

Maitre d'ouvrage :

Avec le soutien de :



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

Rapport de phase 1 – Etat des lieux et diagnostic

Janvier 2022



SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	2
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	6
2.1- Contexte géologique et morphostructural.....	6
2.2- Sectorisation en tronçons homogènes.....	8
3- Evolutions historiques	11
3.1- Evolutions en plan du Verdon	11
3.2- Evolutions verticales des fonds	14
3.2.1- Inventaire et limites des données disponibles	14
3.2.2- Evolutions du profil en long depuis 1907-1952	16
3.2.3- Evolutions au tournant du 21 ^{ème} siècle	17
3.2.4- Evolutions récentes	19
4- Transport solide et morphologie actuelle.....	21
4.1- Constitution des fonds	21
4.1.1- Méthode.....	21
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
a) Colmatage et couverture algale.....	26
b) Diversité des substrats et des faciès d'écoulement	28
c) Stabilité des ouvrages riverains	28
4.3- Transport solide.....	30
4.3.1- Débits morphogènes	30
4.3.2- Charriage et capacité de transport	31
4.4- Sources sédimentaires et stocks alluvionnaires.....	32
5- Synthèse et diagnostic.....	37
5.1- Equilibre et ajustements morphologiques des cours d'eau	37
5.2- Evolutions verticales des fonds du Moyen Verdon	38
5.3- Evolutions de la distribution granulométrique des fonds du Moyen Verdon.....	39
5.4- Rétraction des bandes actives.....	40
5.5- Bilan et hiérarchisation du déficit sédimentaire	40
BIBLIOGRAPHIE.....	42
ANNEXE.....	45

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les 2 secteurs d'études au sein du bassin versant du Verdon.....	7
Figure 2. Tronçons homogènes du Moyen Verdon.....	9
Figure 3. Cartographie diachronique des bandes actives du Moyen Verdon – secteur AMONT	11
Figure 4. Cartographie diachronique des bandes actives du Moyen Verdon – secteur MEDIAN.....	12
Figure 5. Cartographie diachronique des bandes actives du Moyen Verdon – secteur AVAL.....	12
Figure 6. Evolution de la largeur de la bande active du Moyen Verdon entre 1860 et 2021 : a) évolution de la largeur moyenne ; b) évolutions par tronçon homogène	13
Figure 7. Différences entre les lignes d'eau d'avril 2021 et celles du profil en long des grandes forces hydrauliques (novembre 1952 en amont du pont du Roc et novembre 1907 en aval).....	16
Figure 8. Photographies du seuil EDF juste après sa construction en 1953 (à gauche ; source EDF) et en 2016 (à droite ; source : Sigosphère)	17
Figure 9. Profils en long des fonds de 1993, 2010 et 2016 dans la traversée de Castellane	18
Figure 10. Profils en long des lignes d'eau de 1907, 1952, 2001 et 2021 : a) entre le barrage de Chaudanne et le lieu-dit la Colle ; b) entre la Colle et la Porte Saint-Jean.....	19
Figure 11. Evolutions des lignes d'eau (en bleu) et des fonds (en marron) de 2010 à 2016 entre le seuil des Listes et le hameau de Brans	20
Figure 12. Evolutions des lignes d'eau de 2010 à 2021 entre le seuil des Listes et le hameau de Brans ..	20
Figure 13. Localisation des transects levés sur le Moyen Verdon.....	22
Figure 14. Distribution des faciès échantillonnés lors des levés sur transects	23
Figure 15. Distributions granulométriques dominantes du Moyen Verdon par tronçon	24
Figure 16. Distributions granulométriques dominantes du Moyen Verdon par type de faciès	25
Figure 17. Concrétions biochimiques (a) et périphyton (b) dans le TCC de Chaudanne.....	27
Figure 18. Dépôts fins dans la retenue du seuil des Listes (a) et 250m en aval de ce seuil (b)	27
Figure 19. Importante couverture algale en aval de la STEP de Castellane	27
Figure 20. Protection de berge effondrée par affouillement au droit du camping de la Salaou (en rive droite au lieu-dit la Colle).....	28
Figure 21. Exemples de faciès (a, b, c, d) et de substrats (e, f) en aval de la Colle	29
Figure 22. Versants rocheux en contact direct du Verdon aux environs du tronçon « Chasteuil ».....	32
Figure 23. Principales caractéristiques morphologiques et géologiques des affluents du Moyen Verdon (hors Jabron).....	33
Figure 24. Apports solides d'une petite ravine de rive droite en aval de la Porte-Saint-Jean : a) cône de déjection formée par la ravine : b) fonds du Verdon constitués d'alluvions non émoussées au droit de cette ravine.....	35

Figure 25. Cône de déjection du torrent de la Jabie	35
Figure 26. Confluence du ruisseau du Pesquier	35
Figure 27. Exemples d'érosions de berge du Moyen Verdon : a) érosion de la rive gauche en amont du ruisseau du Pesquier, dans la traversée centre de Castellane ; b), érosion de la rive droite en aval du camping de la Salaou ; c) érosion de la rive droite en amont du Jabron	36
Figure 28. Balance de Lane (1955, d'après Watson et Biedenharn 1999)	37
Figure 29. Débit de pointe des déversements du barrage de Chaudanne depuis 1971.....	39
Figure 30. Cartes synthétiques du déficit sédimentaire du Moyen Verdon	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques principales des tronçons homogènes du Moyen Verdon.....	10
Tableau 2. Liste des levés topographiques réalisés sur le Moyen Verdon.....	15
Tableau 3. Classification de Wentworth modifiée par Malavoi et Souchon (1989)	22
Tableau 4. Historique des déversements du barrage de Chaudanne entre 1971 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 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 Moyen 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 Moyen Verdon.
- Enfin, la 5^{ème} section résume brièvement les principaux résultats et leurs implications sur l'équilibre morphodynamique du Moyen 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 calcaire 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 le Moyen Verdon la partie médiane du bassin versant.

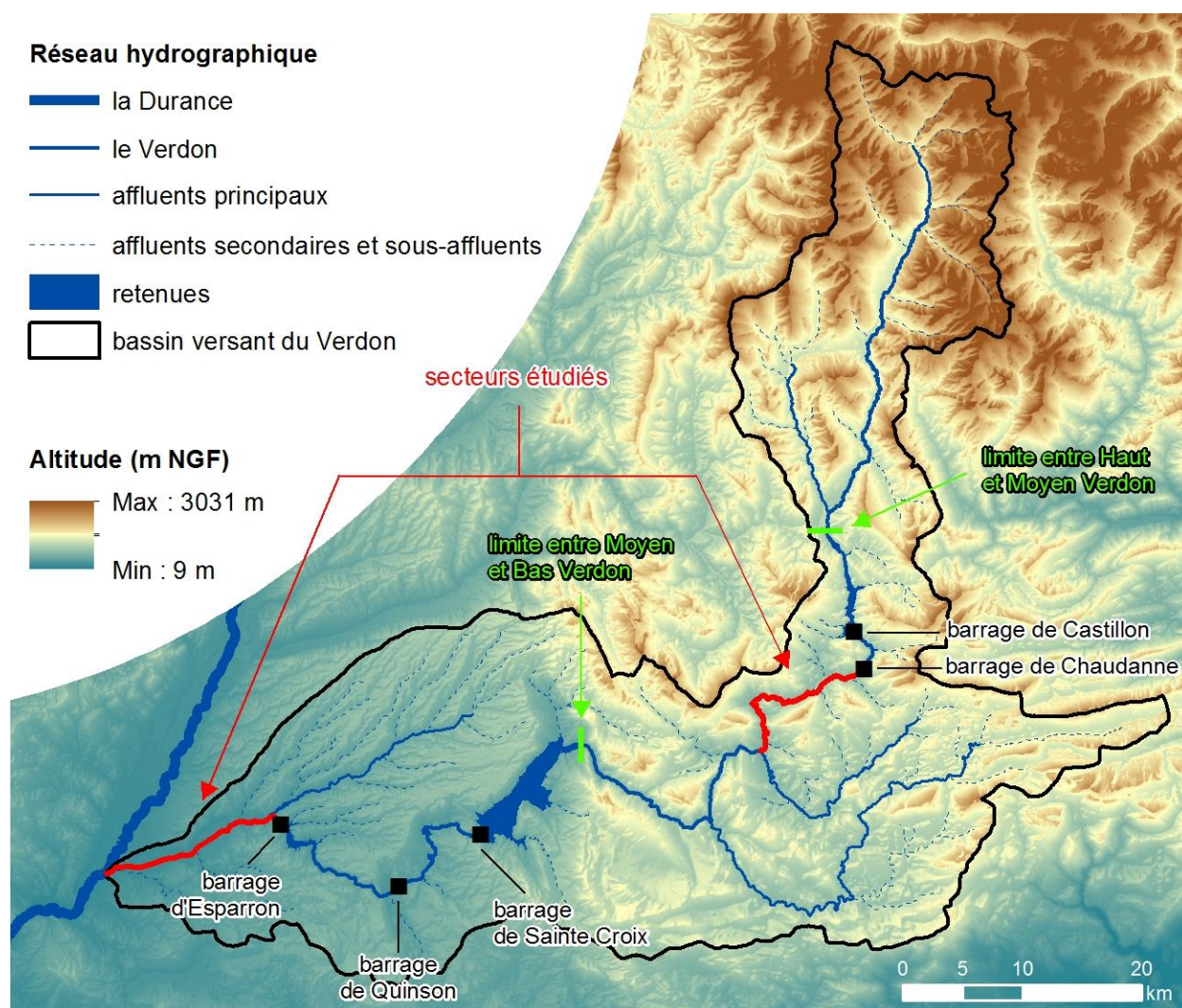


Figure 1. Les 2 secteurs d'études au sein du bassin versant du Verdon

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 Moyen Verdon entre le barrage de Chaudanne et le Jabron (ou le pont de Carajuan) – que nous appellerons simplement par la suite « Moyen Verdon » – est l'une de ces poches alluviales. Il est cerné en amont par les retenues des barrages de Castillon puis de Chaudanne et en aval par un tronçon en gorges qui débouche lui-même sur le grand canyon du Verdon, encore plus encaissé. Précisons toutefois que le fond de vallée alluvial est surtout large entre le barrage de Chaudanne et le pont de Taloire. En aval, il se resserre et contraint ainsi latéralement le Verdon en plusieurs endroits. Ce point est détaillé dans la section suivante (cf. § 2.2).

2.2- Sectorisation en tronçons homogènes

Le Moyen 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 identifions ainsi 7 tronçons homogènes entre le barrage de Chaudanne et le Jabron (**figure 2**).

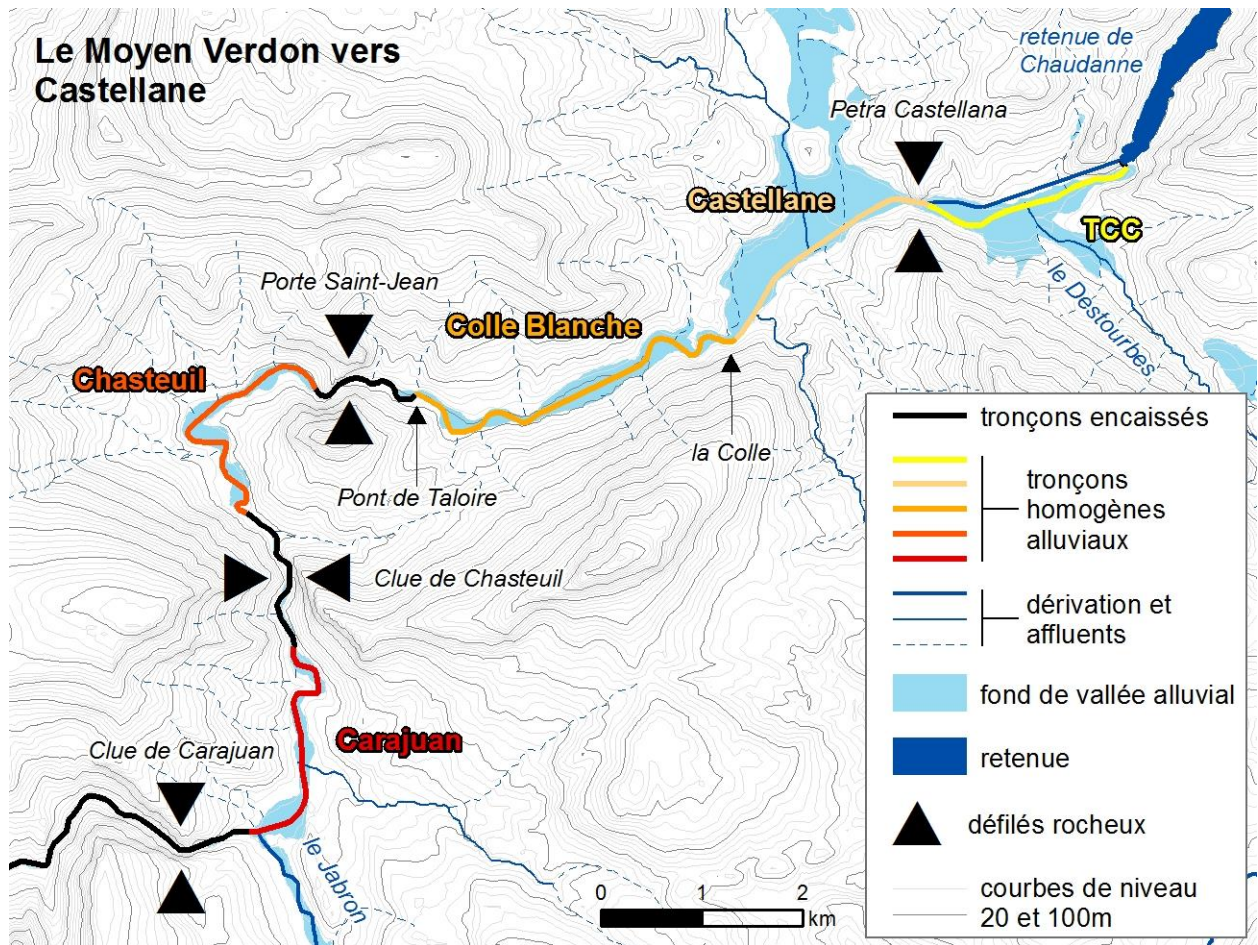


Figure 2. Tronçons homogènes du Moyon Verdon

Il faut tout d'abord distinguer les tronçons « alluviaux » et les tronçons « encaissés » :

- Les tronçons dits « encaissés » circulent dans des fonds de vallée étroits où la proximité des versants se traduit par la présence dans le lit de substrats non alluviaux, en particulier des affleurements rocheux mais aussi des particules de taille diverse provenant de l'érosion des versants adjacents (rochers, blocs métriques, colluvions...). Ces tronçons sont peu sensibles aux perturbations anthropiques et leurs fonds sont peu représentatifs de la charge solide en transit. Ils sont par conséquent peu vulnérables à d'éventuels déséquilibres sédimentaires et peu révélateurs de ces derniers.
- Les tronçons dits « alluviaux » traversent les alluvions modernes déposées dans les fonds de vallées larges à moyens où ils sont potentiellement libres de divaguer (en l'absence d'aménagements latéraux). Ils peuvent ajuster rapidement leur morphologie (pente, géométrie en travers ou granulométrie) suite à une perturbation des flux liquides et/ou solides et concentrent ainsi la plupart des enjeux de gestion liés à ces déséquilibres hydromorphologiques.

