

Maitre d'ouvrage :

Avec le soutien de :



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

Rapport de phase 1 – Etat des lieux et diagnostic

Janvier 2022



SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES.....	3
LISTE DES TABLEAUX	4
1- Introduction	5
1.1- Cadre et objectifs de l'étude	5
1.2- Contenu du rapport.....	6
2- Contexte et sectorisation hydromorphologique	7
2.1- Contexte géologique et morphostructural.....	7
2.2- Sectorisation en tronçons homogènes.....	9
3- Evolutions historiques	11
3.1- Evolutions en plan du Verdon	11
3.2- Evolutions verticales des fonds	15
3.2.1- Inventaire des données disponibles	15
3.2.2- Limites des données	16
3.2.3- Evolution du profil en long depuis 1907	16
3.2.4- Evolutions à la fin du 20 ^{ème} siècle	18
3.2.5- Evolutions récentes	20
4- Transport solide et morphologie actuelle	22
4.1- Constitution des fonds	22
4.1.1- Méthode	22
4.1.2- Résultats des échantillonnages granulométriques	23
4.2- Qualité globale des habitats physiques.....	26
4.2.1- Préambule	26
4.2.2- Résultats des observations de terrain	26
4.3- Transport solide.....	29
4.3.1- Débits morphogènes	29
4.3.2- Charriage et capacité de transport	30
4.4- Sources sédimentaires	32
4.5- Stocks alluvionnaires	34
5- Analyse spécifique de la queue de retenue de Cadarache	36
5.1- Profil en long du Bas Verdon en aval de Vinon	36
5.2- Topographie actuelle de la queue de retenue de Cadarache et tendances futures.....	37
5.3- Origines des dépôts observés.....	38
5.4- Conséquences de la future défluviation.....	39
6- Synthèse et diagnostic.....	41
6.1- Equilibre et ajustements morphologiques des cours d'eau	41
6.2- Evolutions verticales des fonds du Bas Verdon.....	42
6.3- Evolutions de la granulométrie des fonds du Bas Verdon	43
6.4- Rétraction des bandes actives.....	44
6.5- Bilan et hiérarchisation du déficit sédimentaire	44
BIBLIOGRAPHIE.....	46
ANNEXE	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les 2 secteurs d'études au sein du bassin versant du Verdon	8
Figure 2. Tronçons homogènes du Bas Verdon.....	10
Figure 3. Evolution de la largeur de la bande active du Bas Verdon entre 1860 et 2021 : a) évolution de la largeur moyenne ; b) évolutions par tronçon homogène	12
Figure 4. Cartographie diachronique des bandes actives du Bas Verdon	13
Figure 5. Principaux blocages de la mobilité latérale du Bas Verdon par les ouvrages latéraux (les ouvrages sont représentés en rouges et les blocages en jaunes).....	14
Figure 6. Différences entre les lignes d'eau d'avril 2021 et celles de novembre-décembre 1907 (profil en long des grandes forces hydrauliques).....	17
Figure 7. Profils en long des fonds du tronçon aval (« aval Vinon »).....	19
Figure 8. Profils en long des lignes d'eau du tronçon aval (« aval Vinon »).....	19
Figure 9. Différences entre les lignes d'eau d'avril 2021 et celles d'octobre 2010	21
Figure 10. Localisation des transects levés sur le Bas Verdon	22
Figure 11. Distribution des faciès échantillonnés lors des levés sur transects	23
Figure 12. Distributions granulométriques dominantes du Bas Verdon par tronçon.....	24
Figure 13. Distributions granulométriques dominantes du Bas Verdon par transect	25
Figure 14. Affleurements rocheux à proximité de la confluence avec le Colostre (a) et aux environs du parcours de santé de Gréoux-les-Bains (b)	26
Figure 15. Colmatage et couverture algale entre le Colostre et la retenue de Gréoux.....	27
Figure 16 Grands herbiers dans la retenue (a) et en aval immédiat (b) du seuil de Gréoux	27
Figure 17. Diversité des faciès et substrats observés dans la partie aval du TCC	28
Figure 18. Colmatage et couverture algale en aval proche du pont de Vinon.....	28
Figure 19. Exemples de bancs mobiles et de substrats observés dans la partie aval du tronçon « aval Vinon »	29
Figure 20. Exemple de substrat favorable au frai piscicole en aval de la confluence avec le Colostre	32
Figure 21. Fonds de la retenue de Gréoux lors d'une vidange en 2004 (source : PNRV, d'après Artelia 2015).....	33
Figure 22. Principales érosions de berge : a) en face de la déchetterie de Gréoux ; b) rive droite qui accueillait la digue fusible en aval de Vinon.....	34
Figure 23. Distribution des formations alluviales exondées dans le Bas Verdon	35
Figure 24. La queue de retenue de Cadarache	36
Figure 25. Profil en long du Verdon, de la Louane et de la plaine alluviale en aval de Vinon	37

Figure 26. Topographie actuelle queue de retenue de Cadarache et futurs tracé du Verdon.....	38
Figure 27. Evolutions de la confluence Durance-Verdon depuis 1860	39
Figure 28. Possible évolution du profil en long d'équilibre en cas de défluviation du Verdon vers la Louane.....	40
Figure 29. Balance de Lane (1955, d'après Watson et Biedenharn 1999)	41
Figure 30. Carte synthétique du déficit sédimentaire du Bas Verdon	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques principales des tronçons homogènes du Bas Verdon	10
Tableau 2. Liste des levés topographiques réalisés sur le Bas Verdon	15
Tableau 3. Classification de Wentworth modifiée par Malavoi et Souchon (1989)	23
Tableau 4. Historique des déversements du barrage d'Esparron entre 1969 et 2019	31

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 ([figure 1](#)).

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 porte sur la phase 1 de l'étude qui vise à établir un état des lieux et un diagnostic du fonctionnement hydromorphologique du Bas Verdon.

L'état des lieux consiste à décrire dans le détail les évolutions et l'état actuel du cours d'eau, en prenant en compte les contraintes naturelles imposées par son environnement comme les pressions générées par les activités humaines.

Le diagnostic consiste à interpréter l'ensemble des résultats de l'état des lieux, en examinant leurs relations (liens de cause à effet, interactions amont-aval, boucles de rétroaction, inertie et temporalités des ajustements, influence de facteurs externes). Il doit aboutir à une compréhension globale des mécanismes en cours permettant de prédire les évolutions futures et les principaux leviers pour y remédier.

Ce travail s'appuie à la fois sur de nombreuses études antérieures et sur de nouvelles données et analyses. Il reprend notamment la totalité des éléments développés lors de notre récente *Etude de faisabilité pour la recharge sédimentaire du Bas et du Moyen Verdon* (Dynamique Hydro, 2019), en les approfondissant et en couvrant un plus large linéaire. Une nouvelle campagne de prospection a ainsi été réalisée sur le terrain en juillet 2021 pour compléter celle de juin 2019 : échantillonnages systématiques de la granulométrie des fonds, évaluation visuelle de la qualité physique des habitats, emprise des ouvrages, intensité des érosions de berge, apports solides des affluents...

Le plan du rapport est le suivant :

- La 2^{ème} section du rapport porte sur le contexte géologique et/ou morphostructural du Verdon, à l'échelle de son bassin versant, puis sur les tronçons homogènes qui constituent le secteur d'étude.
- La 3^{ème} section présente les évolutions historiques du lit du Verdon : évolution du tracé en plan et évolutions verticales des fonds.
- La 4^{ème} section décrit l'état et le fonctionnement actuels du Bas Verdon.
- La 5^{ème} section concerne le cas particulier de la queue de retenue de Cadarache, et plus précisément le risque de défluviation du Bas Verdon identifié dans cette zone.
- Enfin, la 6^{ème} section résume brièvement les principaux résultats et leurs implications sur l'équilibre morphodynamique du Bas Verdon.

2- Contexte et sectorisation hydromorphologique

Le contexte géologique est décrit à l'échelle du bassin versant pour donner une vision d'ensemble du Verdon et mettre en avant la singularité des 2 secteurs étudiés (§ 2.1).

Leur sectorisation hydromorphologique fine permet ensuite de distinguer les différents tronçons homogènes qui les constituent, et de préciser les spécificités de chacun dont il faut tenir compte dans l'établissement du diagnostic comme dans les propositions de gestion ultérieures (§ 2.2).

2.1- Contexte géologique et morphostructural

Le Verdon prend sa source au pied du massif des Trois Evêchés qui culmine à près de 3000 m d'altitude, traverse une succession de petites cuvettes et de défilés étroits, puis s'encaisse profondément entre les plateaux de Canjuers et de Valensole, pour finalement rejoindre la plaine alluviale de la Durance vers 250 m d'altitude. Il s'agit globalement d'un bassin versant de moyenne montagne, situé entre les Alpes et la basse Provence, dont l'altitude moyenne est modérée (1047 m) mais le relief très accidenté (pente moyenne de 26%) du fait de sa structure géologique complexe.

Le sous-sol du bassin versant est dominé par les roches marno-calcaires (notamment le sud du bassin versant, en rive gauche du Moyen et du Bas Verdon) puis par les roches détritiques (notamment les conglomérats du plateau de Valensole et les flyschs en tête de bassin versant). Ces roches affleurent généralement sur les crêtes et plateaux mais sont couvertes de formations superficielles meubles plus ou moins épaisses (accumulations d'alluvions, de colluvions ou d'éluvions) dans les dépressions et aux pieds des versants. Les éboulis sont notamment très fréquents dans la moitié nord-est du bassin versant. La nature du sous-sol a ainsi favorisé le développement d'importants réseaux karstiques dans la partie sud du bassin versant et en particulier sous le plateau de Canjuers. Cela se traduit par des pertes et des résurgences, notamment dans la partie médiane du bassin versant.

Le Verdon est par ailleurs fractionné par 5 grands barrages hydroélectriques. Ces ouvrages créent de longues retenues inondant les vallées sur plusieurs dizaines de kilomètres (au total, les retenues représentent plus d'un tiers de la longueur du Verdon). Ils perturbent fortement les flux liquides (eau) et solides (alluvions). C'est particulièrement le cas du point de vue de la charge solide grossière dont le transit est totalement interrompu au droit de ces grands ouvrages. Chacun d'eux constitue donc une discontinuité majeure d'un point de vue hydromorphologique.

On distingue généralement 3 grands secteurs :

- le Haut Verdon entre le massif des Trois Evêchés au nord et la queue de retenue du barrage de Castillon au sud (à Saint-André-les-Alpes) ;
- le Moyen Verdon jusqu'à la sortie du Grand canyon au pont de Gatelas qui coïncide avec le début du lac de Sainte Croix ;
- le Bas Verdon jusqu'à la retenue du barrage de Cadarache où il conflue avec la Durance.

Le Haut Verdon s'inscrit dans un contexte plus montagnard que les 2 secteurs aval, tant du point de vue géologique que climatique. Il conserve également un environnement plus naturel, étant notamment dépourvu de barrages.

Les Moyen et Bas Verdon présentent des caractéristiques bien distinctes de celles du Haut Verdon et, dans une certaine mesure, relativement proches car ils se caractérisent tous deux par une succession de lacs de retenues, de linéaires en gorges et de poches alluviales.

C'est dans ces poches alluviales que se concentrent la plupart des enjeux d'ordre hydromorphologique liés à la ressource en eau, au risque d'inondation, à la stabilité des ouvrages riverains et à la préservation d'écosystèmes typiques des plaines alluviales (bras morts, prairies humides, ripisylve et forêts alluviales...). En effet, la rivière peut s'y déplacer dans les dimensions latérales et verticales, et ainsi interagir fortement avec les milieux qui l'entourent. Et les plaines alluviales sont propices à l'installation des activités humaines (urbanisation et agriculture notamment).

Le Bas Verdon en aval du barrage d'Esparron – que nous appellerons simplement par la suite « Bas Verdon » – est l'une de ces poches alluviales, et de loin la plus large. Ici, la rivière s'apparente davantage à un cours d'eau de piedmont. Elle s'écoule avec une pente modérée, c'est à dire relativement faible par rapport aux secteurs et tronçons amont, dans une large plaine alluviale qui rejoint celle de la Durance. Précisons néanmoins que le fond de vallée alluvial s'élargit en fait à environ 1,3 km en aval du barrage. Ce point est détaillé dans la section suivante (§ 2.2).

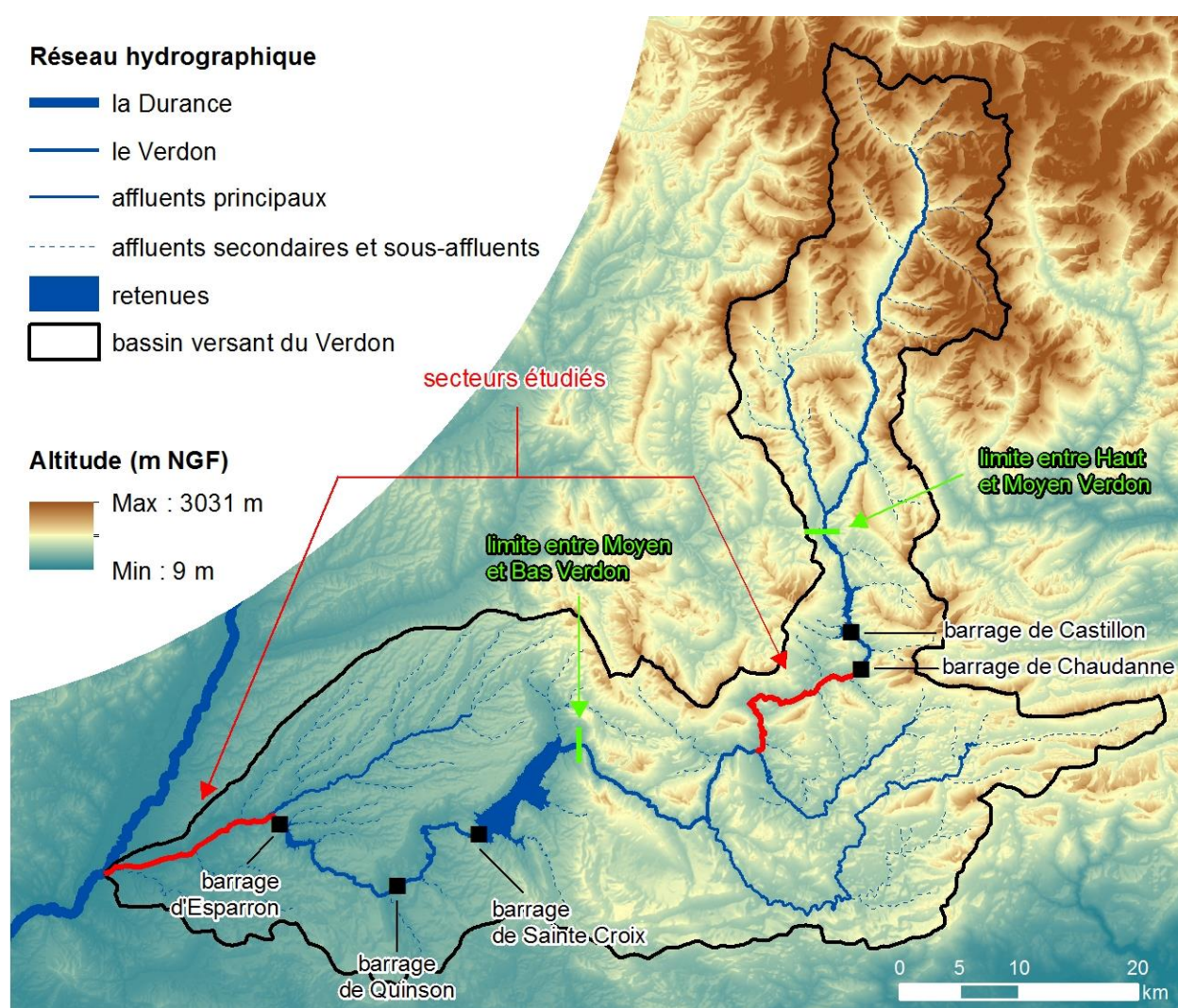


Figure 1. Les 2 secteurs d'études au sein du bassin versant du Verdon

NB : l'ouvrage le plus amont de notre secteur d'étude est plus souvent appelé barrage de Gréoux et l'ouvrage suivant seuil de Gréoux voire boudin de Gréoux. Pour éviter les confusions, nous désignerons le barrage amont sous le terme de barrage d'Esparron (comme son lac) et l'ouvrage suivant sous le terme de seuil de Gréoux, même si ce dernier s'apparente davantage à un petit barrage qu'à un seuil.

2.2- Sectorisation en tronçons homogènes

Le Bas Verdon a été découpé en tronçons homogènes vis-à-vis des principaux facteurs de contrôle hydromorphologiques :

- largeur et nature dominante du fond de vallée (rocheux ou alluvial) ;
- confluences majeures ;
- pente du lit et du fond de vallée ;
- principaux aménagements.

Nous distinguons 3 tronçons homogènes entre le pied du barrage d'Esparron et la confluence avec la Durance (**figure 2**) :

- Le premier tronçon (« TCC amont ») s'étend du pied du barrage d'Esparron au seuil de Gréoux. La largeur de son fond de vallée est globalement modeste et surtout très variable (80 à 500 m). Son extrémité amont s'écoule sur plus de 1 km dans de petites gorges étroites. Puis, environ 400 m en aval du Colostre, le fond de vallée s'élargit et uniquement vers la rive droite (au nord) dans un premier temps. Cette rive droite n'est cependant pas une véritable plaine alluviale (dont la pente transversale – perpendiculairement au Verdon c'est-à-dire du nord au sud – serait alors à peu près nulle) mais plutôt un glaciais d'accumulation dont la pente transversale est de l'ordre de 4% et où la roche mère affleure par endroits plus haute que le fond de Verdon. Le fond de vallée se resserre finalement à nouveau à environ 800 m en amont du seuil de Gréoux. Ce premier tronçon est donc un tronçon de transition, relativement hétérogène, entre les gorges en amont et la véritable plaine alluviale du Verdon en aval. Par ailleurs, son extrémité aval correspond à une discontinuité vis-à-vis de la stabilité verticale des fonds pour les raisons suivantes :
 - le substratum rocheux sur lequel est fondé le seuil de Gréoux affleurerait déjà avant sa construction (d'après une photographie aérienne de 1934) à cause du resserrement du fond de vallée au droit de l'ouvrage, et cet affleurement constitue naturellement un point dur dans le lit ;
 - le seuil de Gréoux forme une retenue relativement longue (0,7 à 1,2 km selon l'état de la baudruche) et diminue sensiblement la pente moyenne du tronçon (**tableau 1**) donc l'énergie des écoulements.
- Le deuxième tronçon (« TCC aval ») s'écoule dans la large plaine alluviale des Iscles où le Verdon développait autrefois un lit en tresses. Il est désormais endigué et présente un tracé rectiligne sur la majeure partie de sa longueur. Son extrémité aval correspond à la restitution de l'usine hydroélectrique et coïncide à peu près avec le seuil naturel rocheux du pont de Vinon qui forme un nouveau point dur dans le fond du Verdon. Un peu plus en amont, il accueillait encore très récemment deux seuils artificiels successifs (seuils de Vinon), effacés en septembre 2018. La pente moyenne de ce tronçon (3,4 m/km) est semblable à celle du tronçon amont en l'absence du seuil de Gréoux.

- Le troisième et dernier tronçon (« aval Vinon ») se situe en aval de la restitution de l'usine hydroélectrique de Vinon. D'un point de vue morphostructural, rien ne le différencie du tronçon précédent mais il présente un régime hydrologique distinct du fait des fréquentes éclusées de l'usine. Il s'achève dans la retenue de Cadarache qui réduit la pente moyenne du tronçon (2.8 m/km actuellement contre 3,8 m/km en 1959 avant la construction du barrage). La retenue elle-même constitue un sous-tronçon particulier dans la mesure où elle est sous l'influence directe du barrage et de la Durance (pente et vitesse d'écoulement quasiment nulles hors crue majeure).

