

Maitre d'ouvrage :

Avec le soutien de :



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

Plan de gestion sédimentaire

Juin 2024



SOMMAIRE

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- Sectorisation hydromorphologique.....	5
2.2- Evolutions et état actuel du Bas Verdon	6
2.3- Intensité et conséquences du déficit sédimentaire.....	7
2.4- Evolution future en queue de retenue de Cadarache	8
3- Leviers de restauration	9
3.1- Vue d'ensemble et hiérarchisation	9
3.2- Intérêt et faisabilité de la recharge sédimentaire	9
3.2.1- Principes	9
3.2.2- Intérêt pour le Bas Verdon	10
3.2.3- Faisabilité.....	11
a) Sources potentielles de matériaux	11
b) Contraintes locales	13
c) Sites potentiels d'injection	14
d) Bilan sur la faisabilité.....	18
3.2.4- Eléments de dimensionnement.....	19
a) Définition des volumes à injecter	19
b) Composition granulométrique des matériaux à injecter.....	20
c) Agencement et mobilité des matériaux	20
d) Calendrier des injections	22
3.3- Intérêt et faisabilité des lâchers morphogènes	23
3.3.1- Principes	23
3.3.2- Intérêt pour le Bas Verdon	24
3.3.3- Eléments de dimensionnement.....	24
3.3.4- Faisabilité.....	24
3.4- Intérêt et faisabilité de restaurer un espace de mobilité	25
3.4.1- Principe.....	25
3.4.2- Intérêt pour le Bas Verdon	25
3.4.3- Faisabilité.....	27
a) Restauration intégrale du périmètre morphologique optimal	27
b) Restauration de l'espace de mobilité hors des zones habitées	27
4- Première proposition de travaux.....	27
4.1- Portée du projet et objectifs visés.....	27
4.2- Description des travaux.....	29
a) Recharge en aval du pont de Vinon	29
b) Recharge du TCC amont	30
c) Recharge du TCC aval	30
d) Limites des propositions et solutions alternatives	32
4.3- Dossiers réglementaires	32
4.4- Suivi morphologique ou écomorphologique	33
4.5- Coût de l'opération	34
BIBLIOGRAPHIE.....	37

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les 3 tronçons homogènes du Bas Verdon	6
Figure 2. Carte synthétique du déficit sédimentaire du Bas Verdon	7
Figure 3. Topographie actuelle de la queue de retenue de Cadarache et futurs tracés du Verdon.....	8
Figure 4. Exemples de recharge sédimentaire : a) sur le Buëch en aval du barrage de Saint-Sauveur (EDF) ; b et c) sur la Maronne en aval du barrage de Hautefage (Ecogea 2017)	10
Figure 5. Sites préférentiels de prélèvement des matériaux : localisation (a) et évaluation des volumes disponibles (b)	13
Figure 6. Sites préférentiels d'injection	15
Figure 7. Site d'injection n°1 : en amont (a) et en aval (b) du Colostre	16
Figure 8. Site d'injection n°2 : vue depuis l'amont (a) et long faciès lentique en aval du seuil (b)	17
Figure 9. Site d'injection n°3 : en aval immédiat du pont de Vinon (a) et en aval de la passerelle piétonne (b)	18
Figure 10. Schéma d'implantation type en bancs alternés	21
Figure 11. Schéma de principe des débits et durées nécessaires en fonction des objectifs visés par les lâchers morphogènes (Loire et al. 2021).....	23
Figure 12. Exemples de blocages de la mobilité latérale (flèches jaunes) par les ouvrages (pointillés rouges).....	26
Figure 13. Sites potentiels où restaurer l'espace de mobilité du Bas Verdon	28
Figure 14. Première recharge proposée en aval immédiat du pont de Vinon.....	29
Figure 15. Première recharge proposée aux environs de la confluence avec le Colostre	30
Figure 16. Première recharge proposée en aval immédiat du seuil de Gréoux : profil en long (a) et vue en plan (b). NB : les valeurs sur la vue en plan correspondent à des épaisseurs moyennes.....	31

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Hiérarchisation des périodes d'interventions plus ou moins favorables (en vert) et défavorables (en rouge) sur le Bas Verdon	22
Tableau 2. Estimations des coûts pour la recharge sédimentaire sur le site amont	35
Tableau 3. Estimations des coûts pour la recharge sédimentaire sur le site médian.....	35
Tableau 4. Estimations des coûts pour la recharge sédimentaire sur le site aval	36
Tableau 5. Estimations des coûts pour une campagne de mesure du suivi morphologique.....	36

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) porteur 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 D20 qui prévoit de mettre en œuvre une gestion hydraulique de la retenue de Cadarache (pour limiter les atterrissements en queue de retenue et le relèvement consécutif des lignes d'eau de crue en amont) ;
- 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 Bas Verdon. Il est organisé comme suit :

- La 2^{ème} section du rapport 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 Bas Verdon.

2.1- Sectorisation hydromorphologique

Dans le secteur d'étude, nous distinguons 3 tronçons homogènes (**figure 1**). Cette sectorisation est fondamentale pour comprendre les évolutions antérieures et futures de la morphologie de la rivière.

Le premier tronçon (« TCC amont ») s'étend du pied du barrage d'Esparron au seuil de Gréoux. Il s'agit d'un tronçon de transition entre les gorges étroites et encaissées en amont et la véritable plaine alluviale du Verdon en aval. La largeur de son fond de vallée est variable (entre 50 et 500m) mais globalement modeste (moins de 200 m en moyenne).

Le deuxième tronçon (« TCC aval ») correspond à la large plaine alluviale des Iscles où le Verdon développait autrefois un lit en tresses. Il est désormais endigué avec un tracé essentiellement rectiligne.

Le troisième tronçon (« aval Vinon ») débute en aval de la restitution de l'usine hydroélectrique de Vinon. D'un point de vue hydrologique, il présente un régime plus intense du fait des fréquentes éclusées de l'usine. Mais d'un point de vue morphologique, il est semblable au tronçon précédent avec un tracé rectiligne cerné par des digues au sein d'une large plaine alluviale.

Ces 3 tronçons sont séparés par 2 resserrements ponctuels du fond de vallée où la roche mère affleure et forme des seuils rocheux (le seuil de Gréoux étant fondé sur la roche). Ces discontinuités ont une influence majeure sur l'évolution du Verdon : au droit de ces discontinuités, la mobilité latérale de la rivière est réduite et son profil en long est tenu par les points durs que constituent les seuils rocheux.

L'extrémité aval du 3^{ème} tronçon est enfin sous l'influence du barrage de Cadarache et de sa retenue.

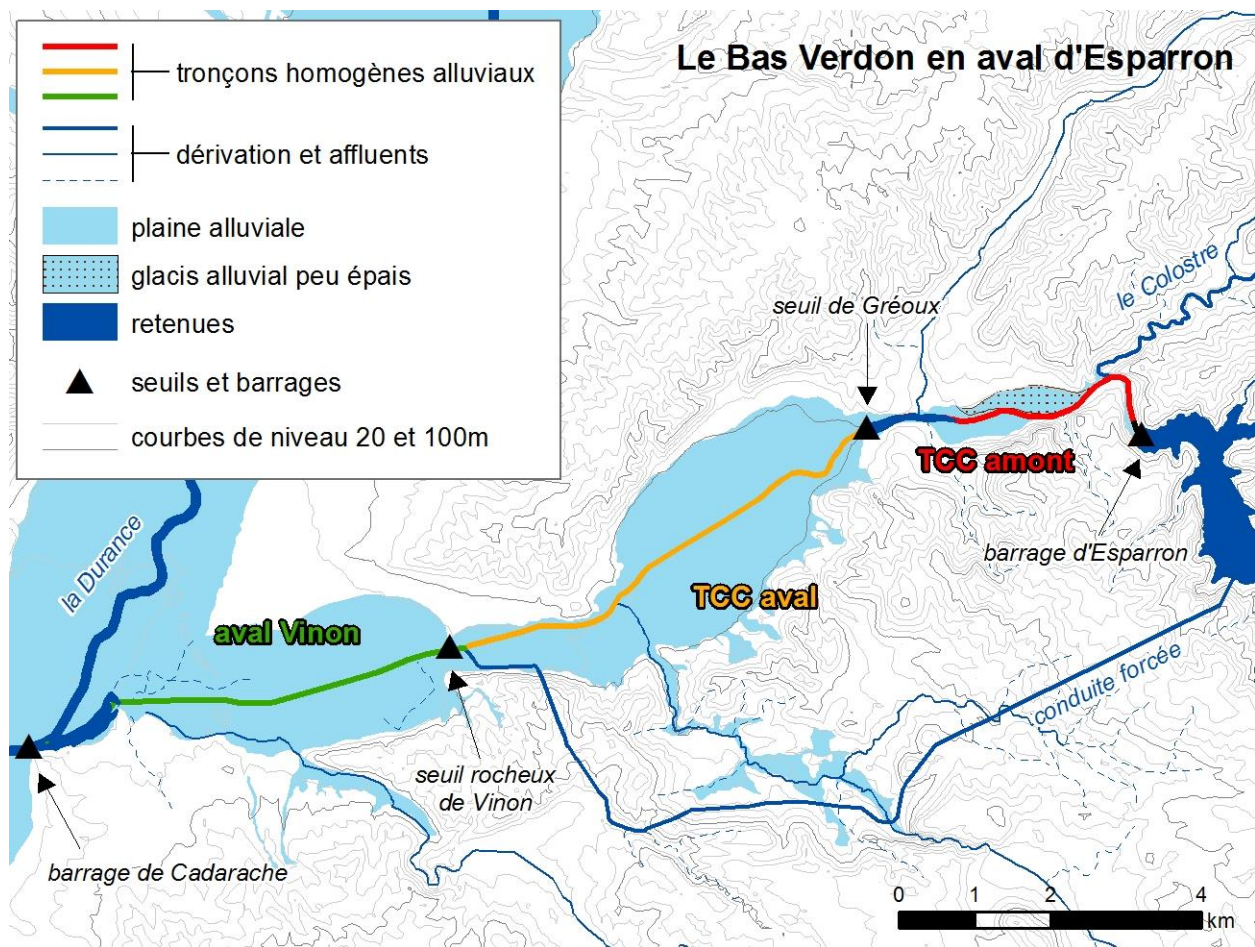


Figure 1. Les 3 tronçons homogènes du Bas Verdon

2.2- Evolutions et état actuel du Bas Verdon

Les évolutions morphologiques du Bas Verdon depuis la fin du 19^{ème} siècle ont été les suivantes :

- forte rétraction de la bande active ;
- incision du lit ;
- dégradation des substrats (qualité et diversité des matériaux constituant les fonds du lit).

Ces évolutions ont affecté l'ensemble du secteur d'étude mais elles ont été plus ou moins prononcées selon les tronçons.

Le TCC amont avait dès l'origine un caractère alluvial moins prononcé que les 2 tronçons aval, le fond de vallée étant plus étroit et la roche mère moins profonde. Par conséquent, la contraction de la bande active a été relativement moins intense et l'incision du lit rapidement stoppée. Mais le stock d'alluvions désormais très faible se traduit par une granulométrie grossière des fonds et de nombreux affleurements rocheux. La qualité des substrats est donc fortement dégradée. Localement, on observe néanmoins de petits faciès à granulométrie favorable pour la fraie piscicole qui proviennent vraisemblablement du Colostre.