Deux courts tronçons encaissés circulent entre les défilés rocheux de la Porte Saint-Jean (1,2 km) et de la clue de Chasteuil (1,6 km) où le fond de vallée est particulièrement étroit (38 m en moyenne).

Nous nous intéressons davantage aux cinq tronçons alluviaux qui se situent de part et d'autre de ces défilés :

- Le premier correspond au tronçon court-circuité (TCC) de Chaudanne. Il présente un fond de vallée relativement large et de nature alluviale. Sa pente moyenne (8 m/km) est plus élevée que celles des tronçons aval (6 m/km) mais il se distingue surtout de ces derniers par ses faibles débits, en raison de la dérivation de l'usine hydroélectrique de Chaudanne.
- Le deuxième correspond à la traversée de Castellane où le fond de vallée est particulièrement large, du moins dans le contexte du Moyen Verdon. Mais il s'agit d'un tronçon endigué, ce qui limite en pratique l'espace disponible pour la rivière et la contraint à adopter un tracé rectiligne.
- Le troisième tronçon (« Colle Blanche ») s'étend du lieu-dit la Colle jusqu'au pont de Taloire. Il s'agit d'un tronçon plus naturel que le précédent au sens où il est quasiment dépourvu d'aménagements, ce qui permet au Verdon de divaguer plus librement et de développer un tracé en plan sinueux. C'est surtout vrai dans la partie centrale du tronçon, plus large, où étaient autrefois extraites ses alluvions (gravière de Colle Blanche). Aux extrémités amont et aval du tronçon, le fond de vallée est plus étroit et les méandres du Verdon sont figés par des éperons rocheux.
- Le quatrième tronçon (« Chasteuil ») correspond à une petite poche alluviale coincée entre la Porte Saint-Jean et la clue de Chasteuil. Il présente à peu près les mêmes caractéristiques que le tronçon précédent, avec un fond de vallée légèrement plus étroit.
- Le cinquième tronçon (« Carajuan ») correspond à une autre poche alluviale coincée entre la clue de Chasteuil et celle de Carajuan qui débute juste après la confluence avec le Jabron. Et ses caractéristiques sont encore très proches de celles du tronçon homogène alluvial précédent. Son fond de vallée est un peu plus large en moyenne, car on constate un élargissement important mais très ponctuel en amont immédiat du Jabron (site de Carajuan).

nom	extrémité amont	extrémité aval	longueur (km)	lithologie dominante	largeur du fond de vallée (km)	pente du lit (m/km)
TCC	barrage de Chaudanne	restitution	2,1	alluviale	240	7,6
Castellane	restitution	lieu-dit la Colle	2,5	alluviale	420	6,0
Colle Blanche	lieu-dit la Colle	pont de Taloire	3,9	alluviale	130	6,3
porte Saint-Jean	<i>(court tronçon encaissé)</i>		1,2	rocheuse	37	7,4
Chasteuil	porte Saint-Jean	clue de Chasteuil	2,9	alluviale	100	5,8
clue de Chasteuil	<i>(court tronçon encaissé)</i>		1,6	rocheuse	39	5,9
Carajuan	clue de Chasteuil	pont de Carajuan	2,6	alluviale	120	5,6

Tableau 1. Caractéristiques principales des tronçons homogènes du Moyen 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 7 séries de photographies aériennes : 1933, 1948, 1972, 1994 (avant la crue de novembre), 1996, 2010 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 (feuille n°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 à 5 présentent sur cartes les principaux résultats de cette analyse. La figure 6 présente l'évolution des largeurs moyennes de bandes actives.

Secteur AMONT entre le barrage de Chaudanne et le lieu-dit la Colle

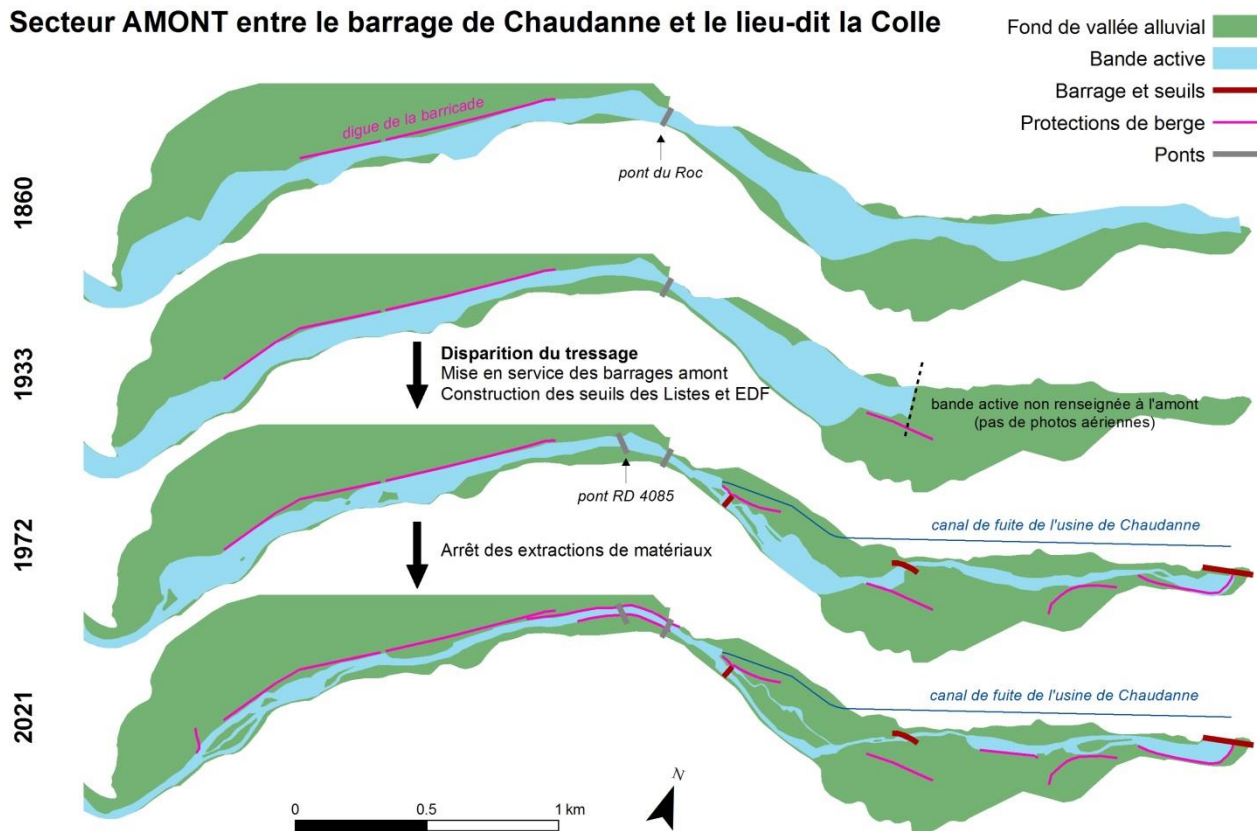


Figure 3. Cartographie diachronique des bandes actives du Moyen Verdon – secteur AMONT

Secteur MEDIAN entre le lieu-dit la Colle et Saint-Martin

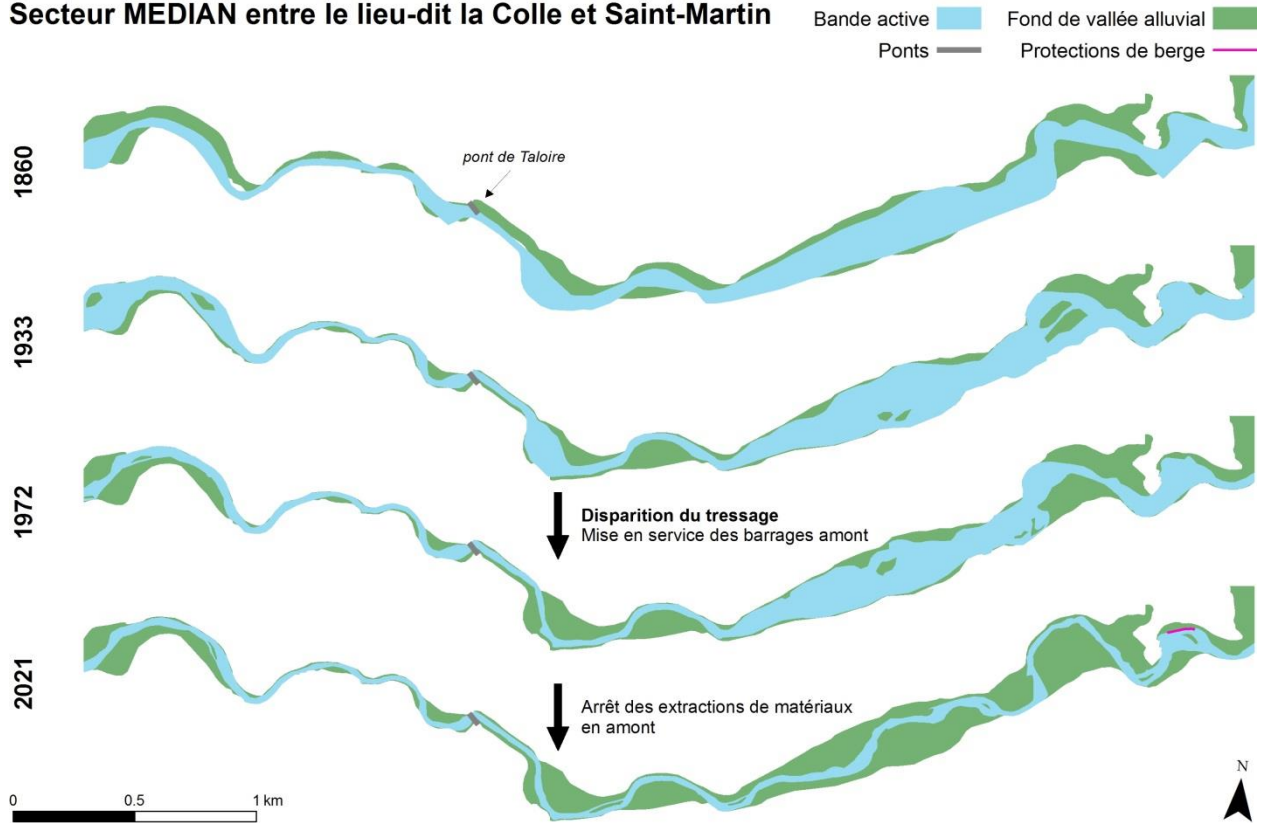


Figure 4. Cartographie diachronique des bandes actives du Moyen Verdon – secteur MEDIAN

Secteur AVAL entre Saint-Martin et le pont de Carajuan

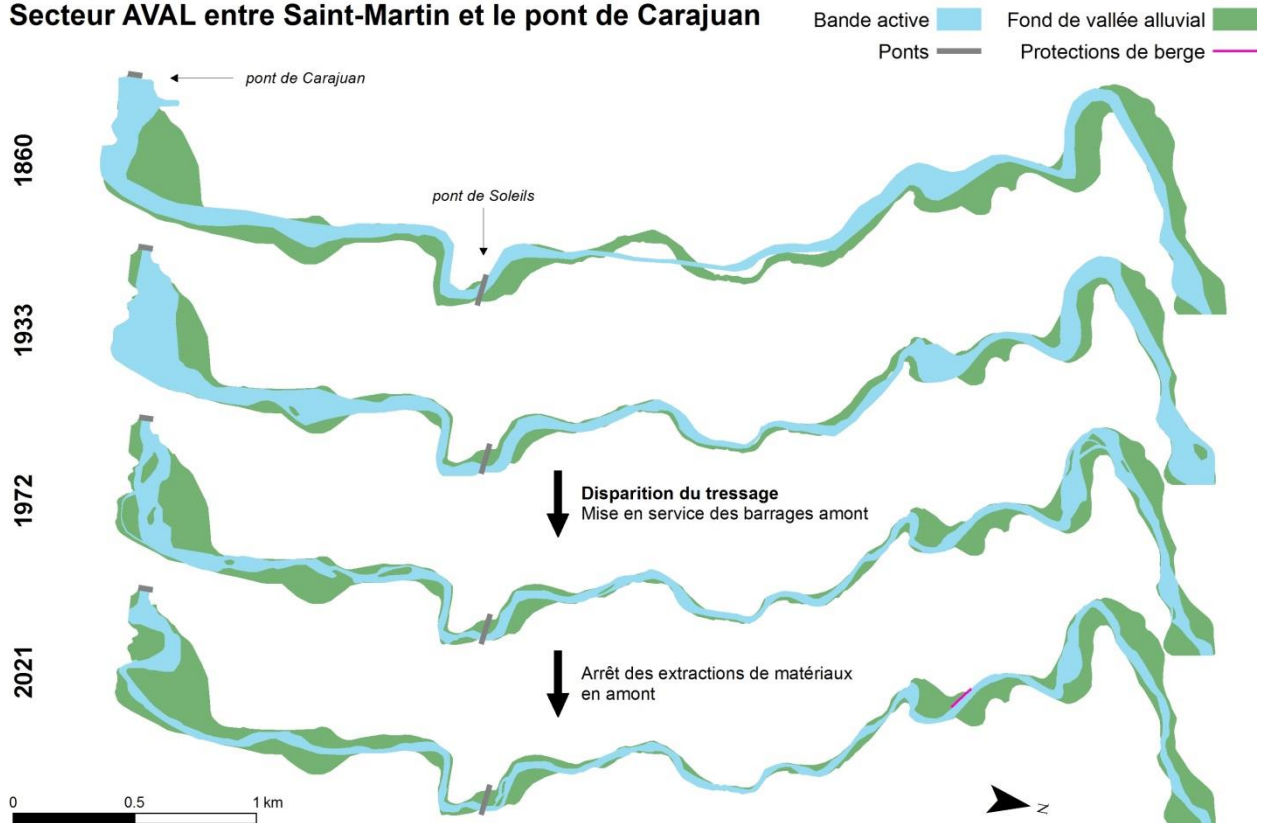


Figure 5. Cartographie diachronique des bandes actives du Moyen Verdon – secteur AVAL

NB : compte tenu des limites technologiques de l'époque, les cartes d'Etat-Major sont imprécises si bien que l'emprise de la bande active de 1860 n'est pas toujours cohérente avec celle du fond de vallée alluvial. C'est notamment le cas au niveau de la Porte Saint-Jean, en aval du pont de Taloire (secteur MEDIAN – 2^{ème} carte), puis au niveau de la clue de Chasteuil, environ 1 km en amont du pont de Soleils (secteur AVAL – 3^{ème} carte).

