



SYNDICAT D'ASSAINISSEMENT DU CANTON DE L'OISANS ET DE LA BASSE ROMANCHE

Rapport
Phase 1

PLAN DE GESTION DU TRANSPORT SOLIDE DU BASSIN VERSANT AMONT DE LA ROMANCHE Phase 1 : État des lieux – Diagnostic



ARI-15-123
HYDRETUDES
Mars 2018

Émetteur

HYDRETTUES

815 route de champ Farçon
74 370 ARGONAY
Tél. : 04.50.27.17.26
Fax : 04.50.27.25.64



Agréé digues et barrages

24 novembre 2012 JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Texte 25 sur 119

Décrets, arrêtés, circulaires

TEXTES GÉNÉRAUX

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE

Arrêté du 15 novembre 2012 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques

NOR : DEP1230754A

IV. – Dignes et petits barrages - études et diagnostics

| NUMÉRO D'AGREMENT | DÉSIGNATION DE L'ENTREPRISE OU DE L'ORGANISME AGREÉ : dignes et barrages - études et diagnostics | AGRÉÉ JUSQU'AU |
|-------------------|---|----------------|
| 1-d | HYDRETTUES | 10 juin 2017 |

V. – Dignes et petits barrages - études, diagnostics et suivi des travaux

| NUMÉRO D'AGREMENT | DÉSIGNATION DE L'ENTREPRISE OU DE L'ORGANISME AGREÉ : dignes et petits barrages - études, diagnostics et suivi des travaux | AGRÉÉ JUSQU'AU |
|-------------------|---|----------------|
| 1-d | HYDRETTUES | 10 juin 2017 |

Réf. affaire : ARI-15-123

Titre : Plan de gestion du transport solide du bassin versant amont de la Romanche

| Indice | Date | Phase | Statut | Établi par | Vérifié par | Approuvé par |
|--------|------------|---|--|------------|-------------|--------------|
| 01 | 14/04/2017 | Première diffusion Pièces jointes : Annexes + Atlas carto. | <input checked="" type="checkbox"/> Provisoire <input type="checkbox"/> Définitif | CM-JMD | JMD | DC |
| 02 | 21/07/2017 | Prise en compte des remarques transmises par le SACO le 15/06/2017 Pièces jointes : Annexes + Atlas carto. | <input checked="" type="checkbox"/> Provisoire <input type="checkbox"/> Définitif | CM-JMD | JMD | DC |
| 03 | 23/02/2018 | Prise en compte des remarques complémentaires (laves torrentielles, MES) Pièces jointes : Annexes + Atlas carto. | <input checked="" type="checkbox"/> Provisoire <input type="checkbox"/> Définitif | JMD | JMD | DC |
| 04 | 30/03/2018 | Compléments concernant les MES | <input type="checkbox"/> Provisoire <input checked="" type="checkbox"/> Définitif | JMD | DC | DC |

Directeur de projet : Didier Clément

Chef de projet : Jean-Manuel Deleuze

Maître d'Ouvrage : Syndicat d'Assainissement du Canton de l'Oisans et de la Basse Romanche

Document protégé, propriété exclusive d'HYDRETTUES. Ne peut être utilisé ou communiqué à des tiers à des fins autres que l'objet de l'étude commandée

SOMMAIRE

| | | |
|-----|--|-----|
| 1 | Préambule | 15 |
| 1.1 | Contexte de la mission | 15 |
| 1.2 | Replacer les cours d'eau dans leur contexte dynamique | 15 |
| 1.3 | Périmètre d'étude et données utilisées | 16 |
| 1.4 | Une démarche scientifique | 17 |
| 2 | Rappel de quelques notions d'hydromorphologie | 18 |
| 2.1 | L'équilibre dynamique | 18 |
| 2.2 | Les modes de transport des matériaux..... | 19 |
| 2.3 | L'évolution granulométrique amont → aval, des lits à blocs aux lits à graviers | 20 |
| 2.4 | La trajectoire géomorphologique d'un cours d'eau | 22 |
| 2.5 | L'incision | 22 |
| 2.6 | Métamorphose fluviale et temporalité | 23 |
| 2.7 | Les tressages : un style fluvial particulier | 26 |
| 3 | Présentation du bassin versant « Haute-Romanche-Oisans » | 30 |
| 3.1 | Contexte géographique | 30 |
| 3.2 | Topographie..... | 31 |
| 3.3 | Occupation du sol | 31 |
| 3.4 | Contexte hydrologique | 33 |
| 3.5 | Contexte géologique | 34 |
| 3.6 | Contexte environnemental et enjeux écologiques..... | 39 |
| 4 | Sectorisation morphodynamique..... | 64 |
| 5 | Histoire géomorphologique du bassin versant | 66 |
| 5.1 | La déglaciation et la séquence paraglaciale | 67 |
| 5.2 | La séquence paraglaciale de la Romanche et du Vénéon..... | 72 |
| 6 | Héritage géomorphologique | 79 |
| 6.1 | Forçages climatiques..... | 79 |
| 6.2 | Modifications anthropiques | 80 |
| 6.3 | Analyse diachronique | 92 |
| 7 | Fonctionnement dynamique | 118 |
| 7.1 | État de la recharge sédimentaire | 118 |
| 7.2 | Capacité de charriage | 159 |
| 7.3 | Cinématique du transport solide | 181 |
| 8 | Évolution dynamique | 188 |
| 8.1 | Vers une métamorphose fluviale..... | 188 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 8.2 | Un <i>scenario</i> d'évolution très pénalisant pour Bourg d'Oisans..... | 189 |
| 8.3 | Préconisations d'amélioration de l'évolution dynamique..... | 190 |
| 9 | Suivi dynamique..... | 192 |
| 9.1 | Le suivi métrologique..... | 192 |
| 9.2 | Éléments du suivi dynamique..... | 193 |
| 9.3 | Une vision globale grâce au suivi dynamique..... | 193 |
| 9.4 | Focus sur le suivi de la plaine du Buclet..... | 195 |
| 10 | Glossaire..... | 199 |
| 11 | Références bibliographiques..... | 206 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Les trois zones fonctionnelles d'un cours d'eau (d'après Sear & Newson, 1993) | 18 |
| Figure 2 : Représentation du principe d'équilibre d'après Lane (1955) et Borland (1960) | 19 |
| Figure 3 : Schéma montrant les modes de transport solide | 20 |
| Figure 4 : Gradient morphologique des lits fluviaux | 21 |
| Figure 5 : Les trois composantes de la trajectoire géomorphologique d'un cours d'eau | 22 |
| Figure 6 : Réponse temporelle à une perturbation suivant l'impact sur le profil en long (Malavoi & Bravard, 2010 d'après Knighton, 1984) | 24 |
| Figure 7 : Temps de réponse d'un cours d'eau suite à une perturbation (d'après Knighton, 1984) | 25 |
| Figure 8 : Exemple de trajectoire géomorphologique perturbée suite à un déséquilibre sédimentaire lié aux métamorphoses climatiques et anthropiques..... | 25 |
| Figure 9 : Évolutions événementielle et tendancielle de la bande active | 28 |
| Figure 10 : Localisation du bassin versant Haute-Romanche-Oisans..... | 30 |
| Figure 11 : Cartographie du relief du bassin versant Haute-Romanche-Oisans (Fond de plan : BD Alti IGN) | 31 |
| Figure 12 : Cartographie de l'occupation du sol du bassin versant amont de la Romanche (Source : Corine Land Cover 2012) | 32 |
| Figure 13 : Débits moyens mensuels de la Romanche et du Vénéon (d'après Banque Hydro)..... | 33 |
| Figure 14 : Coupe géologique réalisée le long du lit de la Romanche | 37 |
| Figure 15 : Coupe géologique réalisée le long du lit du Vénéon | 38 |
| Figure 16 : Périmètres de protection réglementaires du bassin versant amont de la Romanche | 42 |
| Figure 17 : Caractérisation des habitats | 43 |
| Figure 18 : Organisation théorique des biocénotypes le long d'un cours d'eau (d'après Verneaux, 1973) | 49 |
| Figure 19 : Cartographie des zones de frayères de la truite commune (Source : DDT 38) | 50 |
| Figure 20 : Boisements alluviaux pionniers sur le tressage de la Romanche au Buclet (à gauche) et sur le Vénéon en amont de Plan du Lac (à droite)..... | 59 |
| Figure 21 : Évolution de la bande active en amont de la Bayette entre 1937 et 2016..... | 61 |
| Figure 22 : Localisation des tronçons issus de la sectorisation morphodynamique de la Romanche et du Vénéon | 65 |
| Figure 23 : Décompression rocheuse paraglacière (exemple du paléo-glacier de la Clarée) (Cossart et al., 2008)..... | 67 |
| Figure 24 : Temporalité de la séquence paraglacière (d'après Church & Ryder, 1972)..... | 68 |
| Figure 25 : Impact d'une terrasse fluvio-glaciaire sur le couplage d'un mouvement de masse (Cossart et al. 2013) Absence de couplage entre un mouvement de masse (landslide mass) et un cours d'eau (stream) lié à la présence d'une terrasse fluvio-glaciaire (glacio-fluvial terrace)..... | 70 |
| Figure 26 : Description d'une cascade sédimentaire paraglacière sous la forme d'un graphique (Cossart, 2014) | 70 |
| Figure 27 : Éléments bloqués dans des réservoirs sédimentaires durables en pied de cascades sédimentaires (Viers, 1967) | 71 |

| | |
|---|-----|
| Figure 28 : Dernier Maximum Glaciaire du glacier de l'Isère avec celui de la Romanche au Würm II 1 : appareils glaciaires ; 2 : flux glaciaires ; 3-4 : glaciers locaux ; 5 : lacs de barrage glaciaire (Montjuvent, 1978) | 72 |
| Figure 29 : Retrait du glacier des Étançons entre la fin du XIX ^{ème} et 2012 (Gardent, 2014) | 73 |
| Figure 30: Rétraction du glacier de la Pilatte entre 1884 et 2002 (Gardent, 2014) | 73 |
| Figure 31 : Dernier Maximum Glaciaire au Würm III pour les Alpes du Nord et le glacier de la Romanche (Coutterand, 2010)..... | 75 |
| Figure 32 : Récurrence du glacier de la Romanche au Würm III (Montjuvent, 1978) | 75 |
| Figure 33 : Extension du glacier de la Pilatte au PAG (Gardent, 2014)..... | 76 |
| Figure 34 : Évolution de la fourniture sédimentaire d'origine glaciaire et de la fourniture alluviale (inspirée de Starkel, 1987 et Huggett, 2007)..... | 77 |
| Figure 35 : Profil en long 1911 dans le secteur de Plan du Lac montrant l'impact de l'éboulement..... | 78 |
| Figure 36 : Partie busée du seuil sur le Vénéon avant la crue de 2008 (à gauche) et après (à droite) | 80 |
| Figure 37 : Travaux historiques d'endiguement de la Lignarre reporté sur un fond de carte datant de 1865 (Source : RTM, 2012, p. 43) | 82 |
| Figure 38 : Barrage n°1 de la Poyat (Hydrétudes, 05/2016) | 82 |
| Figure 39 : Localisation des perturbateurs hydromorphologiques selon leur type et leur degré d'impact | 85 |
| Figure 40 : Localisation des linéaires corsetés de la Romanche et du Vénéon (en rouge) | 88 |
| Figure 41 : Localisation des linéaires corsetés sur les principaux affluents de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans | 89 |
| Figure 42 : Gravière du Vénéon..... | 90 |
| Figure 43 : Superposition des bandes actives 1948 et 2016 (bleu) au Buclet montrant les espaces perdus (hachures en rouge) et les espaces construits (hachures en vert) par rapport à 1948 | 93 |
| Figure 44 : Analyse diachronique en plan du tronçon VEN_3 (RD530 en rouge) | 94 |
| Figure 45 : Analyse diachronique en plan de la zone du Buclet (à gauche), carte de Cassini (à droite en haut) sans tressage et carte de l'État-major (à droite en bas) avec le cours d'eau rectifié et endigué et un tressage en amont de La Bayette bien développé | 95 |
| Figure 46 : Dynamique latérale de la Romanche et du Vénéon d'après l'analyse diachronique | 96 |
| Figure 47 : Évolution de la superficie de la bande active de la Romanche et du Vénéon..... | 98 |
| Figure 48 : Évolution de la bande active au niveau de la zone du Buclet par rapport à l'année de base 1948..... | 99 |
| Figure 49 : Évolution de la bande active pour le tronçon VEN_3 à Plan du Lac par rapport à l'année 1952 | 99 |
| Figure 50 : Analyse diachronique en plan de la Lignarre au niveau de son cône de déjection de 1750 à 2009 (Source : RTM, 2012, p. 28) | 100 |
| Figure 51 : Profils en long de la Haute-Romanche (en haut) et du Vénéon (en bas) levés en août/septembre 1911 par Grandes Forces Hydrauliques..... | 103 |
| Figure 52 : Évolution altimétrique des tressages étudiés dans le cadre de la Zone Atelier Bassin du Rhône, dont le Vénéon (Source : Piégay et al., 2008) | 106 |
| Figure 53 : Comparaison des fils d'eau de la Romanche en amont du Barrage du Chambon (tronçon ROM_1) | 107 |

| | |
|---|-----|
| Figure 54 : Comparaison des fils d'eau de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans (ROM_2 à ROM_4) | 108 |
| Figure 55 : Comparaison des profils en long du fond de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans | 109 |
| Figure 56 : Comparaison générale des profils en long du fil d'eau du Vénéon jusqu'à l'usine de Pont Escoffier | 110 |
| Figure 57 : Comparaison des fils d'eau du Vénéon dans le secteur de La Bélarde (amont du tronçon VEN_1)..... | 111 |
| Figure 58 : Comparaison des fils d'eau du Vénéon dans le secteur Plan du Lac (tronçon VEN_3)..... | 112 |
| Figure 59 : Comparaison des fils d'eau du Vénéon de Bourg d'Arud à l'usine de Pont Escoffier | 113 |
| Figure 60 : Comparaison des fils d'eau du Vénéon de l'usine de Pont Escoffier à la confluence avec la Romanche | 114 |
| Figure 61 : Évolution du profil en long de la Lignarre entre 1860 et 2011 en aval du barrage de la Poyat (Source : RTM, 2012, p. 33)..... | 115 |
| Figure 62 : Évolution du profil en long de la Sarenne depuis la cascade (Source : BURGEAP, 2016, p. 55)..... | 116 |
| Figure 63 : Exemple de connexion versant-lit sur le Vénéon par talus d'éboulis | 118 |
| Figure 64 : Partie distale du glacier de la Pilatte. On note les épandages proglaciaires tapissant la vallée en aval (Source : RTM38) | 119 |
| Figure 65 : Évolution du couplage versant-lit et donc de la fourniture sédimentaire dans le Vénéon entre la fin du XIX ^{ème} siècle et maintenant | 119 |
| Figure 66 : Profil en amont du ruisseau d'En Bas (à gauche) et vue depuis la rive gauche dans ce secteur (à droite), les éboulis en rive droite apparaissent végétalisés et découplés du Vénéon. | 120 |
| Figure 67 : Cône de déjection de la combe de la Pierre Blanche. On remarque une végétalisation commençant à fixer le cône sur les parties les moins actives lors des événements Basse Fréquence Haute Magnitude*. | 121 |
| Figure 68 : Carte géologique montrant les éboulis en partie basse des versants taillés dans le granite | 121 |
| Figure 69 : Vue aérienne du Vénéon en aval des Étages montrant le contraste entre les deux versants : celui de rive droite présente des talus d'éboulis actifs mais déconnectés par végétalisation en pied, alors que le versant de rive gauche est végétalisé (Source : Géoportail) | 121 |
| Figure 70 : Vue aérienne de la partie aval du tronçon VEN_1 montrant certains talus d'éboulis de rive droite (flèches jaunes) connectés au Vénéon et injectant probablement des matériaux. Ceux de la rive gauche sont moins actifs et moins connectés, du fait notamment de leur degré de végétalisation (Source : Géoportail) | 122 |
| Figure 71 : Vue aérienne de l'amont du tronçon VEN_2. Les éboulis sont peu représentés. En rive gauche, entre 1500 et 1900 m, ils sont déconnectés et le ruisseau de Champhorent apparait comme un faible contributeur pour le Vénéon. En rive droite, à partir de l'aval, des éboulis apparaissent mais semblent déconnectés du Vénéon (Source : Géoportail) | 123 |
| Figure 72 : Les éboulis sont bien présents en rive gauche mais leur connexion avec le Vénéon est limitée du fait de la végétation. La rive droite présente des éboulis sous la forme de ravinements mais très au-dessus du Vénéon et sans couplage avec ce dernier qui est 270 mètres plus bas. La Grande Ruine, connectée au Vénéon, est bien visible (flèche jaune) (Source : Géoportail) | 123 |

| | |
|--|-----|
| Figure 73 : Écroulement sous le lieu-dit "Pré Clot" dans les gneiss formant un cône d'éboulis rechargeant localement le Vénéon. En jaune, les cicatrices d'arrachement et en rouge, le cône d'éboulis empiétant sur la bande active du Vénéon (Source : Google Earth) | 124 |
| Figure 74 : Tressage de Plan du Lac lié à l'aggradation des matériaux en appui sur un éboulement ancien qui a créé un niveau de base local. On note la végétalisation des versants et les stockages sédimentaires paraglaciers en pied de versant qui sont déconnectés (rouge) (Source : Géoportail) | 125 |
| Figure 75 : Carte postale ancienne de Plan du Lac. On note la bonne connexion versant-lit et le peu de végétalisation des versants. La connexion versant-lit est importante (flèche jaune). | 126 |
| Figure 76 : Vue générale du Vénéon depuis le pont du barrage de Plan du Lac. On constate une végétalisation très forte de la zone et même une structure alluvionnaire en lit qui se végétalise (flèche jaune). | 126 |
| Figure 77 : Le Vénéon à Plan du Lac. On note la végétalisation très importante du secteur (à gauche) et les talus d'éboulis paraglaciers déconnectés du lit et en cours de végétalisation (à droite) (flèche jaune). | 126 |
| Figure 78 : Ébouilisation en rive droite avec en aval le talus d'éboulis actif de Bourg d'Arud (flèche). En rive gauche, les talus d'éboulis sont en cours de végétalisation (Source : Géoportail) | 127 |
| Figure 79 : Versant de rive gauche sujet à l'ébouilisation (action gel/dégel) (à gauche), on note la végétalisation de la rive droite ainsi que celle du talus d'éboulis bien visible en aval (flèche). Vue d'éboulis piégés en pied de versant (à droite) susceptibles d'être réinjectés lors d'une crue Basse Fréquence Haute Magnitude* (flèche). | 127 |
| Figure 80 : Pied de talus quasiment au contact du Vénéon mais qui se végétalise (à gauche) et pied du talus d'éboulis en équilibre sur des matériaux très gros (à droite) liés vraisemblablement à un éboulement ancien et végétalisé, le couplage est donc limité avec le Vénéon. | 128 |
| Figure 81: Rive droite du tronçon VEN_5 (à gauche), les sources et réservoirs sédimentaires sont importants dans les versants, mais le couplage en pied est très limité. On note à l'Alpe de Vénosc la Combe Hochue, source sédimentaire dans les marnes noires du Toarcien, mais qui est haut dans les versants et totalement découplée. Gros plan sur les éboulis découplés de Plan Verney (à droite). ... | 129 |
| Figure 82 : Talus d'éboulis couplé au Vénéon | 129 |
| Figure 83 : Carrière et moraine würmienne (à gauche) (limite amont en rouge), les éboulis de pied calés dessus sont en jaune et profil de la vallée (à droite) montrant la moraine en pied et les profils de versant. | 130 |
| Figure 84 : Rive gauche du tronçon VEN_6 avec les parties hautes dénudées et les parties basses végétalisées | 130 |
| Figure 85 : Profil en auge glaciaire entre la Pétaure (1 566 m) et la Côte Belle (1 789 m) | 131 |
| Figure 86 : Tressage du Vénéon dans l'ombilic de la plaine du Buclet. On remarque le versant subvertical et la végétalisation de la berge opposée qui témoigne d'un découplage versant-lit. | 131 |
| Figure 87 : Vues aériennes du tressage du Vénéon de 2011 montrant le découplage entre le stock sédimentaire et le stock alluvial | 132 |
| Figure 88 : Découplage des versants et du lit du Vénéon dans la plaine du Buclet | 132 |
| Figure 89 : Tête de bassin du Vénéon avec le glacier de la Pilatte (à gauche) et tressage dans l'ombilic du Carrelet (à droite). On note le découplage du versant de rive droite (flèche rouge) et les cônes fournissant des matériaux (flèche jaune). La bande active est bien visible. | 135 |
| Figure 90 : Une vallée glaciaire type du bassin du Vénéon : la vallée de la Lavey | 136 |

| | |
|--|-----|
| Figure 91 : Partie distale du torrent des Étançons avec deux sources sédimentaires couplées (surtout celle en amont) en rive droite, mais un versant de rive gauche découplé. Le cône de déjection est végétalisé. | 137 |
| Figure 92 : Vue du torrent des Étançons sur son cône alluvial en amont immédiat de la confluence avec le Vénéon | 137 |
| Figure 93 : Vue des deux cônes antagonistes avec la partie active et l'éboulisation sur le cône alluvial historique (à gauche) et détail sur le cône de la combe de la Pierre Noire (à droite). On voit en rouge la ligne délimitant les éboulis de pied de versant d'origine paraglacière et en jaune le cône alluvial historique. | 138 |
| Figure 94 : Vallon des Étages | 138 |
| Figure 95 : Combe de la Cros de l'Ours sous deux orientations opposées. (1) Cône actif, (2) éboulisation et recharge actives en amont. La limite des placages de pied de versant est simulée en tirets jaunes. | 139 |
| Figure 96 : Le Lavey et la Mariandre, faibles contributeurs sédimentaires du Vénéon..... | 140 |
| Figure 97 : Érosion de versant généralisée en amont de la gorge de la Pisse. L'orientation n'est pas la même..... | 141 |
| Figure 98 : Petits contributeurs de VEN_5 | 141 |
| Figure 99 : Verrou et lac de surcreusement limitent la production sédimentaire du Lauvitel (Google Earth)..... | 142 |
| Figure 100 : Entrée de la vallée du Lauvitel vue depuis Les Ougiers..... | 142 |
| Figure 101 : Cône alluvial de la Combe Blanche (à gauche) et vue aérienne de la partie distale de la Combe Blanche (à droite) où l'on voit le cône (flèche) | 143 |
| Figure 102 : (1) Vue générale du bassin avec la morphologie glaciaire héritée, (2) vue des zones éboulisées en tête de bassin dans les granites, (3) vue de la partie distale avec la bande active de raccordement en sortie de gorge..... | 143 |
| Figure 103 : Classification des écoulements naturels saturés sur forte pente en fonction de la granulométrie et de la concentration solide totale (Coussot, 1993) | 145 |
| Figure 104 : à gauche, les éléments fonctionnels d'une lave torrentielle (Remaître, 2006, d'après Johnson & Rodine, 1984), à droite, profil en long, vue en plan et coupes d'une lave montrant les bouffées sédimentaires (vagues), Remaître (2006), d'après Bardou (2002)..... | 147 |
| Figure 105 : Surfaces d'érosion relativement importantes sur la Romanche en aval du lieu-dit Les Fréaux (en haut) et sur le Vénéon (en bas) en amont du pont Les Ougiers (à gauche) et dans le secteur de Plan du Lac (à droite) | 149 |
| Figure 106 : Localisation des surfaces d'érosion sur la Romanche amont et le Vénéon..... | 150 |
| Figure 107 : Protocole de mesure des caractéristiques morphométriques des structures alluvionnaires | 151 |
| Figure 108 : Extrait de l'analyse des structures alluvionnaires de la zone du Buclet..... | 152 |
| Figure 109 : Localisation des structures alluvionnaires sur la Romanche amont et le Vénéon selon le volume de matériaux stockés et leur degré de mobilité..... | 153 |
| Figure 110 : Profil en long 2016 de la zone du Buclet-Bayette (VEN_7-ROM_3) et du Vénéon depuis le pont de Bourg d'Arud montrant ainsi la rupture de pente..... | 155 |
| Figure 111 : Répartition du stock alluvial de la Romanche et du Vénéon par tronçon selon le degré de mobilité | 157 |

| | |
|---|-----|
| Figure 112 : Structures alluvionnaires très mobile (en vert) et quasi fixée (en rouge) présentes sur le Vénéon..... | 158 |
| Figure 113 : Structures alluvionnaires très mobile (en vert), mobile (en orange) et quasi fixée sur la Romanche | 158 |
| Figure 114 : Évolution du diamètre caractéristique d_{50} sur la Romanche et le Vénéon à l'exutoire de chaque tronçon selon la classification de Wentworth sandrisée (2002) (CG^W : cailloux grossiers et PF^W : pierres fines)..... | 160 |
| Figure 115 : Courbes de débits classés à l'exutoire des tronçons de la Romanche..... | 166 |
| Figure 116 : Courbes de débits classés à l'exutoire des tronçons du Vénéon calculées sur 16 979 jours | 166 |
| Figure 117 : à gauche → substrat grossier vs. substrat fin (Gayraud et al., 2002) ; à droite → coupe de l'armure d'une structure alluvionnaire. | 170 |
| Figure 118 : représentation imagée du test développé par Archambaud et al., (2005). | 172 |
| Figure 119 : relation entre la concentration en MES et la turbidité (1) sur le Ferrand et (2) sur la Romanche (Mano, 2008)..... | 174 |
| Figure 120 : Chroniques de concentration en MES vs. débits mesurés (07-2002 à 04-2014) pour le (Mano, 2008) | 175 |
| Figure 121 : Chroniques de concentration en MES vs. débits mesurés (07-2002 à 11-2003) pour la Romanche (Mano, 2008)..... | 176 |
| Figure 122 : impact de la fusion nivale sur les MES sur le Ferrand et la Romanche (Mano, 2008) | 177 |
| Figure 123 : Evolution des flux de sédiments et volumes d'eau cumulés sur les périodes d'étude pour le Ferrand et la Romanche (d'après Mano, 2008) : | 178 |
| Figure 124 : Modèle du transport des MES à réservoir (Poirel & Bessy, 2004) | 179 |
| Figure 125 : comparaison des flux mesurés et simulés sur le Ferrand et la Romanche | 179 |
| Figure 126 : Comparaison des flux journaliers mesurés et simulés sur le Ferrand et la Romanche ... | 180 |
| Figure 127 : Flux spécifiques simulés 1961-2004 sur le Ferrand et la Romanche (comparaison des résultats obtenus avec la formule de Ludwig & Probst (1998) et le modèle (avec 3 calages différents) | 180 |
| Figure 128 : Chaîne cinématique du transport solide de la Romanche et du Vénéon | 183 |
| Figure 129 : Impact des terrasses fluvio-glaciaire sur le couplage sédimentaire latéral..... | 184 |
| Figure 130 : Structures alluvionnaires végétalisées dans la bande active de ROM_3 | 189 |
| Figure 131 : L'approche métrologique (suivi dynamique) et les trois approches..... | 192 |
| Figure 132 : Éléments préliminaires pour le suivi dynamique 2016 de la plaine du Buclet..... | 196 |
| Figure 133 : Évolution amont-aval de la largeur de la bande active et de l'indice de tressage..... | 198 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Principale bibliographie consultée existante sur le bassin versant amont de la Romanche | 17 |
| Tableau 2 : Hiatus entre le temps géomorphologique et le temps de gestion | 25 |
| Tableau 3 : Principales caractéristiques des stations hydrométriques présentes sur le bassin versant. | 33 |
| Tableau 4 : Description des formations traversées par la Romanche..... | 36 |
| Tableau 5 : Sites NATURA 2000 présents dans le bassin versant amont de la Romanche | 40 |

| | |
|---|-----|
| <i>Tableau 6 : Habitats inscrits à l'Annexe 1 concernant le bassin amont de la Romanche</i> | 41 |
| Tableau 7 : Superficie d'habitats par site NATURA 2000..... | 41 |
| Tableau 8 : Principales espèces piscicoles présentes dans la zone d'étude | 48 |
| Tableau 9 : Biocénotypes des cours d'eau d'étude..... | 49 |
| Tableau 10 : Amphibiens présents sur la zone d'étude..... | 51 |
| Tableau 11 : Reptiles présents sur la zone d'étude | 52 |
| Tableau 12 : Entomofaune concernée par l'Annexe 2 de la Directive Habitats et présente dans le bassin amont de la Romanche | 52 |
| Tableau 13 : Avifaune concernée par l'Annexe 2 de la Directive Habitat et présente dans l'amont de la Romanche | 54 |
| Tableau 14 : Chiroptères inscrits à l'Annexe 2 de la Directive Habitat..... | 56 |
| Tableau 15 : Autres chiroptères présents dans le bassin amont de la Romanche | 56 |
| Tableau 16 : Espèce floristique inscrite à l'annexe 2 de la Directive habitat..... | 57 |
| Tableau 17 : Boisements alluviaux pionniers de la Romanche et du Vénéon..... | 62 |
| Tableau 18 : Alliances phytosociologiques présentes dans les boisements rivulaires..... | 63 |
| Tableau 19 : Principales caractéristiques des tronçons morphodynamiques de la Romanche et du Vénéon | 64 |
| Tableau 20 : Temporalité de la séquence paraglaciale en fonction de l'origine des sédiments (Ballantyne, 2002)..... | 68 |
| Tableau 21 : Évolution du glacier de la Pilatte entre 1893 et 1948 (d'après Sitzmann, 1961)..... | 73 |
| Tableau 22 : Évolution de la surface des glaciers de la Romanche et du Vénéon entre 1925-1930 et 1952 (d'après Sitzmann, 1979)..... | 74 |
| Tableau 23 : Évolutions climatiques et incidences probables sur la Romanche et le Vénéon | 79 |
| Tableau 24 : Synthèse des aménagements historiques dans le bassin versant du Vénéon..... | 81 |
| Tableau 25 : Synthèse des aménagements historiques sur la Lignarre (Source : RTM, 2012, pp. 9-10) | 83 |
| Tableau 26 : Synthèse des aménagements historiques sur l'Eau d'Olle (Source : Deniau, 1997 repris par HYDRETTUDES, 2010) | 83 |
| Tableau 27 : Corsetage du lit de la Romanche et du Vénéon par type..... | 86 |
| Tableau 28 : Linéaires corsetés par tronçon et type de corsetage..... | 87 |
| Tableau 29 : Synthèse des extractions de matériaux et des curages ayant eu lieu dans les cours d'eau | 91 |
| Tableau 30 : Photographies aériennes disponibles sur la Romanche et le Vénéon (d'après Géoportail) | 92 |
| Tableau 31 : Profils en long de la Romanche et du Vénéon utilisés pour l'analyse diachronique en altimétrie | 102 |
| Tableau 32 : Synthèse de la connexion versant-lit du Vénéon par tronçon morphodynamique..... | 133 |
| Tableau 33 : Synthèse des contributeurs sédimentaires potentiels du Vénéon | 144 |
| Tableau 34 : Superficies érodées de la Romanche amont et du Vénéon par tronçon | 150 |
| Tableau 35 : Répartition des volumes de matériaux stockés dans la Romanche par tronçon..... | 154 |

| | |
|--|-----|
| Tableau 36 : Répartition des volumes de matériaux stockés dans le Vénéon par tronçon | 154 |
| Tableau 37 : Répartition du stock alluvial de la Romanche par stade d'évolution En vert : très mobile ; en orange : mobile et en rouge : quasi fixée | 156 |
| Tableau 38 : Répartition du stock alluvial du Vénéon par stade d'évolution En vert : très mobile ; en orange : mobile et en rouge : quasi fixée..... | 156 |
| Tableau 39 : Diamètres caractéristiques de la Romanche et du Vénéon | 160 |
| Tableau 40 : Paramètres d'entrée hydrauliques retenus..... | 161 |
| Tableau 41 : Synthèse des chroniques de débits journaliers moyens disponibles aux stations hydrométriques..... | 162 |
| Tableau 42 : Synthèse de la méthodologie retenue pour reconstituer les séries de débits journaliers moyens à l'exutoire des tronçons du Vénéon..... | 163 |
| Tableau 43 : Synthèse de la méthodologie retenue pour reconstituer les séries de débits journaliers moyens à l'exutoire des tronçons de la Romanche..... | 164 |
| Tableau 44 : Débits classés aux tronçons de la Romanche et du Vénéon | 165 |
| Tableau 45 : Capacité théorique de charriage obtenue par tronçon | 167 |
| Tableau 46 : Test de sensibilité de la formule par rapport à la largeur | 168 |
| Tableau 47 : Capacité de charriage de la Haute-Romanche et des affluents issus de la bibliographie existante sur ces secteurs | 169 |
| Tableau 48 : taille des particules de colmatage et impact associé..... | 171 |
| Tableau 49 : Echelle de cohésion du substrat des lits fluviaux | 172 |
| Tableau 50 : pluies et débits utilisés pour modéliser les MES (Mano, 2008)..... | 173 |
| Tableau 51 : valeurs extrêmes de concentration et de flux de MES sur le Ferrand et la Romanche (Mano, 2008) | 176 |
| Tableau 52 : flux de sédiments annuels | 176 |
| Tableau 53 : caractéristiques des événements de fort transport de MES (Ferrand et Romanche), Mano (2008)..... | 178 |
| Tableau 54 : Suivi dynamique préconisé pour la Romanche et le Vénéon..... | 194 |
| Tableau 55 : Indices hydromorphologiques d'un tressage révélateurs de son évolution dynamique . | 195 |
| Tableau 56 : Synthèse du suivi dynamique 2016 de la plaine du Buclet | 197 |

LISTE DES ENCARTS

| | |
|---|----|
| Encart 1 : La bande active d'un cours d'eau | 26 |
| Encart 2 : Les artéfacts hydromorphologiques | 29 |
| Encart 3 : Les orogénèses..... | 34 |
| Encart 4 : Les nappes de charriage..... | 34 |
| Encart 5 : Les périodes glaciaires du Quaternaire | 35 |
| Encart 6 : Échelle de dureté des minéraux | 35 |
| Encart 7 : Caractérisation des habitats aquatiques..... | 43 |

| | |
|--|-----|
| Encart 8 : Statut de conservation IUCN..... | 48 |
| Encart 9 : Les biocénotypes | 49 |
| Encart 10 : L'aphanomyose | 57 |
| Encart 11 : Boisements inféodés aux cours d'eau | 58 |
| Encart 12 : Le paraglaciale..... | 66 |
| Encart 13 : La décompression paraglaciale..... | 67 |
| Encart 14 : Les cascades sédimentaires | 69 |
| Encart 15 : Évolution de la bande active et crue | 97 |
| Encart 16 : Grandes Forces Hydrauliques..... | 101 |
| Encart 17 : Les structures alluvionnaires | 151 |
| Encart 18 : Dépôt-obstruction-défluviation | 157 |
| Encart 19 : Les hiatus sédimentaires | 182 |
| Encart 20 : Le couplage sédimentaire | 182 |
| Encart 21 : Temporalité des injections | 190 |

1 Préambule

1.1 Contexte de la mission

Dans le cadre du Contrat de Rivière Romanche 2013-2019, le Syndicat d'Assainissement du Canton de l'Oisans et de la Basse Romanche (SACO) souhaite définir un plan de gestion du transport solide du bassin versant amont de la Romanche.

En effet, le bassin versant amont de la Romanche s'étendant jusqu'à la confluence avec l'Eau d'Olle à Bourg d'Oisans, a connu un fort développement socio-économique au fil des siècles orienté notamment autour de l'hydroélectricité et le tourisme d'hiver et d'été, créant ainsi des enjeux humains importants (campings, axes routiers, stations de ski, villages...).

Aujourd'hui, le bassin versant amont de la Romanche est sous forçage anthropique majeur : la Romanche amont est soumise à l'influence d'importants aménagements hydroélectriques tels que le barrage du Chambon et du Clapier. Le lit est donc compartimenté par des ouvrages transversaux impactant vraisemblablement le transit sédimentaire.

La tête de bassin versant se trouve ainsi déconnectée de la plaine de Bourg d'Oisans dont les apports solides sont limités. Seul le Vénéon, principal contributeur sédimentaire de la Romanche à l'entrée de la plaine de Bourg d'Oisans, semble avoir préservé un fonctionnement dynamique relativement naturel. Le transport solide peut s'y exprimer, le tressage du Buclet témoignant d'un stockage-régulation du transport solide encore efficient, mais perturbé par l'entonnement de La Bayette. Toutefois, la destruction du seuil permettant l'accès à la gravière survenue lors de la crue de 2014 change la donne, le fonctionnement et l'évolution dynamiques du tressage ayant probablement été modifiés.

Par ailleurs, le bassin versant amont de la Romanche a été affecté par les glaciations du Quaternaire et encore récemment, et a contenu des appareils glaciaires puissants qui ont modelé les vallées (présence d'ombilics dont celui du Bourg d'Oisans en auge glaciaire très représentatif de ce type d'érosion).

Cette période a généré une crise morphogénique en laissant, après la déglaciation, des volumes de matériaux très conséquents, dont une partie a été exploitée pour remblayer les fonds de vallées. Cette crise morphogénique touche certainement à sa fin et seuls restent des matériaux piégés principalement sous forme d'éboulis de pieds de versant.

La péjoration climatique récente (réchauffement) vient également limiter la fourniture sédimentaire, risquant de provoquer une incision des lits fluviaux, voire la disparition du tressage du Buclet et le déstockage des matériaux vers l'aval.

C'est donc dans ce contexte hérité qu'il convient d'étudier finement le fonctionnement dynamique de la Romanche et du Vénéon, afin de bien appréhender les impacts des discontinuités sédimentaires (modifications climatiques, anthropiques...), et ainsi construire un plan de gestion du transport solide cohérent et adapté aux réalités du bassin versant.

1.2 Replacer les cours d'eau dans leur contexte dynamique

Pour comprendre le fonctionnement dynamique de la Romanche et du Vénéon, il est absolument essentiel de les **replacer dans leur contexte morphodynamique**. Cette mise en contexte dynamique doit apporter une nouvelle dimension à la fois dans la compréhension de l'héritage (le passé), du diagnostic fonctionnel et des solutions préconisées pour s'adapter au mieux au fonctionnement et à l'évolution dynamiques des cours d'eau.

Il s'agit donc de remonter le passé récent pour analyser l'héritage de ce passé et son impact sur le fonctionnement actuel et pouvoir ainsi se projeter dans l'évolution des cours d'eau et anticiper sa gestion future.

Cette démarche permettant de replacer la Romanche et le Vénéon dans leur contexte dynamique s'appuie sur le concept de **trajectoire géomorphologique** (au sens de Wiederkehr *et al.*, 2008) définie par trois composantes en interrelation :

- L'**héritage géomorphologique**, c'est à dire le vécu du cours d'eau dont les derniers siècles, et particulièrement les dernières décennies, sont très importants, étant donné qu'ils influencent directement le présent ;
- Le **fonctionnement dynamique**, c'est à dire le fonctionnement actuel du cours qui pourrait évoluer très vite sous l'effet d'une crue morphogène ou de modifications anthropiques ;
- L'**évolution dynamique** qui reflètera les crues morphogènes subies et les aménagements et/ou modes de gestion générés par l'Homme.

Ainsi, le diagnostic hydromorphologique, première étape essentielle à l'élaboration du plan de gestion, repose sur l'analyse de chacune des composantes de la trajectoire géomorphologique de la Romanche.

Le présent rapport a donc pour objet de présenter l'état des lieux-diagnostic du bassin versant amont de la Romanche à partir de l'analyse de la trajectoire géomorphologique.

Il est accompagné d'un **atlas cartographique** restituant par planche à une échelle fine (1/10 000^e) tous les éléments relevés lors des investigations de terrain. L'ensemble des cartes présentées dans le présent rapport visant à illustrer et étayer le propos sont extraites de l'atlas cartographique.

1.3 Périmètre d'étude et données utilisées

La présente étude concerne le bassin versant amont de la Romanche s'étendant en amont de la confluence avec l'Eau d'Olle, avec **deux niveaux de précision** attendus :

- **Le secteur Haute-Romanche (amont du barrage du Chambon) et les principaux affluents (Ferrand, Lignarre, Sarenne, Eau d'Olle)** sont étudiés d'après la bibliographie existante. Il convient de noter que la majorité des données bibliographiques ne concernent pas une vision globale des bassins versants ou d'analyse trajectorielle, mais sont plutôt des données d'ordre local qu'il est difficile d'extrapoler. Ainsi, les éléments d'analyse de la trajectoire géomorphologique pour ces cours d'eau sont fonction des données trouvées dans la bibliographie et jugées pertinentes et en cohérence avec l'approche (connexion versant-lit, géomorphologie, contributeurs sédimentaires...) ;
- **Le Vénéon depuis sa confluence avec le torrent des Étançons et la Romanche du Clapier à l'Eau d'Olle** : prospection plus fine avec relevés de terrain, calculs... d'où une analyse plus approfondie et précise sur ces cours d'eau et secteurs.