Dans les 2 tronçons aval, l'enfoncement du lit a été maximal à leurs extrémités amont alors que leurs extrémités aval, tenues par le seuil de Vinon et la retenue de Cadarache, sont restées à peu près stables

verticalement. De la même manière, on observe un gradient longitudinal très prononcé des habitats physiques au sein de chacun de ces tronçons : la qualité et la diversité des substrats et des macro-formes fluviales (bancs, faciès d'écoulement) s'améliorent vers l'aval.

Le TCC aval se distingue par une bande active plus étroite et la présence, dans sa partie médiane, de bancs massifs et végétalisés que le Verdon ne parvient pas à rajeunir et remobiliser. Cela s'explique en partie par la rareté des crues morphogènes mais également par l'incision du lit mineur dont les marges alluviales sont désormais perchées.

Le tronçon aval Vinon se distingue par ses fréquentes éclusées qui génèrent davantage de transport solide que dans le TCC. L'incision du lit est ainsi un peu plus prononcée au pied du seuil de Vinon qu'au pied du seuil de Gréoux. Et elle a encore récemment progressé (-30 cm depuis 2010 sur 1,2 km en aval du seuil de Vinon).

2.3- Intensité et conséquences du déficit sédimentaire

Les évolutions décrites ci-avant résultent essentiellement d'un déficit sédimentaire, c'est-à-dire d'un déséquilibre entre les flux liquides et solides. Ce déficit provient de la déconnexion du Bas Verdon avec les sources sédimentaires amont depuis la construction des barrages. Dans les 2 tronçons aval, il a également été renforcé par la rectification et l'endiguement du lit qui augmentent l'énergie des écoulements tout en empêchant l'érosion des berges.

La **figure 2** ci-dessous représente l'importance du déficit sédimentaire acquis par le Bas Verdon au cours du dernier siècle. De manière très schématique, on peut considérer qu'elle représente également le niveau de dégradation de la morphologie de la rivière et de son état écologique. Sur chacun des 3 tronçons homogènes, le déficit sédimentaire est important à l'amont alors que leur extrémité aval est plus ou moins en équilibre voire en léger excédent (effet des ouvrages).

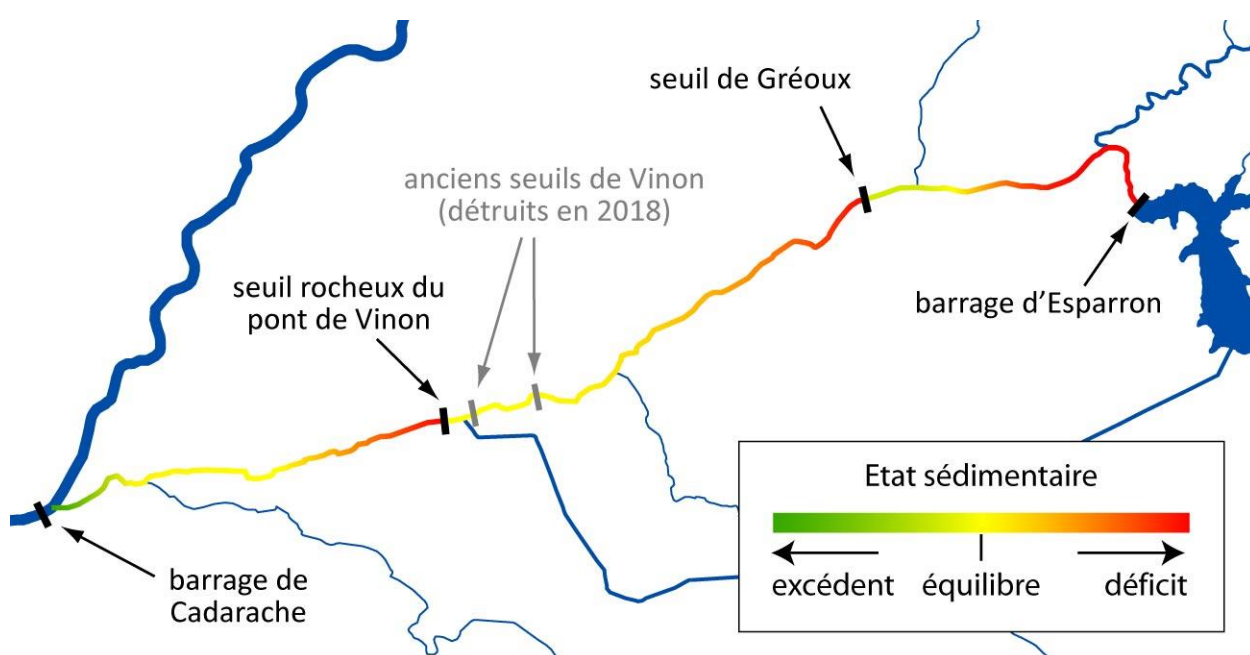


Figure 2. Carte synthétique du déficit sédimentaire du Bas Verdon

Les conséquences du déficit sédimentaire sont les suivantes :

- une dégradation de la qualité physique des habitats aquatiques et riverains ;
- un risque de déstabilisation des ouvrages riverains, en particulier en aval proche des seuils de Vinon et de Gréoux ;
- une moindre capacité d'auto-épuration des eaux et d'auto-entretien du lit (vis-à-vis de la végétation), cette dernière tendance étant encore renforcée par les crues moins fréquentes.

2.4- Evolution future en queue de retenue de Cadarache

Une défluviation importante risque de se produire à l'extrémité aval du Bas Verdon, entre le début de la forêt domaniale et la retenue de Cadarache, où le lit du Verdon est perché d'environ 2 m par rapport à celui de la Louane (**figure 3**). Il est difficile de prédire quand pourrait avoir lieu cette défluviation. Mais, à long terme, les conséquences seront les suivantes :

- au nord : capture de la Louane par le Verdon ;
- au sud : assèchement de la forêt alluviale où les essences pionnières de bois tendre (peupliers, saules...) seront progressivement remplacées par des essences de bois durs (frênes, ormes, chênes...) ;
- en amont : risque d'incision régressive et donc d'affouillement des digues.

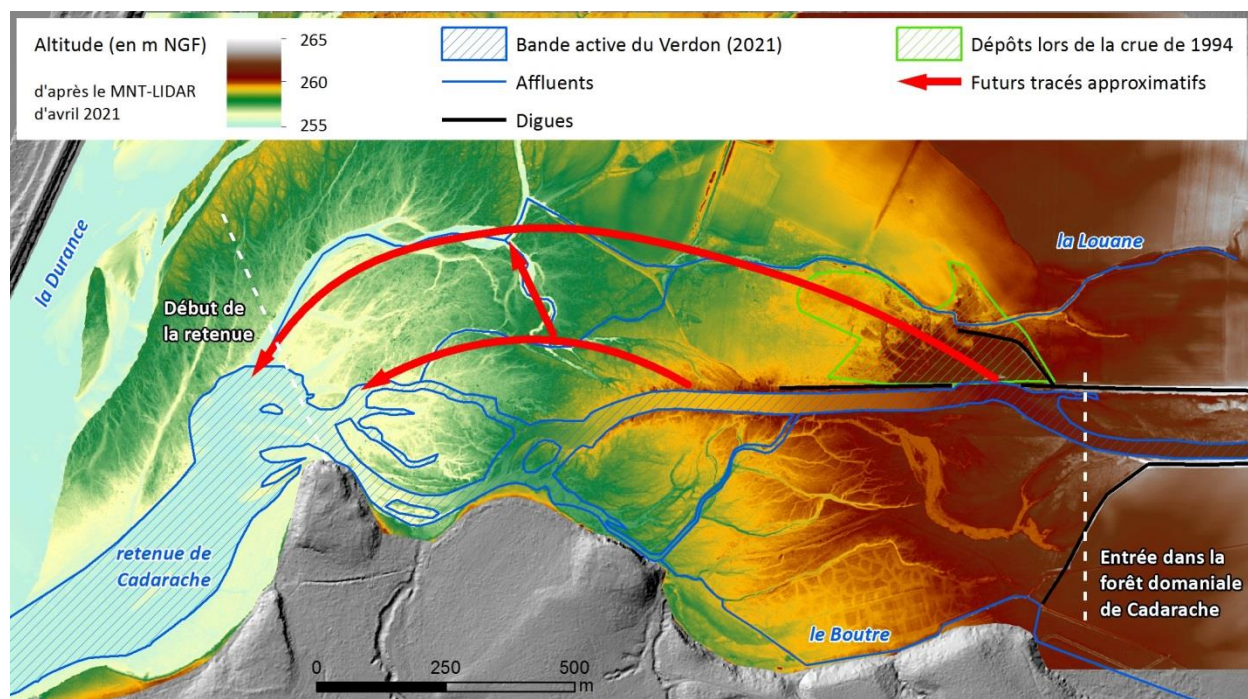


Figure 3. Topographie actuelle de la queue de retenue de Cadarache et futurs tracés du Verdon

3- Leviers de restauration

3.1- Vue d'ensemble et hiérarchisation

Compte tenu des dysfonctionnements et enjeux constatés, nous identifions 3 leviers pour restaurer le Bas Verdon :

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

La recharge sédimentaire est à la fois le levier le plus efficace et le plus efficient (moins coûteux). Les 2 autres leviers présentent un intérêt variable selon les tronçons et les moyens qu'on leur alloue :

- La restauration d'un espace de mobilité concerne principalement les tronçons aval. Elle suppose de très lourds investissements compte tenu de leur endiguement quasi-généralisé et de l'exploitation des terres riveraines.
- Les lâchers morphogènes ont davantage d'intérêt pour le TCC aval. Pour être efficaces, ils doivent être suffisamment intenses et réguliers. Ils doivent également être réalisés après essartement et arasement des bancs massifs et végétalisés.

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

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 (tels que les forêts alluviales) ;
- 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.

La fréquence et les volumes injectés sont variables selon les objectifs visés et les sources de matériaux exploitées. Dans le cas d'une réinjection ponctuelle des sédiments accumulés d'une retenue d'un

barrage amont, les volumes sont généralement importants, comme par exemple sur le Buëch en aval du barrage de Saint-Sauveur (**figure 4a**). Lorsqu'il s'agit de recréer des substrats favorables à la faune aquatique, on procède généralement à des injections régulières de volumes plus modestes. C'est par exemple le cas sur 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 réalisés pour reconstituer des frayères à salmonidés (**figures 4b et 4c** ; Ecogea 2017).



Figure 4. Exemples de recharge sédimentaire : a) sur le Buëch en aval du barrage de Saint-Sauveur (EDF) ; b et c) sur la Maronne en aval du barrage de Hautefage (Ecogea 2017)

3.2.2- Intérêt pour le Bas Verdon

La recharge sédimentaire est le 1^{er} levier de restauration sur le Bas 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 les digues, en particulier en aval immédiat du seuil de Vinon où l'incision a encore récemment progressé.

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).

Précisons néanmoins que l'injection de sédiments ne suffira pas à elle seule à rétablir la capacité d'auto-entretien du TCC aval. Pour cela, il faut également araser les formations alluviales les plus hautes et les plus végétalisées. Mais c'est bien ce qui est proposé car ces formations sont les principales sources sédimentaires (§ 3.2.3.a).