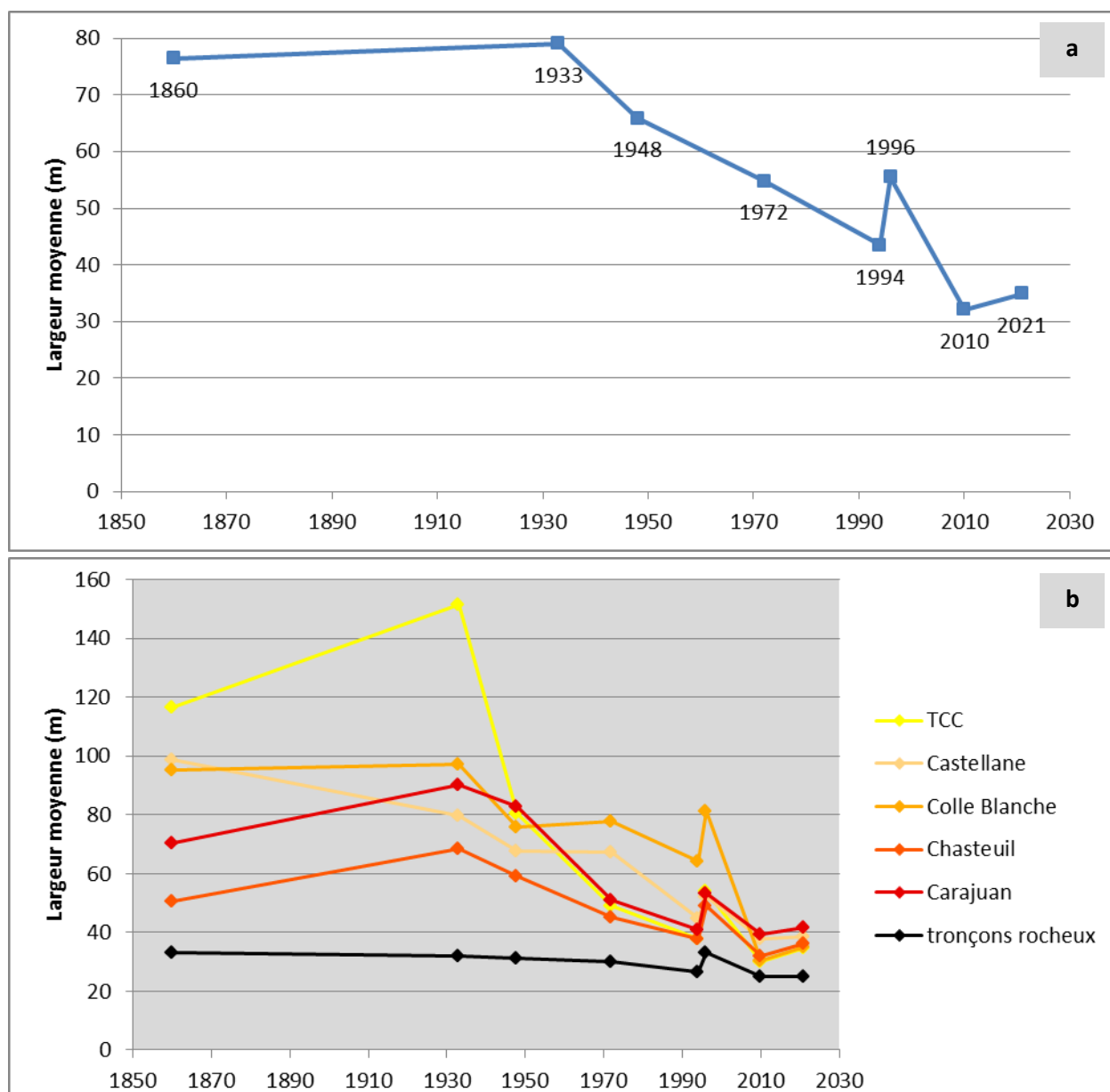


Figure 6. Evolution de la largeur de la bande active du Moyen Verdon entre 1860 et 2021 : a) évolution de la largeur moyenne ; b) évolutions par tronçon homogène

Compte tenu de l'imprécision de la carte d'état-major, on peut considérer que la largeur moyenne de la bande active du Moyen Verdon a peu évolué entre 1860 et 1933 (**figure 6a**). Puis on constate une forte rétraction jusqu'à aujourd'hui, avec une vitesse globalement constante à 2 exceptions près :

- l'élargissement soudain constaté en 1996 qui reflète l'effet de la crue de 1994 (autour de 700 m³/s) ;
- le léger élargissement entre 2010 et 2021 suite à la crue de novembre 2016.

La largeur mesurée en 2010 pourrait être légèrement sous-estimée (difficulté à voir les limites de la bande active du fait de l'ombre portée des sommets environnants). Mais on peut quand même considérer que la crue de 1994, pourtant la plus intense depuis la construction des barrages amont (soit au moins 70 ans), n'a pas eu d'effet à long terme sur la dynamique fluviale : les surfaces rajeunies par cette crue se sont très vite refermées et la rétraction de la bande active s'est poursuivie à une vitesse semblable.

Dans l'ordre d'importance décroissante des évolutions constatées depuis 1933, les tronçons homogènes se classent comme suit (**figure 6b**) :

- la rétraction la plus forte est observée sur le TCC, où le fond de vallée est naturellement large et dont la dynamique est la plus amoindrie par la dérivation de l'usine de Chaudanne ;
- vient ensuite le tronçon de Colle Blanche dont l'actuelle largeur ne représente plus qu'un tiers de sa valeur initiale ;
- puis les 3 autres tronçons alluviaux (Castellane, Chasteuil et Carajuan) dont les actuelles largeurs représentent désormais la moitié de leurs valeurs initiales ;
- et enfin les 2 tronçons encaissés, correspondant à la Porte-Saint-Jean et à la clue de Chasteuil, dont la faible largeur a peu évolué (un peu moins de 30 m en moyenne).

La rétraction de la bande active a donc été plus importante sur le tronçon de Colle Blanche que sur celui de Castellane où le fond de vallée est pourtant plus large. Cela s'explique par l'ancienneté de la digue de la Barricade qui était déjà présente sur la carte d'Etat-major.

En à peu près 80 ans, la largeur moyenne de la bande active a diminué de plus de moitié. Et cette diminution a commencé un peu avant la mise en service des barrages de Castillon (1948) et de Chaudanne (1952). Les travaux avaient toutefois débuté en 1929 à Castillon (en 1950 à Chaudanne). Il semble donc que les 2 barrages amont ne soient pas totalement responsables de la perte d'activité morphodynamique du Moyen Verdon. Ces aménagements ont eu par la suite un impact majeur et sont en grande partie responsable de la disparition du tressage entre 1948 et 1972. Mais d'autres facteurs ont probablement favorisé ces évolutions dans un 1^{er} temps (fin du petit âge glaciaire, stabilisation des versants par végétalisation, modifications des pratiques culturelles et d'entretien de la ripisylve).

3.2- Evolutions verticales des fonds

3.2.1- Inventaire et limites des données disponibles

Pour étudier le plus finement possible les évolutions verticales du lit, nous avons tenté de recenser puis de retrouver 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 l'EPAGE Verdon. La dernière ligne correspond en fait 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 en amont du seuil des Listes	novembre 1952
	profil en long de la ligne d'eau en aval du seuil des Listes	novembre 1907
levé réalisé pour le Plan d'exposition aux risques de Castellane 1993 (d'après Sogreah et al. 2002)	profil en long du fond dans la traversée de Castellane	1993
levé réalisé pour l'étude Sogreah et al. 2002	profil en long de la ligne d'eau entre le barrage de Chaudanne et le pont de Taloire	février 2001
GEOA, pour le PNRV	profil en long du fond et de la ligne d'eau entre le seuil des Listes et Brans	octobre 2010
Boyer Gilbert, pour EDF (d'après Biotec 2013 et Sigosphere & Morpheau Conseils 2016)	semi de points sur tout ou partie du TCC	avril 2011 ou 2012 ?
SCP (destination inconnue)	28 profils en travers dans la traversée de Castellane	octobre 2013
Sigosphere, pour le PNRV	profil en long du fond et de la ligne d'eau entre le barrage de Chaudanne et Brans	septembre 2016
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 Moyen Verdon

La plupart des levés mentionnés ont été retrouvés mais, si les levés les plus récents sont disponibles au format numérique, les levés anciens ne le sont qu'au 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.

Outre l'imprécision des données récupérées, c'est surtout la rareté des levés réalisés (ou archivés) au cours du 20^{ème} siècle qui fait défaut. En effet, la plupart des données que nous avons pu exploiter datent d'un peu avant les années 2000. Elles se concentrent en général dans la traversée de Castellane. Et il n'y a aucun levé intermédiaire entre le profil en long de 1907 et celui de 2021 en aval du pont de Taloire.

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.

3.2.2- Evolutions du profil en long depuis 1907-1952

Lorsque l'on compare les levés les plus anciens (novembre 1907 ou 1952) avec les plus récents (avril 2021), on constate une forte diminution des altitudes des lignes d'eau (**figure 7**) :

- dans le TCC, l'actuelle ligne d'eau au débit réservé est en moyenne 1,4 m plus basse qu'en novembre 1952 ;
- en aval de la restitution et jusqu'au pont de Carajuan, elle est plus basse de 2,3 m en moyenne à celle de novembre 1907.

Il faut néanmoins souligner que ces lignes d'eau ne sont pas toujours comparables du fait des différences de débit entre les levés :

- les levés du 8 avril 2021 ont été réalisés au débit réservé (3 m³/s) ;
- ceux du 14 novembre 1952, entre le barrage et le pont du Roc, ont vraisemblablement été réalisés pour un débit proche de cette dernière valeur (le barrage de Castillon était déjà en service et le débit journalier naturel reconstitué à la station de Demandolx est évalué à 4,4 m³/s) ;
- ceux des 13 et 14 novembre 1097, en aval du pont du Roc, ont en revanche été réalisés pour un débit nettement plus élevé. Nous ignorons la valeur précise du débit du Moyen Verdon mais Lefort (2006) indique que l'automne 1907 a été particulièrement humide avec un débit moyen mensuel de 117 m³/s à Quinson. Or, si l'on considère un débit de 100 m³/s sur le Moyen Verdon, la surélévation de la ligne d'eau de 1907 par rapport à l'actuel débit réservé est d'environ 75 cm. Il faut donc soustraire cette valeur aux évolutions représentées sur la **figure 7**.

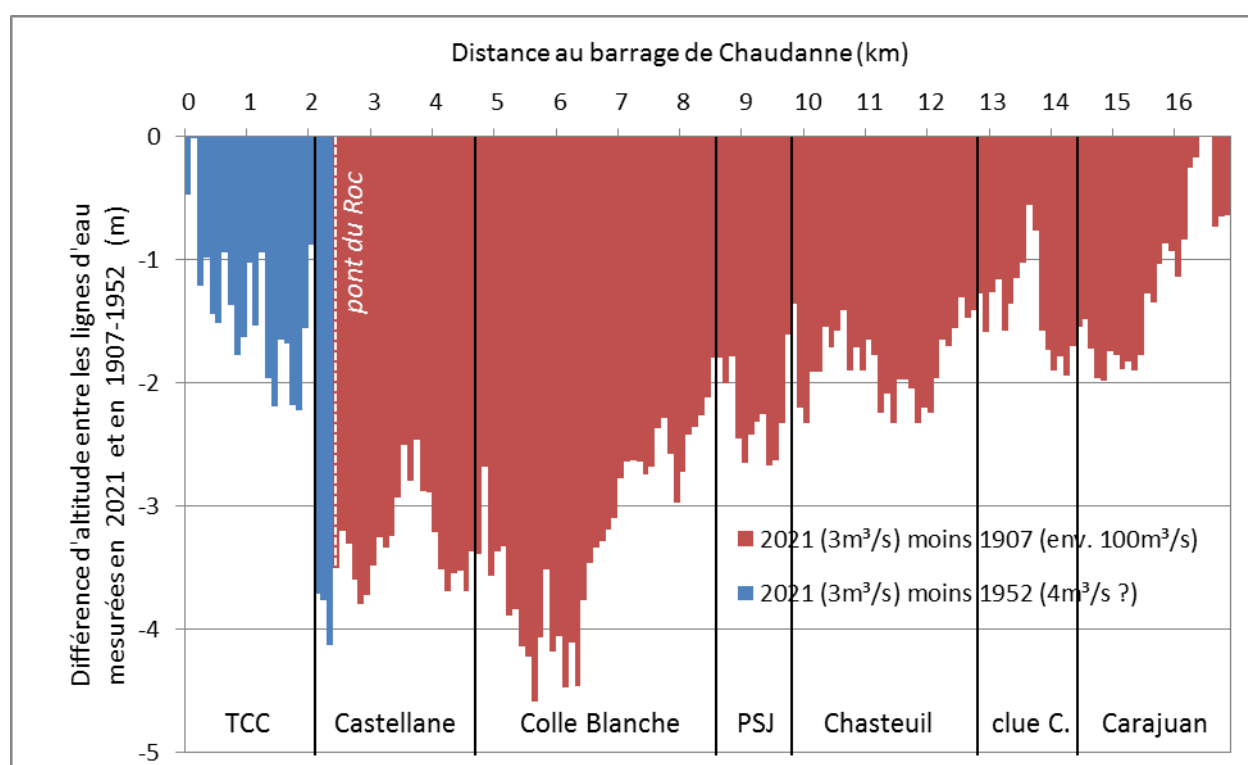


Figure 7. Différences entre les lignes d'eau d'avril 2021 et celles du profil en long des grandes forces hydrauliques (novembre 1952 en amont du pont du Roc et novembre 1907 en aval)

L'abaissement constaté entre 1952 et 2021 en amont du pont du Roc (en bleu sur la [figure 7](#)) témoigne donc bien d'une incision du lit. Elle est de l'ordre de 1,4 m en amont du seuil EDF qui a permis de limiter l'incision du TCC. Elle atteint près de 4 m entre ce seuil et le pont du Roc. On sait pourtant que la ligne d'eau n'a pas ou très peu évolué en aval immédiat du seuil EDF depuis sa construction en 1953 ([figure 8](#)). L'abaissement très important constaté entre cet ouvrage et le pont du Roc est donc survenu en quelques mois seulement. Il ne résulte certainement pas d'une incision spontanée liée à un déficit sédimentaire mais probablement d'un curage du Verdon en aval du canal de fuite visant à optimiser la hauteur de chute exploitée par l'usine hydroélectrique de Chaudanne.

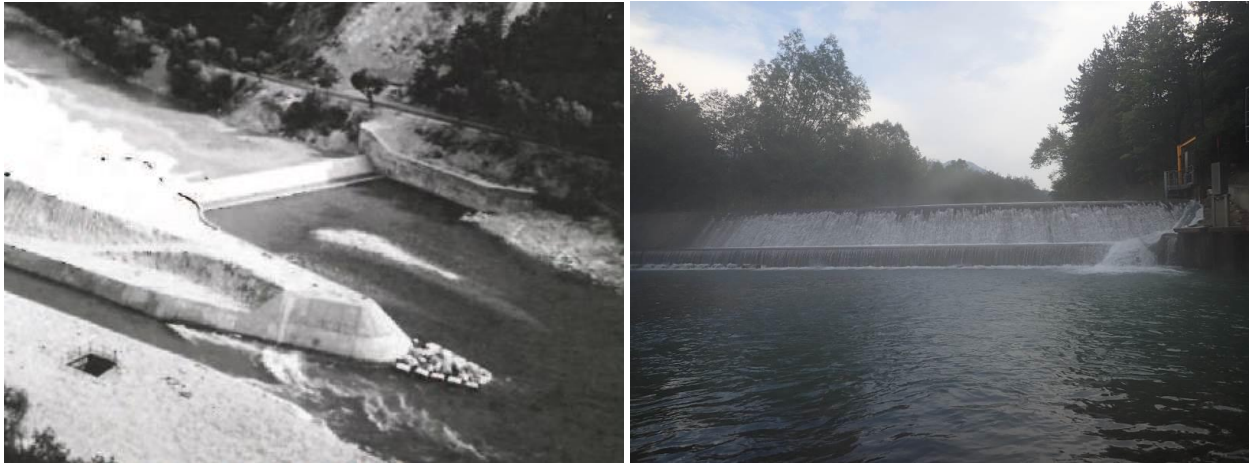


Figure 8. Photographies du seuil EDF juste après sa construction en 1953 (à gauche ; source EDF) et en 2016 (à droite ; source : Sigosphère)

L'abaissement constaté entre 1907 et 2021 en aval du pont du Roc témoigne également bien d'une incision importante du lit car, si l'on retire 75 cm à la ligne d'eau de 1907 pour la rendre comparable à celle de 2021, on obtient les valeurs suivantes :

- incision de 2,8 m en moyenne sur les 5 premiers kilomètres en aval de la restitution (c'est-à-dire jusqu'à l'extrémité aval de l'ancienne gravière de Colle Blanche) ;
- incision moyenne de 1 m sur les 10 derniers kilomètres, avec une intensité décroissante vers l'aval (1,9 m en aval immédiat de l'ancienne gravière de Colle Blanche ; à peu près nulle en aval du camping de Carajuan).