La méthodologie employée pour l'étude de chaque composante de la trajectoire géomorphologique s'appuie sur le couplage de différents éléments mis à disposition dans le cadre de la présente étude :

- Données bibliographiques existantes (études *cf.* Tableau 1, articles scientifiques...) ;
- Investigations de terrain réalisées par HYDRETTUDES en juin 2016 : parcours pédestre de la Romanche (Haute-Romanche et depuis le pont de St-Guillaume) ainsi que du Vénéon depuis le torrent des Étançons, avec levé de divers indicateurs hydromorphologiques (surfaces d'érosion, structures alluvionnaires, perturbateurs hydromorphologiques, prélèvements granulométriques, confortement de berge...). Il est à noter que les tronçons en gorge difficilement accessibles n'ont pas été parcourus, voire partiellement ;
- Levés topographiques réalisés par SINTEGRA de septembre à novembre 2016 : profil en long de la Haute-Romanche, 89 profils en travers de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans depuis le pont de St-Guillaume, profil en long du Vénéon depuis le torrent des Étançons hors zone de gorge ;

- Levés topographiques par drone sur la zone du Buclet réalisés en juillet 2016 par IXALP DRONES : semis de points et orthophotographie aérienne.

| PRINCIPALE BIBLIOGRAPHIE DISPONIBLE SUR LE BASSIN VERSANT AMONT DE LA ROMANCHE | | |
|---|------------------|-------|
| Nom de l'étude | Maître d'œuvre | Année |
| Étude de faisabilité pour la restauration des habitats aquatiques - Affluents de la Romanche | BURGEAP | 2016 |
| Étude de danger des travaux de confortement des digues de l'Eau d'Olle | ARTELIA | 2012 |
| État des lieux et programme d'actions du bassin versant de la Lignarre | RTM | 2012 |
| Plan de gestion des cours d'eau Haut-Alpins - Phase 2 - Mise en place d'un réseau de suivi géomorphologique | ARTELIA | 2012 |
| Étude multifonctionnelle des rivières et milieux aquatiques du bassin versant de la Romanche | HYDRETTUES | 2012 |
| Plage du ruisseau de la Sarenne sur Bourg d'Oisans – Dossier de gestion, d'entretien et de suivi | HYDRETTUES | 2010 |
| Digues de la Romanche, de la Lignarre et de l'Eau d'Olle | HYDRETTUES | 2010 |
| Étude de l'influence de la dynamique sédimentaire de la Vaudaine et l'Infernet sur le fonctionnement de la Romanche | ENSE3 | 2010 |
| Étude de transport solide de la Haute Romanche | SOGREAH | 2009 |
| Connaissance de la nappe de la plaine de Bourg d'Oisans | BURGEAP | 2009 |
| Étude hydraulique du Vénéon et de la Muzelle pour la protection du camping Le Champ du Moulin | ONF | 2008 |
| Étude de transport solide et des dépôts dans la zone du Buclet | ETRM | 2007 |
| Schéma d'aménagement de la Romanche - État des lieux, diagnostic et scénario | HYDRETTUES | 2007 |
| Étude hydraulique et de transport solide du Vénéon - Secteur La Bérarde et Plan du Lac | ETRM/BURGEAP | 2006 |
| Étude relative au curage de la Sarenne | SOGREAH | 2006 |
| Étude hydrogéologique Installation de concassage - Site d'Auris en Oisans | SAFEGE | 2005 |
| Plan de gestion de la plaine du Bourg d'Oisans | CEMAGREF/BURGEAP | 2003 |

Tableau 1 : Principale bibliographie consultée existante sur le bassin versant amont de la Romanche

1.4 Une démarche scientifique

L'hydromorphologie est une discipline relativement jeune qui est assez mal connue du grand public. Elle fait appel à des concepts et des connaissances assez divers et complexes qu'il convient d'intégrer et de clarifier dans la présente étude. Divers éléments complémentaires sont donc mis en œuvre dans le corps du texte pour favoriser sa compréhension ou encore conforter les affirmations faites :

- Un **chapitre rappelant les grands principes de l'hydromorphologie**, afin de fixer les principaux termes et processus, et disposer en amont de l'analyse d'un « socle commun de connaissances » ;
- Des **encarts bleus** positionnés au gré des pages sont intégrés contre la marge de gauche, afin d'apporter des éclairages et des éléments de connaissance plus approfondis concernant des notions liées à l'hydromorphologie et à d'autres disciplines (géologie, hydrologie, climatologie, écologie...) ;
- Un **glossaire** disponible à la fin du rapport explique les termes techniques utilisés dans le texte suivi d'un astérisque ;
- Des **références bibliographiques** au format APA (APA, 2009) viennent étayer les propos techniques et scientifiques contenus dans le texte, respectant ainsi le principe d'Euclide qui expliquait : « *Ce qui est affirmé sans preuve peut être nié sans preuve.* »

2 Rappel de quelques notions d'hydromorphologie

2.1 L'équilibre dynamique

Les cours d'eau constituent des zones de transfert, depuis l'amont vers l'aval, des débits et des matériaux érodés. Le transfert, aussi bien de l'eau que des matériaux, n'est pas constant dans le temps mais varie suivant les apports qui proviennent des pluies pour le débit liquide, et des glissements, éboulements, érosions et reprises d'anciens dépôts, pour le débit solide.

Les lits fluviaux **ajustent** donc leur **morphologie** en **réponse aux variations** de débits liquides et de la charge solide (Gilvear & Bravard, 1993).

La charge de fond transite ainsi depuis les zones de **production** primaire (têtes de bassin) vers l'aval (zone de **transfert** puis zone de **stockage** dans les grandes plaines alluviales), en passant par des phases de transfert/stockage/remobilisation dans le lit du cours d'eau sous diverses formes : cônes de déjection, lit, bancs actifs, bancs inactifs... (Sear & Newson, 1993).

Cette charge est également renforcée par des apports latéraux tout le long du cours d'eau (érosion latérale et affluents).

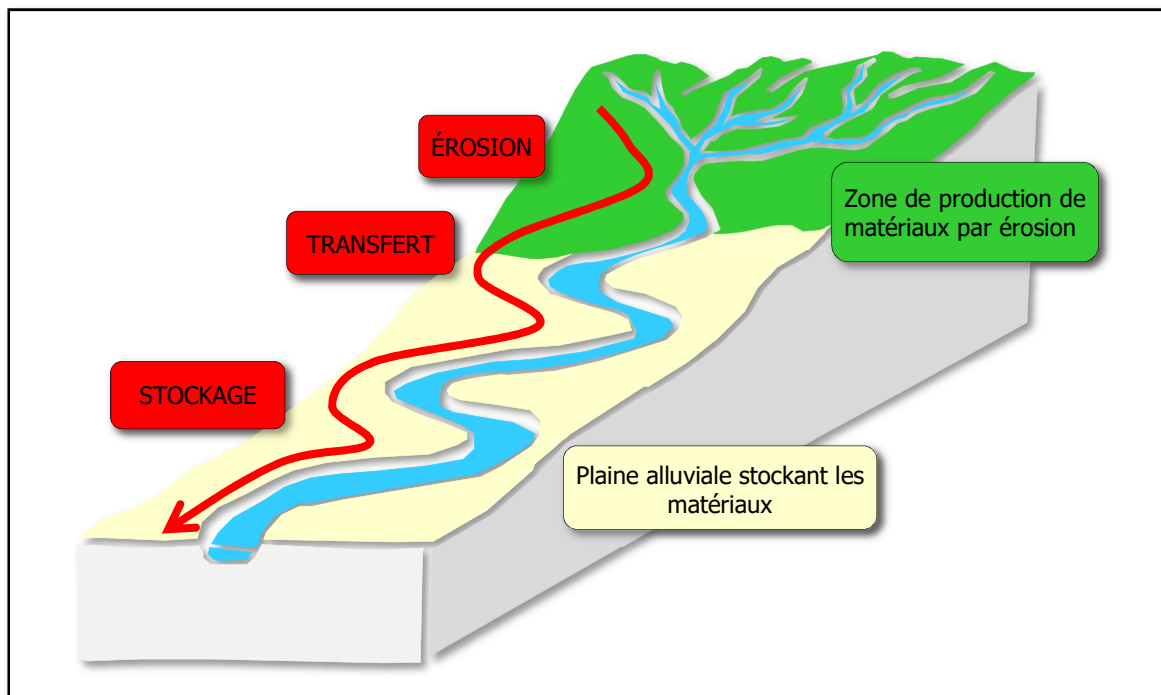


Figure 1 : Les trois zones fonctionnelles d'un cours d'eau (d'après Sear & Newson, 1993)

Il en résulte que la rivière est un **milieu vivant** en évolution permanente autour d'une **position d'équilibre**. Cette évolution permanente est ainsi influencée par des forçages de variables de contrôle et d'ajustements.

Les principes d'ajustement autour de cette position d'équilibre ont été expliqués dès la première partie du XX^{ème} siècle (Gilbert, 1914 ; Mackin, 1948), puis précisés par Lane (1955) et Borland (1960).

C'est d'ailleurs Borland qui présenta **l'équilibre dynamique** sous la forme d'une **balance** d'après les idées de Lane. Mais que ce soit à l'état naturel, après des aménagements ou des modifications (anthropiques, climatiques), l'hydrosystème évoluera aux niveaux physique et biologique. Ces changements peuvent être très lents mais également catastrophiques.

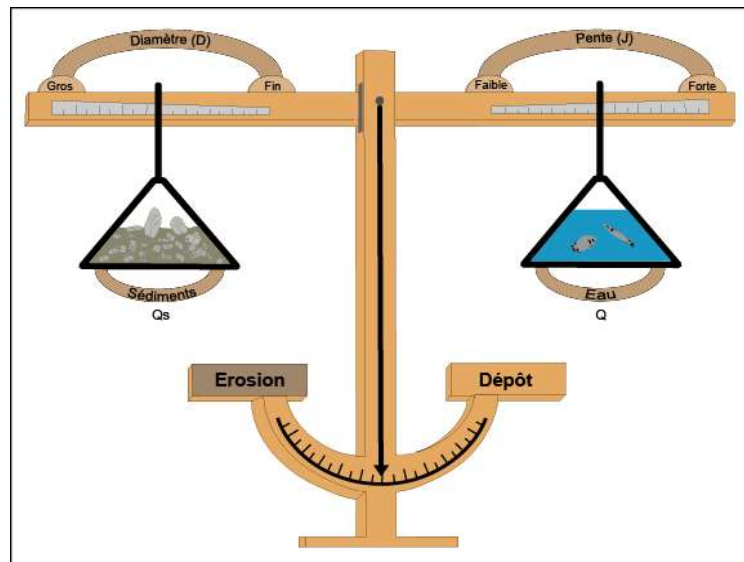


Figure 2 : Représentation du principe d'équilibre d'après Lane (1955) et Borland (1960)

Cet hydrosystème met en étroite relation des éléments physiques (géométrie en travers et en long du lit), hydrologiques (débits) et biologiques (colonisation des berges et du lit par les espèces végétales). Une modification d'un ou plusieurs de ces éléments entraîne un réajustement plus ou moins important des autres (Gilvear & Bravard, 1993).

En matière de dynamique sédimentaire, les principaux processus physiques qui permettent à la rivière de dissiper son énergie sont :

- Les débordements, permettant d'abaisser les vitesses en aval ;
- Les érosions, affectant les berges (érosion latérale) et le lit (érosion verticale) ;
- Le transport des sédiments (charriage et en suspension) ;
- La sédimentation (dépôts des matériaux transportés).

2.2 Les modes de transport des matériaux

Le transport des matériaux solides (ou sédiments) se produit de deux façons :

- Par **charriage** : transport des matériaux les plus grossiers au fond du lit ;
- Par **suspension** : transport dans la colonne d'eau des matériaux les plus fins lorsque le débit liquide est suffisamment important.

La limite « granulométrique » entre charriage et suspension a été fixée par Hjulström (1935) à 0,5 mm. Pour lui, au-dessus de cette limite, les matériaux transitent par charriage, en dessous, ils transitent en suspension.

En fait, cette limite est plutôt double : on considère qu'au-dessus de 8 mm le mode de transport dominant est le charriage (Bray & Church, 1980 ; Couvert *et al.*, 1999). La limite entre charriage et suspension n'est pas nette et le transport par charriage est graduel. Une même particule peut ainsi transiter successivement par charriage et suspension. On considère donc qu'entre 8 et 2 mm, il n'y a pas de mode de transport dominant. En effet, Moss (1972) et Middleton (1976) ont montré que les particules proches de 8 mm effectuent la plupart de leur transit en suspension, mais que c'est le charriage qui est le mode de transport dominant de ces particules.

La fraction grossière transite donc par charriage et la fraction fine par suspension. C'est cette fraction fine qui est colmatante, elle peut ainsi conduire à colmater des substrats intéressants pour le frai des espèces lithophiles* (au sens de Balon, 1975) et à indurer, voire cimenter, les matériaux grossiers en surface des lits (au sens de Archambaud, Giordano & Dumont, 2005).

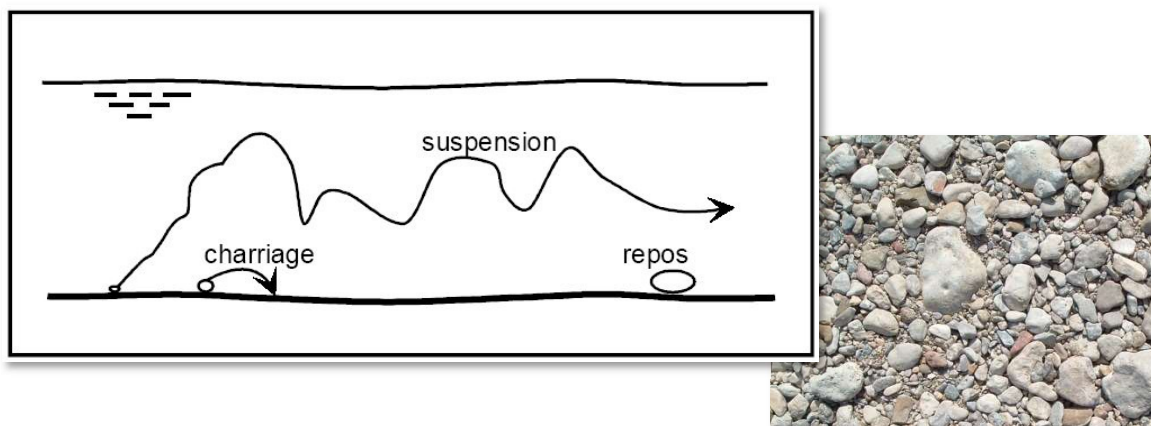


Figure 3 : Schéma montrant les modes de transport solide

Le débit solide conditionnant l'équilibre dynamique est donc constitué par les éléments grossiers transportés par charriage, les matières en suspension jouant un rôle négligeable. Ce débit solide et la morphologie du lit s'influencent mutuellement et s'ajustent ainsi l'un à l'autre (Paccaud & Roulier, 2010).

Toute modification de l'un ou l'autre des **variables de contrôle** (apports liquides et solides, caractéristiques du lit – profil en long, profil en travers – granulométrie, végétation...) provoque, par le biais des phénomènes de transport solide des **réajustements* morphologiques** (ou géométriques) jusqu'à ce qu'un nouvel **état d'équilibre** soit atteint. Joël Cacas (1987) résumait ces éléments par la formule suivante : « *La rivière est son propre architecte* ».

2.3 L'évolution granulométrique amont → aval, des lits à blocs aux lits à graviers

La diversité des cours d'eau dans les parties montagneuses est importante. Cette diversité est liée aux processus morphologiques qui s'adaptent à la capacité de transport et à la charge solide.

Cette diversité s'exprime sous la forme d'un **continuum amont-aval** (au sens de Vannote *et al.*, 1980), évoluant d'un excès de capacité de transport en amont (zones de production sédimentaire) à un excès de charge sédimentaire en aval (zones de stockage), passant par un système intermédiaire (zone de transfert). Le cours d'eau développe ainsi toute une stratégie de réponses morphologiques à divers pas de temps.

Dans les têtes de bassin versant à forte pente, les lits présentent successivement des formes en cascades, puis en step-pool et enfin en rapides (Montgomery & Buffington, 1997 ; Church & Zimmerman, 2007). Les pavages y sont caractérisés par des éléments grossiers (blocs et rochers) les structurant. C'est le domaine des **lits à blocs** particulièrement rugueux et relativement stables.

Puis, la pente et la puissance du cours d'eau diminuent et celui-ci ne peut plus mobiliser tous les apports amont. On entre dans le domaine des **lits à graviers** en « seuil-mouille-banc » où le stockage prédomine. Plus la charge est excédentaire, plus le cours d'eau développera des chenaux multiples (Church & Jones, 1982). On rencontre dans cette zone des **lits en tresses** (au sens de Tricart, 1977), à méandres et divagants avec des capacités de stockage/transfert importantes.

Plus bas dans les grandes plaines alluviales à faible pente, on rentre dans le domaine des **rivières à sables**.

Cette évolution granulométrique conditionne les faciès d'écoulement (au sens de Malavoi & Souchon, 2002), qui conditionnent eux-mêmes les habitats. On pourrait ainsi démontrer que le gradient granulométrique et l'évolution de la nature et de la composition granulométrique des lits fluviaux d'amont en aval, c'est-à-dire le compartiment physique du lit, constituent la base du *continuum* de la rivière (au sens de Vannote *et al.*, 1980).

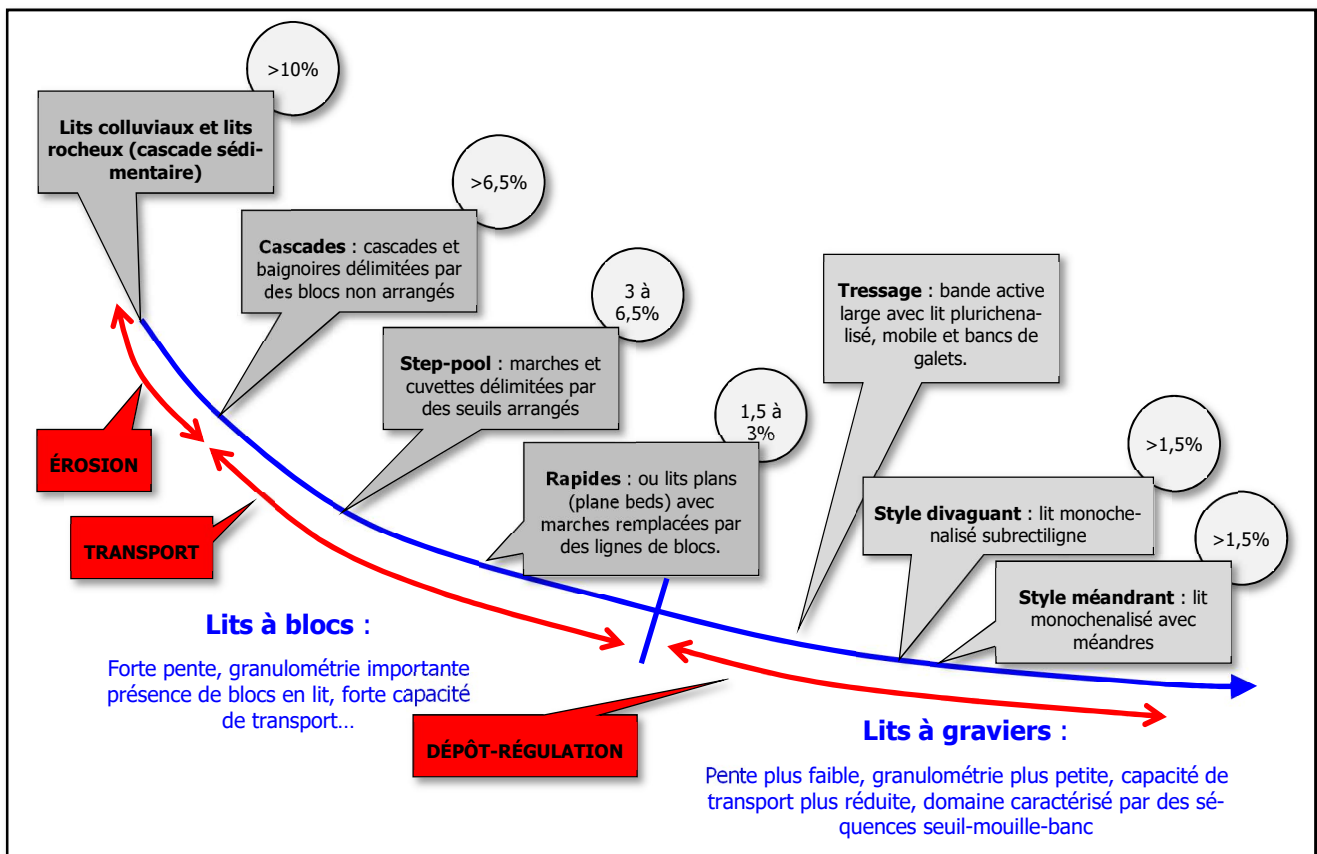


Figure 4 : Gradient morphologique des lits fluviaux

2.4 La trajectoire géomorphologique d'un cours d'eau

Un cours d'eau est une entité dynamique qui présente une trajectoire, c'est-à-dire dans le sens d'une courbe décrite dans le temps par cette entité. Elle intègre ainsi le passé, le présent et le futur et exprime la dynamique du cours d'eau en fonction de son évolution géomorphologique.

Ainsi, la trajectoire géomorphologique d'un cours d'eau se caractérise par trois composantes en interrelation :

- **L'héritage géomorphologique***, c'est-à-dire le vécu (passé) du cours d'eau, dont les derniers siècles, et particulièrement les dernières décennies, sont très importants étant donné qu'ils influencent directement le présent ;
- Le **fonctionnement dynamique***, qui correspond au fonctionnement actuel du cours d'eau et qui pourrait évoluer très vite sous l'effet d'une crue morphogène ou de modifications anthropiques ;
- **L'évolution dynamique*** qui est sous influence de l'héritage géomorphologique et qui reflètera les crues morphogènes subies et les aménagements et/ou modes de gestion générés par l'Homme.

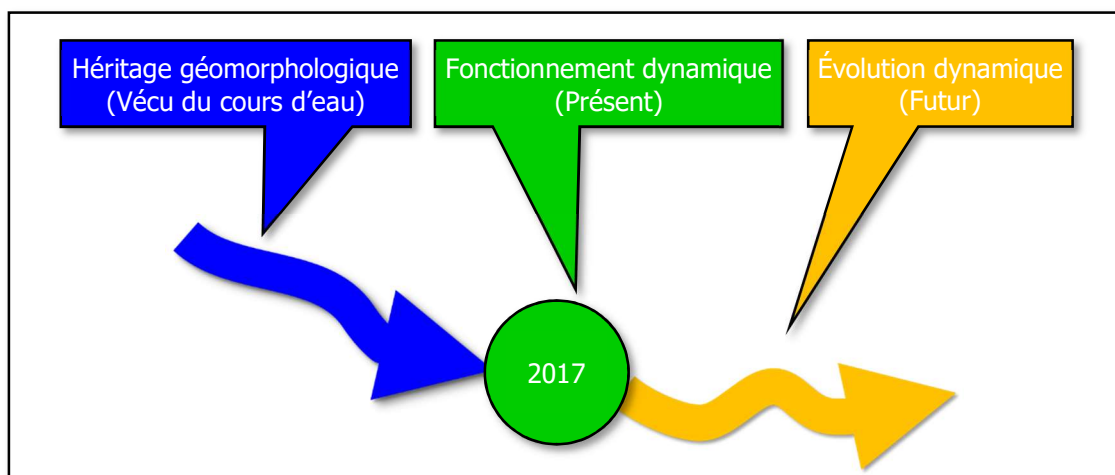


Figure 5 : Les trois composantes de la trajectoire géomorphologique d'un cours d'eau

2.5 L'incision

A Une tendance durable

L'incision d'un lit fluvial peut provoquer plusieurs effets pervers qui se cumulent et se renforcent (rétroaction positive au sens de Bravard & Petit, 1997) sans aucun phénomène de régulation, car le fonctionnement naturel (équilibre dynamique symbolisé par la balance de Lane) est dégradé, voire rompu, au moins à court et moyen termes.

Cette dégradation n'est toutefois pas identique sur l'ensemble du profil en long du cours d'eau. L'incision n'est pas générale, mais globalement généralisée, c'est une **tendance lourde**.

En effet, les discontinuités du *continuum* sédimentaire (Vannote *et al.*, 1980) ne sont pas régulièrement réparties et se font sentir sur une plus ou moins longue distance tant vers l'aval que vers l'amont. Il y a donc des zones excédentaires (s'exhaussant) et des zones déficitaires (s'incisant), mais la tendance générale pour le lit est à l'incision.

Cette dégradation du fonctionnement dynamique est la plupart du temps **irréversible naturellement** à court, voire à moyen, termes (Bravard, 1994). C'est donc une **évolution dynamique durable**.

En effet, la balance de Lane est bloquée durablement en position déséquilibrée, le blocage se renforçant au fil du temps par autodéstabilisation et la réponse morphologique à l'incision n'est plus adaptée.

Seules des modifications substantielles dans les apports et les conditions d'écoulements pourraient ré-équilibrer ce processus dégradé. C'est pourquoi, il est nécessaire de mettre en place une stratégie d'accompagnement pour essayer d'apporter une réversibilité « anthropique » à ces phénomènes de dégradation.

Cette réversibilité ne pourra donc se faire que par un **forçage assisté du système**, basé sur un transfert des matériaux rétablissant une certaine continuité sédimentaire.

B Les effets de l'incision

Les effets de l'incision des lits fluviaux sont maintenant bien connus :

- **L'abaissement de la ligne d'eau** conduit à l'abaissement de la nappe d'accompagnement ce qui a un effet direct sur la forêt alluviale. Celle-ci se trouve déconnectée du cours d'eau qui pourtant est le moteur de son évolution.

En effet, cette évolution passe par des processus allogéniques* de régénération de la forêt alluviale lors des crues, et notamment l'arrachement des arbres sénescents (arbres du passé), laissant les arbres du présent, qui ralentissent ce flux, se développer (Piégay, Pautou & Ruffinoni, 2003).

Ainsi, la crue amène des sédiments, des nutriments et des diaspores* d'espèces pionnières qui colonisent les clairières dégagées et constituent le moteur de la régénération et de l'évolution de la forêt alluviale. Les premiers stades arborés de la communauté de bois tendre (saules, peupliers noirs, aulnes...) apparaissent alors (arbres potentiels).

Ainsi, l'incision par l'abaissement du toit de la nappe d'accompagnement et la diminution de la fréquence, voire de la disparition, des inondations dans la forêt alluviale, provoque des réajustements dans les communautés végétales de cette forêt et génère à terme une véritable métamorphose de la couverture végétale (Piégay, Pautou & Ruffinoni, 2003).

- **La stabilité des ouvrages d'art**, dont les fondations d'appui (culées, piles...) ont été certainement édifiées sans prendre en compte ce phénomène. Il en est de même pour les confortements de berge dont les fondations (semelles d'ancrage...) peuvent se trouver déstabilisées.
- **La déconnexion des structures alluvionnaires*** du stock alluvial* normalement facilement remobilisables. En effet, lorsque le lit n'est pas incisé, les structures alluvionnaires sont régulièrement mobilisées avant qu'elles ne se fixent par végétalisation (strate arborée). L'incision diminue, voire interdit, la remobilisation des structures alluvionnaires ce qui favorise alors leur végétalisation. C'est autant de matériaux qui sont soustraits au stock alluvial et qui contribuent à favoriser l'incision en n'apportant plus de charge solide localement, c'est un phénomène « d'auto-dérégulation » de l'équilibre sédimentaire (cf. Balance de Lane).

2.6 Métamorphose fluviale et temporalité

Sous nos latitudes, la trajectoire géomorphologique des cours d'eau est donc perturbée par une double **métamorphose fluviale** (au sens de Schumm, 1977 ; Bravard, 1989). En effet, les forçages climatiques et anthropiques ont modifié les variables de contrôle (le transit sédimentaire) et ont eu un tel impact que la morphologie et donc le fonctionnement des cours d'eau en ont été durablement modifiés.

Ces modifications sont tellement rapides et importantes qu'elles dépassent alors la **capacité de réajustement** des cours d'eau entraînant alors des changements irrémédiables, tels qu'une incision généralisée.

Le temps de réponse à ces forçages externes est plus ou moins long. Knighton (1984) a proposé un schéma spatio-temporel illustrant la réponse d'un cours d'eau à différents forçages (cf. Figure 6). Ce schéma met en relation la longueur du profil en long perturbé et les ajustements dans le temps permettant de retrouver un équilibre dynamique cohérent.

Toujours d'après Knighton (1984), la réponse dynamique aux différents forçages externes comprend plusieurs temps (cf. Figure 7).

- Un **temps de réaction** qui correspond à la période de mise en œuvre de réajustements du cours d'eau pour réactiver une dynamique fonctionnelle ;
- Un **temps de relaxation** qui correspond à la période nécessaire pour rechercher un nouvel équilibre intégrant les nouvelles conditions dynamiques.

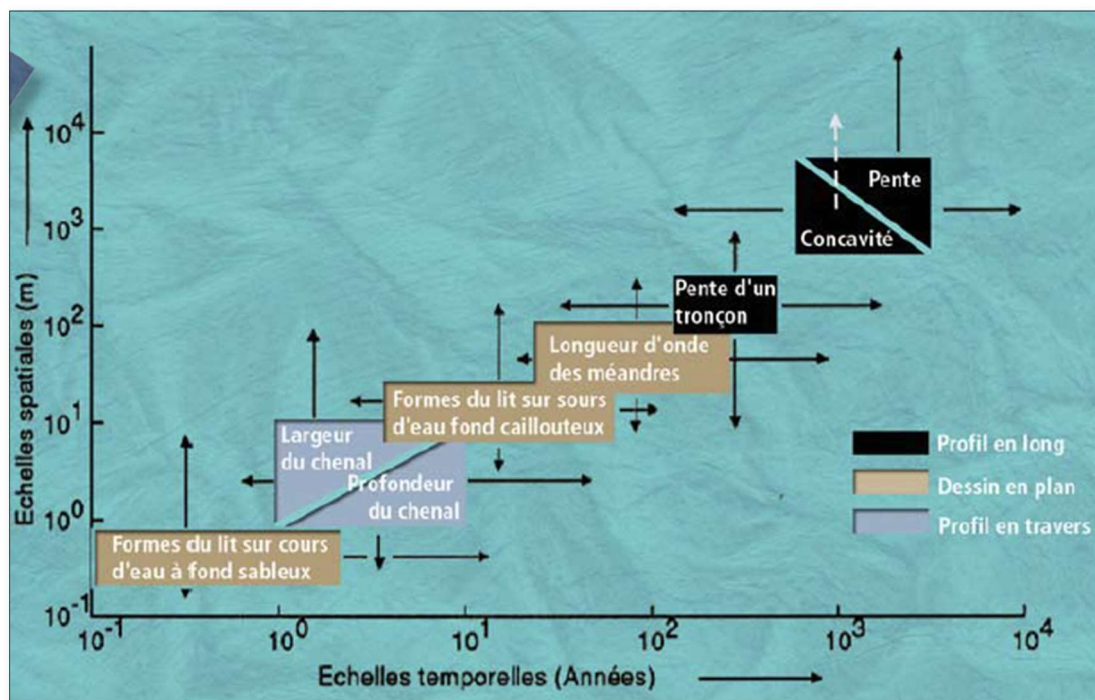


Figure 6 : Réponse temporelle à une perturbation suivant l'impact sur le profil en long (Malavoi & Bravard, 2010 d'après Knighton, 1984)

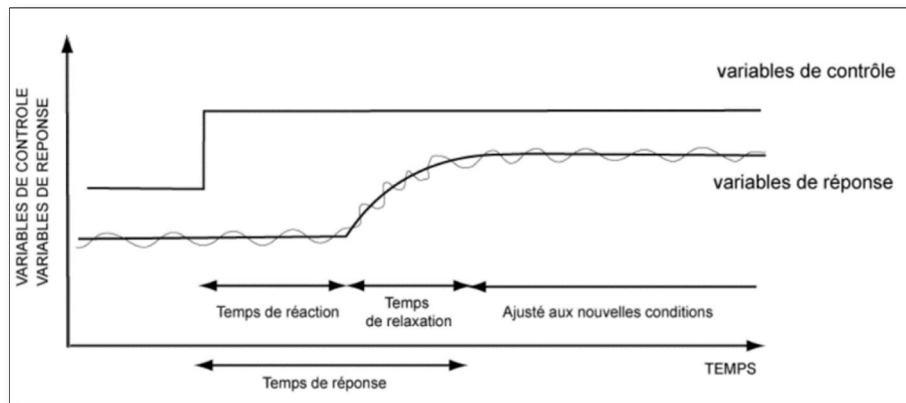


Figure 7 : Temps de réponse d'un cours d'eau suite à une perturbation (d'après Knighton, 1984)

Par ailleurs, il est à noter que le **temps géomorphologique** et le **temps de gestion** concernent des échelles de temps qui sont en total décalage (cf. Tableau 2). C'est pourquoi des stratégies d'accompagnement des processus d'évolution et/ou de réajustements des cours d'eau, voire la création de réajustements spécifiques, doivent être développées.

| TEMPS GÉOMORPHOLOGIQUE <i>VERSUS</i> TEMPS DE GESTION | | | |
|---|------------------------|------------------|--------------------|
| Terme | Temps géomorphologique | Temps de gestion | |
| | | Durée | Nature |
| Court terme | 10-100 ans | 0-5 ans | Mandat |
| Moyen terme | 100-10 000 ans | 5-10 ans | Programme |
| Long terme | 100 000 ans et + | 10-30 ans | Vision prospective |

Tableau 2 : Hiatus entre le temps géomorphologique et le temps de gestion

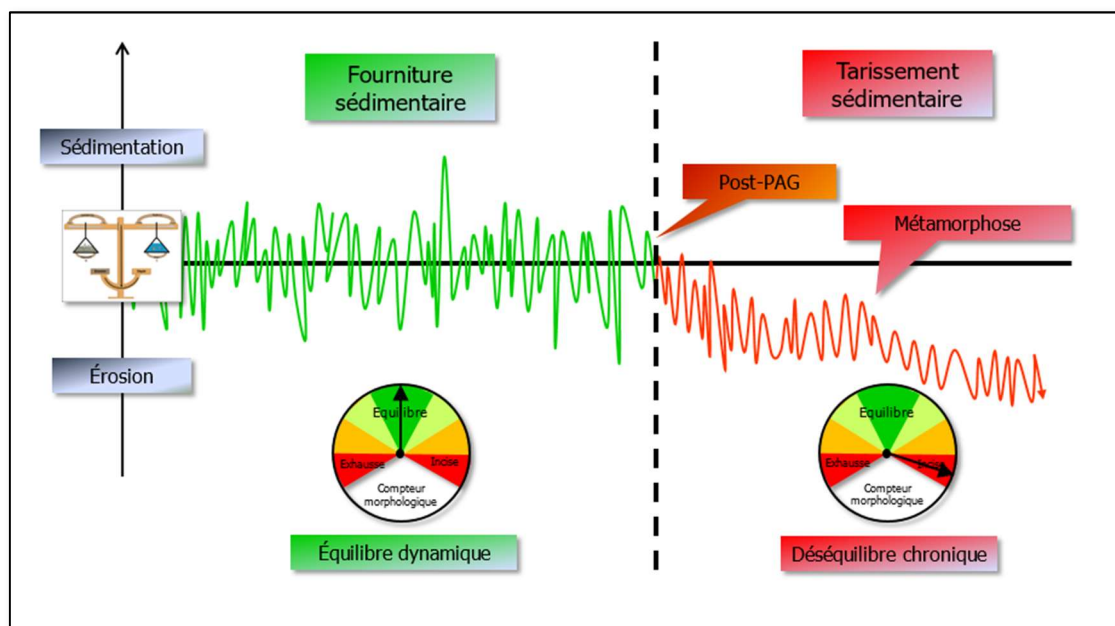


Figure 8 : Exemple de trajectoire géomorphologique perturbée suite à un déséquilibre sédimentaire lié aux métamorphoses climatiques et anthropiques

2.7 Les tressages : un style fluvial particulier

A Définition et rôle des tressages

La bande active d'un cours d'eau

C'est pour les systèmes en tresses que l'on parle préférentiellement de bande active.

En effet, la bande active des cours d'eau en tresses se caractérise par des chenaux et des structures alluvionnaires non végétalisées qui sont très mobiles. Elle est donc très facilement identifiable.

Par extension, la bande active concerne la bande dans laquelle s'écoule un cours d'eau et où se concentre l'activité morphogène, notamment les chenaux et les dépôts sédimentaires.

En particulier, ce terme est approprié pour caractériser le fuseau dans lequel une crue morphogène de type Basse Fréquence Haute Magnitude a identifié des chenaux et des structures alluvionnaires avant qu'elle ne se rétracte au fil des ans (par végétalisation et/ou enfoncement du lit).

Le tressage au sens de Tricart (1977) est un style fluvial caractérisé par un patron géomorphologique très particulier. En effet, le cours d'eau présente un tracé subrectiligne, multi-chenalisé et s'écoule dans une bande active (*cf.* Encart 1) large et généralement peu ou pas végétalisée.

Arscott *et al.*, (2000) précisent que les tressages sont en perpétuelle évolution (spatialement et temporellement).

Malgré la multichenalisation, un chenal dominant (voire deux) est généralement observable (Malavoi & Bravard, 2010). Les chenaux secondaires sont plus ou moins nombreux et peuvent être diachrones : certains sont perchés par rapport au chenal dominant et sont donc mis en eau en fonction des débits roulés par le cours d'eau (Malavoi *et al.*, 1998).

Encart 1 : La bande active d'un cours d'eau

Les tressages ont un rôle hydromorphologique et hydrologique importants (Wiederkehr *et al.*, 2008) :

- Ils constituent des zones de stockage et donc de régulation du transport solide et sont ainsi essentiels pour rythmer la migration de la charge grossière ;
- Ils limitent le risque d'embâcle en aval car ils sont généralement peu ou pas végétalisés et peuvent ainsi peigner les embâcles ;
- La largeur de la bande active généralement conséquente permet le stockage des eaux en crue et minimise l'accélération des vitesses d'écoulement.

Les tressages ont donc un effet sur la morphogénie des crues.

B Morphogénèse des tressages

Les conditions d'apparition d'un tressage sont liées à la conjonction de plusieurs éléments dont les principaux sont la **surabondance de la charge alluviale** et la **forte érodabilité des berges**, et dont les secondaires sont la forte variabilité des débits et une puissance spécifique* importante (Léopold & Wolman, 1957 ; Schumm, 1977 ; Knighton, 1984).

D'après Wiederkehr (2008), le facteur important est le rapport entre l'abondance de la charge de fond et la compétence au transport, dont la capacité est somme toute limitée par rapport à l'amont puisque les zones de tressages sont des zones d'accumulation.

Bourdin (2004) indique que la surabondance de la charge de fond est le facteur primordial, l'érodabilité des berges étant pour lui nettement moins importante dans la genèse et l'évolution des tressages. D'autres auteurs minimisent également le rôle de la pente dans les tressages (Bravard, 1998 ; Saulnier, 1999 ; Habidis, 2006), donc celui de la puissance spécifique du cours d'eau.

Il est à noter que les tressages se concentrent souvent dans des zones caractérisées par une rupture de pente entre l'amont et l'aval.

Des analyses historiques de tressages ont montré que ce sont essentiellement des **apports solides réguliers et conséquents** qui permettent leur maintien, voire leur expansion (Church, 1983 ; Madej & Ozaki, 1996 ; Liébault *et al.*, 2005).

D'après Fergusson (1993), la puissance spécifique* permettant le déclenchement et le développement du tressage serait de 150 à 200 W/m². Cette puissance spécifique est toutefois relativement conséquente puisque l'on considère qu'un cours d'eau a des capacités de réajustement au-dessus de 35 W/m² (Brookes, 1988).

Richard (1982) module l'importance de la puissance du cours d'eau dans la morphogénèse des tressages en expliquant qu'il faut relier la puissance avec la granulométrie de la charge de fond. Ainsi, un cours d'eau dont la pente est modeste, pourra développer un tressage à la condition de présenter un débit à pleins bords conséquent et une charge de fond de faible granulométrie.

Toutefois, la charge de fond doit présenter une granulométrie étendue et contenir une fraction grossière qui dépasse la compétence au transport du cours d'eau. En effet, d'après Malavoi *et al.* (1998), c'est cette fraction qui est à l'origine des premiers dépôts qui, en s'engraissant, conduisent au tressage avec une progression du phénomène vers l'aval (progradation).

La surabondance de la charge solide explique le tracé globalement subrectiligne des tressages. En effet, ce tracé traduit un ajustement en plan permettant d'évacuer la charge solide en cherchant ainsi à augmenter la puissance du cours d'eau. Pour avoir un rendement optimal en matière de transport solide, le cours d'eau va donc chercher à avoir **la pente la plus proche possible de celle de la vallée** (Malavoi & Bravard, 2010).

Enfin, lorsqu'un chenal dominant est très marqué et très sinueux, ces éléments seraient les signes d'une métamorphose (au sens de Bravard, 1989), c'est-à-dire un changement radical de style fluvial, conduisant à terme à la disparition du tressage qui évolue vers un style vagabond. Cette métamorphose serait due à un tarissement sédimentaire, la charge de fond étant la variable principale de contrôle du tressage.

C Un style fluvial relictuel en cours de métamorphose

Piégay *et al.* (2009) pensent que les tressages n'ont plus qu'un **caractère relictuel** compte tenu du tarissement sédimentaire lié à l'évolution des conditions climatiques (sortie du Petit Âge Glaciaire et réchauffement climatique en cours) et à l'impact des activités anthropiques (compartimentage du lit bloquant la charge, corsetage limitant la recharge, extractions...).

Cette situation serait révélatrice du fait que les tressages ne sont plus en équilibre avec les conditions climatiques actuelles. Ainsi, la disparition des zones en tresses depuis la fin du XIX^{ème} siècle dans les Alpes est avérée et bien documentée (Bravard & Peiry, 1993 ; Liébault *et al.*, 2008...).

L'extension maximale des tressages dans les Alpes, et en particulier sur le bassin Rhône Méditerranée Corse, se situe à la fin du Petit Âge Glaciaire (milieu du XIX^{ème} siècle). Ainsi, Bourdin (2004) a repéré 1 066 km de tressage sur les cartes de l'État-Major éditées entre 1820 et 1866. Actuellement, il reste 650 km de tressage actif sur ce territoire (Piégay *et al.*, 2009), soit une diminution de 39% des linéaires de tressage en un siècle et demi environ.

En conséquence, la plupart des tressages ne seraient que les **témoins de conditions climatiques révolues** et pourraient donc être voués à disparaître dans les décennies qui viennent.

D Évolution des tressages et de leur bande active

Les tressages évoluent et passe donc par différents stades d'évolution : expansion, contraction ou stabilité de la bande active. L'élargissement et le rétrécissement de la bande active sont en fait des réponses (ajustements géométriques) à la variabilité temporelle des débits solide et liquide (Schumm, 1977 ; Piégay *et al.* 2003). On parle alors de respiration de la bande active.

Bien que les conditions mêmes conduisant au tressage et à son évolution apparaissent mal connues, la communauté scientifique s'accorde sur le fait que l'évolution des tressages et de leur bande active est sous contrôle à la fois de la fourniture sédimentaire et des crues morphogènes. L'évolution s'effectue donc à deux échelles de temps emboîtées :

- **Évolution tendancielle** (moyen et long termes) liée aux conditions climatiques : l'expansion des tressages serait liée à une fourniture sédimentaire importante et continue, tandis que leur rétraction, voire leur disparition (monochenalisation), serait due à une fourniture sédimentaire limitée se tarissant dans le temps et générant une incision du lit (Leduc, 2013).
- **Évolution événementielle** (court et moyen termes) liée aux conditions hydrologiques : on constate que les bandes actives les plus larges se rencontrent après les crues morphogènes (Piégay *et al.*, 2009). En fait, la bande active s'élargit après les crues morphogènes et a tendance à se rétracter lors des périodes de calme hydrologique entre deux crues morphogènes (temps de relaxation), notamment par le développement de la végétation. L'intensité des crues n'est pas proportionnelle à l'élargissement de la bande active (Piégay *et al.*, 2009).