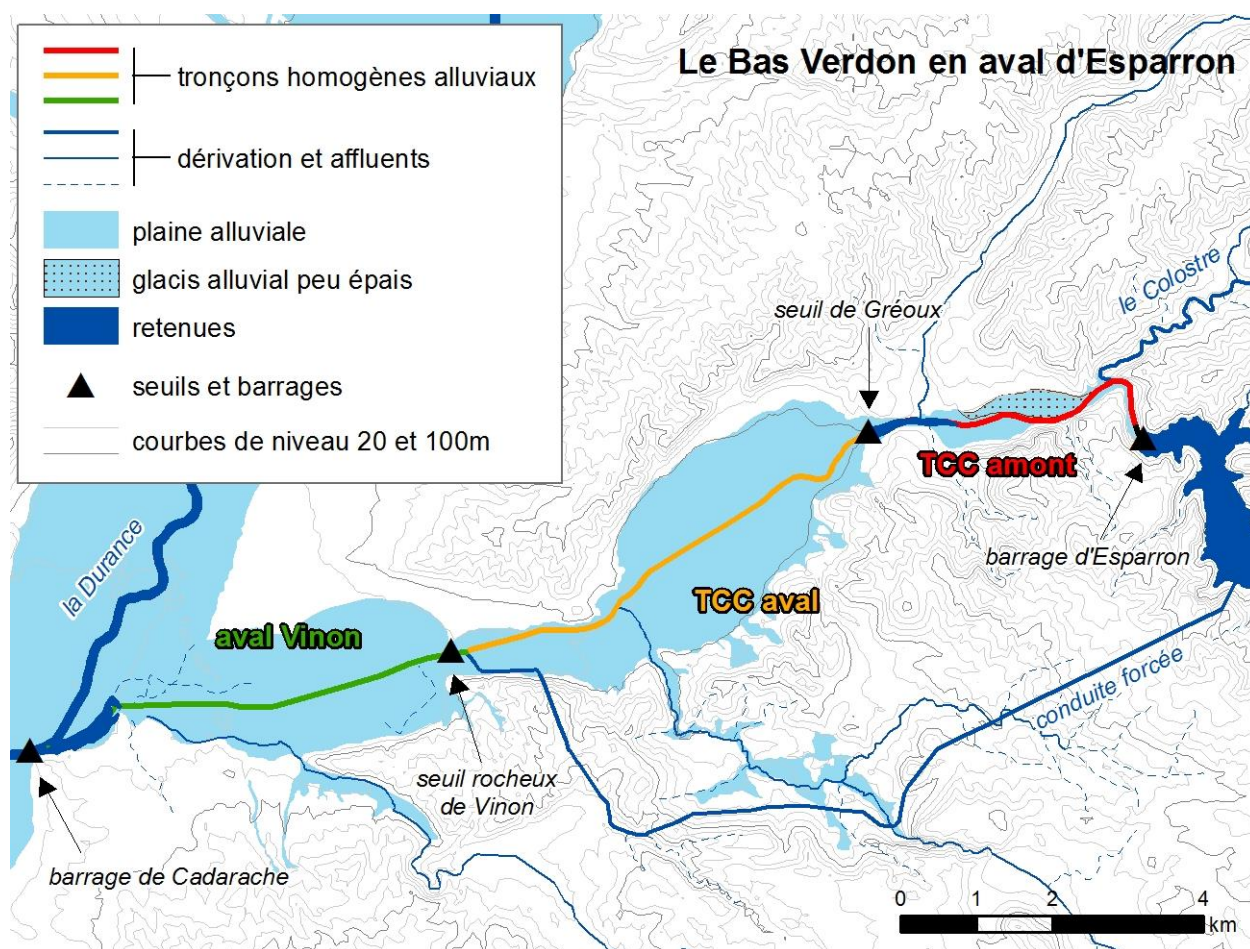


Figure 2. Tronçons homogènes du Bas Verdon

nom	extrémité amont	extrémité aval	longueur (km)	largeur du fond de vallée (km)	pente du lit (m/km)
TCC amont	barrage d'Esparron	seuil de Gréoux	4,2	0,2	2,7 à 3,6 *
TCC aval	seuil de Gréoux	restitution de Vinon	6,3	1,3	3,4
aval Vinon	restitution de Vinon	Durance	5,9	1,4	2,8

* 2,7 m/km quand la boudruche du seuil de Gréoux est gonflée ; 3,1 m/km jusqu'à la crête en béton (boudruche dégonflée) ; 3,6 m/km jusqu'à la crête du seuil naturel rocheux

Tableau 1. Caractéristiques principales des tronçons homogènes du Bas Verdon

3- Evolutions historiques

Ce chapitre présente les évolutions historiques du lit du Verdon : évolution du tracé en plan (§ 3.1) et évolutions verticales des fonds (§ 3.2).

3.1- Evolutions en plan du Verdon

Les évolutions en plan ont été étudiées à partir de 6 séries de photographies aériennes : 1934, 1966, 1993, 1995, 2009 (en fait 2008 et 2010 selon les départements) et 2021 (source : IGN sauf celle de 2021 qui a été levée spécifiquement pour cette étude) et des cartes d'état-major réalisées en 1860 (feuilles n°223 et 224).

Sur chacun de ces documents, nous nous sommes attachés à délimiter l'emprise de la bande active, c'est-à-dire l'emprise des chenaux en eau et des bancs alluviaux nus ou peu végétalisés qui correspondent à l'espace fréquemment remanié par la rivière. La bande active peut éventuellement se déplacer latéralement, se rétracter ou s'élargir. Les évolutions de la largeur de bande active témoignent principalement de l'intensité des dynamiques fluviales : plus les flux liquides et solides sont importants dans un cours d'eau, plus sa bande active est large (et inversement). Les évolutions de sa position témoignent de la capacité du lit à divaguer au sein de son fond de vallée.

Les **figures 3 et 4** résument le résultat de cette analyse.

Globalement, la bande active du Bas Verdon n'a cessé de se rétracter depuis 1860 (**figure 3a**). Seul l'élargissement provisoire constaté en 1995, c'est-à-dire suite à la crue de novembre 1994, fait exception. Cette crue rare (autour de 1000 m³/s) n'a cependant pas eu d'effet à long terme sur la dynamique fluviale (l'érosion des surfaces végétalisées n'a pas favorisé leur mobilité par la suite).

La rétraction de la bande active a été particulièrement importante entre 1860 et 1934 (la largeur moyenne a diminué de plus de moitié), période durant laquelle ont été construites la majeure partie des digues du Bas Verdon (la plupart datent de la fin du 19^{ème} siècle ; L'écho du Verdon n°158). Ces aménagements ont donc eu un effet majeur dans un 1^{er} temps. D'autres facteurs ont également favorisé la rétraction des bandes actives, en particulier les barrages dont le 1^{er} à Quinson dès 1869. Ces derniers ouvrages diminuent à la fois les débits liquides et solides, ce qui conduit systématiquement à une réduction de la taille des cours d'eau.

Le style en tresses, encore bien marqué en 1934, disparaît au début des années 1960 environ (probablement un peu plus tôt en amont). Cette disparition résulte d'une diminution de la charge solide.

Les trajectoires des différents tronçons homogènes mettent bien en évidence l'influence de la largeur du fond de vallée alluvial (**figure 3b**) :

- le tronçon amont (« TCC amont ») s'est rétracté rapidement jusqu'en 1966 puis un peu plus lentement après cette date. Son actuelle largeur représente 45% de sa valeur en 1934. En proportion, c'est davantage que les 2 tronçons aval car son fond de vallée plus étroit, en particulier à son extrémité amont, n'a jamais permis à la rivière de s'étaler fortement.
- les 2 tronçons aval, naturellement plus larges, ont une évolution semblable qui se décompose en 3 étapes :
 - une très forte rétraction suite à leur endiguement entre 1860 et 1934 (2,2 m/an en moyenne) ;

- une diminution un peu plus lente mais encore importante entre 1934 et 1993 (1,4 m/an) ;
- une faible évolution entre 1993 et 2021. Sur cette dernière période, les trajectoires des 2 tronçons diffèrent quelque peu en fait : la largeur actuelle du tronçon en aval de la restitution est proche de sa valeur de 1993 (-9%) alors que celle du TCC aval a régressé sensiblement (-27%).

Sur ces 2 tronçons aval, plus propices à la mobilité latérale, la largeur de la bande active ne représente désormais plus que 13% de celle de 1860 et 30% de celle de 1934. Elle est donc largement inférieure à la largeur moyenne de l'espace inter-digue (de l'ordre de 130 m) si bien que les digues ne constituent plus une limite en termes de largeur. Néanmoins, les digues bloquent encore les divagations de la rivière, l'empêchant de développer un tracé plus sinueux (figure 5).

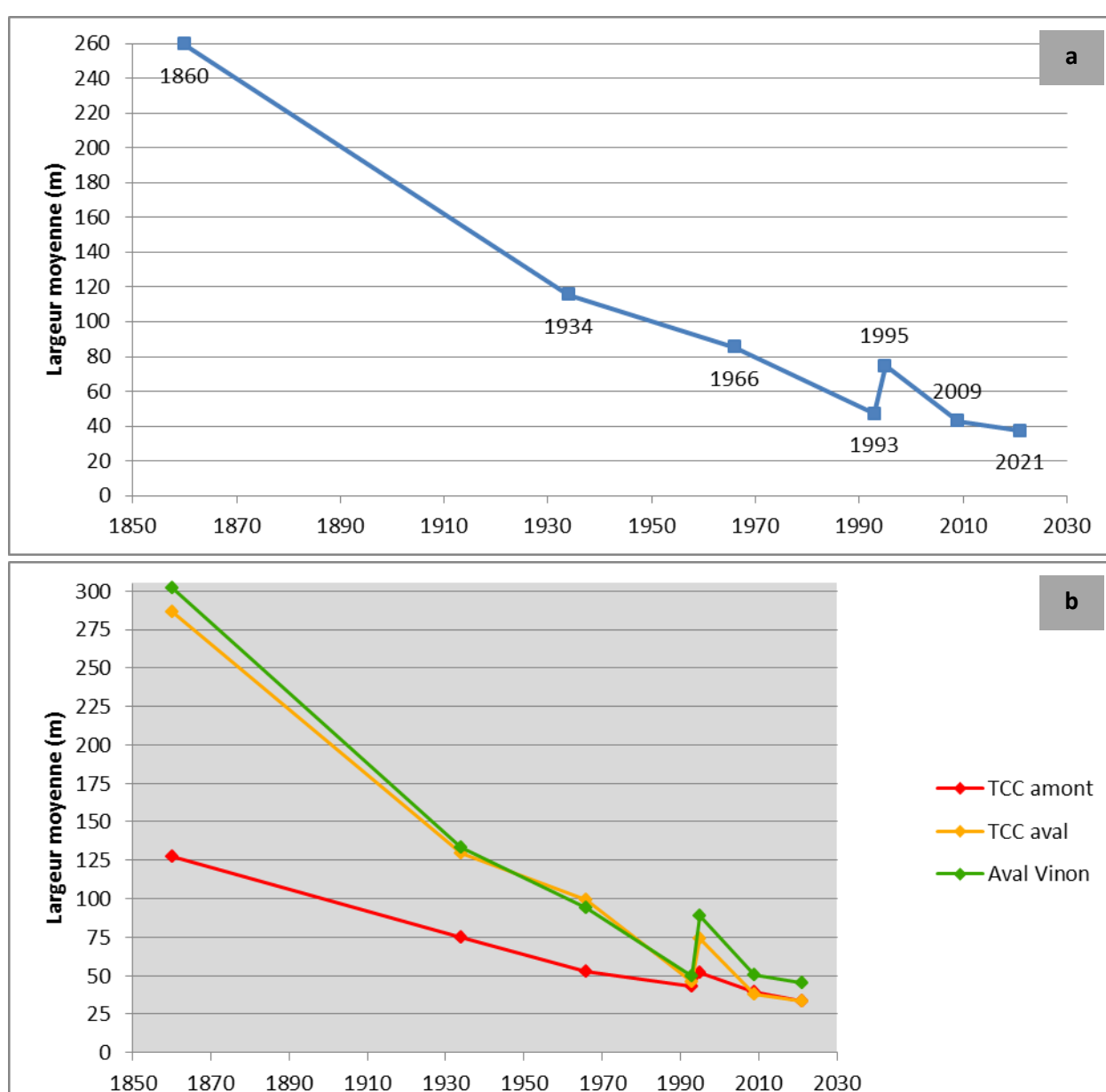
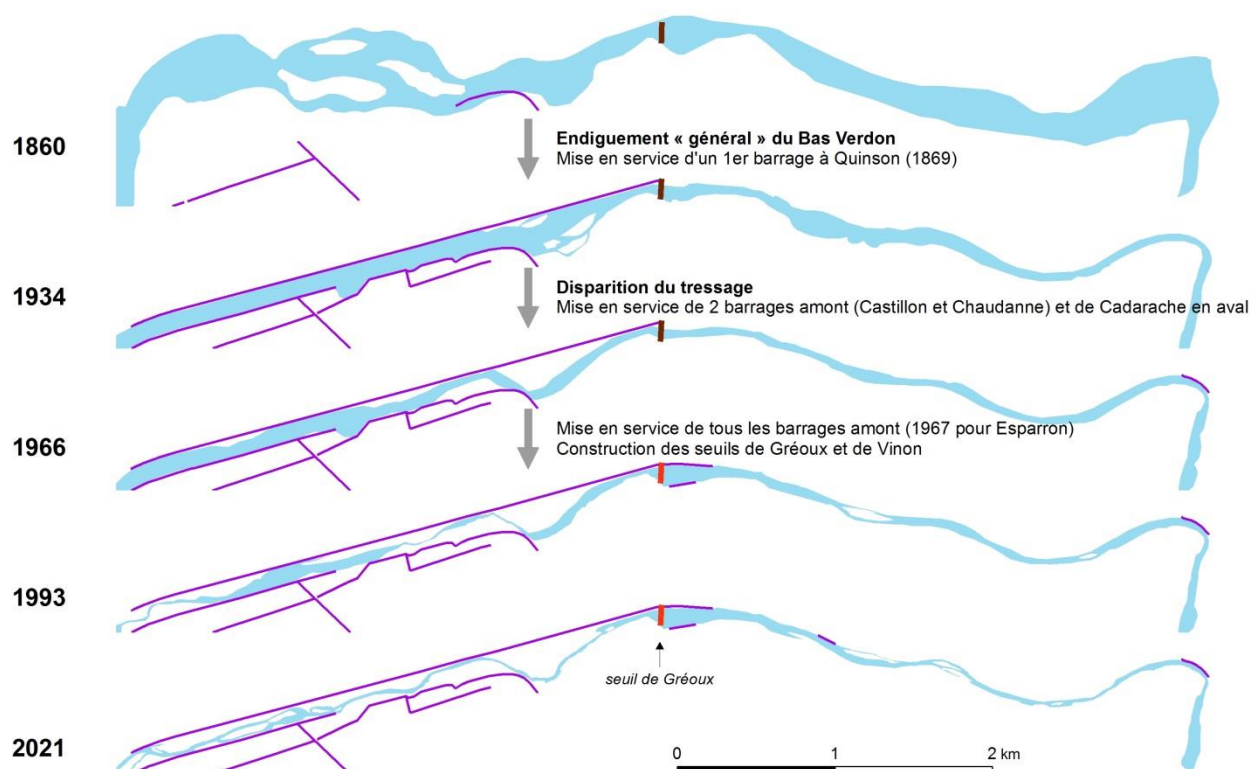


Figure 3. Evolution de la largeur de la bande active du Bas Verdon entre 1860 et 2021 : a) évolution de la largeur moyenne ; b) évolutions par tronçon homogène

Secteur AMONT entre le barrage d'Esparron et le collet des Fourches

■ Bande active
 ■ Seuil naturel rocheux
 ■ Seuil artificiel
 ■ Principaux ouvrages latéraux



Secteur AVAL entre le collet des Fourches et la retenue de Cadarache

■ Bande active
 ■ Seuil naturel rocheux
 ■ Seuil artificiel
 ■ Principaux ouvrages latéraux

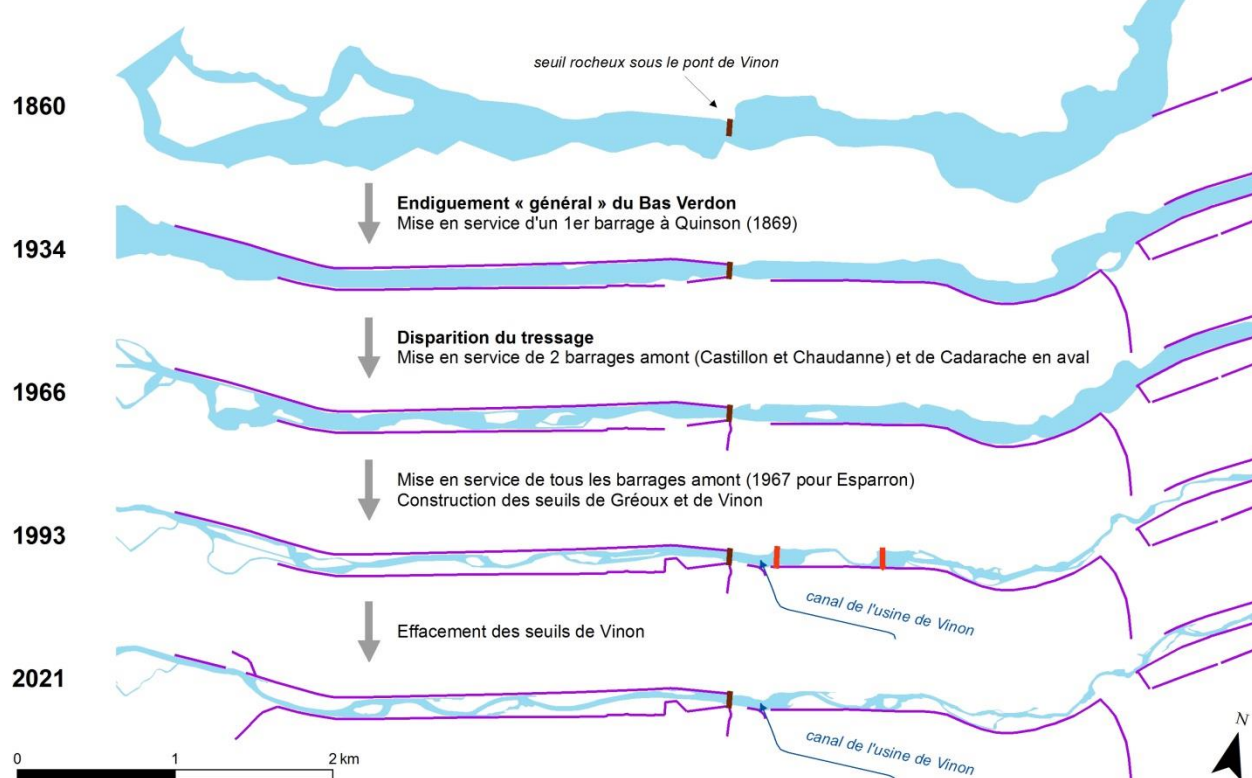


Figure 4. Cartographie diachronique des bandes actives du Bas Verdon



Figure 5. Principaux blocages de la mobilité latérale du Bas Verdon par les ouvrages latéraux (les ouvrages sont représentés en rouges et les blocages en jaunes)

3.2- Evolutions verticales des fonds

3.2.1- Inventaire des données disponibles

Pour étudier le plus finement possible les évolutions verticales du lit, nous avons recensé puis tenté de récupérer tous les levés topographiques réalisés sur le secteur d'étude.

Le **tableau 2** ci-dessous établit la liste des levés mentionnés dans les études antérieures et les documents fournis par le PNRV. La dernière ligne correspond au profil en long établi par nos soins à partir des acquisitions LIDAR réalisées par Opsia en avril 2021 dans le cadre de la présente étude.

