suivi morphologique ou écomorphologique.....	26
4.5- Coût de l'opération.....	27
BIBLIOGRAPHIE.....	29

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte synthétique du déficit sédimentaire du Moyen Verdon	6
Figure 2. Exemples d'injections sédimentaires : a) sur le Buëch en aval du barrage de Saint-Sauveur (EDF) ; b&c) sur la Maronne en aval du barrage de Hauteclage (Ecogea 2017).....	8
Figure 3. Sites préférentiels d'injection	13
Figure 4. Matériaux grossiers constituant le radier sur le site d'injection n°1	16
Figure 5. Schéma de principe des débits et durées nécessaires en fonction des objectifs visés par les lâchers morphogènes (Loire et al. 2021).....	18
Figure 6. Les sites potentiels où restaurer l'espace de mobilité du Moyen Verdon : a) zone de dépôt à Colle Blanche ; b) camping Sandaya ; c) camping Huttopia ; d) camping Chasteuil-Verdon-Provence.....	22
Figure 7. Vue en plan du site d'injection n°1 et de l'injection proposée	24

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Historique des volumes de matériaux extraits dans la queue de retenue de Castillon	9
Tableau 2. Hiérarchisation des périodes d'interventions plus ou moins favorables (en vert) et défavorables (en rouge) aux injections	17
Tableau 3. Estimations des coûts pour une première injection sur le Moyen Verdon.....	27
Tableau 4. Estimations des coûts pour une campagne de mesure du suivi morphologique.....	28

1- Introduction

1.1- Cadre et objectifs de l'étude

Deux « secteurs sensibles à l'enfoncement du lit » sont identifiés dans le Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SAGE) du Verdon :

- le Moyen Verdon entre le barrage de Chaudanne et le pont de Taloire ;
- le Bas Verdon entre le barrage d'Esparron et la queue de retenue de Cadarache.

Le syndicat mixte du Parc naturel régional du Verdon (PNRV), en tant qu'établissement public d'aménagement et de gestion de l'eau (EPAGE) titulaire de la compétence GEMAPI (gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations) sur le bassin versant du Verdon, a lancé la présente étude sur les 2 secteurs précités, en prolongeant le premier jusqu'au pont de Carajuan.

Il s'agit d'une étude hydromorphologique, qui s'intéresse aux interactions entre les flux liquides et solides (eau et alluvions) et la morphologie du cours d'eau (pente, largeur, profondeur, substrats), ainsi qu'à leurs conséquences sur les activités humaines, les habitats aquatiques ou les écosystèmes riverains (affouillement d'ouvrages, érosions de berge, dégradation des substrats du lit mineur, inondations en lit majeur, déconnexion ou atterrissement des milieux annexes...).

Elle vise à définir un plan de gestion sédimentaire et à délimiter un espace de bon fonctionnement sur les 2 secteurs étudiés. Elle concourt ainsi à mettre en œuvre plusieurs dispositions du SAGE, parmi lesquelles nous pouvons citer :

- la disposition D21 qui prévoit de réaliser un suivi topographique des secteurs sensibles à l'enfoncement du lit (pour évaluer régulièrement les évolutions verticales des tronçons s'étant incisés par le passé) ;
- la disposition D22 qui prévoit d'envisager la réalimentation en matériaux des secteurs sensibles à l'enfoncement du lit (pour remédier au déficit sédimentaire déjà constaté par les études antérieures) ;
- la disposition D24 qui prévoit de maîtriser le développement d'activités dans les zones vulnérables aux inondations (lien avec l'espace de bon fonctionnement hydraulique) ;
- la disposition D35 qui prévoit de préserver ou restaurer une zone tampon entre le cours d'eau et les activités humaines (lien avec l'espace de bon fonctionnement biogéochimique) ;
- les dispositions D40, D42 et R1 qui prévoient de préserver, restaurer et gérer les zones humides (lien avec l'espace de bon fonctionnement biologique).

Plus précisément, cette étude consiste à :

- définir les propriétés intrinsèques des différents tronçons homogènes composant les secteurs étudiés, qui contrôlent leur fonctionnement effectif et potentiel ;
- évaluer le déficit sédimentaire de ces 2 secteurs, sur la base des études antérieures et à partir de nouvelles données et analyses ;
- prédire leurs trajectoires futures et les éventuels dysfonctionnements ou impacts sur les enjeux riverains ;
- délimiter un espace de bon fonctionnement permettant à chacune des fonctions de la rivière de s'exercer durablement ;
- définir des solutions pour préserver, entretenir ou restaurer les milieux aquatiques.

1.2- Contenu du rapport

Ce rapport présente le plan de gestion sédimentaire du Moyen Verdon. Il se décompose comme suit :

- La 2^{ème} section rappelle brièvement les principaux résultats de la phase 1 de l'étude (état des lieux et diagnostic) ;
- La 3^{ème} section présente les leviers de restauration puis étudie l'intérêt et la faisabilité de chacun d'entre eux.
- La 4^{ème} section correspond à une première proposition d'injection de matériaux dans le lit du Verdon, qui pourrait amorcer un programme pluriannuel de recharge sédimentaire.

2- Bref rappel de la phase 1

Cette section résume très brièvement les principaux résultats de la phase 1 de l'étude qui visait à établir un état des lieux et un diagnostic du fonctionnement hydromorphologique du Moyen Verdon.

2.1- Evolutions historiques et récentes

Nos investigations et diverses études antérieures ont mis en évidence les principales évolutions suivantes :

- rétraction de la bande active, c'est-à-dire de la largeur du lit vif (lit mouillé et bancs non ou peu végétalisés) régulièrement rajeuni par les crues, qui a diminué de plus de moitié en 80 ans ;
- incision du lit, avec une intensité globalement décroissante vers l'aval (près de 3 m entre le seuil EDF et l'ancienne gravière de Colle Blanche, négligeable au droit de la confluence avec le Jabron) ;
- dégradation des substrats (qualité des matériaux constituant les fonds du lit) selon un gradient longitudinal à peu près semblable (plus marqué dans le centre de Castellane que dans les tronçons aval).

Ces évolutions témoignent d'un déficit sédimentaire important et d'une raréfaction des crues morphogènes. Le déficit sédimentaire correspond à un déséquilibre entre les flux liquides et solides. Il est à l'origine de l'incision du lit et de la dégradation des substrats par transport sélectif des particules (les plus petites étant transportées plus rapidement que les grosses, la taille moyenne des particules augmente et cela se traduit par une moindre qualité et une moindre diversité des fonds du lit). La raréfaction des crues morphogènes correspond à une diminution de la fréquence et de l'intensité des crues capables de modifier la morphologie du lit. Elle se traduit par une diminution de l'activité générale de la rivière, donc une moindre largeur de bande active.

Les barrages amont (Chaudanne et Castillon) sont la principale cause de ces évolutions et dysfonctionnements. Ils réduisent effectivement le régime des crues en aval et entraînent surtout une déconnexion du Moyen Verdon avec les sources sédimentaires amont (Haut Verdon). D'autres facteurs, en partie naturels, sont également intervenus dans une moindre mesure et à une échelle de temps plus longue (évolutions climatiques, évolution des pratiques agricoles...).

2.2- Etat actuel

Les évolutions et déséquilibres décrits dans la section précédente ont les impacts suivants :

- dégradation de la qualité physique des habitats aquatiques et riverains ;
- moindre capacité d'auto-entretien du lit (vis-à-vis de la végétation) et d'auto-épuration des eaux (pouvant affecter toutes les propriétés physico-chimiques de l'eau comme la température) ;
- risque de déstabilisation des ouvrages riverains (digue de la Barricade en particulier).

La **figure 1** ci-dessous représente l'importance du déficit sédimentaire acquis par le Moyen Verdon au cours du dernier siècle. De manière schématique, on peut considérer qu'elle représente également le niveau actuel de dégradation de la morphologie de la rivière. Celui-ci décroît de l'amont vers l'aval à partir du seuil EDF et de la restitution de l'usine hydroélectrique de Chaudanne, pour plusieurs raisons :

- l'inertie de l'érosion progressive générée par les barrages, les tronçons amont étant les premiers affectés ;
- l'endiguement du lit à Castellane qui favorise l'uniformité des habitats ;
- la présence de quelques points durs dans le lit des tronçons aval qui limitent leur érosion ;
- les apports solides diffus qui contribuent à recharger le lit sont plus fréquents en aval.

Le tronçon court-circuité (TCC) de Chaudanne fait exception à ce gradient amont-aval car le seuil EDF et les moindres crues l'ont en partie préservé du déficit sédimentaire. En revanche, il présente un colmatage important des fonds (encroutement calcaire et accumulation d'alluvions fines provenant du ravin de Destourbes).