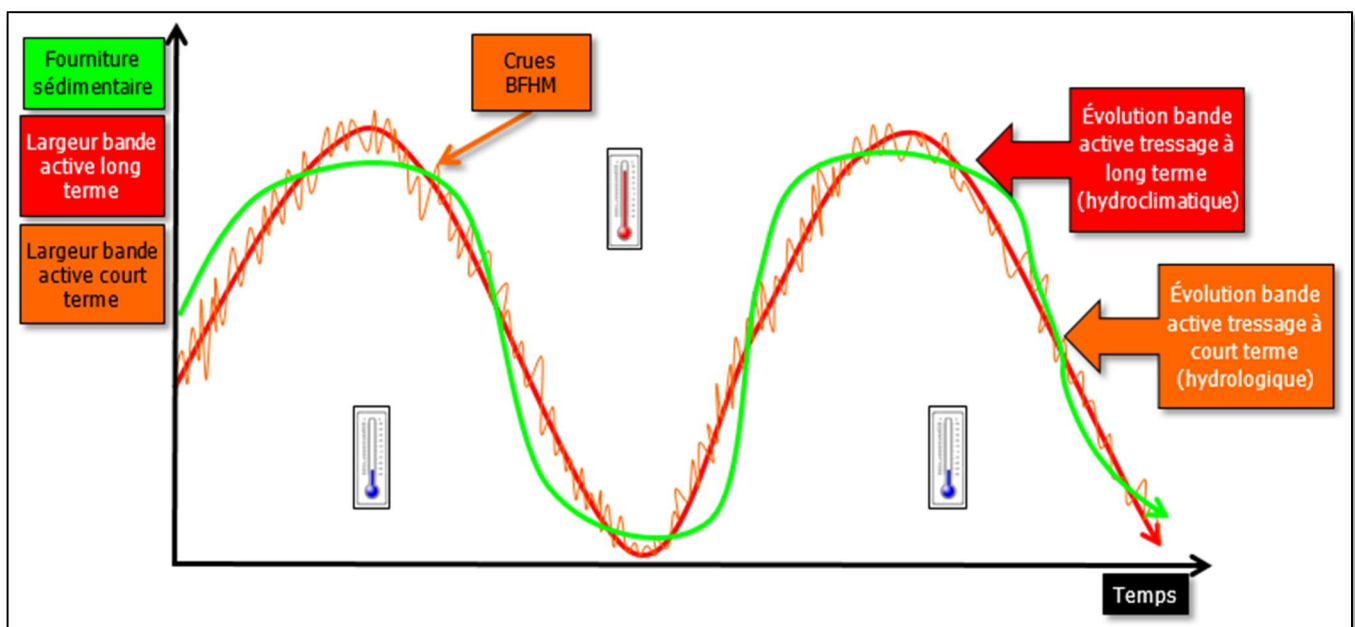


Figure 9 : Évolutions événementielle et tendancielle de la bande active

On peut rencontrer des tressages sur des lits stables (en équilibre sédimentaire) comme sur des lits incisés ou ayant tendance à s'exhausser. Toutefois, leur évolution dynamique est bien différente. Il est à noter que 56% des tressages dans les Alpes sont en incision (Piégay *et al.*, 2009), ce qui peut être considéré comme un indice de leur rétraction, voire de disparition en cours.

Dans les lits incisés, les bancs situés dans la bande active et délimitant les chenaux ont ainsi tendance à se végétaliser car ils sont plus rarement submergés que dans les bandes actives des tressages s'exhausant ou stables sédimentairement (Piégay *et al.*, 2009). Cette situation conduit à une rétraction de la bande active (Liébault & Piégay, 2002 ; Piégay *et al.*, 2009). Par contre, les tressages s'exhausant ont une bande active large et ne semblent donc ne pas se rétracter (Piégay *et al.*, 2009).

Il en est de même pour les profils en long qui présentent des caractéristiques particulières suivant l'évolution du tressage. Effectivement, ceux des tressages incisés sont concaves, tandis que ceux s'exhausant apparaissent convexes. Cette convexité serait liée à l'accumulation des matériaux (Church & Jones, 1982).

Les extractions et les curages ont également un effet sur la trajectoire des zones en tresses. En effet, d'après Piégay *et al.* (2009), les tressages s'exhaussant ou stables sont ceux où il y a eu le moins de prélèvements.

Les zones de tressage présentent à la fois un dynamisme spatial et temporel (rajeunissement permanent du milieu), ce qui se traduit en termes d'habitats par une grande richesse et un dynamisme important (Piégay *et al.*, 2009). Toutefois, compte tenu de la répartition de la lame d'eau dans plusieurs bras et de leur faible profondeur à l'étiage, la température de l'eau peut y être élevée l'été (Mosley, 1983).

E L'évolution des tressages par rétraction de la bande active

La rétraction des bandes actives est un phénomène bien connu et documenté, notamment dans les Alpes. Comme indiqué précédemment, la rétraction des bandes actives est couplée à une incision du lit et conduit à une monochenalisation, c'est-à-dire à terme, à la disparition du tressage (évolution vers un style fluvial vagabond puis méandrant).

Miramont & Guilbert (1997) comme Liébault & Taillefumier (2000) imputent ce phénomène de rétraction des bandes actives à la **raréfaction des crues** Basse Fréquence Haute Magnitude*. Cela revient également à parler de tarissement sédimentaire, puisque ces crues sont particulièrement morphogènes et participent alors activement au transport solide.

Pour Flez & Garitte (2005), la rétraction des bandes actives serait due au cumul de paramètres géomorphologiques et climatiques liés à la sortie du Petit Âge Glaciaire, mais également au forçage anthropique (compartimentage et corsetage du lit, curage, extractions, reboisement notamment dans les zones de production primaire...).

Artéfacts hydromorphologiques

Les artéfacts sont des phénomènes liés à une cause anthropique ou naturelle altérant plus ou moins fortement et durablement le fonctionnement dynamique d'un cours d'eau. On peut citer comme exemple le temps de relaxation d'une crue ou encore l'atterrissement d'un seuil.

Encart 2 : Les artéfacts hydromorphologiques

Toutefois, la rétraction des bandes actives est un phénomène réversible : la bande active se réactive lors d'une crue Basse Fréquence Haute Magnitude, comme l'ont montré Flez & Lahousse (2003) Arnaud-Fassetta & Fort (2004) sur l'Ubaye, ou encore HYDRETTUDES (2015) sur le gave de Pau dans les Pyrénées.

Mais il convient de nuancer ce propos, si la tendance du cours d'eau est à l'incision, l'expansion liée à la crue Basse Fréquence Haute Magnitude ne sera

qu'un artéfact hydromorphologique (*cf.* Encart 2) et la tendance lourde restera à la rétraction et à la métamorphose fluviale, donc à la disparition du style en tresses.

Le boisement spontané des marges latérales, voire de la bande active, est un élément important dans ce phénomène de rétraction des bandes actives. Ainsi, Liébault & Piégay (2001) explique que depuis 1945 et le changement de pratiques pastorales dans les lits majeurs, la rétraction des bandes actives a fortement progressé, en particulier dans les Alpes.

Tal *et al.* (2004) ou encore Beletti *et al.* (2010) précisent la relation directe entre la végétalisation des corridors alluviaux et la rétraction des bandes actives.

La végétalisation de la bande active, corolaire de sa rétraction, contribue ainsi à favoriser l'expansion de la bande active lors d'une crue morphogène. C'est ce qu'HYDRETTUDES (2015) a constaté sur le gave de Pau, la bande active s'étant fortement rétractée depuis 1937 (dernière crue Basse Fréquence Haute Magnitude).

3 Présentation du bassin versant « Haute-Romanche-Oisans »

3.1 Contexte géographique

La Romanche prend sa source dans la commune de Villar-d'Arène dans les Hautes-Alpes à 2 150 mètres d'altitude au glacier de la Plate des Agneaux dans la partie Nord du massif des Écrins et rejoint le Drac à Champ-sur-Drac après un parcours de 78 kilomètres. Principal affluent de rive droite du Drac, elle draine ainsi un bassin versant d'une superficie de 1 200 km².

La Haute-Romanche-Oisans concerne la partie amont du bassin versant composée de la Haute-Romanche jusqu'à la confluence avec le Vénéon et de la plaine de Bourg d'Oisans jusqu'à l'Eau d'Olle à Bourg d'Oisans, soit un linéaire de 48 kilomètres et un bassin versant d'une superficie d'environ 995 km² orienté Est/Nord-Ouest.

Le réseau hydrographique y présente de nombreux affluents, dont certains constituent des contributeurs sédimentaires potentiels pour la Romanche, tels que le Ferrand et le Vénéon pour la Haute-Romanche et la Lignarre, la Sarenne et l'Eau d'Olle dans la plaine de Bourg d'Oisans.

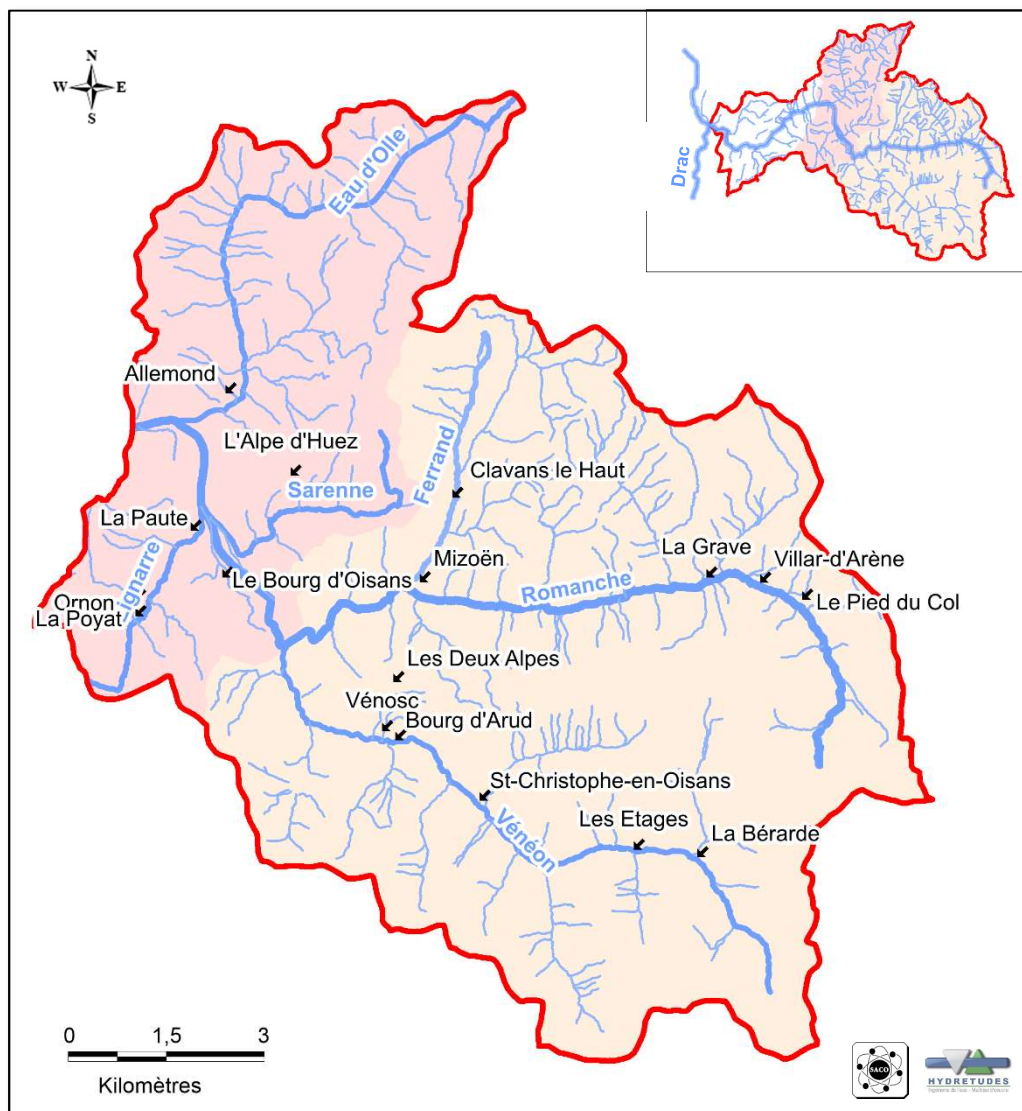


Figure 10 : Localisation du bassin versant Haute-Romanche-Oisans

3.2 Topographie

Situé en haute montagne, le bassin versant amont de la Romanche présente une altitude comprise en 765 et 3 285 mètres (*cf.* Figure 11). Il s'inscrit dans le massif des Écrins marqué par la présence de plusieurs glaciers délimitant notamment les contours du bassin versant du Vénéon : au Sud, le glacier de la Pilatte, le glacier du Vallon des Étançons, le glacier du Chardon, et au Nord, le glacier de la Girose et le glacier de la Meije.

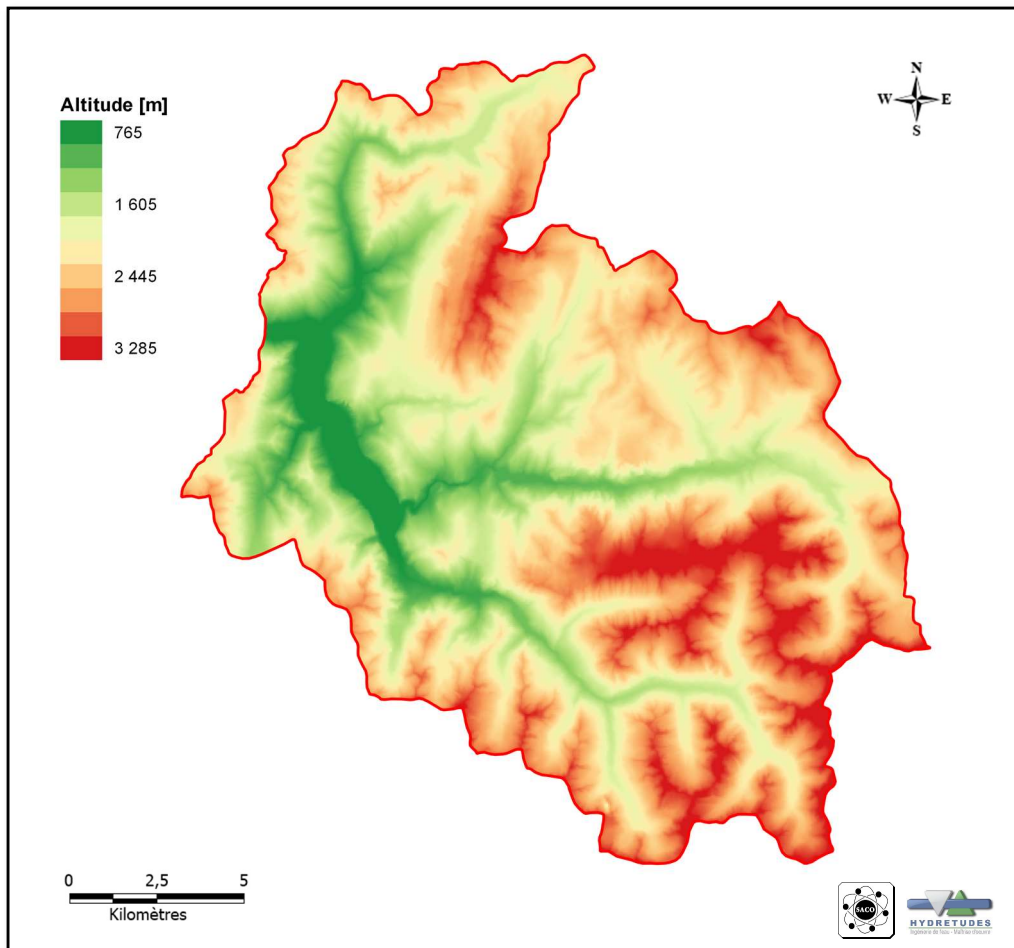


Figure 11 : Cartographie du relief du bassin versant Haute-Romanche-Oisans
(Fond de plan : BD Alti IGN)

3.3 Occupation du sol

Le bassin versant amont de la Romanche est un bassin montagnard profondément marqué par l'érosion glaciaire. Les modelés glaciaires développent ainsi sur le tracé des vallées une succession d'étroitures (verrous, gorges) et d'ouvertures (bassins intra-montagnard qui sont des ombilics liés au surcreusement glaciaire remblayés ensuite par des matériaux fluvioglaciers lors de la décrue et de la fonte des glaciers). Les villes et villages du bassin versant amont de la Romanche, tels que Boug d'Oisans et Bourg d'Arud, se sont ainsi développés principalement dans les ombilics ou sur des cônes torrentiels (comme La Grave, Vénosc...).

La vallée de la Romanche a été équipée dans l'entre-deux guerres (Clapiers, Chambon), celle du Vénéon a vu la construction de l'unité de production de Plan du Lac.

Une agriculture traditionnelle perdure encore. Elle est centrée sur l'élevage viande et laitier (ovin et bovin) et caprin (laitier). Le lait est transformé sur place (fromage). Cette agriculture traditionnelle tournée vers l'élevage s'accompagne de cultures fourragères (prairies de fauche) et utilise également dans les alpages. Les exploitations sont souvent diversifiées (polyculture et polyélevage). Dans la plaine de Bourg d'Oisans, on trouve également de la culture céréalière.

L'agriculture de montagne s'est développée sur des cônes alluviaux et des terrasses d'origine fluvio-glaciaire (placage morainique, éboulis paraglaciaire...). On en trouve encore des reliques comme dans le secteur de La Grave et Villar-d'Arène, où une agriculture agro-pastorale active se développait jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle.

La production forestière est également présente mais limitée par le relief accidenté et le climat (production faible, coût élevé des dessertes, absence d'industries utilisatrices sur place). La forêt a un rôle de protection contre les risques naturels (éboulements, coulées de débris, avalanches...).

Actuellement, l'activité principale est le tourisme avec les stations de l'Alpe d'Huez et des Deux Alpes pour l'hiver et les activités de pleine nature pour l'été.

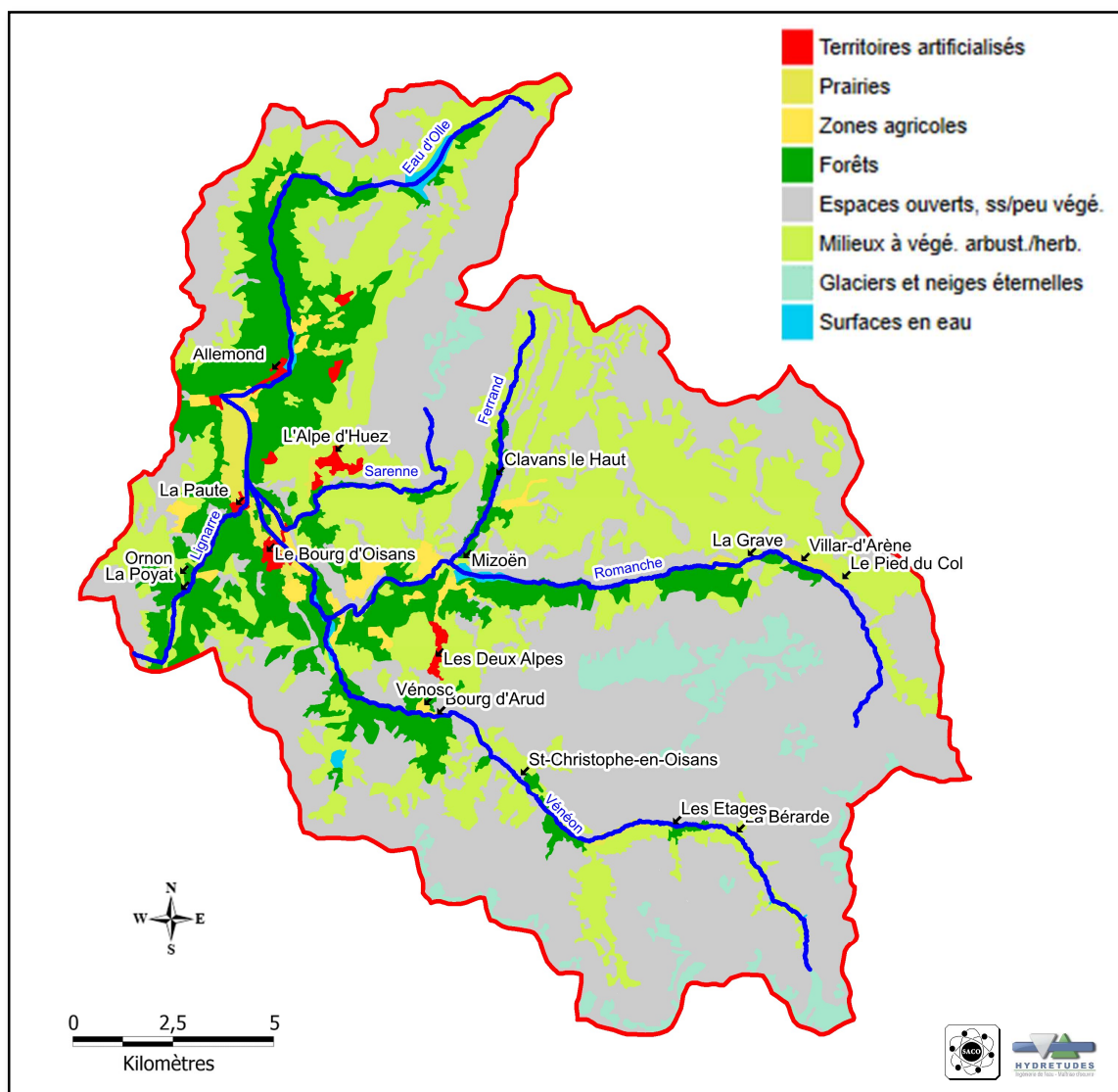


Figure 12 : Cartographie de l'occupation du sol du bassin versant amont de la Romanche
(Source : Corine Land Cover 2012)

3.4 Contexte hydrologique

Le bassin versant amont de la Romanche présente des aménagements hydroélectriques majeurs qui modifient notablement le régime hydrologique naturel de la Romanche (barrage du Chambon et du Clapier) et de certains affluents, en particulier le Vénéon (barrage de Plan du Lac) et l'Eau d'Olle (barrage de Grand'Maison).

Le bassin versant amont de la Romanche dispose d'un réseau d'observation constitué de quatre stations hydrométriques gérées par EDF pour la gestion des ouvrages. Le Tableau 3 synthétise les principales caractéristiques des stations hydrométriques présentes sur le territoire d'étude.

Il convient de noter que les stations implantées sur des rivières torrentielles présentent une incertitude de mesure assez importante pour les forts débits, du fait de la forte évolution des débits *via* une faible évolution de la hauteur d'eau. C'est notamment le cas pour la Romanche à Mizoën et le Vénéon. Ainsi, la station la plus fiable tant pour le nombre d'années de mesure que par son implantation est la station de la Romanche à Champeau à la sortie de la plaine de Bourg d'Oisans.

| RÉSEAU D'OBSERVATION PRÉSENT SUR LE BASSIN VERSANT AMONT DE LA ROMANCHE | | | | | |
|---|-------------|--------------|--------------|-------------------------------|--------------------|
| Cours d'eau | Station | Code station | Altitude [m] | Superficie [km ²] | Période disponible |
| Romanche | Mizoën | W2714010 | 1 057 | 220 | [1948-2014] |
| Romanche | Champeau | W2764010 | 701 | 1 000 | [1951-2015] |
| Vénéon | Les Étages | ? | ? | 220 | [1969-2016] |
| Eau d'Olle | La Pernière | W2755010 | 713 | 172 | [1951-2014] |

Tableau 3 : Principales caractéristiques des stations hydrométriques présentes sur le bassin versant

La Romanche présente un régime hydrologique nival, c'est-à-dire caractérisé par un pic de débit marqué en juin lié à la fonte des neiges rapide se produisant durant le printemps (avril-mai). La période d'étiage est peu marquée. Le Vénéon présente un régime hydrologique glaciaire dans sa partie haute, puis nivoglacière en aval, d'où une période de hautes eaux en été (juillet) due à la fonte de neige et de glace, et une période d'étiage très prononcée de la fin de l'automne au début du printemps.

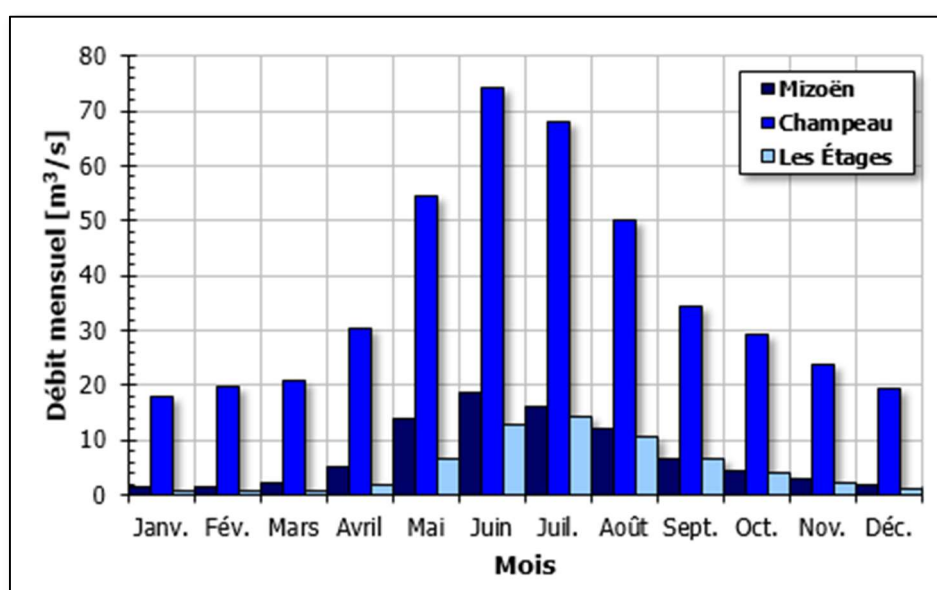


Figure 13 : Débits moyens mensuels de la Romanche et du Vénéon (d'après Banque Hydro)

3.5 Contexte géologique

A Histoire géologique de la région

L'orogénèse alpine

Le terme « orogénèse » désigne les processus aboutissant à la formation d'une chaîne de montagne.

Amorcée par la remontée vers le Nord de l'Afrique et de l'Arabie vers l'Eurasie au début du Crétacé inférieur il y a 100 Ma d'années, la formation de l'arc montagneux alpin commence réellement au début du Cénozoïque (45 Ma d'années), lorsque les plaques continentales entrent en collision.

Durant tout le Crétacé, la subduction s'effectue entre deux plaques océaniques, ce qui explique la présence de roches sédimentaires dans la géologie de la Romanche. La collision continentale débutée il y a 45 Ma d'années s'accompagne d'un accroissement des forces mises en jeu, donc d'un fort métamorphisme des roches impactées.

Encart 3 : Les orogénèses

❖ Ère primaire (542 à 251 millions d'années)

Les terrains les plus anciens de la région, dans le massif des Pelvoux-Ecrins, sont cristallins d'âge paléozoïque (-542 ; -241 Ma d'années), voire antérieur. Au niveau de la Meije, ils constituent le socle anté-hercynien (-400 Ma d'années).

L'ensemble des roches granitiques et migmatitiques, sur lesquelles s'écoule la Romanche en amont du lac de Chambon, se sont formées à cette période et ont été remobilisées depuis le début de l'orogénèse alpine il y a 45 Ma d'années (cf. Encart 3).

La fin de l'orogénèse hercynienne à la fin du Permien (-254 Ma d'années) s'accompagne dans la région d'une sédimentation continentale à l'origine des bassins houillers conglomératiques de l'Ouest du lac de Chambon.

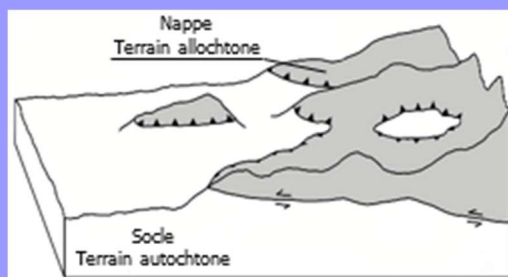
❖ Ère secondaire (-251 à -66 millions d'années)

Au début du Trias (-245 Ma d'années), la mer envahit progressivement la région d'est en Ouest. Au niveau de ce que l'on appelle la Zone Externe, située entre La Grave et Vizille, les eaux sont peu profondes et la sédimentation reste épicontinentale. Les premiers dépôts sont fins et mal conservés. Mais ceux du sommet du Trias (-205 Ma d'années) sont plus épais (avec gypses) du fait des massifs cristallins formant de hauts fonds.

Nappes de charriage

Une nappe de charriage est un ensemble de couche qui, sous les contraintes dues à une orogénèse, se sont décollées du socle et se sont déplacées horizontalement en glissant sur d'autres couches, et ce sur de grandes distances.

Par convention, on appelle la nappe déplacée le terrain « allochtone » et le socle en place sur laquelle elle s'est déposée, le terrain « autochtone ».



Encart 4 : Les nappes de charriage

Au cours du Jurassique (-200 ; -146 Ma d'années), des dépôts vaseux se mettent en place avec un accroissement des apports terrigènes durant le Jurassique moyen (-170 Ma d'années). Localement, des calcaires néritiques (formés dans la zone immergée surplombant le plateau continental) se déposent.

Le Crétacé inférieur et le Crétacé moyen ont été totalement érodés dans la zone externe et n'affleurent plus.

Dès la fin du Crétacé (-70 Ma d'années), la zone externe subit une tectonisation importante (dite phase arvinche), responsable de la formation des plis à axe est-ouest et d'écaillages vers le Nord, ainsi qu'une émergence de la région.

❖ *Ères tertiaire (-66 à -1,8 millions d'années) et quaternaire (depuis 1,8 millions d'années)*

Les glaciations du Quaternaire

Les glaciations désignent une succession de périodes glaciaires survenant régulièrement et séparées par des périodes interglaciaires.

| ÈRES GLACIAIRES DU QUATÉNAIRE | | |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Période glaciaire | Périodes interglaciaire | Années (BP) |
| Günz | → | 600 000 540 000 |
| - | Inter Günz-Mindel | 540 000 480 000 |
| Mindel | → | 480 000 430 000 |
| - | Inter Mindel-Riss | 430 000 240 000 |
| Riss | → | 240 000 180 000 |
| - | Inter Riss-Würm | 180 000 120 000 |
| Würm | → | 120 000 12 000 |

BP : Before Present étant entendu à partir de 1950 début des datations au ¹⁴C (carbone 14).

Encart 5 : Les périodes glaciaires du Quaternaire

L'Oligocène inférieur (-30 Ma d'années) voit la mise en place des nappes briançonnaises et sub-briançonnaise (*cf.* Encart 4) alors que l'orogénèse alpine est à son paroxysme. Au niveau de la zone externe, les figures structurales de la phase arvinche (plis, failles...) sont remobilisées. Les directions des contraintes étant cette fois-ci Nord-Sud, les axes des plis vont se déplacer jusqu'à prendre cette orientation.

Durant le Miocène (-5,3 à -23 Ma d'années), les massifs cristallins externes (Mont-Blanc et Belledonne) sont soulevés et comprimés. Les Alpes ont alors une hauteur de l'ordre de 3 000 mètres avec des reliefs beaucoup plus mous qu'aujourd'hui, les produits de l'érosion arrivent dans les bassins d'avant chaîne. Les reliefs supérieurs à 4 000 mètres sont récents (moins de 5 Ma d'années), ils ont été formés par incision glaciaire principalement.

Enfin, durant le Quaternaire, des alluvions glaciaires (moraines) et des dépôts de pente se mettent en place sous l'effet de l'avancée et du recul des glaciers lors des différentes glaciations (*cf.* Encart 5). Le volet concernant la période glaciaire qui constitue une part importante de l'héritage géomorphologique de la Romanche et du Vénéon est traité au chapitre 3.6.

B Érodabilité des formations

Dureté des minéraux

En 1812, Friedrich Mohs crée une échelle permettant de classer les minéraux par leur dureté en les comparant avec d'autres matériaux dont la dureté est déjà connue. Si cette échelle ne s'applique qu'aux minéraux, il est possible de se baser sur celle-ci pour estimer la dureté d'une roche (en fonction d'autres paramètres tels que la consolidation de la roche).

| ECHELLE DE DURETE (Mohs, 1812) | |
|--------------------------------|--------|
| Minéral | Dureté |
| Talc | 1 |
| Gypse | 2 |
| Calcite | 3 |
| Fluorine | 4 |
| Apatite | 5 |
| Orthose | 6 |
| Quartz | 7 |
| Topaze | 8 |
| Corindon | 9 |
| Diamant | 10 |

Encart 6 : Échelle de dureté des minéraux

Les formations géologiques ont toutes une résistance à l'altération propre. Il est possible de les classer par rapport à leur degré d'érodabilité*, ce qui permet d'avoir une idée plus précise des zones sensibles au phénomène d'érosion.

L'analyse des différentes formations traversées par la Romanche et le Vénéon (*cf.* Tableau 4) montrent que ces cours d'eau s'écoulent sur des terrains granitiques et gneissiques.

Ces roches métamorphiques dominantes du bassin (granites et gneiss) sont constituées de quartz (très résistant d'après l'échelle de Mohs – *cf.* Encart 6), de feldspath et de micas de plus faible résistance qui s'altèrent en particules argileuses.

Les roches métamorphiques présentes sur le bassin versant amont de la Romanche sont donc plutôt résistantes à l'érosion. En résistant ainsi à l'érosion glaciaire, lors des phases de glaciation, ces roches ont permis de dégager des couloirs (gorges). Les passées moins résistantes ont favorisé la création d'auges glaciaires dans la zone d'ablation du glacier

de la Romanche, c'est-à-dire la totalité du bassin. En effet, la zone d'accumulation du glacier se situe dans et en aval du couloir de Livet-Gavet (Coutterand, 2010).

La dureté des roches métamorphiques est visible au niveau du Chambon, verrou glaciaire constitué de gneiss migmatiques très résistants. *A contrario*, les schistes du Lias peu résistants ont permis le surcreusement glaciaire. Cet ensemble a ainsi permis la construction du barrage du Chambon en 1934-1935.

Les calcaires présents sur le bassin versant composés majoritairement de calcite sont consolidés et présentent une résistance à l'érosion mécanique, mais une résistance plus faible à l'altération chimique. Ils sont toutefois moins résistants que les granites à l'érosion mécanique.

| DESCRIPTION DES FORMATIONS TRAVERSÉES PAR LA ROMANCHE | | | | |
|---|--------------|---------------------|---|--|
| | Longueur (m) | Formation traversée | Nom commun | Description |
| 1 | 1 000 | Y1 | Granites de la Meije | Granite alcalin leucocrate à grains moyens |
| 2 | 6 000 | Mζ | Migmatites du Bec de l'Homme | Gneiss granitoïdique à grain très variable |
| 3 | 5 000 | My | Granites migmatitiques | Granites à faciès d'anatexites, disparition totale des structures planaires |
| 4 | 4 000 | I1-2 à I6-8 | Terrains sédimentaires de la zone dauphinoise | Sédiments principalement calcaires déposés au Lias supérieur et dogger inférieur |
| 5 | 10 000 | ζ | Gneiss et amphibolites indifférenciées | - |
| 6 | 2 000 | I1-2 à I6-8 | Terrains sédimentaires de la zone dauphinoise | Sédiments principalement calcaires déposés au Lias supérieur et dogger inférieur |
| 7 | 200 | Mζ | Gneiss migmatitiques | Gneiss riches en faldspaths, fortement affectés par la déformation de la région (plis, failles) |
| 8 | 100 | h4d-5a | Conglomérats houillers | Schistes noirs micacés, grès et conglomérats roses, en gros bancs alternants, à stratification irrégulière |
| 9 | 200 | Zg | Leptynite sériciteuse | Ancienne roche détritique volcanique, quartzo-feldspathique, métamorphisée dans l'épizone |
| 10 | 300 | h5a-4d | Conglomérats grès et schistes | Dépôt houiller sous forme de schiste noirs micacés, de grès, de conglomérats et de couches d'antracites |

Tableau 4 : Description des formations traversées par la Romanche

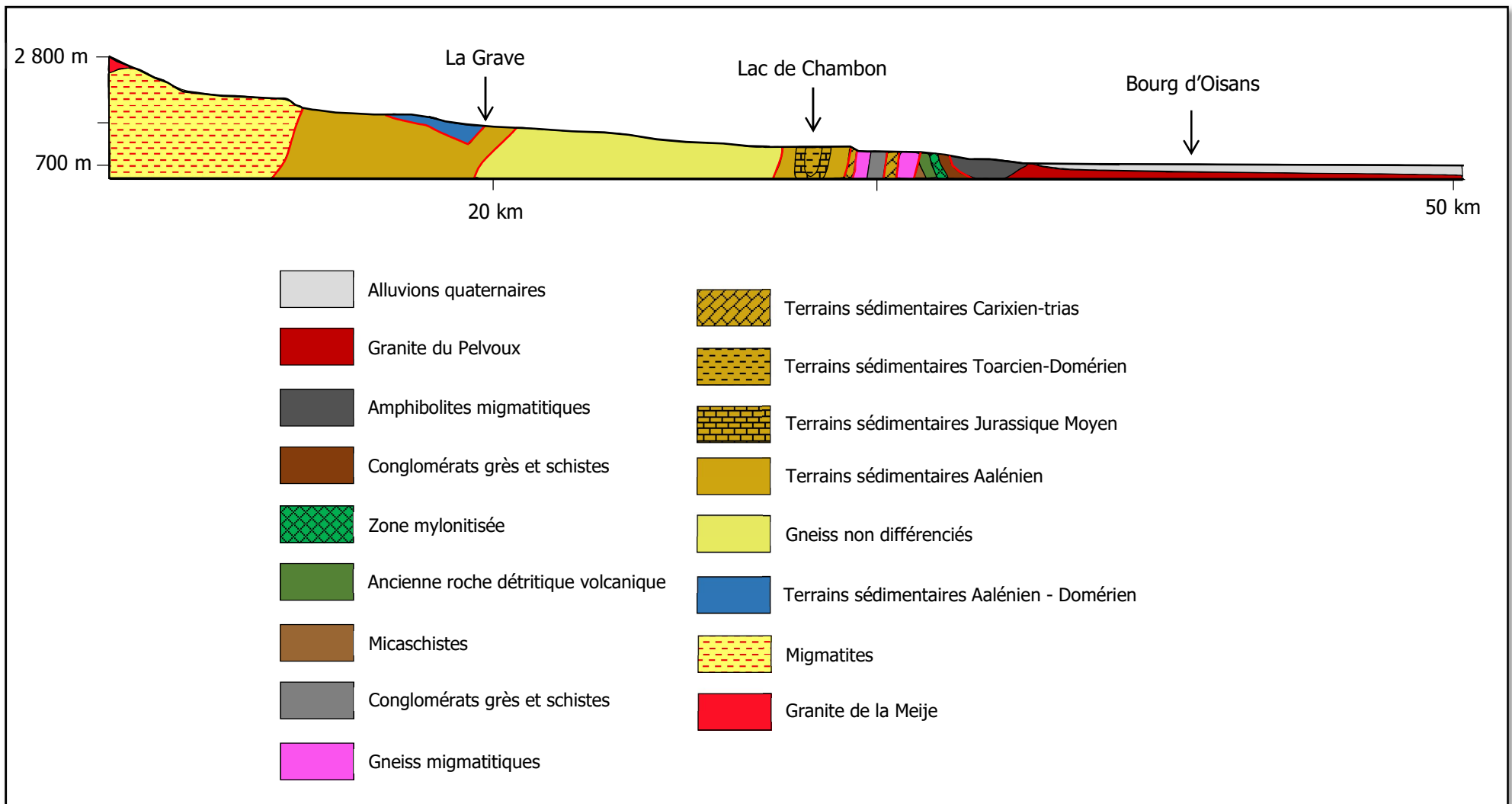


Figure 14 : Coupe géologique réalisée le long du lit de la Romanche

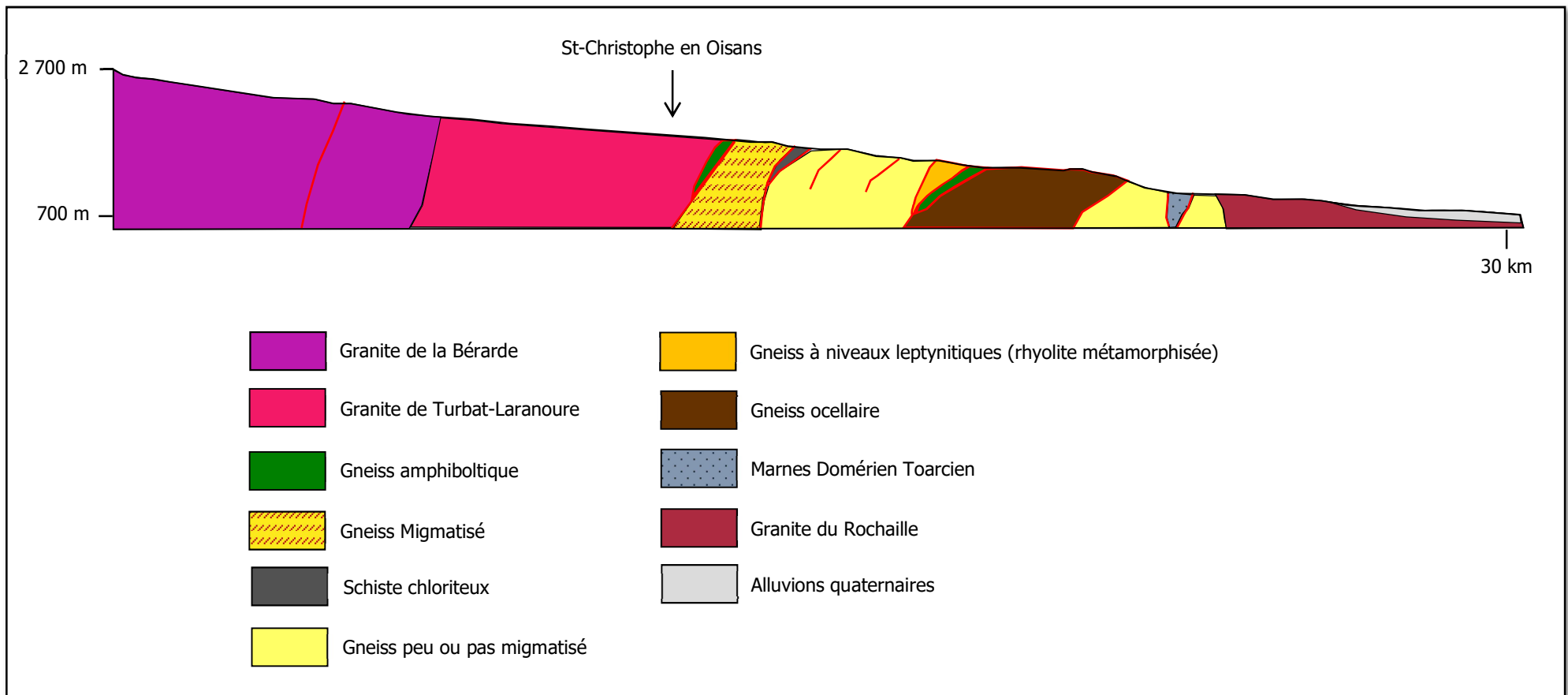


Figure 15 : Coupe géologique réalisée le long du lit du Vénéon

3.6 Contexte environnemental et enjeux écologiques

Les habitats présents dans le corridor alluvial* que construit le cours d'eau sont sous influence, voire contrôle, direct ou indirect de sa morphologie et de son évolution spatio-temporelle. **C'est donc le compartiment physique qui construit et façonne le compartiment biologique** (Malavoi & Souchon, 1996).