Auteur et/ou destinataire des levés	Type de levés et localisation	Date des levés
Service du Nivellement Général de la France	profil en long de la ligne d'eau de l'ensemble du Bas Verdon	nov. et déc. 1907
levé réalisé par/pour EDF d'après SCP 1995	12 profils en travers entre le pont de Vinon et la retenue de Cadarache	1959
CERIC (d'après plusieurs sources)	lignes d'eau ponctuelles à différents débits entre le pont de Quinson et la Durance	1962 à 1964
plan EDF mentionné par Lefort 1995a, Sigosphere et Morpheau Conseils 2016	plan de projet de la retenue de Gréoux	< 1966
levé réalisé pour l'étude Lefort 1995b	profil en long des lignes d'eau entre le pont de Vinon et la retenue de Cadarache	mars 1995
levé réalisé pour l'étude SCP 1995	profil en long du fond entre le Malaurie et la retenue de Cadarache	été 1995
cabinet Petitjean pour l'étude Lefort 1995a	profil en long des lignes d'eau et laisses de crue autour de Gréoux	novembre 1995
levé réalisé pour l'étude Sogreah et al. 2002	profil en long du fond et/ou de la ligne d'eau de l'ensemble du Bas Verdon	mars 2001
levé réalisé pour l'étude Lefort 2006	profil en long des lignes d'eau entre le pont de Vinon et la retenue de Cadarache	mai 2006
levé réalisé pour l'étude CETE 2012	39 profils en travers entre le Malaurie et la forêt domaniale de Cadarache	2009
GEOA, pour le PNRV	profil en long de la ligne d'eau de l'ensemble du Bas Verdon	octobre 2010
levé réalisé pour la commune de Gréoux	2 profils en travers autour du pont de Gréoux	2011
Toulemonde-Bontoux, pour l'étude Artelia 2013-2015	14 profils en travers entre le Colostre et la déchetterie de Gréoux	2013
Sintegra, pour l'étude Artelia 2013-2015	levé bathymétrique de la retenue du seuil de Gréoux	2014
Sigosphere, pour le PNRV	profil en long du fond et de la ligne d'eau de l'ensemble du Bas Verdon	septembre 2016
levé réalisé par/pour SCE 2019	profil en long du fond sur 2 km en amont du pont de Vinon	2018
Opsia, pour cette étude	profil en long de la ligne d'eau extrait à partir des levés LIDAR	8 avril 2021

Tableau 2. Liste des levés topographiques réalisés sur le Bas Verdon

3.2.2- Limites des données

Tous les levés mentionnés n'ont pas pu être retrouvés. Par ailleurs, si les levés les plus récents sont disponibles au format numérique, les levés anciens ne sont disponibles que sous format papier (profils en long dessinés par les auteurs des levés ou dans les rapports d'étude) et avec des degrés divers de précision de lecture. Les altitudes des points renseignés sont donc moins précises, comme leurs positions dans l'espace (distance amont-aval). Nous avons donc écarté les données que nous ne sommes pas parvenus à recalculer raisonnablement.

C'est notamment le cas de la plupart des données datant de la fin du 20^{ème} siècle. Les levés réalisés ne couvrent généralement qu'un court tronçon et sont peu denses (peu de points levés). Outre les défauts des levés eux-mêmes, les sources qui relatent ces données (essentiellement des graphiques) ne permettent pas de recalculer précisément les profils en long, ce qui entraîne d'importantes incertitudes.

Le même problème de recalcul existe avec le profil en long de 1907 mais, compte tenu des fortes évolutions constatées, les incertitudes deviennent négligeables.

Enfin, il est délicat de comparer des profils en long des lignes d'eau avec des profils en long des fonds. Nous nous intéressons essentiellement à l'évolution des fonds du lit mais nous nous appuyons essentiellement sur des levés de ligne d'eau dans les sections suivantes. Ces derniers sont plus nombreux et présentent l'avantage de lisser les pentes, ce qui facilite la lecture des profils en long et entraîne généralement moins d'erreur dans le calcul des évolutions. Ils présentent cependant l'inconvénient d'être influencés par les débits lors des levés. Nous nous sommes donc efforcés d'évaluer les différences d'altitude engendrées par ces débits pour les rendre comparables.

3.2.3- Evolution du profil en long depuis 1907

Lorsque l'on compare le profil en long le plus ancien (levé entre fin novembre et début décembre 1907) avec le plus récent (avril 2021), on constate d'emblée que les lignes d'eau se sont fortement abaissées sur la majeure partie du Bas Verdon, sauf dans les retenues du seuil de Gréoux et du barrage de Cadarache où elles sont artificiellement surélevées (**figure 6**).

L'influence des seuils rocheux de Gréoux et de Vinon qui séparent les 3 tronçons homogènes est également mise en évidence. Ces seuils rocheux, déjà visibles sur les photos aériennes de 1934, bloquent naturellement l'incision du lit. L'abaissement des lignes d'eau est donc minimal en amont immédiat de ces 2 points durs et, au contraire, maximal en aval immédiat. Et le barrage de Cadarache, mis en service en 1959, constitue en quelque sorte un dernier point dur à l'extrémité aval du Verdon. Le gradient amont-aval des évolutions est ainsi très net sur les 2 tronçons aval du Bas Verdon (« TCC aval » et « aval Vinon »).

Ce n'est pas le cas dans le TCC amont car d'autres affleurements rocheux ont rapidement bloqué l'incision du lit. La roche mère devait déjà affleurer par endroits sur ce tronçon en 1907, notamment aux environs du parcours de santé où le profil en long des grandes forces hydrauliques montre des ruptures de pente significatives. Elle affleure désormais de manière discontinue depuis le pied du barrage d'Esparron jusqu'à la queue de retenue du seuil de Gréoux. La pente du lit correspond donc aujourd'hui à peu près à celle des affleurements rocheux sur plus de 3 km.

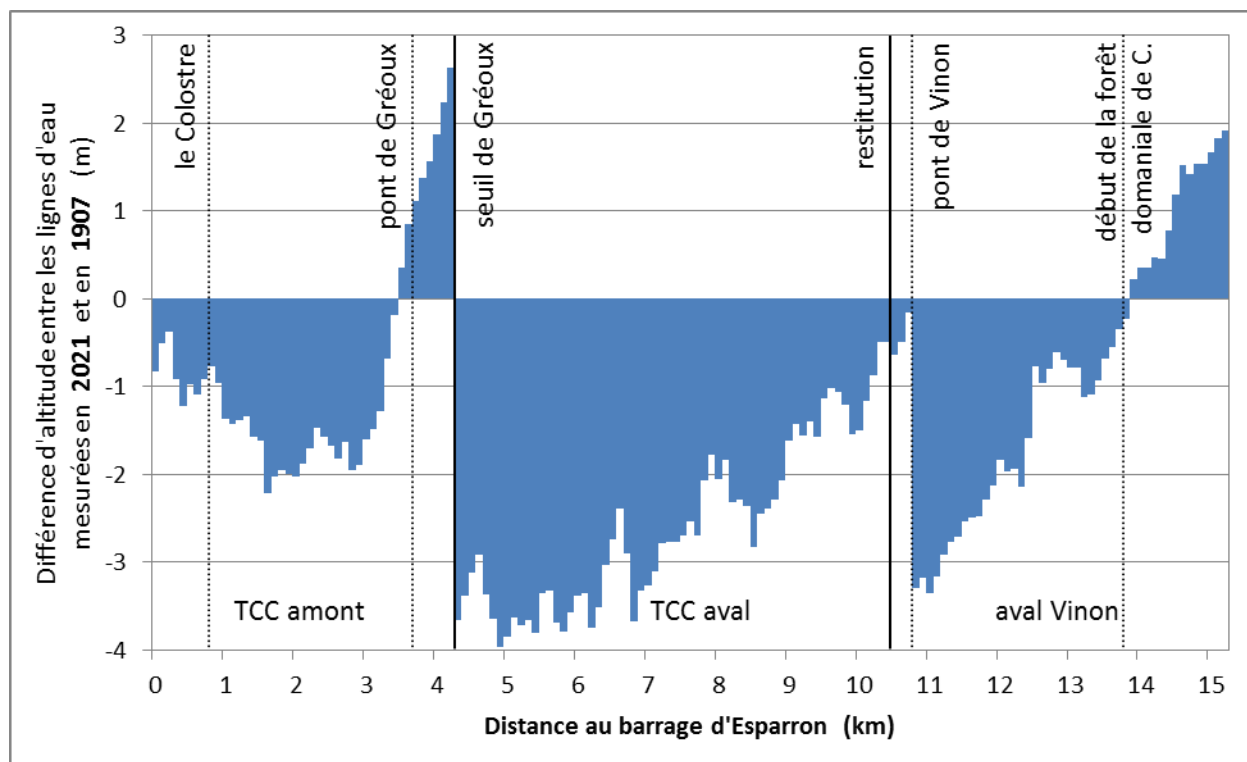


Figure 6. Différences entre les lignes d'eau d'avril 2021 et celles de novembre-décembre 1907 (profil en long des grandes forces hydrauliques)

Soulignons que ces lignes d'eau ne sont pas directement comparables du fait des différences de débit entre les levés :

- D'après Lefort (2006), la fin de l'année 1907 a été particulièrement humide avec un débit moyen mensuel à Quinson de 117 m³/s en novembre et 57 m³/s en décembre. Il estime ainsi que le débit lors des levés du profil en long des grandes forces hydrauliques (du 4 au 6 décembre en amont de l'actuelle forêt domaniale de Cadarache ; le 29 novembre en aval) devait être de l'ordre de 80 m³/s sur le Bas Verdon et que la surélévation de la ligne d'eau de 1907 par rapport à l'actuel débit réservé est d'environ 1 m à Gréoux et 75 cm à Vinon.
- Lors des levés du 8 avril 2021, le débit était égal sinon proche du débit réservé (2,2 m³/s) dans le TCC et une écluse était en cours en aval de la restitution (débit turbiné compris entre 40 et 41 m³/s d'après EDF). Nous estimons que cela entraîne une surélévation de la ligne d'eau d'environ 80 cm par rapport au débit réservé.

Il faut donc soustraire environ 1 m aux évolutions représentées sur la **figure 6** dans le TCC. Mais les lignes d'eau de 1907 et 2021 sont à peu près comparables en aval de Vinon (le lit était plus large en 1907). Il faut également ne pas tenir compte des évolutions dans les retenues du seuil de Gréoux et du barrage de Cadarache où l'évolution des lignes d'eau n'est pas représentative de celle du lit.

Compte tenu des différences de débit, l'incision du lit entre 1907 et 2021 peut être évaluée comme suit :

- Sur les ¾ amont du TCC amont, l'incision est de l'ordre de 50 cm.
- Dans la retenue du seuil de Gréoux, nous ne pouvons pas évaluer les évolutions sur la base du profil en long de 2021 mais on sait par ailleurs que les fonds ont peu évolué : la ligne d'eau levée en 2010 au débit réservé alors que le seuil de Gréoux était transparent est en

moyenne 1 m plus élevée que celle de 1907 ; cet écart est donc attribuable à la différence de débit.

- Dans le TCC aval, l'incision est de l'ordre de 3 m au pied du seuil puis décroît jusqu'à devenir nulle à proximité de la restitution. En moyenne, elle est de 2,5 m dans la moitié amont qui correspond au tronçon rectiligne de la plaine des Iscles et de 1 m dans sa moitié aval.
- Entre la restitution de l'usine de Vinon et le pont de Vinon, les fonds comme les lignes d'eau n'ont pas évolué de manière significative.
- En aval du pont de Vinon, l'incision est encore de l'ordre de 3 m au pied du seuil rocheux et décroît vers l'aval pour devenir nulle aux environs de l'entrée de la forêt domaniale de Cadarache. En moyenne, elle est ainsi d'environ 1.5 m sur ce linéaire de 3 km en aval du pont de Vinon.
- Au-delà de l'entrée de la forêt domaniale de Cadarache, les fonds se sont probablement exhaussés mais nous ne sommes pas en mesure de quantifier l'évolution du lit. En effet, la reconfiguration de la confluence Verdon-Durance lors de la construction du barrage de Cadarache limite la comparaison des levés.

3.2.4- Evolutions à la fin du 20^{ème} siècle

Dans le TCC amont, l'unique profil en long intermédiaire dont nous disposons entre celui de 1907 et les plus récents que nous étudierons plus loin (cf. § 3.2.5) est la ligne d'eau de 2001. Ce profil en long couvre les 2 km en amont du seuil de Gréoux (dont un peu plus de 1 km de retenue) et il est semblable à ceux de 2010, 2016 et 2021. Le TCC amont est donc stable depuis 2001 au moins. Il l'est probablement depuis beaucoup plus longtemps du fait de la faible profondeur de la roche mère.

Dans le TCC aval, quelques points de ligne d'eau d'étiage ont été levés en 1964. Ils sont globalement à la même altitude que tous les levés ultérieurs (2001, 2010, 2016, 2021). L'incision de ce tronçon serait donc survenue avant 1964.

Le tronçon aval de la restitution est mieux renseigné durant cette période. Les profils en long des fonds (**figure 7**) montrent les évolutions suivantes :

- Entre 1959 et 1995, on constate un basculement du profil en long des fonds entraînant une diminution de la pente du lit : les fonds se sont incisés de plus de 1 m en aval proche du pont de Vinon et sur environ 1,5 km, et se sont au contraire exhaussés de près de 2 m en queue de retenue de Cadarache.
- Entre 1995 et 2001, on observe un léger exhaussement des fonds sur 800 m en aval du pont mais celui-ci n'apparaît plus sur les levés de 2010. Il s'agissait peut-être d'un dépôt temporaire qui s'est résorbé, d'une simple imprécision des données voire d'un artefact engendré par un curage du lit après la crue de novembre 1994 (le niveau bas des fonds de 1995 serait alors artificiel). En tous cas, cet exhaussement ne révèle pas de tendance durable au dépôt.

Les profils en long des lignes d'eau (**figure 8**) sont moins comparables compte tenu de la variabilité des débits. Voici les principaux commentaires que l'on peut émettre :

- Les lignes d'eau levées en mars puis en été 1995 ne sont pas très cohérentes : elles sont différentes alors qu'il n'y a pas eu de déversement au barrage d'Esparron entre ces 2 levés. Les différences pourraient provenir des travaux post-crue de 1994.

- Le profil en long de 2001 a été levé à 50 m³/s, ce qui le rend peu comparable aux autres.
- En revanche, celui de 2006 a été levé au débit réservé et montre clairement une incision du lit dans la moitié aval du tronçon.

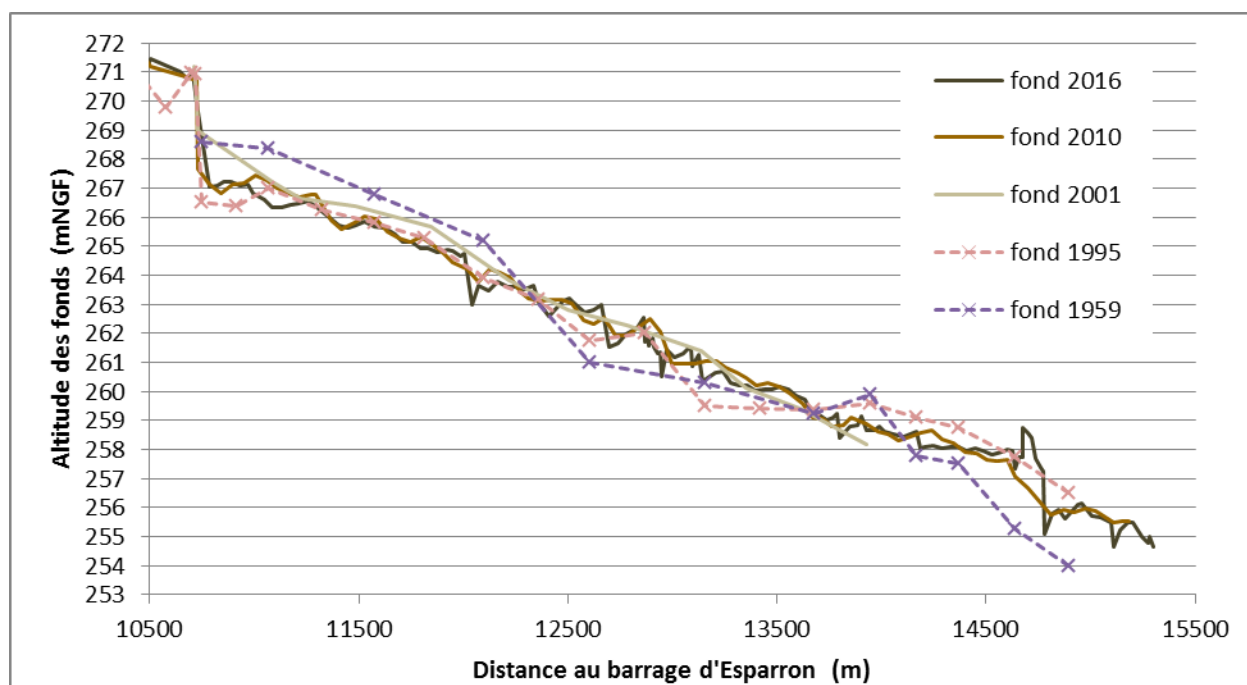


Figure 7. Profils en long des fonds du tronçon aval (« aval Vinon »)

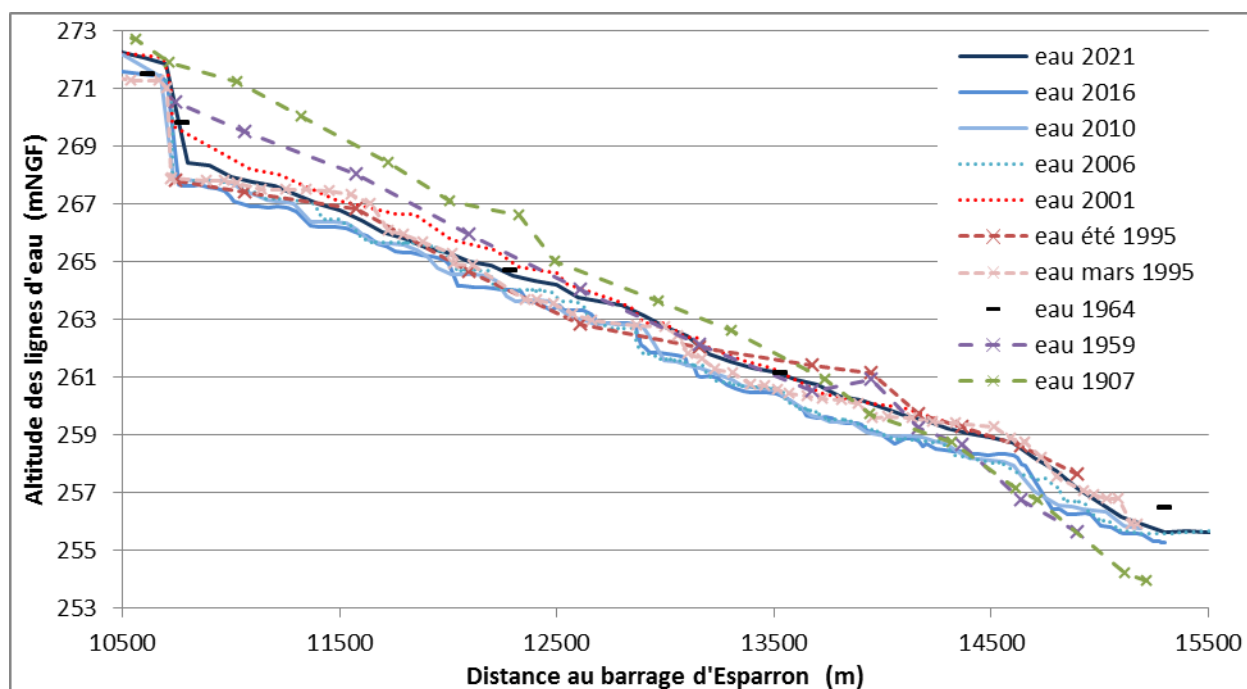


Figure 8. Profils en long des lignes d'eau du tronçon aval (« aval Vinon »)

En définitive, les profils en long levés au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle montrent que l'incision du Bas Verdon s'est essentiellement déroulée au début de ce 20^{ème} siècle. Lefort (2006) et Koulinski (Sogreah et al. 2002) estiment que c'est principalement le 1^{er} barrage de Quinson, construit entre 1866 et 1869, qui en est à l'origine. On sait que ce barrage a eu peu d'influence sur les débits du Verdon. Mais il a entraîné une érosion progressive des fonds qui s'est rapidement propagée vers l'aval compte tenu des pentes fortes et de la faiblesse supposée des stocks alluviaux dans les gorges amont.

Nous avons peu de détails sur les évolutions verticales du TCC mais on peut considérer qu'il s'est stabilisé avant la mise en service du barrage d'Esparron (1967). Des dépôts significatifs sont tout de même apparus provisoirement suite à la crue de novembre 1994 d'après Lefort (1995a).

En aval du pont de Vinon, des évolutions significatives ont eu lieu jusqu'au début du 21^{ème} siècle. La première tendance observée est un basculement du profil en long (incision en amont et exhaussement en aval) suite à la construction du barrage de Cadarache (1955-1959) et jusqu'à la crue de 1994. L'incision amont est due au déficit sédimentaire du Bas Verdon. L'exhaussement en aval est lié à l'influence du barrage de Cadarache qui n'avait jamais été mis en transparence jusqu'à cette crue. Des transparences hydrauliques sont désormais réalisées lors des crues dont le débit journalier prévisionnel Durance+Verdon est supérieur à 500 m³/s (sources : EDF ; SAGE Verdon 2014). Elles ont permis d'inverser la tendance, au moins provisoirement, puisque le lit à l'extrémité aval du Bas Verdon s'est abaissé après 1995. En parallèle, l'incision en aval proche du pont de Vinon s'est poursuivie.