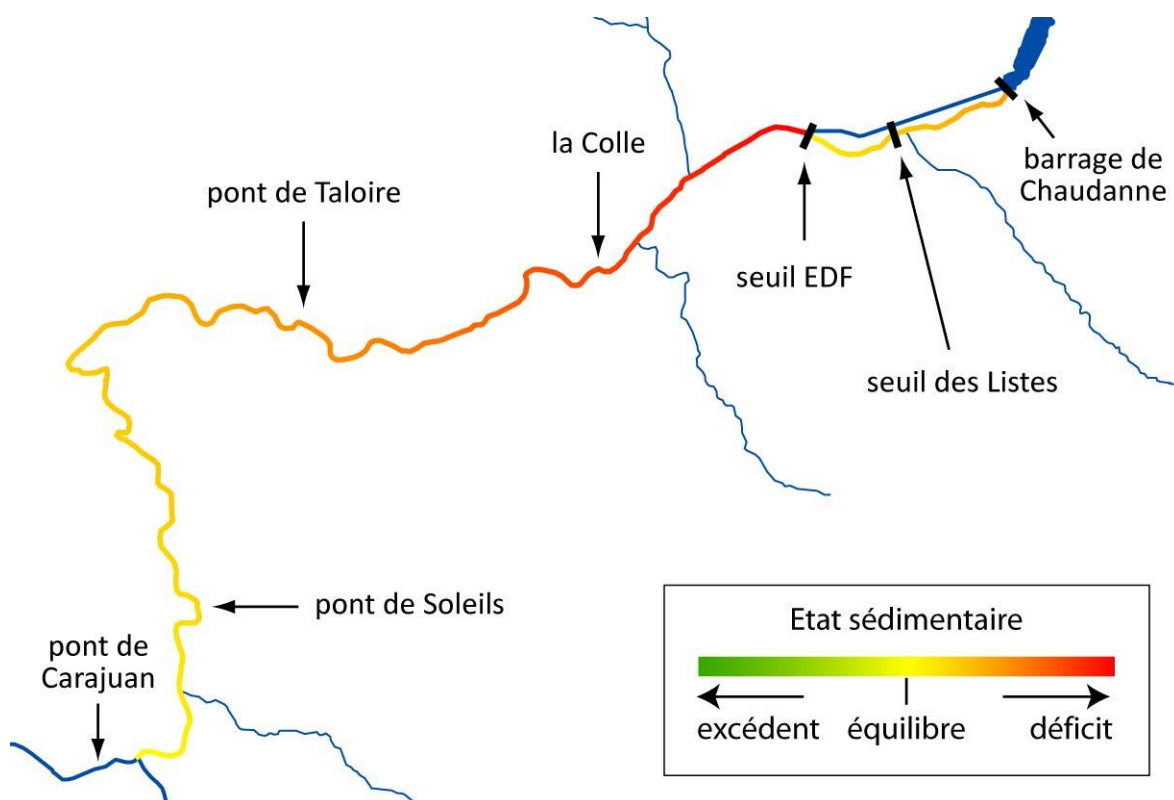


Figure 1. Carte synthétique du déficit sédimentaire du Moyen Verdon

3- Leviers de restauration

3.1- Vue d'ensemble et hiérarchisation

Compte tenu des dysfonctionnements et enjeux constatés, nous identifions 3 leviers de restauration que l'on peut classer dans l'ordre d'intérêt décroissant suivant :

- Recharge sédimentaire
- Lâchers morphogènes
- Restauration d'un espace de mobilité

L'intérêt et la faisabilité de chacun de ces leviers sont analysés dans les sections suivantes.

3.2- Intérêt et faisabilité de la recharge sédimentaire

3.2.1- Principes / Cadre général

La recharge sédimentaire consiste à augmenter la quantité d'alluvions dans le lit des cours d'eau. Elle peut être réalisée de manière indirecte en favorisant par exemple la mobilité latérale d'une rivière, donc l'apport de matériaux par érosion des berges. Elle peut être réalisée de manière directe en injectant dans le lit des alluvions provenant de sources diverses (ex. : terrasses alluviales proches, tronçons excédentaires). Lorsque les matériaux injectés proviennent de la retenue d'un barrage amont, on parle alors de réinjection dans la mesure où l'on restitue les matériaux qui transitent naturellement en amont.

Ce type d'actions peut viser plusieurs objectifs que l'on peut regrouper autour de 3 grands axes : la restauration écologique, l'amélioration de la ressource en eau et la stabilisation des aménagements riverains. La recharge sédimentaire contribue en effet à :

- rehausser ou stabiliser l'altitude du lit et de la nappe alluviale ;
- augmenter la diversité des faciès d'écoulement et l'hétérogénéité des habitats aquatiques ;
- améliorer la qualité des substrats et notamment le nombre et la qualité des zones de reproduction piscicole ;
- renforcer l'intérêt des habitats riverains (ou ripariens) ;
- augmenter les échanges hyporhéiques (entre les écoulements de surface et la nappe d'accompagnement) propices à l'auto-épuration des eaux et au développement de la faune benthique.

Compte tenu de l'impact significatif des barrages sur le transport solide, les réinjections sont de plus en plus fréquentes. Certaines sont massives et réalisées à titre ponctuel alors que d'autres sont régulières mais concernent des volumes plus modestes. Les premières peuvent être réalisées par opportunité, par exemple suite à un curage visant en premier lieu à restaurer la capacité de stockage d'une retenue ou à limiter l'inondation des terrains amont comme ce fut le cas sur le Buëch en aval du barrage de Saint-Sauveur (**figure 2a** ; EDF). Les secondes ont plutôt un objectif biologique. C'est par exemple le cas de la Maronne (affluent de la Dordogne) en aval du barrage de Hautefage où des injections annuelles de l'ordre de 500 m³/an ont été réalisées pour reconstituer des frayères à salmonidés (**figures 2b et 2c** ; Ecogea 2017).



Figure 2. Exemples d'injections sédimentaires : a) sur le Buëch en aval du barrage de Saint-Sauveur (EDF) ; b&c) sur la Maronne en aval du barrage de Hautefage (Ecogea 2017)

3.2.2- Intérêt pour le Moyen Verdon

La recharge sédimentaire est le 1^{er} levier de restauration sur le Moyen Verdon dans la mesure où celui-ci souffre d'un déficit sédimentaire. Et l'intérêt de recharger le lit est ici principalement motivé par les enjeux suivants :

- l'amélioration de la qualité des habitats aquatiques étroitement liée à la taille, la quantité et la mobilité des matériaux qui constituent le fond du lit (qualité et diversité des substrats, diversité des faciès d'écoulement) ;
- la stabilisation du profil en long et des ouvrages riverains tels que la digue de la Barricade.

Dans une certaine mesure, la recharge sédimentaire peut également renforcer la capacité d'auto-entretien du lit en réactivant un transport solide grossier donc la mobilité des bancs et le renouvellement de la végétation. Elle contribuerait ainsi à satisfaire d'autres intérêts liés à cette végétation :

- améliorer la qualité des habitats ripariens (notamment par la présence d'essences pionnières composées de jeunes saules et peupliers) ;
- améliorer la qualité des paysages en fond de vallée (plus ouverts et plus typiques) ;
- faire des économies en termes d'entretien de la végétation (moindre densité d'arbres matures).

3.2.3- Faisabilité

a) Sources potentielles de matériaux

Du fait de l'étroitesse du fond de vallée, il y a peu de matériaux remobilisables facilement et en quantité intéressante dans le lit majeur du Moyen Verdon.

Le stock le plus pertinent à exploiter correspond aux alluvions qui s'accumulent dans la queue de retenue du barrage de Castillon, à Saint-André-les-Alpes. On peut également considérer qu'il s'agit d'un gisement légitime dans la mesure où ces matériaux devraient parvenir au Moyen Verdon en l'absence de barrages. Ils sont déjà extraits régulièrement afin de limiter le risque d'inondation des terres riveraines. Le volume maximal prélevable est fixé à 30 000 m³/an par arrêté préfectoral et les volumes réellement prélevés sont définis chaque année sur la base d'un suivi topographique. Depuis 2002, ce sont en moyenne un peu plus de 16 000 m³/an qui sont prélevés ([tableau 1](#)).

En 2019, nous avons interrogé trois personnes sur la distribution granulométrique des matériaux extraits du Haut Verdon : Christian Peugeot, ancien agent de l'ONEMA ; Michel Cozzi, dirigeant de l'entreprise Cozzi Travaux Publics ; Jean-Luc Lattil, directeur d'exploitation de Alpes Sud Matériaux. Leurs réponses sont assez proches et on peut les résumer par la composition approximative suivante :

- 20 à 30% de limons et sables (< 2 mm) ;
- 20 à 30% de graviers (2-16 mm) ;
- 30 à 40% de cailloux (16-64 mm) ;
- 10 à 20% de pierres et de petits blocs (> 64 mm).

année	volume prélevé (m ³)	source	commentaire
1988 à 1994	21 000	ERTM 2008	autorisation annuelle de 3000 m ³ /an
1995 à 2001	nr	ERTM 2008	curages d'urgence après la crue de 1994 mais volumes inconnus
2002	4 000	ERTM 2008	autorisation annuelle de 30 000 m ³ /an maximum
2003	8 000		
2004	30 000		
2005	25 000		
2006	6 500		
2007	15 000		
2008	0		
2009	30 000		
2010	16 500		
2011	27 600		
2012	8 700	DREAL PACA	
2013	0		
2014	29 900		
2015	27 500	EDF	
2016	0		
2017	30 000	EDF	
2018	22 433		

Tableau 1. Historique des volumes de matériaux extraits dans la queue de retenue de Castillon

Le volume disponible de graviers et cailloux, fractions les plus intéressantes pour une réinjection, serait alors de l'ordre de 10 000 m³/an en moyenne. Cette valeur est supérieure aux estimations de la capacité de transport moyenne du Moyen Verdon (1 500 à 9 000 m³/an ; Sogreah et al. 2002). Le stock est donc suffisamment important.

b) Contraintes locales

Les implantations riveraines et aménagements qui pourraient éventuellement être menacés par une injection sédimentaire, ou qui limitent sa faisabilité, sont les suivants :

- le village de Castellane entre le pont du Roc et la Colle (essentiellement en rive droite) ;
- la zone d'activité de Chaudanne en rive gauche du TCC ;
- le stade d'eaux vives en aval immédiat du pont de la RD 4085 ;
- le seuil EDF et sa passe à poissons à l'extrémité aval du TCC.

L'impact potentiel sur les activités riveraines est d'aggraver le risque d'inondation par rehaussement des lignes d'eau de crues. Cet impact doit et peut être évité :

- en limitant les volumes injectés, de manière générale mais plus particulièrement au droit de ces enjeux ;
- en déposant les matériaux sur des sites moins vulnérables et/ou dans les faciès lenticles (le niveau des lignes d'eau étant davantage contrôlé par les radiers) ;
- en favorisant la mobilité des matériaux injectés de manière à ce qu'ils ne s'accumulent pas massivement au droit de ces enjeux.