3.2.3- Faisabilité

a) Sources potentielles de matériaux

Le Bas Verdon est trop éloigné des barrages amont, qui bloquent l'essentiel de la charge solide du Verdon, pour envisager de réinjecter les matériaux qui se déposent dans leurs queues de retenue. Les sources locales potentielles de matériaux correspondent toutes aux stocks alluviaux du Bas Verdon lui-même. Cela peut paraître contradictoire avec le déficit sédimentaire mais ces stocks ne sont pas toujours remobilisables spontanément par la rivière.

Dans l'ordre décroissant d'intérêt à les exploiter, il s'agit des 3 sources suivantes (**figure 5a**) :

- **Bancs et basses terrasses de la partie médiane du TCC** : de grandes quantités de matériaux sont disponibles au sein de l'espace inter-digue entre la station d'épuration de Gréoux et le collet des Fourches (PK 4,8 à 8). Il s'agit de grands bancs végétalisés, peu mobiles, et parfois si haut perchés par rapport au lit mineur qu'ils s'apparentent davantage à de basses terrasses alluviales. Nous recommandons d'exploiter en priorité cette source de matériaux en ciblant préférentiellement les atterrissements les moins mobiles voire les plus limitants vis-à-vis de la capacité hydraulique. Outre la disponibilité des matériaux, exploiter cette source présente 3 avantages :
 - cela permet de limiter les coûts et les impacts écologiques des travaux dans la mesure où une partie de ces travaux sont déjà prévus par le plan pluriannuel d'entretien du lit et des berges du Bas Verdon (installation des chantiers, défrichements, terrassements, DIG et autorisation, le cadre réglementaire sera toutefois à vérifier avec la DDT) ;
 - le dégraissage par arasement des bancs massifs et végétalisés permettrait de rétablir plus efficacement la capacité d'auto-entretien de ce tronçon ;
 - cela permettrait accessoirement de réduire l'aléa inondation sur les terres riveraines en augmentant la capacité hydraulique de l'espace inter-digue.
- **Atterrissements autour de la déchetterie et de la STEP de Gréoux** : les matériaux accumulés sous et autour de ces 2 équipements forment une large protubérance qui renvoie le Verdon sur la rive opposée. Ils sont composés pour partie d'alluvions et pour partie de

remblais provenant de chantiers réalisés dans les années 80 (Préfecture des Alpes de Haute Provence, 2014). Une partie de ces matériaux pourrait être retirée pour recharger le lit et limiter l'érosion de la rive opposée. Mais nous ignorons la nature et l'emprise exactes des matériaux constituant les remblais. Tant que la STEP et de la déchetterie resteront en place, il faudra conserver une marge raisonnable entre elles et la zone d'emprunt des matériaux, ce qui limite les volumes exploitables. On peut encore envisager de les déplacer et d'évacuer les éventuels remblais impropres pour restaurer entièrement l'EBF, auxquels cas les volumes seront importants.

- **Queue de retenue de Cadarache (rive gauche)** : jusqu'en 1994, l'essentiel de la charge de fond en transit dans le Bas Verdon s'accumulait dans la queue de retenue de Cadarache, en particulier en rive gauche (au sud) car une digue canalisait les écoulements en rive droite. Malgré la largeur importante du site, les volumes disponibles sont plus faibles que sur les autres sites car les dépôts sont peu épais, d'autant plus que les terrains en rive droite sont plus bas que le lit du Verdon (cf. § 2.4). Et nous ne recommandons pas de les prélever car la plupart de ces dépôts se situent dans le périmètre de la forêt domaniale de Cadarache, classée réserve biologique dirigée pour sa flore et sa faune remarquables. Il s'agit effectivement d'un des rares endroits où la plaine du Verdon n'est pas exploitée, ce qui a permis le développement d'une forêt alluviale parcourue par des bras morts ou secondaires. Précisons néanmoins que cette zone pourrait s'assécher et se transformer en forêt de bois durs suite à la défluviation du Verdon (cf. § 2.4). A termes, elle pourrait donc perdre une partie de son intérêt écologique ou du moins son caractère alluvial qui fait sa spécificité.

A mesure que la morphologie du Verdon évoluera, d'autres dépôts alluviaux pourraient éventuellement être prélevés au sein du lit moyen. De manière générale, il faudra privilégier les bancs les moins mobiles caractérisés par de grandes dimensions et un degré de végétalisation élevé. Ce pourrait par exemple devenir le cas des bancs situés en amont de la retenue du seuil de Gréoux si ce dernier était effacé. Suite à de petites crues, trop faibles pour éroder les bancs mais assez intenses pour éroder le fond du lit et entraîner son incision, ces bancs pourraient éventuellement se retrouver perchés. Le cas échéant, il serait opportun de les araser pour augmenter leur mobilité et recharger le lit.

Mais les volumes disponibles sur les sites présélectionnés sont déjà considérables. Nous les avons évalués en considérant une cote d'arase de 1 mètre au-dessus de la ligne d'eau d'étiage (équivalente au débit réservé du TCC). Il s'agit donc des volumes que l'on peut récupérer en arasant tous les atterrissements à cette cote (**figure 5b**). Le 1^{er} site représente un peu plus de 200 000 m³, soit environ 50 ans de transport solide. Le 2^{ème} site, dont la superficie est pourtant faible, représente à lui seul environ 140 000 m³ et le 3^{ème} site représente environ 100 000 m³. Cette cote d'arase n'est pas nécessairement optimale. Il s'agit plutôt d'une valeur haute que l'on pourra revoir à la baisse (par exemple 50 cm).

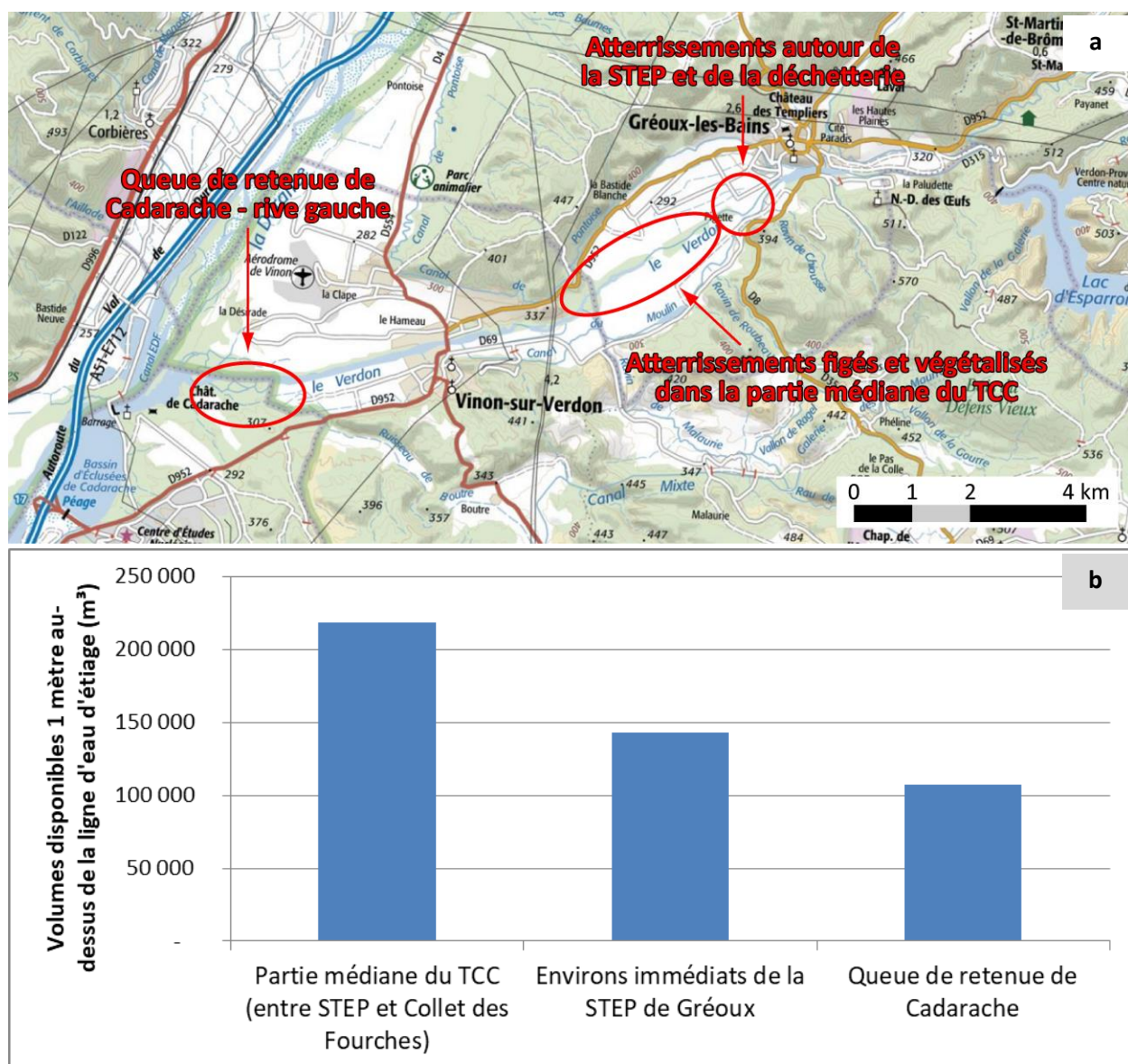


Figure 5. Sites préférentiels de prélèvement des matériaux : localisation (a) et évaluation des volumes disponibles (b)

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 :

- les zones urbaines de Gréoux-les-Bains et de Vinon-sur-Verdon où se concentrent la plupart des activités humaines ;
- les parcelles agricoles qui bordent la rivière sur la quasi-totalité des tronçons étudiés, excepté à ses extrémités amont (fond de vallée étroit au pied du barrage d'Esparron) et aval (forêt alluviale de Cadarache) et dans les traversées urbaines ;
- le stade d'eaux vives en aval immédiat du pont de Vinon (RD 554) ;
- le seuil EDF de Gréoux (ou « boudin de Gréoux ») qui devrait prochainement disparaître.

L'impact potentiel sur les activités riveraines, urbaines ou agricoles, 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 ;
- en adaptant la mobilité des matériaux injectés en fonction de leur site d'injection (de manière à éviter leur accumulation au droit de ces enjeux).

De manière générale, la capacité hydraulique du lit du Bas Verdon est largement suffisante pour permettre d'injecter des quantités significatives sans entraîner de sur-inondation des terres riveraines.

L'impact potentiel sur le stade d'eaux vives de Vinon est de diminuer sa fonctionnalité en cas de dépôt important de matériaux. Mais dès lors qu'on n'injecte pas de matériaux directement sur ce site, et une faible épaisseur sur le chenal principal au droit de celui-ci, le risque est quasi-inexistant compte tenu de sa configuration (il n'occupe qu'une partie de la largeur du lit et est légèrement surélevé par rapport au chenal principal).

L'impact potentiel sur le seuil de Gréoux et sur les aménagements connexes (prises d'eau) est négligeable. L'ouvrage est effectivement équipé de vannes de dégrèvement (actuellement inutilisées compte tenu du très faible transport solide). Rappelons néanmoins que l'effacement de cet ouvrage bénéficierait à l'équilibre morphodynamique des tronçons aval. Ces derniers profiteraient alors des apports modestes mais intéressants du Colostre et d'une partie des matériaux stockés dans la retenue, estimée à 10 000 m³ (Artelia 2015). Ils profiteraient également davantage des injections réalisées en amont.