3.2.5- Evolutions récentes

Les évolutions verticales récentes du Bas Verdon peuvent être évaluées par comparaison des profils en long de 2010, 2016 et 2021. Ce dernier est extrait des levés LIDAR acquis dans le cadre de cette étude. Par conséquent, il ne peut pas rendre compte de l'altitude des fonds (le signal laser pénètre peu dans l'eau) mais seulement des lignes d'eau.

Nous avons comparé les 3 profils en long des lignes d'eau ainsi que les 2 profils en long des fonds. Mais, pour résumer nos résultats, nous ne présenterons que l'évolution globale des lignes d'eau entre 2010 et 2021 (**figure 9**). Au cours de cette période, plus de 7 déversements sont survenus et 3 d'entre eux ont généré un transport solide significatif en mai 2013, novembre 2016 et décembre 2019 avec des débits maximums déversés par le barrage amont de 150, 125 et 150 m³/s respectivement (**tableau 4**).

Il n'y a pas eu d'évolution significative dans le TCC amont entre 2010 et 2021 contrairement à ce que suggère la **figure 9** :

- L'élévation importante des lignes d'eau dans la retenue du seuil de Gréoux provient du fait que le seuil était transparent lors des levés de 2010.
- La légère élévation des lignes d'eau en amont de la retenue provient soit d'une imprécision des levés soit d'une différence de débit, mais certainement pas d'un exhaussement des fonds. Cette élévation apparente survient en fait entre 2016 et 2021 et concerne l'ensemble du tronçon. Or le niveau d'eau de la retenue est contrôlé par le seuil de Gréoux et ne serait pas influencé par un léger exhaussement des fonds. Par ailleurs, il est impossible que les fonds se soient significativement exhaussés en amont de la retenue compte tenu de la fréquence des affleurements rocheux.

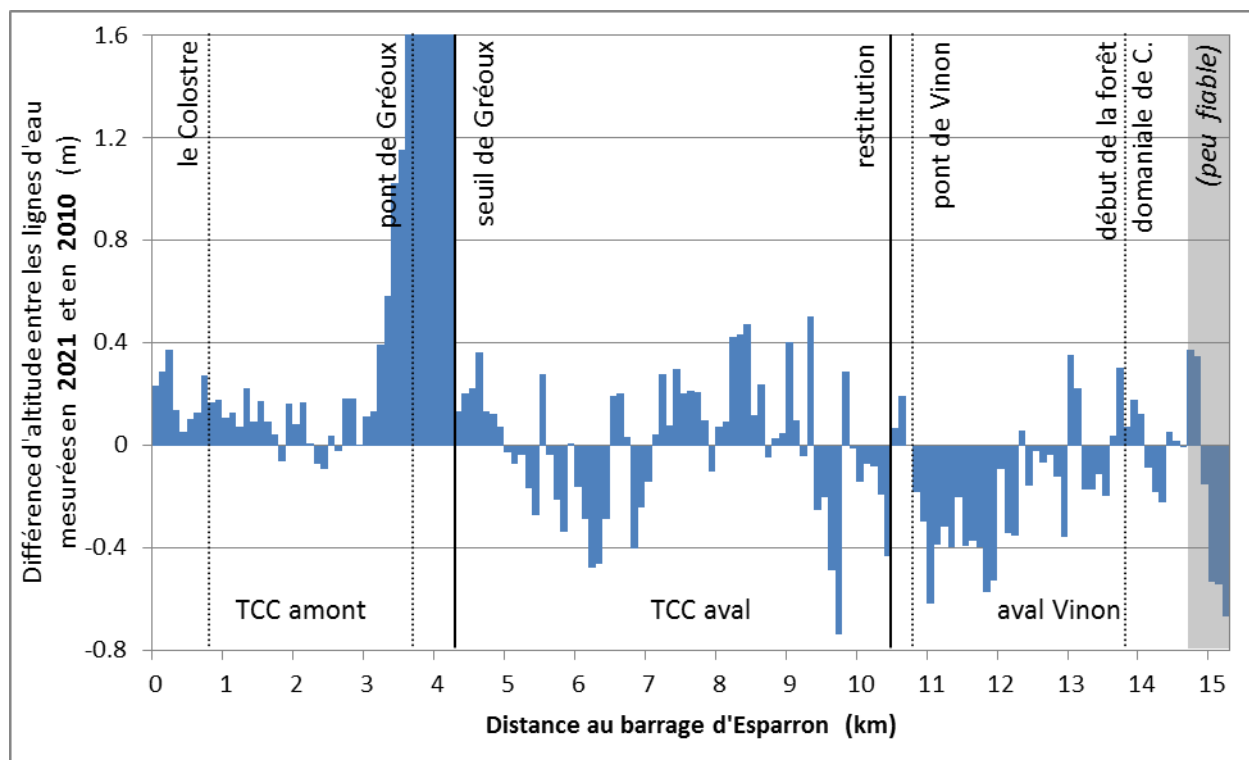


Figure 9. Différences entre les lignes d'eau d'avril 2021 et celles d'octobre 2010

Dans le TCC aval, les différences d'altitude entre les lignes d'eau sont négligeables en moyenne. Il y a tout de même eu quelques évolutions locales qui se compensent globalement et alternent de l'amont vers l'aval :

- élévation moyenne de 18 cm entre les PK 4,3 et 4,9 (PK pour point kilométrique, soit la distance au barrage d'Esparron) ;
- abaissement moyen de 14 cm entre les PK 5,0 et 7,0 ;
- élévation moyenne de 18 cm entre les PK 7,1 et 9,3 ;
- abaissement moyen de 21 cm entre les PK 9,4 et 10,4.

Ces évolutions ne témoignent d'aucune tendance réelle à l'incision ou à l'exhaussement des fonds. Il s'agit essentiellement de fluctuations cycliques autour d'un niveau moyen résultant de la respiration du lit. Le dernier linéaire d'environ 1 km en amont de la restitution a également été influencé par l'arasement des seuils de Vinon (septembre 2018) qui a entraîné un abaissement des lignes d'eau ainsi qu'une légère érosion régressive des fonds. Celle-ci devrait encore progresser à l'avenir mais elle ne relève pas d'un déficit sédimentaire.

En aval de Vinon, le levé de la ligne d'eau de 2021 a été réalisé lors d'une éclusée de l'usine hydroélectrique (40 à 41 m³/s). Les évolutions présentées dans la **figure 9** ont été corrigées pour en tenir compte. Cette correction est fiable jusqu'à environ 14,7 km en aval du barrage d'Esparron (la pente et la largeur du lit mouillé étant à peu près constantes). Ce n'est pas le cas au-delà du fait de l'absence digues et de l'influence de la retenue de Cadarache (la zone grisée représente la limite de validité). Ce résultat met en évidence une incision de l'ordre de 30 cm entre le pont de Vinon et la station d'épuration de Vinon (1,2 km). L'examen des différents levés montre qu'elle a affecté les 800 premiers mètres en aval du pont de Vinon entre 2010 et 2016 puis les 400 m suivants entre 2016 et 2021.

4- Transport solide et morphologie actuelle

4.1- Constitution des fonds

4.1.1- Méthode

Le secteur d'étude a été parcouru en juin 2019 puis en juillet 2021 pour déterminer la granulométrie des fonds qui renseigne sur la qualité des substrats et l'équilibre sédimentaire des tronçons. Les levés ont été réalisés à intervalles réguliers sur 36 transects espacés de 400 m (**figure 10**).

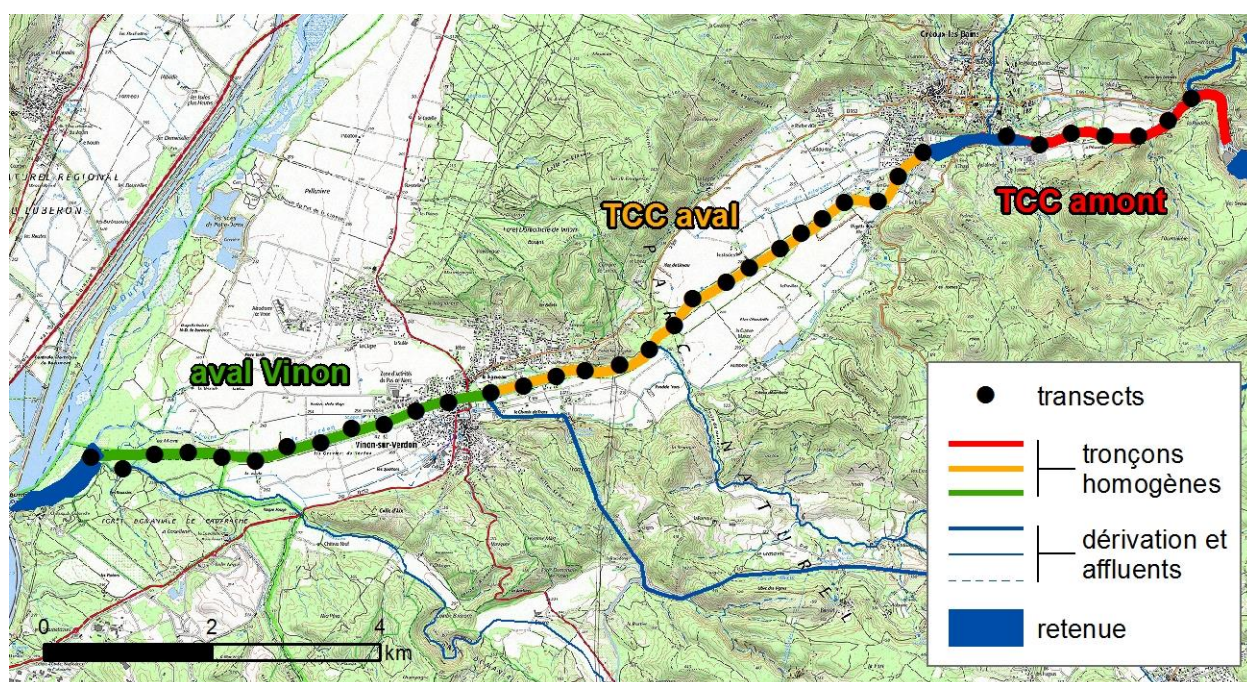


Figure 10. Localisation des transects levés sur le Bas Verdon

Sur chaque transect, les levés ont été effectués en 10 points de mesure répartis sur la largeur du lit vif selon le protocole EVHA. Ce protocole consiste à identifier visuellement (à l'aide d'un abaque) la fraction dominante et l'éventuelle fraction co-dominante dans un rayon de 50 cm autour de chaque point de mesure. Les fractions granulométriques considérées reposent sur la classification de Wentworth modifiée par Malavoi et Souchon (1989), présentée dans le **tableau 3**.

Par ailleurs, le type de faciès d'écoulement de chaque transect est renseigné car il influence la constitution des fonds : les faciès à forte énergie (ex. : rapides) présentent en général des fonds plus grossiers que les faciès à moindre énergie (ex. : plats, mouilles). Il s'agit donc d'un indicateur de contexte dont il faut tenir compte dans l'interprétation des résultats. La classification des 11 faciès d'écoulement établie par Malavoi et Souchon (2002) et sa simplification en 3 grands types sont décrites en annexe.

Nom de la Classe granulométrique	Classe de taille (diamètre en mm)	Code utilisé
Dalles (dont dalles d'argile)	>1024	D
Rochers	>1024	R
Blocs	256 - 1024	B
Pierres Grossières	128 - 256	PG
Pierres Fines	64 - 128	PF
Cailloux Grossiers	32 - 64	CG
Cailloux Fins	16 - 32	CF
Graviers Grossiers	8 -16	GG
Gravier fins	2 - 8	GF
Sables	0,625 - 2	S
Limons	0,0039 - 0,0625	L
Argiles	< 0,0039	A

Tableau 3. Classification de Wentworth modifiée par Malavoi et Souchon (1989)

4.1.2- Résultats des échantillonnages granulométriques

La **figure 11** présente la distribution des faciès d'écoulement échantillonnés sur les 3 tronçons homogènes lors des levés sur transects, simplifiée en 3 grands types :

- les faciès profonds (mouilles, chenaux lentiques ou chenaux lotiques), caractérisés par une hauteur d'eau moyenne élevée (> 60 cm) et des vitesses d'écoulement généralement faibles (< 30 cm/s) ;
- les radiers, caractérisés par une pente forte qui se traduit par une faible hauteur d'eau (< 60 cm) et une vitesse d'écoulement élevée (> 30 cm/s) ;
- les plats (lentiques ou courants) qui correspondent à des faciès intermédiaires.

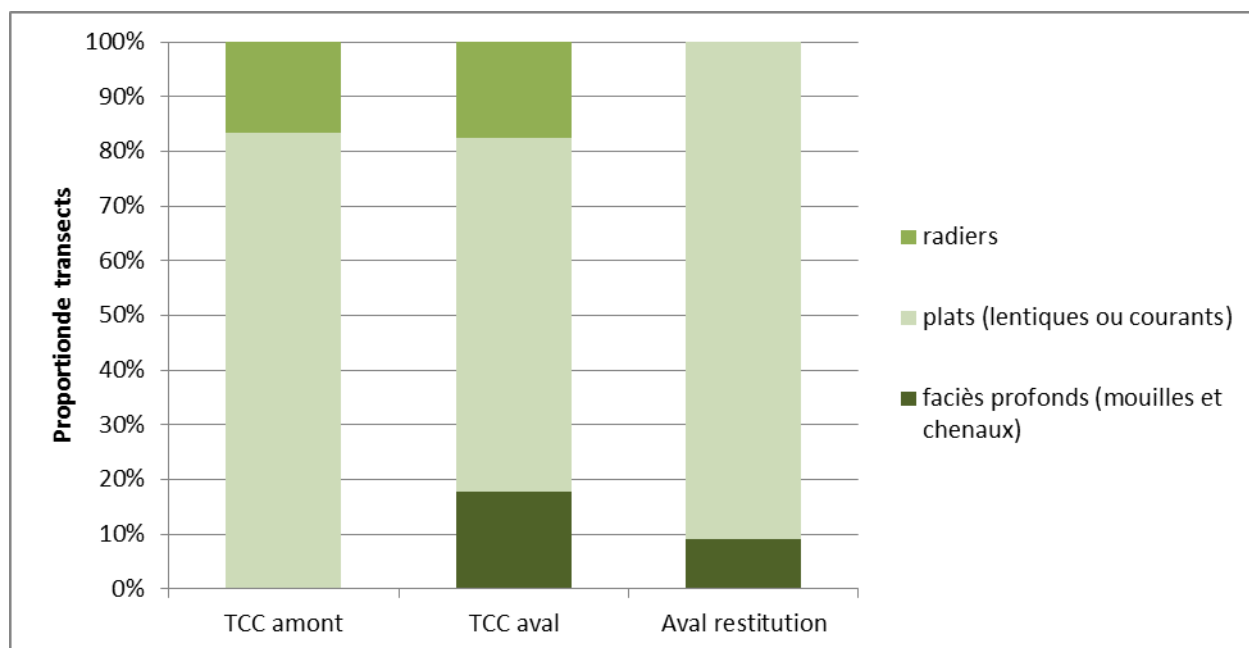


Figure 11. Distribution des faciès échantillonnés lors des levés sur transects

Les faciès d'écoulement échantillonnés sont globalement dominés par les plats mais il existe de légères différences entre les tronçons. Cela ne témoigne pas forcément de véritables différences morphologiques mais il faut en tenir compte lors de la comparaison des distributions granulométriques. Cette distribution est néanmoins cohérente avec la répartition spatiale des volumes d'alluvions au sein du Bas Verdon : les faibles volumes de matériaux dans le TCC amont limitent la diversité des faciès qui s'organisent essentiellement en long plats entrecoupés de courts seuils rocheux (mini-chutes) avant de laisser place à un long chenal lentique dans la retenue du seuil de Gréoux. Les volumes plus importants stockés dans les tronçons aval favorisent au contraire le développement de séquences radiers-mouilles entrecoupées de plats. Néanmoins, la faible pente du tronçon aval limite la fréquence des radiers.

La **figure 12** représente la distribution granulométrique moyenne des fonds de chaque tronçon. La comparaison des tronçons peut être réalisée de manière globale (tous types de faciès confondus ; **figure 12a**) ou en ne tenant compte que du type de faciès dominant (les plats ; **figure 12b**) pour s'affranchir de l'influence d'un éventuel biais d'échantillonnage.

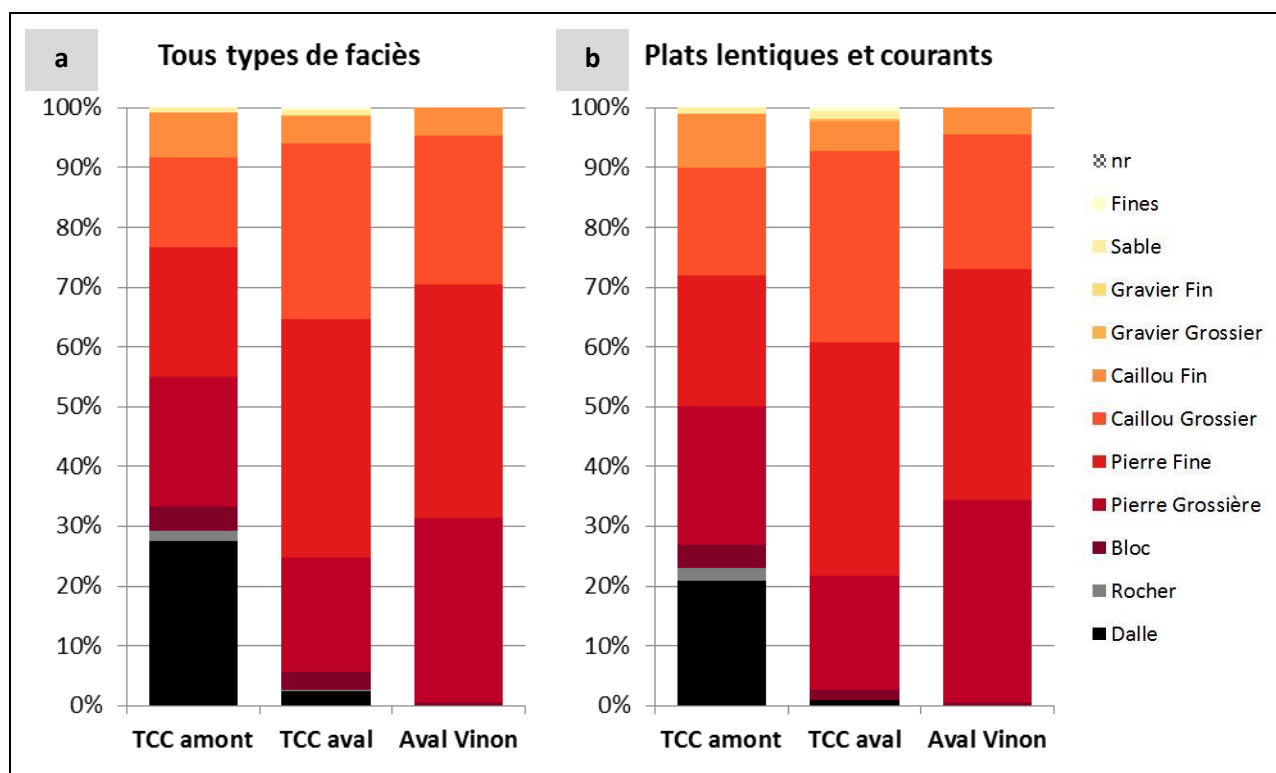


Figure 12. Distributions granulométriques dominantes du Bas Verdon par tronçon

Les fonds du TCC amont sont principalement constitués de fractions granulométriques grossières et moyennes (dalles à cailloux grossiers). Les affleurements rocheux (dalles) représentent à eux seuls environ un quart des fractions dominantes. Le fait que la roche mère affleure aux environs de la confluence avec le Colostre n'est pas étonnant compte tenu de la proximité des versants rocheux mais leur présence plus en aval, jusque dans la retenue, témoigne d'un déficit sédimentaire important. Les plus anciennes photographies aériennes dont nous disposons (1934) montrent que des affleurements étaient déjà présents à l'extrémité amont de ce tronçon mais pas en aval et pas dans ces proportions. Il y a néanmoins une proportion non négligeable de cailloux fins (près de 10%) que l'on peut probablement attribuer aux apports solides du Colostre comme le supposait MRE (2019).