3.2.3- Evolutions au tournant du 21^{ème} siècle

Les plus anciens levés dont nous disposons après celui des grandes forces hydrauliques (1907-1952) datent de 1993 et 2001. Tous deux ont été recalés approximativement à partir des graphiques publiés dans l'étude du schéma global de gestion du Verdon (Sogreah et al. 2002). D'après ces derniers auteurs, celui de 1993 rend compte de l'altitude du talweg du lit alors que celui de 2001 correspond à une ligne d'eau levée lors d'une écluse de l'usine de Chaudanne. Le profil en long de 1993 peut donc être comparé aux fonds levés en 2010 et 2016 ([figure 9](#)). Celui de 2001 peut donc être comparé aux lignes d'eau de 1907/1952 et à celles de 2021 ([figure 10](#)).

Le profil en long de 1993 ainsi recalé est proche de ceux de 2010 et 2016 dans sa partie amont – entre le seuil EDF et la route départementale 4085 – comme dans sa partie aval – entre le ruisseau du Pesquier et la station d'épuration ([figure 9](#)). Il est revanche sensiblement plus haut sur environ 500 m autour de

la confluence avec le torrent de la Recluse : la différence d'altitude moyenne avec les fonds de 2010 et 2016 est de l'ordre de 70 cm et 1 m respectivement.

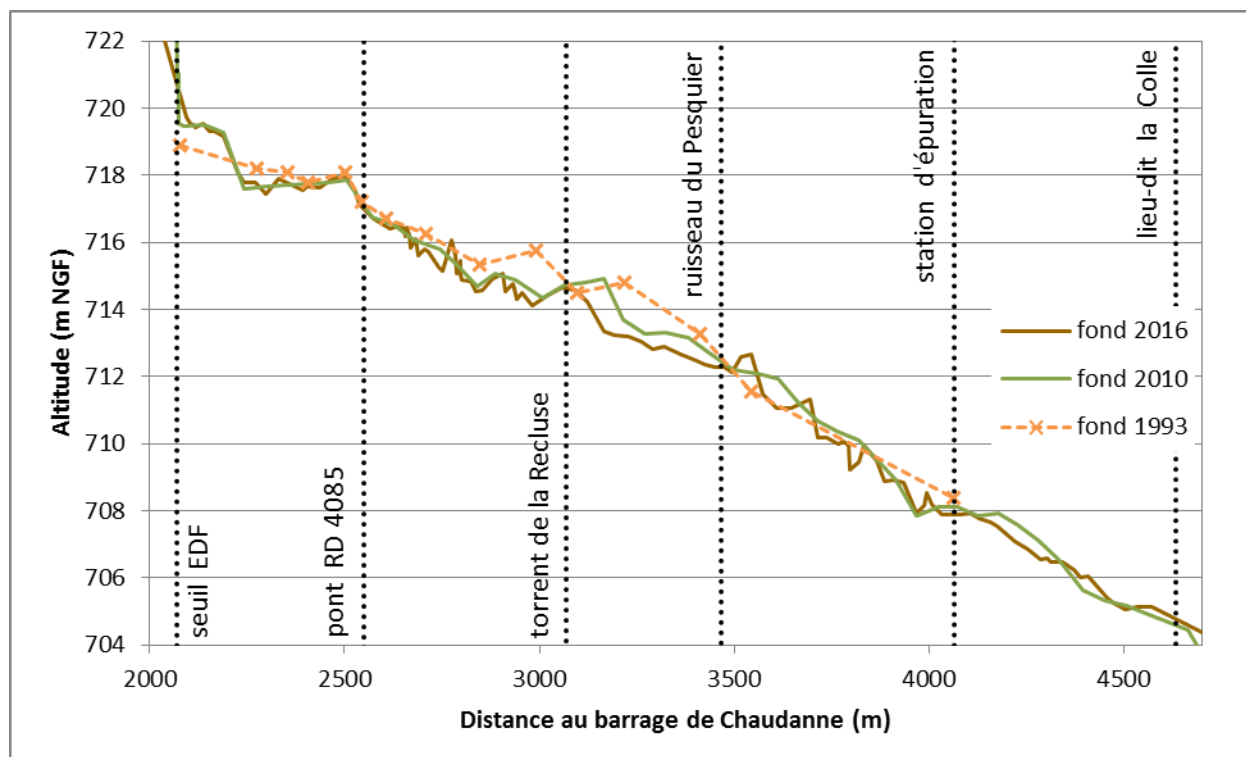


Figure 9. Profils en long des fonds de 1993, 2010 et 2016 dans la traversée de Castellane

Les lignes d'eau mesurées en 2001 sont largement plus basses que celles de 1907 ou 1952 sur l'ensemble du linéaire couvert par ces levés (figure 10). Comparées aux lignes d'eau de 2021, elles sont :

- semblables dans le TCC (figure 10a) ;
- légèrement plus hautes sur les 4 premiers kilomètres en aval de la restitution mais dans une proportion non significative compte tenu des apports du canal de fuite, à une exception près : on constate encore un point haut aux environs du torrent de la Recluse (figure 10a), comme sur le profil en long des fonds de 1993 ;
- sensiblement plus élevées en aval du ravin de la Sarraye (affluent de rive gauche qui conflue à peu près à l'extrémité amont de l'ancienne gravière de Colle Blanche ; figure 10b). Sur ces 2,6 km aval, la différence d'altitude est en moyenne de 1,2 m avec un maximum de 1,6 m, ce qui paraît excessif pour être attribué intégralement au débit maximal turbiné par l'usine de Chaudanne (40 m³/s).

L'incision du Moyen Verdon entre le barrage de Chaudanne et le pont de Taloire s'est donc essentiellement réalisée au cours du 20^{ème} siècle. Il est difficile d'être catégorique mais elle s'est probablement poursuivie au cours des années 2000 au droit de l'ancienne gravière et jusqu'au pont de Taloire.

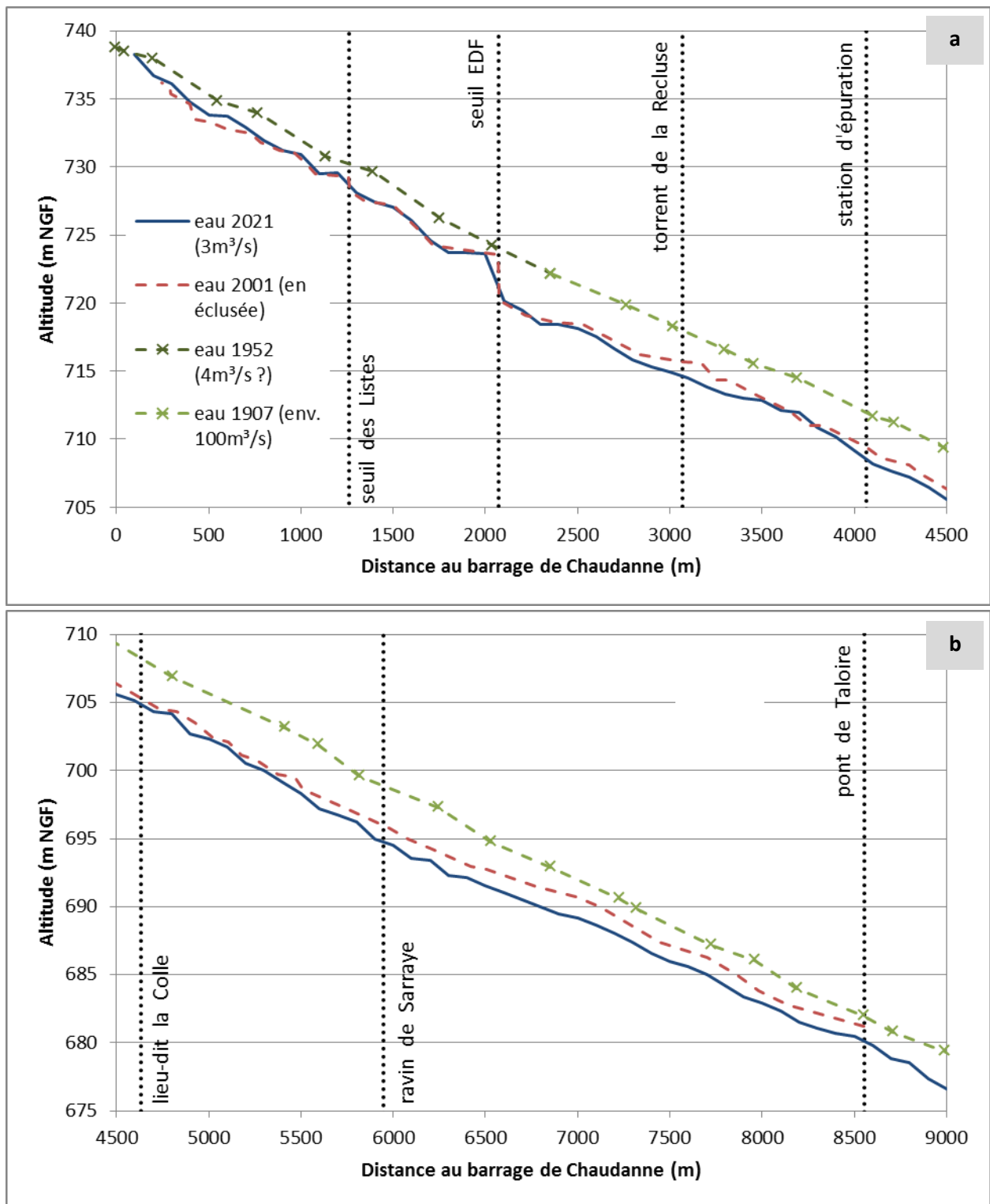


Figure 10. Profils en long des lignes d'eau de 1907, 1952, 2001 et 2021 : a) entre le barrage de Chaudanne et le lieu-dit la Colle ; b) entre la Colle et la Porte Saint-Jean

3.2.4- Evolutions récentes

Les évolutions verticales récentes du Moyen Verdon peuvent enfin 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.

Aussi, seuls les levés de 2010 et 2016 rendent compte directement de l'évolution des fonds (figure 11) mais il s'agit d'une période calme du point de vue hydrologique (débit maximum déversé à Chaudanne de 80 m³/s). La comparaison des lignes d'eau de 2010 et 2021 (figure 12) permet d'évaluer indirectement les évolutions verticales du lit en intégrant la dernière crue importante (novembre 2016 avec un débit maximum déversé à Chaudanne de 211 m³/s).

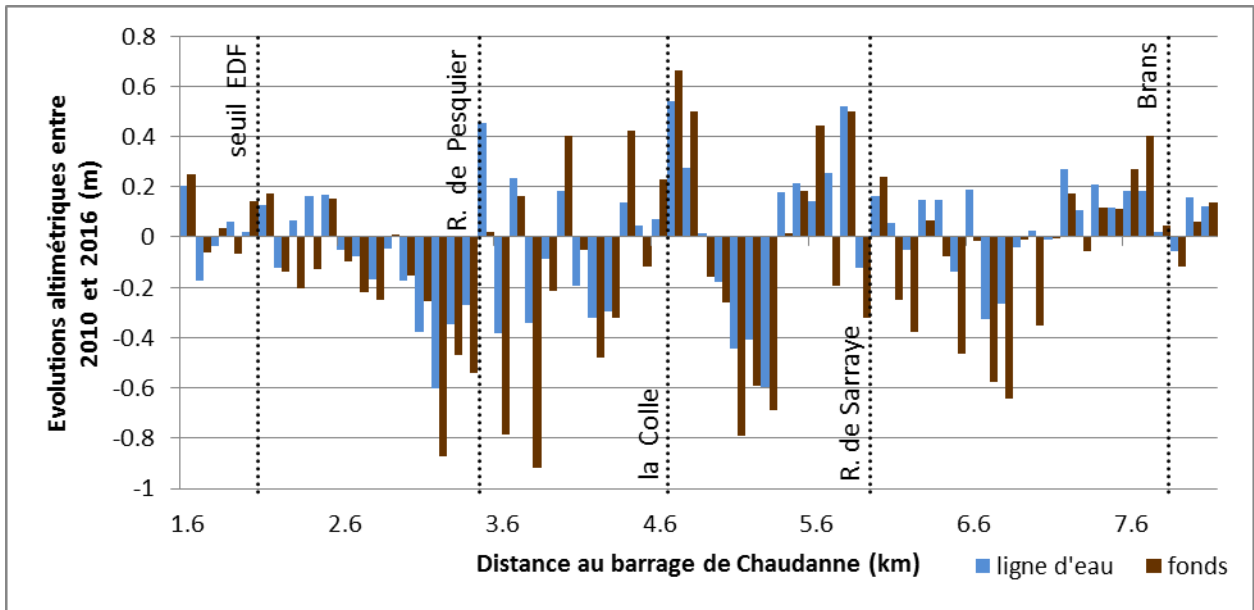


Figure 11. Evolutions des lignes d'eau (en bleu) et des fonds (en marron) de 2010 à 2016 entre le seuil des Listes et le hameau de Brans

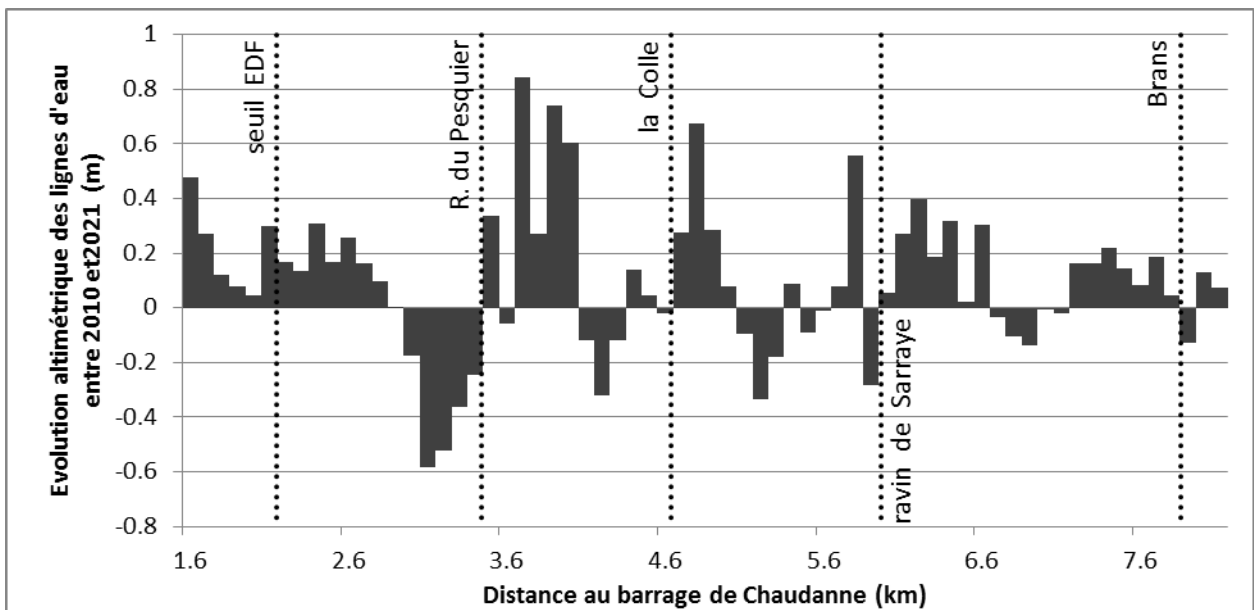


Figure 12. Evolutions des lignes d'eau de 2010 à 2021 entre le seuil des Listes et le hameau de Brans

Entre 2010 et 2016, il n'y a eu aucune évolution significative des fonds ou des lignes d'eau comme l'avaient déjà montré Sigosphère et Morpheau Conseils (2016). En moyenne sur les 6,5 km communs aux 2 levés, la différence entre les lignes d'eau est de 1 cm seulement. On observe bien quelques évolutions locales (**figure 11**) mais il s'agit soit de fluctuations cycliques (« respiration du lit » autour d'un niveau moyen) soit d'artéfacts liés aux choix des points levés par les opérateurs (ex. : les points levés en 2016 sont généralement plus proches du talweg).