Il n'y a donc pas de contrainte majeure à une injection sédimentaire.

c) Sites potentiels d'injection

Nous proposons 3 sites d'injection qui correspondent à l'extrémité amont de chaque tronçon homogène (**figure 6**).

Il y a un intérêt certain à reconstituer un matelas alluvial sur ces 3 sites compte tenu de leur état de dégradation très avancé. Mais cette proposition vise surtout à restaurer assez rapidement une grande partie du Bas Verdon en diffusant progressivement vers l'aval les matériaux injectés sur chacun des tronçons.

Ces sites sont numérotés de l'amont vers l'aval et nous les décrivons dans le même ordre. Leur numéro ne représente pas un ordre de priorité.

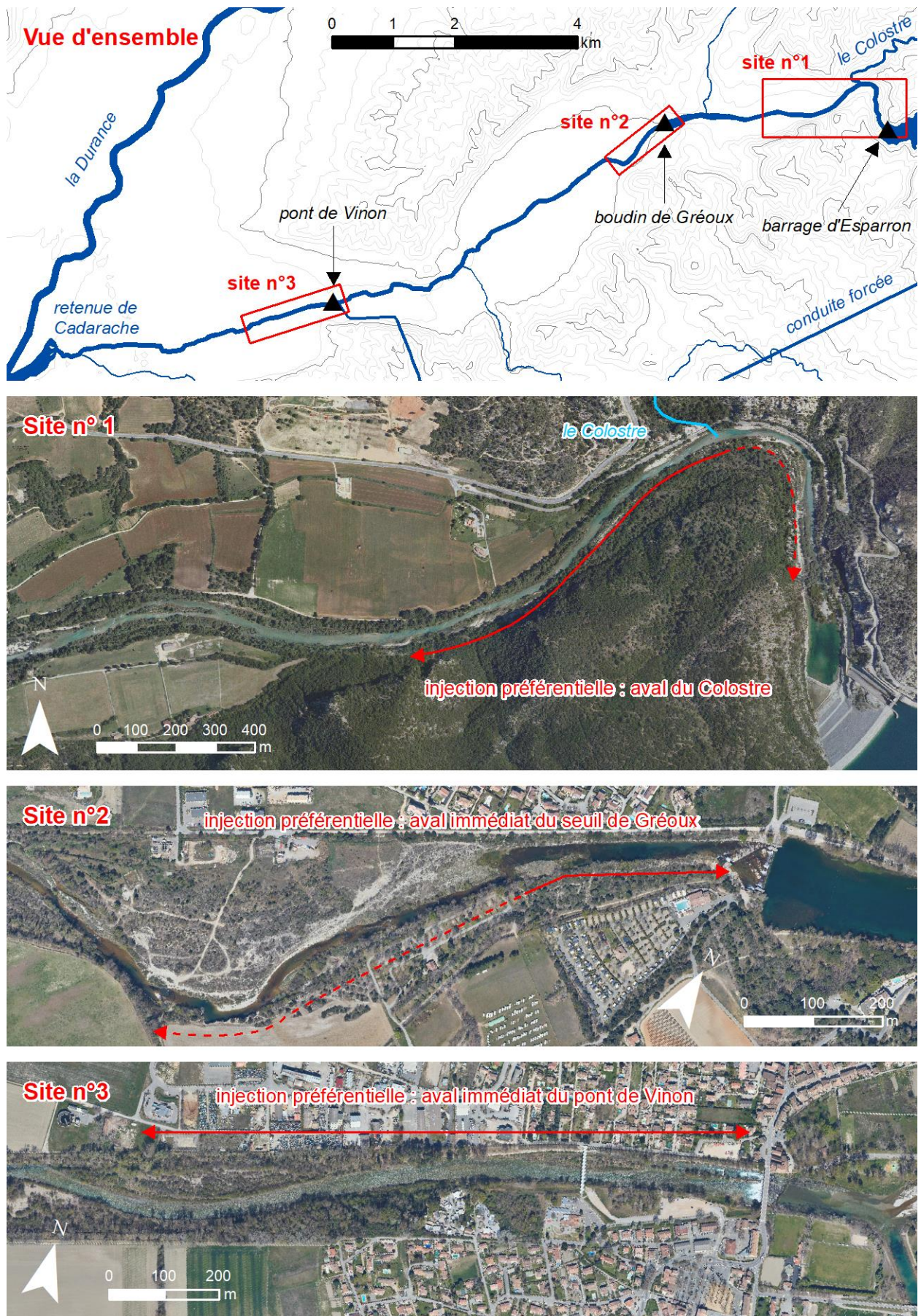


Figure 6. Sites préférentiels d'injection

Le 1^{er} site d'injection se situe en aval immédiat de la confluence avec le Colostre. On peut également déposer une partie des matériaux plus en amont mais les crues morphogènes y sont plus rares alors que les matériaux déposés en aval du Colostre seront remaniés plus fréquemment grâce aux crues de ce dernier (tous les 1 à 2 ans). Cela permettra de les diffuser plus rapidement vers l'aval, donc de restaurer plus rapidement les substrats du TCC amont. Le fond du lit est en grande partie constitué d'affleurements rocheux sous forme de dalles inondées, de rochers protubérants ou de banquettes exondées en rive droite (**figure 7**). Ces substrats relativement lisses pourraient encore favoriser la mobilité des particules comme l'avait montré l'expérimentation menée en 2017 par l'AAPPMA Verdon-Colostre avec le soutien de la FDPPMA des Alpes de Haute Provence (FDPPMA 04, 2017). Ce site présente l'avantage d'être éloigné de toutes implantations humaines, ce qui permet de déposer de grandes quantités sans entrainer de sur-inondation (la route et les quelques habitations sont perchées très haut par rapport au Verdon). L'accès peut se faire par l'amont via la piste EDF ou par l'aval via le chemin de la Haute Palud.



Figure 7. Site d'injection n°1 : en amont (a) et en aval (b) du Colostre

Le 2^{ème} site débute au pied du seuil de Gréoux où le substrat et, de manière plus générale, les habitats aquatiques sont particulièrement dégradés. Il est entouré par un quartier résidentiel en rive droite et par un camping en rive gauche. Et le lit n'est pas très large mais son encaissement vertical est important, suite à son incision, ce qui limite les risques de sur-inondation. Il commence d'ailleurs par un faciès lentique très profond (>2m en étiage) sur près de 300 m, ce qui permet d'injecter d'assez grandes quantités de matériaux sans même modifier la ligne d'eau d'étiage (**figure 8b**). On peut également déposer des matériaux plus en aval et notamment jusqu' au droit de la STEP de Gréoux où la rive gauche est fortement érodée. Au-delà de la recharge sédimentaire du fond du lit, cela contribuera à rééquilibrer le profil en travers et donc à soulager un tant soit peu l'érosion de cette berge. L'accès à ce site est plus difficile que les 2 autres. Il peut éventuellement se faire par l'amont, via la piste menant au camping en rive gauche, mais celle-ci est étroite. Il semble préférable de passer par l'aval, depuis la déchetterie de Gréoux, puis d'aménager une piste provisoire dans le lit.



Figure 8. Site d'injection n°2 : vue depuis l'amont (a) et long faciès lentique en aval du seuil (b)

Le 3^{ème} site débute en aval immédiat du pont de Vinon. Outre la dégradation avancée du substrat, l'intérêt d'une injection sur ce site est encore renforcé par l'incision qui a encore progressé depuis 2010. Le lit est à la fois large et très encaissé, si bien que le risque de sur-inondation lié aux injections est négligeable. L'accès au site est très facile par la rive gauche (figure 9a).



Figure 9. Site d'injection n°3 : en aval immédiat du pont de Vinon (a) et en aval de la passerelle piétonne (b)

d) Bilan sur la faisabilité

Le déficit sédimentaire important du Bas Verdon et ses conséquences sur la stabilité du profil en long comme sur la qualité des habitats aquatiques justifient une recharge sédimentaire significative.

La fourniture sédimentaire étant quasiment nulle, il faudra recharger le lit régulièrement pour compenser le déficit sur le long terme. Une première recharge massive permettrait déjà de le faire à

moyen terme et de restaurer rapidement la qualité des habitats aquatiques. De plus, cette solution semble préférable à des recharges modestes mais très fréquentes d'un point de vue écologique (moins de nuisances) et économique (économies d'échelle).

Les sites d'injection proposés permettent de faire l'un et l'autre. Leur capacité est suffisante pour déposer d'importants volumes de matériaux sans engendrer de nuisances majeures sur les activités humaines. Le site le plus à l'amont est optimal parce que les matériaux injectés bénéficieront à la totalité du Bas Verdon et parce qu'il est éloigné des principales activités humaines, ce qui limitera les nuisances. Mais les matériaux ne parviendront pas avant longtemps aux tronçons aval. Dans un premier temps, il est donc préférable d'injecter des matériaux sur les 3 sites, c'est à dire à l'extrémité amont de chacun des tronçons homogènes.

C'est principalement la disponibilité des matériaux qui conditionnera l'ampleur et la fréquence des injections. En l'absence de sources externes relativement proches (comme les alluvions du lac de Castillon pour le Moyen Verdon), il faut exploiter les matériaux de la plaine alluviale du Bas Verdon. De manière caricaturale, cela revient à déshabiller certains sous-tronçons pour en restaurer d'autres. Mais il s'agit surtout de rendre à nouveau disponibles des stocks peu ou pas mobilisables spontanément par la rivière. Et ces stocks sont considérables. Les atterrissements présents dans la partie médiane du TCC constituent vraisemblablement la meilleure source car leur arasement permettrait de restaurer une morphologie plus favorable à l'auto-entretien du lit et au rajeunissement de la bande active. Par ailleurs, il est préférable d'araser les atterrissements qui seront défrichés dans le cadre du plan d'entretien du lit et des berges pour ne pas contrecarrer celui-ci et pour limiter encore les coûts et les nuisances. Par conséquent, nous préconisons de programmer et de concevoir les prélèvements comme les injections en fonction du plan d'entretien du lit et des berges du Bas Verdon.

3.2.4- Eléments de dimensionnement

a) Définition des volumes à injecter

La capacité de transport annuelle moyenne du Bas Verdon serait d'environ 1 500 m³/an dans le TCC et 4 000 m³/an en aval de la restitution de Vinon d'après Sogreah et al. (2002). Il s'agit a priori de valeurs minimales dans la mesure où leurs estimations ne tiennent pas compte des crues du Colostre.

Il faudrait donc injecter plus de 1 500 m³/an dans le TCC et 4 000 m³/an en aval de Vinon pour compenser le futur déficit sédimentaire de ces tronçons. Mais ces volumes ne permettront pas de restaurer le déficit acquis depuis plusieurs décennies. Compte tenu de l'importance de ce dernier, nous recommandons d'injecter annuellement 9 000 m³ répartis à peu près comme suit :

- ≥ 2 000 m³/an dans le 1^{er} tronçon homogène (TCC amont) ;
- ≥ 2 000 m³/an dans le 2^{ème} tronçon homogène (TCC aval) ;
- ≥ 5 000 m³/an dans le 3^{ème} tronçon homogène (aval Vinon).

Rapporté à la superficie totale de la bande active du Bas Verdon, ce volume global de 9 000 m³/an représente une épaisseur moyenne d'environ 1,5 cm/an. Il pourra être ajusté sur la base d'un suivi morphologique.