Les fonds des 2 tronçons aval sont largement dominés par les pierres (fines ou grossières) et les cailloux grossiers qui représentent à eux seuls 90% des fractions dominantes en moyenne. Viennent ensuite les cailloux fins qui ne représentent que 4% des fractions dominantes. La part des affleurements rocheux est globalement négligeable. En fait, la roche mère affleure essentiellement en aval immédiat du seuil de Gréoux (sur laquelle il est fondé). Les 2 tronçons aval présentent donc des fonds semblables. Ils sont tout de même un peu plus grossiers en aval de Vinon dont la pente est pourtant plus faible, ce qui devrait théoriquement favoriser la présence de particules de plus petite taille en moyenne. Cela suggère que le déficit sédimentaire du Bas Verdon est globalement supérieur en aval de la restitution de l'usine de Vinon qu'en amont, exception faite du TCC amont.

Au-delà de la différence globale entre les tronçons, on peut s'intéresser à l'évolution longitudinale (c'est-à-dire de l'amont vers l'aval) de la distribution des fonds au sein de ces tronçons (**figure 13**). L'analyse de cette figure est moins aisée dans la mesure où les conditions d'écoulement propres à chaque transect brouillent quelque peu l'information (liées aux faciès d'écoulement). Mais on parvient tout de même à observer un gradient au sein des 2 tronçons aval : la taille moyenne des particules diminue vers l'aval. C'est particulièrement visible en aval de Vinon, cela l'est moins dans le TCC aval mais ce gradient existe bel et bien. Un tel gradient semble d'ailleurs exister au sein du TCC amont mais il a peu de signification du fait de la plus grande proximité de la roche mère à l'extrémité amont de ce tronçon et de la retenue de Gréoux qui favorise au contraire les dépôts fins à son extrémité aval.

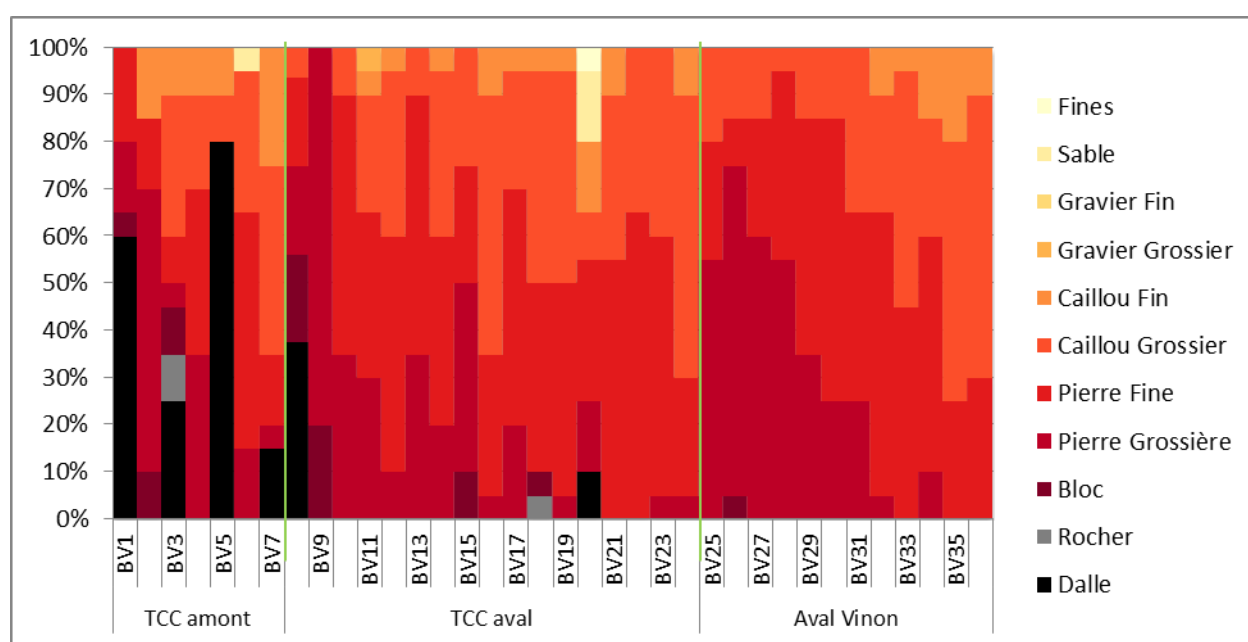


Figure 13. Distributions granulométriques dominantes du Bas Verdon par transect

Pour conclure, la distribution granulométrique des fonds souligne clairement le déficit sédimentaire du Bas Verdon et ses conséquences sur la qualité des substrats. Elle montre que l'intensité globale de ce déficit sédimentaire entre les tronçons est le suivant : TCC amont > aval Vinon > TCC aval. Elle montre également que ce déficit montre un important gradient amont-aval dans les tronçons : il y a plus de différence au sein des 2 tronçons aval qu'entre ces tronçons.

4.2- Qualité globale des habitats physiques

4.2.1- Préambule

Lors de nos campagnes de terrain, nous nous sommes également intéressés à tout ce qui permet d'apprécier l'état général de la rivière et son potentiel de restauration :

- diversité générale des macro-formes fluviales (présence de bancs, de chenaux multiples, diversité des faciès d'écoulements...) ;
- présence d'atterrissements potentiellement remobilisables à proximité immédiate du lit de la rivière (bancs, banquettes, basses terrasses) ;
- degré de colmatage minéral des fonds ;
- présence d'algues ou de périphyton ;
- degré de végétalisation des bancs ;
- état et influence des aménagements.

Nous résumons dans cette section les éléments les plus marquants. Il s'agit d'informations qualitatives complémentaires aux précédentes analyses car elles témoignent également du fonctionnement hydromorphologique du Bas Verdon tout en offrant une vision plus large de la qualité des habitats physiques. Par « habitat physique », nous entendons les composantes physiques des habitats aquatiques : qualité et diversité des substrats et des macro-formes fluviales (bancs, faciès).

Nos commentaires sur la constitution des fonds sont redondants avec la section précédente (§ 4.1). Mais notre expertise s'est appuyée autant sur cet examen qualitatif des fonds de l'ensemble des tronçons parcourus que sur les échantillonnages systématiques réalisés sur les transects. Nous tenions donc à partager notre ressenti terrain et à les illustrer par des photographies.

4.2.2- Résultats des observations de terrain

En amont du seuil de Gréoux, les fractions granulométriques grossières prédominent et les fonds sont colmatés. Les affleurements recouvrent parfois l'intégralité de la largeur du lit mineur, formant ainsi de vastes dalles. Ils sont globalement plus fréquents à proximité de la confluence avec le Colostre mais ils sont quasiment présents sur l'ensemble du tronçon (**figure 14**). Les dépôts fins sont relativement rares en dehors de la retenue mais on constate un encroûtement des fonds lié aux concrétions biochimiques à la surface des particules (**figure 15**). Le taux de couverture du périphyton est par ailleurs très élevé, les fonds étant parfois tapissés de longues algues filamenteuses.

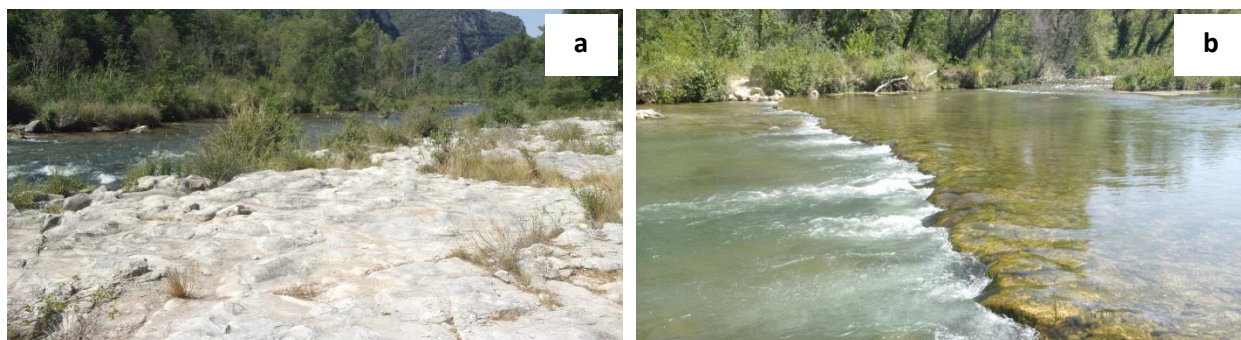


Figure 14. Affleurements rocheux à proximité de la confluence avec le Colostre (a) et aux environs du parcours de santé de Gréoux-les-Bains (b)



Figure 15. Colmatage et couverture algale entre le Colostre et la retenue de Gréoux

Du fait des hauteurs d'eau importantes et des faibles vitesses d'écoulement, les habitats de la retenue se distinguent des habitats amont par la présence de particules plus petites et le développement de grands herbiers (**figure 16**).



Figure 16 Grands herbiers dans la retenue (a) et en aval immédiat (b) du seuil de Gréoux

En aval immédiat du seuil de Gréoux et sur environ 2 km, la rivière s'écoule de manière essentiellement rectiligne en un chenal unique bordé de marges boisées et figées. Les fonds sont encore grossiers, peu diversifiés et peu mobiles. Ils sont par ailleurs recouverts d'algues filamenteuses. La morphologie générale du lit est donc celle d'une rivière profondément dégradée.

Les habitats aquatiques évoluent favorablement aux environs du domaine des Iscles. La sinuosité du lit mineur au sein de l'espace inter-digue augmente. Les écoulements se divisent par endroits en chenaux multiples séparés par des bancs de petite dimension, relativement mobiles et peu végétalisés. Les faciès d'écoulement deviennent alors plus variés et leur fréquence de succession s'accélère. La taille moyenne des particules diminue et les fractions dominantes se diversifient. Des zones d'écoulement très faibles se développent dans certains bras secondaires, connectés au chenal principal par l'aval et alimentés par la nappe d'accompagnement, où les alluvions fines se déposent. Tout cela contribue néanmoins à améliorer grandement la qualité des substrats et, de manière plus générale, la composante physique des habitats aquatiques (**figure 17**). Ce constat est valable jusqu'à la restitution même si la présence des

seuils de Vinon a généré des habitats atypiques (effet retenue) et si leur arasement récent a momentanément perturbé le milieu.

Il y a donc un gradient amont-aval très net dans le TCC aval en termes de qualité et de diversité des habitats et cette évolution longitudinale paraît parfaitement corrélée à l'abondance des stocks alluvionnaires et à la taille des matériaux du lit présentés dans les sections précédentes.

Il en est exactement de même en aval du pont de Vinon (**figures 18 à 19**). A ce titre, les 2 tronçons aval (entre le seuil de Gréoux et la restitution puis entre le pont de Vinon et la retenue de Cadarache) se ressemblent beaucoup. Sur ce tronçon aval, l'amélioration des caractéristiques physiques du lit est en revanche plus brusque : la limite entre le linéaire amont visiblement dégradé et le linéaire aval de meilleure qualité apparente se situe à environ 2 km en aval du pont de Vinon. Cette limite est quelque peu subjective mais elle nous est apparue évidente sur le terrain.



Figure 17. Diversité des faciès et substrats observés dans la partie aval du TCC



Figure 18. Colmatage et couverture algale en aval proche du pont de Vinon



Figure 19. Exemples de bancs mobiles et de substrats observés dans la partie aval du tronçon « aval Vinon »

4.3- Transport solide

4.3.1- Débits morphogènes

Les débits morphogènes sont les débits capables d'entraîner des modifications de la morphologie du lit par érosion, transport puis dépôt des alluvions grossières (graviers, cailloux et pierres ; les alluvions fines telles que les sables et limons ayant très peu d'influence). Ils peuvent être évalués à partir de formules empiriques de transport solide en déterminant le débit de mise en mouvement (ou d'érosion) des particules composant les fonds du lit. Compte tenu de la pente du lit et de la taille moyenne des matériaux présents à sa surface, nous estimons que ce débit est de l'ordre de :

- 70 m³/s dans le tronçon court-circuité ;
- 90 m³/s en aval de la restitution (du fait de la pente plus faible).

Ces valeurs sont un peu plus faibles que les évaluations réalisées antérieurement :

- Artelia (2013) a évalué ce débit de mise en mouvement à 90 m³/s dans le TCC de Gréoux ;
- D'après MRE (2019), les débits morphogènes seraient supérieurs à 100 m³/s dans la mesure où les crues de 2013 et 2016 (respectivement 150 et 125 m³/s) ont engendré des modifications significatives sur leurs stations d'étude (1 sur chacun des 3 tronçons homogènes).

Il s'agit surtout de valeurs approximatives du débit liquide nécessaire pour générer un flux solide non négligeable mais modeste. Car, en fait, il n'existe pas de véritable seuil pour mettre en mouvement les particules mais plutôt un gradient de conditions : plus le débit augmente, plus la quantité de matériaux et la taille des particules transportées augmentent. Et on peut résumer ce gradient de la manière suivante :

- Quelques particules peuvent être transportées pour des débits un peu plus faibles que nos estimations (dès 50 m³/s dans le TCC et 70 en aval) mais dans des proportions négligeables.
- Il faut probablement atteindre 100 m³/s pour obtenir un transport solide réellement significatif, capables de modifier la morphologie du lit sur le long terme (sans pour autant engendrer un effet immédiat après une seule crue de cette intensité) et dans tous les tronçons.
- Et il faut probablement approcher des 200 m³/s pour que ce transport solide engendre des évolutions morphologiques remarquables à court terme, c'est-à-dire lors d'une crue (migration latérale du cours d'eau, remaniement des bancs, rajeunissement de la bande active).

D'après l'historique des déversements du barrage d'Esparron entre 1969 et 2019 (**tableau 4**) et les débits caractéristiques de crues du Colostre, la fréquence des crues morphogènes serait de l'ordre de 1 à 2 ans dans le TCC comme dans le tronçon aval (où la pente plus faible compense les éclusées de l'usine de Vinon). Ces fréquences sont des ordres de grandeur compte tenu des incertitudes sur les débits du Verdon. Mais ils suffisent à conclure que les crues morphogènes sont fréquentes.

4.3.2- Charriage et capacité de transport

Une première estimation du transport solide du Verdon a été réalisée par l'ingénieur Ivan Wilhelm (d'après Martel 1906), et reprise plus tard par Carzon (1958), d'après les profils en long réalisés en 1878 puis en 1899 sur le remous solide de l'ancien barrage de Quinson (construit entre 1866 et 1869). Il a estimé que 933 000 m³ de « graviers » s'étaient accumulés durant cette période, soit environ 45 000 m³/an.

Plus récemment, les atterrissements en queue de retenue de Castillon ont été évalués à 35 000 m³/an en moyenne (d'après Sogreah et al. 2002 ; probablement estimé par ETRM et INPG en 1997 dans le cadre du schéma de restauration et de gestion des eaux du Haut Verdon).

Ces 2 dernières estimations, très proches, fournissent une bonne estimation des volumes de matériaux apportés au Bas Verdon avant la mise en service des aménagements hydroélectriques amont, et de ce qu'ils seraient encore en leur absence.

Les capacités de transport du Bas Verdon ont été estimées par modélisation dans le cadre du schéma global de gestion du Verdon (Sogreah et al. 2002). Il s'agit d'estimations théoriques du transport solide maximum : la capacité de transport correspond à la quantité maximale de matériaux qu'un tronçon de cours d'eau est capable de transporter (généralement définie pour un débit donné, ou pour une année) ; outre la forte incertitude des méthodes d'évaluation, la capacité de transport ne correspond au transport solide réel que si le stock de matériaux mobilisables est suffisant pour la satisfaire. Les résultats de cette étude sont les suivants :

- la capacité de transport annuelle moyenne serait de 1 500 m³/an en aval du seuil de Gréoux (TCC aval) et de 4 000 m³/an en aval de la restitution (aval Vinon) ;
- elle atteindrait 5 000 m³ lors d'une crue décennale et environ 40 000 m³ lors d'une crue centennale sur ces 2 tronçons. ;
- les capacités de transport n'ont pas été évaluées en amont du seuil de Gréoux (TCC amont), le transport solide étant jugé négligeable du fait de la stabilité des fonds et des faibles apports du Colostre.

Faute de données hydrologiques suffisantes (incertitudes sur les débits de pointe, méconnaissance totale de la durée des crues), nous ne sommes pas en mesure de réévaluer les capacités de transport du Bas Verdon. Les capacités de transport annuelles moyennes indiquées par Sogreah nous semblent raisonnables. Nous pouvons seulement ajouter que, même si le transport solide réel du TCC amont doit effectivement être négligeable, ses capacités de transport sont semblables à celles du TCC aval, du moins dans sa partie amont (en dehors de l'influence de la retenue).

date	débit maximum déversé (m³/s)	sources
1971	160	Koulinski 2002 (d'après Lefort 2010)
1977	289	Koulinski 2002 (d'après Lefort 2010)
octobre 1978	270	Artelia 2013 ; SCE 2014, 2021
1984	180	Koulinski 2002 (d'après Lefort 2010)
octobre 1993	163-250	Koulinski 2002 (d'après Lefort 2010) ; Artelia 2013 ; SCE 2014, 2021
janvier 1994	100	Artelia 2013 ; SCE 2014, 2021
mars 1994	20	Artelia 2013 ; SCE 2014, 2021
novembre 1994	950	Artelia 2013 ; SCE 2014, 2021
janvier 1996	70	Artelia 2013 ; SCE 2014, 2021
juillet 1997	180-204	Koulinski 2002 (d'après Lefort 2010) ; Artelia 2013 ; SCE 2014, 2021
novembre 2000	305-350	Lefort 2010 ; Artelia 2013 ; SCE 2014, 2021
décembre 2000	70	Artelia 2013 ; SCE 2014, 2021
janvier 2001	40	Artelia 2013
2001	150-200	Lefort 2010
novembre 2002	125-200	Lefort 2010 ; Artelia 2013 ; SCE 2014, 2021
janvier 2003	22	Artelia 2013
octobre 2004	50	Artelia 2013 ; SCE 2014, 2021
octobre 2004	200	Lefort 2010 ; Artelia 2013 ; SCE 2014, 2021
juin 2008	10	Artelia 2013
juin 2008	140	Artelia 2013 ; SCE 2014, 2021 ; MRE 2019
décembre 2008	20	Artelia 2013 ; SCE 2014, 2021 ; MRE 2019
mai à juin 2009	30	MRE 2019
juin 2010	10	Artelia 2013
juin 2010	100	Artelia 2013 ; SCE 2014, 2021 ; MRE 2019
avril à mai 2013	150	Sigosphere & Morpheau Conseils 2016 ; MRE 2019
février à mars 2014	50	Sigosphere & Morpheau Conseils 2016
nov. à déc. 2014	50	Sigosphere & Morpheau Conseils 2016
novembre 2016	125	MRE 2019
2017	?	<i>SCE (2021) indique un (ou des) déversement(s) suite à des travaux sur l'usine de Vinon</i>
mai 2018	20	MRE 2019
juin 2018	5	MRE 2019
décembre 2019	150	EDF (communication personnelle en sept. 2021)

Tableau 4. Historique des déversements du barrage d'Esparron entre 1969 et 2019

4.4- Sources sédimentaires

On distingue 3 types de sources sédimentaires :

- la fourniture primaire, issue de l'érosion des versants (éboulements, écroulements, glissements de terrain, reptation, érosion diffuse des sols...) ;
- la fourniture secondaire, qui correspond aux apports solides des affluents ;
- la fourniture interne, issue de l'érosion du lit et des berges.

Le Bas Verdon en aval du barrage d'Esparron est quasiment déconnecté des sources sédimentaires primaires dans la mesure où il est rarement en contact direct avec des versants rocheux capables de fournir des matériaux grossiers par ravinement, éboulement ou autres mouvements de masses. Seuls les 2 premiers kilomètres du TCC et quelques centaines de mètres au droit du collet des Fourches font exception mais les versants adjacents sont peu propices à ce type de production.