Les corridors alluviaux font partie des écosystèmes les plus dynamiques (Johnson, 1997) présentant toutes les propriétés associées à ces milieux en termes d'échanges, filtrage, diversité... (Odum, 1978 ; Naiman & Descamps, 1990). Il est à noter que ces corridors fluviaux constituent des couloirs empruntés par les espèces faunistiques et floristiques.

Les **tressages** (de manière générale et en particulier ceux présents dans le bassin versant du Vénéon), font partie des habitats les plus menacés. En effet ils constituent des **milieux fragiles** (Amoros *et al.*, 1987), et ce d'autant plus qu'ils constituent un style fluvial relictuel certainement en cours d'ajustement, voire pour certains tressages en cours de disparition (Malavoi *et al.*, 1998). Il est également à noter que du fait de la multichenalisation du lit vif, les rivières en tresses peuvent présenter des températures élevées en été (Mosley, 1983), ainsi qu'une forte variabilité spatiale en température (Mosley, 1983 ; Arcscott *et al.*, 2001), ce qui contribue également à fragiliser ces milieux en termes de population piscicole et plus généralement de réseaux trophiques.

Dans le cadre du plan de gestion de la Romanche, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance du contexte écologique, afin d'intervenir en minimisant les impacts à la fois sur les habitats et sur les espèces.

Cette bonne connaissance implique d'avoir une vision globale du patrimoine faunistique (et floristique éventuellement) à travers la compilation des données existantes, mais également de :

- Créer une banque de données environnementales importantes en se mettant en rapport avec les détenteurs de données environnementales (CREN, AFB, fédération de pêche, associations naturalistes compétentes ...) pour bancariser ces données et les utiliser ainsi lors de l'analyse de l'impact éventuel des différents travaux prévus dans le cadre du plan de gestion. Une fiche-suivi du plan de gestion sera consacrée à ce volet particulier ;
- Mettre à jour régulièrement ces données, en utilisant notamment les données des différents réseaux associatifs qui étudient certaines espèces ;
- Eventuellement réaliser des inventaires complémentaires avant travaux (cf. par exemple le paragraphe concernant l'écrevisse à pieds blancs...) pour préciser effectivement la présence d'une espèce dans un habitat (*e.g.* inventaire astacicole, recherche de sites de nidification de milan...).

Le contexte écologique du bassin versant amont de la Romanche présenté dans les paragraphes suivants n'est pas exhaustif et concerne les habitats et espèces inféodés aux milieux aquatiques. Il est basé notamment sur la présence d'habitats et d'espèces patrimoniales. Les fiches « milieux » par sous bassin versant (Hydrétudes, 2012) constituent également des éléments importants de connaissance.

A Les habitats

❖ Sites NATURA 2000

Le bassin versant amont de la Romanche regroupe huit sites NATURA 2000 récapitulés succinctement dans le Tableau 5.

Les habitats concernant les milieux aquatiques et le corridor alluvial* de ces sites NATURA 2000 sont présentés au Tableau 5 et au Tableau 6 en indiquant les modes de gestion préconisés.

| SITES NATURA 2000 DU BASSIN VERSANT DU BASSIN AMONT DE LA ROMANCHE | | | | |
|--|---|------|--|-------------|
| Identifiant | Nom | Type | Cours d'eau concernés (localisation) | Eaux douces |
| FR8201738 | Plaine du bourg d'Oisans et ses versants | SIC | <u>Romanche</u> : depuis le Chambon jusqu'à l'Eau d'Olle, avec la Sarenne (depuis la cascade) ; <u>Vénéon</u> : la plaine du Buclet. | 2% |
| FR8201735 | Landes, tourbières et habitats rocheux du Massif du Taillefer | SIC | Non pertinent (hors Romanche ou Vénéon ou affluents principaux) | 5% |
| FR9301497 | Plateau d'Emparis - Goleon | SIC | <u>Romanche</u> : rive droite à l'aval de La Grave sous le plateau d'Emparis | 2% |
| FR8201753 | Forêts, landes et prairies de fauches des versants du col d'Ornon | SIC | La <u>Lignarre</u> depuis la source jusqu'aux barrages de La Poyat | NC |
| FR820151 | Massif de la Muzelle | SIC | <u>Vénéon</u> : rive gauche, entre la Grande Pisse et le Lanchâtra et au niveau de Vénosc | 4% |
| FR9310036 | Les Ecrins | SIC | <u>Romanche</u> entre Villar-d'Arène et La Grave (rive gauche), <u>Vénéon</u> jusqu'à Pont Escoffier en rive gauche | 1% |
| FR9301498 | Combeynot – Lautaret - Ecrins | SIC | <u>Romanche</u> : rive droite sur Villar-d'Arène | 2% |
| FR8201736 | Marais à laiche bicolore, prairies de fauche et habitats rocheux du Vallon du Ferrand et du plateau d'Emparis | SIC | Non pertinent (hors Romanche ou Vénéon ou affluents principaux) | 2% |

Tableau 5 : Sites NATURA 2000 présents dans le bassin versant amont de la Romanche

| HABITATS INSCRITS À L'ANNEXE I ET PRÉSENTS DANS LE BASSIN AMONT DE LA ROMANCHE | | |
|--|---|--|
| Code | Description | Mode de gestion préconisé |
| 3220 | Rivières alpines avec végétation ripicole herbacée | <p>C'est la partie la plus rajeunie par les cours d'eau notamment suite à la fonte des neiges. Ces habitats évoluent généralement par endroit vers des habitats à Myricaire d'Allemagne (cf. 3230). Ils se rencontrent ainsi dans les zones de tressage.</p> <p>Ces espaces sont intégrés dans les bandes actives et les parties de lit sous influence directe des processus allogéniques de régénération. Il faudra uniquement veiller à ce que ces milieux ne se ferment (rétraction de la bande active) et donc que n'y poussent pas à termes des espèces ligneuses de la strate arborée. Pour ces habitats, une attention particulière doit être portée au risque d'embâcle.</p> |
| 3230 | Rivières alpines avec végétation ripicole ligneuse à <i>Myricaria germanica</i> | <p>Elle se rencontre notamment dans la plaine du bourg d'Oisans.</p> <p>C'est le stade d'évolution de l'habitat précédent avec la présence de salicées (<i>Salix elaeagnos</i>, <i>S. purpurea</i>, <i>S. nigricans</i>, <i>S. daphnoides</i>) généralement sous la forme arbustive. Ces espaces sont régulièrement rajeunis, car ils restent généralement sous influence des processus allogéniques de régénération. En fait, en règle générale ils se développent lors d'une période longue entre deux crues morphogènes, où dans les secteurs moins remaniés du fait de l'incision des lits fluviaux. La gestion de ces milieux est sensiblement la même que pour ceux relevant du code 3220.</p> |

| | | |
|------|--|--|
| 3240 | Rivières alpines avec végétation ripicole ligneuse à <i>Salix elaeagnos</i> | La végétation est sous le contrôle direct des phénomènes allogéniques de régénération. Un accompagnement doit être effectué : (1) dans les zones incisées, favoriser le développement des successions végétales en créant des taches pour développer les espèces pionnières saulaie pionnière à Myricaire, et remplacer ainsi les processus allogéniques déficitaires et compléter par des bras piézométriques*, (2) dans les zones non incisées, éviter simplement la rétraction des bandes actives en entretenant le cours d'eau. |
| 91EO | Forêts alluviales à <i>Alnus glutinosa</i> et <i>Fraxinus excelsior</i> (<i>Alno-Padion</i> , <i>Alnion incanae</i> , <i>Salicion albae</i>) | La végétation est sous le contrôle direct des phénomènes allogéniques de régénération. Là-encore, un accompagnement doit être effectué : (1) dans les zones incisées, favoriser le développement des successions végétales en créant des taches permettant le développement d'espèces pionnières en évitant une canopée équienne, en remplaçant ainsi les processus allogéniques déficitaires et complété par des bras piézométriques*, (2) dans les zones non incisées, éviter simplement la rétraction des bandes actives en entretenant le cours d'eau. |
| 6430 | Mégaphorbiaies hydrophiles d'ourlets planitiaires des étages montagnards à alpins | Les interventions dans les mégaphorbiaies sont généralement liées au passage des engins pour aller par exemple traiter la végétation rivulaire ou alluvionnaire. En effet, ces zones enherbées ne justifient pas d'intervention particulière. Dans ce cas on veillera à limiter les passages d'engin afin d'impacter le moins possible ces habitats. |

Tableau 6 : Habitats inscrits à l'Annexe 1 concernant le bassin amont de la Romanche

| NATURA 2000 ET HABITATS CONCERNANT LES MILIEUX AQUATIQUES | | | | | | | | |
|---|-----------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|------------|--------------------------------|---------------------------|
| Code Habitats EUR15/9 | FR8201738 | FR8201735 | FR9301497 | FR8201753 | FR8201751 | FR9310036 | FR8201736 | FR9301498 |
| | Plaine Bourg d'Oisans | Landes, tourbières massif Taillefer | Plateau Emparis Goleon | Versants du col d'Ornon | Massif de la Muzelle | Les Ecrins | Vallon Ferrand plateau Emparis | Combeynot Lautaret Ecrins |
| 3220 | 3,40 | 0 | 77 | 54,70 | 50 | NC | 0,15 | 393 |
| 3240 | 21,77 | 0 | 5,9 | 0 | 1,84 | NC | 0,3 | 22 |
| 91EO | 753,30 | 0 | 4,6 | 245 | 4,57 | NC | 0 | 0 |
| 6430 | 2,32 | 37,07 | 5,10 | 89 | 373 | NC | 0,5 | 389 |

Tableau 7 : Superficie d'habitats par site NATURA 2000

Pour les sites Natura 2000 et compte tenu de la diversité des habitats et des espèces potentiellement présents dans leur périmètre il est important de contacter les différents opérateurs en préalable aux interventions qui seront prévues dans le cadre du plan de gestion.

En effet, même si la plupart des habitats et des espèces ne sont pas strictement inféodés aux milieux aquatiques, les travaux prévus (notamment par exemple lors des accès) sont susceptibles d'impacter certains habitats et/ou espèces.

Dans les fiches-action du plan de gestion, cet élément sera ainsi mis en avant.

La carte ci-dessous présente les sites Natura 2000, complétés par les différentes ZNIEFF recensées sur le bassin.

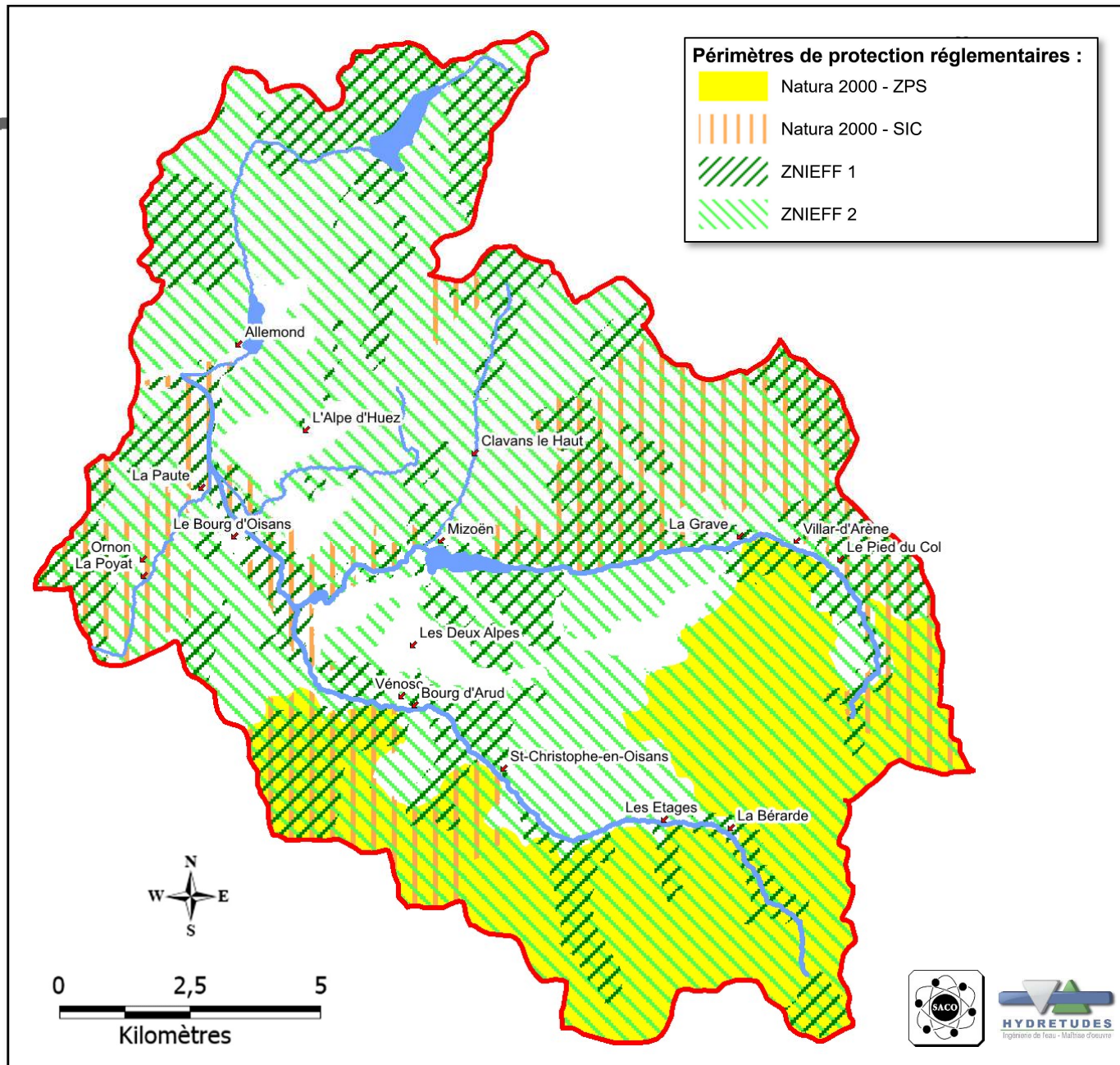


Figure 16 : Périmètres de protection réglementaires du bassin versant amont de la Romanche

❖ Les habitats aquatiques

La caractérisation des habitats

Pour caractériser l'état des habitats d'un cours d'eau, on met généralement en avant quatre critères complémentaires :

⇒ L'**hétérogénéité** qui concerne les éléments présents et diversifiant la morphologie du lit d'un cours d'eau (substrat, éléments de rugosités, macroformes comme les structures alluvionnaires...). Cette hétérogénéité se traduit par des variations de vitesses du courant (dans la colonne d'eau et sur la largeur du lit), de hauteur de la lame d'eau... Cette hétérogénéité contrôle ainsi les faciès d'écoulement (au sens de Malvoï, 1989).

⇒ L'**attractivité** qui porte sur l'intérêt des substrats des lits fluviaux pour l'ensemble du réseau trophique. L'attractivité concerne les habitats de reproduction (*e.g.* frayères), les habitats de vie (*e.g.* abris, caches...), etc... Nous rappelons que les substrats biogènes présentent généralement un diamètre moyen de 40 à 50 mm (Evrard & Micha, 1995).

⇒ La **connectivité** qui caractérise les possibilités éventuelles de relation entre les annexes fluviales et de manière plus générale le corridor fluvial (au sens de Forman & Godron, 1986), par exemple avec les terrasses alluviales, les bras-mort...

⇒ La **stabilité** qui indique la mobilité latérale (érosion *versus* dépôt) et verticale (incision *versus* exhaussement).

Afin de caractériser les différents habitats (*cf.* Encart 7) présents sur la Romanche et le Verdon, on a adopté une présentation synthétique et graphique qui met en avant les principaux éléments (issus de synthèse bibliographique et/ou du terrain).

On utilisera les critères généralement utilisés et détaillés dans l'encart ci-contre qui sont synthétisés sous la forme d'un petit graphique (*cf.* Figure 17) :

Légende

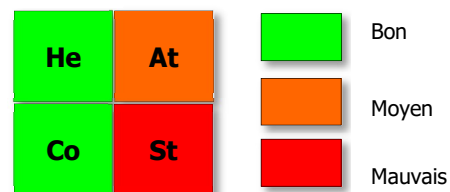


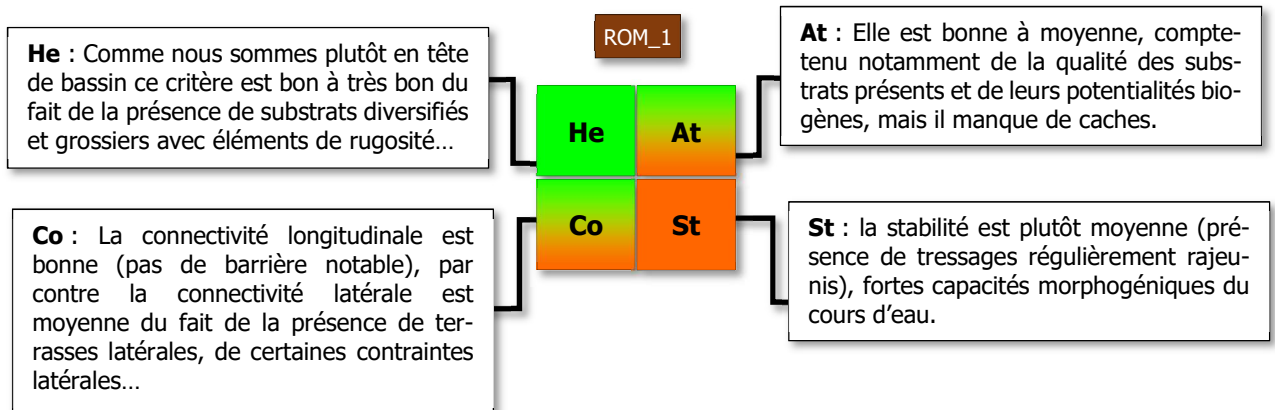
Figure 17 : Caractérisation des habitats

Pour chaque critère un commentaire succinct est présenté et ne sont détaillés que les éléments contextuels importants.

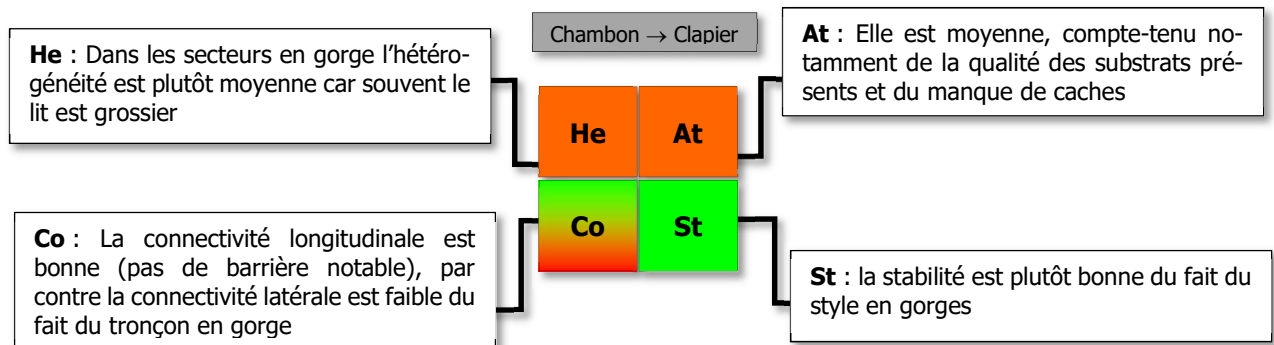
⇒ La Romanche

Le tronçon **ROM_1** qui se situe en partie amont présente les caractéristiques globales suivantes en termes d'habitats :

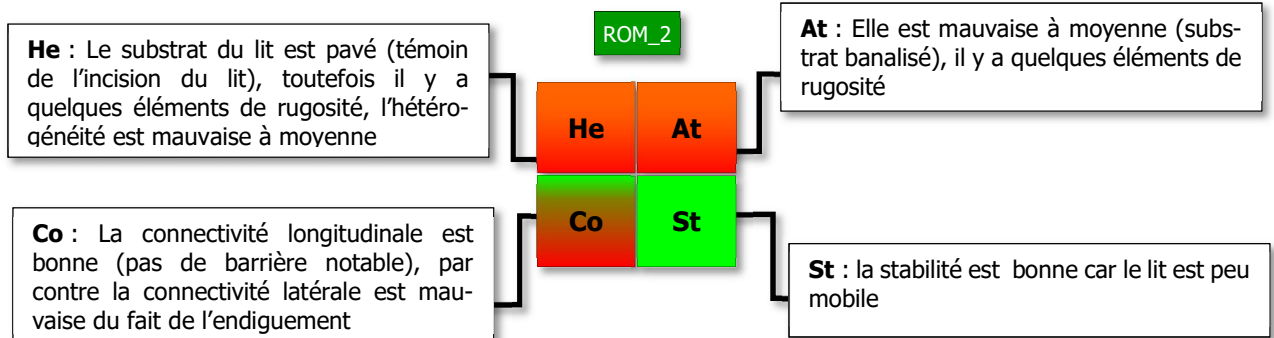
Encart 7 : Caractérisation des habitats aquatiques



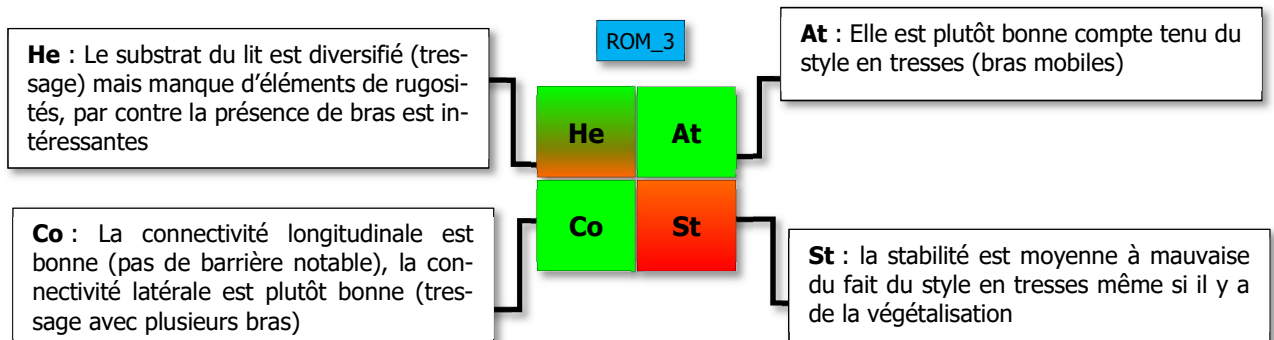
Le tronçon **Chambon** → **Clapier** présente les caractéristiques suivantes :



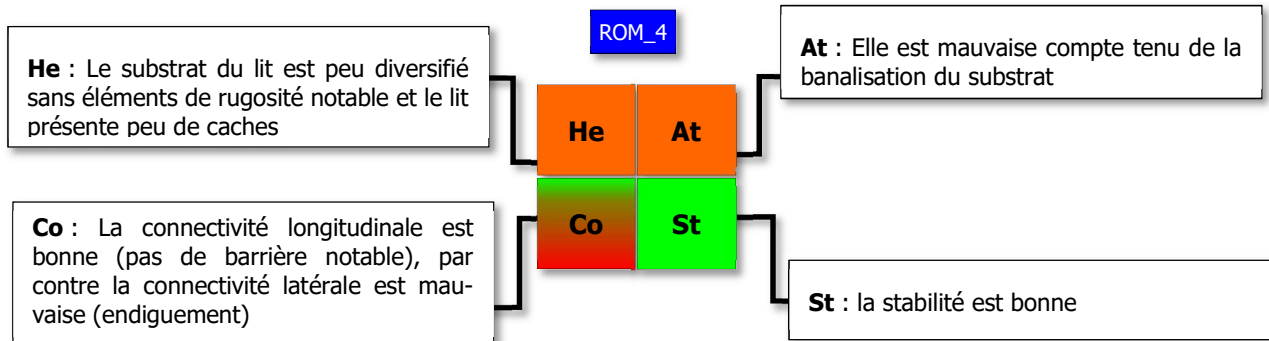
Le tronçon **ROM_2** est déconnecté du tronçon précédent par le barrage du Clapier, de plus comme nous l'avons déjà indiqué il est endigué et son lit est pavé :



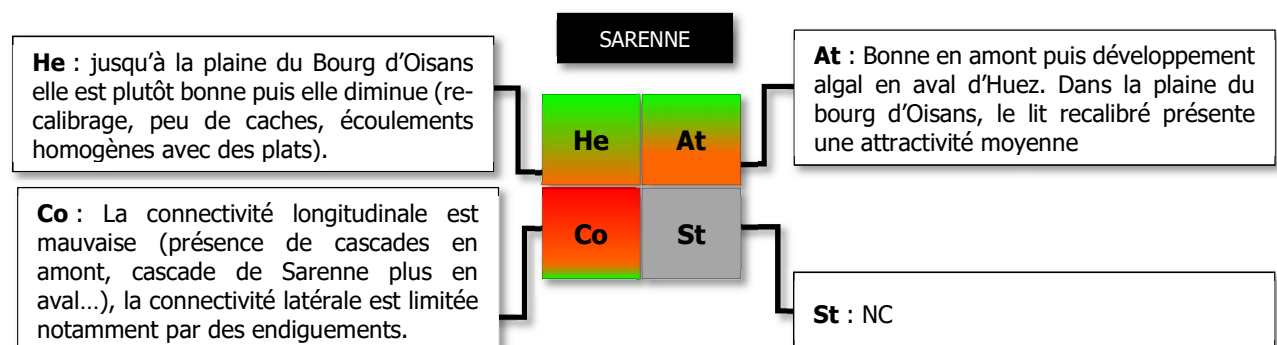
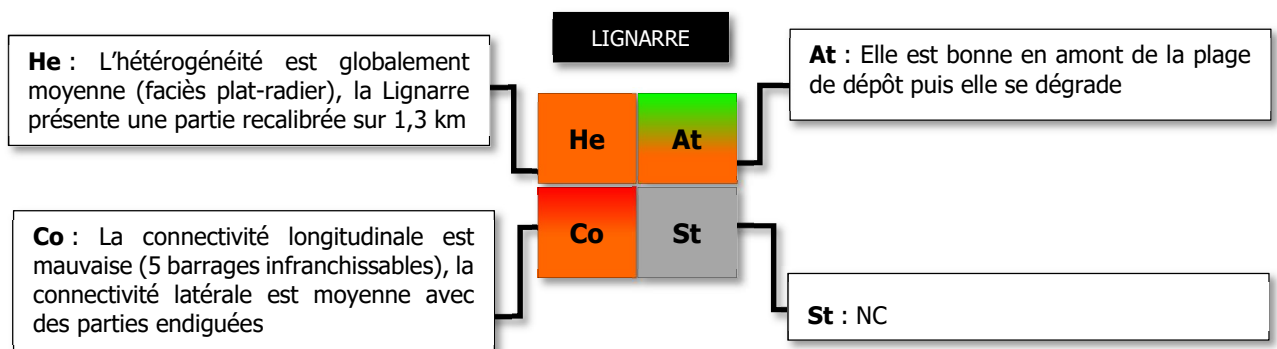
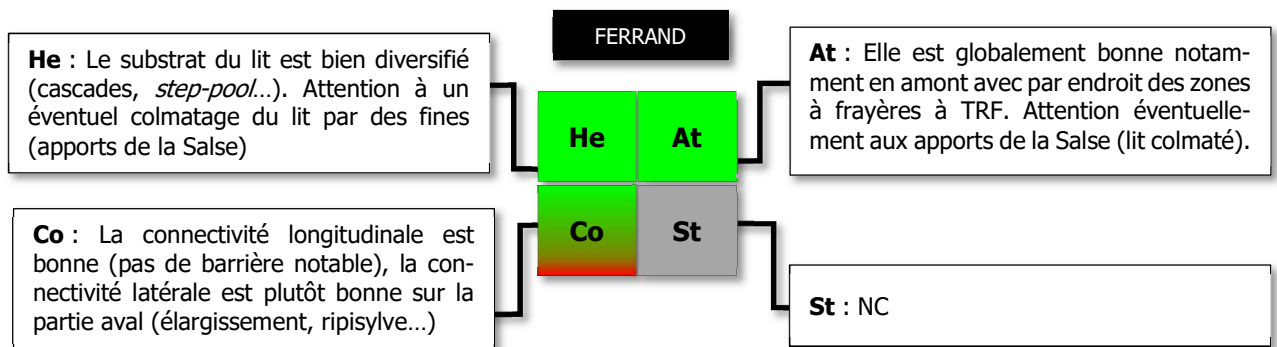
Le tronçon **ROM_3** (qui est juste en aval de la confluence avec le Vénéon) présente les éléments suivants en termes de qualité des habitats :

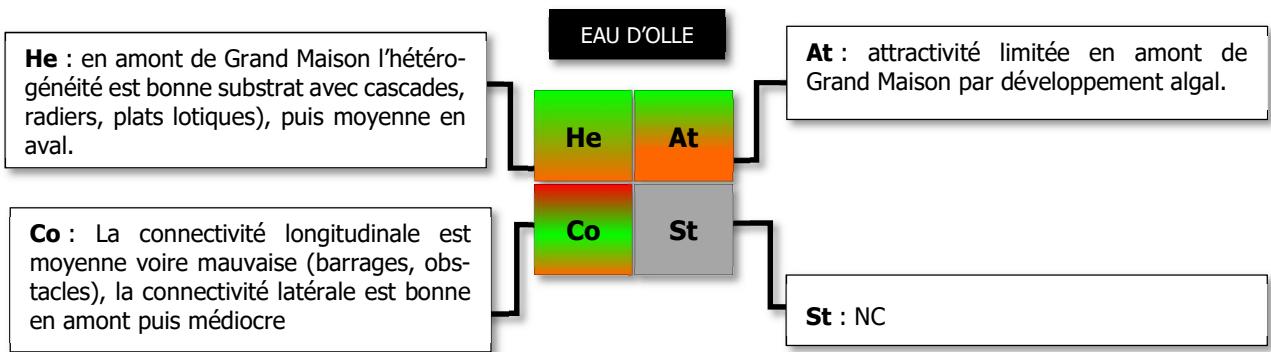


Le tronçon **ROM_4** est endigué et présente une faible pente, ses caractéristiques d'habitats sont les suivantes :



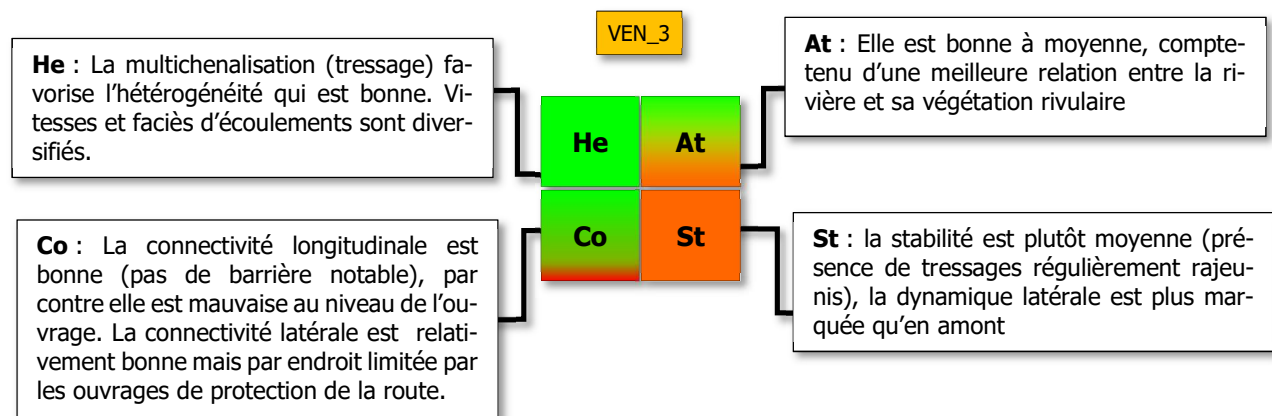
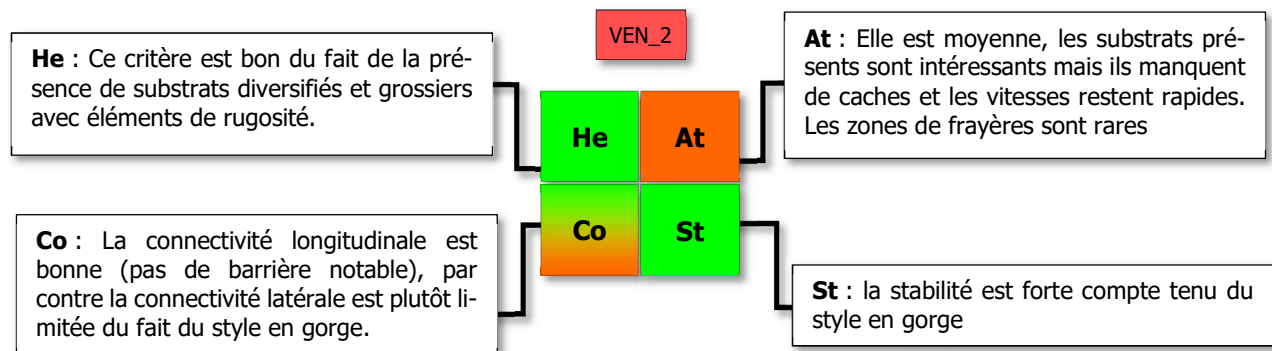
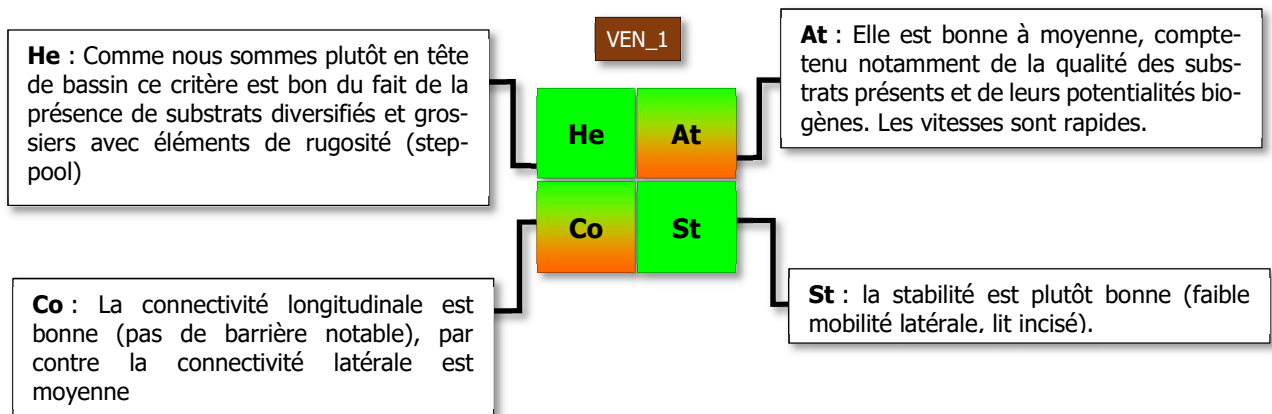
Pour les principaux affluents de la Romanche, les différents éléments collectés (synthèse bibliographique) sont les suivants :

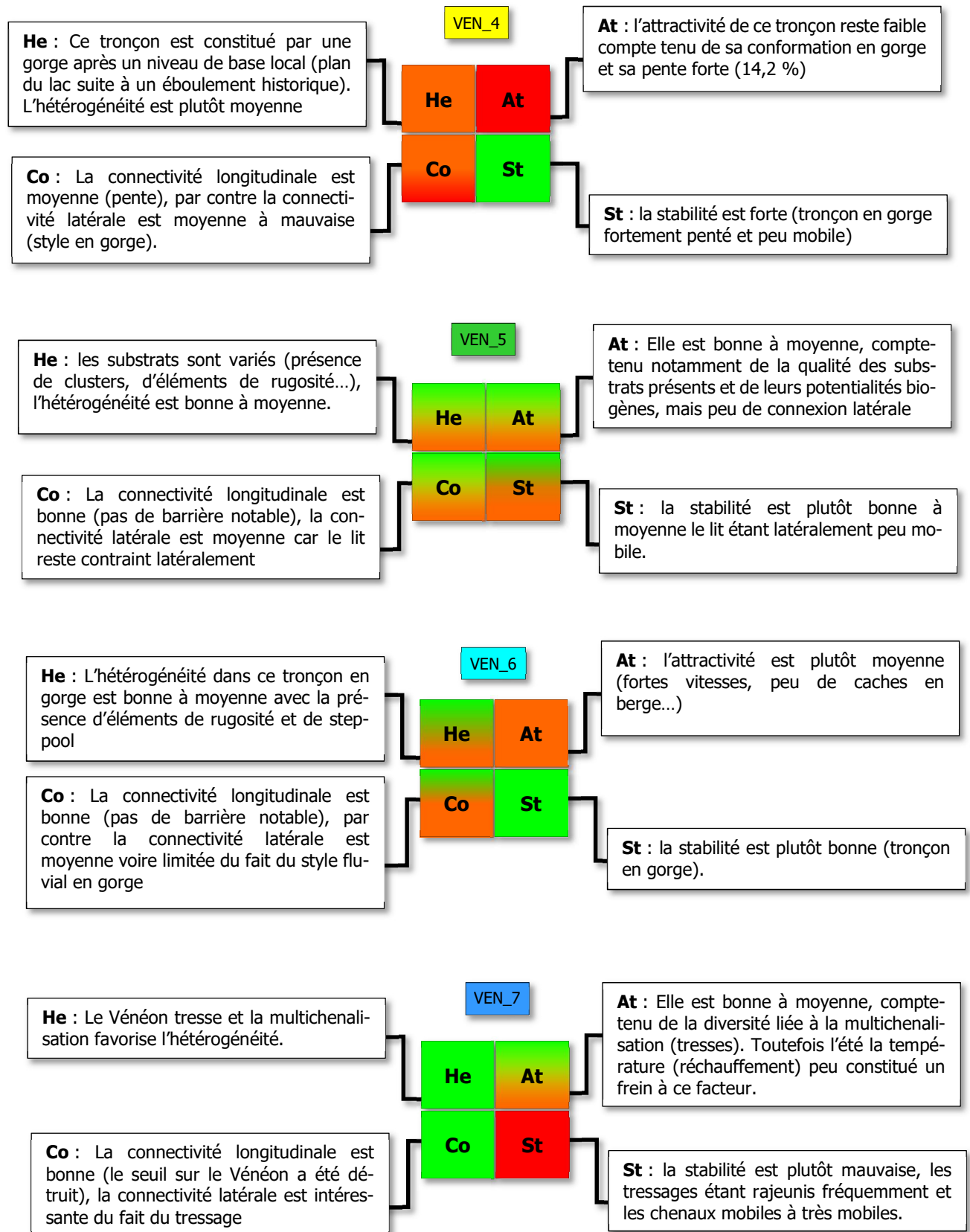




⇒ Le Vénéon

Le tronçon **ROM_1** qui se situe en partie amont présente les caractéristiques globales suivantes en termes d'habitats :





B Les espèces

À titre de rappel, seules les espèces inféodées aux milieux aquatiques sont retenues dans l'inventaire des espèces patrimoniales présentes dans le bassin versant de la Romanche.

Nous avons ainsi pour chaque espèce concernée par l'Annexe 2 de la directive Habitats examiné sur le site de l'Inventaire National du Patrimoine Naturel la pertinence de retenir chaque espèce.

En effet, l'onglet habitats permet de discriminer la présence ou l'absence sur les habitats concernant directement les milieux aquatiques (cf. *Tableau 6*).