De plus, l'acheminement des matériaux extraits en queue de retenue de Castillon nécessite a priori de traverser le centre-ville de Castellane, ce qui entraîne des nuisances.

L'impact potentiel sur le stade d'eaux vives est de diminuer sa fonctionnalité en ennoyant les épis destinés à créer des courants favorables aux activités sportives. L'injection directe de matériaux dans le stade d'eaux vives est donc déconseillée. Cet aménagement est tout de même compatible avec un transport solide modéré et il y a même intérêt à en stabiliser les fonds par des injections en amont. Par ailleurs, la morphologie du lit restera totalement compatible avec la pratique des sports d'eaux vives sur le reste du Verdon (kayak, raft, aquarando...).

L'impact potentiel sur le seuil EDF est nul : cet ouvrage a pour fonction de stabiliser les fonds du TCC et cette fonction ne sera pas altérée. En revanche, il constitue une contrainte dans la mesure où il s'agit d'un obstacle important au transport solide, ce qui limite l'intérêt d'une injection en amont du seuil. Par ailleurs, le seuil est équipé d'une passe à poissons dont l'efficacité pourrait être remise en cause si les bassins successifs qui permettent la remontée des poissons étaient engravés.

Il n'y a donc pas de contrainte majeure à une injection sédimentaire. Mais, compte tenu des contraintes hydrauliques, il est préférable de réaliser régulièrement de petites injections plutôt que réaliser ponctuellement des injections massives. Et il est préférable de les réaliser en aval du seuil EDF.

c) Bilan sur la faisabilité

Au regard du déficit sédimentaire actuel et des enjeux en présence, il est à la fois possible et fortement recommandé de réaliser des opérations de recharge sédimentaire dans le Moyen Verdon. Et le meilleur moyen est de réinjecter tout ou partie des dépôts prélevés en queue de retenue de Castillon.

Mais on peut encore s'interroger sur le niveau de restauration que la recharge sédimentaire doit viser :

- Peut-on envisager une véritable restauration visant à rétablir un état et un fonctionnement proches d'un état antérieur de référence (ex. : avant la mise en service des barrages dans les années 1950) ?
- Doit-on se limiter à la préservation de l'état actuel du Moyen Verdon, c'est-à-dire à compenser le futur déficit sédimentaire en injectant des volumes équivalents à la capacité de transport de la rivière ?

On ne peut pas rehausser sensiblement les fonds du lit tout en conservant les niveaux actuels de crue à moins de reculer les digues et de déplacer une partie des habitations et équipements riverains, ce qui paraît difficilement réalisable (cf. § 3.4.3). D'un point de vue volumétrique et altimétrique (altitude des fonds et des lignes d'eau associée au stock d'alluvions présentes dans le lit), la restauration du Moyen Verdon à un état antérieur lointain est donc exclue a priori.

En revanche, on peut restaurer une partie de ses fonctionnalités, contrôlées par la qualité des substrats, en agissant sur la distribution granulométrique des matériaux injectés. On peut notamment injecter des fractions granulométriques particulièrement favorables à la faune aquatique (poissons et invertébrés) et à l'autoépuration des eaux (via les échanges hyporhéiques).

Le meilleur compromis est donc de compenser le déficit sédimentaire du Moyen Verdon en injectant de façon régulière (fréquence à peu près annuelle) des volumes équivalents à sa capacité de transport actuelle mais en privilégiant les fractions granulométriques les plus favorables à la qualité des habitats aquatiques (graviers et cailloux).

3.2.4- Éléments de dimensionnement

a) Définition des volumes à injecter

La capacité de transport annuelle moyenne du Moyen Verdon serait comprise entre 1 500 et 9 000 m³/an d'après Sogreah et al. (2002). Nous retenons une valeur approximative de **2 000 m³/an** compte tenu de l'imprécision des méthodes de calculs et des évolutions récentes du profil en long (les pentes sont désormais plus homogènes et la comparaison des profils de 2010 et 2016 suggère une surestimation des capacités de transport). Ce volume représente environ 6% du transport solide annuel moyen du Haut Verdon (30 000 à 35 000 m³/an d'après Sogreah et al. 2002 et ERTM 2008) et 16% des quantités moyennes de matériaux annuellement extraites en queue de retenue de Castillon (>300 000 m³ en 24 ans).

Injecter annuellement ce volume permettrait de **compenser le futur déficit sédimentaire** mais ne permettra pas de restaurer le déficit acquis depuis plusieurs décennies. Autrement dit, cela devrait rétablir un bilan sédimentaire nul à l'échelle interannuelle de manière à stopper l'incision du Moyen Verdon sans pour autant reconstituer le stock d'alluvions initialement présent. La restauration du Moyen Verdon dans son état initial nécessiterait d'injecter de plus grands volumes (éventuellement en une seule fois lors d'une première opération de réinitialisation du lit) et entraînerait forcément une élévation des niveaux de crue qui paraît difficile à faire accepter dans la traversée de Castellane.

Cette valeur de 2000 m³/an est un ordre de grandeur qu'il faudra préciser à l'avenir sur la base d'un suivi morphologique. Le suivi s'appuiera en grande partie sur des levés réguliers de profils en long et en travers de manière à évaluer l'évolution du stock d'alluvions dans le Moyen Verdon. On pourra alors

ajuster le volume à injecter à la hausse ou à la baisse de manière à optimiser l'efficacité des réinjections sans mettre en péril les activités riveraines. Pour s'assurer de l'absence d'impacts indésirables sur l'aléa inondation à Castellane, on peut d'ailleurs envisager d'injecter des volumes un peu plus faibles dans un premier temps.

Cette valeur de 2 000 m³/an correspond aussi à une moyenne interannuelle et il conviendra en fait d'ajuster le volume à injecter chaque année en fonction de l'intensité de l'année hydrologique antérieure. On sait notamment que le déficit sédimentaire est nul ou du moins négligeable certaines années, comme l'a montré la comparaison des profils en long de 2010 et 2016. En revanche, la capacité de transport du Moyen Verdon serait de l'ordre de 10 000 m³/an pour une crue décennale et 50 000 m³/an pour une crue centennale (Sogreah et al. 2002). Des injections beaucoup plus importantes doivent donc être envisagées pour compenser le déficit sédimentaire suite à ces crues majeures. Pour autant, il est difficile d'évaluer précisément le déficit sédimentaire du Moyen Verdon lors d'une année donnée et il ne paraît pas nécessaire de chercher à compenser exactement ce déficit annuel. Il est préférable de compenser le déficit à l'échelle interannuelle en injectant un peu moins de matériaux lors des années hydrologiquement faibles (c'est-à-dire un peu plus que le déficit sédimentaire supposé) et au contraire un peu plus de matériaux lors des années hydrologiquement fortes (moins que le déficit sédimentaire supposé). En revanche, il faut éviter de ne rien injecter en l'absence de crues significatives puis de se contenter d'injecter ce volume moyen interannuel après une ou plusieurs crues significatives. Le cas échéant, le bilan sédimentaire à moyen et long termes resterait négatif.

En pratique, nous recommandons de déterminer les volumes à injecter dans le Moyen Verdon en fonction des volumes à prélever en queue de retenue de Castillon car :

- d'une part, le volume disponible pour les injections dépend des volumes prélevés en amont à moins de recourir à une source alternative (ex. : carrière locale), ce qui ne paraît pas nécessaire ;
- d'autre part, l'importance des évolutions constatées sur le Haut Verdon est un assez bon indicateur du déficit sédimentaire en aval du barrage de Chaudanne (toute proportion gardée, la capacité de transport du Haut Verdon étant largement supérieure). En l'absence de dépôts significatifs en queue de retenue de Castillon, on peut considérer que le transport solide a été très faible sur le Moyen Verdon. Inversement, si le volume à prélever en amont du barrage est important, il est probable que le déficit en aval le soit aussi.

En définitive, les volumes à injecter doivent donc être définis et réévalués régulièrement en considérant 2 échelles temporelles :

- à l'échelle annuelle, il s'agit de définir les volumes à injecter en fonction des évolutions constatées en queue de retenue de Castillon ;
- à l'échelle pluriannuelle, il s'agit de préciser le volume moyen interannuel nécessaire pour compenser le déficit sédimentaire du Moyen Verdon en fonction des évolutions des fonds.

b) Sites potentiels d'injection

Nous identifions 2 sites préférentiels d'injection qui se situent exclusivement dans la partie amont du Moyen Verdon car l'intérêt d'une recharge sédimentaire diminue à mesure que l'on progresse vers l'aval (**figure 3**) :

- Site n°1 : entre la restitution de Chaudanne et le pont du Roc ;
- Site n°2 : entre le stade aquatique de Castellane et le ruisseau du Pesquier.