La fourniture sédimentaire secondaire, provenant des affluents, est également faible voire très faible car ces derniers sont peu nombreux, généralement de petite taille, avec des pentes faibles à leur extrémité aval. Seul le Colostre peut être considéré comme un affluent majeur de par sa taille de bassin versant et sa pente. Sa fourniture sédimentaire est généralement considérée comme faible et dominée par des matériaux fins (Sogreah et al. 2002, Lefort 2006, Artelia 2013, SCE 2021). ISL (2013, d'après Artelia 2013) aurait tout de même évalué ses apports solides à 3000-6000 m³/an mais cette valeur paraît surestimée compte tenu des faibles atterrissements dans la retenue du seuil de Gréoux (Artelia 2013). Nous avons nous-mêmes constaté quelques dépôts de cailloux et de graviers mélangés à des particules plus fines à la confluence Colostre-Verdon. En définitive, nous considérons que les apports solides du Colostre sont modestes en volume mais assez intéressants du point de vue de leur granulométrie. Ils contribuent ainsi à améliorer la qualité des substrats du TCC amont (**figure 20**) comme l'avaient déjà suggéré les résultats du suivi environnemental réalisé par la Maison Régionale de l'Eau (MRE 2019) suite à l'augmentation du débit réservé. Il s'agit de la principale source d'alluvions « grossières » et renouvelable du Bas Verdon et il convient de la préserver.



Figure 20. Exemple de substrat favorable au frai piscicole en aval de la confluence avec le Colostre

Précisions que le seuil de Gréoux limite le transit de la charge solide grossière vers l'aval. Il est pourtant équipé de 2 vannes de dégravement mais aucune chasse de dégravement n'est réalisée (seulement des « mises en rivières » annuelles entre 2004 et 2011 dans un objectif de continuité piscicole). Le devenir de cet ouvrage, dont l'effacement est à l'étude, est important pour l'équilibre morphodynamique des tronçons aval. S'il est effacé, ces tronçons bénéficieront alors des modestes apports du Colostre. Dans un premier temps, ils recevront également une partie des matériaux stockés dans la retenue. Artelia (2015) estime que le déstockage de matériaux serait de l'ordre de 10 000 m³, constitués à la fois de matériaux fins (vase et limons) et d'alluvions grossières (graviers) dans des proportions qui ne sont pas précisées (peut-être de l'ordre de 50% compte tenu des résultats d'analyse de 4 prélèvements).

La dernière source sédimentaire est interne au Bas Verdon : il s'agit des alluvions érodées dans le lit et les berges lors des crues morphogènes. Elle contribue quelque peu à maintenir une certaine activité morphodynamique (renouvellement des substrats et de la végétation, divagations latérales, migrations des bancs...) mais celle-ci est fortement amoindrie, en particulier dans le TCC. Il s'agit par ailleurs d'une source non renouvelable qui s'épuisera progressivement faute d'apports extérieurs suffisants.

L'incision du lit a dû constituer la principale source sédimentaire durant les dernières décennies. C'est pourquoi le déficit sédimentaire est plus important en amont qu'en aval : les tronçons aval ont bénéficié des matériaux produits par l'érosion des fonds amont. Dans une certaine mesure, c'est encore le cas dans le tronçon aval de la restitution du fait de l'incision récente du lit en aval du pont de Vinon (cf. § 3.2.5).



Figure 21. Fonds de la retenue de Gréoux lors d'une vidange en 2004 (source : PNRV, d'après Artelia 2015)

Il y a très peu d'érosion de berges compte tenu des nombreux ouvrages latéraux (digues et/ou enrochements) et de la rectitude globale du tracé en plan. La principale érosion de berge actuellement en activité concerne la rive gauche face à la déchetterie de Gréoux (**figure 22a**). Elle est engendrée par le remblai de rive droite, sur lequel sont implantés la déchetterie et la station d'épuration, qui renvoie les écoulements sur la berge opposée. Ce remblai proviendrait de divers chantiers de génie civil réalisés dans les années 80 (Préfecture des Alpes de Haute Provence, 2014). D'autres érosions de berges de

moindre intensité ont été observées, parmi lesquelles nous pouvons citer celle qui se poursuit au niveau de l'ancienne digue fusible en aval de Vinon (**figure 22b**).



Figure 22. Principales érosions de berge : a) en face de la déchetterie de Gréoux ; b) rive droite qui accueillait la digue fusible en aval de Vinon

4.5- Stocks alluvionnaires

Sur la base du MNT généré à partir des levés LIDAR d'avril 2021, nous avons analysé la répartition des matériaux alluvionnaires stockés entre les digues ou, pour les tronçons dépourvus de digues, entre les berges. La **figure 23** représente la distribution longitudinale des formations alluviales exondées (FAE), c'est-à-dire des bancs ou basses terrasses alluviales présentes au-dessus de la ligne d'eau d'étiage.

Les hauteurs moyennes des FAE rendent compte de l'encaissement vertical du lit par rapport à ces formations. Elles témoignent donc du degré d'incision du lit et l'on constate qu'il est maximal aux extrémités amont de chacun des 3 tronçons homogènes (en aval immédiat du barrage, du seuil rocheux de Gréoux et de celui de Vinon) puis décroît vers l'aval.

Les volumes des FAE rendent compte des quantités de matériaux alluvionnaires. Cet indicateur est fortement influencé par la largeur du lit (entre les berges ou entre les digues). C'est pourquoi on constate un pic aux endroits suivants :

- vers la déchetterie de Gréoux (à environ 5 km en aval du barrage) où l'espace interdigue s'élargit ponctuellement ;

- vers le Collet des fourches (à environ 8,5 km en aval du barrage) où il n'y a pas de digue en rive droite ;
- à l'entrée de la forêt domaniale de Cadarache où les digues disparaissent.

C'est donc logiquement l'absence d'ouvrages latéraux qui explique la localisation des principaux stocks alluvionnaires disponibles pour le Verdon.

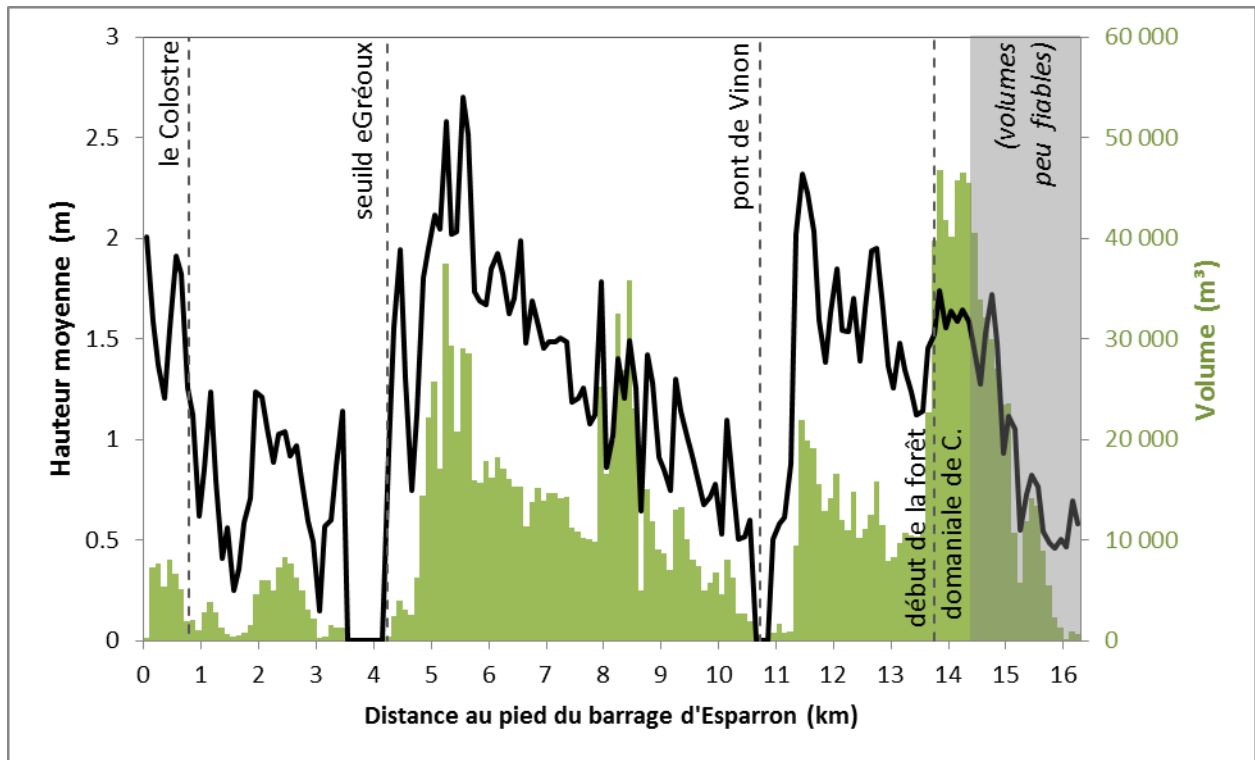


Figure 23. Distribution des formations alluviales exondées dans le Bas Verdon

Inversement, on identifie 4 linéaires où les volumes de FAE sont nuls ou négligeables :

- dans le TCC amont dont les rares stocks se concentrent surtout en queue de retenue du seuil de Gréoux, où se sont développés quelques bancs exondés plus ou moins végétalisés, ainsi qu'en amont du Colostre mais les stocks sont en fait surévalués à cette extrémité amont du TCC car les FAE reposent en partie sur la roche mère ;
- en aval immédiat du seuil de Gréoux ;
- en aval immédiat du pont de Vinon ;
- à proximité de la retenue de Cadarache où la diminution apparente des volumes n'est en fait pas représentative car elle relève de plusieurs facteurs : l'élévation de la ligne d'eau qui inonde les dépôts alluviaux, le resserrement du fond de vallée alluvial en rive gauche, la non prise en compte de toutes les FAE de rive droite (la limite entre les FAE de la Durance et celles du Verdon est ici arbitraire).

Ces résultats confirment, s'il en était besoin, le déficit sédimentaire important du TCC amont et en aval proche des 2 points durs que sont les seuils rocheux de Gréoux et de Vinon.

Les stocks d'alluvions se situent donc essentiellement dans les 2 tronçons aval. Soulignons néanmoins que ceux du TCC aval ne sont pas toujours mobilisables par les écoulements. En effet, ce tronçon contient d'importantes quantités de matériaux alluvionnaires sous la forme de vastes atterrissements

généralement végétalisés. Certains sont perchés 2 à 3 m au-dessus de la ligne d'eau d'étiage et occupent environ 80% de la largeur de l'espace inter-digue. C'est particulièrement le cas dans sa partie médiane, aux environs du domaine des Iscles et un peu plus en aval. Cela peut sembler contradictoire avec le déficit sédimentaire constaté par ailleurs mais il n'en est rien : l'incision du lit favorise la surélévation des bancs qui, une fois perchés, ne sont plus mobilisables par le Verdon. Ces stocks sont en quelque sorte perdus pour le Verdon qui manque pourtant de matériaux.

5- Analyse spécifique de la queue de retenue de Cadarache

La queue de retenue de Cadarache désigne la zone comprise entre l'entrée dans la forêt domaniale, à partir de laquelle les digues disparaissent progressivement, et la retenue elle-même où la pente de la ligne d'eau est nulle (figure 24). Cette zone particulière n'est donc quasiment plus contrainte par les ouvrages latéraux mais elle est influencée par la Durance et en partie contrôlée par l'aménagement hydroélectrique de Cadarache.

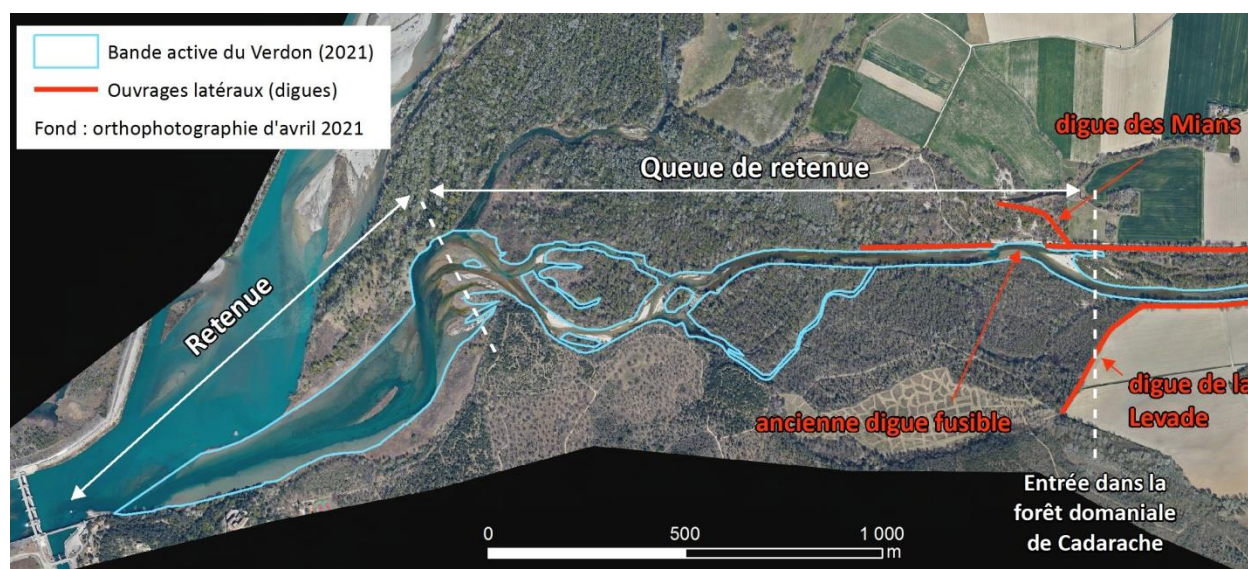


Figure 24. La queue de retenue de Cadarache

5.1- Profil en long du Bas Verdon en aval de Vinon

Du fait de l'incision de son lit, la pente du Verdon est désormais plus faible que celle de sa plaine alluviale. Le Verdon est ainsi fortement encaissé en aval immédiat du pont de Vinon, où la hauteur des berges est de plus de 5 m. Il l'est de moins en moins vers l'aval c'est-à-dire que la hauteur des berges diminue progressivement pour devenir faible aux environs de l'entrée dans la forêt domaniale de Cadarache et négligeable 1 km plus loin (figure 25). Cela favorise l'étalement des eaux de crues et les dépôts d'alluvions dans le lit majeur.

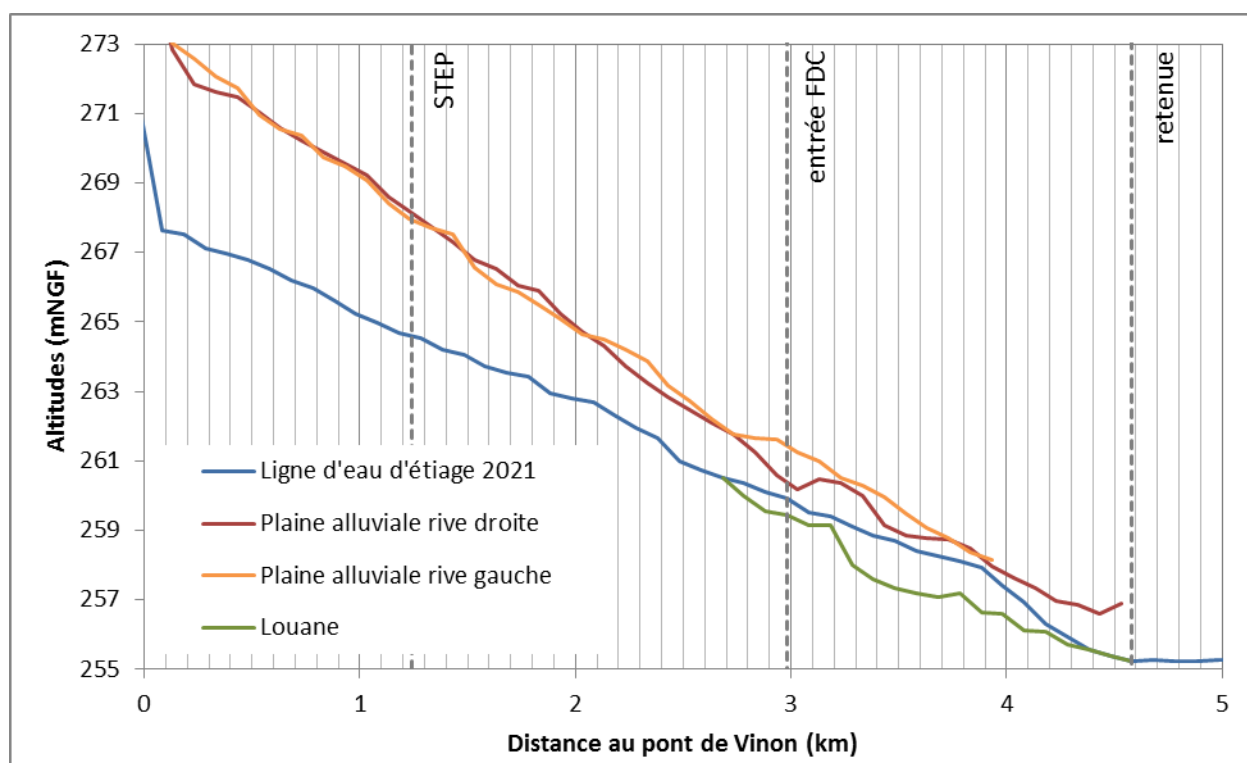


Figure 25. Profil en long du Verdon, de la Louane et de la plaine alluviale en aval de Vinon

D'après les données disponibles, le profil en long de la queue de retenue de Cadarache n'évolue quasiment plus depuis près de 20 ans grâce aux mises en transparence régulières du barrage (cf. § 3.2.5). Mais la comparaison des profils en long, qui ne considère que 2 dimensions (verticale et longitudinale), ne rend compte que partiellement des évolutions de cette zone où le Verdon a la possibilité de divaguer (latéralement). Sur le long terme, le bilan sédimentaire de la queue de retenue reste probablement excédentaire même si les dépôts d'alluvions n'engendrent pas systématiquement d'élévation significative des fonds du lit mineur ou des lignes d'eau d'étiage. Outre les bras principaux de la rivière représentés sur la figure 24, cette zone est effectivement parcourue par de nombreux petits chenaux secondaires qui ont du se former progressivement au gré des débordements du Verdon, voire hérités des anciens tracés de la Durance. Ces chenaux et les îles qui les séparent sont autant de zones de stockage des matériaux qui échappent à la comparaison des profils en long.

5.2- Topographie actuelle de la queue de retenue de Cadarache et tendances futures

L'analyse du modèle numérique de terrain établi à partir des levés LIDAR d'avril 2021 montre que le lit du Verdon est perché par rapport aux terrains environnants de rive gauche comme de rive droite, et plus particulièrement de ce dernier côté (la rive droite au nord ; figure 26). Au centre de cette zone, c'est-à-dire un peu en aval de la dernière digue de rive droite, le Verdon est effectivement perché d'environ 2 m par rapport au lit de la Louane et de 1 m par rapport au ruisseau du Boutre. Dès sa source, la Louane est en fait plus basse que le Verdon. Cet adoux correspond donc au talweg de l'extrémité aval de la vallée du Verdon, ce qui explique la permanence de ses écoulements.