Entre 2010 et 2021, le résultat est semblable : il n'y a eu aucune évolution significative des lignes d'eau mais des fluctuations locales qui se compensent à l'échelle du linéaire suivi (**figure 12**). L'évolution moyenne serait de +9 cm mais nous estimons que cela correspond à peu près à la précision du profil en long extrait du LIDAR de 2021.

Le lit du Moyen Verdon est donc stable depuis 2010 dans sa partie amont. Il en est probablement de même pour les tronçons aval compte tenu du contexte morphologique (points durs et sources sédimentaires diffuses).

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 46 transects espacés de 300 m (**figure 13**). Seuls les tronçons alluviaux sont couverts par ces levés car la constitution des fonds des tronçons encaissés au niveau de la Porte Saint-Jean et de la Clue de Chasteuil sont peu révélateurs d'éventuels déséquilibres sédimentaires du Moyen 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.

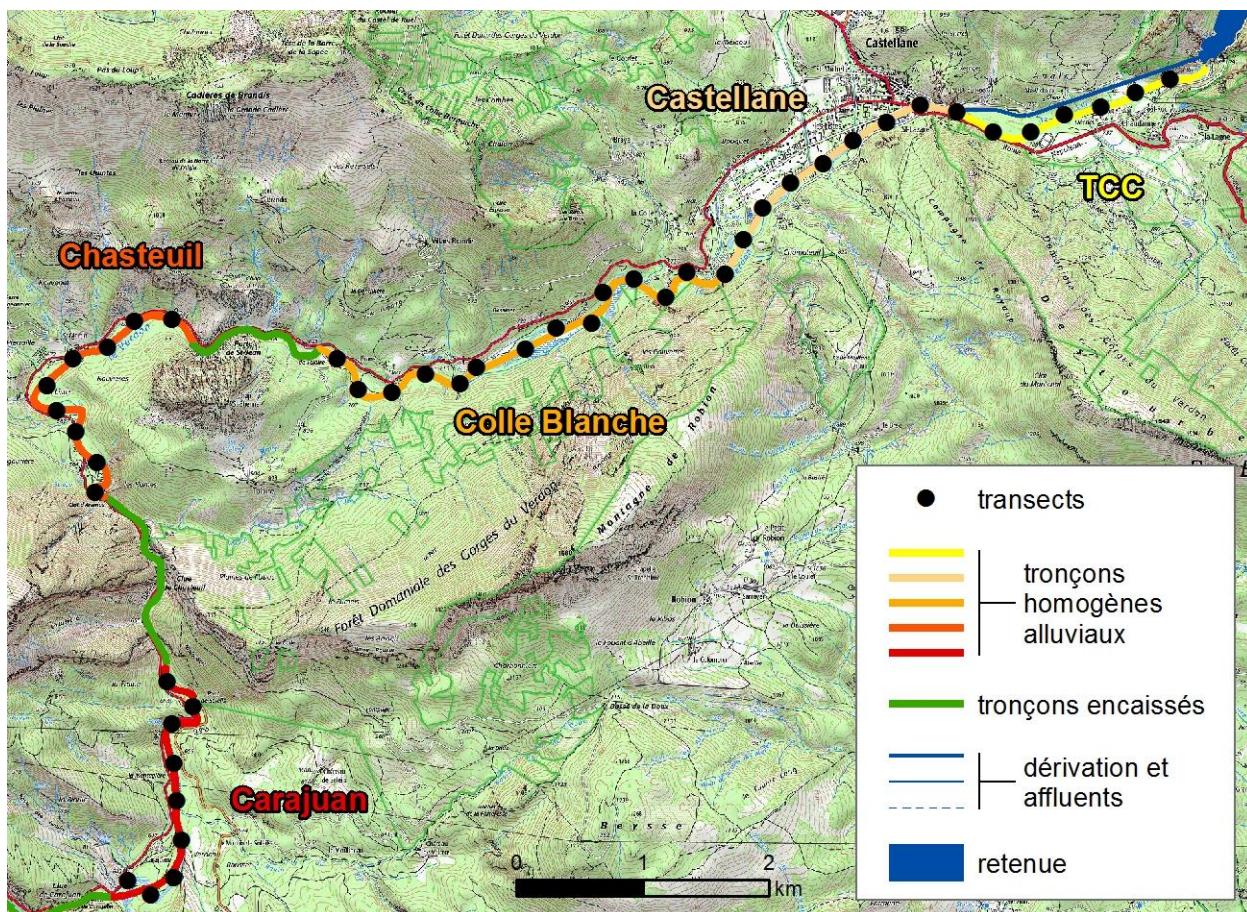


Figure 13. Localisation des transects levés sur le Moyon Verdon

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 14** présente la distribution des faciès d'écoulement échantillonnés lors des levés sur transects, simplifiée en 3 grands types :

- les faciès profonds (mouilles, chenaux lenticques 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 (lenticques ou courants) qui correspondent à des faciès intermédiaires.

On constate des différences significatives entre les tronçons, en particulier entre le TCC où la moitié des faciès échantillonnés sont profonds (influence des 2 seuils artificiels) et les 4 tronçons aval où les plats et les radiers sont plus fréquents. Il y a moins de différences entre ces 4 derniers tronçons dont les pentes moyennes sont très proches. Compte tenu du faible nombre de transects pris en compte, ce résultat ne témoigne pas forcément de véritables différences morphologiques mais d'un biais d'échantillonnage dont il faut tenir compte lors de la comparaison des distributions granulométriques.

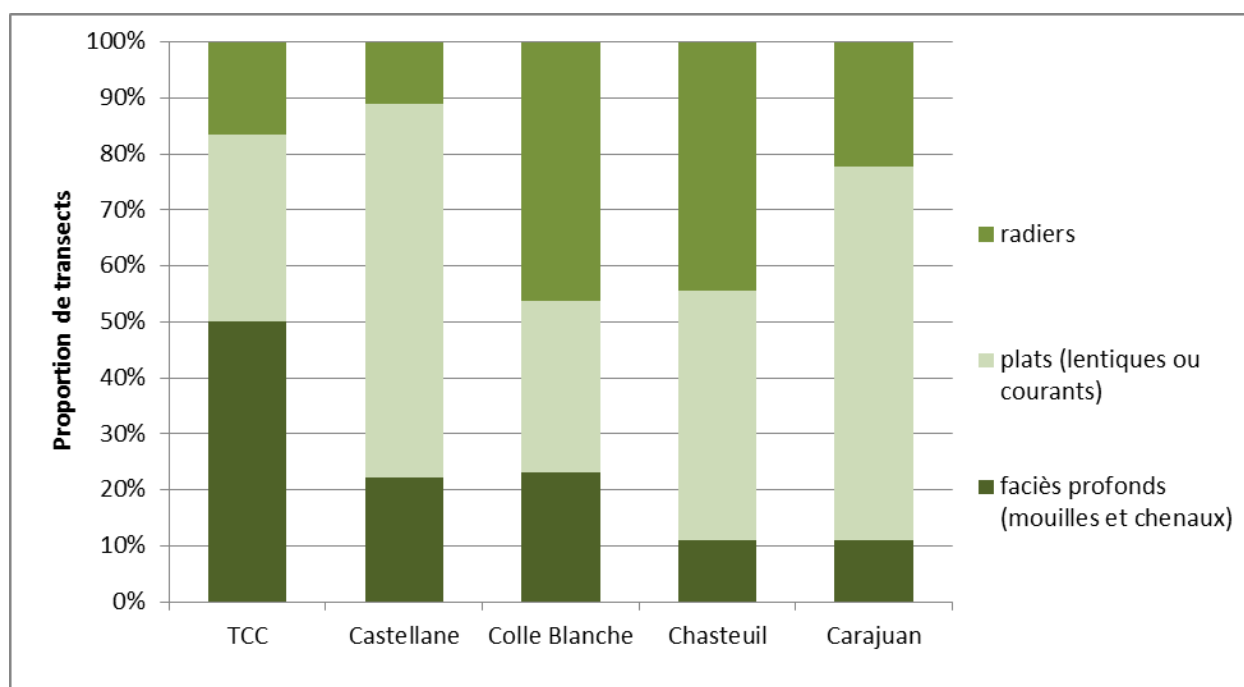


Figure 14. Distribution des faciès échantillonnés lors des levés sur transects

La comparaison globale des 5 tronçons alluviaux du Moyen Verdon – tous types de faciès confondus (**figure 15**) – montre que :

- le TCC se distingue nettement des tronçons aval par une distribution granulométrique plus hétérogène et en moyenne plus fine ;
- les 4 tronçons aval présentent une granulométrie à peu près semblable, largement dominée par les pierres (fines et grossières) et les cailloux grossiers.

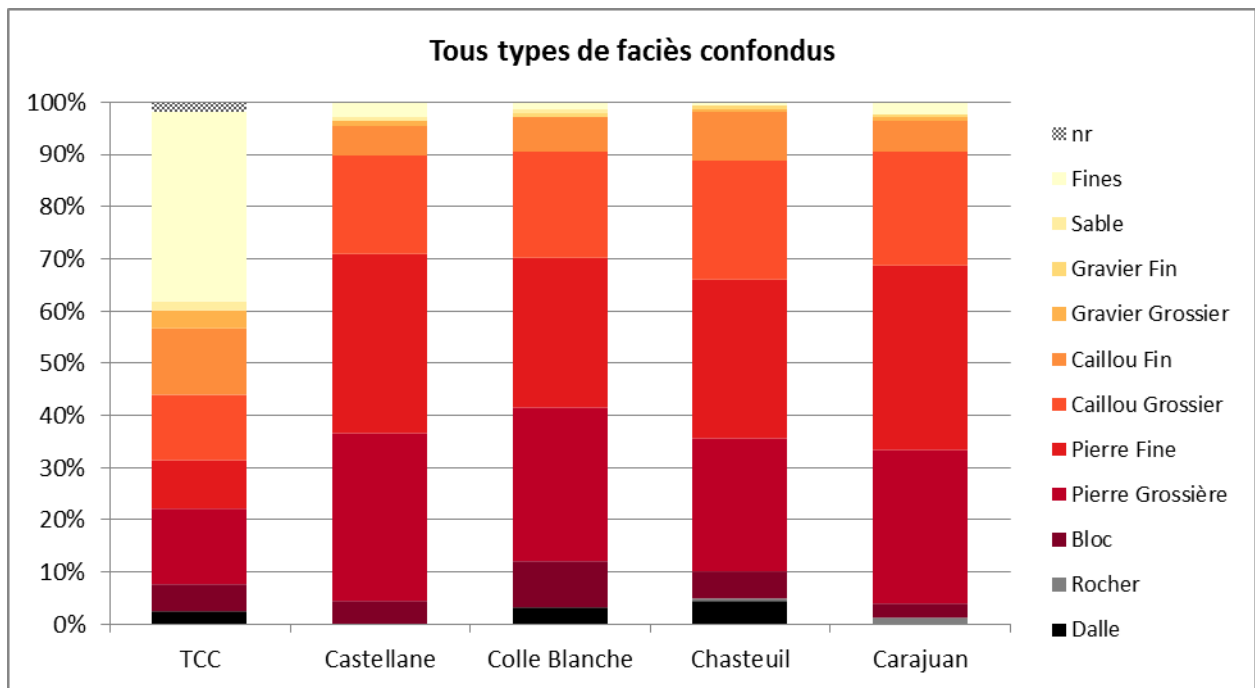


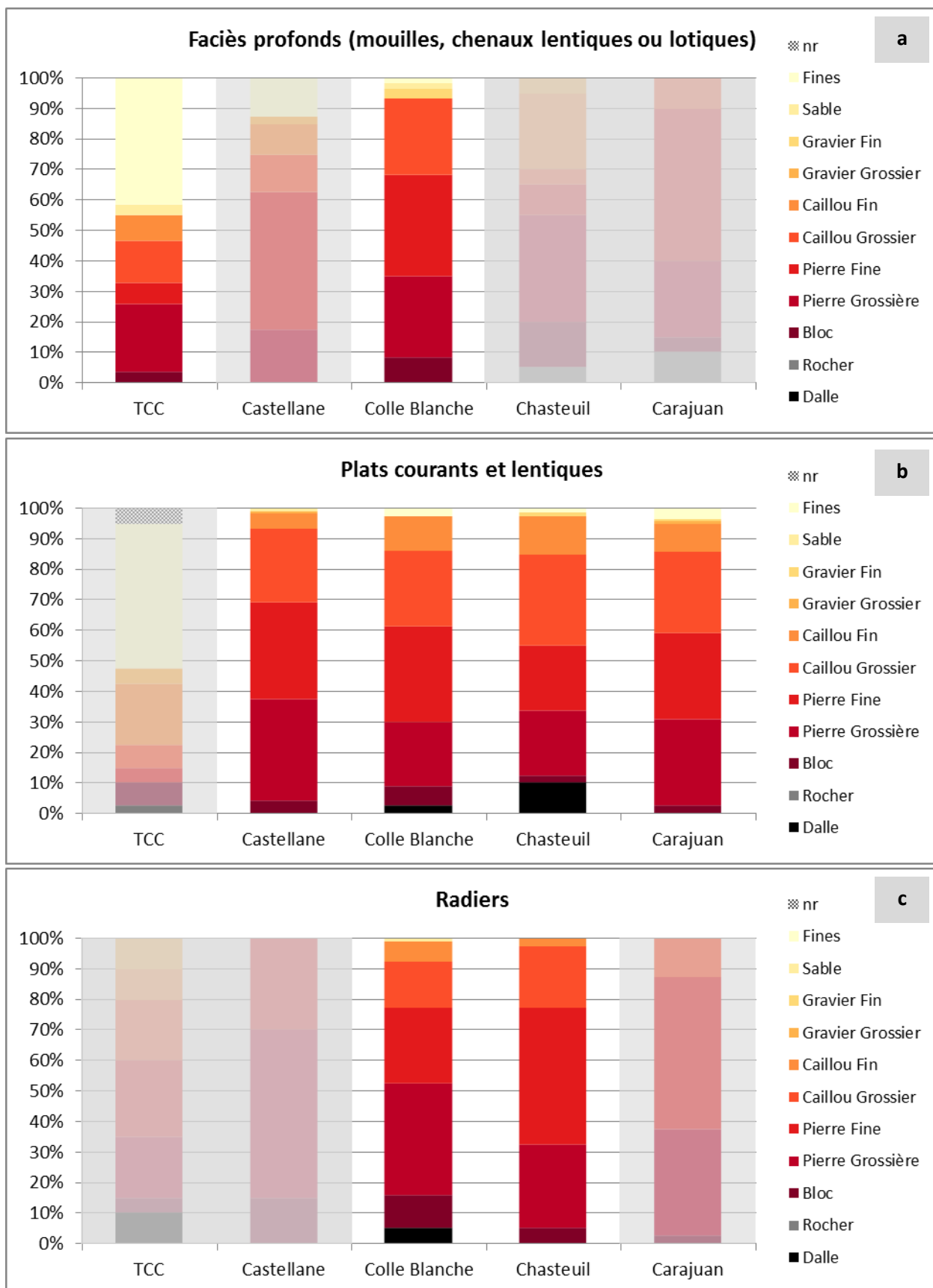
Figure 15. Distributions granulométriques dominantes du Moyen Verdon par tronçon

Ces distributions moyennes sont néanmoins influencées par les types de faciès échantillonnés sur chaque tronçon. Pour s'affranchir de ce biais, il est préférable de comparer les tronçons pour un même type de faciès, en se basant sur le type dominant ou majoritaire. Au regard des faciès échantillonnés sur chaque tronçon, nous procédons de la manière suivante :

- les faciès profonds (mouilles, chenaux lentiques et chenaux lotiques) servent de base pour comparer le TCC et le Moyen Verdon en aval de la restitution (trop peu de radiers ou de plats ont été échantillonnés dans le TCC) ;
- les plats (lentiques ou courants) servent de base pour comparer les 4 tronçons en aval de la restitution car il s'agit du type de faciès le plus fréquent ;
- les radiers peuvent également être comparés sur les tronçons de Colle Blanche et Chasteuil.