Ces volumes sont surtout des moyennes interannuelles. On sait que le déficit sédimentaire est négligeable certaines années, notamment dans le TCC comme l'a montré la comparaison des profils en long de 2010 et 2016. En revanche, la capacité de transport serait de l'ordre de 5 000 m³ pour une seule

crue décennale et 40 000 m³ 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 lors d'une année donnée et il n'est 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 périodes hydrologiquement faibles (c'est-à-dire plus que le déficit sédimentaire supposé) et au contraire un peu plus de matériaux lors des périodes hydrologiquement fortes (moins que le déficit sédimentaire supposé). Mais 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.

La capacité d'accueil des sites d'injection présélectionnés (cf. § 3.2.3.c) est largement suffisante pour y déposer davantage de matériaux sans modifier sensiblement les lignes d'eau de crue. On peut donc procéder à des injections plus importantes et moins fréquentes (ex. : 45 000 m³ tous les 5 ans soit la durée d'un contrat de rivière) de manière à s'adapter aux évolutions morphologiques du lit tout en faisant des économies d'échelle. En pratique, il faudra effectivement s'adapter aux volumes disponibles au droit des zones d'emprunt.

b) Composition granulométrique des matériaux à injecter

Nous recommandons de favoriser l'hétérogénéité des matériaux injectés tout en minimisant la proportion d'alluvions fines.

L'injection de matériaux hétérogènes en taille, c'est-à-dire peu triés, favorisera leur dispersion : les plus grandes particules, peu mobiles, resteront un peu plus longtemps aux environs immédiats du site d'injection alors que les petites se diffuseront un peu plus rapidement en aval. Cela permettra de recharger le lit localement et à l'échelle du tronçon.

Il faut néanmoins privilégier les alluvions dites grossières (pierres, cailloux et graviers de diamètre supérieur à 2 mm) et minimiser la proportion d'alluvions fines (sables et limons de diamètre inférieur à 2 mm) pour augmenter l'efficacité et l'efficience des injections. Les alluvions fines sont peu efficaces pour restaurer les habitats aquatiques du Bas Verdon, leur injection en grandes quantités pourrait même augmenter le degré de colmatage de certains substrats. Elles sont très rapidement évacuées vers l'aval, ce qui augmenterait inutilement la fréquence des injections. Les sources sédimentaires les plus intéressantes en termes de volumes sont a priori les plus riches en alluvions fines (couches supérieures des bancs massifs, perchés et végétalisés). Dans certains cas, il pourrait donc être nécessaire de trier les matériaux avant leur injection.

La présence de particules très grossières (blocs) ne pose pas de problèmes tant qu'elle reste faible.

c) Agencement et mobilité des matériaux

Il est préférable de déposer les matériaux directement dans le lit mineur dans la mesure où les crues sont peu fréquentes sur le Bas Verdon, en particulier dans le TCC. 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, ce qui limitera leur mobilité ultérieure. Les bénéfices escomptés par les injections seraient donc retardés.

Pour recharger de manière durable les sites d'injection eux-mêmes, on peut modérer la vitesse de transport des matériaux injectés vers l'aval en les agencant sous une forme relativement stable. On peut

notamment constituer un matelas alluvial d'épaisseur à peu près homogène mais importante (≥ 50 cm). On peut également reconstituer des séquences de bancs alternés pour diversifier plus rapidement les écoulements.

Nous proposons ainsi une implantation type qui correspond à une séquence de 2 bancs alternés entre lesquels sinue un lit d'étiage (**figure 10**).

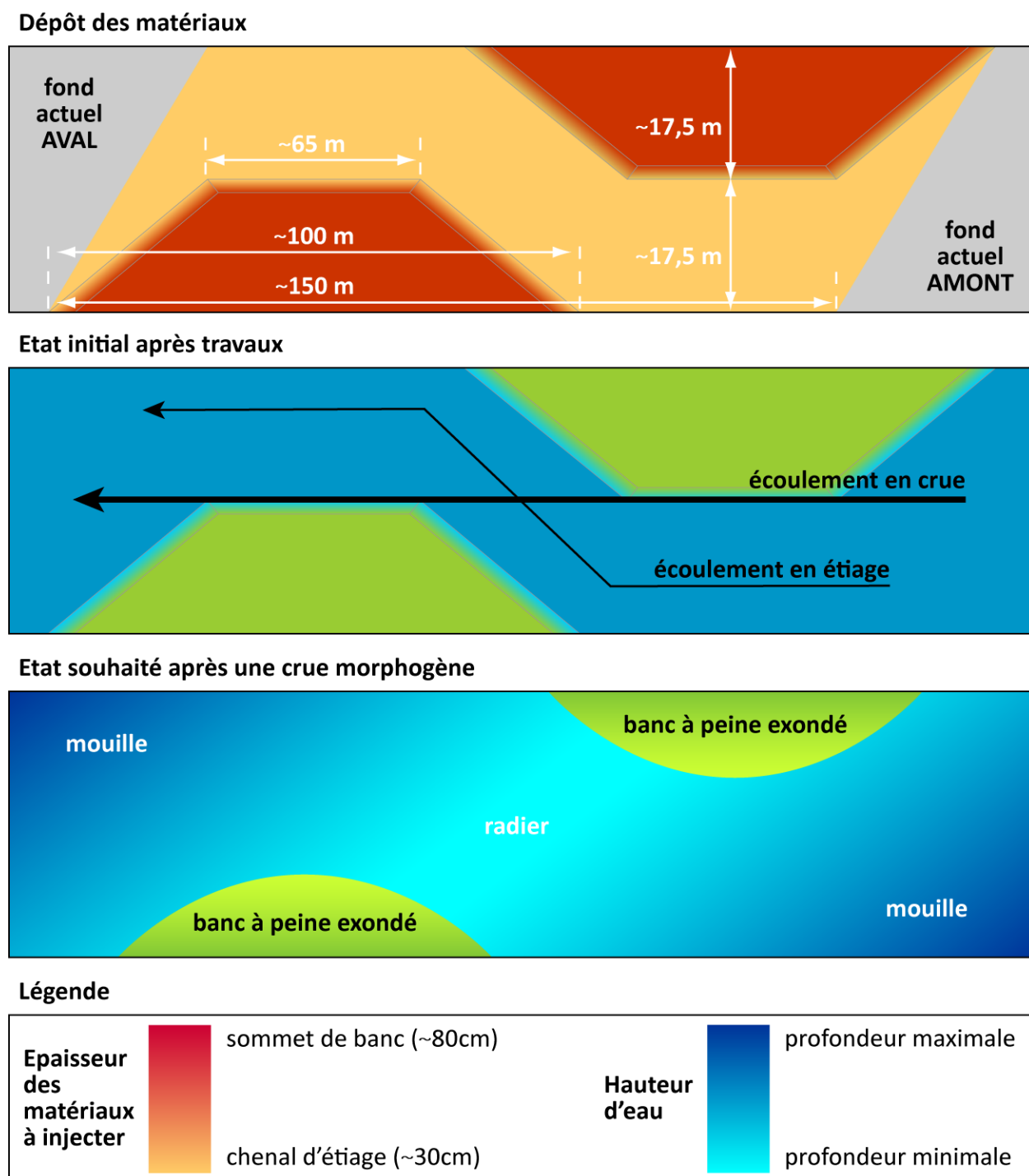


Figure 10. Schéma d'implantation type en bancs alternés

Cette séquence représente un volume de matériaux d'environ 3000 m³ et peut être multipliée autant de fois que nécessaire en fonction des volumes à injecter. Ses dimensions sont les suivantes :

- chaque banc présente une épaisseur de dépôt de 80 cm (épaisseur modérée pour éviter que les bancs ne se figent), une longueur de 100 m en pied de berge et occupe à peu près la moitié de la largeur de la bande active (soit 17,5 m en moyenne) ;
- l'autre moitié de la bande active est recouverte d'un matelas à peu près homogène de 30 cm d'épaisseur qui concentrera les écoulements à l'étiage (puis les crues recréeront spontanément une diversité de formes en séquences radier-mouille) ;
- la longueur d'onde des bancs (environ 150 m entre 2 bancs d'une même rive) est 3 à 4 fois inférieure à celle que l'on observe actuellement sur le Bas Verdon de manière à favoriser leur érosion car il faut tout de même permettre aux matériaux injectés de se diffuser progressivement.

Nous recommandons ce type d'implantation lorsque c'est possible et lorsque les volumes de matériaux sont importants. Les dimensions seront évidemment à adapter à la configuration du site d'injection et notamment de sa largeur.

d) Calendrier des injections

Le régime hydrologique du Bas Verdon est à dominance pluvio-nival, ce qui se traduit par des étiages estivaux. Mais les déversements du barrage d'Esparron étant rares, les travaux dans le TCC sont généralement possibles toute l'année (hors crues du Colostre).

La truite fario et le chabot sont les 2 espèces piscicoles dominantes du Bas 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).

Bien que le tourisme thermal ait lieu la majeure partie de l'année, la période estivale reste moins propice pour la circulation des engins.

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), **la période la plus propice pour procéder aux injections correspond a priori au mois d'octobre.**

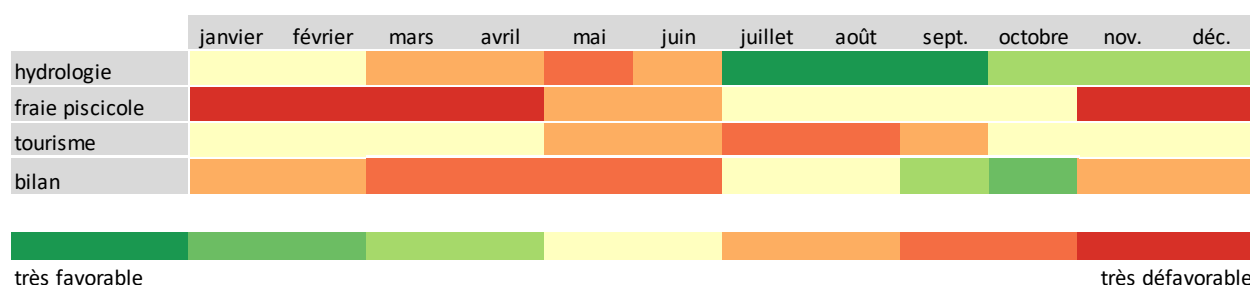


Tableau 1. Hiérarchisation des périodes d'interventions plus ou moins favorables (en vert) et défavorables (en rouge) sur le Bas Verdon

3.3- Intérêt et faisabilité des lâchers morphogènes

3.3.1- Principes

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.

Loire et al. (2021) distinguent ainsi 8 objectifs nécessitant un débit et une durée croissants (**figure 11**) : des lâchers relativement courts et peu intenses peuvent suffire à décolmater les frayères en remobilisant sables et limons ; des lâchers plus importants sont nécessaires lorsqu'il s'agit de réguler le développement de la végétation du lit ou de modifier les macroformes fluviales (bancs, faciès d'écoulement) car cela suppose de transporter les alluvions grossières ; les objectifs les plus exigeants sont la restauration des zones humides du lit majeur et la régénération des forêts alluviales.

Les lâchers morphogènes sont parfois 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.