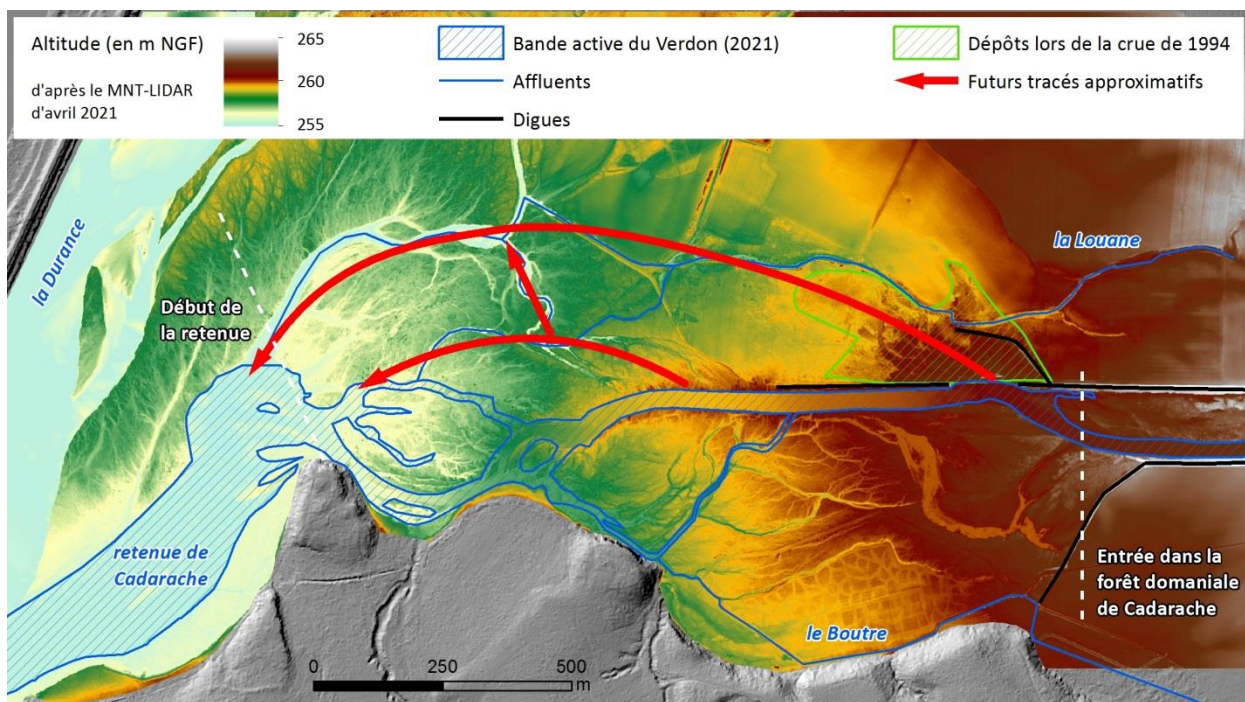


Figure 26. Topographie actuelle queue de retenue de Cadarache et futurs tracés du Verdon

Compte tenu de la topographie actuelle de cette zone, le Verdon a tendance à migrer vers la rive droite (au nord). Cette tendance a déjà été amorcée par la crue de 1994 qui avait détruit une partie de la digue de rive droite et déposé des matériaux en lit majeur peu après l'entrée dans la forêt domaniale. Plus en aval, à proximité de la retenue, les écoulements empruntent régulièrement plusieurs chenaux et l'évolution récente est un abandon progressif des chenaux les plus au sud en faveur des chenaux les plus au nord. Les alluvions grossières du Verdon ont effectivement tendance à s'accumuler dans les premiers alors que les seconds présentent une pente plus élevée donc une meilleure capacité de transport.

A l'avenir, les petites crues régulières favoriseront la migration du lit en aval de la dernière digue de rive droite (via les 2 plus petites flèches rouges sur la [figure 26](#)). Mais les crues rares de plus grande intensité favoriseront la migration du lit plus en amont, via la brèche créée par la crue de 1994 ([figure 26](#)). Il n'est pas possible de déterminer quand aura lieu cette défluviation mais, à terme, le Verdon devrait rejoindre la Louane via cette brèche. Ce futur tracé (la plus grande flèche rouge au nord sur la [figure 26](#)) a une longueur d'environ 1,6 km et se situe à près de 400 m au nord de l'actuel lit du Verdon.

5.3- Origines des dépôts observés

On peut s'interroger sur les raisons de la topographie actuelle du fond de vallée.

La première explication réside probablement dans le déplacement vers l'aval de la confluence Durance-Verdon entre 1860 et 1959 ([figure 27](#)), c'est-à-dire entre le début de l'endiguement général du Verdon (1857-1887) et la construction de l'aménagement hydroélectrique de Cadarache (dont les travaux ont débuté en 1955 et sa mise en service en 1959). Dans la mesure où la Durance présentait une pente plus faible que celle du Verdon, le déplacement a largement contribué à l'élévation du lit de ce dernier pour rattraper le niveau de base imposée par la Durance. Au début du 20^{ème} siècle, la différence de pente entre la ligne d'eau de la Durance (2,7 m/km en 1909) et celle du Verdon (3,8 m/km en 1907) était de 1,1 m/km. En théorie, le déplacement de la confluence aurait donc pu entraîner à lui seul un

exhaussement de 2 m du Verdon (1,1 m/km x 1,8 km). Or c'est justement le dénivelé que l'on observe entre la Louane et le Verdon.

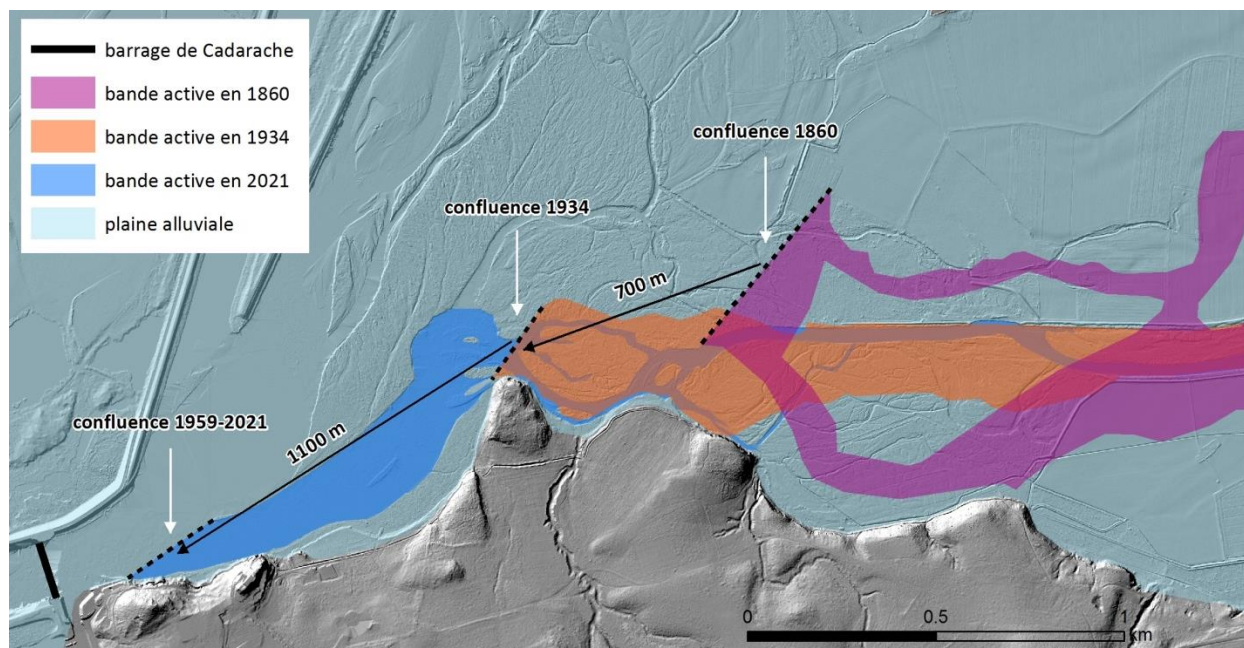


Figure 27. Evolutions de la confluence Durance-Verdon depuis 1860

Une autre explication réside dans l'influence du barrage de Cadarache dont le remous favorise les dépôts en queue de retenue. Pour rappel, c'était surtout le cas jusqu'en 1994 et les mises en transparence réalisées depuis ont limité son influence lors des crues importantes (débit prévisionnel Durance et Verdon $> 500 \text{ m}^3/\text{s}$). Mais son influence sur le bilan sédimentaire reste probablement positive sur le long terme, notamment lors des crues morphogènes de moindre intensité.

Dans tous les cas, les matériaux se sont préférentiellement accumulés dans le lit mineur et dans le lit majeur de la rive gauche dans la mesure où le lit majeur de la rive opposée est déconnecté par une digue plus longue.

5.4- Conséquences de la future défluviation

Au nord, la défluviation du Verdon devrait se traduire par une capture de la Louane dès les environs de la digue des Mians (la digue oblique qui limite les reflux amont lors des débordements par la brèche en rive droite). Une grande partie sinon la totalité du lieu-dit des Mians – entre le tracé actuel du Verdon (au sud), la Louane (au nord), la digue des Mians (à l'est) et la retenue de Cadarache (à l'ouest) – pourrait ainsi être balayée par le Verdon lors de cette défluviation. Les impacts sur les usages rivaux seront faibles car les parcelles ne sont plus cultivées depuis plusieurs décennies. En effet, les terrains cultivés ont progressivement déserté cette zone fortement sujettes aux inondations. Elle est désormais occupée par des friches et des boisements alluviaux.

Au sud, l'éloignement du Verdon et l'abaissement probable du niveau de sa nappe d'accompagnement entraîneront un assèchement de la forêt alluviale dans le périmètre de la forêt domaniale de Cadarache.

Les essences pionnières de bois tendre (peupliers, saules...) seront donc progressivement remplacées par des essences de bois durs (frênes, ormes, chênes...).

L'impact potentiellement le plus important concerne le tronçon en amont de cette zone : une érosion régressive de l'ordre de 1 m d'altitude pourrait éventuellement affecter l'ensemble du linéaire amont jusqu'au pied du seuil rocheux de Vinon (**figure 28**). Une telle incision du lit aurait notamment pour conséquence de déstabiliser par affouillement une grande partie des digues amont. Toutefois, cette incision est hypothétique compte tenu des incertitudes sur la position exacte du futur tracé du Verdon, sur la vitesse de la défluviation (en une seule crue majeure ou en plusieurs réparties sur plusieurs décennies) et surtout sur l'évolution des matériaux qui seront nécessairement érodés entre l'actuel lit du Verdon et le nouveau : les terrains en rive droite constituent un point haut qui devra être déblayé pour que la défluviation s'opère ; les matériaux érodés pourraient alors se déposer dans le lit de la Louane (ou tout autre point bas du futur tracé) et ainsi rehausser l'altitude du futur profil en long d'équilibre, ce qui réduirait partiellement voire totalement le risque d'incision en amont. C'est d'ailleurs ce qui devrait se produire dans un 1^{er} temps mais il est possible que, dans un 2^{ème} temps, le Verdon évite la zone où l'essentiel des matériaux se seront déposés.

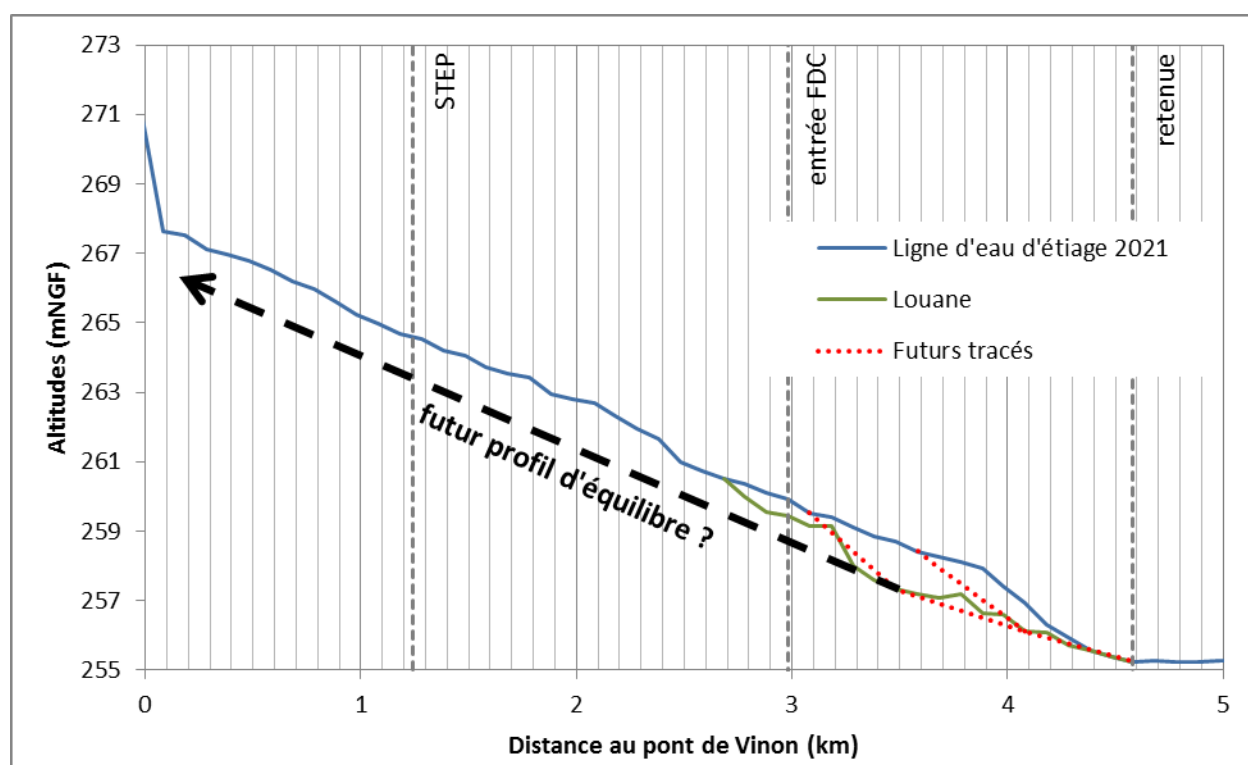


Figure 28. Possible évolution du profil en long d'équilibre en cas de défluviation du Verdon vers la Louane : la flèche représente le profil en long en cas d'incision régressive suite au court-circuit via l'ancienne digue fusible et si le niveau de base (aval) reste celui de la Louane

6- Synthèse et diagnostic

6.1- Equilibre et ajustements morphologiques des cours d'eau

Les cours d'eau sont constamment à la recherche d'un équilibre dynamique entre les flux sédimentaires et les flux liquides (**figure 29**). En cas de déficit sédimentaire, c'est-à-dire de déséquilibre entre les volumes de matériaux provenant de l'amont (plus faibles) et ceux transportés vers l'aval (plus élevés), un tronçon de cours d'eau peut s'ajuster de deux manières :

- La première réponse est généralement une incision du lit. En effet, le déficit sédimentaire entraîne systématiquement un abaissement de l'altitude des fonds dès lors que ceux-ci sont libres de s'ajuster. L'incision a pour effet de diminuer la pente du tronçon donc sa capacité de transport, ce qui contribue à l'établissement d'un nouvel équilibre.
- Un autre ajustement possible est une augmentation de la taille des particules à la surface du lit par transport sélectif, les plus petites particules étant évacuées plus rapidement que les grosses. Cela réduit également la capacité de transport. Et si une quantité suffisante de particules grossières est disponible, il peut se former une couche superficielle très grossière qui préserve le lit de l'érosion sauf en cas de crues exceptionnelles. On parle alors de pavage, qui a pour effet de stopper ou de fortement ralentir l'incision.

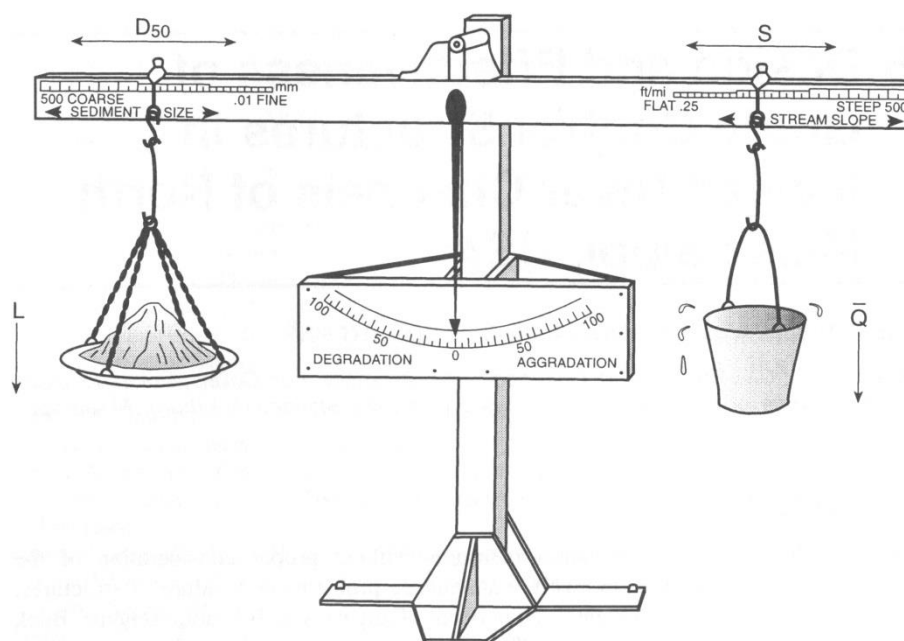


Figure 29. Balance de Lane (1955, d'après Watson et Biedenharn 1999)

Autrement dit, le déficit sédimentaire ne se résume pas seulement à une diminution des volumes d'alluvions dans le lit mais peut modifier leur distribution granulométrique, du moins à la surface du lit. Ces deux types d'ajustements sont interdépendants, notamment car le pavage tout comme les

affleurements rocheux limitent l'intensité des évolutions verticales du lit. Mais, par commodité, nous analyserons tour à tour ces 2 aspects pour évaluer le déficit sédimentaire du Bas Verdon :

- aspect volumétrique : évolutions verticales des fonds (§ 6.2) ;
- aspect granulométrique : évolutions de la constitution des fonds (§ 6.3).

6.2- Evolutions verticales des fonds du Bas Verdon

La comparaison diachronique des profils en long montre que le Bas Verdon s'est fortement incisé au cours du 20^{ème} siècle. Cette incision a affecté l'ensemble du linéaire de manière inégale compte tenu des affleurements rocheux et aménagements qui fixent le lit. Si l'on prend le début du 20^{ème} siècle comme référence, il est donc clair qu'il présente un déficit sédimentaire important. Et on peut affirmer qu'il résulte essentiellement de l'implantation des barrages, de la rectification et de l'endiguement de la rivière, voire d'extractions de granulats. Le reboisement des versants, l'évolution des pratiques d'entretien ou d'exploitation de la ripisylve ainsi que le réchauffement climatique depuis le petit âge glaciaire ont également pu contribuer au déficit sédimentaire comme ce fut le cas sur d'autres bassins versants mais ces facteurs semblent secondaires sur le Verdon.

Les 5 cinq grands ouvrages hydroélectriques implantés en amont du Bas Verdon bloquent désormais totalement la charge de fond (la part de la charge solide qui transite au fond du lit) qui provenait autrefois des secteurs amont du Verdon. Mais ils régulent également les crues, dans une certaine mesure, ce qui compense partiellement la diminution de la fourniture sédimentaire liée à ces barrages. La capacité de transport du Verdon est encore amoindrie par les ajustements morphologiques du lit suite à l'incision.

On peut donc s'interroger sur la tendance actuelle des fonds : est-ce que l'incision va continuer au cours des prochaines décennies ou est-ce qu'un nouvel équilibre s'est établi ?

Les fonds du « **TCC amont** » (tronçon court-circuité en amont du seuil de Gréoux) sont stables depuis plusieurs décennies car ses fonds sont tenus par des affleurements rocheux. Il n'y aura donc pas d'incision à l'avenir et on peut même considérer qu'il est désormais en équilibre sédimentaire (équilibre entre les flux solides entrants et sortants qui sont tous deux négligeables), voire en léger excédent sédimentaire du fait du seuil de Gréoux. Mais cet excédent est très faible, à la hauteur des apports solides du Colostre. A une autre échelle temporelle, on peut au contraire considérer qu'il présente un important déficit sédimentaire hérité du début du 20^{ème} siècle, voire même antérieur.

Les fonds du « **TCC aval** » (tronçon court-circuité en aval du seuil de Gréoux) semblent stables depuis plusieurs décennies d'après les quelques points de mesure dont on dispose en 1964. En tous cas, ils le sont depuis 2001 et l'évolution du profil en long au cours des dernières années se résume à une légère oscillation des fonds autour d'un niveau moyen constant. L'effacement très récent (2018) des seuils de Vinon va entraîner une érosion régressive mais celle-ci sera faible compte tenu des faibles hauteurs de dépôt en amont de ces ouvrages et du contrôle exercé par le seuil rocheux de Vinon. Une nouvelle incision significative sur ce tronçon semble donc très improbable. La seule limite de ce diagnostic réside dans l'incertitude des levés de 1964 voire de celle de l'historique des débits : si les levés de 1964 sont fiables, on peut effectivement considérer que le lit est stable ; s'ils ne le sont pas, alors on peut encore douter de la capacité du lit à résister à des crues intenses comme celle de 1994 ($> 1000 \text{ m}^3/\text{s}$) dans la mesure où aucun évènement majeur n'est survenu depuis 2001 (déversement maximum du barrage amont : $200 \text{ m}^3/\text{s}$).