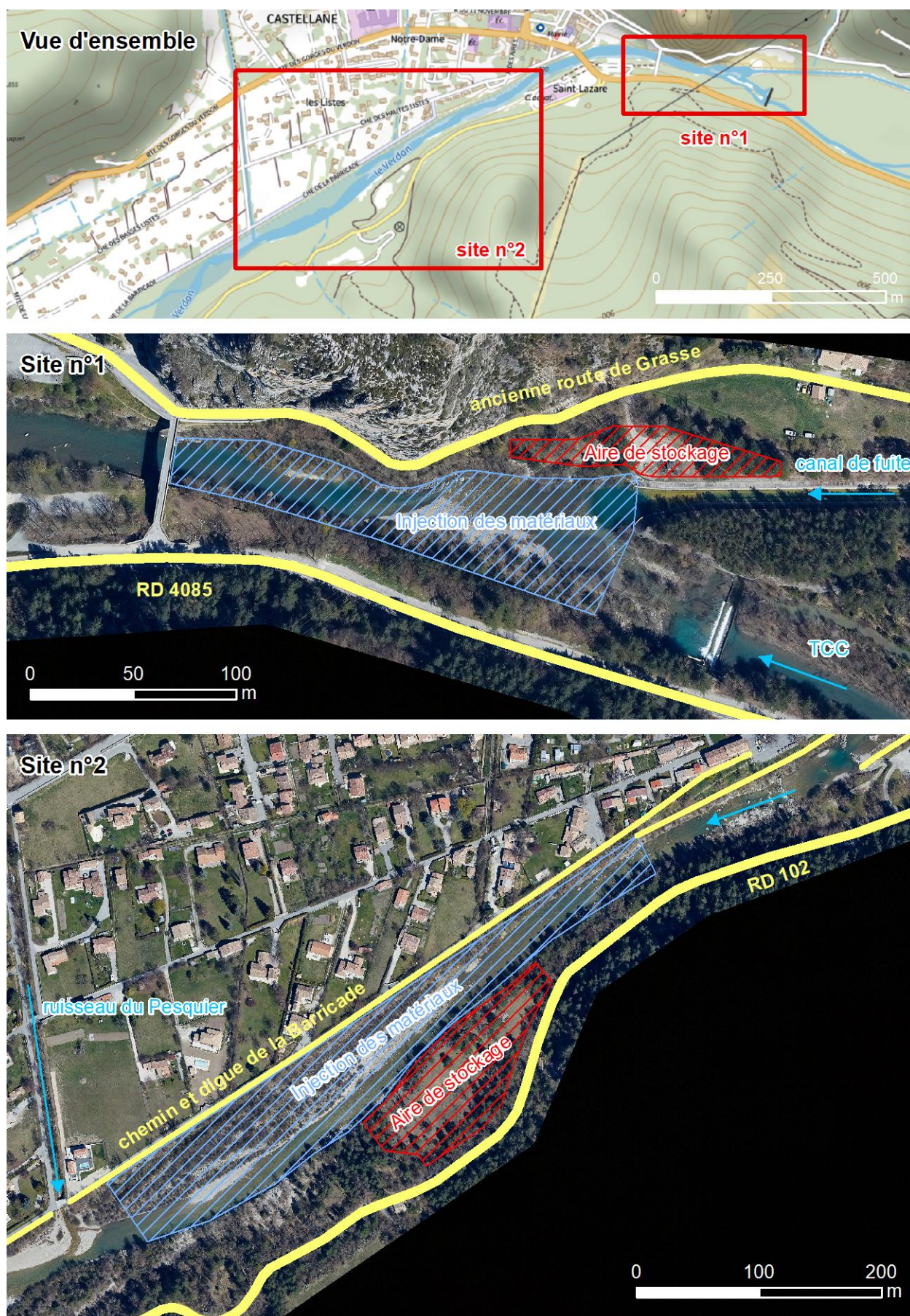


Figure 3. Sites préférentiels d'injection

Le 1^{er} site présente le plus grand intérêt car les matériaux injectés peuvent être progressivement mobilisés par les fréquentes éclusées de l'usine hydroélectrique de Chaudanne tout en rechargeant un linéaire maximal à l'exception du TCC. Sa superficie relativement faible limite néanmoins les volumes que l'on peut injecter en une fois. L'accès à ce 1^{er} site est a priori plus facile par la rive droite, où une petite terrasse peut être aménagée pour entreposer le matériel et une partie des matériaux (parcelle cadastrale n°572). Une autre piste peut éventuellement être aménagée en rive gauche comme ce fut le cas lors de la construction de la passe à poissons du seuil EDF.

Le 2^{ème} site présente moins d'intérêt du fait de sa position aval. Mais il constitue une solution complémentaire si le volume de matériaux à injecter dépassait la capacité d'accueil du 1^{er} site, notamment suite à une crue majeure nécessitant une injection massive. L'accès est à privilégier par la rive gauche environ 500 m en aval du pont où la RD 102 s'écarte du Verdon et laisse place à une terrasse alluviale propice à l'installation du chantier (parcelles cadastrales n°375 et 376). Il est encore possible d'accéder au lit par la rive droite où s'est développé le premier banc alterné mais cet accès est moins favorable (il faudrait passer par-dessus la digue de la Barricade).

Le TCC de Chaudanne a été écarté pour les raisons suivantes :

- La rareté des écoulements morphogènes a jusqu'ici limité l'intensité du déficit sédimentaire donc la nécessité d'une recharge, et limitera à l'avenir le transport des matériaux vers l'aval donc son utilité.
- Le seuil EDF constitue un obstacle au transport solide si bien que les matériaux injectés ne bénéficieront pas aux tronçons en aval de la restitution, du moins pas avant un certain temps.
- La tendance au colmatage de la retenue du seuil limite encore l'intérêt d'une recharge en alluvions grossières car celles-ci seront recouvertes d'alluvions fines.
- La présence de la passe à poissons du seuil EDF plaide à la fois pour et contre une recharge sédimentaire du TCC :
 - d'un côté, cela permettrait de restaurer ou de préserver les habitats aquatiques desservis par cet équipement ;
 - d'un autre côté, cela augmenterait le risque d'engrèvement des bassins et pourrait ainsi diminuer la fonctionnalité de la passe.

Précisons que tous ces inconvénients ne se cumulent pas dans le temps. Si les matériaux injectés venaient à terme combler la retenue du seuil EDF, cela ne gênerait en rien la fonction première de cet ouvrage (stabilisation du profil en long) et permettrait de rétablir le transit sédimentaire au-delà du seuil. Il n'y a que le fonctionnement de la passe à poissons qui pourrait être pénalisé.

c) Composition granulométrique des matériaux à injecter

Nous préconisons d'injecter préférentiellement un **mélange de graviers (2-16 mm) et cailloux (16-64 mm)** car il s'agit des fractions granulométriques les plus intéressantes pour la faune aquatique et l'autoépuration des eaux. Il s'agira donc de cribler les matériaux prélevés en queue de retenue de Castillon pour éliminer tant que possible les alluvions fines (sables, limons, argiles) ou plus grossières (pierres et blocs).

D'après les personnes interrogées sur la composition des matériaux régulièrement prélevés en queue de retenue (cf. § 3.2.3.a), ces fractions représenteraient à peu près la moitié du volume disponible et a

minima 20% soit au moins 6 000 m³. Il y en aura donc suffisamment pour réaliser les injections et le criblage sera relativement rapide si l'on prend soin de sélectionner les dépôts les plus appropriés.

Le criblage des matériaux représente un surcoût par rapport à l'utilisation de matériaux non triés prélevés en queue de retenue. Ce surcoût se justifie cependant à plusieurs titres :

- D'un point de vue volumétrique, les injections préconisées ne permettent pas véritablement de restaurer le Moyen Verdon. Elles visent seulement à compenser le déficit sédimentaire futur engendré par la rupture du transport solide au droit des barrages de Castillon et de Chaudanne de manière à maintenir le niveau actuel des fonds. Privilégier l'injection des fractions granulométriques moyennes permettra en revanche d'améliorer plus efficacement les habitats aquatiques.
- On pourrait tout aussi bien raisonner dans le sens inverse et considérer que le criblage des matériaux permet en fait de limiter les coûts de transport et l'ampleur des nuisances. En effet, le principal inconvénient du projet de réinjection réside dans l'acheminement de ces matériaux sur près de 25 km en passant par le centre-ville de Castellane. Il est donc préférable de limiter les volumes en transit et, en guise de compensation, d'optimiser la qualité des matériaux en augmentant la proportion en fractions granulométriques « utiles ».
- La distribution granulométrique des dépôts en queue de retenue est rarement représentative des matériaux en transit. La rupture de pente engendrée par la retenue a plutôt tendance à favoriser le dépôt des alluvions fines. Il y aurait effectivement en général 20 à 30% de sables et limons en queue de retenue alors que ces fractions sont relativement rares dans le Moyen Verdon. Cette proportion est bien plus élevée certaines années et la réinjection des fines pourrait davantage perturber les habitats aquatiques du Moyen Verdon que les restaurer.

L'injection de particules plus grossières telles que les pierres et petits blocs serait moins préjudiciable que celle des particules fines. Du fait de leur meilleure stabilité, ce serait même les fractions à privilégier si l'on cherchait uniquement à stopper l'incision du lit voire à rehausser son niveau. Mais elles sont beaucoup moins intéressantes du point de vue de la qualité des substrats.

d) Agencement et mobilité des matériaux

Pour un gain écologique maximal, il faut privilégier la mobilité des matériaux injectés. Cela permet une diffusion progressive vers les tronçons aval et un renouvellement régulier des substrats. Or la mobilité des matériaux est d'autant plus forte qu'ils sont de petite taille et agencés en petites formations bien exposées aux écoulements, au plus proche du talweg.

La mobilité des matériaux injectés doit être plus particulièrement recherchée sur le site n°1. En effet, il n'y a pas d'intérêt particulier à augmenter le stock d'alluvions spécifiquement sur ce site, d'autant plus que les matériaux en place sont déjà très grossiers (**figure 4**). Il faut également veiller à ce qu'ils ne s'accumulent pas massivement au droit du centre-ville de Castellane et dans le stade d'eaux vives.

C'est un peu moins le cas sur le site n°2. Il est en effet moins intéressant d'alimenter rapidement les tronçons en aval lointain de Castellane, relativement préservés et où les enjeux en termes de stabilité des ouvrages riverains sont moindres. Dans la mesure où nous cherchons à restaurer les habitats aquatiques, il faut tout de même éviter de rendre les fonds plus grossiers et donc limiter la taille des particules injectées. Mais on peut augmenter leur stabilité en reconstituant une (ou des) séquence(s) de type radier-banc.

Enfin, quel que soit le site d'injection, il sera toujours préférable de déposer les matériaux directement dans le lit mineur dans la mesure où les crues sont rares sur le Moyen Verdon. Si les dépôts sont trop hauts (ex. : lit majeur), ils ne seront pas remobilisés par les petites crues. Ils pourraient alors progressivement être colonisés par la végétation et/ou s'exhausser par dépôts successifs des fines, ce qui limitera leur mobilité ultérieure. Les bénéfices escomptés par les injections seraient donc a minima retardés sinon faibles. Dans le pire des cas, ils pourraient même contribuer à l'inondation des terres riveraines en diminuant les sections d'écoulement lors de la prochaine crue majeure.