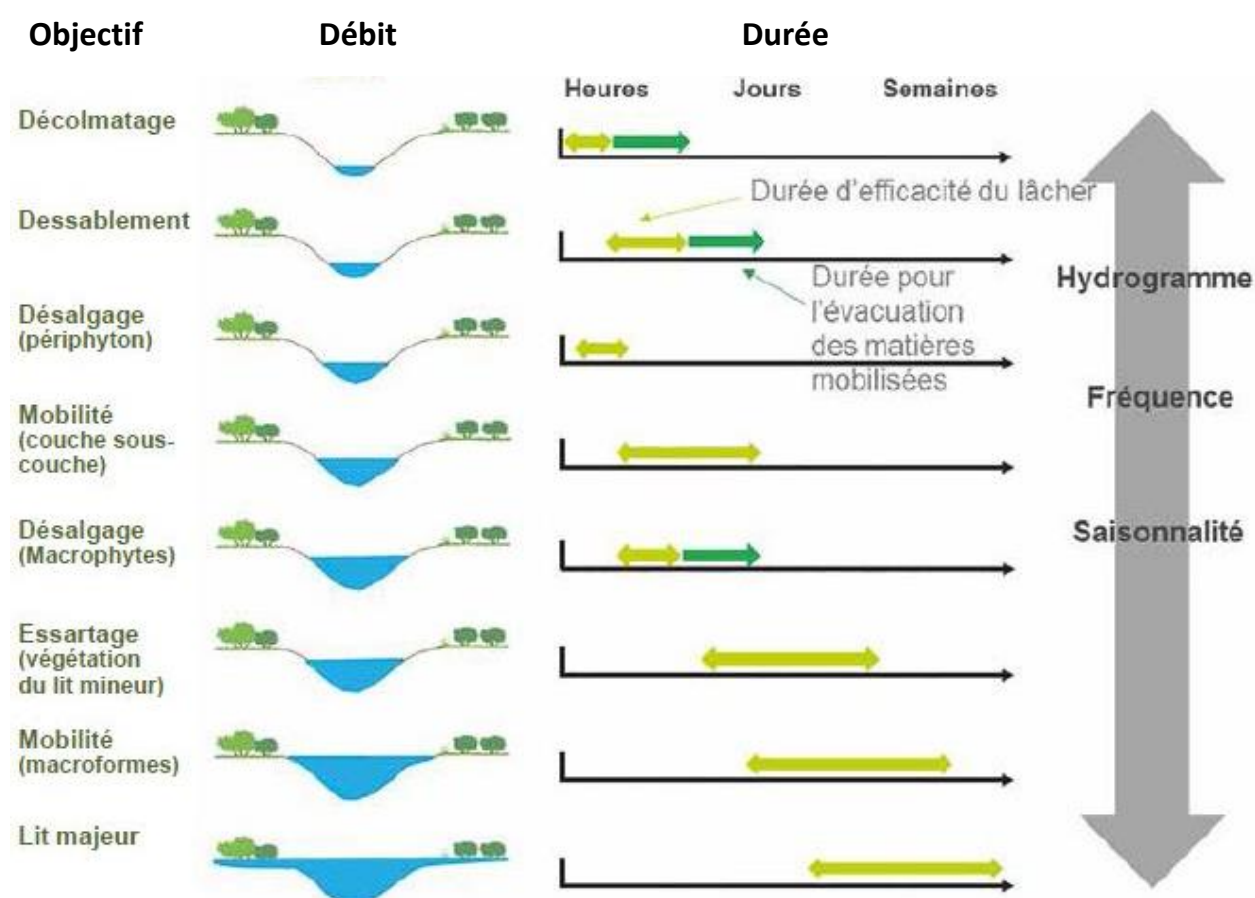


Figure 11. Schéma de principe des débits et durées nécessaires en fonction des objectifs visés par les lâchers morphogènes (Loire et al. 2021)

3.3.2- Intérêt pour le Bas Verdon

Sur le Bas Verdon, l'intensité et la fréquence des crues morphogènes sont fortement réduites par les barrages amont. 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. C'est davantage le cas dans le TCC aval, entre Gréoux et Vinon, car le tronçon aval bénéficie des fréquentes éclusées de l'usine hydroélectrique et que le TCC amont a très peu de stocks alluviaux à remobiliser.

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.

3.3.3- Eléments 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 m³/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 près chaque année. Un tel lâcher permettrait d'atteindre les 5 premiers objectifs de la [figure 11](#).
- Un lâcher de l'ordre de 200 m³/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 11](#). Idéalement, la fréquence de ces lâchers serait comprise entre 2 et 5 ans (actuellement, les déversements du barrage d'Esparron dépasseraient ce débit tous les 10 ans environ ; voir le tableau 4 du rapport de phase 1).

NB : si l'usine de Vinon fonctionne durant le lâcher (capacité maximale de 48 m³/s), seul le surplus qui n'est pas turbiné bénéficie au TCC (42 à 152 m³/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, alimentation du réseau SCP, alimentation en eau potable des communes aval, cote touristique estivale du lac de Sainte-Croix. 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 Bas 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 cout unitaire moyen de 0,05 €/m³ (coût moyen des soutiens d'étiage par les ouvrages hydroélectriques en Adour Garonne ; CGEDD 2021), le coût d'un lâcher de 100 m³/s durant 10 à 12h serait compris entre 100 000 et 200 000 euros environ, selon que l'usine de Vinon turbine une partie des eaux ou non. 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.

Pour information, les volumes d'eau nécessaires pour ces deux types de lâcher représentent respectivement :

- 0,4 et 2% du volume d'eau annuel moyen à la station de Vinon-Gréoux ;
- 5 et 20% environ de la capacité du lac d'Esparron à la cote normale (78,5 millions de m³).

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 fixe 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 Bas Verdon

En amont du seuil de Gréoux, la plaine alluviale est étroite et cela se traduit naturellement par une faible dynamique latérale. En aval du seuil, la dynamique latérale pourrait en revanche être plus prononcée si elle n'était pas bloquée par les digues (**figure 12**). On pourrait donc l'améliorer en supprimant ou en reculant les ouvrages.

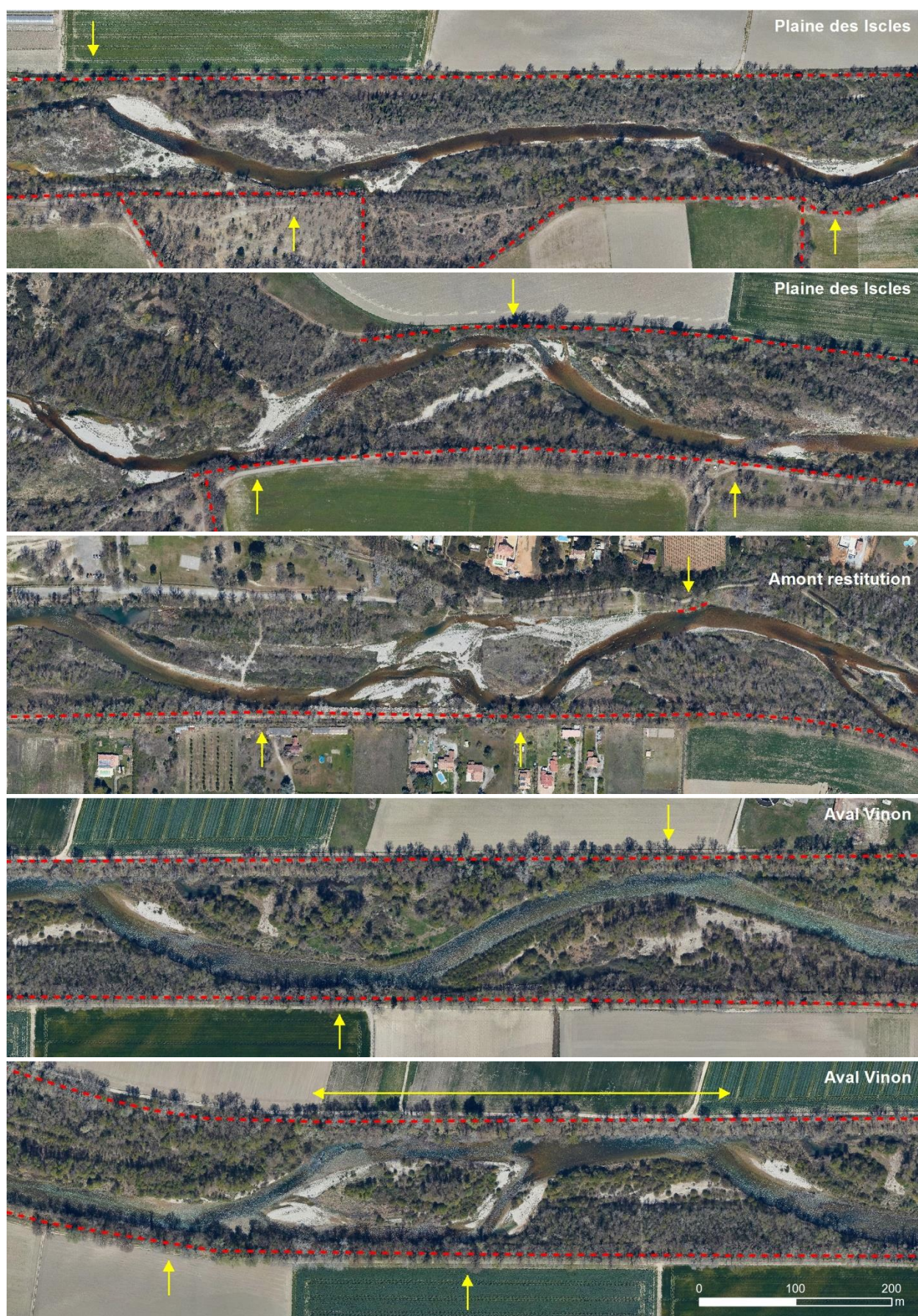


Figure 12. Exemples de blocages de la mobilité latérale (flèches jaunes) par les ouvrages (pointillés rouges)

Cela favoriserait le renouvellement des habitats aquatiques et riverains (rajeunissement de la bande active). Les matériaux produits par l'érosion des berges contribueraient également à recharger le lit.

Enfin, cela augmenterait la stabilité du profil en long car la pente du lit diminue à mesure que la sinuosité du lit augmente.

3.4.3- Faisabilité

a) Restauration intégrale du périmètre morphologique optimal

Le périmètre morphologique optimal du Bas Verdon (PMO) correspond à l'espace au sein duquel il pourrait divaguer à plus ou moins long terme.

Cet espace est en grande partie protégé par des digues, qui font également office de protections de berges. Il faudrait supprimer (détruire) voire reculer (détruire et reconstruire en retrait) tous ces ouvrages pour restaurer intégralement le PMO. Le coût de cette dernière opération (recul des digues) est de l'ordre de 50 millions d'euros.

On pourrait éventuellement déplacer toutes les constructions et activités protégées par ces ouvrages : la station d'épuration de Gréoux, la déchetterie de Gréoux, l'école de Vinon, une quinzaine d'habitations individuelles, 6 ha de campings, 8 ha d'équipements sportifs et de loisirs, 139 ha de terrains agricoles. Le coût total de l'opération s'élèverait alors à près de 100 millions d'euros.

b) Restauration de l'espace de mobilité hors des zones habitées

On peut envisager une restauration partielle du PMO au droit des zones les moins occupées (**figure 13**). On pourrait alors se contenter de supprimer les digues sans en reconstruire de nouvelles en retrait, ce qui limiterait les coûts :

- en aval rive gauche de Gréoux : environ 5 M€ pour une superficie de 43 ha
- en aval rive droite de Gréoux : environ 3 M€ pour une superficie de 27 ha
- en aval rive gauche de Vinon : environ 2 M€ pour une superficie de 34 ha
- en aval rive droite de Vinon : environ 2 M€ pour une superficie de 29 ha

Le coût total d'une telle opération est 8 fois moins élevé que la restauration intégrale du PMO alors qu'elle supprimerait la majeure partie des contraintes latérales au bon fonctionnement du Bas Verdon.