On constate alors que la proportion d'alluvions fines est largement plus élevée dans les faciès profonds du TCC que dans ceux des tronçons aval (figure 16a). En effet, les fonds du TCC sont fréquemment recouverts par des dépôts limoneux voire argilo-limoneux en aval du ravin de Destourbes, d'où ils proviennent vraisemblablement, et que l'on ne retrouve quasiment pas en aval de la restitution. Ces dépôts sont largement favorisés par les 2 seuils (seuil des Listes et seuil EDF) en amont desquels les fonds sont presque exclusivement fins. Précisons que la proportion de fines dans le TCC reste supérieure à celle des autres tronçons même en dehors des retenues des seuils, les dépôts fins étant fréquents quel que soit le type de faciès considéré en aval du ravin de Destourbes.

Trois fractions granulométriques dominent largement les faciès de type plats des 4 tronçons alluviaux aval : les pierres grossières, les pierres fines et les cailloux grossiers (figure 16b). Mais les fonds sont un peu plus hétérogènes dans les 3 tronçons aval où ces 3 fractions représentent 73 à 83% des fractions dominantes alors qu'elles atteignent 89% à Castellane. Il y a notamment davantage de cailloux fins (9 à 13% contre 5% à Castellane). Il y a également plus de substrats très grossiers tels que les dalles (affleure-



-ments rocheux), rochers et blocs mais cela est cohérent avec le contexte morphostructural, c'est-à-dire la proximité des versants rocheux en aval de Castellane.

Enfin, les radiers sont nettement plus grossiers à Colle Blanche qu'à Chasteuil (**figure 16c**).

En définitive, le TCC de Chaudanne se distingue singulièrement des autres tronçons par sa proportion élevée d'alluvions fines (vase et limons). Les fonds des tronçons en aval de la restitution sont à peu près semblables et dominés par les pierres et les cailloux grossiers. On constate néanmoins une légère diminution de la taille moyenne des fractions dominantes à mesure que l'on s'éloigne de Castellane, qui se traduit par une diversification des substrats. Ce gradient amont-aval est ténu mais bien réel. Il témoigne d'une dégradation de la composition des substrats dans la traversée de Castellane et, dans une moindre mesure, jusqu'au pont de Taloire.

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 les sections suivantes les éléments les plus marquants. Il s'agit d'informations qualitatives complémentaires aux précédentes analyses car elles témoignent également du fonctionnement hydromorphologique du Moyen 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

a) Colmatage et couverture algale

Les fonds du TCC de Chaudanne présentent un important degré de colmatage. Dans sa moitié amont, il s'agit d'un colmatage d'origine chimique et biologique, engendré par le développement à la surface des particules immergées à de faibles profondeurs de périphyton (biofilm constitué d'un mélange d'algues et de divers micro-organismes) consolidé par des concrétions calcaires (précipitation du calcaire initialement dissous dans l'eau ; **figure 17**). Dans sa moitié aval, il s'agit d'un colmatage minéral

engendré par les alluvions fines (limons et argiles) provenant vraisemblablement du ravin de Destourbes. Ces particules fines se déposent dans les zones à faible vitesse d'écoulement, c'est-à-dire dans les retenues des seuils et en bordure du lit mouillé (figure 18).

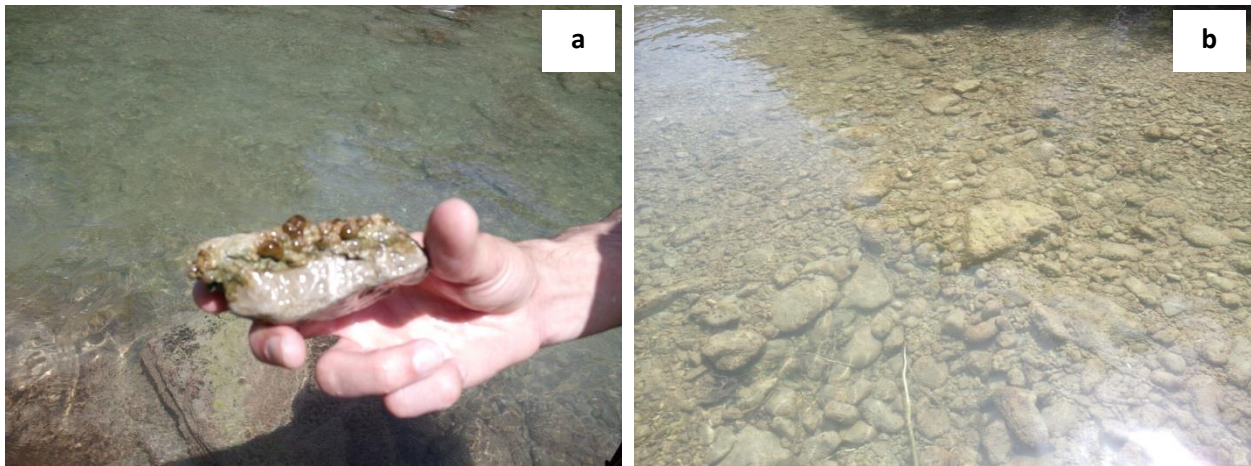


Figure 17. Concrétions biochimiques (a) et périphyton (b) dans le TCC de Chaudanne



Figure 18. Dépôts fins dans la retenue du seuil des Listes (a) et 250m en aval de ce seuil (b)



Figure 19. Importante couverture algale en aval de la STEP de Castellane

Le degré de colmatage du lit est en général assez faible en aval de la restitution mais la couverture algale augmente brutalement au droit de la STEP de Castellane (**figure 19**). Précisons néanmoins que cette dernière était en travaux lors de notre 1^{ère} campagne de terrain (juin 2019).

b) Diversité des substrats et des faciès d'écoulement

Dans le TCC de Chaudanne, les substrats sont assez hétérogènes mais ils sont colmatés.

En aval de la restitution, nous avons constaté une amélioration progressive de la qualité et de la diversité des substrats : les fonds sont très grossiers à proximité immédiate du seuil EDF et au droit du centre de Castellane ; puis la part des fractions granulométriques moyennes (cailloux et graviers) augmente petit à petit vers l'aval, ce qui se traduit à la fois par une plus grande hétérogénéité des matériaux présents à la surface du lit et par une diminution de leur taille moyenne.

La sinuosité du tracé en plan – nettement plus prononcée en aval – favorise cette amélioration. Les tronçons aval s'organisent fréquemment en séquences radier-mouille (mouille de concavité) rapprochées, adossées à des bancs de convexité (**figures 21c et 21d**). Cela génère une grande diversité des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement, de l'amont vers l'aval comme sur la largeur du lit. Dans les méandres, les particules grossières se concentrent en intrados du fait des fortes vitesses d'écoulement alors qu'en extrados, les vitesses plus faibles favorisent le dépôt de plus petites particules (**figure 21d**). Il se crée ainsi un tri granulométrique latéral favorable à la diversité des substrats. Nous avons notamment observé de fréquentes petites parcelles caillouto-graveleuses, en particulier sur les marges du lit mineur et dans certains plats courants (**figure 21f**). Ce type de substrat est beaucoup plus rare dans la traversée de Castellane où le tracé en plan de la rivière est rectiligne. Les hauteurs d'eau, les vitesses d'écoulement et les substrats y sont effectivement plus homogènes.

Outre les substrats, c'est donc plus globalement la qualité et de la diversité des habitats aquatiques du Moyen Verdon qui s'améliorent de l'amont vers l'aval.

c) Stabilité des ouvrages riverains

Sur le linéaire parcouru, nous n'avons identifié qu'un seul ouvrage déstabilisé par affouillement, au droit du camping « Domaine du Verdon » (**figure 20**). L'effondrement de cet ouvrage résulte bien d'une incision du lit mais rien n'indique qu'il s'agisse d'une incision récente.



Figure 20. Protection de berge effondrée par affouillement au droit du camping de la Salaou (en rive droite au lieu-dit la Colle)

A proximité, deux autres enrochements sont en mauvais état : en amont proche de la station d'épuration de Castellane et dans le 1^{er} méandre prononcé en aval de la Colle. Ces ouvrages sont implantés sur des berges en extradoss particulièrement exposées aux écoulements. Leur déstructuration résulte vraisemblablement d'une érosion latérale et non pas d'une érosion verticale (incision) du lit.



Figure 21. Exemples de faciès (a, b, c, d) et de substrats (e, f) en aval de la Colle

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 du lit. Compte tenu de la pente moyenne du Moyen Verdon (6 m/km) et de la taille médiane des particules à la surface de son lit ($d_{50} = 125$ mm), nous estimons que la majeure partie de ces particules sont mises en mouvement pour un débit de l'ordre de $80 \text{ m}^3/\text{s}$.

Il s'agit d'une valeur intermédiaire entre 2 précédentes estimations :

- Partant de l'hypothèse que le lit du Moyen Verdon était stable lors des fréquentes éclusées de l'usine de Chaudanne dont la capacité maximale est de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, auxquels s'ajoutent le débit réservé et le débit des affluents, Sogreah et al. (2002) estimait que le débit de mise en mouvement des particules devait être de l'ordre de $50 \text{ m}^3/\text{s}$.
- MRE (2019) suggérait que les débits morphogènes du Moyen Verdon devaient être supérieurs à $200 \text{ m}^3/\text{s}$ dans la mesure où la crue de novembre 2016 ($211 \text{ m}^3/\text{s}$) n'a pas engendré de modifications profondes sur leurs stations d'études.

Il s'agit surtout d'une valeur approximative 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 pour le Moyen Verdon :

- Une faible proportion de particules est transportée lors des éclusées de l'usine de Chaudanne comme l'ont montré les mesures de terrain réalisées dans le cadre d'une étude de l'impact écologique des éclusées (Véodis 2021 ; débit maximum estimé à $43 \text{ m}^3/\text{s}$ sans tenir compte du débit des affluents) ;
- Il faut probablement atteindre $100 \text{ m}^3/\text{s}$ pour obtenir un transport solide réellement significatif, capable de modifier la morphologie du lit sur le long terme, mais dont l'effet de n'est pas nécessairement visible après chaque crue de cette intensité.
- Et il faut probablement dépasser $200 \text{ m}^3/\text{s}$ pour que ce transport solide engendre des évolutions morphologiques remarquables à court terme, c'est-à-dire en une seule crue (migration latérale, remaniement des bancs, rajeunissement de la bande active).

Il n'y a donc pas de transport solide significatif en dehors des déversements du barrage de Chaudanne, sinon lors des crues majeures des affluents (comme le ravin de Destourbes et le ruisseau du Pesquier) dont nous ignorons les fréquences et intensités.

D'après l'historique des déversements du barrage de Chaudanne entre 1971 et 2019 ([tableau 4](#)), un tiers d'entre eux sont supérieurs à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ et ces derniers surviennent en moyenne tous les 8 ans. La fréquence des crues morphogènes dans le TCC est donc de l'ordre de 8 ans. En aval de la restitution, des déversements d'intensité plus faible peuvent générer un transport solide significatif s'ils se cumulent aux éclusées de l'usine de Chaudanne. Dans la mesure où $\frac{1}{4}$ des déversements recensés sont supérieurs à $60 \text{ m}^3/\text{s}$ et que les éclusées peuvent atteindre $40 \text{ m}^3/\text{s}$, la fréquence des crues morphogènes dans les

tronçons aval est donc comprise entre 4 et 8 ans. Ces fréquences de crue morphogène sont des ordres de grandeur mais ils suffisent pour considérer que les crues morphogènes sont relativement rares, mais qu'il y aura encore du transport solide à l'avenir.

date	débit maximum déversé (m ³ /s)	sources
1971	60	Sogreah et al. (2002)
1977	75	Sogreah et al. (2002)
1979	217	Sogreah et al. (2002)
1981	50	Sogreah et al. (2002)
1983	47	Sogreah et al. (2002)
1984	110	Sogreah et al. (2002)
1987	66	Sogreah et al. (2002)
1991	90	Sogreah et al. (2002)
octobre 1993	220-300	Sogreah et al. (2002), PPRN Castellane (2005)
janvier 1994	243-400	Sogreah et al. (2002), PPRN Castellane (2005)
novembre 1994	374-590	Sogreah et al. (2002), PPRN Castellane (2005)
1996	45	Sogreah et al. (2002)
novembre 2002	295	SCP et MRE (2016)
décembre 2003	20	SCP et MRE (2016)
juin 2008	35-75	MRE (2019) ; SCP et MRE (2016)
juin 2010	45	MRE (2019)
novembre 2011	70	MRE (2019)
mai 2013	80	MRE (2019)
novembre 2016	211	MRE (2019)

Tableau 4. Historique des déversements du barrage de Chaudanne entre 1971 et 2019

4.3.2- Charriage et capacité de transport

Une première estimation du transport solide du Verdon a été réalisée par 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 (valeur citée par Sogreah et al. 2002 mais probablement estimée 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, rendent compte du Bas Verdon avant la réalisation des aménagements hydroélectriques amont et du Haut Verdon à la fin du 20^{ème} siècle. Elles fournissent donc une bonne estimation de ce qu'était le transport solide du Moyen Verdon avant la mise en service des barrages de Chaudanne et Castillon, et de ce qu'il serait encore en leur absence.

Les capacités de transport du Moyen 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 dans le TCC de Chaudanne où les crues morphogènes sont très rares (seulement 3 événements significatifs en 28 ans selon leurs estimations pourtant basées sur un débit critique de 50 m³/s) ;
- la capacité de transport annuelle moyenne serait de l'ordre de 5 000 m³/an entre le seuil EDF et le pont de Taloire avec, selon les pentes locales, un minimum de 2 000 m³/an dans la traversée de Castellane et un maximum de 9 000 m³/an en aval de la barricade.
- la capacité de transport entre le seuil EDF et le pont de Taloire serait l'ordre de 10 000 m³ lors d'une crue décennale et de 50 000 m³ lors d'une crue centennale.