Figure 4. Matériaux grossiers constituant le radier sur le site d'injection n°1

e) Calendrier des injections

Du fait du régime hydrologique pluvio-nival du Verdon, les débits mensuels moyens sont plus élevés entre avril et juin. Et les déversements du barrage de Chaudanne rendus nécessaires par les crues seraient plus fréquents en juin et en novembre (d'après le peu d'informations dont nous disposons).

D'après ERTM (2008), le transport solide du Haut Verdon se produit essentiellement entre mai et juillet (environ un quart en mai, plus de la moitié en juin et un peu plus de 10% en juillet). Mais les travaux de curage en queue de retenue de Castillon, autorisés de février à avril puis de septembre à octobre, interviennent généralement en février et mars.

La truite fario puis le chabot sont les 2 espèces piscicoles dominantes du Moyen Verdon (MRE 2019). La période de reproduction de la truite s'étend de novembre à février et celle du chabot périalpin se concentre principalement de mars à avril bien qu'elle puisse s'étendre de février à juin (Keith et al. 2011).

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	octobre	nov.	déc.
hydrologie												
fraie piscicole												
prélèv. amont												
tourisme												
bilan												

légende :

très favorable				neutre						très défavorable	

Par conséquent, pour limiter l'impact des travaux sur les populations piscicoles et sur le tourisme, et pour faciliter leur réalisation (travail en basses eaux) tout en assurant la disponibilité des matériaux extraits, **la période la plus propice pour procéder aux injections correspond au mois d'octobre.**

3.3- Intérêt et faisabilité des lâchers morphogènes

Les lâchers morphogènes correspondent aux lâchers d'eau réalisés en aval des barrages pour générer un transport solide et renouveler les formes fluviales de manière plus ou moins significative. Bien entendu, plus l'effet morphologique recherché est significatif, plus le lâcher doit être important.

Les lâchers morphogènes peuvent parfois être réalisés en accompagnement des injections sédimentaires. C'est par exemple le cas sur la Trinity River en Californie où des injections sont réalisées depuis les années 1970. Des expérimentations ont ensuite permis de tester différentes stratégies de restauration et d'évaluer leurs effets sur les habitats et la faune aquatique. Depuis les années 2000, des

injections sont réalisées annuellement et un lâcher morphogène chaque printemps. Les matériaux transportés vers l'aval recréent ainsi rapidement des bancs, des radiers et des frayères à salmonidés.

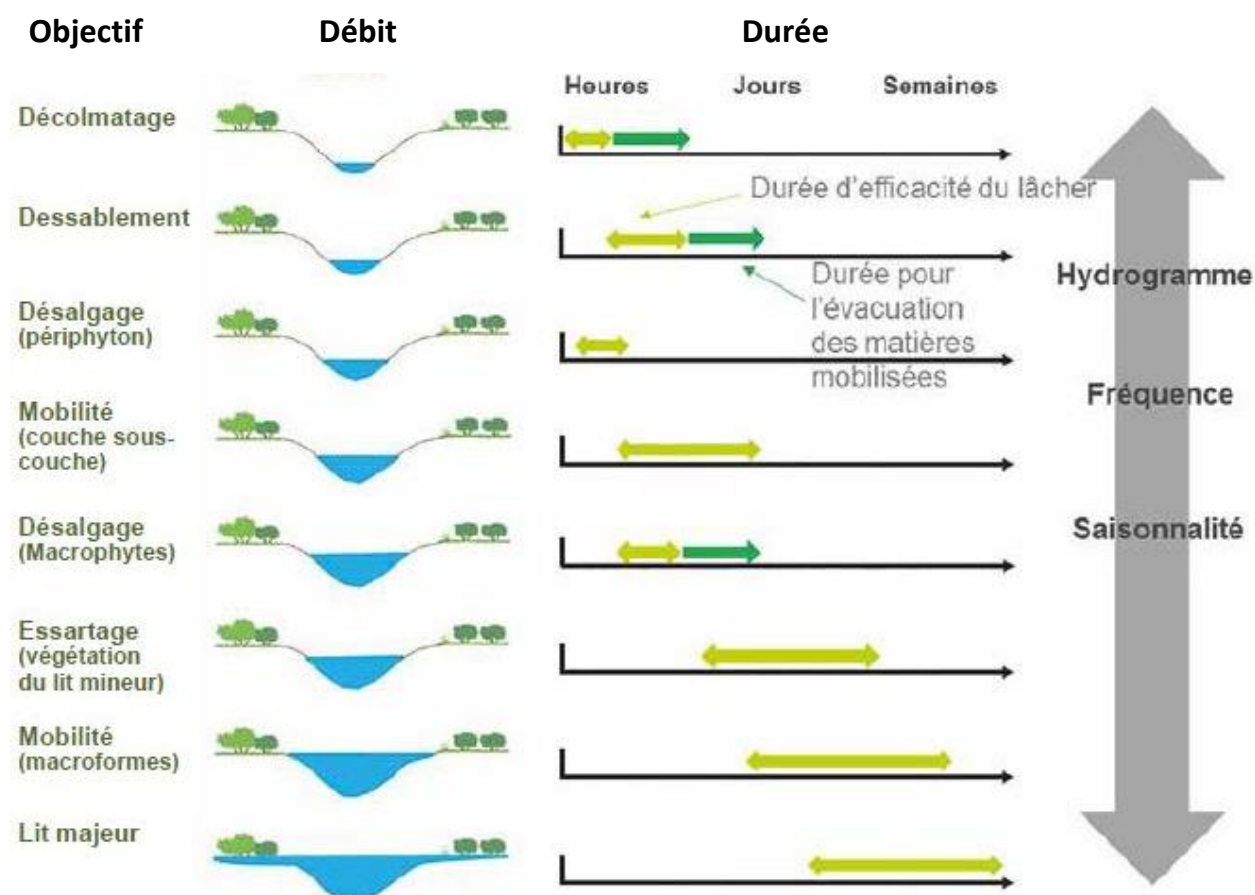


Figure 5. Schéma de principe des débits et durées nécessaires en fonction des objectifs visés par les lâchers morphogènes (Loire et al. 2021)

3.3.2- Intérêt pour le Moyen Verdon

Sur le Moyen Verdon, l'intensité et la fréquence des crues morphogènes sont fortement réduites par les barrages de Castillon et Chaudanne. Cela contribue à une moindre activité morphologique de la rivière qui se traduit concrètement par un développement plus important de la végétation pérenne dans le lit moyen et une moindre fréquence de renouvellement des habitats.

La réalisation de lâchers morphogènes pourrait partiellement compenser ces impacts. Générer un charriage modéré permettrait a minima de recréer des substrats « frais ». Avec un débit plus soutenu, un lâcher permettrait de rajeunir la bande active donc de renouveler l'ensemble des habitats qu'elle contient tout en entretenant la capacité hydraulique du lit.

En fait, les gains écologiques seraient à peu près de même nature qu'avec une recharge sédimentaire mais ils seraient plus importants si ces 2 leviers de restauration étaient actionnés ensemble. En revanche, il ne faut pas réaliser de lâchers morphogènes seuls : non seulement ils sont moins efficaces mais ils doivent impérativement être accompagnés d'injections de matériaux afin de ne pas aggraver le déficit sédimentaire.

Enfin, dans le TCC, on peut éventuellement envisager des lâchers encore plus modestes pour décolmater les fonds, en particulier en aval du Destourbes où la proportion d'alluvions fines est importante. Mais le linéaire qui bénéficierait de cette action est court, notamment du fait de la retenue du seuil EDF où le colmatage est inévitable. Les fonds du TCC en amont du Destourbes sont également colmatés mais il s'agit d'un colmatage par encroutement qui ne peut être détruit que par le charriage des alluvions grossières qui le subissent, donc par des débits élevés.

3.3.3- Éléments de dimensionnement

Le dimensionnement des lâchers fait intervenir leur débit, durée et fréquence. Différentes solutions sont envisageables selon les objectifs visés. Nous proposons les ordres de grandeur suivants qui correspondent à 2 niveaux d'ambition :

- Un lâcher de l'ordre de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ durant 10 à 12h générerait un transport solide modéré mais suffisant pour entretenir la morphologie du lit mineur et en particulier les substrats s'il est réalisé régulièrement, c'est-à-dire à peu après chaque année. Un tel lâcher permettrait d'atteindre les 5 premiers objectifs de la **figure 5**.
- Un lâcher de l'ordre de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ durant 20 à 24h engendrerait des évolutions morphologiques plus intenses et remarquables immédiatement (migration latérale dans les zones de divagation, rajeunissement de la bande active par remaniement des bancs et essartement de leur végétation). Un tel lâcher permettrait d'atteindre les 6 ou 7 premiers objectifs de la **figure 5**. Idéalement, la fréquence de ces lâchers serait comprise entre 2 et 5 ans (actuellement, les déversements du barrage de Chaudanne dépasseraient ce débit tous les 10 ans ; voir le tableau 4 du rapport de phase 1).

NB : si l'usine de Chaudanne fonctionne durant le lâcher (capacité maximale de $40 \text{ m}^3/\text{s}$), seul le surplus qui n'est pas turbiné bénéficie au TCC (60 à $160 \text{ m}^3/\text{s}$).

3.3.4- Faisabilité

La faisabilité technique et financière dépend en premier lieu de la disponibilité du volume d'eau nécessaire au lâcher dans la période souhaitée. Un volume suffisant doit être stocké dans la retenue et son utilisation ne doit pas remettre en cause les usages de l'aménagement : production électrique, fourniture d'eau (dans le cadre de la concession régionale du canal de Provence), débits réservés et lâchers touristiques en aval, voire le maintien de la cote touristique du lac de Castillon. Elle dépend également de la souplesse d'utilisation des vannes du ou des barrages : débit maximum, gamme de débit acceptable, position verticale des vannes (fond, surface, mi-hauteur). D'autres contraintes techniques ou administratives peuvent encore intervenir, comme par exemple les limites acceptables en termes de propriétés physico-chimiques des eaux lâchées (température, taux en oxygène, en ammoniac ou en matières en suspension).