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 Bas Verdon via une recharge sédimentaire massive à l'extrémité amont de chacun de ses tronçons homogènes. On pourra éventuellement recharger les 3 tronçons simultanément ou échelonner les travaux. Dans ce dernier cas, nous recommandons de débiter par le tronçon aval du fait de son incision récente.

Les volumes de matériaux injectés représentent, selon les sites, 5 à 12 fois la capacité de transport annuelle moyenne. Ces opérations pourraient donc restaurer efficacement la morphologie du lit et compenser le déficit sédimentaire pendant plusieurs années. Leur efficacité à moyen terme dépendra néanmoins des crues futures.

Les matériaux injectés proviendront des sites de prélèvements identifiés (cf. § 3.2.3.a), en privilégiant le premier. On pourra éventuellement adapter les volumes en fonction du programme d'entretien du lit et des berges du Bas Verdon pour respecter sa programmation.

4.2- Description des travaux

a) Recharge en aval du pont de Vinon

Cette proposition repose sur l'implantation type proposée dans le chapitre précédent (cf. § 3.2.4.c). Il s'agit de disposer les matériaux en 7 séquences de bancs alternés d'environ 80 cm d'épaisseur et en un matelas à peu homogène d'environ 30 cm d'épaisseur sur le reste du lit mineur (**figure 14**).

Les matériaux sont déposés sur une largeur de 35 m soit la largeur de la bande active. Cette dernière est homogène sur le site et correspond au lit mouillé pour un débit d'environ 40 m³/s (débit lors des levés LIDAR du 8 avril 2021). En revanche, aucun matériau n'est déposé dans le stade d'eau vive, en rive droite juste après le seuil. Un modèle hydraulique pourrait vérifier l'incidence sur ses lignes d'eau.

Cela représente un volume d'environ 25 000 m³ soit 5 à 6 ans de transport solide annuel moyen (moyenne interannuelle en aval de la restitution). Le site d'injection s'étend sur près de 1,2 km entre le pied du seuil rocheux jusqu'aux environs de la STEP, ce qui correspond au linéaire qui s'est incisé de 30 cm entre 2010 et 2021.

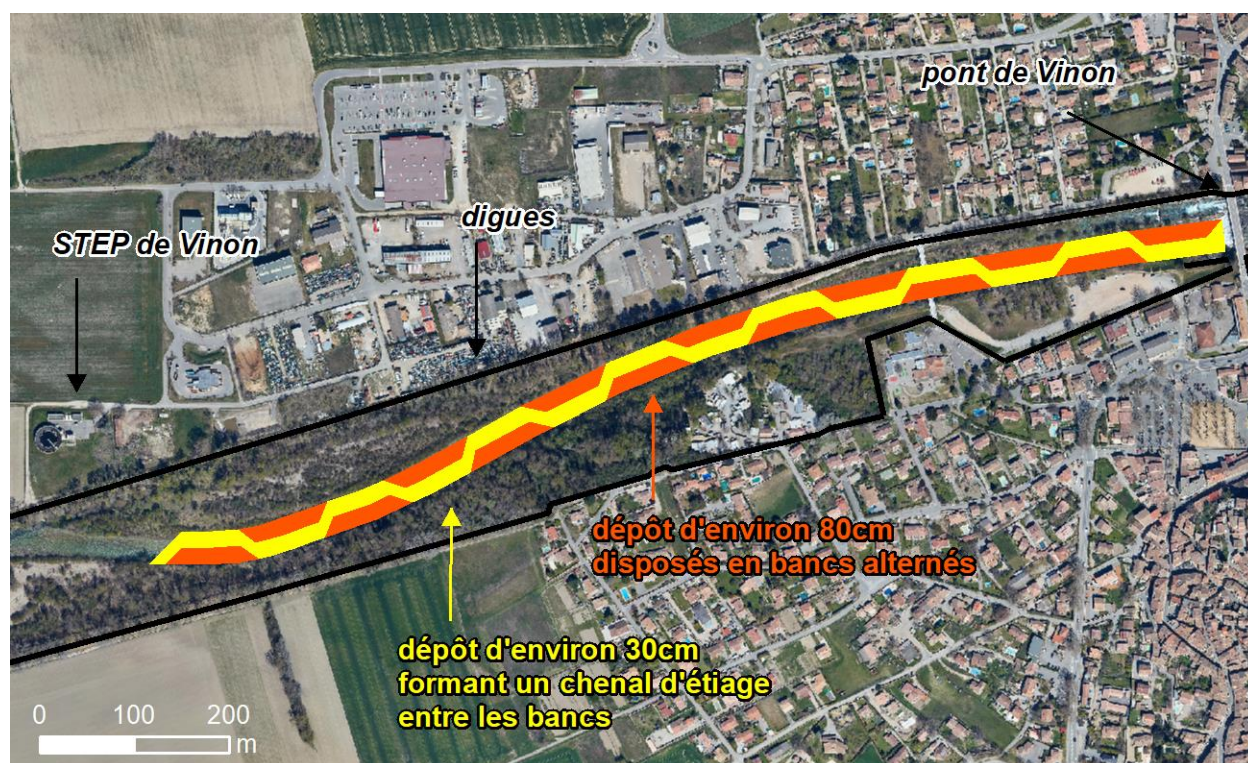


Figure 14. Première recharge proposée en aval immédiat du pont de Vinon

b) Recharge du TCC amont

Cette proposition repose encore en grande partie sur l'implantation type proposée dans le chapitre précédent (cf. § 3.2.4.c). Les matériaux sont déposés sur 1 km, essentiellement en aval du Colostre de manière à bénéficier de ses crues. Au droit et en aval de cette confluence, les matériaux sont agencés en 5 séquences de bancs alternés d'environ 80 cm d'épaisseur et en un matelas à peu homogène d'environ 30 cm d'épaisseur sur le reste du lit mineur (**figure 15**). Un banc supplémentaire est également implanté à l'extrémité amont, le long de la berge rocheuse de rive droite. Ce banc est par ailleurs plus long car sa position en extrados favorisera son érosion lors des déversements du barrage.

Cela représente un volume d'environ 18 000 m³ soit 12 ans de transport solide annuel moyen (moyenne interannuelle du TCC).

Le schéma d'implantation repose sur une largeur constante de 35 m soit la largeur moyenne de la bande active du tronçon. Mais la largeur de cette dernière est variable et la présence d'affleurements rocheux plus ou moins saillants dans le lit ou sur les berges nécessitera d'adapter l'implantation réelle des matériaux.

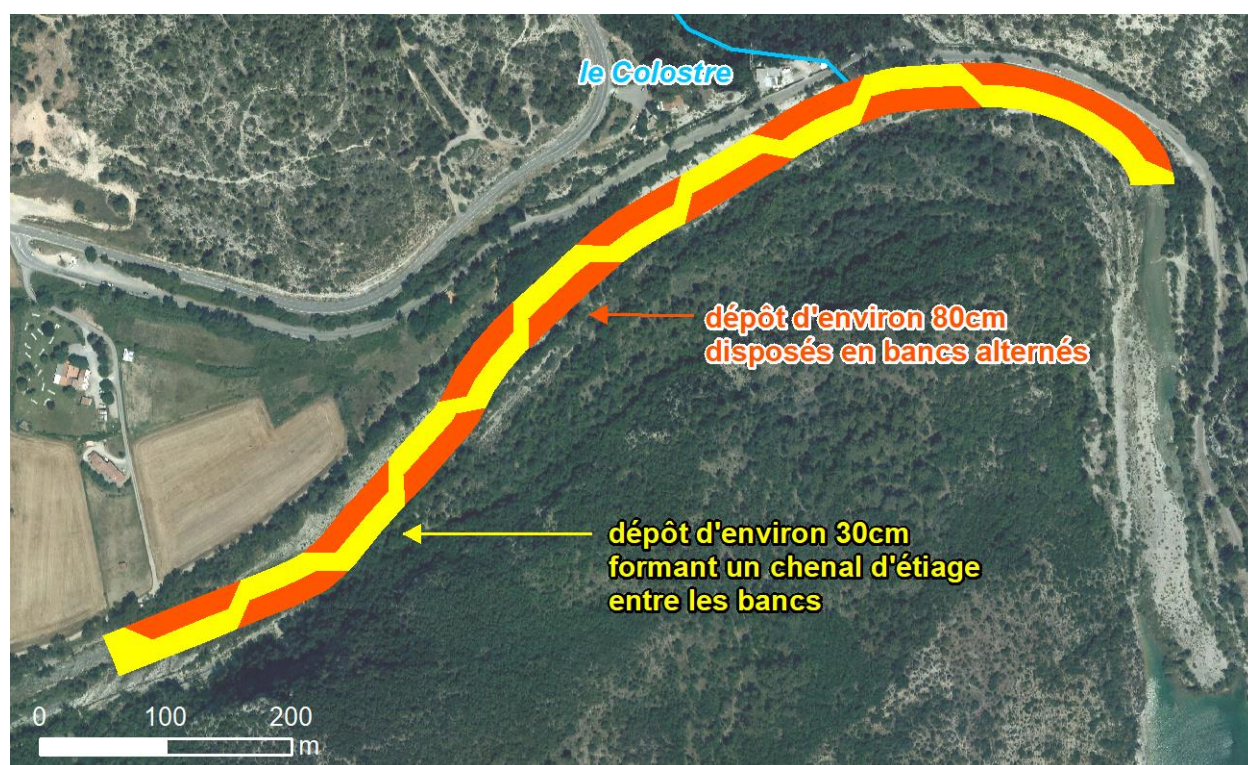


Figure 15. Première recharge proposée aux environs de la confluence avec le Colostre

c) Recharge du TCC aval

Sur ce site, la morphologie du lit se prête mal à la création de bancs alternés.

Sur les 300 premiers mètres en aval immédiat du seuil de Gréoux, le lit est étroit et très profond. Les matériaux peuvent être déposés quasiment à hauteur de la ligne d'eau d'étiage (ce qui ne modifiera pas ou peu cette dernière) selon une pente nulle de manière à combler ce long faciès lentique. D'après les données dont nous disposons, cela permettrait de déposer 8500 m³.

Sur les 500 m suivants, nous proposons de déposer les matériaux en un matelas à peu près homogène avec une pente semblable à celle du lit (0,5%). Les dépôts s'étendent jusqu'à droit de la STEP de Gréoux, soit un peu au-delà de la berge qui est fortement érodée en rive gauche. La recharge sédimentaire ne stoppera pas l'érosion de cette berge mais limitera son ampleur en étalant davantage les écoulements. D'après les données dont nous disposons, cela permettrait de déposer 3500 m³ supplémentaires.