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 Moyen Verdon. Les évaluations réalisées par Sogreah nous semblent un peu surestimées compte tenu de l'influence des crues rares et intenses comme celle de novembre 1994 dans leur bilan (dont la capacité de transport est forte mais le transport réel peut être limité par manque de disponibilité des matériaux). Elles constituent néanmoins un ordre de grandeur raisonnable.

4.4- Sources sédimentaires et stocks alluvionnaires

On distingue 3 types de sources sédimentaires :

- la fourniture primaire, directement issue de l'érosion des versants ;
- la fourniture secondaire, qui correspond aux apports solides des affluents ;
- la fourniture interne, issue de l'érosion du lit et des berges.

La partie amont du Moyen Verdon est peu connectée aux sources sédimentaires primaires. C'est davantage le cas dans les tronçons aval qui longent régulièrement des versants rocheux abrupts capables de fournir des matériaux de toute taille par éboulements, glissements de terrain, ravinement et autres mouvements de masses (**figure 22**). Ces derniers sont peu détectables sur le terrain mais ne doivent pas être négligés au regard de la morphologie du fond de vallée en aval de la traversée de Castellane et plus particulièrement en aval de la Porte-Saint-Jean.



Figure 22. Versants rocheux en contact direct du Verdon aux environs du tronçon « Chasteuil »

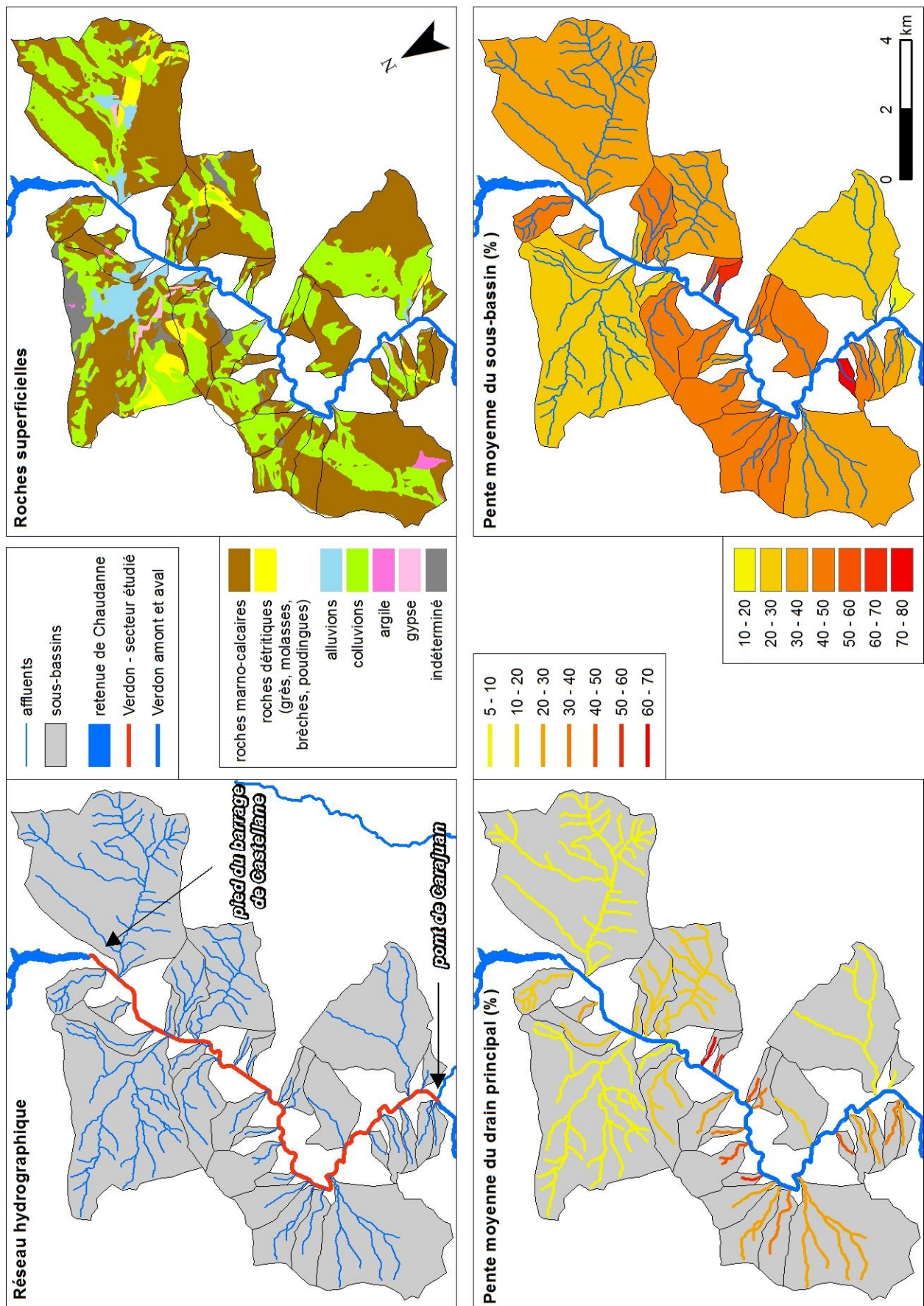


Figure 23. Principales caractéristiques morphologiques et géologiques des affluents du Moyen Verdon (hors Jabron)

Nous avons caractérisé les principaux affluents du Moyen Verdon (ceux qui sont pris en compte dans la BD Carthage) au regard de leur superficie de bassin versant, de la nature des roches superficielles constituant ces sous-bassins, de la pente moyenne du cours d'eau et de la pente moyenne des versants (**figure 23**). Nous avons également tenu compte de leur couverture végétale. Cette approche théorique ne permet pas d'évaluer leur fourniture sédimentaire en valeur absolue (i.e. en m³/an) mais de les comparer pour mettre en évidence les principaux affluents contributeurs. Le résultat suggère que c'est en aval du lieu-dit la Colle (limite entre les tronçons « Castellane » et « Colle Blanche ») que se situent les principales sources sédimentaires secondaires. Les affluents et leurs bassins versants présentent en effet des pentes plus fortes dans la partie aval du Moyen Verdon.

Nous avons ensuite examiné les confluences et les parties terminales de la plupart de ces affluents sur le terrain. Globalement, leurs apports solides semblent faibles et les affluents que l'on pouvait considérer comme les principaux contributeurs potentiels du Verdon sur la base de notre analyse cartographique ne se sont pas avérés particulièrement intéressants après coup. C'est par exemple le cas du ravin de Patarasse (en bas à gauche de chaque carte de la **figure 23**) qui présentait pourtant à la fois des pentes soutenues, une superficie de bassin versant significative et un couvert végétal limité. Les seuls affluents ayant manifestement déposé des alluvions grossières dans le lit du Verdon en quantité suffisante pour former un petit cône de déjection au cours des derniers mois ou dernières années sont :

- une petite ravine (sans nom et exclue de la BD Carthage) drainant les éboulis des Cadières de Brandis en aval de la Porte-Saint-Jean. Le cône de déjection de cette ravine n'est pas très grand mais significatif par rapport à la très petite taille de son bassin versant (**figure 24a**). Et il contribue visiblement à recharger quelque peu le lit du Verdon en matériaux grossiers non émoussés (**figure 24b**). Outre sa pente très forte, notre analyse cartographique n'a pas mis en évidence d'autres facteurs expliquant pourquoi cette ravine fournirait davantage de matériaux que les autres.
- le torrent de la Jabie, qui est le 1^{er} affluent de rive droite du TCC de Chaudanne. Le cône de déjection observé à sa confluence (**figure 25**) semble donc moins témoigner de l'intensité de ses apports solides que de la rareté des écoulements morphogènes dans le TCC.

Dans une moindre mesure, le ruisseau du Pesquier semble également apporter une charge solide non négligeable au Verdon dans la traversée de Castellane comme le suggèrent les dépôts à sa confluence (**figure 26**) qui forment un point haut sur l'actuel profil en long. On sait par ailleurs que le ravin de Destourbes apporte principalement des matériaux fins à cause de sa faible pente à son extrémité aval (Sogreah et al. 2002, Biotech 2013, SCP et MRE 2016).

Ces 2 derniers affluents drainent les plus grands sous-bassins représentés sur la **figure 23** mais le plus important affluent du secteur d'étude est clairement le Jabron, non représenté sur la **figure 23**, qui augmente d'environ 16% la superficie de drainage du Verdon à leur confluence. Le Jabron peut donc être considéré comme un affluent majeur et il est certainement le principal pourvoyeur en charge de fond du Moyen Verdon en termes de volumes. Mais sa confluence ne se situe qu'à quelques dizaines de mètres en amont du pont de Carajuan, si bien que seule l'extrémité aval de notre secteur d'étude peut en bénéficier.



Figure 24. Apports solides d'une petite ravine de rive droite en aval de la Porte-Saint-Jean : a) cône de déjection formée par la ravine : b) fonds du Verdon constitués d'alluvions non émoussées au droit de cette ravine



Figure 25. Cône de déjection du torrent de la Jabie



Figure 26. Confluence du ruisseau du Pesquier

Enfin, il n'y a pas d'importants stocks sédimentaires remobilisables dans les tronçons amont. Il y a bien quelques bancs végétalisés dont certains semblent perchés (probablement d'anciens bancs de tressage perchés suite à l'incision du lit vif) mais ces derniers ne sont ni très hauts ni très vastes en superficie si bien qu'ils ne représentent pas des volumes importants. Les érosions de berges sont d'ailleurs rares. Les principaux stocks sédimentaires du Moyen Verdon se situent dans les 3 tronçons alluviaux aval : Colle Blanche, Chasteuil et Carajuan. C'est dans ces 3 tronçons que le Verdon est libre de divaguer, de déposer ses alluvions sous formes de bancs puis de les remobiliser, régulant ainsi son transport solide.



Figure 27. Exemples d'érosions de berge du Moyen Verdon : a) érosion de la rive gauche en amont du ruisseau du Pesquier, dans la traversée centre de Castellane ; b), érosion de la rive droite en aval du camping de la Salaou ; c) érosion de la rive droite en amont du Jabron

En fin de compte, il n'y a pas de source sédimentaire massive le long du secteur d'étude mais de nombreuses petites sources génèrent des apports solides diffus : les petits affluents tels que les ravines drainant les falaises des Cadières de Brandis ou les apports directs depuis les versants adjacents. On constate ainsi une augmentation de la part des particules peu ou pas émoussées, provenant de sources locales en aval de la Porte-Saint-Jean (les particules s'émoussent à mesure qu'elles sont transportées loin de leur source de production). Ces sources sédimentaires sont très faibles par rapport aux volumes que charriait autrefois le Verdon mais elles ne sont plus négligeables aujourd'hui : elles contribuent à renouveler les substrats et à stabiliser le profil en long des tronçons aval.

Le Jabron contribue très peu à recharger le lit du Moyen Verdon dans notre secteur d'étude mais il s'agit probablement d'une source sédimentaire significative pour les gorges en aval.

5- Synthèse et diagnostic

5.1- 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 28**). 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.

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 Verdon :

- aspect volumétrique : évolutions verticales des fonds (§ 5.2) ;
- aspect granulométrique : évolutions de la constitution des fonds (§ 5.3).

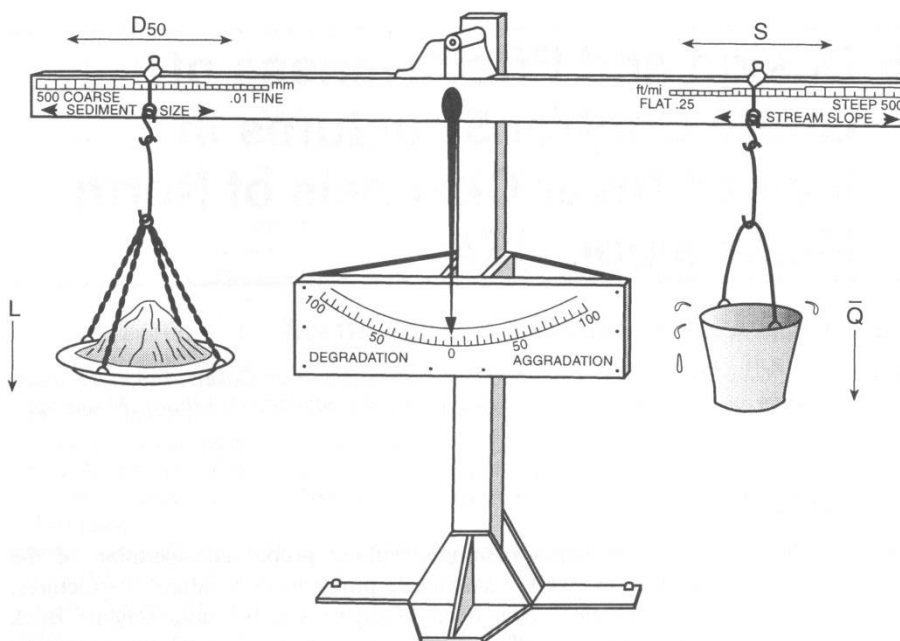


Figure 28. Balance de Lane (1955, d'après Watson et Biedenharn 1999)

5.2- Evolutions verticales des fonds du Moyen Verdon

La comparaison diachronique des profils en long montre que le Moyen Verdon s'est fortement incisé au cours du 20^{ème} siècle. L'incision a été particulièrement intense sur les 5 premiers kilomètres en aval de la restitution de l'usine hydroélectrique de Chaudanne (jusqu'aux environs de Vilars Brandis), plus modérée sur les 8 kilomètres suivants, et finalement négligeable aux environs immédiats du pont de Carajuan et de la confluence avec le Jabron. Ce gradient amont-aval est classique en aval des grands barrages qui entraînent une érosion du lit progressive, c'est-à-dire qui se propage de l'amont vers l'aval. Ce gradient est aussi conforme avec les théories et modèles empiriques des cours d'eau sujets à un déficit sédimentaire : en s'enfonçant davantage en amont qu'en aval, la pente du lit diminue, ce qui favorise le rétablissement d'un nouvel équilibre. De plus, l'incision a dû être ralentie puis bloquée par des affleurements rocheux ou amas de gros blocs dépassant la compétence de transport du cours d'eau dans les tronçons aval, et en particulier au niveau de la Porte Saint-Jean, de la clue de Chasteuil et celle de Carajuan. Enfin, les apports solides diffus provenant des affluents voire des versants rocheux directement connectés à la rivière contribuent dans une certaine mesure à recharger et à stabiliser le lit de ces tronçons aval.

Le TCC a été modérément affecté grâce au seuil EDF implanté à son extrémité aval et aux moindres crues. Mais le plus ancien profil en long dont on dispose sur ce tronçon est plus récent (1952 soit à peu près l'année de mise en service du barrage de Chaudanne et quelques années après celle du barrage de Castillon).

L'incision se serait arrêtée au cours des années 1990 dans la traversée de Castellane, puis au cours des années 2000 sur le tronçon de Colle Blanche. C'est d'ailleurs au droit de l'ancienne gravière de Colle Blanche, exploitée jusqu'en 1994, que l'on constate la plus grande différence avec le profil en long de 1907. Nous ne disposons d'aucune donnée pour analyser les tendances « récentes » au-delà du hameau de Brans (500 m en amont du pont de Taloire) mais les tronçons aval sont les moins vulnérables.

Le lit du Verdon paraît donc stabilisé. Et il est effectivement établi qu'il n'a pas évolué en amont du pont de Taloire entre 2010 et 2021 : les fonds et les lignes d'eau ont fluctué localement mais leurs altitudes moyennes en 2010, 2016 et 2021 sont semblables.