Les fonds du tronçon « **aval Vinon** » (en aval du canal de fuite de l'usine de Vinon) ont connu une évolution plus complexe : jusqu'en 1994, l'extrémité amont du tronçon s'incisait alors que l'extrémité aval s'exhaussait suite à l'implantation du barrage de Cadarache. L'incision de l'extrémité amont du tronçon s'est poursuivie au cours des dernières années : elle a été de l'ordre de 30 cm entre 2010 et 2021 sur 1,2 km. Plus précisément, ce sont les 800 premiers mètres en aval du pont de Vinon qui se sont incisés entre 2010 et 2016 puis les 400 m suivants entre 2016 et 2021. Il s'agit donc d'une érosion progressive, c'est-à-dire qui progresse de l'amont vers l'aval, que 2 facteurs favorisent :

- l'absence d'apports solides significatifs en amont, d'autant plus que les faibles apports du Colostre sont piégés par le seuil de Gréoux et que les stocks alluviaux du TCC aval semblent figés (bancs massifs perchés et végétalisés) ;
- les débits turbinés par l'usine de Vinon qui, quand ils se cumulent aux déversements du barrage amont ou aux crues des affluents, augmentent la capacité de transport du Verdon donc son déficit sédimentaire potentiel.

D'après les données disponibles, le profil en long de la queue de retenue de Cadarache n'évolue plus depuis que le barrage est régulièrement mis en transparence. Outre ces transparences, le Verdon dispose ici d'une grande liberté de divagation qui lui permet de déposer de plus grandes quantités de matériaux sans entraîner une élévation significative de son profil en long, mais le bilan sédimentaire de cette zone est probablement encore positif. Quoi qu'il en soit, une future défluviation de l'extrémité aval du Verdon est probable compte tenu de la topographie actuelle : le lit est perché et tend à se déplacer vers le talweg qui correspond à la Louane. Or cette défluviation risque d'entraîner une érosion régressive qui pourrait affecter l'ensemble du linéaire amont. La stabilité du profil en long du Verdon en aval de Vinon est donc menacée par l'amont et par l'aval.

6.3- Evolutions de la granulométrie des fonds du Bas Verdon

Contrairement aux profils en long, nous ne sommes pas en mesure de comparer la distribution granulométrique des fonds actuels avec une référence historique. Mais l'évolution longitudinale (de l'amont vers l'aval) de la granulométrie des fonds nous renseigne sur le degré de perturbation de chaque tronçon et sur le stade de progression du déficit sédimentaire du Bas Verdon.

Des 3 tronçons homogènes que nous avons identifiés, c'est le tronçon amont qui se distingue le plus des autres de par la faible largeur du fond de vallée alluvial, la fréquence des affleurements rocheux et la faiblesse des stocks sédimentaires. Du point de vue de la granulométrie des matériaux qui constituent son lit, il n'y a pas de grandes différences au sein du tronçon (si l'on exclut les fonds envasés de la retenue de Gréoux). Ils sont dominés par les fractions granulométriques grossières et les affleurements rocheux. Ces derniers forment par endroits de vastes dalles qui recouvrent l'intégralité de la largeur du lit mineur. Les habitats aquatiques sont donc franchement dégradés par le déficit sédimentaire. De plus, le colmatage des fonds est important. On peut néanmoins observer par endroits des surfaces favorables au frai piscicole constituées de graviers et cailloux fins provenant vraisemblablement du Colostre.

Les 2 tronçons en aval du seuil de Gréoux sont marqués par une tendance similaire : la progressive amélioration des substrats et, de manière plus générale, de la diversité et de la qualité des habitats physiques de l'amont vers l'aval. Ce constat est cohérent avec l'évolution verticale des fonds et la distribution des stocks alluvionnaires. En d'autres termes, les habitats sont franchement dégradés en aval proche des seuils rocheux de Gréoux et de Vinon et sont satisfaisants dans la moitié aval de chacun

de ces tronçons. Cela ne signifie pas pour autant que ces derniers ne sont pas dégradés par rapport à une référence historique. La différence avec la distribution granulométrique du Moyen Verdon (autre secteur étudié) est d'ailleurs assez faible alors que la pente moyenne du Moyen Verdon est quasiment 2 fois plus élevée. A cet égard, le déficit sédimentaire du Bas Verdon semble plus avancé que celui du Moyen Verdon. Cela s'explique notamment par l'absence de sources sédimentaires significatives (apports solides depuis les versants et les affluents).

Enfin, la stabilité verticale des fonds apparemment acquise dans le TCC ne signifie pas qu'il n'y a plus de déficit sédimentaire. A l'avenir, la proportion des alluvions de taille moyenne (gravier et cailloux) devrait s'amoinrir au fur et à mesure qu'elles sont exportées par les crues morphogènes et celle des particules grossières (blocs et pierres) devrait augmenter. A terme, un pavage des fonds du lit va se constituer c'est-à-dire que la couche superficielle du lit deviendra résistante à l'érosion en dehors des crues exceptionnelles. Cela aura des conséquences négatives :

- les substrats ne seront plus renouvelés, ce qui diminuera la qualité des habitats aquatiques ;
- le colmatage des fonds s'accroîtra, ce qui diminuera non seulement la qualité des habitats aquatiques mais aussi les échanges avec la nappe et la capacité d'autoépuration des eaux ;
- le moindre transport solide empêchera le rajeunissement de la bande active, c'est à dire celui de la végétation sur les bancs, ce qui se traduira par une perte de biodiversité et par des risques d'inondation accrus (par diminution de la capacité hydraulique du lit et formations d'embâcles).

6.4- Rétraction des bandes actives

L'emprise de l'actuelle de la bande active du Bas Verdon ne représente plus qu'un tiers de celle 1934. Et sa rétraction ne semble pas achevée, en particulier dans le TCC aval dont la dynamique fluviale amoindrie empêche de remobiliser les matériaux stockés sous formes de bancs massifs et perchés.

Cette évolution relève principalement d'une diminution globale des flux liquides et solides. Elle a notamment été favorisée par la raréfaction des crues suite à la mise en service des barrages hydroélectriques amont.

Mais le déficit sédimentaire dont il était question dans les sections précédentes, c'est-à-dire le déséquilibre entre flux liquides et flux solides, favorise également la rétraction des bandes actives. En effet, l'encaissement vertical du lit mineur, le moindre transport solide et le pavage des fonds réduisent encore la capacité des crues à rajeunir les bancs alluviaux qui se végétalisent.

6.5- Bilan et hiérarchisation du déficit sédimentaire

Le déficit sédimentaire du Bas Verdon a donc entraîné des ajustements morphologiques importants depuis le début du 20^{ème} siècle et c'est encore le cas au début du 21^{ème}. Ces ajustements devraient se poursuivre à l'avenir mais ils seront de plus en plus lents à mesure que la rivière se rapproche d'un nouvel équilibre.

L'état sédimentaire du Bas Verdon peut être schématisé par la **figure 30**. Sur chacun des 3 tronçons homogènes, le déficit acquis au cours du dernier siècle est important à l'amont alors que leur extrémité aval est plus ou moins en équilibre voire en léger excédent.

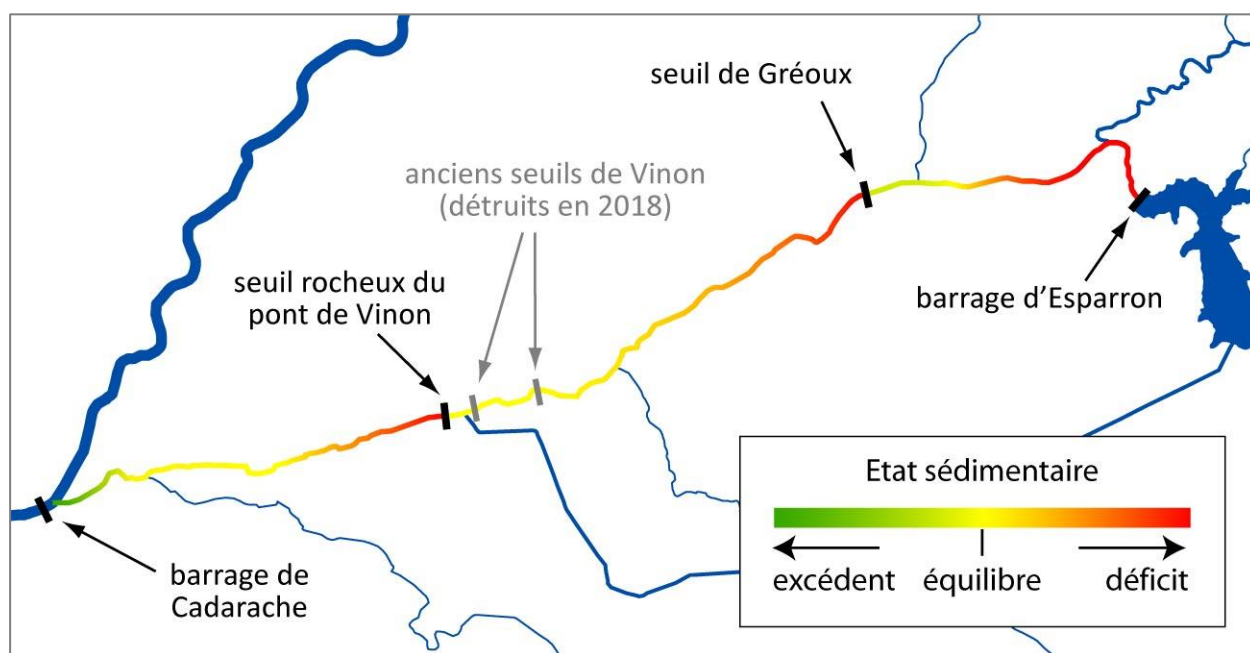


Figure 30. Carte synthétique du déficit sédimentaire du Bas Verdon

BIBLIOGRAPHIE

- Artelia, 2013-2015. Etude pour la restauration des continuités écologiques du seuil de Gréoux. Etat des lieux, diagnostic, étude de scénarios et avant-projet.
- Biotec, 2013. Etude et projet de restauration du tronçon court-circuité du Verdon du barrage de Chaudanne à Castellane.
- BLG Environnement, 2014. Travaux d'entretien régulier – branche Verdon – lieu-dit les Méouilles. Mémoire technique et étude d'impact.
- Carzon J., 1958. Monographie hydrologique du Verdon. La houille blanche, numéro spécial B/ 1958, pp. 717-728.
- CETE Méditerranée, 2016. Plan de prévention des risques naturels prévisibles multirisques sur la commune de Vinon sur Verdon. Phase 2 : études hydrauliques complémentaires.
- DDE des Alpes de Haute Provence, 2005. Plan de prévention des risques naturels prévisibles de la commune de Castellane.
- DDTM du Var, 2012. Porter à connaissance (PAC) de l'Etat relatif à la définition de l'aléa inondation sur la commune de Vinon-sur-Verdon lié à la présence du Verdon.
- DDTM des Bouches du Rhône, 2014. Plan de prévention des risques naturels prévisibles inondation sur la commune de Saint-Paul-lez-Durance.
- Dynamique Hydro, 2019. Etude de faisabilité pour la recharge sédimentaire du Bas et du Moyen Verdon.
- ETRM, 2008. Etude des prélèvements de matériaux dans la queue de retenue du lac de Castillon à Saint-André-les-Alpes.
- Fédération Départementale de Pêche et de Protection Milieux Aquatiques des Alpes de Haute Provence (FDPPMA 04), 2017a. Compte-rendu du suivi de l'opération de recharge sédimentaire sur des placettes test.
- Fédération Départementale de Pêche et de Protection Milieux Aquatiques des Alpes de Haute Provence (FDPPMA 04), 2017b. Projet de diversification d'habitats sur le Bas Verdon. Evaluation de la pertinence des aménagements et identification des besoins par secteur.
- Gereco et Lindénia, 2013-2014. Etude diagnostique préalable à l'élaboration du nouveau programme de restauration et d'entretien du Bas Verdon (2014-2021).
- Guin C., 2018. Quelle qualité des eaux superficielles sur le bassin versant du Verdon ?. Courrier scientifique *L'eau précieuse du Verdon*, n°4, juillet 2018, pp. 8-19.
- Jorda M., 1975. Les montagnes du Haut Verdon, étude géomorphologique. Méditerranée, vol.20, n°1, pp. 37-58.
- L'écho de Vinon-sur-Verdon (magazine municipal), n°158, dossier spécial Verdon, pp. 5-8.
- Lefort P., 1995a. Expertise hydraulique de la crue de novembre 1994 sur la commune de Gréoux.
- Lefort P., 1995b. Expertise hydraulique de la crue de novembre 1994 sur la commune de Vinon.
- Lefort P., 2006. Incidences des essartements projetés dans le lit du Verdon en aval du pont de Vinon.
- Lefort P., 2010. Définition d'une digue fusible en rive droite du Verdon en aval de Vinon.
- Lefort P., 2012. Remarques sur le débit maximum des crues dans le cours inférieur du Verdon.
- 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.

Martel E.-A., 1906. Le grand canyon du Verdon. La France ignorée, chapitre 1, pp. 17-44.

Martel E.-A., 1908. Le profil en long du grand canyon du Verdon. Annales de géographie, 96, pp. 395-403.

ONF, 2015. Plan de gestion 2015-2024 de la réserve biologique dirigée de la Castellane.

Peuget C. et Chappaz R., 2018. Le peuplement piscicole du Verdon, de sa source à sa confluence. Courrier scientifique *L'eau précieuse du Verdon*, n°4, juillet 2018, pp. 38-53.

PNR du Verdon, 1999. Vers un schéma d'aménagement et de gestion des eaux du Verdon. Dossier Préliminaire.

PNR du Verdon, 2008. Contrat de rivière du Verdon – Dossier définitif – Synthèse.

PNR Verdon, 2017. Plan pluriannuel de restauration et d'entretien du bassin versant du Verdon. Etude d'impact.

PNR Verdon, 2020. Diagnostic du bassin versant du Verdon.

Préfecture des Alpes de Haute Provence, 2014. Plan de prévention des risques naturels prévisibles de la commune de Gréoux-les-Bains.

SAGE Verdon. Synthèse de l'état des lieux et diagnostic du bassin versant, validé par la Commission Locale de l'Eau du 19 octobre 2005 et par le Comité d'Agrément du Bassin Rhône-Méditerranée du 20 janvier 2006.

SAGE Verdon. Rapport de présentation, projet validé par la CLE du 4 avril 2013.

SAGE Verdon. Plan d'aménagement et de gestion durable de la ressource en eau et des milieux aquatiques. Projet validé par la CLE du 12 février 2014.

SAGE Verdon. Rapport environnemental, adopté par la CLE du 12 février 2014.

Saunier Infra, 2015. Projet de confortement des digues du Verdon. Etudes des digues en aval du pont du Verdon et programme de rénovation des ouvrages.

SCE, 2014. Etude pour la restauration des continuités écologiques des seuils de Vinon-sur-Verdon.

SCE, 2019. Suppression des deux seuils en enrochement de Vinon-sur-Verdon. Suivi hydromorphologique avant et après travaux.

SCE, 2021. Etude de dangers du système d'endiguement de Vinon-sur-Verdon.

Schéma de Cohérence Territoriale de Durance Luberon Verdon Agglomération 2017-2035. Rapport de présentation, juillet 2018.

SCP, 1995. Etude de factabilité de la réhabilitation du Verdon sur la commune de Vinon-sur-Verdon.

SCP, 2000-2001a. Etude du risque inondation de commune de Vinon-sur-Verdon.

SCP, 2000- 2001b. Etude du risque inondation de la zone d'activité du Pas de Menc.

SCP et MRE, 2016. Etude pour la restauration des continuités écologiques du seuil des Listes dans le tronçon court-circuité de Castellane, sur le Verdon. Aménagement de la prise d'eau et du canal, solution d'aménagement du seuil du Pesquier.

SIEE, 2007. Cartographie des zones inondables dans les Alpes de Haute Provence.

Sigosphère et Morpheau Conseils, 2016. Analyse de l'évolution du profil en long du Verdon dans les secteurs en déficit sédimentaire et de l'impact sur les ouvrages de protection, propositions d'interventions.

SIVU d'entretien des berges du Verdon, 2008a. Bilan du plan pluriannuel d'entretien et de restauration de la ripisylve 2004-2008.

SIVU d'entretien des berges du Verdon, 2008b. Plan pluriannuel d'entretien et de restauration de la ripisylve. Programme 2009-2013.

SIVU d'entretien des berges du Verdon, 2013a. Bilan du plan pluriannuel d'entretien et de restauration de la ripisylve 2009-2013.

SIVU d'entretien des berges du Verdon, 2013b. Plan de gestion des boisements rivulaires du Verdon et de ses affluents 2014-2021 d'Allos à Sainte-Croix.

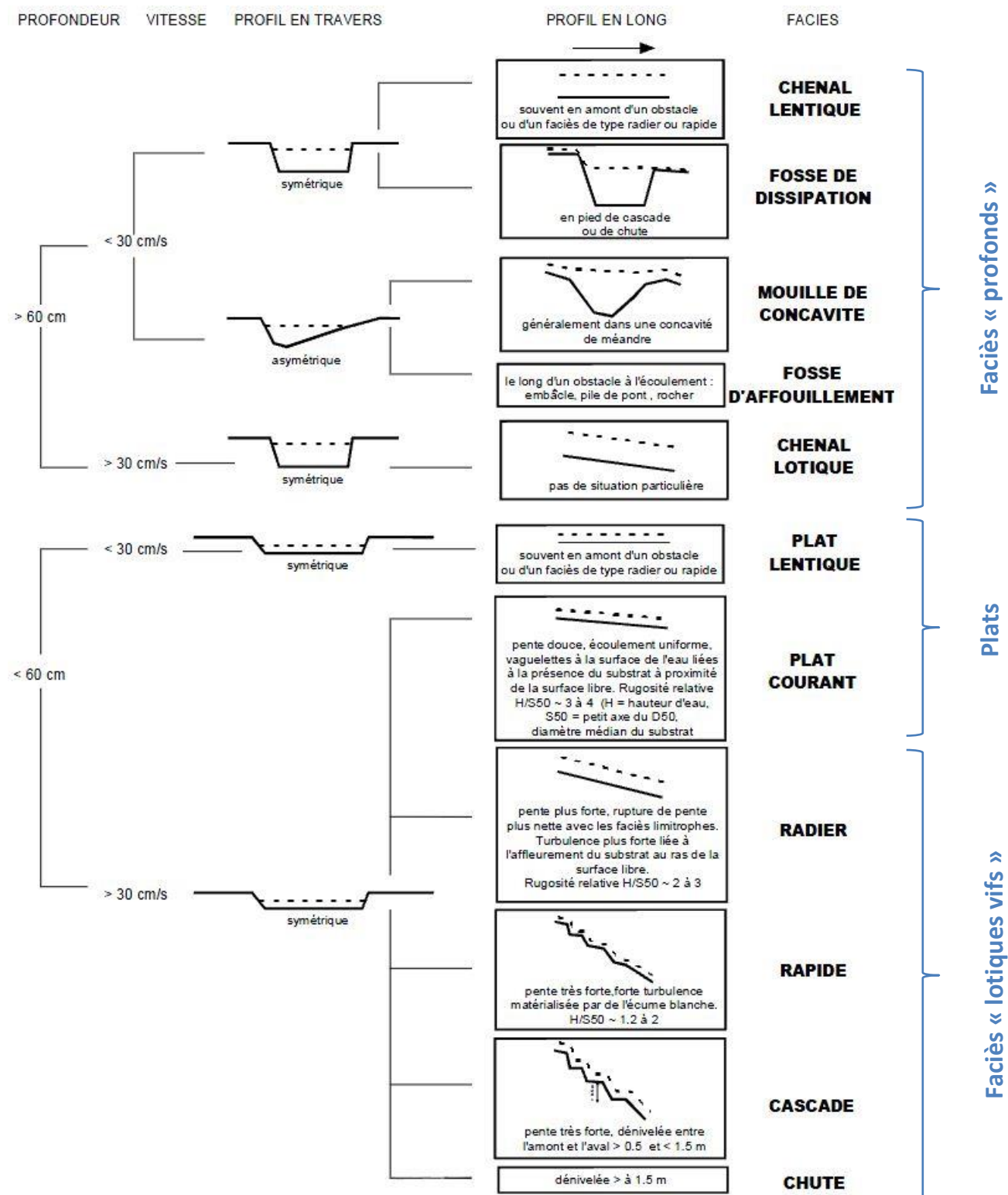
Sogreah, ETRM, Sibenson Environnement, 2002-2003. Schéma global de gestion du Verdon.

ANNEXE

Classification des faciès d'écoulement
selon Malavoi et Souchon (2002)

11 TYPES
initiaux

Simplification
en 3 TYPES





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