❖ Les espèces piscicoles

Les espèces piscicoles présentes sur le bassin amont de la Romanche sont listées dans le Tableau 8.

| ESPÈCES PISCICOLES PRESENTES SUR LE BASSIN AMONT DE LA ROMANCHE | | | | |
|---|------------------------------|------|-------------|---|
| Nom vernaculaire | Taxon | Code | Statut IUCN | Présence |
| Vairon | <i>Phoxinus phoxinus</i> | VAI | DD (FR) | Le vairon serait présent sur le Vénéon, la Romanche, la Sarenne et l'Eau d'Olle |
| Loche franche | <i>Barbatula barbatula</i> | LOF | LC (FR) | La loche franche est présente partout sauf sur le Ferrand et la Lignarre |
| Truite commune | <i>Salmo trutta</i> | TRF | LC (FR) | Très présente, mais population largement soutenue par des empoissonnements |
| Truite arc-en-ciel | <i>Oncorhynchus mykiss</i> | TAC | NA (FR) | Espèce introduite présente sur la haute Romanche et le Ferrand |
| Saumon de fontaine | <i>Salvelinus fontinalis</i> | SDF | NA (FR) | Espèce classée « introduite envahissante » (source INPN), présente sur le Vénéon |
| Chabot périalpin (ou commun) | <i>Cottus gobio</i> | CHA | DD (FR) | Présent sur la Haute Romanche, le Vénéon et les principaux affluents de la Romanche (Sarenne, Lignarre, Eau d'Olle) |

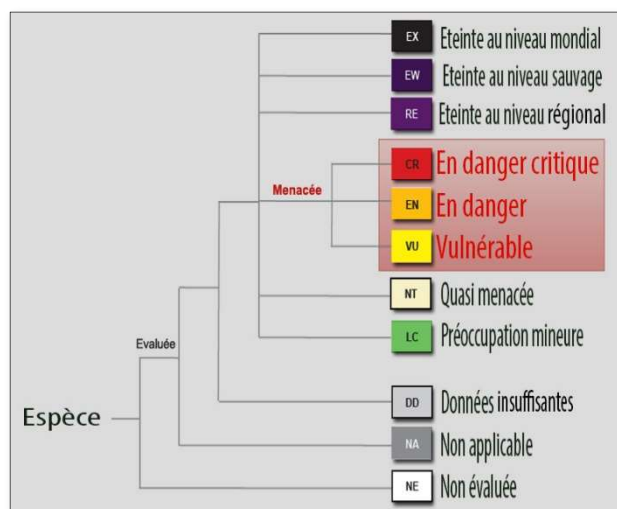
Tableau 8 : Principales espèces piscicoles présentes dans la zone d'étude

Statut de conservation IUCN

Le statut de conservation IUCN (*International Union for Conservation of Nature*) des différentes espèces faunistiques et floristiques a été mis au point par l'ONG IUCN qui regroupe des états, des agences gouvernementales, des ONG et des experts et scientifiques.

Ainsi elle attribue un statut de conservation aux espèces qui fait référence et qui est traduit en liste rouge des espèces menacées (mondial, européen, français et régional).

Ce statut est détaillé ci-contre.



Encart 8 : Statut de conservation IUCN

Les biocénotypes

Les biocénotypes définis par Verneaux (1973) mettent en relation la zonation piscicole et la typologie des cours d'eau.

Les biocénotypes définissent la probabilité de présence des espèces de poissons en fonctions de facteurs physico-chimiques résumés sous la forme de trois variables : facteur thermique, géotrophique et morphodynamique.

Les 9 biocénotypes sont notés B0 à B9 et regroupent des associations de poissons aux exigences écologiques proches.

Le Tableau 9 ci-après présente les niveaux typologiques ou biocénotypes (*cf.* Encart 9) de la Romanche et du Vénéon par tronçon ainsi que ceux des principaux affluents, qui permettent de caractériser les assemblages de poissons présents sur les cours d'eau ou tronçons de cours d'eau concernés.

En complément, la Figure 18 détaille les neuf biocénotypes développés dans la méthode de Verneaux.

Il est à noter que les cours d'eau du bassin versant amont de la Romanche ne comportent que des biocénotypes B0 à B4.

Encart 9 : Les biocénotypes

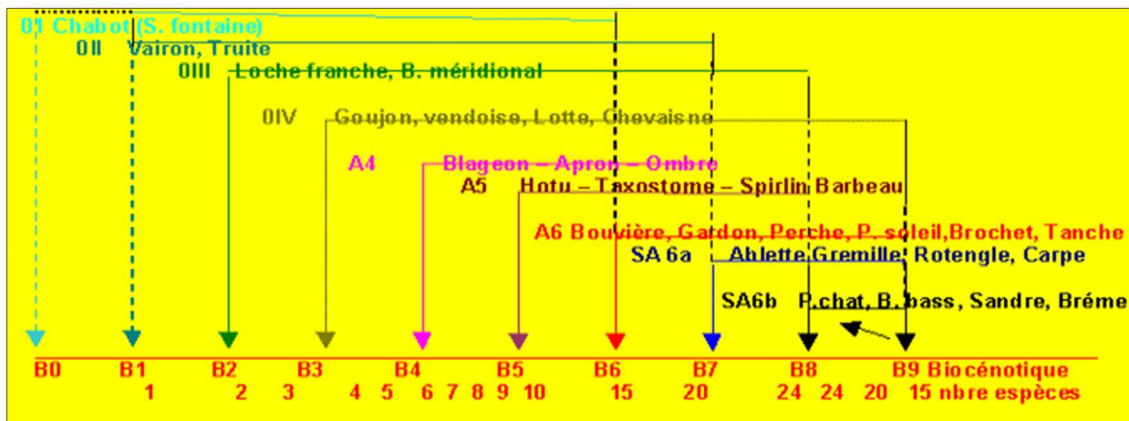


Figure 18 : Organisation théorique des biocénotypes le long d'un cours d'eau (d'après Verneaux, 1973)

| BIOCENOTYPES DES COURS D'EAU D'ETUDE | | |
|--------------------------------------|----------------|-------------------------|
| Tronçons | Biocénotypes | Principales espèces |
| ROM_1 | B0 et B1 | TRF, TAC, CHA, LOF, VAI |
| ROM_2 | B2 | TRF, TAC, CHA, LOF, VAI |
| ROM_3 | B2 | TRF, CHA, LOF, VAI |
| ROM_4 | B2 et B2+ | TRF, CHA, LOF, VAI |
| Ferrand | B0 | TRF, TAC |
| Lignarre | B1 et B2 | TRF, CHA |
| Sarenne | B0 et B2 | TRF, CHA, LOF, VAI |
| Eau d'Olle | B0, B1, B3, B4 | TRF, TAC, CHA, VAI |
| VEN_1 | B0 | TRF, SDF, CHA, LOF, VAI |
| VEN_2 | B0 | TRF, SDF, CHA, LOF, VAI |
| VEN_3 | B0 | TRF, SDF, CHA, LOF, VAI |
| VEN_4 | B0 | TRF, SDF, CHA, LOF, VAI |
| VEN_5 | B1 | TRF, SDF, CHA, LOF, VAI |
| VEN_6 | B1 | TRF, SDF, CHA, LOF, VAI |
| VEN_7 | B2 | TRF, SDF, CHA, LOF, VAI |

Tableau 9 : Biocénotypes des cours d'eau d'étude

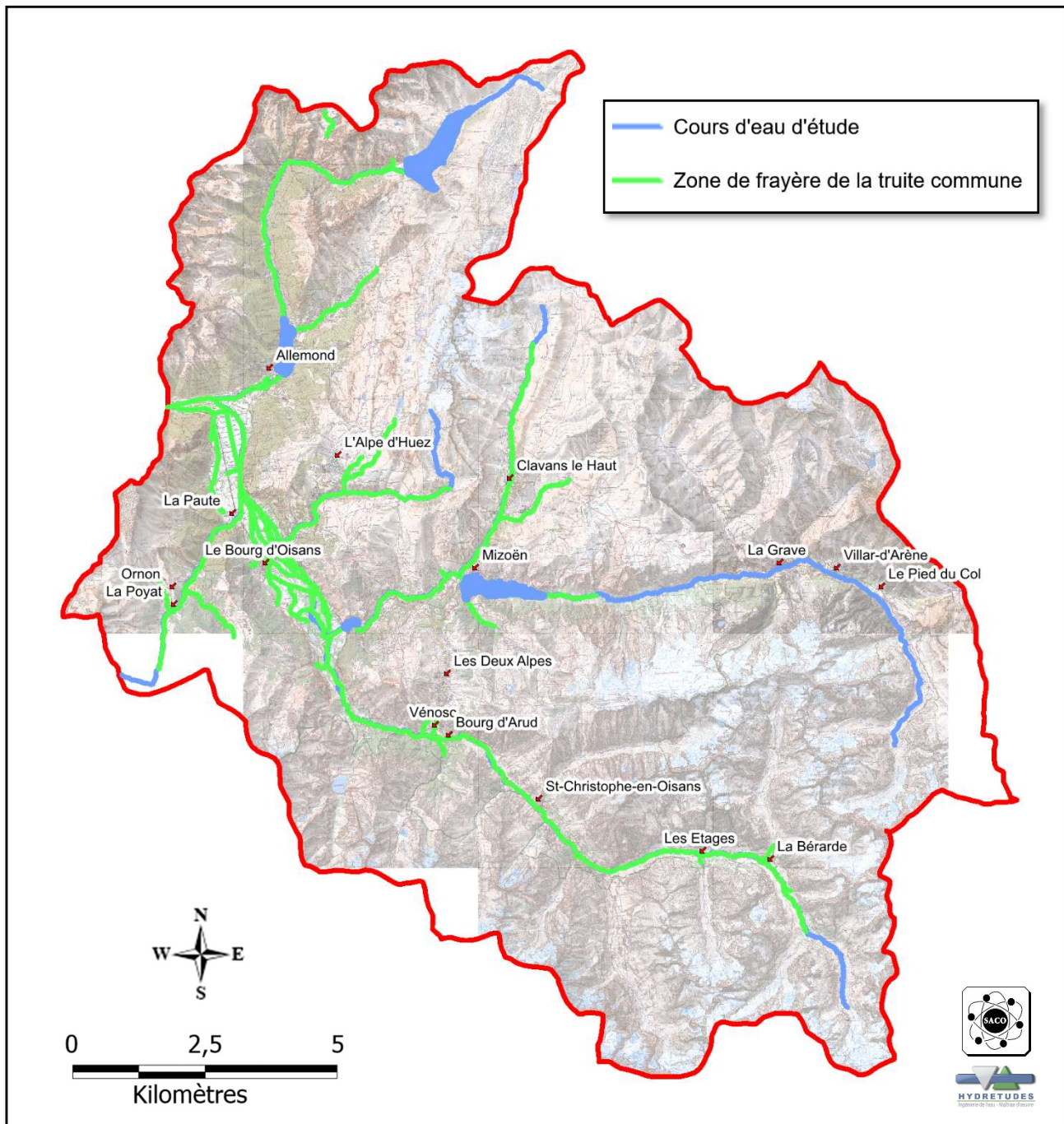


Figure 19 : Cartographie des zones de frayères de la truite commune (Source : DDT 38)

Les mesures de protection des espèces piscicoles présentes concernent essentiellement la protection des habitats de reproduction en cas de travaux de transfert-réinjection d'alluvions.

Il s'agira d'éviter le colmatage des substrats de frai des espèces lithophiles (au sens de Balon, 1975) susceptibles d'être présentes en notamment :

- De déterminer pour chaque site de réinjection des **mesures adaptées** permettant de limiter l'impact des injections sur les zones de frayères (granulométrie des matériaux, technique d'injection employée, période par rapport au cycle de vie des espèces susceptibles de frayer, utilisation de la capacité de résilience du substrat...);
- D'effectuer un **suivi dynamique** des zones de réinjection (granulométrie, mesure de l'épaisseur hyporhéique efficace au sens Tremblay, 2006, conductivité hydraulique au sens de Datry, 2010).

❖ Amphibiens

Les espèces d'amphibiens présentes dans les milieux aquatiques du bassin amont de la Romanche sont listées dans le Tableau 10.

| AMPHIBIENS CONCERNÉS PAR L'ANNEXE 2 DE LA DIRECTIVE HABITAT DANS LE BASSIN AMONT DE LA ROMANCHE | | | |
|---|------------------------------|--------------|--|
| Nom vernaculaire | Taxon | Statut IUCN* | Habitat, comportement, reproduction, précautions et préconisations en cas d'intervention |
| Sonneur à ventre jaune | <i>Bombina variegata</i> | VU (FR) | Il est présent dans la plaine du Bourg d'Oisans (particulièrement en rive droite de la Romanche) et sur la zone du Buclet (habitat hivernal). Pour limiter l'impact d'éventuels travaux il serait nécessaire d'éviter les travaux lors de la période de reproduction (mai à juillet) période où il est le plus vulnérable. → Des modalités de gestion sont proposées dans Benttiti & Gaudillat (2002) → Présence potentielle ¹ : ROM_3 et VEN_7 |
| Triton alpestre | <i>Ichtyosaura alpestris</i> | LC (FR) | Plutôt en point d'eau (mares, étangs, marécages, ornières, fossés et ruisseaux forestiers). C'est donc autour de ces points d'eau que les mesures éventuelles de protection de cette espèce doivent se concentrer. → Voir la fiche espèce protégée de l'ONEMA (AFB) avec liens avec diverses fiches (DORIS, ULG...) : https://inpn.mnhn.fr/fichesEspece/EspeciesEauDouce/Triton_alpestre-I.alpestris_2015.pdf → Présence potentielle : Altitude limite 2 000/2 400 m |

Tableau 10 : Amphibiens présents sur la zone d'étude

❖ Reptiles

Les espèces de reptiles présentes dans les milieux aquatiques du bassin versant amont de la Romanche sont listées dans le Tableau 11.

¹ Il s'agit des tronçons où l'espèce a été contactée, mais cela n'a pas de valeur d'exhaustivité pour l'ensemble du bassin. Cette remarque est générale et s'appliquera dans le reste du présent chapitre. Lorsque les données sont insuffisantes on mettra simplement l'altitude limite de contactage de l'espèce.

| REPTILES CONCERNÉS PAR L'ANNEXE 2 DE LA DIRECTIVE HABITAT DANS LE BASSIN AMONT DE LA ROMANCHE | | | |
|---|-------------------------|--------------|--|
| Nom vernaculaire | Taxon | Statut IUCN* | Habitat, comportement, reproduction, précautions et préconisations en cas d'intervention |
| Lézard des murailles | <i>Podarcis muralis</i> | LC (FR) | Habitat : vieux murs, tas de cailloux, souches... Les interventions prévues dans le plan de gestion devraient peu impacter cette espèce. → Présence potentielle : Ubiquiste, jusqu'à 2 000 m d'altitude |
| Lézard vivipare | <i>Zootoca vivipara</i> | LC (FR) | Le lézard vivipare exploite un habitat sensiblement le même que celui du L. des murailles. Il est dépendant des milieux humides plutôt en basse altitude (Vacher & Geniez, 2010). Les travaux prévus devraient avoir un impact limité sur cette espèce. → Voir fiche ONEMA : https://inpn.mnhn.fr/fichesEspece/EspeciesEauDouce/Lezard_vivipare-Z.vivipara_2015.pdf → Présence potentielle : Jusqu'à 2 500 m d'altitude |
| Couleuvre à collier | <i>Natrix natrix</i> | NT (FR) | Cette espèce consomme essentiellement des amphibiens et fréquente donc les milieux aquatiques. Toutefois, les travaux qui seront proposés dans le plan de gestion ne devraient pas impacter cette espèce. → Voir fiche ONEMA : https://inpn.mnhn.fr/fichesEspece/EspeciesEauDouce/Couleuvre_collier-N.natrix_2015.pdf → Présence potentielle : Ubiquiste, jusqu'à 2 000 m d'altitude |

Tableau 11 : Reptiles présents sur la zone d'étude

❖ Entomofaune

Les espèces d'insectes présentes dans les milieux aquatiques du bassin versant amont de la Romanche sont listées dans le Tableau 12.

| ENTOMOFAUNE CONCERNÉE PAR L'ANNEXE 2 DE LA DIRECTIVE HABITAT DANS LE BASSIN AMONT DE LA ROMANCHE | | | |
|--|--|----------------|---|
| Nom vernaculaire | Taxon | Statut IUCN | Habitat, comportement, reproduction, précautions et préconisations en cas d'intervention |
| Criquet des torrents | <i>Epacromius tergustinus ponticus</i> | Non réglementé | Présent sur les bancs de graviers notamment dans le secteur du Buclet. Cette espèce est très rare en France et a été « redécouverte » au début des années 2000. → Voir association entomologiste ou éventuellement PN Ecrins. → Présence potentielle : ROM_3, VEN_7, VEN_3(?) |

Tableau 12 : Entomofaune concernée par l'Annexe 2 de la Directive Habitats et présente dans le bassin amont de la Romanche

❖ Avifaune

Les espèces nichant ou vivant dans la ripisylve écotonale, voire dans la bande active, des cours d'eau de la zone d'étude sont présentées dans les tableaux ci-après.

| AVIFAUNE PRÉSENTE DANS LE BASSIN VERSANT AMONT DE LA ROMANCHE | | | |
|---|------------------------------|-------------|---|
| Nom vernaculaire | Taxon | Statut IUCN | Habitat, comportement, reproduction, précautions et préconisations en cas d'intervention |
| Grèbe huppé | <i>Podiceps cristatus</i> | LC (FR) | Le grèbe huppé fréquente plutôt les eaux dormantes (étangs, lacs...) et niche dans des plans d'eau. Les travaux du plan de gestion ne devraient pas impacter cette espèce. → Présence potentielle : ROM_4, ROM_3, VEN_7 |
| Foulque macroule | <i>Fulica atra</i> | LC (FR) | Le nid de la foulque est une plate-forme en bordure d'un plan d'eau. En conséquence, même si quelques foulques peuvent être présentes, les travaux du plan de gestion ne devraient pas impacter cette espèce. → Présence potentielle : ROM_4, ROM_3, VEN_7 |
| Chevalier guignette | <i>Actis hypoleucos</i> | NT (FR) | Cette espèce niche particulièrement dans les zones de tressage. Elle affectionne les bancs de galets et niche généralement un peu à l'écart du cours d'eau. Elle a besoin d'une végétation herbacée et arbustive clairsemée pour installer son lit. Toutefois, il ne serait qu'un nicheur occasionnel dans la zone d'étude. → Prendre contact avec la LPO pour voir si des nidifications ont été observées et le cas échéant, protéger les sites. → Des propositions de gestion sont présentées dans la fiche : https://inpn.mnhn.fr/docs/cahab/fiches/Chevalier-guignette.pdf → Présence potentielle : ROM_4, ROM_3, VEN_7 |
| Grand cormoran | <i>Phalacrocorax carbo</i> | LC (FR) | Le grand cormoran occupe des dortoirs en bordure de cours d'eau. Cette espèce fait l'objet de mesures de régulation dans le département de l'Isère (cf. Arrêté n° 38-2016-11-14-006 et arrêté modificatif 38-2017-02-13-006). → Des propositions de gestion sont présentées dans la fiche : https://inpn.mnhn.fr/docs/cahab/fiches/Grand-cormoran.pdf → Présence potentielle : ROM_4, ROM_3, ROM_2, VEN_7 |
| Bihoreau gris | <i>Nycticorax nycticorax</i> | NT (FR) | Cette espèce initialement migratrice hiverne de plus en plus dans notre pays. Il aime les boisements rivulaires et les bras morts, et élève sa progéniture dans des nids réutilisés généralement et placés dans les arbres de certaines ripisylves. Il niche en colonies plus ou moins importantes. → Un contact avec la LPO devrait permettre de mieux cerner les zones de reproduction de cette espèce. → Des propositions de gestion sont présentées dans la fiche : https://inpn.mnhn.fr/docs/cahab/fiches/Bihoreau-gris.pdf → Présence potentielle : ROM_4, ROM_3, VEN_7, VEN_3 |
| Busard des roseaux | <i>Circus aeruginosus</i> | NT (FR) | Cette espèce est plutôt présente à l'aval de la zone d'étude. Il affectionne les roselières comme site de reproduction, mais on constate actuellement qu'il niche dans des milieux plus secs, se détournant ainsi des milieux aquatiques. Les nids sont construits proches du sol généralement dans les frondaisons d'une végétation dense. → Un contact avec la LPO devrait permettre de mieux cerner les zones de reproduction de cette espèce. → Des propositions de gestion sont présentées dans la fiche : https://inpn.mnhn.fr/docs/cahab/fiches/Bihoreau-gris.pdf → Présence potentielle : ROM_4 |

| | | | |
|------------------|--------------------------|------------|--|
| Pipit rousseline | <i>Anthus campestris</i> | LC (FR) | <p>Cette espèce peut nicher dans les parties sèches du lit de cours d'eau (tressage...). Le lit est au ras du sol camouflé dans la végétation.</p> <p>→ Un contact avec la LPO devrait permettre de mieux cerner les zones de reproduction de cette espèce.</p> <p>→ Des propositions de gestion sont présentées dans la fiche : https://inpn.mnhn.fr/docs/cahab/fiches/Pipit-rousseline.pdf</p> <p>→ Présence potentielle : ROM_4, ROM_3, VEN_7</p> |
|------------------|--------------------------|------------|--|

Tableau 13 : Avifaune concernée par l'Annexe 2 de la Directive Habitat et présente dans l'amont de la Romanche

| AUTRES ESPÈCES DE L'AVIFAUNE IMPORTANTES PRÉSENTES DANS LE BASSIN AMONT DE LA ROMANCHE | | | |
|--|--------------------------|-------------|---|
| Nom vernaculaire | Taxon | Statut IUCN | Habitat, comportement, reproduction, précautions et préconisations en cas d'intervention |
| Martin-pêcheur | <i>Alcedo atthis</i> | VU (FR) | <p>Espèce piscivore qui niche dans les berges meubles où il creuse un terrier. Nidification : généralement deux pontes d'avril à juillet avec départ des poussins de mai à août. Pour cette espèce, il n'est pas souhaitable d'intervenir pendant la période de nidification au moins dans les sites favorables comme habitat de reproduction.</p> <p>→ Un contact avec la LPO devrait permettre de mieux cerner les zones de reproduction de cette espèce.</p> <p>→ Présence potentielle : ROM_4, ROM_3, VEN_7,</p> |
| CinCLE plongeur | <i>Cinclus cinclus</i> | LC (FR) | <p>Présent jusqu'à 2 200 mètres dans les Alpes. Nidification en mars/avril et les poussins quittent le nid en avril/juin. Le nid est constitué d'un dôme en mousse posé sur le rocher, cavité, pont... Lors de la période de mue, il se réfugie dans des secteurs à végétation dense en berge. Pour cette espèce, il n'est pas souhaitable d'intervenir pendant la période de nidification au moins dans les sites favorables comme habitat de reproduction.</p> <p>→ Un contact avec la LPO devrait permettre de mieux cerner les zones de reproduction de cette espèce.</p> <p>→ Présence potentielle : Tous les tronçons</p> |
| Bergeronnette printanière | <i>Motacilla flava</i> | LC (FR) | <p>Cette espèce n'est pas inféodée au milieu aquatique notamment pour sa reproduction mais les fréquentes notamment pour se nourrir (invertébrés aquatiques). Les travaux qui seront proposés dans le plan de gestion ne devraient pas impacter particulièrement cette espèce.</p> <p>→ Présence potentielle : Jusqu'à 1 000 m d'altitude</p> |
| Pipit spioncelle | <i>Anthus spinoletta</i> | LC (FR) | <p>Cette espèce n'est pas inféodée au milieu aquatique notamment pour sa reproduction mais les fréquentes notamment pour se nourrir (invertébrés aquatiques). Les travaux qui seront proposés dans le plan de gestion ne devraient pas impacter particulièrement cette espèce.</p> <p>→ Présence potentielle : Jusqu'à 2 500 m d'altitude</p> |
| Tarier des prés | <i>Saxicola rubetra</i> | LC (FR) | <p>Cette espèce n'est pas inféodée au milieu aquatique notamment pour sa reproduction mais les fréquentes notamment pour se nourrir (mollusques). Les travaux qui seront proposés dans le plan de gestion ne devraient pas impacter particulièrement cette espèce.</p> <p>→ Des propositions de gestion sont présentées dans la fiche : https://inpn.mnhn.fr/docs/cahab/fiches/Tarier-despres.pdf</p> <p>→ Présence potentielle : ROM_4</p> |

❖ Chiroptères

Les chiroptères utilisent le corridor végétal de la Romanche et du Vénéon, comme habitat de chasse, gîte ou encore comme corridors de vol. Des modalités de gestion dans le cadre du plan de gestion pourront être mises en avant notamment en prenant contact avec le Groupe Chiroptères de la SFEPM (Société Française pour l'Etude et la Protection des Mammifères) qui a une correspondante en Isère à Saint-Paul-de-Varces (<https://www.sfepm.org/groupeChiropteres.htm>).

| CHIROPTÈRES INSCRITS À L'ANNEXE 2 DE LA DIRECTIVE HABITAT | | | | |
|---|----------------------------------|-------------|---|---|
| Nom vernaculaire | Taxon | Statut IUCN | Présentation succincte | Nature de l'impact |
| Grand rhinolophe | <i>Rhinolophus ferrumequinum</i> | NT (FR) | Pour se déplacer suit les ripisylves et peut chasser parfois en bordure des cours d'eau → Propositions de gestion : https://inpn.mnhn.fr/docs/ca-hab/fiches/1304.pdf → Présence potentielle : Jusqu'à 1 500 m voire 2 000 m d'altitude | Habitats de chasse Corridor de vols |
| Petit rhinolophe | <i>Rhinolophus hipposideros</i> | LC (FR) | Pour se déplacer suit les ripisylves et peut chasser au-dessus des étendues d'eau. → Proposition de gestion : https://inpn.mnhn.fr/docs/ca-hab/fiches/1303.pdf → Présence potentielle : Jusqu'à 1 500 m à 2 000 m d'altitude | Habitats de chasse Corridor de vols |
| Barbastelle d'Europe | <i>Barbastella barbastellus</i> | LC (FR) | Cette espèce gîte l'été dans les arbres en changeant presque chaque jour. → Propositions de gestion : https://inpn.mnhn.fr/docs/ca-hab/fiches/1303.pdf → Présence potentielle : Jusqu'à 2 000 m d'altitude | Destruction gîtes Habitats de chasse |
| Minioptère de Schreibers | <i>Miniopterus schreibersii</i> | VU (FR) | Espèce cavernicole → Propositions de gestion : https://inpn.mnhn.fr/docs/ca-hab/fiches/1308.pdf → Présence potentielle : Jusqu'à 1 000 m d'altitude | Habitats de chasse |
| Murin à oreille échancrée | <i>Myotis emarginatus</i> | LC (FR) | Fréquente les milieux boisés, espèce cavernicole → Propositions de gestion : https://inpn.mnhn.fr/docs/ca-hab/fiches/1321.pdf → Présence potentielle : Jusqu'à 1 000 m d'altitude | Habitats de chasse |
| Petit murin | <i>Myotis blythii</i> | NT (FR) | Cavernicole peut chasser dans la bande active du Vénéon ou de la Romanche. Jusqu'à 1 000 m d'altitude. → Propositions de gestion : | Habitats de chasse |

| | | | | |
|-------------|----------------------|---------|--|--------------------|
| | | | https://inpn.mnhn.fr/docs/ca-hab/fiches/1307.pdf → Présence potentielle : Jusqu'à 2 000 m d'altitude | |
| Grand murin | <i>Myotis myotis</i> | LC (FR) | Espèce essentiellement forestière. → Propositions de gestion : https://inpn.mnhn.fr/docs/ca-hab/fiches/1324.pdf → Présence potentielle : Jusqu'à 1 500 m d'altitude | Habitats de chasse |

Tableau 14 : Chiroptères inscrits à l'Annexe 2 de la Directive Habitat

| CHIROPTÈRES INSCRITS À L'ANNEXE 2 DE LA DIRECTIVE HABITAT | | | | |
|---|----------------------------------|-------------|---|--|
| Nom vernaculaire | Taxon | Statut IUCN | Présentation succincte | Nature de l'impact |
| Murin de Natterer | <i>Myotis nattereri</i> | LC (FR) | La reproduction s'effectue souvent sous un pont. → Présence potentielle : Jusqu'à 1 800 m d'altitude en Oisans | Habitats de reproduction |
| Murin de Dauberton | <i>Myotis daubentonii</i> | LC (FR) | Les sites de reproduction et de repos de cette espèce sont proches des cours d'eau. → Présence potentielle : Jusqu'à 1 800 m d'altitude | Site de reproduction, habitats de chasse |
| Pipistrelle commune | <i>Pipistrellus pipistrellus</i> | LC (CR) | Chasseur ubiquiste, jusqu'à 2 000 m d'altitude → Présence potentielle : Jusqu'à 2 000 m d'altitude | Habitats de chasse |
| Pipistrelle de Nathusius | <i>Pipistrellus nathusii</i> | NT (FR) | Espèce forestière. Seule espèce effectuant de véritables migrations. Plutôt sous les 750 m d'altitude, quelques contactages jusqu'à 2 000 m, mais rares. → Présence potentielle : ROM_4, ROM_3, ROM_2 VEN_7, | Habitats de chasse |
| Pipistrelle de Kuhl | <i>Pipistrellus kuhlii</i> | LC (FR) | Chasse en bordure des cours d'eau → Présence potentielle : Jusqu'à 1 000 m d'altitude, plutôt : ROM_4, ROM_3, ROM_2 VEN_7 | Habitats de chasse |
| Vespère de Savi | <i>Hypsugo savii</i> | LC (FR) | Chasse au-dessus des zones humides, → Présence potentielle : Contactée souvent en dessous de 750 m d'altitude, rares incursions plus haut : ROM_4, ROM_3, ROM_2 VEN_7 | Habitats de chasse |

Tableau 15 : Autres chiroptères présents dans le bassin amont de la Romanche

❖ Flore

Il n'y a pas d'espèce floristique inscrite à l'Annexe 2 de la Directive Habitat et menacée, strictement inféodée au milieu aquatique, toutefois le trèfle des rochers est susceptible de se développer sur les

bancs de galets du Vénéon (Buclet, Plan du Lac...). En, conséquence il faut tenir compte de la présence de cette espèce dans la bande active du Vénéon.

| ESPÈCE FLORISTIQUE INSCRITE À L'ANNEXE 2 DE LA DIRECTIVE HABITAT | | | |
|--|---------------------------|--------------------|---|
| Nom vernaculaire | Taxon | Statut particulier | Présentation succincte et préconisations |
| Trèfle des rochers | <i>Trifolium saxatile</i> | VU (FR) | Cette espèce est présente dans la bande active du Vénéon et de la Romanche (Bourg d'Oisans). On pourra ainsi avant une intervention de gestion de ces espaces effectuer des recherches (milieu associatif, CREN) et/ou des reconnaissances pour préserver les stations de trèfle des rochers. → Propositions de gestion : https://inpn.mnhn.fr/docs/cahab/fiches/1545.pdf → Présence potentielle : ROM_4, ROM_3, ROM_1, tout le Vénéon, mais préférentiellement VEN_7, VEN_3 |

Tableau 16 : Espèce floristique inscrite à l'annexe 2 de la Directive habitat

On peut également noter la présence dans la plaine du Buclet (ROM_3 et VEN_7) dans les boisements alluviaux relevant de l'alliance de l'*Alnion incanae* (cf. Tableau 6, code 91E0) d'une espèce protégée au niveau régional par l'arrêté du 4 décembre 1990 : l'inule de Suisse (*Inula helvetica*).

On note également la présence de deux espèces hydrophytes patrimoniales : le potamot dense (*Groenlandia densa*) classée **LC** (niveau européen) et surtout la renoncule à pinceau (*Ranunculus penicillatus*) classée **LC** (niveau européen). Ces deux espèces sont des espèces rares présentes au niveau de Bourg d'Oisans dans la Rive.

De manière plus générale, un contact avant travaux avec les opérateurs des sites Natura 2000 concernés (Parc National des Ecrins, mairie de La Grave pour le site FR9301497) serait le bienvenu afin d'évaluer la présence d'espèces floristiques patrimoniales et éventuellement de prendre des mesures de protection s'il y a lieu.

❖ Les crustacés

L'aphanomyose ou « peste des écrevisses »

Cette maladie a démarré en Italie dès 1860, puis en France (dans l'Est) en 1876. Cette maladie est venue d'Amérique *via* les écrevisses américaines (porteuses saines). Elle est due à un champignon (*Aphanomycoze astaci*) parasite spécifique des écrevisses.

Actuellement, elle se transmettrait par contact direct, par transport de spores *via* d'autres organismes (Nylund & Westman, 1992), voire par le matériel infecté de pêcheurs...

C'est une maladie foudroyante. Les écrevisses présentent des signes de fatigue, sortent de l'eau en laissant pendre leurs pinces et ne se défendent pas. Des membranes blanches (comme du coton) apparaissent sur les yeux et les articulations. L'issue est fatale.

La seule espèce patrimoniale de crustacé potentiellement présente est l'écrevisse à pieds blancs (*Austropotamobius pallipes*), elle apparaît ainsi dans le Formulaire Standard de Données (FSD) du site NATURA2000 « Plaine de bourg d'Oisans et ses versants » (FR8201738). D'après le statut de conservation IUCN, cette espèce est classée en danger (**EN**) au niveau mondial et vulnérable (**VU**) en France (cf. Encart 8).

Il s'agit d'une espèce très sensible à la transmission de l'aphanomyose, champignon très contagieux qui fait des ravages sur les populations d'écrevisses à pieds blancs (cf. Encart 10).

En premier lieu il sera nécessaire de mener des investigations complémentaires pour rechercher la présence de cette espèce.

Encart 10 : L'aphanomyose

Dans les zones potentielles de présence de cette espèce hautement patrimoniale et compte tenu du risque de contamination par l'aphanomycose, il serait souhaitable avant toute intervention pouvant les impacter de procéder à une prospection nocturne après repérage des stations potentielles le jour.

Il s'agit de contacter des écrevisses à pieds blancs et rechercher les limites amont et aval de la station (par exemple arrêt de prospection si pendant 50 mètres il n'y a pas de contactage). Des précautions doivent être prises entre les stations (désinfection des chaussants des intervenants...) et au niveau du matériel (désinfection), afin d'éviter tout risque de contamination par l'aphanomycose. En cas de non-contactage dans une zone où la présence d'écrevisse à pieds blancs est avérée, on pourra rechercher des exuvies ou poser des nasses appâtées ; Réaliser pour chaque station avérée une cartographie habitationnelle (Degiorgi, 2002) avec calcul de l'Indice Spécifique de Capacité Astacicole (ISCA).

C Les boisements du corridor alluvial de la Romanche et du Vénéon

Etant donné que le présent diagnostic a pour objectif principal de conduire à la rédaction d'un plan de gestion du transport solide, notre lecture des boisements de la Romanche et du Vénéon se fait à l'aune de l'hydromorphologie. Il s'agit ainsi de bien cibler les interactions entre végétation et formes des lits fluviaux.

❖ Les boisements du corridor alluvial

Boisements des cours d'eau

On distingue plusieurs types de boisements des cours d'eau que l'on peut classer en plusieurs types suivant leur position en lit :

⇒ Dans la bande active poussant sur les alluvions apportées après chaque crue (structures alluvionnaires) on rencontre les **boisements alluviaux pionniers** domaines privilégiés des salicacées, peupliers...

⇒ Sur la berge se développent les **boisements rivières** ou ripisylve,

⇒ Dans le lit majeur pousse les **boisements du corridor alluvial** ou forêt alluviale où l'on rencontre généralement deux types de communautés végétales : (1) *les communautés à bois tendres* (saules pourpres, drapés et blancs, peupliers noirs, aulnes...) et (2) *les communautés à bois mixtes* dominées et structurées par les bois durs (chênes, frênes, érables...).

Dans les communautés à bois tendres, les **processus allogéniques** (*i.e.* processus liés aux inondations) constituent le moteur de l'évolution et de la régénération. *A contrario*, dans les communautés à bois durs, ce sont les processus autogéniques (rapports de compétition, d'indépendance, de subordination) qui constituent le moteur d'évolution (Le Lay & Piégay, 1997).

Les boisements d'un corridor alluvial (au sens de Forman & Godron, 1986) sont complexes (*cf.* Encart 11), et directement contrôlés par l'hydromorphologie lors des crues. Entre les crues c'est la végétation qui exerce un contrôle sur les crues en favorisant la fixation du stock alluvial voire en générant des embâcles en lit plus en aval dans des zones de perte de charge et en favorisant ainsi le dépôt de macroformes, voire en modifiant significativement la morphologie du lit (*cf. infra*)

Les communautés végétales de ce corridor alluvial présentent des successions dans le temps qui sont le résultat d'interactions entre :

- Les **processus autogéniques** : rapports de dépendance, de subordination, de coopération, de mutualisme entre les différentes communautés présentes ;
- Les **processus allogéniques** : débordement et dissipation de l'énergie de l'eau dans les différents boisements avec arrachage des arbres vieillissants et apports de nutriments, sédiments et diaspores² (Pautou *et al.*, 1997).

Encart 11 : Boisements inféodés aux cours d'eau

Ainsi, les processus allogéniques régénèrent les boisements du corridor alluvial en créant des taches exploitées par les espèces pionnières, et démarrent un nouveau cycle de successions végétales.

² *Diaspores* : toute partie d'un végétal (fruit, graine, feuille...) détachées et amenées par les flots permettant de reproduire l'espèce par dissémination (par germination, bouturage...).

Les débordements en rechargeant la nappe d'accompagnement du cours d'eau favorisent les espèces à bois tendre supportant un ennoisement de leur système racinaire (saules, peupliers etc...) au détriment des espèces à bois durs.

Le rapport entre les bois tendres et les bois durs évolue dans le temps en fonction des crues. En effet, les bois tendres sont ainsi favorisés dans les périodes où la dynamique fluviale est intense tandis que dans les périodes de calme ce sont les bois durs qui se développent. Becker (1982) a étudié ce phénomène récurrent sur une période de 8 000 ans.

Il est à noter que l'incision des lits fluviaux favorise les bois durs au détriment des bois tendre en limitant voire en supprimant les capacités de débordement régénérant les bois tendres et abaissant le niveau des nappes d'accompagnement.

Nous évoquerons rapidement ici également l'impact du **boisement de versant** (pour lutter contre l'érosion ou encore les avalanches) sur la fourniture sédimentaire des cours d'eau, notamment dans le contexte actuel de déficit sédimentaire. Ces boisements ont pour la plupart été réalisés pour lutter contre les risques naturels dans le contexte de la crise morphogénique du Petit Âge Glaciaire.

Les versants dénudés constituent des contributeurs sédimentaires importants, pour la Romanche et le Vénéon, mais également pour leurs affluents ce qui favorise leur rôle de contributeurs sédimentaires pour les cours d'eau dans lesquels ils se jettent.

Dans la suite du paragraphe nous nous intéresserons essentiellement aux boisements alluviaux pionniers et aux boisements rivulaires. Dans les fiches-action (le cas échéant) la forêt alluviale ou encore les boisements de versant seront traités spécifiquement si besoin.

❖ *Les boisements alluviaux pionniers*

Ces boisements sont surtout présents dans les bandes actives des différents tressages (Plan du Lac, Buclet...), ainsi que sur les structures alluvionnaires des stades d'évolution fluvio-sylvigénétique avancés, c'est-à-dire les stades \geq SL2 et SC2 (cf. Annexe 2).



Figure 20 : Boisements alluviaux pionniers sur le tressage de la Romanche au Buclet (à gauche) et sur le Vénéon en amont de Plan du Lac (à droite)

Ces boisements alluviaux pionniers nécessitent une gestion particulière dans le sens où ils constituent un **élément important dans le contrôle de la morphologie du lit** de la Romanche et du Vénéon.

En particulier la présence et le développement de la végétation sous la forme de successions arbustives puis arborées :

- Contrôle dans les **zones de tressage** les phases de contraction de la bande active lors des périodes sans crue morphogène significative (cf. Figure 9). Le développement de cette végétation alluviale pionnière contribue ainsi à fermer plus ou moins le milieu et à rétracter la

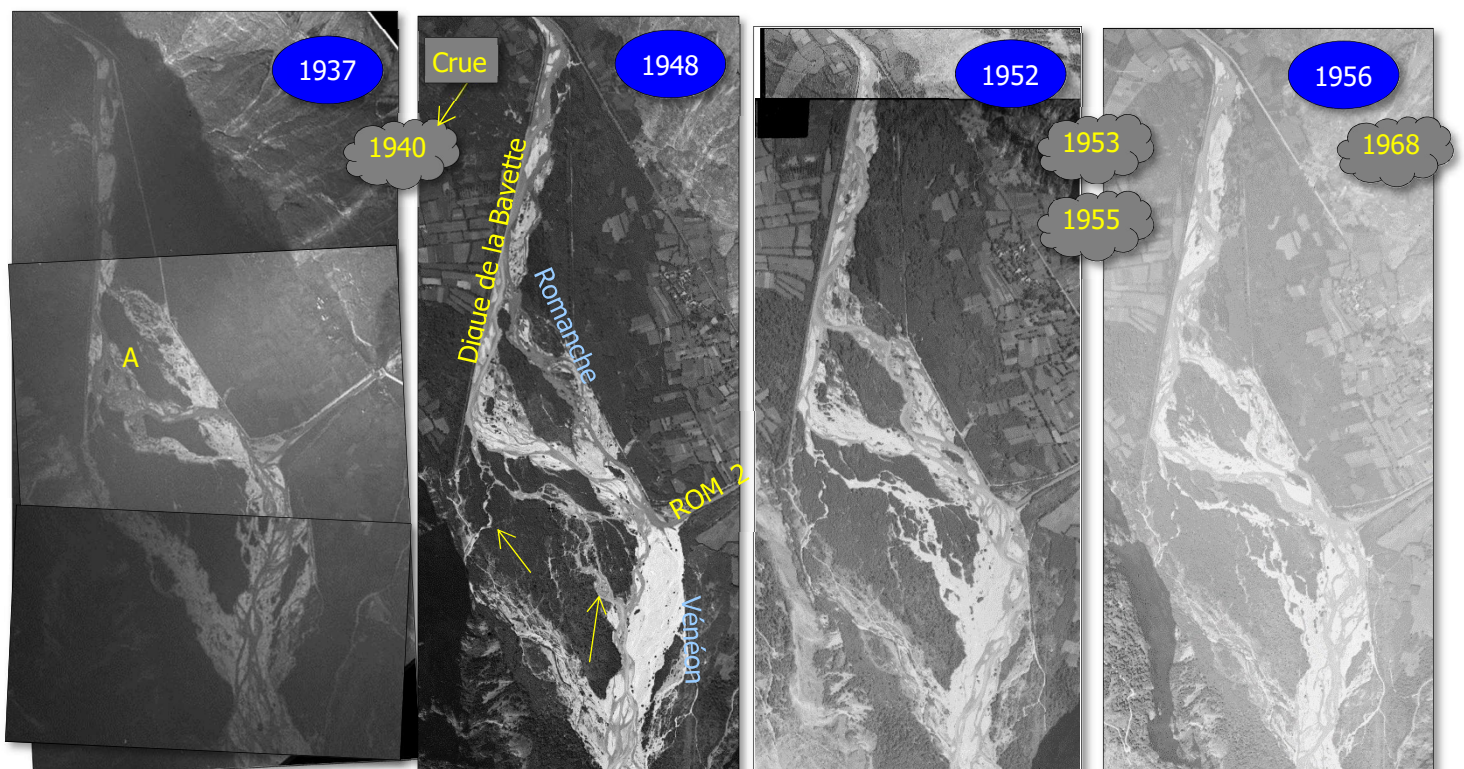
bande active à la fois sur ses marges et à l'intérieur de son emprise. Elle peut favoriser les accrétions alluviales en « peignant » les matériaux ou *a contrario* favoriser l'embâclage du lit lorsque des arbres sont arrachés et vont se bloquer plus en aval favorisant alors les phénomènes de dépôt-obstruction-défluviation (cf. Encart 18).