Nous ne sommes pas en mesure d'évaluer la faisabilité des lâchers morphogènes sur le Moyen Verdon. Seul l'exploitant peut déterminer les contraintes techniques et estimer le coût financier de ces opérations. Et encore faut-il tenir compte de leur impact sur les autres usages du lac. Nous présentons néanmoins ci-après une évaluation grossière de leurs coûts et des principales contraintes techniques.

En considérant un coût unitaire moyen de $0,05 \text{ €/m}^3$ (coût moyen des soutiens d'étiage par les ouvrages hydroélectriques en Adour Garonne ; CGEDD 2021), le coût d'un lâcher de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ durant 10 à 12h

serait compris entre 100 000 et 200 000 euros environ, selon que l'usine de Chaudanne turbine une partie des eaux ou non (le volume lâché est d'environ 4 millions de m³ mais 40% pourrait éventuellement transiter par l'usine).

Le coût d'un lâcher de 200 m³/s durant 20 à 24h serait quant à lui compris entre 500 000 et près de 1 million d'euros. Par ailleurs, le volume d'eau nécessaire pour lâcher exactement 200 m³/s pendant 22,2h correspond à la capacité de la retenue du barrage de Chaudanne (16 millions de m³). Aussi faudrait-il complètement vider cette retenue ou mobiliser les eaux du lac de Castillon (149 millions de m³). On comprend alors que ce type de lâcher ne peut pas être réalisé fréquemment. Mais il peut être envisagé certaines années en appui d'une crue naturelle (ex. : déverser 200 m³/s pour un débit entrant de 150 m³/s). Il s'agirait donc en quelque sorte d'augmenter la fréquence et l'intensité des opérations de transparence hydraulique.

Pour information, les volumes d'eau nécessaires pour ces deux types de lâcher représentent respectivement 1 et 4% du volume d'eau annuel moyen (d'après les données de la station de Demandolx).

3.4- Intérêt et faisabilité de restaurer un espace de mobilité

3.4.1- Principe

L'espace de bon fonctionnement (EBF) d'un cours d'eau correspond à l'espace qu'il parcourt et avec lequel il interagit pour permettre aux 5 grandes fonctions qu'il assure – qui sont autant de services rendus aux collectivités humaines – de s'exercer durablement : hydraulique, morphologique, biologique, hydrogéologique, biogéochimique. Les fonctions morphologiques et hydrauliques sont prépondérantes car, une fois satisfaites, les 3 autres le sont aussi généralement.

Dans le cadre d'un plan de gestion sédimentaire, on peut restaurer la composante morphologique de l'EBF. Cette dernière contribue à réguler le transport solide et participe ainsi à l'équilibre du profil en long et au renouvellement des habitats aquatiques et riverains. On peut en particulier supprimer des ouvrages de protection des berges pour permettre leur érosion et ainsi augmenter la recharge sédimentaire du cours d'eau tout en lui permettant d'ajuster sa largeur et sa sinuosité. On peut encore favoriser (ou sur-activer) les érosions de berge en reconfigurant le tracé en plan, en détruisant temporairement la ripisylve qui fixent les berges ou en mettant en place des structures qui dirigent les écoulements vers la berge à éroder (ex. : épis déflecteurs).

3.4.2- Intérêt pour le Moyen Verdon

Du point de vue de l'espace de mobilité, on peut distinguer 2 grands secteurs :

- en amont du lieu-dit la Colle, le fond de vallée est naturellement large mais de nombreuses implantations humaines réduisent l'espace disponible pour la rivière ;
- en aval du lieu-dit la Colle, le fond de vallée est globalement plus étroit mais il est peu occupé. Ce secteur aval alterne en fait des passages en gorges étroites et de larges poches alluviales et c'est surtout dans ces dernières que les enjeux de mobilité latérale sont importants.

Les efforts de restauration de l'espace de mobilité du Moyen Verdon devraient donc théoriquement se concentrer sur le secteur amont. Néanmoins, même si l'espace résiduel laissé au Verdon n'y est pas

optimal, il n'est franchement limitant qu'au droit de la piscine municipale et du camping « Domaine du Verdon » (en aval de la station d'épuration).

Dans le secteur aval, le principal enjeu n'est pas de restaurer un espace de mobilité mais de le préserver, et de manière plus générale de préserver l'EBF.

L'intérêt de ce 3^{ème} levier de restauration est donc relativement faible sur le Moyen Verdon. Par ailleurs, il est très difficile de déplacer la plupart des infrastructures et habitations riveraines des tronçons amont. On peut cependant proposer quelques actions ciblées pour augmenter localement l'espace accordé à la rivière.

3.4.3- Faisabilité

a) Restauration intégrale du périmètre morphologique optimal

Le périmètre morphologique optimal du Moyen Verdon (PMO) correspond globalement à son espace de divagation historique hors influence des aménagements (plus de détails dans le rapport EBF). Sa largeur est de 100 m lorsqu'il n'occupe pas la totalité du fond de vallée alluvial (si la largeur de celui-ci est inférieure à 100 m).

Pour permettre au Verdon de divaguer au sein de ce périmètre, il faudrait a minima retirer tous les ouvrages empêchant l'érosion des berges. Il faudrait également déplacer les constructions et activités protégées par ces ouvrages et incompatibles avec les érosions :

- une dizaine d'immeubles d'habitations (villa ou maison de ville), ainsi que leurs jardins et dépendances ;
- la piscine municipale ;
- une petite partie de la zone d'activité de Chaudanne ;
- quelques terrains de Camping (à proximité de la station d'épuration et aux environs de Chasteuil) ;
- les parkings situés entre le pont du Roc et celui de la D4085.

Le coût de cette opération est de l'ordre de 20 millions d'euros. Précisons qu'il s'agit d'une évaluation approximative qui ne tient pas compte des pertes d'activités économiques générées durant le déplacement voire la suppression définitive de certaines activités concernées. Elle n'intègre pas non plus le coût de déplacement du poste électrique situé dans la partie amont de la zone d'activité de Chaudanne et qui empiète peu sur le PMO.

En définitive, cette solution semble irréaliste et disproportionnée par rapport aux faibles gains en termes de bon fonctionnement de la rivière.

b) Restauration ciblée au droit de quelques sites

En pratique, il semble plus réaliste de limiter ce levier d'action à quelques sites qui empiètent sur l'espace de divagation historique du Verdon :

- A Colle Blanche : la zone de dépôt de matériaux situés sur le site de l'ancienne carrière (**figure 6a**) ;
- En aval proche du village de Castellane : les rives du camping Sandaya-Domaine du Verdon (autrefois la Salaou ; **figure 6b**) ;

- Vers Chasteuil : au droit des campings Huttopia-Gorges de Verdon (figure 6c) et Chasteuil-Verdon-Provence (figure 6d).

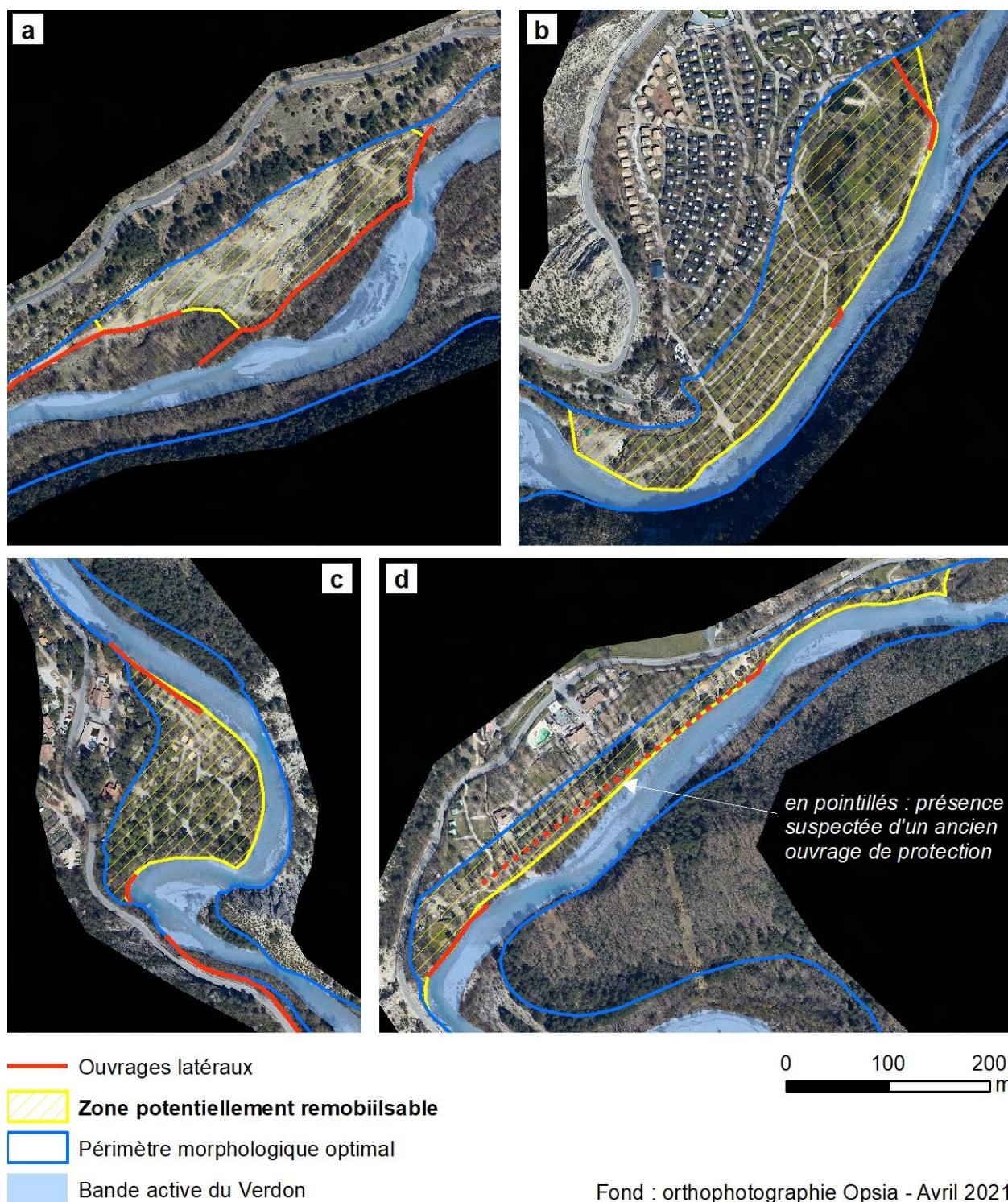


Figure 6. Les sites potentiels où restaurer l'espace de mobilité du Moyen Verdon : a) zone de dépôt à Colle Blanche ; b) camping Sandaya ; c) camping Huttopia ; d) camping Chasteuil-Verdon-Provence