Sur la base d'un modèle à fond mobile, Sogreah et al. (2002) avait pourtant prédit que l'incision se poursuivrait dans la traversée de Castellane à moyen terme (de l'ordre de 50 cm jusqu'en 2030 environ) et qu'elle menacerait la stabilité de tous les ouvrages riverains (digues en particulier) à long terme (280 ans). Nous savons désormais que ce modèle s'est trompé pour ce qui est des évolutions à moyen terme. Mais il n'est pas certain qu'il se soit trompé sur la tendance à long terme car il prenait en compte tous les déversements du barrage de Chaudanne survenus entre 1971 et 1998 qui comportaient plusieurs crues significatives (**figure 29**). Or les événements hydrologiques ont été peu intenses entre 2010 et 2021 : il n'y a eu que 3 déversements dont 1 seul réellement significatif (211 m³/s en novembre 2016). On peut donc douter de la capacité du lit à résister à des crues majeures comme celle de novembre 1994 (autour de 700 m³/s).

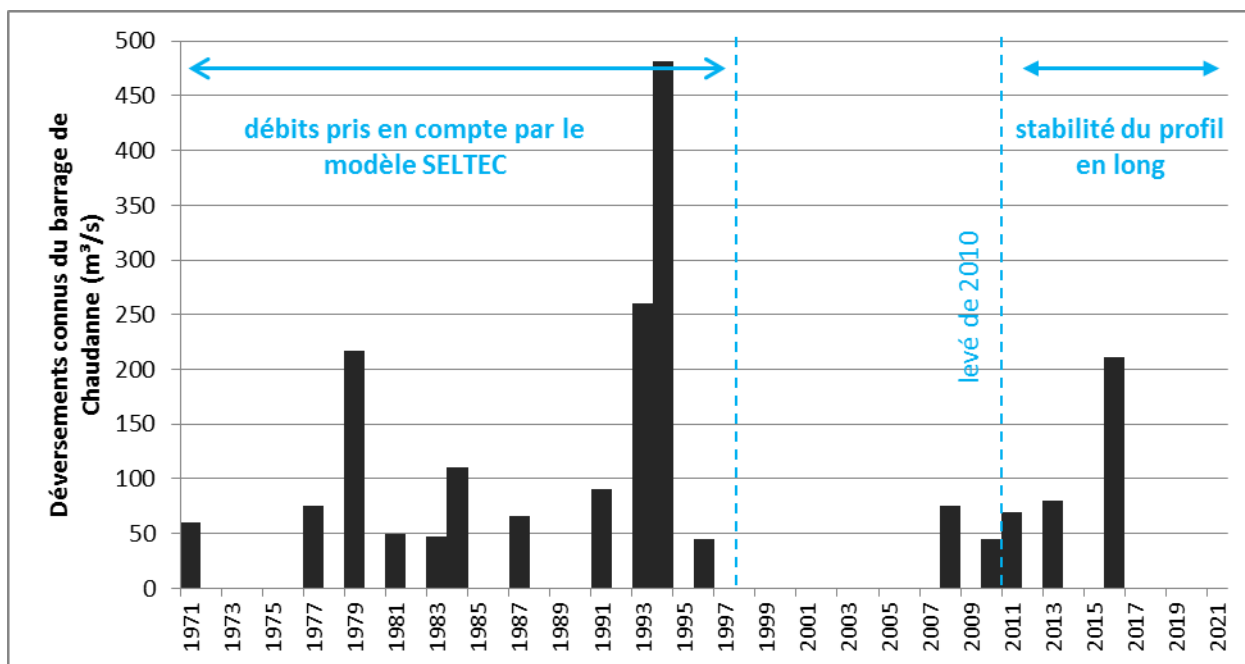


Figure 29. Débit de pointe des déversements du barrage de Chaudanne depuis 1971

5.3- Evolutions de la distribution granulométrique des fonds du Moyen Verdon

Contrairement aux profils en long, nous ne sommes pas en mesure de comparer la distribution granulométrique des fonds actuelle avec une référence historique. Mais l'évolution longitudinale 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 Moyen Verdon.

Les fonds du TCC se distinguent sensiblement des tronçons aval. Ils sont à la fois plus fins et plus hétérogènes en taille du fait de la proportion importante d'alluvions fines (sables, limons, argiles) mais aussi de particules de taille moyenne (graviers et cailloux). Ils ont donc été davantage préservés du déficit sédimentaire que les fonds en aval de la restitution, ce qui s'explique principalement par la rareté des crues morphogènes. En revanche, ils sont très colmatés. Il s'agit d'un colmatage biochimique en amont du ravin de Destourbes (biofilm consolidé par des concrétions calcaires) puis d'un colmatage minéral à l'aval (dépôts de sédiments fins provenant de cet affluent).

En aval de la restitution, la qualité et la diversité des matériaux constituant les fonds du Moyen Verdon s'améliorent progressivement de l'amont vers l'aval : les particules de taille moyenne telles que les graviers et cailloux (2 à 64 mm de diamètre) sont rares en amont, en particulier dans la traversée de Castellane, et deviennent un peu plus fréquentes en aval. C'est surtout vrai entre le seuil EDF et la Porte-Saint-Jean. Il n'y a plus de différences significatives en aval, ce qui ne signifie pas pour autant que les fonds de ces tronçons aval ne sont pas dégradés par rapport à une référence historique. Mais les apports solides diffus que cumulent petit à petit le Moyen Verdon contribuent à les renouveler et à les préserver davantage que les tronçons amont.

L'état de dégradation global des substrats et son gradient amont-aval avaient déjà été établis par d'autres (Sogreah et al. 2002 ; Biotec 2013 ; MRE 2019). Biotec (2013) considérait notamment que les

études récentes de la qualité des eaux et des habitats aquatiques soulignaient « *un déficit sédimentaire croissant en défaveur des fractions moyennes de la granulométrie (10-100 mm) souvent plébiscitées pour le frai de la truite et limitant [...] les capacités auto-épuratrices [...] du cours d'eau* ».

Au-delà de la granulométrie des fonds, ce sont en fait toutes les composantes physiques des habitats aquatiques qui s'améliorent schématiquement de l'amont vers l'aval (diversité générale des macro-formes fluviales associée à la présence de bancs et de chenaux multiples, faciès d'écoulement, colmatage et couverture algale). Cela s'explique par les différents éléments indiqués ci-dessus et dans la section précédente (apports solides diffus, inertie de l'érosion progressive, présence de points durs stabilisant le lit des tronçons aval ; § 5.2) auxquels s'ajoute l'influence des ouvrages latéraux : l'endiguement du lit dans la traversée de Castellane favorise l'uniformité des habitats alors que le tracé en plan sinueux en aval de la Colle favorise la diversité des écoulements et des substrats. Il y a en fait de nombreuses protections de berge entre Chasteuil et Carajuan mais celles-ci sont ponctuelles et très proches des versants rocheux, donc peu contraignantes.

5.4- Rétraction des bandes actives

Outre les évolutions verticales du lit et la dégradation des substrats dont il était question dans les 2 sections précédentes, le déficit sédimentaire favorise également la rétraction des bandes actives. En effet, l'encaissement vertical du lit, le moindre transport solide et le pavage des fonds réduisent la capacité des crues à rajeunir les bancs alluviaux qui se végétalisent.

Mais ce processus est surtout favorisé par la raréfaction des crues suite à la mise en service des barrages hydroélectriques amont. La rétraction des bandes actives semble néanmoins avoir débuté avant leur mise en service sous l'influence d'autres facteurs comme cela a été démontré dans d'autres bassins versants (fin du petit âge glaciaire, stabilisation des versants par végétalisation, modifications des pratiques culturales et d'entretien de la ripisylve).

5.5- Bilan et hiérarchisation du déficit sédimentaire

Le déficit sédimentaire du Moyen Verdon a donc entraîné des ajustements morphologiques conséquents 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.

Schématiquement, l'intensité du déficit acquis durant cette période de près d'un siècle peut être hiérarchisée comme suit (figure 30) :

- maximal en aval du seuil EDF et dans la traversée de Castellane ;
- modéré dans le TCC de Chaudanne (au regard des faibles débits et de l'influence du seuil EDF) et aux environs du pont de Taloire ;
- minimal dans les tronçons aval.

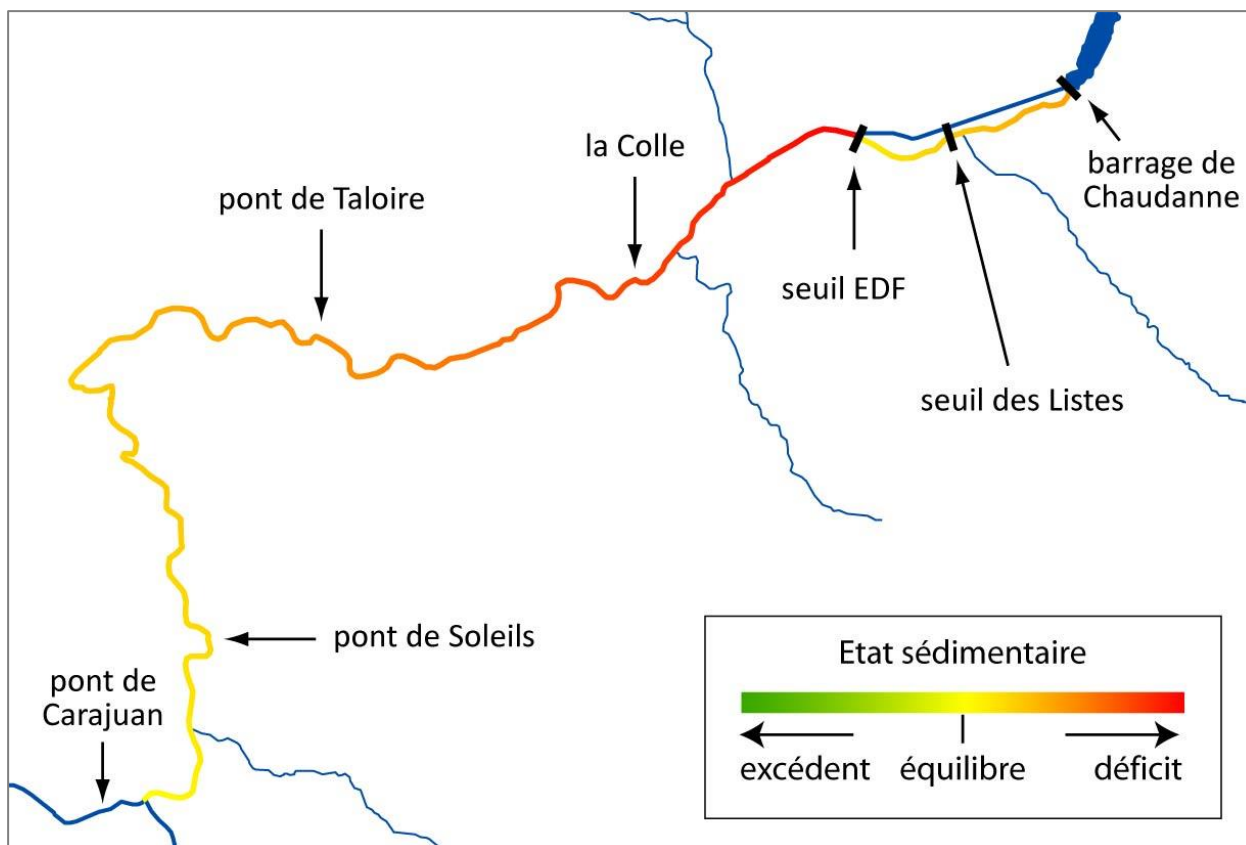


Figure 30. Carte synthétique du déficit sédimentaire du Moyen Verdon

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.

Peugot 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.

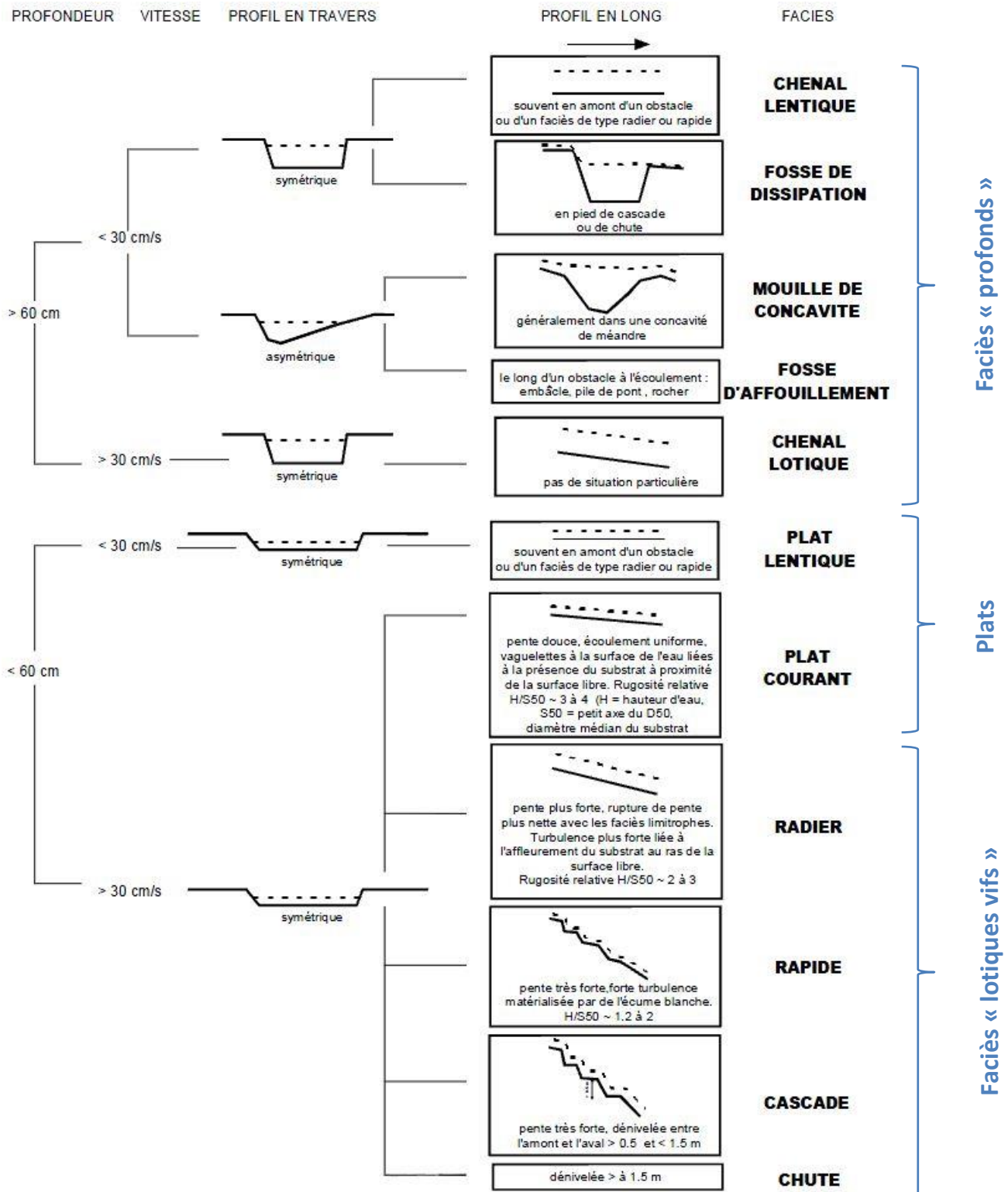
Véodis-3D, 2021. Mesures physiques et biologiques en phase d'écluse sur le Verdon. Volet mesures physiques – année 2021. Rapport d'intervention.

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