- Contrôle la maturité des **structures alluvionnaires** et donc leur fixation. Ainsi le développement des boisements alluviaux pionniers sur les structures alluvionnaires contribue soit à leur fixation soit à fournir des embâcles en lit avec toujours ce risque de dépôt-obstruction-défluviation (D-O-D).

La gestion de cette végétation est donc un élément important entre deux crues morphogènes pour éviter particulièrement l'embâclage du lit et ce phénomène de D-O-D, mais aussi pour limiter la fixation des structures alluvionnaires.

Il s'agit donc, entre deux crues, de « préparer » le lit en limitant notamment les risques de D-O-D et favorisant la mobilité du stock alluvial.

Les photographies suivantes montrent l'interaction entre les boisements alluviaux pionniers (mais également les boisements rivulaires et les boisements du corridor alluvial) et les crues dans la bande active de tressage.



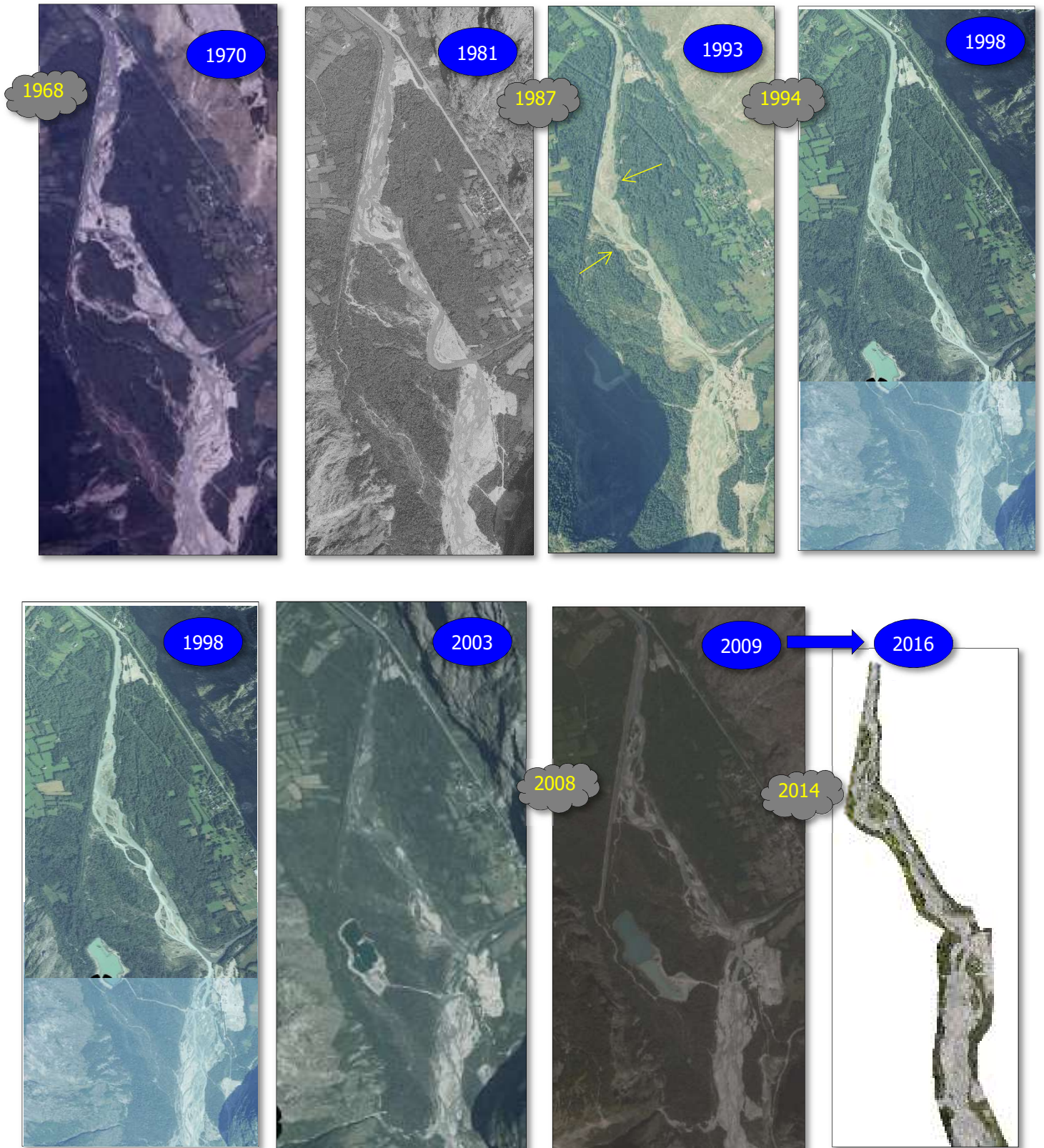


Figure 21 : Évolution de la bande active en amont de la Bayette entre 1937 et 2016

Les montages de photographies aériennes ci-dessus montrent l'évolution des boisements alluviaux des structures alluvionnaires et de la bande active de la Romanche dans le tronçon ROM_3 et dans la fin du tronçon VEN_7 du Vénéon.

En **1937** la bande active apparaît large et peu végétalisée, mais elle s'inscrit dans un fond de vallée remblayé par des matériaux fluvio-glaciaires et boisé. La bande active présente deux axes principaux diffusant à peu près au niveau du vallon de la Pisse et confluant après le premier tiers de la digue de la Bayette.

Après la forte crue de 1940 (580 m³/s sur la basse Romanche), le tressage s'accroît (en **1948**) avec l'ouverture de nouveaux chenaux (flèches). La végétation de l'interfluve entre les deux chenaux principaux a ainsi été arrachée et certainement charriée lors de la création de ces chenaux. Le système de tresses s'est donc développé au détriment de la végétation, les processus allogéniques de régénération de la végétation ont ainsi fonctionné.

Entre 1948 et **1956** le tressage n'évolue pas beaucoup et les chenaux restent superposables. La végétation est stable et les boisements alluviaux dans la bande active évoluent peu, ce qui montre que le tressage est fonctionnel et donc régulièrement rajeuni y compris pour des crues de forte récurrence. Il y a d'ailleurs eu des crues en 1953 et 1955.

À partir de **1970**, la bande active régresse fortement avec boisement. Les chenaux ouverts lors de la crue de 1940 tendent à se végétaliser. Le chenal bordant la grande structure végétalisée (noté A en 1937) s'est même végétalisé après s'être fortement rétracté à partir de 1956 malgré la crue de 1968.

On note entre **1981** et 1993, quelques évolutions en marge de la bande active avec des arrachages d'arbres et des zones érodées (flèche jaune en 1993).

À partir de **1993**, ces différents chenaux ne sont quasiment plus visibles sur la photographie aérienne. Malgré la crue de 1987 estimée à une crue décennale, la bande active se rétracte par végétalisation de ses marges (rétraction latérale) et certaines structures à l'intérieur même de la bande active commencent à se végétaliser. Ceci indique une activité dynamique réduite, voire traduit le début d'une incision.

Dans les années 90, la gravière est ouverte et exploitée, ce qui montre que le bras est complètement remblayé et déconnecté. La végétation est ainsi en train de l'envahir.

En **1998** la bande active se trouve bien réduite et se végétalise encore dans les années suivantes, compte tenu de la faible activité dynamique et certainement du début d'enfoncement du lit.

Sur cette période de 79 ans, la végétation a accompagné le rythme dynamique de la Romanche.

Les boisements alluviaux pionniers sont synthétisés dans le Tableau 17.

| BOISEMENTS ALLUVIAUX PIONNIERS DE LA ROMANCHE ET DU VÉNÉON | | |
|---|-----------------------------|--|
| Nature | Syntaxons | Localisation |
| Végétation pionnière herbacée des bancs de graviers (rivières alpines avec végétation ripicole herbacée – code EUR 15 : 3220) | <i>Epilobion fleischeri</i> | Remonte en amont dans tous les secteurs à tressage ou à bancs alluviaux. L'épilobe est présente jusqu'à 2 500 m d'altitude. Sur la Romanche (ROM_1) comme sur le Vénéon. |
| Saulaie pionnière sous forme de fourrés (stade d'évolution de l'habitat précédent) avec myricaire d'Allemagne (<i>Myricaria germanica</i>) et le saule faux daphné (<i>S. Daphnoides</i>) – Rivières alpines avec végétation ripicole ligneuse à <i>Myricaria germanica</i> , code EUR 15 : 3230. | <i>Salicion incanae</i> | Remonte en amont dans tous les secteurs à tressage ou à bancs alluviaux, sur la Romanche (ROM_1) comme sur le Vénéon. |

Tableau 17 : Boisements alluviaux pionniers de la Romanche et du Vénéon

❖ ⇒ Les boisements rivulaires

Les principaux boisements rivulaires sont présentés dans le Tableau 18.

| VÉGÉTATION RIVULAIRE (ALLIANCES PHYTOSOCIOLOGIQUES ³ PRESENTES) | | |
|--|---|---|
| Nature | Syntaxons ou taxon principal | Cours d'eau |
| Forêts alluviales à <i>Alnus glutinosa</i> et <i>Fraxinus excelsior</i> – Code EUR 15 : 91E0. | <i>Alnion incanae</i> , <i>Alno-Padion</i> , <i>Salicion albae</i> | Romanche (confluence Romanche-Eau d'Olle, rive droite confluence Romanche-Sarenne → lieu-dit la Courra, confluence Romanche-Vénéon, puis régulièrement en amont du bourg d'Oisans) et Vénéon, aval de la Sarenne. Aulnaie blanche (<i>Alnion incanae</i>) présente sur la Lignarre. |
| Rivières alpines avec végétation ripicole ligneuse à <i>Salix elaeagnos</i> – Code EUR 15 : 3240 | <i>Salix elaeagnos</i> | Romanche, Vénéon, Ferrand |
| Boulaie – aulnaie - saulaie | Bouleau verruqueux (<i>Betula pendula</i>), Aulne glutineux (<i>Alnus glutinosa</i>) et saulaie avec présence de <i>S. Daphnoides</i> | Vénéon (Plan du Lac) |
| Pinaie à <i>Pinus uncinata</i> | Pin à crochets (<i>Pinus uncinata</i>), <i>Pino-Juniperetea</i> | Amont du Vénéon |

Tableau 18 : Alliances phytosociologiques présentes dans les boisements rivulaires

³ Au sens du Prodomes des végétations de France établi par Bardat et al., 2004.

4 Sectorisation morphodynamique

La sectorisation morphodynamique consiste à découper la Romanche et le Vénéon en tronçon morphologiquement homogène, entité spatiale la plus pertinente pour décrire et gérer un cours d'eau (Malavoi & Adam, 2007). Ce compartimentage est réalisé en tenant compte des caractéristiques morphométriques du lit et des discontinuités sédimentaires, c'est à dire le style fluvial, la pente, et les perturbateurs hydromorphologiques tels que des ouvrages transversaux (barrages, seuils...).

Par cette méthodologie, on délimite ainsi quatre tronçons morphodynamiques pour la Romanche et sept tronçons pour le Vénéon présentés sur la Figure 22 et dont les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 19. Chaque tronçon est désigné par un identifiant qui comprend les trois premières lettres du cours d'eau suivies du numéro de tronçon donné de l'amont vers l'aval.

Il convient de noter que le tronçon de la Romanche situé entre les barrages du Chambon et du Clapier constitue un tronçon en gorge quasi inaccessible et sans référence bibliographique. C'est la raison pour laquelle il n'est pas intégré à la sectorisation.

| CARACTÉRISTIQUES DES TRONÇONS MORPHODYNAMIQUES DE LA ROMANCHE ET DU VÉNÉON | | | | | |
|--|--|---------------|-----------|-------------|-------------------|
| Identifiant | Localisation | Longueur [km] | Pente [%] | Sinusosité* | Style fluvial |
| ROM_1 | Pas d'Anna Falque → Barrage du Chambon | 18,5 | 4,1% | 1,07 | Divers |
| ROM_2 | Pont St-Guillaume → Vénéon | 0,8 | 0,67% | 1,06 | Monochenalisé |
| ROM_3 | Vénéon → Entonnement La Bayette | 2,0 | 0,39% | 1,15 | Tressant-divagant |
| ROM_4 | Entonnement La Bayette → Eau d'Olle | 9,8 | 0,15% | 1,02 | Monochenalisé |
| VEN_1 | Torrent des Étançons → Passerelle de la Muande | 6,9 | 3,6% | 1,07 | Monochenalisé |
| VEN_2 | Passerelle de la Muande → Camping Les Fétoules | 5,6 | 3,3% | 1,05 | Gorges |
| VEN_3 | Camping Les Fétoules → Plan du Lac | 2,4 | 1,1% | 1,07 | Tresses |
| VEN_4 | Plan du Lac → Camping de Bourg d'Arud | 2,1 | 14,2% | 1,05 | Gorges |
| VEN_5 | Camping de Bourg d'Arud → Pont Les Ougiers | 3,9 | 2,5% | 1,06 | Monochenalisé |
| VEN_6 | Pont Les Ougiers → Usine Pont Escoffier | 2,3 | 4,6% | 1,09 | Gorges |
| VEN_7 | Usine Pont Escoffier → Romanche | 2,8 | 1,0% | 1,17 | Tresses |

Tableau 19 : Principales caractéristiques des tronçons morphodynamiques de la Romanche et du Vénéon

Chaque tronçon morphodynamique de la Romanche et du Vénéon a fait l'objet d'une fiche descriptive disponible en [Annexe 1](#) mettant en relation les données suivantes :

- **Caractéristiques physiques et morphologiques** : longueur, pente moyenne, sinuosité, largeur moyenne de la bande active et style fluvial dominant ;
- **Caractéristiques granulométriques du lit** : diamètres caractéristiques (d_{30} , d_{50} , d_{90} , d_m) et étendue granulométrique ;
- **Pressions limitant le transit sédimentaire et la divagation du lit** : nombre de perturbateurs hydromorphologiques, corsetage du lit (pourcentages d'endiguement, de protections de berge...) ;
- **Bilan sédimentaire** : domaine sédimentaire, connexion versant-lit, contributeurs sédimentaires potentiels, stock alluvial, érosion latérale et capacité de charriage annuelle ;
- **Mobilité du lit** : latérale et verticale ;
- **Contexte environnemental** : caractérisation des habitats, espèces remarquables.

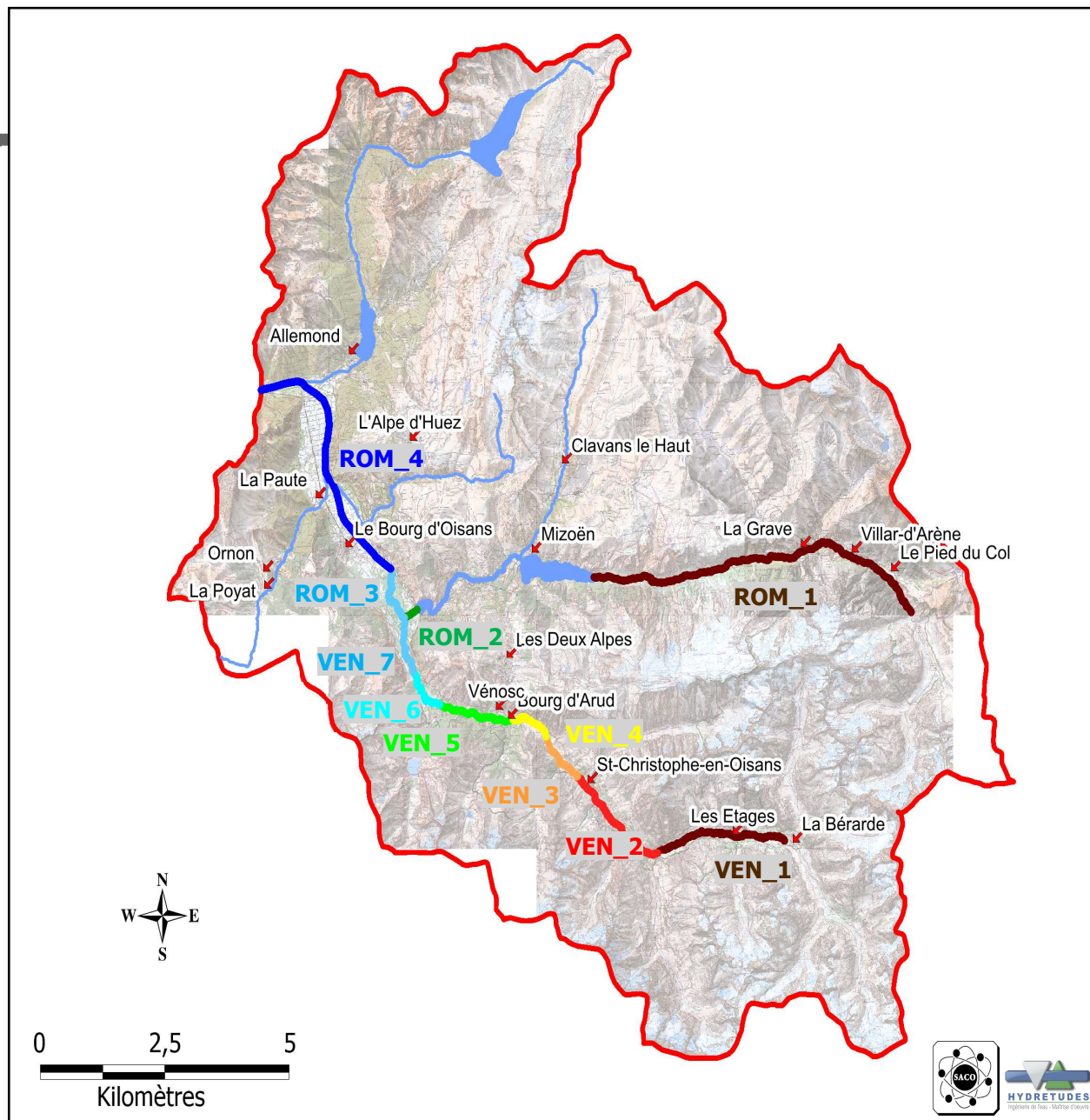


Figure 22 : Localisation des tronçons issus de la sectorisation morphodynamique de la Romanche et du Vénéon

5 Histoire géomorphologique du bassin versant

Ce chapitre concerne l'histoire géomorphologique du bassin versant de la Romanche influencé très fortement par le **modelé glaciaire**.

En effet, les vallées de la Romanche et du Vénéon ont été englacées. Cet englacement n'est en fait qu'une suite de phases d'englacement et de déglacement pendant toute la durée du Quaternaire (caractérisé par quatre principales glaciations – cf. Encart 5), qui ont laissé des traces sur le modelé de la région.

La connaissance de la déglaciation est un élément essentiel de la compréhension de la fourniture sédimentaire des bassins versants au modelé glaciaire. En effet, les glaciers :

Le paraglaciale

Church & Ryder (1972) ont développé ce concept qui a une double signification.

Il s'agit en premier lieu des processus géomorphologiques liés au phénomène de déglaciation. Lors de la fonte des glaciers les moraines, mais également les versants entaillés et fragilisés par la glace ou le fond des vallées fournissent des matériaux sous forme de coulées de boue, de débris etc... finissant sous forme de cônes ou de plaines d'épandages fluvioglaciaires.

On parle ensuite de séquence paraglaciale pour la longue période d'exportation des matériaux issus de la fonte des glaciers notamment par les cascades sédimentaires et les processus fluviaux.

- **Ont façonné le modelé des vallées** (auges glaciaires et ombilics), générant des zones de surcreusement (ombilics) remblayées ensuite avec des matériaux fluvioglaciaires constituant ainsi un plancher alluvial important et bancarisant un volume de matériaux détritiques base d'un stock alluvial conséquent.

- **Ont libéré une masse considérable de matériaux** (sédiments) qui ont été repris par divers processus de transport dont une faible partie a été exportée vers les cours d'eau. Des sources sédimentaires et des réservoirs durables (comme nous le détaillerons *infra*) existent encore actuellement sous forme d'un stock paraglaciale très important et peu couplé avec les cours d'eau.

Encart 12 : Le paraglaciale

Ainsi les phases de glaciation/déglaciation ont développé deux stocks sédimentaires hérités directement ou indirectement des processus glaciaires :

- Un **stock sédimentaire post-glaciaire** (ou paraglaciale – cf. Encart 12), constitué de sédiments (illuvions et colluvions) présents sur les versants et en pied de versant sous la forme de réservoirs. Les processus privilégiés de mise en place sont les mouvements de masse, les écroulements, l'ébouilisation...). Ce stock est disséminé sur l'ensemble du bassin à des altitudes variables. Il est toutefois ubiquiste et certainement très important. Une partie de ce stock est mobile, le reste est végétalisé donc fixé de manière naturelle ou anthropique.
- Un **stock alluvial** constitué de sédiments accumulés par des processus de transport fluvioglaciaires et fluviaux. Ce stock n'est constitué que lorsqu'il y a (ou il y a eu) couplage entre le stock sédimentaire post-glaciaire et le cours d'eau par divers processus intermédiaire de transport (ruissellement, gravité). En fait ce stock alluvial constitue une reprise par le processus de transport fluvial des sédiments dégagés par les appareils glaciaires et la séquence paraglaciale. Il s'agit donc d'une injection des sédiments glaciaires et post-glaciaires dans les cours d'eau. Ces sédiments deviennent alors des alluvions qui sont exportés à plus ou moins long terme par les cours d'eau.

Cette fourniture paraglaciale des cours d'eau constitue le moteur encore actuellement du fonctionnement des cours d'eau et est directement en relation avec les interrelations entre ces deux stocks. Slaymaker (2000) indique ainsi que le paraglaciale constitue la clef de la compréhension de l'évolution des milieux précédemment englacés. Cette fourniture sédimentaire et les transports solide dans les cours d'eau étant également sous influence (et dans certains cas sous contrôle) des forçages climatiques et anthropiques.

5.1 La déglaciation et la séquence paraglaciale

A Caractérisation de la séquence paraglaciale

Décompression paraglaciale

La décompression des versants, suite à la déglaciation, est égale à la compression qu'exerçait la glace en période glaciaire (Mercier).

La décompression est ainsi une force de même valeur mais de sens opposé à celle qu'exerçait le glacier sur les parois (*ibid.*).

La force de compression t est donnée par la formule suivante (Augustinus, 1992 ; Kerschner *et al.*, 1999 ; Liboutry, 2002 ; Cossart, 2002) :

$$t = r.g.h.\sin a.f$$

t = force de compression en pascals

r = masse volumique de la glace (900 kg/m³)

g = accélération de la pesanteur en 9,81 m/s²

h = épaisseur du glacier en m

a = pente de la surface du glacier

f = facteur géomorphologique (0,5 pour une langue glaciaire et 1 pour un glacier de cirque)

Comme nous l'avons déjà indiqué, lors de la fonte d'un glacier ce dernier libère une masse très importante de matériaux. Cette séquence qui est très longue (plusieurs dizaines de milliers d'années) est appelée la **séquence paraglaciale** (*cf.* Encart 12).

Lors du Quaternaire il y a eu ainsi après chaque décrue glaciaire (retrait substantiel d'un glacier) une séquence paraglaciale.

Lors d'une séquence paraglaciale, la fonte du glacier va libérer des matériaux sous la forme de :

- **Moraines latérales et frontales** qui sont généralement rapidement exportées,
- Débris liés au **raidissement des versants** modelés par le glacier, et aux pentes d'équilibre qui se sont formées suite à ce raidissement,
- Sédiments fournis par la **décompression des terrains** suite à la disparition de la glace qui contraignait fortement les versants (*cf.* Encart 13).

Encart 13 : La décompression paraglaciale

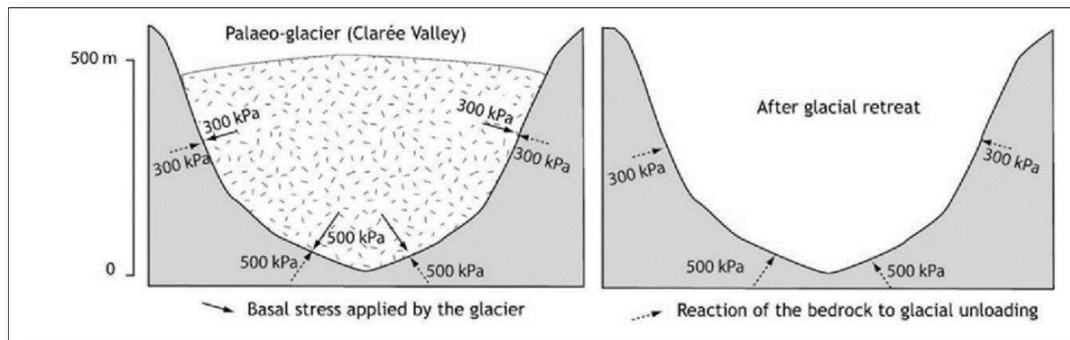


Figure 23 : Décompression rocheuse paraglaciale (exemple du paléo-glacier de la Clarée) (Cossart *et al.*, 2008)

C'est également au cours de ces séquences paraglaciaires que se forment les remblaiements fluvio-glaciaires dans les ombilics (*e.g.* celui de Bourg d'Oisans) et que se construisent les cônes alluviaux les plus importants. L'ensemble de ces éléments constitue le **stock sédimentaire paraglaciale**.

B La temporalité de la séquence paraglaciale

La séquence paraglaciale va ainsi injecter des matériaux avec différentes échelles de temps en fonction de la nature de ces matériaux et de leur disponibilité par rapport aux processus de transport et en particulier des cours d'eau, des mouvements de masse, des couloirs d'avalanche... Cette temporalité est présentée dans le Tableau 20 et à la Figure 24.

| TEMPORALITÉ DE LA SEQUENCE PARAGLACIAIRE D'APRÈS BALLANTYNE (2002) | | | |
|--|----------------|---------------------------|---|
| Processus | Demi-vie [an] | Durée de la séquence [an] | Références bibliographiques |
| Décompression rocheuse | 3 850 | 25 000 | Cruden & Hu (1993) |
| Ravinement des manteaux morainiques | 8 à 30 | 50 à 200 | Ballantyne & Bern (1994) |
| Ablation des moraines | 1 à 3 | 10 à 20 | Welch (1970) et Sharp (1984) |
| Constructions des cônes alluviaux | > 365 < 900 | > 2 400 < 6 000 | Ryder (1971) Beaudouin & King (1994) |

Tableau 20 : Temporalité de la séquence paraglaciale en fonction de l'origine des sédiments (Ballantyne, 2002)

La séquence paraglaciale est donc une séquence constituée en début d'un apport massif de sédiments puis d'un tarissement sur une longue période. Elle répond ainsi à un **modèle de tarissement**.

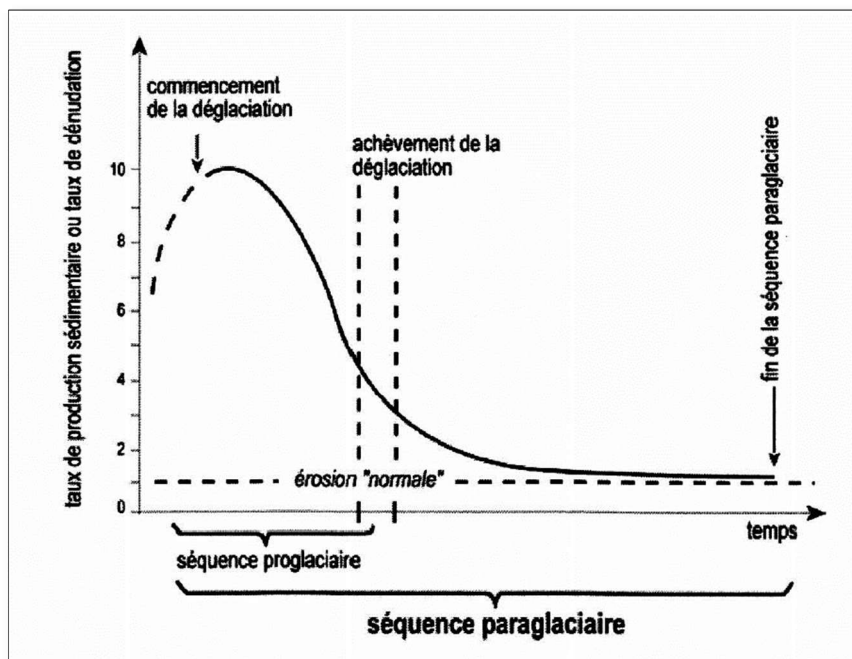


Figure 24 : Temporalité de la séquence paraglaciale (d'après Church & Ryder, 1972)

C Les mouvements de masse

Les mouvements de masse d'origine paraglaciale sont très importants pour la fourniture sédimentaire des bassins. En effet, ils peuvent libérer des millions de m³, voire obturer les vallées et modifier les profils en long en créant des niveaux de base local sur lesquels les alluvions viennent s'aggraver au fil des crues. Ces mouvements de masse peuvent contribuer ainsi à **fragmenter les hydrosystèmes**.

Ainsi sur la haute Gironde, un écoulement massif ayant obstrué la vallée il y a 7 à 8 000 ans a généré un niveau de base local et profondément modifié le profil en long du cours d'eau. Le réservoir sédimentaire situé au lieu-dit au nom évocateur (le Pré de Madame Carle) présenterait une réserve de 20 millions de m³ de matériaux à proportion de 75 % d'alluvions et 25 % d'éboulis (Cossart *et al.*, 2008). L'apport massif de matériaux et le taux d'ablation très faible de l'ordre du millimètre par an (Cossart, 2014) font que cette situation de blocage perdure depuis plusieurs milliers d'années.

La vallée de la Romanche en aval du Bourg d'Oisans a également été affectée par des obturations de son fond avec création de lacs (4 au total). Ces obturations étaient liées dans un premier temps à la présence de moraines barrant la vallée lors du Tardiglaciaire puis dans un second temps par des cônes de déjection très actifs entre 3000 Before Present et 1219 AD⁴ (Bailly-Maître *et al.*, 1997). Un paragraphe est consacré à l'obturation glaciaire de Plan du Lac sur le Vénéon (voir *infra*).

Cossart & Fort (2008) estiment que les mouvements de masse peuvent ainsi fournir plus de la moitié des sédiments dans les bassins montagnards. Ballantyne (2002) indique que les instabilités de versant constituent les principales sources d'injection vers les fonds de vallée.

Ainsi l'instabilité des versants peut injecter des volumes importants de matériaux brusquement. Ces injections massives peuvent bloquer le cours d'eau (obturation). L'influence sur le transport solide se traduit par un forçage de l'aggradation, créant alors un niveau de base local (Cossart 2014).

D La cascade sédimentaire paraglaciale

Les sources sédimentaires d'origine paraglaciale exportent gravitairement leur production *via* les versants vers les fonds de vallée. Ces matériaux dont nous avons déjà indiqué l'importance en volume aboutissent généralement en fond de vallée grâce à divers processus de transport (gravité, ruissellement...) et soit :

- Sortent du stock sédimentaire paraglaciale et sont **injectés** dans le **stock alluvial** de la Romanche ou du Vénéon,
- Se **bloquent** en fond de vallée dans des **réservoirs durables** (cône alluvial, éboulis, éboulement, chaos...).

Pour arriver de leur source vers le fond de vallée les matériaux suivent souvent un lent processus de transport avec des phases intermédiaires de stockage plus ou moins durables dans des réservoirs intermédiaires dans le versant (replat structural, épaulement glaciaire...).

Les cascades sédimentaires

Les cascades sédimentaires (Caine, 1974 ; Schumm, 1977) regroupent les flux de sédiments entre les zones sources (production), les zones de stockage intermédiaire (réservoirs sédimentaires) et les zones d'évacuation (exutoires) dans un bassin versant.

Les zones de stockage intermédiaire sont nombreuses en montagne (Godard, 1961 ; Caine, 1974) ce sont des connecteurs qui favorisent ou entravent le transit vers l'aval (Walker, 1990).

Les cascades sédimentaires sont des réseaux du type arbre comme les réseaux hydrographiques. Globalement le fonctionnement des cascades sédimentaires reste relativement mal connu.

Ils peuvent également emprunter un contributeur sédimentaire (affluent) qui les transporte vers le fond de vallée où ils se stockent dans un cône torrentiel.

Seuls des événements du type Basse Fréquence Haute Magnitude sont susceptibles alors de faire passer éventuellement (ce n'est pas systématique) ces matériaux du stock paraglaciale vers le stock alluvial.

On constate également que des cônes d'éboulis sont piégés sur des terrasses fluvio-glaciaires ou alluviales et leur exportation par injection dans le cours d'eau présent souvent à seulement quelques dizaines de mètres est quasiment impossible même en cas de survenue d'une crue Basse Fréquence Haute Magnitude* (*cf.* Figure 27). Cette situation est encore plus accrue en cas d'incision du cours d'eau.

Encart 14 : Les cascades sédimentaires

⁴ *Anno Domini* qui signifie après Jésus-Christ.

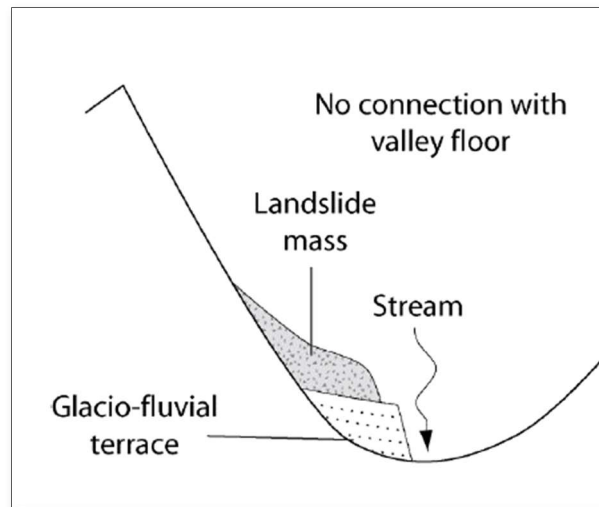


Figure 25 : Impact d'une terrasse fluvio-glaciaire sur le couplage d'un mouvement de masse (Cossart et al. 2013)
Absence de couplage entre un mouvement de masse (landslide mass) et un cours d'eau (stream) lié à la présence d'une terrasse fluvio-glaciaire (glacio-fluvial terrace)

C'est le système de la **cascade sédimentaire paraglaciale** (cf. Encart 14) qui met en jeu tout un ensemble de sources, de connecteurs et réservoirs, formant un *continuum* sédimentaire.

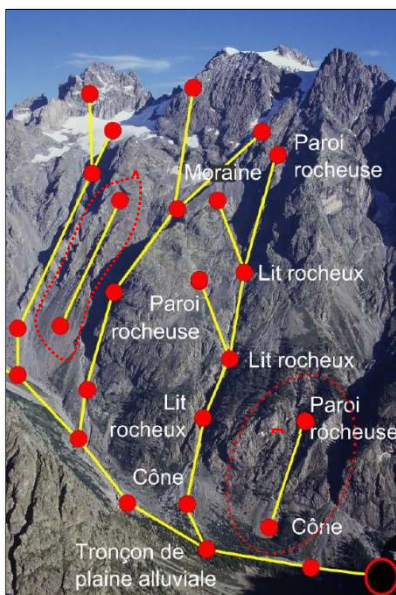


Figure 26 : Description d'une cascade sédimentaire paraglaciale sous la forme d'un graphique (Cossart, 2014)

Ainsi les sédiments sont généralement transportés depuis les **sources de production** vers de **réservoirs paraglaciaux** où ils se stockent. C'est la phase primaire de la cascade. Depuis ces réservoirs des mécanismes de transports secondaires se mettent ensuite en œuvre. Ils conduisent la plupart du temps les sédiments vers de **réservoirs durables** situés en fond de vallée (Jones, 2000). A notre échelle ces réservoirs durables sont de véritables pièges à sédiments, positionnés en pied de versant.

Une cascade sédimentaire répond ainsi à un fonctionnement complexe et multi-scalaire contrôlé à la fois par la liaison entre deux éléments (couplage sédimentaire au sens d'Harvey, 2001), mais également par l'agencement de l'ensemble des liens qui constitue le réseau en cascade (connectivité). Certains forçages externes impactent également le fonctionnement (*e.g.* le reboisement) (Gleyze, 2001).

En fait, l'exportation sédimentaire n'est possible que si les liens entre les différents réservoirs s'activent, provoquant alors une injection de matériaux (Cossart, 2014).

Actuellement les cascades sédimentaires sont représentées sous la forme de graphiques avec des nœuds (réservoirs sédimentaires) et des liens (connecteurs qui sont des zones de transfert entre réservoirs).

E Le « sediment delivery problem »

L'exportation des matériaux grâce aux cascades sédimentaires est lente et limitée. En effet, le volume exporté serait compris entre 1 et 15 % selon différents auteurs (Slaymaker, 1977 ; Trimble, 1983 ; Olive

et al., 1994 ; Fryirs & Brialey, 2001). Cossart (2014) précise bien que cette « inefficacité géomorphologique » (*sic*) est liée au fonctionnement complexe des cascades paraglaciaires.

On parle alors de ***sediment delivery problem*** (Walling, 1983) que l'on pourrait traduire par le « **problème de la délivrance des matériaux** ». Les matériaux sont produits, injectés dans le stock paraglaciaire *via* les cascades sédimentaires, mais les matériaux ont du mal à s'exporter vers le cours d'eau principal. Walling (*ibid.*) met ainsi en avant la différence entre la production et l'exportation dans les cascades sédimentaires liée au fonctionnement des connecteurs, dans l'espace et dans le temps. Certains de ces connecteurs n'étant activés que pour des événements du type Basse Fréquence Haute Magnitude.

Walker (1990) parle même de ***sedimentological anarchy***, caractérisant alors les cascades sédimentaires d'une véritable anarchie sédimentaire dans leur fonctionnement qui apparaît parfois erratique et donc difficilement prévisible.

Cossart (2016) titre ainsi un article de référence sur les cascades sédimentaires : « *l'(in)efficacité géomorphologique des cascades sédimentaires en question : les apports d'une analyse réseau* », dans lequel il explique que les propriétés intrinsèques de couplage et de connectivité créent cette inaptitude structurelle à exporter les matériaux vers les fonds de vallée.

Ces éléments sont illustrés à la Figure 27.

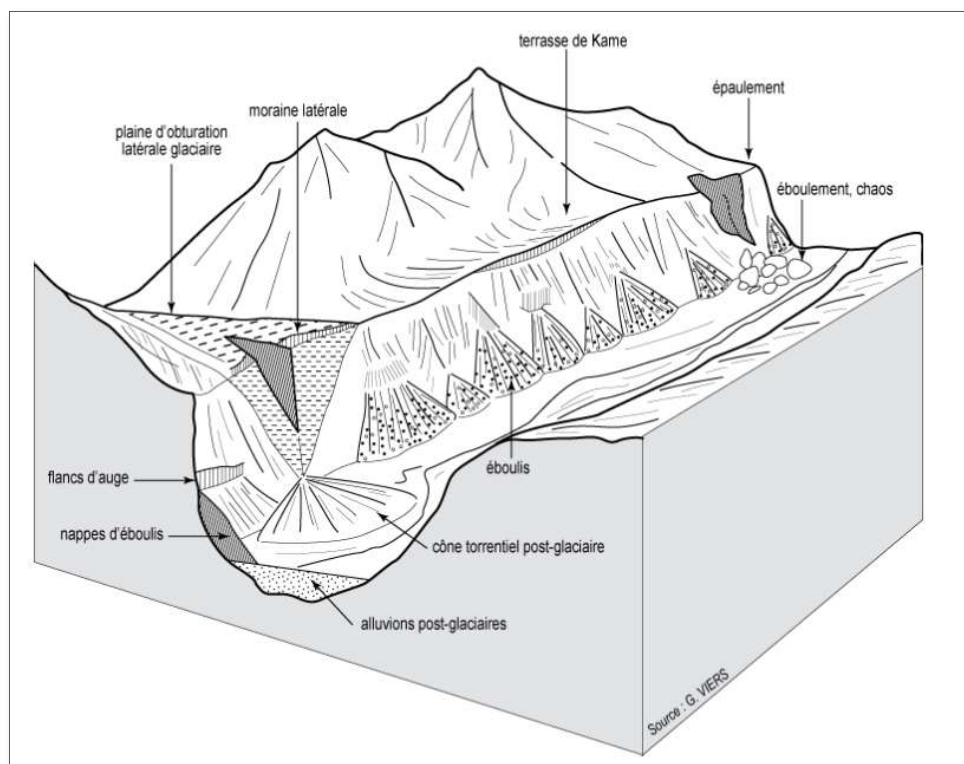


Figure 27 : Éléments bloqués dans des réservoirs sédimentaires durables en pied de cascades sédimentaires (Viers, 1967)

La passerelle entre le stock paraglaciaire et le stock alluvial est donc un élément clé pour la fourniture sédimentaire (charge grossière) des cours d'eau de fond de vallée. C'est donc certainement une piste majeure pour un plan de gestion dans le contexte de tarissement sédimentaire qui touche nos latitudes.

5.2 La séquence paraglaciale de la Romanche et du Vénéon

A Les glaciers de la Romanche et Vénéon

Le glacier de la Romanche était un appareil glaciaire puissant qui drainait un important bassin versant glaciaire ($\approx 1\,100 \pm 50 \text{ km}^2$ avec une surface théorique de la zone d'ablation de 550 km^2 , Coutterand, 2010). Ce glacier puissant présentait un flux glaciaire convergent avec celui du glacier de l'Arc. En amont de Bourg d'Oisans, la surface du glacier de la Romanche dépassait largement 2 500 mètres d'altitude. Au niveau de la Bérarde, la glace atteignait même 2 700 mètres d'altitude (Coutterand, 2010).

Dans les Alpes, d'après Montjuvent (1978), les glaciers ont connu leur Dernier Maximum Glaciaire* au Würm II, c'est-à-dire entre 87 500 et 54 000 ans *Before Present* à $\pm 5\,000$ ans. Dans le cas du bassin versant de la Romanche, on l'estime entre 70 000 et 50 000 ans *Before Present* (Montjuvent, 1978 ; Mandier, 1984 ; Nicoud, 1993 ; Mandier, 2003). Le glacier de la Romanche aurait alors atteint Uriage à cette époque et aurait également laissé des moraines sur le plateau de Champagnels.