Ces sites sont partiellement protégés par des ouvrages de protection de berges. Leur suppression volontaire permettrait de restaurer localement l'espace de mobilité de la rivière.

Le coût de ces opérations est très variable, la maîtrise foncière des terrains concernés pouvant être obtenue plus ou moins facilement selon les propriétaires, et ne nécessite pas forcément leur acquisition. Dans tous les cas, le coût des travaux est faible.

La faisabilité de ces opérations dépend davantage de leur acceptation par les propriétaires. Elle semble plus facile à obtenir pour la zone de dépôt de matériaux de Colle Blanche car celle-ci peut facilement être déplacée. C'est plus délicat au niveau des campings qui devraient accepter de perdre une partie des terrains qu'ils avaient progressivement gagné sur la rivière.

La suppression de ces ouvrages pourrait finalement être réalisée au gré des opportunités, par exemple en cas de fin d'activité des entreprises concernées. On peut éventuellement attendre que les ouvrages soient spontanément détruits par une forte crue car ils sont généralement anciens et en mauvais état. Dans ce cas, il sera plus facile de faire accepter de ne pas les reconstruire ou de le faire en retrait de la rivière.

4- Première proposition de travaux

4.1- Portée du projet et objectifs visés

La proposition qui suit vise à stabiliser l'évolution verticale des fonds et à améliorer la qualité des habitats aquatiques du Moyen Verdon en aval de la restitution de l'usine hydroélectrique de Chaudanne. Il s'agit d'une première tranche de travaux qui pourrait être réalisée la 1^{ère} année d'un programme pluriannuel de recharge sédimentaire. Le même type de travaux pourrait être réalisé les années suivantes mais il faudra nécessairement adapter les volumes injectés aux évolutions ultérieures des fonds et à l'intensité des événements hydrologiques.

Par ailleurs, cette proposition mériterait d'être développée au stade projet ou avant-projet sur la base de levés topographiques du site d'injection et des environs (a minima jusqu'au pont de la RD 4085). Cela permettra à la fois de préciser le(s) plan(s) du projet et ses incidences hydrauliques. Il s'agit donc d'un préalable nécessaire à la rédaction des dossiers réglementaires.

Cette 1^{ère} proposition consiste à injecter 2000 m³ de graviers et de cailloux sur le site n°1, entre la restitution et le verrou rocheux formé en rive droite par la falaise de Petra Castellana ([figure 7](#)). D'autres options sont encore envisageables, notamment sur l'autre site d'injection, mais le site n°1 est le plus intéressant.

4.2- Description des travaux

Les matériaux injectés seront essentiellement composés de graviers (2-16 mm) et cailloux (16-64 mm) comme préconisé précédemment (cf. § 3.2.4.c). Cela nécessitera de trier par criblage les matériaux prélevés en queue de retenue de Castillon. Le criblage sera réalisé à Saint-André-les-Alpes sur les aires provisoires de stockage des matériaux déjà existantes.

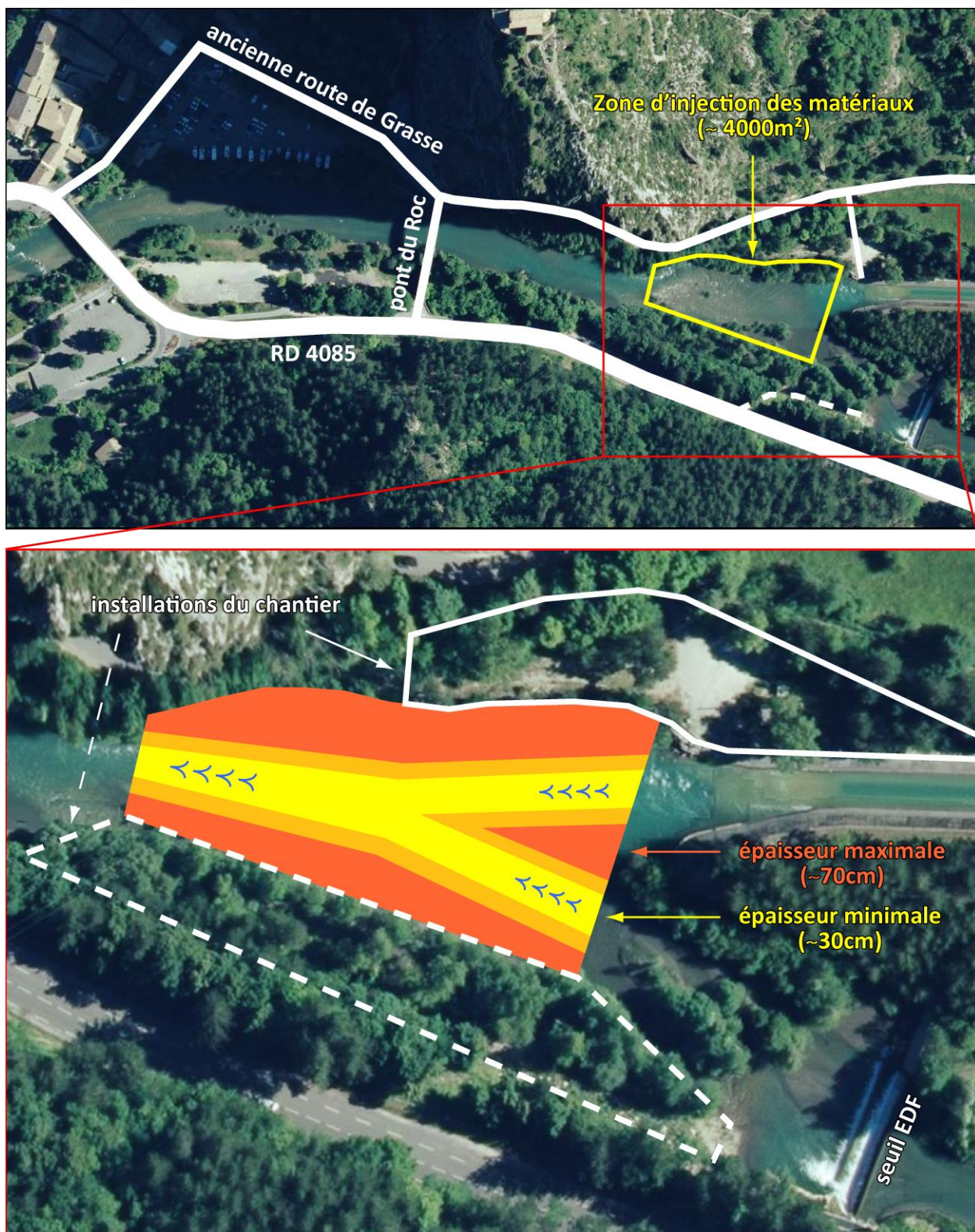


Figure 7. Vue en plan du site d'injection n°1 et de l'injection proposée

Les 2 000 m³ de matériaux criblés seront transportés par camions, ce qui représente environ 200 rotations (10 m³ par camion). Une rampe devra être aménagée pour accéder au site d'injection, a priori en rive droite où la berge est moins abrupte et où il y a davantage de place pour entreposer le matériel

voire stocker une partie des matériaux. (NB : un accès durable au site d'injection pourrait être éventuellement être aménagé dès la 1^{ère} année pour faciliter les injections ultérieures).

Les matériaux pourront alors être étalés dans le lit mineur au bulldozer. La zone de dépôt indiquée sur la **figure 7** s'étend sur 4 000 m², ce qui représente une épaisseur moyenne de dépôt de 50 cm. Il est néanmoins préférable de disposer les matériaux à une altitude variable de manière à concentrer les écoulements d'étiage dans des chenaux de basses eaux : un provenant du TCC, un autre provenant du canal de fuite de l'usine de Chaudanne et un dernier en aval de leur confluence.

Limites de la proposition et solutions alternatives :

- Cette proposition s'appuie sur les données topographiques à notre disposition (MNT établi à partir des levés LIDAR d'avril 2021, profil en long des fonds levés en 2016). Elles rendent bien compte de la topographie des surfaces exondées mais sont peu précises en ce qui concerne les zones en eau profonde. Un levé topographique dense des fonds du lit sur le site d'injection et en aval immédiat devra préciser l'implantation des matériaux.
- Une modélisation hydraulique sera nécessaire pour évaluer l'incidence du projet sur les lignes d'eau de crues. Précisons qu'il n'aura pas d'incidence immédiate sur les lignes d'eau aval. Son influence immédiate ne portera que sur les lignes d'eau amont et c'est le transport progressif des matériaux vers l'aval qui pourrait modifier les lignes d'eau aval.
- Si le projet proposé venait à rehausser significativement les lignes d'eau de crue en aval, donc le risque d'inondation de Castellane, une solution alternative consisterait à réduire le volume injecté (ex. : 1 000 m³) ou à déposer l'excédent sur le 2nd site d'injection.