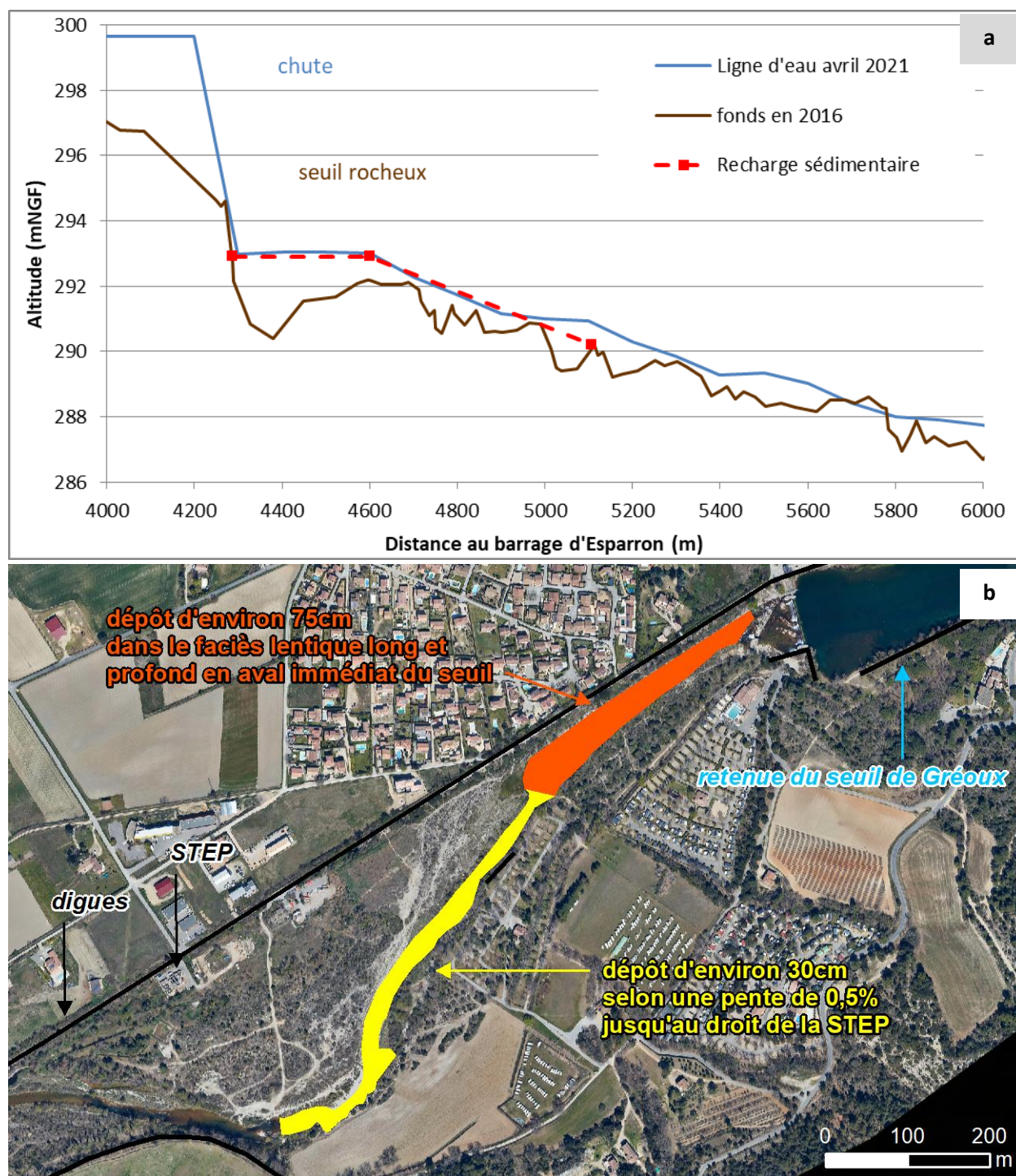


Figure 16. Première recharge proposée en aval immédiat du seuil de Gréoux : profil en long (a) et vue en plan (b). NB : les valeurs sur la vue en plan correspondent à des épaisseurs moyennes

Cette proposition (**figure 16**) représente donc un volume d'environ 12 000 m³ soit 8 ans de transport solide annuel moyen (moyenne interannuelle dans le TCC). Mais des levés topographiques plus denses sont nécessaires pour préciser ces volumes et éventuellement adapter le mode d'implantation des matériaux.

d) Limites des propositions et solutions alternatives

Ces propositions s'appuient 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 les sites d'injection et en aval immédiat devra nécessairement préciser l'implantation des matériaux.

Une modélisation hydraulique est généralement souhaitable pour évaluer l'incidence d'un projet sur les lignes d'eau de crues. Précisons qu'il n'aura pas d'incidence immédiate sur les lignes d'eau en aval de chaque site d'injection. 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. C'est donc un modèle hydrosédimentaire à fond mobile qu'il faudrait réaliser pour prédire l'évolution des fonds et des lignes d'eau en aval. Or la fiabilité de ces modèles est encore limitée en l'état actuel des connaissances. De plus, à mesure que les matériaux sont transportés vers l'aval, ils s'étalent de plus en plus si bien que leur influence sur les lignes d'eau de crue devient négligeable. Nous estimons qu'un modèle hydraulique ou hydrosédimentaire est inutile sur le site d'injection amont compte tenu de l'absence d'implantations humaines à proximité. On pourrait également s'en passer sur les sites aval si les volumes injectés restent raisonnables.

Les volumes à déposer pourront évoluer notamment au regard de ces 2 derniers éléments (topographie et incidence hydraulique). Mais les sites ont globalement une capacité d'accueil importante qui ne remettra pas en cause la faisabilité du projet.

Enfin, d'autres modes d'implantation sont envisageables. Il est notamment possible et même recommandé de déposer une petite partie des matériaux prélevés directement dans le chenal d'étiage au droit des zones d'emprunt des matériaux, pour rééquilibrer les sections en travers du TCC aval (cf. § 3.2.3.a).

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 ce type de travaux est prévu dans la DIG obtenue en 2018 pour les travaux du programme pluriannuel d'entretien du bassin versant du Verdon. 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 ;
- et enfin de suivre le profil en long du Bas Verdon, comme le prévoit déjà la disposition D21 du SAGE.

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 30 m sur les sites d'injection (3 km au total) et tous les 100 m en moyenne ailleurs (10 km au total hors retenue de Gréoux). Il n'est pas utile de lever les berges pour ce suivi, le levé du fond du lit suffira. On peut ajuster la distance entre les profils en fonction des travaux réellement réalisés tout en gardant à l'esprit que les profils levés lors de la 1^{ère} campagne serviront de référence par la suite (les campagnes ultérieures relèveront les mêmes profils).
- Evaluation de la granulométrie dominante des fonds, sur 40 transects espacés de 400 m (pour lever tout le Bas 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'emprise des mesures pourrait éventuellement être réduite en fonction des travaux réalisés, par exemple en se limitant au tronçon aval si la recharge sédimentaire n'est réalisée qu'en aval de Vinon dans un 1^{er} temps. Mais il paraît plus pertinent de suivre l'intégralité du Bas Verdon pour disposer d'un profil en long complet, même en l'absence de recharge des tronçons amont, pour réévaluer les évolutions verticales du lit de tous les tronçons et réévaluer les volumes à injecter, surtout après une forte crue.

La fréquence des mesures sera d'ailleurs à adapter à l'historique des crues morphogènes. Les débits mesurés à Vinon et le suivi des déversements du barrage d'Esparron permettront 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 pour la recharge sédimentaire des 3 tronçons sont indiqués dans les **tableaux 2 à 4**. Ils ont été évalués sur la base des hypothèses et limites suivantes :

- Le coût du déblaiement et du transport des matériaux depuis le(s) site(s) de prélèvement des matériaux vers les sites d'injection est pris en compte. En revanche, le coût de défrichage/déboisement des sites de prélèvement est exclu car nous sommes partis du principe que les matériaux proviendront des sites traités dans le cadre du plan pluriannuel d'entretien du lit et des berges du Bas Verdon.
- Procédure réglementaire limitée à une demande d'autorisation environnementale sans inventaires faune/flore.
- Levés topographiques :
 - sur les sites d'injection et aux environs immédiats (100m de part et d'autre) : profils en travers tous les 30 m, à lever 2 fois pour dimensionner les injections avant travaux puis pour décrire l'état initial des sites après travaux (ces données alimenteront le suivi morphologique) ;
 - sur les tronçons aval (environ 9 km au total) : profils en travers tous les 100 m, à lever 1 seule fois pour alimenter si nécessaire les modèles hydrauliques.

prestation	quantité	unité	P.U. (€ HT)	montant HT
Topographie avant/après travaux	1	forfait	15 000	15 000
Maitrise d'œuvre - conception AVP/PRO	1	forfait	20 000	20 000
Dossiers réglementaires	1	forfait	5 000	5 000
Maitrise d'œuvre - ACT et suivi de chantier	1	forfait	12 000	12 000
Mesures ERC	1	forfait	10 000	10 000
Installation et repli du chantier	1	forfait	30 000	30 000
Déblaiement des matériaux	18 000	m³	2.0	36 000
Chargement et transport des matériaux	18 000	m³	20.0	360 000
Agencement des matériaux	18 000	m³	5.0	90 000
Total Hors Taxes				578 000

Tableau 2. Estimations des coûts pour la recharge sédimentaire sur le site amont

prestation	quantité	unité	P.U. (€ HT)	montant HT
Topographie avant/après travaux	1	forfait	17 000	17 000
Maitrise d'œuvre - conception AVP/PRO	1	forfait	20 000	20 000
Dossiers réglementaires	1	forfait	5 000	5 000
Maitrise d'œuvre - ACT et suivi de chantier	1	forfait	12 000	12 000
Mesures ERC	1	forfait	10 000	10 000
Installation et repli du chantier	1	forfait	20 000	20 000
Déblaiement des matériaux	12 000	m³	2.0	24 000
Chargement et transport des matériaux	12 000	m³	11.0	132 000
Agencement des matériaux	12 000	m³	5.0	60 000
Total Hors Taxes				300 000

Tableau 3. Estimations des coûts pour la recharge sédimentaire sur le site médian

prestation	quantité	unité	P.U. (€ HT)	montant HT
Topographie avant/après travaux	1	forfait	18 000	18 000
Maitrise d'œuvre - conception AVP/PRO	1	forfait	20 000	20 000
Dossiers réglementaires	1	forfait	5 000	5 000
Maitrise d'œuvre - ACT et suivi de chantier	1	forfait	14 000	14 000
Mesures ERC	1	forfait	10 000	10 000
Installation et repli du chantier	1	forfait	15 000	15 000
Déblaiement des matériaux	22 000	m³	2.0	44 000
Chargement et transport des matériaux	22 000	m³	17.0	374 000
Agencement des matériaux	22 000	m³	5.0	110 000
Total Hors Taxes				610 000

Tableau 4. Estimations des coûts pour la recharge sédimentaire sur le site aval

Le **tableau 5** indique le coût approximatif d'une campagne de mesures pour le suivi morphologique. 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	200	profil	150	30 000
Granulométrie - Transects	40	transect	150	6 000
Traitements et interprétation des résultats	1	forfait	4 000	4 000
Total Hors Taxes				40 000

Tableau 5. 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 Hauteffage sur la Maronne. Travaux 2016, suivi de la reproduction des salmonidés 2016 et bilan 2013-2016.

Fédération Départementale de Pêche et de Protection Milieux Aquatiques des Alpes de Haute Provence (FDPPMA 04), 2017. Compte-rendu du suivi de l'opération de recharge sédimentaire sur des placettes test.

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