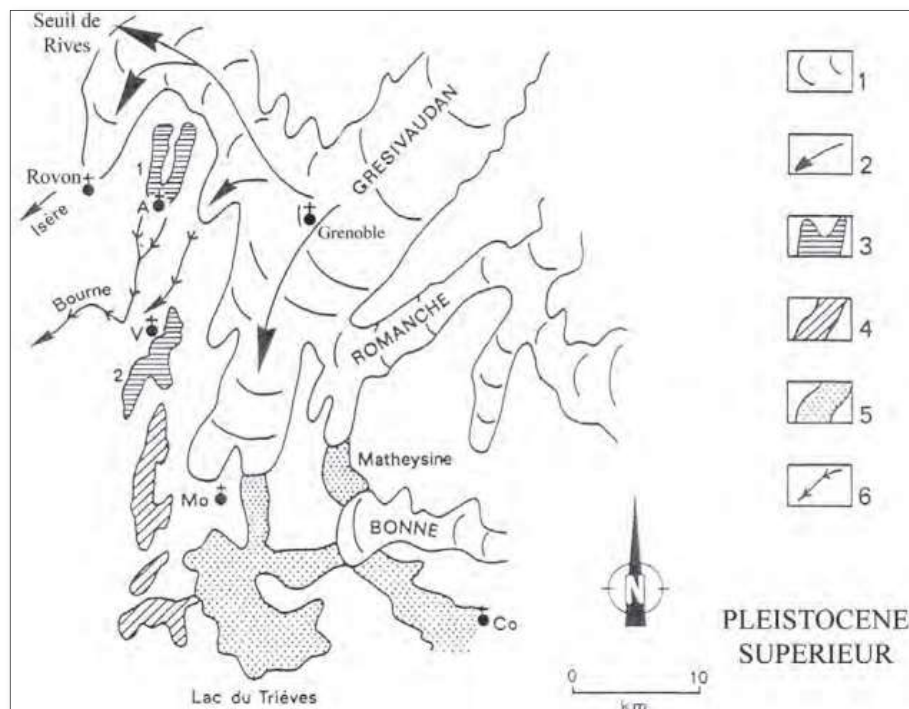


Figure 28 : Dernier Maximum Glaciaire du glacier de l'Isère avec celui de la Romanche au Würm II
1 : appareils glaciaires ; 2 : flux glaciaires ; 3-4 : glaciers locaux ; 5 : lacs de barrage glaciaire (Montjuvent, 1978)

Les glaciers actuellement présents dans le bassin versant de la Romanche sont des **glaciers relictuels** en cours de démembrement compte tenu notamment de l'évolution des conditions climatiques. Dès la première moitié du XX^{ème} siècle, on constate déjà des reculs notables.

La comparaison des photographies du glacier des Etançons présentée ci-dessous montre bien ce recul des glaciers :



Figure 29 : Retrait du glacier des Étançons entre la fin du XIX^{ème} et 2012 (Gardent, 2014)

Le glacier de la Pilatte sur le Vénéon a ainsi fluctué entre 1894 et 1955, mais s'est globalement considérablement restreint (cf. Tableau 21). Il continue actuellement de régresser sous l'effet du forçage climatique. Les photographies ci-dessous illustrent ce phénomène (1884 versus 2002) :

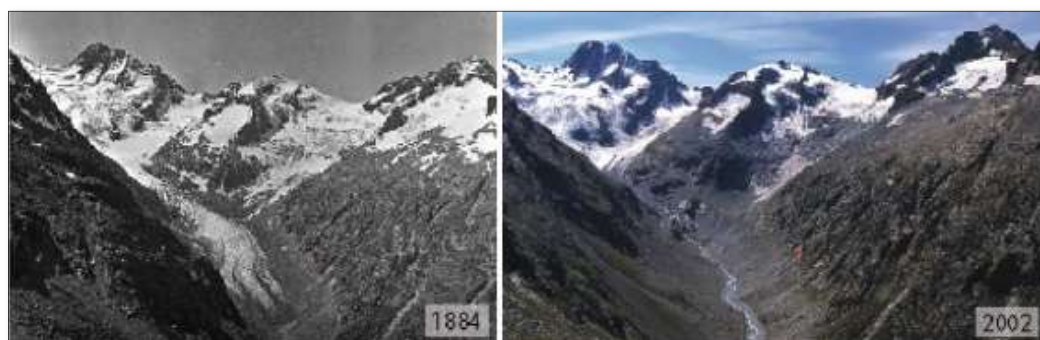


Figure 30: Rétraction du glacier de la Pilatte entre 1884 et 2002 (Gardent, 2014)

Par ailleurs, la comparaison des surfaces englacées des glaciers de la Romanche et du Vénéon entre 1925-1930 et 1952 montre des pertes très importantes en 25 ans (cf. Tableau 22).

| ÉVOLUTION DU FRONT DU GLACIER DE LA PILATTE (1893-1948) | | | |
|---|-------------------|----------------------------|------------------------------|
| Années | Recul/avancée [m] | Recul/avancée moyen [m/an] | Observations |
| 1893-1916 | - 272 | - 1,83 | |
| 1916-1918 | 0 | 0 | |
| 1918-1924 | NC | NC | Crue glaciaire |
| 1924-1927 | + 63 | + 21,00 | Crue glaciaire |
| 1927-1930 | - 9 | - 3,00 | |
| 1930-1933 | - 26 | - 8,66 | Très marqué à partir de 1932 |
| 1933-1938 | - 11 | - 2,20 | |
| 1933-1945 | - 106 | - 8,83 | |
| 1945-1948 | - 32 | -10,66 | |

Tableau 21 : Évolution du glacier de la Pilatte entre 1893 et 1948 (d'après Sitzmann, 1961)

| ÉVOLUTION DE LA SURFACE DES GLACIERS DE LA ROMANCHE ET DU VÉNÉON | | | |
|--|-------------------|--------------|--------------|
| Glacier | 1925-1930 [ha] | 1952 [ha] | Perte [%] |
| Grandes Rousses | 970 | 756 | 22% |
| Alpe de Villar-d'Arêne | 1 446 | 1 292 | 11% |
| La Grave | 1 722 | 1 559 | 9,5% |
| Diable et Étançons | 1 282 | 1 060 | 18% |
| Haut Vénéon (Pilatte...) | 1 666 | 1 467 | 12% |
| Oisans Sud-Ouest | 1 768 | 1 328 | 24% |
| Total | 8 853 | 7 462 | 16% |

Tableau 22 : Évolution de la surface des glaciers de la Romanche et du Vénéon entre 1925-1930 et 1952 (d'après Sitzmann, 1979)

B La séquence paraglaciale du Vénéon

Compte tenu de la configuration du bassin versant amont de la Romanche (production sédimentaire de la Romanche bloquée par le barrage du Chambon, enjeux liés à la présence de la plaine du Buclet en amont du Bourg d'Oisans, fourniture sédimentaire par le Vénéon...), il convient tout particulièrement de s'intéresser à la séquence paraglaciale du Vénéon.

Pour comprendre une séquence paraglaciale, il est important de la borner dans le temps, c'est-à-dire de connaître son origine temporelle.

D'après la documentation scientifique, le Dernier Maximum Glaciaire pour le bassin versant de la Romanche se situe au Würm III, qui se serait terminé il y a 18 000 ans Before Present. D'autres données le dateraient à 20 000 ans, voire plus. On peut donc conclure que nous sommes en **fin de séquence paraglaciale** :

- Seuls les matériaux piégés dans le stock sédimentaire paraglaciale actuel (sédiments paléoglaciales) peuvent être exploités partiellement par connexion, mais la compétence des processus d'érosion contemporains semble insuffisante pour connecter les stockages durables avec le stock alluvial ;
- Les matériaux impliqués dans un mouvement de masse pourraient se rajouter à ces éléments ;
- Éventuellement (compte tenu de la récurrence de glaciers relique), on peut considérer une micro-séquence paraglaciale post-Petit Âge Glaciaire. Toutefois, au vu des volumes résiduels des appareils glaciaires, cette séquence « nouvelle » ne doit pas présenter une ampleur très importante.

C Fin de séquence et crise géomorphologique

Dans notre cas nous savons que nous sommes largement au-delà de la demi-vie de la séquence paraglaciale et nous pensons même que nous sommes en fin de séquence.

Cette situation implique que le bassin de la Romanche n'a pas vocation à injecter de pic de matériaux (comme en début de séquence) dans le stock paraglaciale et ensuite *via* les cascades sédimentaires dans le stock alluvial.

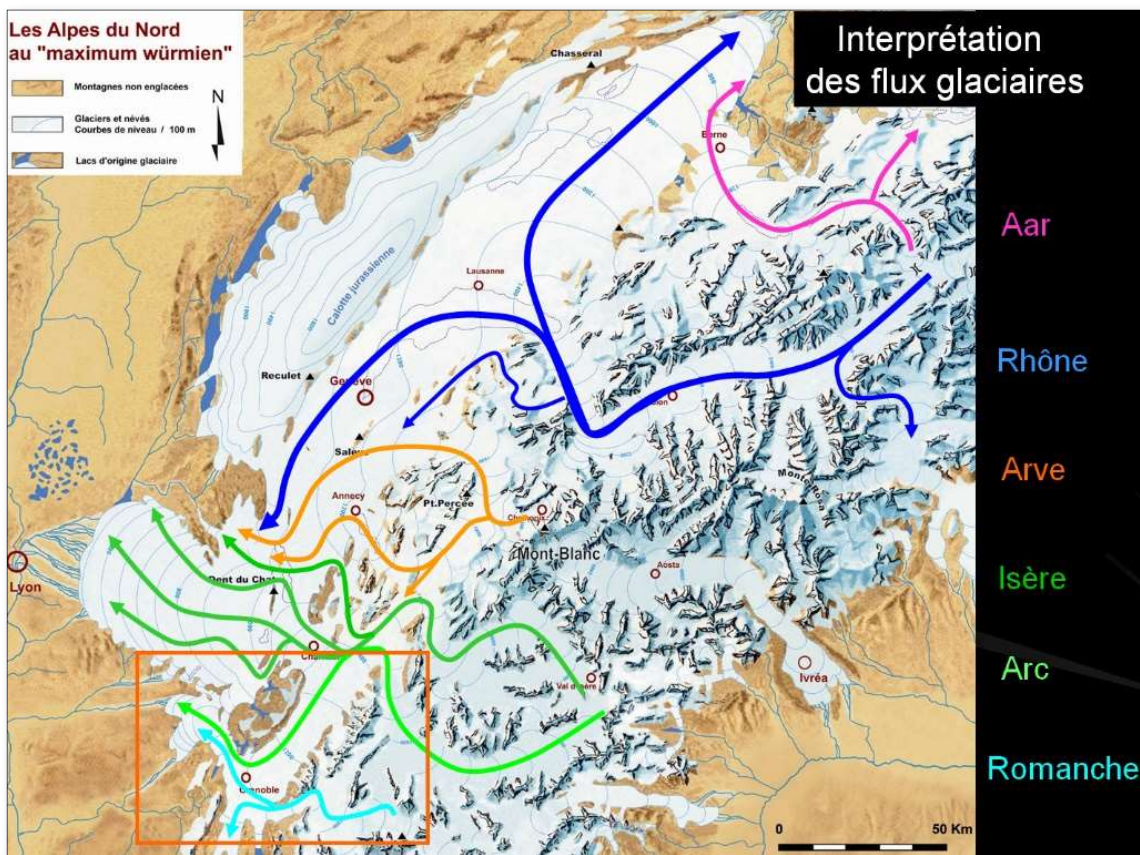


Figure 31 : Dernier Maximum Glaciaire au Würm III pour les Alpes du Nord et le glacier de la Romanche (Coutterand, 2010)

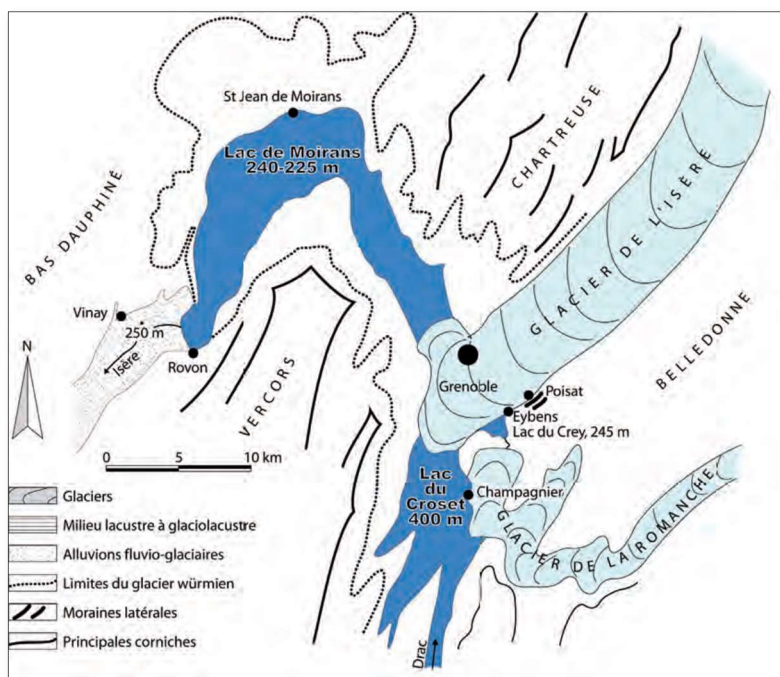


Figure 32 : Réurrence du glacier de la Romanche au Würm III (Montjuvent, 1978)

Ainsi la recharge sédimentaire du stock paraglaciaire (et de fait celle du stock alluvial qui lui est inféodé) ne peut plus bénéficier d'injections de masses importantes de matériaux. De plus, le forçage climatique (réchauffement) conduisant à la raréfaction des événements Basse Fréquence Haute Magnitude*, ainsi que les forçages anthropiques conduisent également à une baisse notable de la production sédimentaire.

Le Petit Âge Glaciaire a réactivé les glaciers (avancée glaciaire, cf. Figure 33) et a généré ainsi une « petite » séquence paraglaciaire par rapport à celle du Dernier Maximum Glaciaire du Würm III. C'était une période de fourniture sédimentaire importante (réactivation des processus de versants) favorisant notamment les styles en tresses. La fin du Petit Âge Glaciaire est datée vers 1850 soit environ 160/170 ans ce qui semble indiquer que le tressage du Vénéon au Buclet pourrait être sous influence de cette séquence.

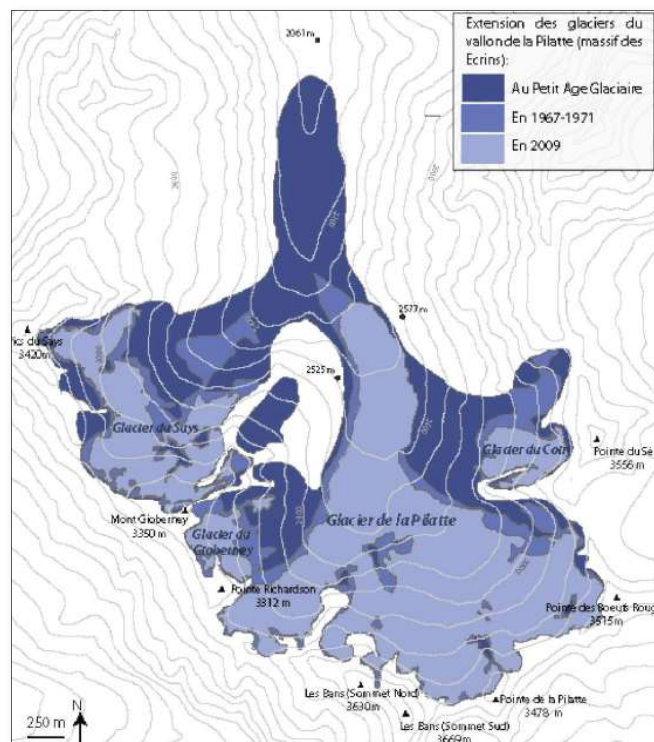


Figure 33 : Extension du glacier de la Pilatte au PAG (Gardent, 2014)

Cette approche laisse à penser que l'évolution future du bassin de la Romanche pourrait conduire aux événements suivants :

- Une **incision des lits fluviaux** (comme sur la plupart des cours d'eau des Alpes, voire même de l'Hémisphère Nord, cf. § 2.5) ;
- Un **déstockage important du stock alluvial** du fait d'un déficit en termes de soutien (renouvellement insuffisant donc budget sédimentaire déficitaire) par les crues Basse Fréquence Haute Magnitude*, mais surtout par un découplage entre le stock sédimentaire paraglaciaire et le stock alluvial.

Il faut donc s'attendre à voir dans les prochaines décennies une nouvelle crise géomorphologique post-paraglaciaire après celle de la séquence paraglaciaire.

Cette situation est liée à la fluctuation climatique (glaciaire → interglaciaire → glaciaire) et à son impact sédimentaire comme forçage climatique :

- La dernière période glaciaire (Würm III) suivi de la séquence paraglaciale holocène ;
- L'impact du Petit Âge Glaciaire et du réchauffement en cours ;
- Starkel (1987) a ainsi mis en avant les points suivants : lors des périodes froides, l'ablation (érosion) domine avec des apports sédimentaires dans les espaces plans des vallées (remplissage fluvio-glaciaire), et lors des périodes de réchauffement, l'érosion diminue, les versants se stabilisent et la pédogénèse (processus conduisant à la formation de sols) se met en place ;
- La fourniture sédimentaire optimale s'effectue sous forme de pic en début de séquence paraglaciale.

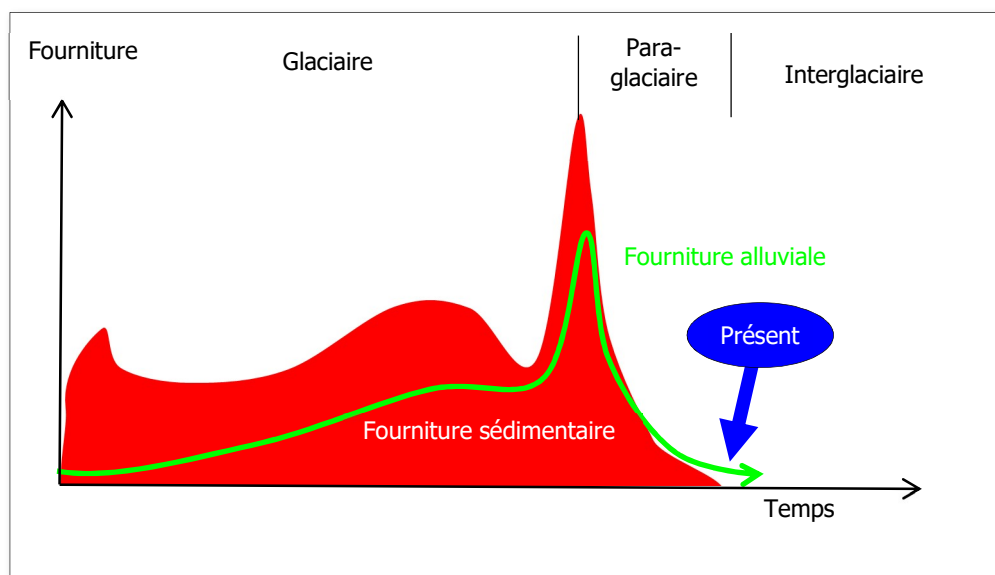


Figure 34 : Évolution de la fourniture sédimentaire d'origine glaciaire et de la fourniture alluviale (inspirée de Starkel, 1987 et Huggett, 2007)

À la crise géomorphologique paraglaciale caractérisée par une potentielle surabondance de la charge alluviale liée aux interconnexions entre stock sédimentaire paraglaciale et stock alluvial, succède une **crise géomorphologique post-paraglaciale** liée au **tarissement paraglaciale** (fin de séquence).

Cette crise géomorphologique post-paraglaciale est plus ou moins impactée par les forçages climatiques et anthropiques qui peuvent ainsi favoriser et donc accentuer le tarissement sédimentaire.

Le plan de gestion du bassin de la Romanche devra donc :

- Tenir compte de ce contexte géomorphologique très prégnant ;
- Se positionner comme un forçage anthropique volontaire pour limiter les effets de cette crise géomorphologique post-glaciaire ;
- S'inscrire dans le temps pour être efficace ;
- Être précisément suivi et évalué pour être le plus efficace possible.

Ainsi le plan de gestion doit intégrer deux éléments : (1) le tarissement sédimentaire et (2) la masse de matériaux paraglaciales sédimentés dans des pièges durables (découplage stock sédimentaire-stock alluvial) pour être efficient.

D Un cas particulier d'obturation paraglacière : Plan du Lac sur le Vénéon

Les obturations paraglaciaires sont des mouvements de masse de fort volume qui obstruent les vallées glaciaires. Lorsque le cours d'eau ne peut évacuer la masse de matériaux injectée brusquement, ces éboulements créent des niveaux de base locaux et favorisent ainsi l'aggradation des alluvions transportés par le cours d'eau.

Le Vénéon dans le secteur de Plan du Lac s'écoule dans une vallée glaciaire en auge creusée essentiellement dans les gneiss ocellaires.

Cette vallée a été obturée par un éboulement post-glaciaire de gros blocs ayant ainsi injecté 40 millions de m³ de matériaux. Les matériaux se sont éboulés sur 1 000 mètres environ depuis la face Nord du Cloutet (Montjuvent & Marnezy, 1986). La date de survenue de cet éboulement n'est pas connue, mais il s'est effectué dans la période historique.

Ainsi la vallée du Vénéon ne présente pas à cet endroit un ombilic fermé par un verrou glaciaire sur lequel on aurait pu implanter un barrage à l'instar de celui du Chambon (ancré sur un verrou en gneiss migmatitiques), c'est pour cette raison que Plan du Lac a bénéficié d'un aménagement hydroélectrique de moindre ampleur.

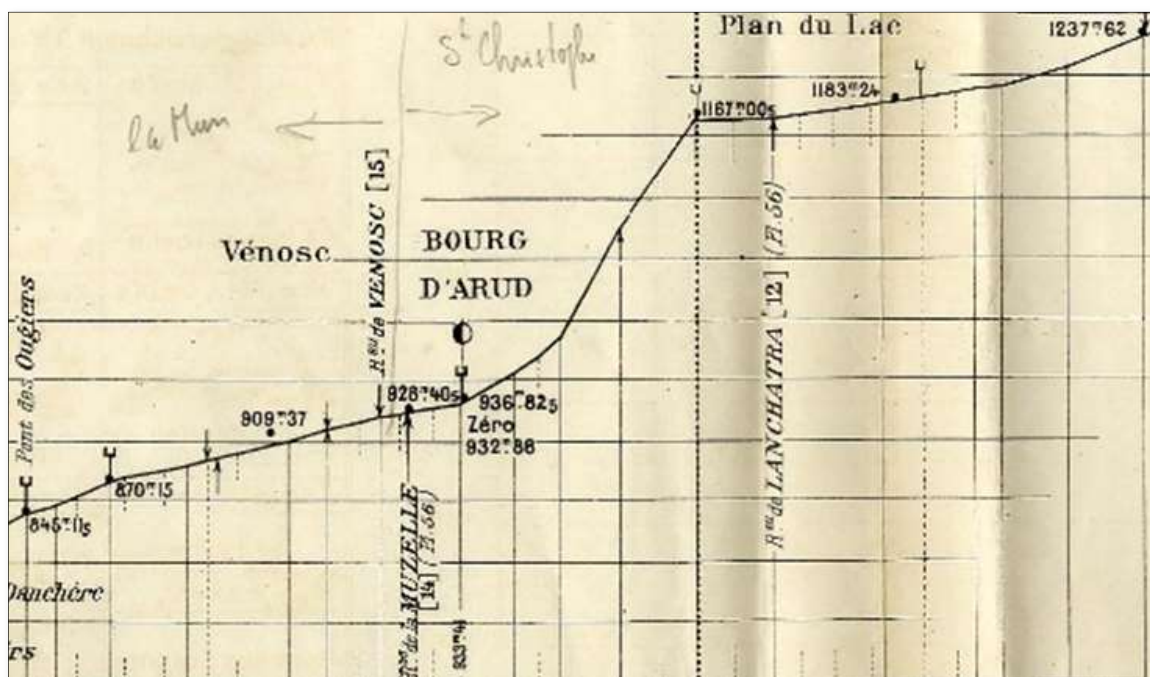


Figure 35 : Profil en long 1911 dans le secteur de Plan du Lac montrant l'impact de l'éboulement

6 Héritage géomorphologique

La trajectoire géomorphologique de la Romanche et du Vénéon est sous influence directe de forçages externes tels que les forçages climatiques et les forçages anthropiques qui se sont produits par le passé. L'analyse de l'héritage géomorphologique consiste donc à replacer le bassin versant amont de la Romanche par rapport à sa dynamique ancienne, en confrontant et comprenant les impacts des modifications climatiques et anthropiques sur cette dynamique.

6.1 Forçages climatiques

Les modifications climatiques sont des modifications lourdes à échelle globale. La Romanche est bien évidemment sous influence de ces modifications climatiques liées notamment à la sortie de la période froide du Petit Âge Glaciaire et donc au réchauffement actuel.

En effet, la période du Petit Âge Glaciaire (1350-1850) présentait un climat instable alternant des périodes avec des épisodes de crues répétées et violentes sur plusieurs décennies et des périodes d'accalmies assez courtes.

Ainsi, d'un point de vue hydrologique, cette période se caractérisait par une fréquence et une intensité marquées des **crues fortement morphogènes** dites Basse Fréquence Haute Magnitude (BFHM) (Arnaud-Fassetta & Fort, 2004), par rapport à la période actuelle. Cette fréquence/intensité supérieure des crues BFHM a conduit à une évolution morphogénique des cours d'eau avec notamment une **érosion** plus marquée, un **transport solide** conséquent et des apports de matériaux dans le lit importants. On peut ainsi parler de recharge sédimentaire quasi-continue.

Durant le Petit Âge Glaciaire, les hivers étaient également plus rigoureux, ce qui a eu pour effet de limiter le développement de la végétation en montagne et donc d'y favoriser l'érosion. Les étés étaient plus pluvieux favorisant aussi l'érodabilité des versants. La charge grossière était donc plus abondante.

Depuis la fin du Petit Âge Glaciaire vers 1850, le retour à des conditions climatiques plus calmes et à un espacement et une moindre magnitude des crues Basse Fréquence Haute Magnitude a conduit à une très forte limitation de la charge grossière, favorisant ainsi l'érosion verticale au détriment de l'érosion latérale. On note ainsi de manière quasi généralisée une incision* des lits fluviaux résultant du **tarissement sédimentaire** post-Petit Âge Glaciaire.

| ÉVOLUTIONS CLIMATIQUES ET INCIDENCES SUR LA ROMANCHE ET LE VÉNÉON | | | |
|---|--|-----------------------------|----------------------|
| Modifications climatiques | Effets principaux induits ou chaîne des effets induits | Impacts sur les cours d'eau | Romanche Vénéon |
| Réchauffement | Remontée de la couverture végétale en montagne ⇒ Baisse de l'érosion et déconnexion versants/lit ⇒ Baisse de la fourniture sédimentaire | Incision des lits fluviaux | Peu impacté |
| Baisse de la pluviométrie | Raréfaction des crues Basse Fréquence Haute Magnitude* : (i) Végétalisation des structures alluvionnaires et des bandes actives (contraction des tressages) ⇒ Baisse de la mobilité des structures alluvionnaires (ii) Baisse de la morphogénie ⇒ Baisse de la mobilité des structures alluvionnaires (iii) Baisse de l'érosion ⇒ Baisse de la fourniture sédimentaire | Incision des lits fluviaux | Certainement impacté |

Tableau 23 : Évolutions climatiques et incidences probables sur la Romanche et le Vénéon

6.2 Modifications anthropiques

Les modifications liées à l'évolution climatique post-Petit Âge Glaciaire ne sont pas les seuls éléments contrôlant la trajectoire géomorphologique de la Romanche. L'impact de certaines activités anthropiques contribuent également à limiter la charge sédimentaire et sont donc également importantes comme facteur favorisant l'incision des lits fluviaux. Elles ont ainsi contribué à amplifier le tarissement sédimentaire post-Petit Âge Glaciaire.

Dans le cadre du bassin versant amont de la Romanche, il s'agit d'étudier les impacts des principales activités et modifications anthropiques influençant fortement et durablement la dynamique des cours d'eau à travers les éléments suivants : les aménagements, tels que les perturbateurs hydromorphologiques et le corsetage du lit, ainsi que les extractions de matériaux.

Cette analyse repose sur la bibliographie existante (*cf.* Tableau 1) et sur les investigations de terrain menées par HYDRETTUDES en juin 2016.

A Les aménagements

❖ Travaux historiques

La bibliographie existante relate de nombreux travaux dans le bassin versant du **Vénéon** qu'il convient d'indiquer. La plupart de ces aménagements concernent la protection et le développement touristique des secteurs à enjeux tels que la Bérarde (camping, parking), Plan du Lac (RD530...), Bourg d'Arud... L'ensemble de ces aménagements présentés dans le Tableau 24 ont généralement été créés dans les zones de divagation du Vénéon, contraignant ainsi la mobilité latérale du cours d'eau.

De plus, la zone du Buclet (VEN_7) a été marquée par la construction d'un seuil sur le Vénéon en 1989 permettant l'accès à la gravière du Vénéon et son exploitation par la société SOVEMAT durant la période de concession. Afin de ne pas impacter la qualité des eaux et la libre circulation piscicole, le seuil se décomposait pour moitié d'un passage busé en rive droite (\varnothing 1900 mm) et d'un passage à gué au fil d'eau en rive gauche, le point bas préférentiel demeurant le passage busé (*cf.* Figure 36). La mise en place de ce seuil a fortement contraint le lit du Vénéon en créant un rétrécissement en amont immédiat de la confluence avec la Romanche, et semble également avoir favorisé l'engravement du lit en amont et son enfoncement en aval (ETRM, 2007).

À la suite de la crue de 2008, le seuil a été partiellement reconstruit, la partie busée ayant été emportée par les flots lors de la crue. La fin de la concession d'exploitation de la gravière du Vénéon en 2013 a engagé la question de l'effacement du seuil, afin de limiter l'engravement et favoriser le transit sédimentaire vers la Romanche. Toutefois, cette question a été abandonnée lorsque l'ouvrage a été totalement emporté lors de la crue de 2014.



Figure 36 : Partie busée du seuil sur le Vénéon avant la crue de 2008 (à gauche) et après (à droite)

| SYNTHÈSE DES AMÉNAGEMENTS HISTORIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DU VÉNÉON | | | | |
|--|----------------|----------------------------------|---|----------------------|
| Localisation | Année | Type d'aménagement | Description | Source |
| Bérarde (VEN_1) | 1975-1979 | Seuil parafouille | Suite aux curages de 1975-1979, création de trois seuils parafoilles pour stabiliser le lit du Vénéon. Actuellement, ils ne sont plus visibles, ce qui témoignerait du ré-engravement du Vénéon | BURGEAP & ETRM, 2006 |
| | 1985-1989 | Camping | Création d'un pont et d'une voie d'accès. Travaux de rectification du lit et de protection de berge par enrochement en rive gauche sur 450 ml. Création d'une digue au droit du camping. Création d'une passerelle. Remblaiement partiel de l'aire du camping | |
| | 1987-1989 | Parking | Création du parking sous le village dans une ancienne zone de divagation du Vénéon impactée par les curages de 1975-1979. Travaux de remblaiement, de rectification du lit et de protection de berge par enrochement sur 350 ml | |
| Plan du Lac (VEN_3) | 1910 | Ancienne route nationale | Création de la route nationale jusqu'à St-Christophe-en-Oisans et mise en service en 1921 mais entretien difficile (avalanche, chute de pierres...) | BURGEAP & ETRM, 2006 |
| | 1930-1950 | Barrage | Création du barrage EDF de Plan du Lac alimenté par une galerie souterraine issue du lac de la Muzelle et arrivant en rive gauche en amont du pont de la RD530 | |
| | 1978-1980 | RD530 | Création de la plateforme routière Détournements du Vénéon en rive gauche. Travaux de protection de berge en enrochement pour protéger le talus routier et 9 épis | |
| | 1985 | Gîte d'étape | Création d'une digue de fermeture du bras mort en prolongeant un des 9 épis situé en amont du gîte en rive droite | |
| Bourg d'Arud (VEN_5) | 1991 | Aire de bivouac « Les Fétoules » | Travaux de remblaiement et de protection de berge en enrochement sur un linéaire de 250 ml | RTM, 2008 |
| | Post-crue 1928 | Protection de berge | Création d'un mur-digue de part et d'autre du pont de la RD530 | |
| | Post-crue 1955 | Protection de berge | Chenalisation étendue en aval en rive gauche pour protéger des parcelles agricoles | |
| | 1970 | Camping | Travaux de remblaiement du lit majeur et implantation du camping | |
| | 1988 | Protection de berge | Chenalisation complète du Vénéon suite à la crue de 1987 | |
| Buclet (VEN_7) | 1989 | Seuil | Création d'un seuil pour accéder à la fosse d'extraction du Vénéon constitué en rive gauche d'un radier et en rive droite d'une série de buse | ETRM, 2007 |
| | 2009 | Seuil | Reconstruction du seuil suite à la crue de 2008 (partie busée ruinée). Création de cloisons en béton banché sur une semelle en béton. Le seuil sera détruit totalement lors de la crue de 2014. | |

Tableau 24 : Synthèse des aménagements historiques dans le bassin versant du Vénéon

La **Lignarre** a également fait l'objet de divers aménagements historiques détaillés dans l'étude réalisée par le service de la RTM (2012) et synthétisés dans le Tableau 25.

Il s'agit principalement de travaux de détournement et d'endiguement depuis le pont de la RD91 jusqu'à la confluence avec la Romanche, réalisés dès 1845, afin de protéger le village de la Paute et les terrains agricoles. Suite à de nombreuses crues, les digues ont régulièrement été réhaussées, réparées et consolidées (1859-1860, 1864, 1876, 06/1887, 1902, 09/1940).

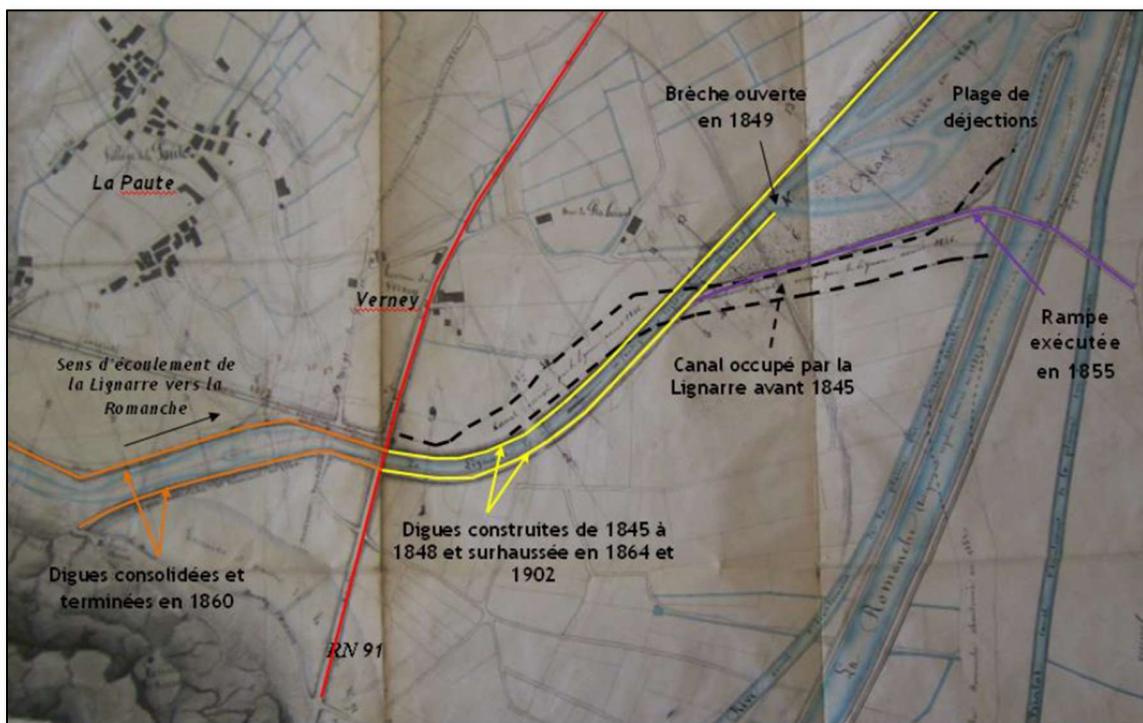


Figure 37 : Travaux historiques d'endiguement de la Lignarre reporté sur un fond de carte datant de 1865
(Source : RTM, 2012, p. 43)

Soumis à un transport solide intense non repris par la Romanche, le lit de la Lignarre présentait également des exhaussements importants (pont de la RN91 engravé jusqu'au sommet des culées, RTM, 2012, p. 9), risquant de provoquer une rehausse de la ligne d'eau, voire une surverse au droit des digues.



Figure 38 : Barrage n°1 de la Poyat (Hydrétudes, 05/2016)

Pour pallier cette situation, cinq barrages de sédimentation ont été construits de 1880 à 1991 en amont du système d'endiguement et ont fait l'objet de travaux d'entretien et de réparation suite notamment aux crues du 21 octobre 1928 (rupture du barrage de la Poyat) et du 24-25 août 1931.

Une plage de dépôt a également été aménagée entre les barrages n°4 et n°5 régulièrement entretenue depuis 1988 et dont la capacité de stockage est de 5 000 m³ (RTM, 2012).

| SYNTHÈSE DES AMÉNAGEMENTS HISTORIQUES SUR LA LIGNARRE | |
|---|---|
| Année | Description |
| 08/1842 | Construction du pont en amont du pont de la RN91 |
| 1845-1848 | Détournement et endiguement entre le pont de la RN91 et la Romanche sur 1 255 ml. Le nouveau lit est surélevé de 3 à 4 mètres par rapport au terrain naturel. |
| 1855-1856 | Repurgement du lit entre le pont de la RN91 et la Romanche sur 1 254 ml |
| 1880 | Construction du barrage n°1 de la Poyat |
| 1929 | Reconstruction du barrage n°1 suite à sa rupture lors de la cure du 21 octobre 1928 |
| 1939 | Construction du barrage n°2 |
| 1949 | Construction du barrage n°3 |
| 1966 | Construction du barrage n°4 car le barrage n°3 est atterri |
| 1991 | Construction du barrage n°5 |

Tableau 25 : Synthèse des aménagements historiques sur la Lignarre (Source : RTM, 2012, pp. 9-10)

Des aménagements ont également été réalisés sur l'**Eau d'Olle**. Il s'agit essentiellement de travaux d'endiguement pour la protection des biens et des personnes, notamment entre le barrage du Verney et la confluence avec la Romanche. D'après les éléments établis par Deniau (1997) et repris par HYDRETTUES (2010), les digues de l'Eau d'Olle ont été construites durant la seconde moitié du XIX^e siècle, dans lesquelles des brèches se sont par la suite produites. HYDRETTUES (2010) indique que si l'origine des matériaux n'est pas clairement identifiée à la création des digues de l'Eau d'Olle, on sait toutefois que les surélévations et élargissements établis après 1930 sont réalisés à partir des matériaux de dragage du cours d'eau.

| SYNTHÈSE DES AMÉNAGEMENTS HISTORIQUES SUR L'EAU D'OLLE | |
|--|--|
| Année | Description |
| 1851 | Création d'une digue au droit de la Pernière d'En Bas en amont du pont de la RD526, de la digue rive gauche de Pisse-Vache en amont du pont de la RD52 et entre le pont de la RD56 et la passerelle de la Pernière Basse |
| 1877-1881 | Création de la digue en amont de la Pernière d'en Haut |
| 1883 | Rectification du lit au lieu-dit la Taillat |
| 1912 | Surélévation et élargissement du lit entre la Fonderie et le hameau de la Pernière d'en Haut |
| 1913-1919 | Dérivation à l'aval du pont de la RD56 avec création de digues en rives droite et gauche. L'ancien lit se situe vraisemblablement au droit du ruisseau (limite communale) ? |
| 1936-1937 | Élargissement du lit rive gauche en amont et aval du pont de la RD56 |
| 1943 | Consolidation de la digue rive droite de la Pernière |
| 1955 | Mise en œuvre d'enrochements rive droite au droit de la Fonderie et de perrés maçonnés et gabions au droit de la fonderie |
| 1957 | Surélévation de la digue rive droite entre le canal de la Fonderie et la passerelle de la Pernière d'en Bas |
| 1979 | Élargissement de la digue rive gauche de la digue de Pisse-Vache pour accès aux lotissements Construction du barrage du Verney |
| 1984-1985 | Mise en eau du barrage du Verney |
| 2001 | Remplacement des gabions par des enrochements côté canal au droit de la Fonderie Mise en œuvre d'enrochements côté rivière de la digue de Pisse-Vache |

Tableau 26 : Synthèse des aménagements historiques sur l'Eau d'Olle (Source : Deniau, 1997 repris par HYDRETTUES, 2010)

Aucune donnée historique ne permet de retracer les travaux d'endiguement de la **Sarenne** en amont proche de la confluence avec la Romanche. BURGEAP (2016, p. 18) indique toutefois que les digues érigées le long de la Sarenne en amont des Trois Ponts sont principalement constituées de matériaux sédimentaires historiquement extraits du lit et déposés en berge et s'apparentent davantage à des merlons irréguliers.

Par ailleurs, une plage de dépôt a été aménagée sur la Sarenne en 2003 en aval immédiat du pont de la RD211, d'une longueur de 60 mètres et délimitée par deux seuils de fond construits en enrochements sur une hauteur de 40 cm (seuil amont) et 30 cm (seuil aval).

❖ *Les perturbateurs hydromorphologiques*

Les perturbateurs hydromorphologiques regroupent l'ensemble des ouvrages transversaux présents dans lit d'un cours d'eau. Ils affectent durablement le profil en long en compartimentant le lit fluvial, créant ainsi des tronçons à dynamique propre et altérant la continuité sédimentaire et/ou écologique. On distingue deux types de perturbateurs hydromorphologiques définis en fonction de leur origine :

- Les **perturbateurs géomorphologiques** concernent les seuils naturels généralement dégagés par l'incision des cours d'eau qui, après avoir affouillé leur plancher alluvial, s'écoulent directement sur la roche ;
- Les **perturbateurs anthropiques** concernent les ouvrages transversaux tels que les barrages, seuils, passages à gué, ponts... La plupart d'entre eux ont généralement un usage (hydroélectricité, stabilisation du profil en long, franchissement...).