4.3- Dossiers réglementaires

Préalablement à l'exécution des travaux, le projet devra recevoir l'ensemble des autorisations administratives. Les procédures concernées devront être validées auprès des services de l'Etat mais, compte tenu des travaux envisagés, il devrait s'agir d'un dossier de déclaration Loi sur l'Eau au titre de la rubrique 3.3.5.0 de la nomenclature IOTA.

Ce dossier d'autorisation environnementale doit permettre d'évaluer les incidences éventuelles du projet sur les milieux concernés. A ce titre, les services de l'état demandent généralement :

- La réalisation d'une modélisation hydraulique de l'impact des aménagements. Si les travaux sont situés dans l'emprise d'un PPRI, une modélisation des effets en lit majeur peut également être demandée.
- La réalisation d'inventaires faune/flore sur les emprises travaux.

A priori, il ne sera pas nécessaire d'établir une déclaration d'intérêt général (DIG) dans la mesure où les injections devraient être réalisées dans le cadre des actions du PPRE du bassin du Verdon, déjà couvert par une DIG. En revanche, une procédure de dérogation pour destruction d'espèce protégée pourrait être requise, si la présence de telles espèces est avérée.

4.4- Suivi morphologique ou écomorphologique

Un suivi devra être réalisé pour évaluer l'efficacité des travaux.

Le suivi s'appuiera en premier lieu sur des levés topographiques réguliers pour suivre les évolutions de l'altitude moyenne du fond du lit au droit du (ou des) site(s) d'injection et en aval. Ces mesures permettront ainsi de :

- programmer les injections futures, en fonction des vitesses d'érosion des fonds et de propagation des matériaux injectés vers l'aval ;
- ajuster les méthodes d'injection, en particulier les volumes à injecter voire également la taille des matériaux injectés et leur disposition ;
- vérifier si besoin les éventuelles conséquences sur les lignes d'eau de crue.

En complément des levés topographiques, un suivi de la composition granulométrique des fonds permettra également d'évaluer l'efficacité des travaux sur la qualité des substrats.

Le suivi proposé repose donc a minima sur les levés suivants, centrés sur la morphologie du lit :

- Levés de profils en travers tous les 10 m entre le seuil EDF et le pont du Roc et tous les 100 m entre le pont du Roc et le camping « Domaine du Verdon ». Il n'est pas utile de lever les berges pour ce suivi, le levé du fond du lit suffira. Les données collectées pour concevoir la 1^{ère} injection et les levés de récolement (après injection) constitueront l'état initial.
- Evaluation de la granulométrie dominante des fonds, sur 25 transects espacés de 100 m entre le seuil EDF et le camping « Domaine du Verdon » et à raison de 10 points de mesure par transect. Une 1^{ère} campagne devra être réalisée juste avant ou juste après la 1^{ère} injection (l'état des lieux réalisé dans le cadre de la présente étude reposait sur un protocole semblable mais l'espacement des transects était de 300 m).

Nous préconisons de répéter ces mesures tous les 2 à 3 ans environ. Mais leur fréquence doit être adaptée à l'historique des crues morphogènes. Le suivi des déversements du barrage de Chaudanne permettra d'évaluer l'intérêt d'effectuer des mesures.

Un suivi des peuplements piscicoles et invertébrés est également souhaitable. Les indicateurs biologiques ne peuvent pas servir à piloter les opérations de recharge sédimentaire parce qu'ils sont moins réactifs que les indicateurs morphologiques et qu'ils sont sensibles à d'autres facteurs tels que la qualité physico-chimique des eaux et les événements hydrologiques majeurs (étiage sévère ou crue importante). Mais ils permettent d'évaluer les gains biologiques à moyen terme. L'intérêt comme les modalités d'un suivi hydrobiologique seront à définir avec les partenaires techniques et financiers du projet.

Précisons que d'autres indicateurs permettraient encore de préciser les évolutions morphologiques, de faire le lien avec la biologie et/ou de servir de support de communication autour du projet. Ils n'ont pas été retenus afin d'alléger le protocole mais ils pourraient s'avérer utiles a posteriori :

- suivi des distances de transport des particules à l'aide de traceurs (PIT-tags) ;
- suivi des surfaces de granulométrie favorable au frai piscicole (recommandation du guide technique de l'AERMC pour l'élaboration et la mise en œuvre de plans de gestion sédimentaire) ;
- suivi du colmatage du substrat et/ou de l'oxygénation de la couche hyporhéique ;
- suivi de l'évolution de la bande active, voire des faciès d'écoulement.

4.5- Coût de l'opération

Les coûts prévisionnels de la 1^{ère} injection proposée sont indiqués dans le **tableau 3**. Ils ont été évalués sur la base des hypothèses et limites suivantes :

- criblage de 4 000 m³ pour obtenir les 2 000 m³ de matériaux nécessaires (soit 50% de graviers et cailloux parmi les matériaux exploités) ;
- le coût du prélèvement des matériaux est exclu car il est déjà pris en charge dans le cadre du plan de gestion de la queue de retenue de Castillon ;
- procédure réglementaire limitée à une demande d'autorisation environnementale sans inventaires faune/flore (cf. § 4.4) ;
- levés topographiques (ces données alimenteront également le suivi morphologique) :
 - sur la zone d'injection et en aval immédiat (jusqu'au pont du Roc) : profils en travers denses (tous les 10 m), levés deux fois pour dimensionner l'injection avant travaux puis pour décrire l'état initial du site après travaux ;
 - sur le tronçon aval (du pont du Roc au camping « Domaine du Verdon ») : profils en travers peu denses (tous les 100 m), levés une seule fois pour alimenter un modèle hydraulique (pour la conception du projet).

prestation	quantité	unité	P.U. (€ HT)	montant HT
Topographie avant/après travaux du site d'injection	56	profil	100	5 600
Topographie avant travaux du tronçon aval	23	profil	100	2 300
Maitrise d'œuvre - conception AVP/PRO	1	forfait	11 500	11 500
Dossiers réglementaires	1	forfait	5 000	5 000
Maitrise d'œuvre - ACT et suivi de chantier	1	forfait	6 500	6 500
Mesures ERC	1	forfait	8 000	8 000
Installation et repli du chantier	1	forfait	10 000	10 000
Criblage des matériaux	4 000	m ³	2.5	10 000
Chargement des matériaux	2 000	m ³	2.5	5 000
Transport des matériaux	2 000	m ³	20	40 000
Injection et agencement des matériaux	2 000	m ³	5.0	10 000
Total Hors Taxes				113 900

Tableau 3. Estimations des coûts pour une première injection sur le Moyen Verdon

Rappel : cette proposition étant dimensionnée par rapport au volume interannuel moyen, son coût est représentatif du coût annuel moyen d'un programme pluriannuel de recharge sédimentaire. Mais, compte tenu de la variabilité des années hydrologiques (et ses conséquences variables sur les évolutions

morphologiques du lit comme sur la disponibilité des matériaux en amont), il est impossible d'établir un tableau de programmation pluriannuelle précis. Les volumes à réinjecter chaque année et les coûts correspondants sont à définir sur la base d'un suivi morphologique.

Le **tableau 4** indique le coût approximatif d'une campagne de mesures pour le suivi morphologique. **Il s'agit a priori d'un coût annuel supplémentaire** mais on pourra en faire l'économie les années particulièrement peu morphogènes. Les coûts d'un éventuel suivi des populations piscicoles et invertébrés ne sont pas pris en compte.

prestation	quantité	unité	P.U. (€ HT)	montant HT
Topographie - Profils en travers	51	profil	100	5 100
Granulométrie - Transects	25	transect	200	5 000
Traitements et interprétation des résultats	1	forfait	2 000	2 000
Total Hors Taxes				12 100

Tableau 4. Estimations des coûts pour une campagne de mesure du suivi morphologique

BIBLIOGRAPHIE

Agence de l'eau Rhône-Méditerranée, 2023. Elaborer et mettre en œuvre un plan de gestion sédimentaire. Guide technique de SDAGE Rhône-Méditerranée 2022-2027.

Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) et Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER), 2021. Conditions de mobilisation des retenues hydroélectriques pour le soutien d'étiage dans le bassin Adour-Garonne. Rapport CGEDD n° 013099-01 et CGAAER n° 19109.

Dynamique Hydro, 2019. Etude de faisabilité pour la recharge sédimentaire du Bas et du Moyen Verdon.

Ecogea, 2017. Aménagements des zones favorables à la fraie des salmonidés dans le tronçon court-circuité de Hauteage sur la Maronne. Travaux 2016, suivi de la reproduction des salmonidés 2016 et bilan 2013-2016.

ETRM, 2008. Etude des prélèvements de matériaux dans la queue de retenue du lac de Castillon à Saint-André-les-Alpes.

Keith P., Persat H., Feunteun E., Allardi J. (coords.), 2011. Les poissons d'eau douce de France. Editeurs : Biotope, Muséum national d'histoire naturelle.

Loire R., Kondolf M., Malavoi J.-R., Melun G., Piégay H., 2021. Lâchers d'eau morphogènes. Guide de mise en œuvre. Publié par l'Office français de la biodiversité.

Maison régionale de l'Eau (MRE), 2019. Suivi environnemental du Verdon en aval de Chaudanne et de Gréoux suite aux augmentations des débits réservés. Bilan de 8 années de suivi 2009-2018.

Sogreah, ETRM, Sibenson Environnement, 2002-2003. Schéma global de gestion du Verdon.



www.dynamiquehydro.fr

Lyon

(siège social)
4 rue Chinard
69009 Lyon
04 78 83 68 89

Annecy

La Tuilerie - 541 route des Marais
74410 Saint-Jorioz
07 60 69 74 74