L'altération du profil en long par la présence de perturbateurs hydromorphologiques peut conduire à une modification du style fluvial en aval (barrage, seuil altérant fortement le transit sédimentaire...) : on parle alors de perturbateur majeur. Dans le cas où l'impact n'est que local, on parle de perturbateur secondaire (radier, gué...).

L'ensemble des perturbateurs hydromorphologiques de la Romanche et du Vénéon ont été recensés dans le cadre des investigations de terrain et analysés, afin de connaître leur impact sur la continuité sédimentaire. La Figure 39 montre la localisation des perturbateurs hydromorphologiques en fonction de leur type et de leur degré d'impact.

Le premier constat montre un nombre peu important de perturbateurs hydromorphologiques tant sur la Romanche que sur le Vénéon (18 et 15 au total, respectivement), et dont la totalité sont des **perturbateurs anthropiques**, en particulier des **ponts** et des **barrages**.

On note également que sur les 18 perturbateurs hydromorphologiques de la Romanche, seuls trois d'entre eux ont un degré d'impact majeur. Il s'agit notamment des barrages de l'Oche (hauteur de 3 mètres) et du Chambon (hauteur de 90 mètres) sur le tronçon ROM_1 et le barrage du Clapier sur le tronçon ROM_2. Concernant les perturbateurs anthropiques du Vénéon, seul le barrage de Plan du Lac présente un degré d'impact majeur.

Ainsi, le profil en long de la Romanche est compartimenté par des ouvrages transversaux de hauteur relativement importante, en particulier le barrage du Chambon, ayant la capacité de stocker des matériaux et donc d'avoir un impact très fort sur le transport solide et de manière plus générale sur la continuité écologique. Les apports de matériaux en amont du tronçon ROM_2 sont donc très limités.

Quant au Vénéon, son profil en long n'apparaît pas morcelé malgré la présence du barrage de Plan du Lac (hauteur de 3 mètres), ce qui permet un transit sédimentaire sans grande discontinuité.

Il est à noter également que les principaux affluents de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans présentent des perturbateurs hydromorphologiques majeurs, en particulier les cinq barrages successifs de la Poyat sur la Lignarre, et les barrages de Grand-Maison (hauteur de 160 mètres) et du Verney (hauteur 42 mètres) sur l'Eau d'Olle, et des perturbateurs hydromorphologiques secondaires, essentiellement des ponts et passerelles.

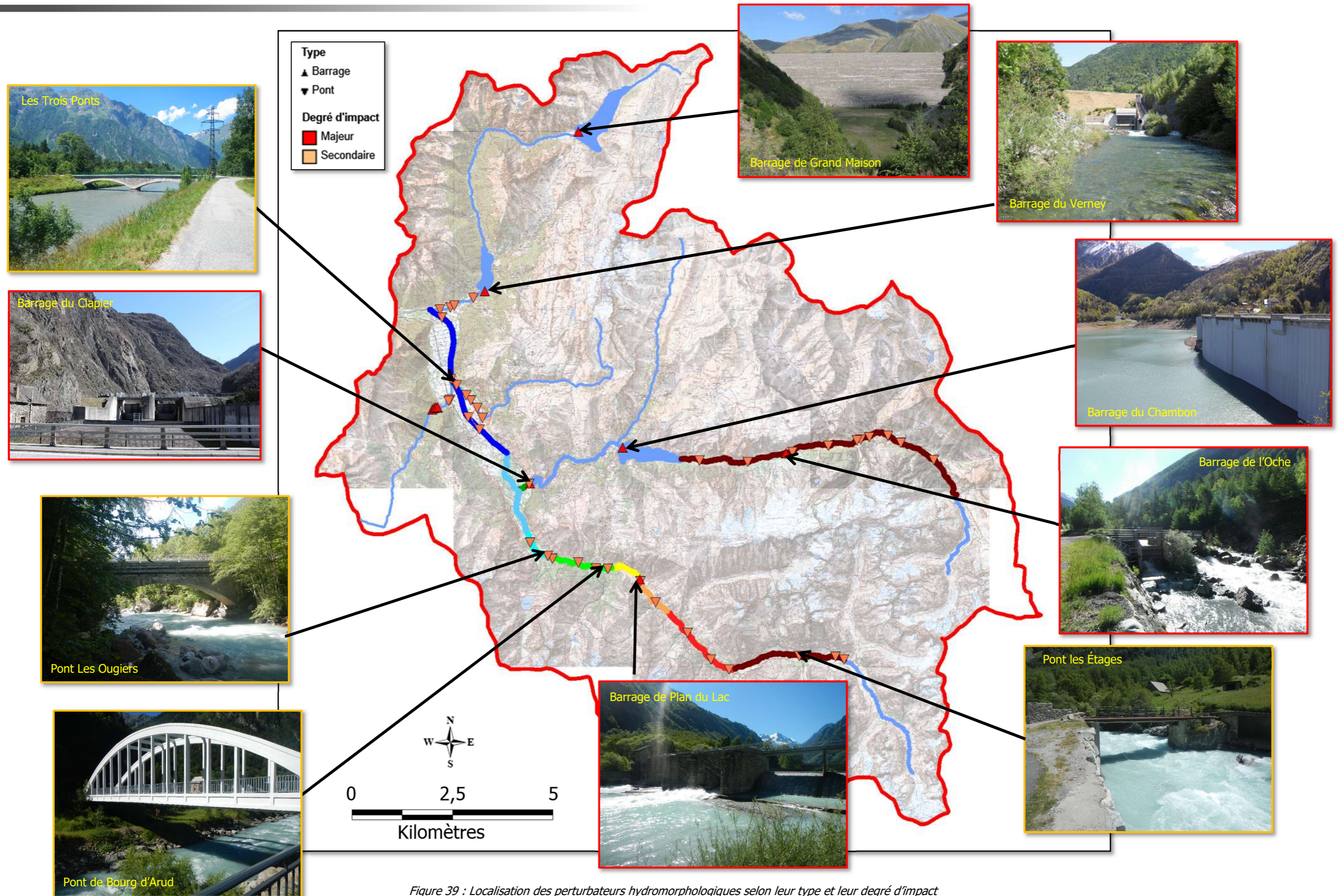


Figure 39 : Localisation des perturbateurs hydromorphologiques selon leur type et leur degré d'impact

❖ Le corsetage du lit

Le corsetage du lit d'un cours d'eau est constitué essentiellement des **ouvrages longitudinaux** (merlons, digues, mur-digue...) et des **confortements de berge** (enrochements libres ou liaisonnés, gabion, épis...). Suivant leur positionnement, ces éléments empêchent la respiration* latérale du lit (donc de la bande active), la mobilité de certaines structures géomorphologiques comme les méandres en fixant leur extradoss*, et la recharge sédimentaire par érosion latérale.

Ces éléments révèlent également d'anciennes zones érodées, dans la mesure où la motivation de leur mise en œuvre a été la protection d'un enjeu contre une érosion préexistante et menaçant directement cet enjeu ou risquant de le menacer à terme.

La connaissance du corsetage d'un lit d'un cours d'eau permet donc d'appréhender certaines zones de mobilité, ainsi que les protections obsolètes pouvant éventuellement être effacées (notamment pour augmenter la recharge latérale, si besoin). Ces protections obsolètes peuvent générer des points durs en aval impactant fortement la dynamique du cours d'eau (risque de contournement, voire d'avulsion*).

Ainsi, les investigations de terrain ont permis d'identifier les principaux linéaires corsetés de la Romanche et du Vénéon présentés à la Figure 40.

On constate que le lit de la **Romanche** est totalement corseté dans la plaine de Bourg d'Oisans. Dès le barrage du Clapier et sur l'intégralité du tronçon ROM_2, la Romanche est endiguée sur ses deux rives. Puis, sur le tronçon ROM_3, la Romanche est contrainte en rive droite par la digue des Alberges ($\approx 2,2$ km de longueur) et en rive gauche par la digue de la Croix du Plan (≈ 2 km de longueur), le long desquelles le lit est progressivement entonné jusqu'à La Bayette. À partir de La Bayette, la Romanche est endiguée sur l'ensemble du linéaire de ROM_4 (soit 9 km de linéaire environ) rives droite et gauche jusqu'à la confluence avec l'Eau d'Olle.

On note également des éléments de corsetage dans la partie Haute-Romanche (ROM_1), en particulier à Pied du Col (base de loisir), La Grave (camping la Meije), au hameau Les Fréaux et à Grand Clot.

Le **Vénéon** présente également des éléments de corsetage, notamment dans le secteur de la Bérarde (camping), des Étages (pylône électrique), à Plan du Lac (camping et gîte d'étape Les Fétoules, pont de la RD530, talus routier de la RD530), dans la traversée de Bourg d'Arud et au droit de l'usine de Pont Escoffier. On retrouve ainsi les secteurs et les éléments identifiés lors de l'analyse des aménagements historiques (cf. § A).

Le Tableau 27 présente les linéaires corsetés de la Romanche et du Vénéon en distinguant les confortements de berge et les ouvrages longitudinaux situés en rives gauche et droite.

| NATURE DU CORSETAGE DE LA ROMANCHE ET DU VÉNÉON [m] | | | | | |
|---|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Type | Nature | Romanche | | Vénéon | |
| | | Rive gauche | Rive droite | Rive gauche | Rive droite |
| Confortement de berge | Enrochement libre | 1 234 | 1 781 | 589 | 1 922 |
| | Enrochement liaisonné | 101 | 704 | 0 | 111 |
| | Gabion | 0 | 29 | 0 | 0 |
| | Épi | 0 | 283 | 6 | 57 |
| Ouvrages longitudinaux | Digue/Merlon | 14 012 | 14 402 | 177 | 305 |
| | Mur-digue | 0 | 28 | 0 | 44 |

Tableau 27 : Corsetage du lit de la Romanche et du Vénéon par type

Compte tenu de la longueur totale du linéaire d'étude (31,2 km), le lit de la Romanche est relativement corseté. En effet, 49% des berges de rive gauche et 55% des berges de rive droite sont contraintes latéralement par des confortements de berge et des ouvrages longitudinaux. Le lit du Vénéon présente un corsetage plus modéré avec seulement 3% des berges de rive gauche et 9% des berges de rive droite.

Parmi les **confortements de berge**, les enrochements (libres et liaisonnés) sont les protections majoritairement présentes tant sur la Romanche que sur le Vénéon avec respectivement 3 820 mètres (soit 12% du linéaire total) et 2 621 mètres (soit 10% du linéaire total) répartis sur l'ensemble des tronçons des deux cours d'eau. Les enrochements servent essentiellement à protéger un enjeu (pont, route, habitations...). Ces différents aménagements constituent des points durs limitant la divagation latérale et les possibilités de recharge sédimentaire.

Les **ouvrages longitudinaux** (merlons, digues...) constituent toutefois le type de corsetage le plus présent sur la Romanche. On compte ainsi un linéaire total de l'ordre de 10 km, soit 35% du linéaire total de la Romanche. Les digues que l'on rencontre principalement dans les tronçons ROM_3 et ROM_4, permettent la protection de Bourg d'Oisans contre les débordements.

| LINÉAIRES CORSETÉS PAR TRONÇON ET TYPE DE CORSETAGE | | | |
|---|---------------|---------------------------|--------------------------|
| Tronçon | Longueur [km] | Confortement de berge [m] | Ouvrage longitudinal [m] |
| ROM_1 | 18,5 | 2 812 | 579 |
| ROM_2 | 0,8 | 0 | 840 |
| ROM_3 | 2,0 | 71 | 2 049 |
| ROM_4 | 9,8 | 1 250 | 9 787 |
| VEN_1 | 6,9 | 423 | 177 |
| VEN_2 | 5,6 | 159 | 0 |
| VEN_3 | 2,4 | 965 | 0 |
| VEN_4 | 2,1 | 0 | 0 |
| VEN_5 | 3,9 | 896 | 349 |
| VEN_6 | 2,3 | 235 | 0 |
| VEN_7 | 2,8 | 0 | 0 |

Tableau 28 : Linéaires corsetés par tronçon et type de corsetage

Il convient également de noter que les principaux affluents de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans présentent un système d'endiguement, en particulier en amont proche de leur confluence avec la Romanche (cf. Figure 41).

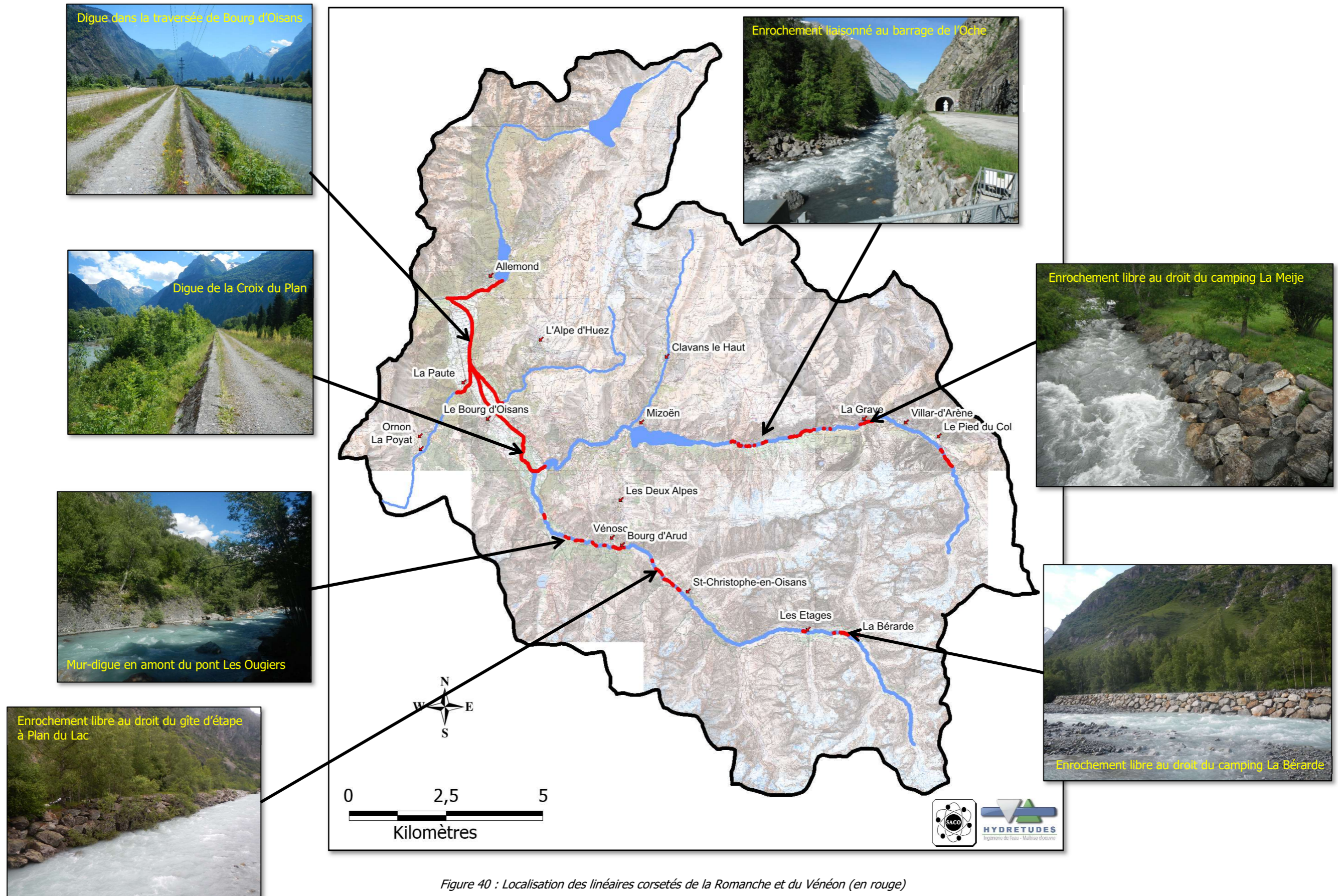


Figure 40 : Localisation des linéaires corsetés de la Romanche et du Vénéon (en rouge)

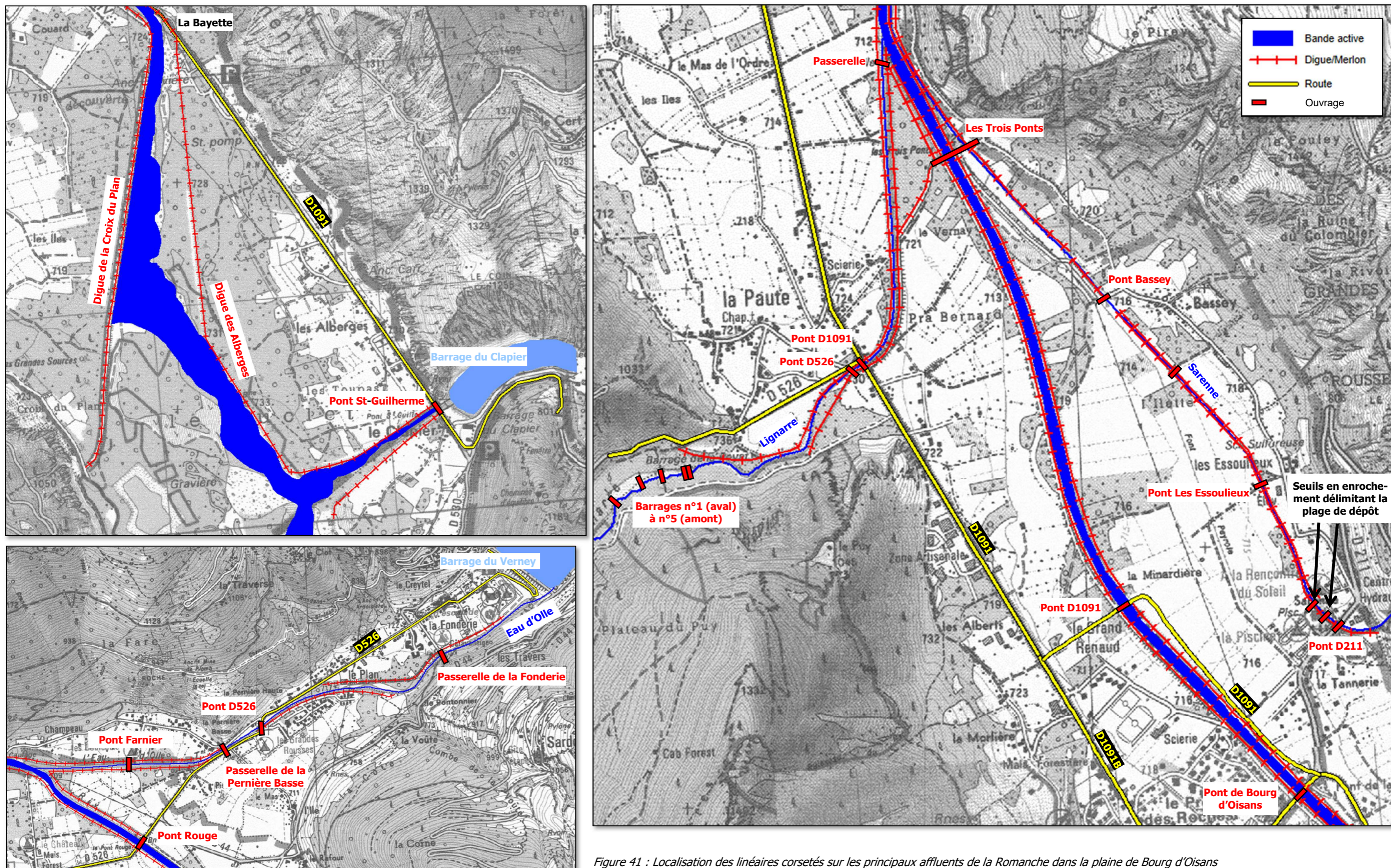


Figure 41 : Localisation des linéaires corsetés sur les principaux affluents de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans

B Les extractions de matériaux et les curages

La consultation de la bibliographie disponible sur le bassin versant amont de la Romanche montre que des extractions de matériaux alluvionnaires et des curages ont eu lieu dans le lit des cours d'eau durant la seconde moitié du XX^{ème} siècle, notamment pour la construction ou le désengrèvement de secteurs sensibles. Le Tableau 29 synthétise les extractions de matériaux et les curages qui ont été réalisées dans les cours d'eau du secteur d'étude.

Divers prélèvements de matériaux ont notamment été effectués dans le **Vénéon**, dans la zone du Buclet qui constitue la zone préférentielle des extractions de matériaux du territoire d'étude :

- Jusqu'à la fin des années 80, la zone du Buclet a fait l'objet d'une exploitation intensive. D'après l'étude réalisée par ETRM en 2014, les volumes de matériaux prélevés entre 1971 et 1984 sont estimés entre 2,8 et 3,6 millions de m³. L'arrêt de l'exploitation, à cette époque, serait lié à une incision importante du lit ($\approx - 2$ m) et à l'affouillement de la digue de la Croix du Plan qui protège la plaine de Boug d'Oisans ;

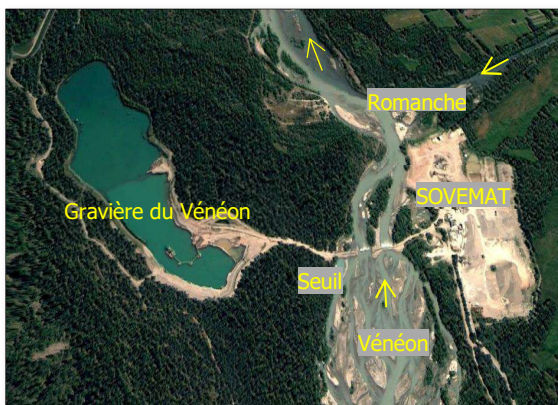


Figure 42 : Gravière du Vénéon

- À partir de 1989, la gravière du Vénéon située en lit majeur en rive gauche est autorisée et l'exploitation de matériaux est réalisée par la SOVEMAT au moyen d'une drague stabilisée et dirigée grâce à quatre câbles ;

- La fin de la concession de l'exploitation de la gravière du Vénéon en 2013 a engagé des propositions de gestion des matériaux permettant notamment de lisser l'effet du seuil sur le transport solide. ETRM (2014) a ainsi préconisé des opérations de curage (jusqu'à environ 60 000 m³/curage) dans deux zones prédéterminées où la rupture de pente du profil en long génère logiquement des dépôts conséquents : en amont du seuil (pente de 1% à 0,4%) avec un prélèvement de

45 000 m³/curage, et en amont de la Bayette (de 0,4% à 0,1%) avec 15 000 m³ de matériaux par opération. ETRM (2014) a également proposé de combler la gravière avec les matériaux fins issus des opérations de curage et de réaliser des protections afin d'éviter le risque de capture du Vénéon et de la Romanche par la gravière.

De fait, il est certain que des matériaux alluvionnaires ont été prélevés dans le lit des cours d'eau au siècle passé, notamment le Vénéon, mais aucun chiffre précis ne peut être donné. On peut toutefois estimer les quantités extraites à plusieurs millions de mètres cubes, impactant ainsi fortement le bilan sédimentaire de la Romanche et du Vénéon, et ce d'autant plus dans le contexte de tarissement sédimentaire (fin de la séquence paraglaciale et sortie du Petit Âge Glaciaire).

Il convient également de noter que la **Sarenne** a fait l'objet de plusieurs opérations d'entretien :

- Avant la création de la plage de dépôt : des travaux de curage ont été réalisés sur 1 200 ml et 1 mètre d'épaisseur suite aux dégâts occasionnés par la crue des 21 et 22 septembre 1968. Une seconde intervention a eu lieu en 1983 entre le chemin d'accès au hameau des Essoulieux et le pont du CD211 (SOGREAH, 2006, p.2) ;
- Depuis la création de la plage de dépôt en 2003 : plusieurs opérations d'entretien du lit ont été réalisées entre 2003 et 2014 au niveau de la plage de dépôt et au lieu-dit Bassey, 2 576 m³ de matériaux ayant été ainsi retirés (BURGEAP, 2016, p.19).

La plage de dépôt aménagée sur la **Lignarre** entre les deux barrages en amont du barrage de la Poyat (barrages n°4 et n°5) a également fait l'objet d'opérations d'entretien entre 1988 et 2014. Les neuf interventions réparties sur la période ont permis d'extraire 56 500 m³ de matériaux au total (BURGEAP, 2016, p. 20).

Par ailleurs, la confluence Lignarre-Romanche a été retravaillée en octobre 2006 suite au développement d'un atterrissement. 250 à 300 m³ de matériaux ont ainsi été arasés et régales contre le pied de digue rive gauche de la Romanche (BURGEAP, 2016, p.20).

| SYNTHÈSE DES EXTRACTIONS DE MATÉRIAUX DANS LES COURS D'EAU DU SECTEUR D'ÉTUDE | | | | | |
|---|---|--------------------------------|--|-----------------------------------|----------------------------|
| Cours d'eau | Localisation | Année | Description | Volume extrait | Source |
| Romanche | Villar-d'Arêne | | Curage du lit mineur au droit de l'ancienne gravière de Pied du Col. L'autorisation a expiré en 2009. | 15 000 m ³ /an | HYDRETTUDES, 2012 |
| Vénéon | Bérarde | 1975-1979 | 2 curages du lit au droit de l'actuel parking et du camping pour les travaux publics liés à l'amélioration de la RD 530 | ? | BURGEAP & ETRM, 2006 |
| | Plan du Lac | 1978-1980 | Extraction de matériaux du Vénéon pour la création de la plateforme routière lors de la construction de la RD530 | ≈ 25 000 m ³ | BURGEAP & ETRM, 2006 |
| | Bourg d'Arud | Post-crue 1955 | Curage du lit du Vénéon suite à la crue du 08/06/1955 | ? | RTM, 2008 |
| | | 1988-1990 | Extraction de matériaux grossiers au droit du camping réalisées pour satisfaire les travaux de protection de berge en enrochement suite à la crue du 14/07/1987 | ? | RTM, 2008 |
| Buclet | | 1958-1969 | Extractions massives de matériaux de 100 000 m ³ /an, à l'exception de l'année 1967 ayant conduit à des prélèvements de 250 000 m ³ de matériaux | 1 500 000 m ³ | ETRM, 2007 |
| | | 1971-1984 | Extractions massives de matériaux de 170 000 m ³ /an | 2,8 à 3,6 millions m ³ | ETRM, 2014 |
| Lignarre | Plage de dépôt | 1988-2014 | Réalisation de 9 curages pour désengraver la plage de dépôt | 56 500 m ³ | RTM, 2012 BURGEAP, 2016 |
| | Confluence Lignarre-Romanche | Octobre 2006 | Remodelage de la confluence | 250 à 300 m ³ | BURGEAP, 2016 |
| Sarenne | Entre le pont du CD211 et la Romanche | Post-crue 09/1968 | Travaux de curage sur environ 1 200 ml et une épaisseur d'alluvions de 1 m | ? | SOGREAH, 2006 |
| | Entre le chemin d'accès hameau des Essoulieux et le pont du CD211 | 1 ^{er} trimestre 1983 | Extractions de bancs naturels de graviers par l'entreprise DODE sous la surveillance du SUO et de la DDE | ? | SOGREAH, 2006 |
| | Plage de dépôt et secteur Bassesey | 2003-2014 | Opérations d'entretien de la plage de dépôt, encadrées par une déclaration simplifiée auprès de la Police de l'Eau | 2 576 m ³ | BURGEAP, 2016 |

Tableau 29 : Synthèse des extractions de matériaux et des curages ayant eu lieu dans les cours d'eau

6.3 Analyse diachronique

L'analyse diachronique consiste à étudier les **évolutions en plan et en altimétrie** des lits fluviaux sur une période fonction des données disponibles à l'échelle du bassin versant :

- L'évolution en plan du lit est représentative de la mobilité latérale du lit (mobilité d'un méandre ou d'un train de méandres, respiration latérale de la bande active...);
- L'évolution en altimétrie est représentative de l'incision, la stabilité ou l'exhaussement du profil en long.

A L'évolution en plan

❖ *Methodologie*

L'évolution en plan de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans (ROM_2 à ROM_4) et du Vénéon (VEN_1 à VEN_7) est analysée à partir de la superposition de photographies aériennes prises à différentes époques et préalablement géoréférencées. Le pas de temps entre chaque photographie et la période totale de l'analyse dépendent de la disponibilité des photographies aériennes prises sur le secteur d'étude.

D'après les données référencées sur Géoportail, les missions aériennes réalisées entre 1947 et 2000 sont réparties selon trois secteurs comme présenté dans le Tableau 30. À titre informatif, les années 2003 et 2010 correspondent aux Bases de Données orthophotographiques fournies par le SACO, et l'année 2016 à l'orthophotographie réalisée lors des levés topographiques par drone sur la zone du Buclet en juillet 2016 dans le cadre de la présente étude.

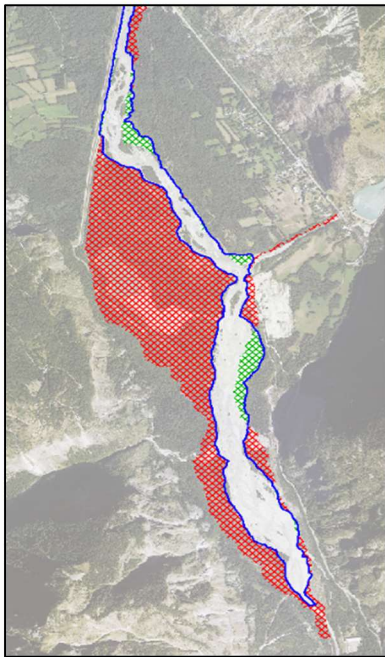
| PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES DISPONIBLES | | |
|--|---|---|
| Secteurs | Années disponibles | Crues morphogènes |
| La Romanche depuis le pont de St-Guillaume jusqu'à la confluence avec l'Eau d'Olle | 08/1948 ; 1952 ; 1956 ; 1960 ; 1970 ; 1971 ; 1975 ; 1980 ; 1981 ; 1982 ; 1983 ; 1989 ; 1993 ; 1996 ; 1998 ; 2000 ; 2003 ; 2010 | 09/1948 1953 1957 1968 1973 1987 1994 2008 |
| Le Vénéon depuis le torrent des Étançons jusqu'à Pont Escoffier | 1952 ; 1970 ; 1981 ; 1983 ; 1988 ; 1993 ; 1996 ; 1998 ; 2000 ; 2003 ; 2010 | |
| La zone du Buclet depuis Pont Escoffier jusqu'à la Bayette | 08/1948 ; 1952 ; 1956 ; 1960 ; 1970 ; 1971 ; 1975 ; 1980 ; 1981 ; 1982 ; 1983 ; 1989 ; 1993 ; 1996 ; 1998 ; 2000 ; 2003 ; 2010 ; 2016 | |

Tableau 30 : Photographies aériennes disponibles sur la Romanche et le Vénéon (d'après Géoportail)

Les années privilégiées pour l'analyse diachronique sont retenues en fonction des crues morphogènes qui se sont produites et de telle sorte que l'ensemble du linéaire de la Romanche depuis le pont St-Guillaume et du Vénéon depuis la confluence avec le torrent des Étançons soient couverts.

Ainsi, sont considérées les années 1948 (sauf Vénéon), 1952, 1956 (sauf Vénéon), 1970, 1981, 1993, 2003, 2010 et 2016 (Buclet), soit une période d'analyse de 69 ans.

La méthodologie employée pour l'analyse diachronique en plan de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans et du Vénéon est la suivante :



- Export des photographies aériennes depuis Géoportail pour les années 1948, 1952, 1956, 1970, 1981 et 1993 ;
- Géoréférencement des photographies aériennes pour ces six années ;
- Délimitation de la bande active pour chacune des neuf années retenues. La bande active correspond à l'emprise des chenaux et des bancs de galets non végétalisés ;
- Superposition des bandes actives, analyse de la dynamique latérale et calcul des espaces perdus (*i.e.* les espaces de contraction de la bande active du cours d'eau) et des espaces construits (*i.e.* les espaces d'expansion de la bande active) par rapport à l'année de base 1948.

Figure 43 : Superposition des bandes actives 1948 et 2016 (bleu) au Buclet montrant les espaces perdus (hachures en rouge) et les espaces construits (hachures en vert) par rapport à 1948

Il est à noter que le géoréférencement des photographies aériennes présente quelques difficultés pouvant induire des incertitudes liées à :

- La qualité des photographies du fait de leur ancienneté ;
- L'angle de prise de vue variable d'une année à l'autre ;
- La végétation qui génère des zones d'ombre ;
- Points de calage parfois difficiles à trouver et différents d'une année à l'autre.

L'ensemble de ces éléments introduit donc déjà un léger décalage de quelques mètres entre les différentes bandes actives. Toutefois, la tendance générale (contraction, expansion ou stabilité de la bande active) est respectée.

❖ La dynamique latérale

La superposition des neuf bandes actives délimitées sur la période [1948-2016] montre que la mobilité latérale du lit de la Romanche et du Vénéon est plus importante sur certains tronçons que d'autres. Ainsi, on peut distinguer les secteurs suivants :

- Le tronçon **VEN_1** présente une bande active plutôt étroite et **peu mobile** sur la période 1952-2010, à l'exception du secteur de la Béarde, où la zone de divagation du lit diminue entre 1981 et 1993, l'impact des curages du Vénéon (1975-1979), de la création du camping et du parking (1985-1989) contraignant le lit du Vénéon. On peut toutefois considérer que la mobilité latérale du tronçon VEN_1 reste faible ;
- Même constat pour le tronçon **VEN_5** qui présente une bande active relativement **stable** sur la période [1952-2010]. On constate toutefois que la bande active du Vénéon s'est rétractée au droit de Bourg d'Arud à partir des années 70 ;

- Les tronçons en gorge **VEN_2**, **VEN_4** et **VEN_6** sont également caractérisés par une bande active étroite et **peu mobile**, le corsetage naturel (versant, falaise) favorisant cette faible mobilité latérale ;
- Pour le tronçon **VEN_3** dont la limite aval est le barrage EDF de Plan du Lac, la dynamique latérale du lit du Vénéon est **moyenne** (cf. Figure 44). Sur la période [1952-1981], la bande active est relativement large avec un style en tresses, l'axe d'écoulement étant plutôt situé sur la rive droite. Puis, à partir des années 90, la bande active se rétracte et subit un basculement en rive gauche lié vraisemblablement aux forçages anthropiques (construction de la RD530, extraction de matériaux...) ;

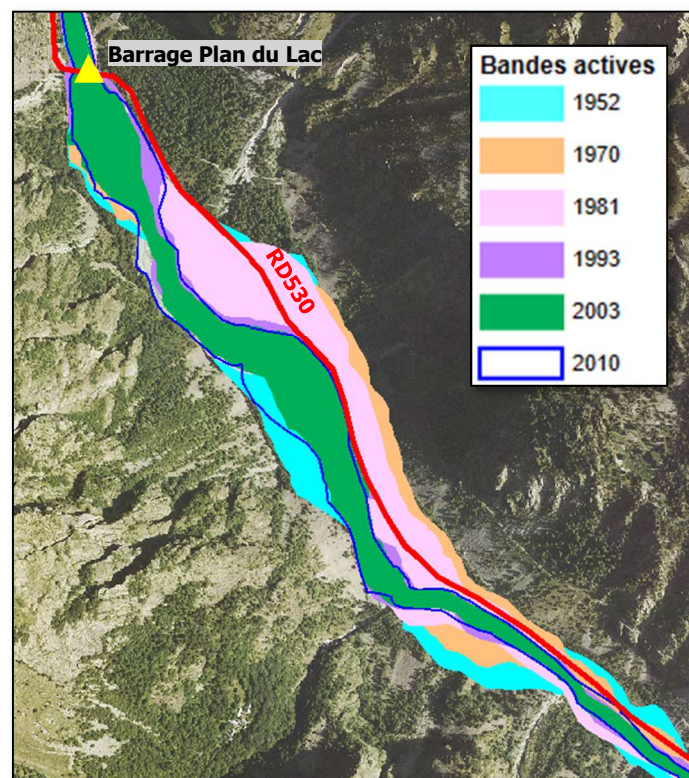


Figure 44 : Analyse diachronique en plan du tronçon VEN_3 (RD530 en rouge)

- C'est aux tronçons **VEN_7** et **ROM_3** constituant la zone de tressage du Buclet que se concentre la mobilité latérale la plus **importante**, notamment en amont de la confluence Vénéon-Romanche, la digue de la Croix du Plan contraignant latéralement le lit de la Romanche en rive gauche et son entonnement progressif à l'entrée de Bourg d'Oisans. La bande active y est très large mais connaît une rétraction généralisée depuis 1970 (cf. Figure 45). Entre 1981 et 1993, on constate également un rétrécissement local de la bande active du Vénéon lié à la création du seuil en 1989, le lit du Vénéon s'étant chenalisé en deux bras du seuil à la confluence avec la Romanche.

Par ailleurs, l'analyse des cartes anciennes montre que le tressage du Buclet est absent de la carte de Cassini (XVIII^{ème} siècle), mais présent sur la carte de l'État-major (XIX^{ème} siècle), période à laquelle la Romanche était déjà rectifiée et endiguée (cf. Figure 45). Il est ainsi probable que la surabondance de la charge alluviale s'est manifestée dès le XVI^{ème} siècle dans les têtes de bassin, puis a progressé lentement par progradation vers l'aval (Mercier, 2010). Ainsi, la charge alluviale serait arrivée dans la plaine du Buclet entre la fin du XVIII^{ème} et le

début du XIX^{ème} siècle. Au XIX^{ème} siècle, la charge alluviale surabondante du Vénéon et de la Romanche (fin du Petit Âge Glaciaire et les barrages du Clapier et du Chambon n'existant pas) se déployait dans tout le fond d'auge en amont de Bourg d'Oisans. La présence de la digue de la Croix du Plan a généré un « écrasement » du tressage qui est bien visible actuellement.

- Le tronçon **ROM_4** correspondant à la traversée de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans présente une **dynamique latérale quasi inexistante** durant la période [1948-2016], le lit y étant endigué.

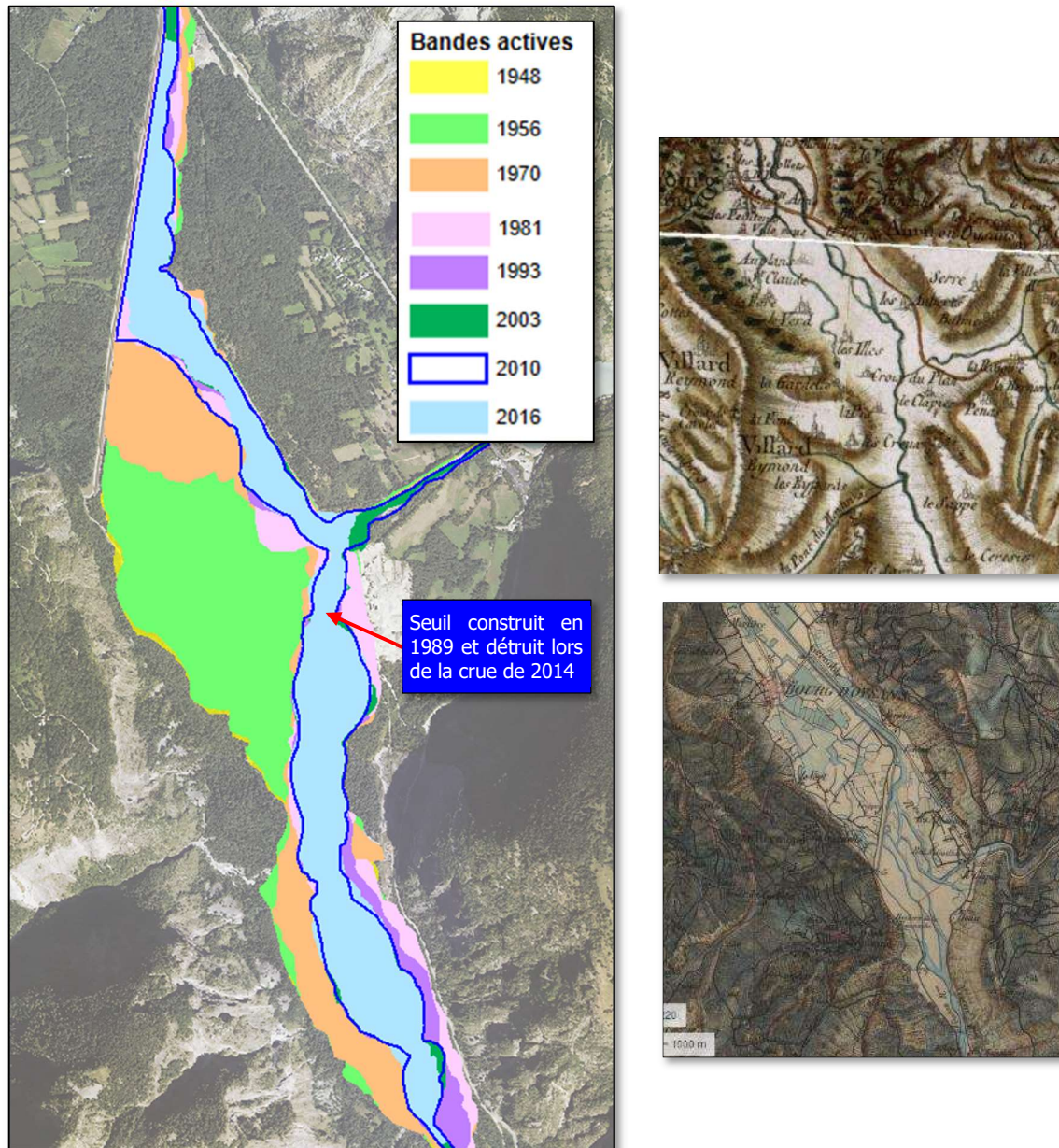


Figure 45 : Analyse diachronique en plan de la zone du Buclet (à gauche), carte de Cassini (à droite en haut) sans tressage et carte de l'État-major (à droite en bas) avec le cours d'eau rectifié et endigué et un tressage en amont de La Bayette bien développé

La Figure 46 synthétise le degré de mobilité latérale des tronçons de la Romanche et du Vénéon d'après l'analyse diachronique en plan des cours d'eau.

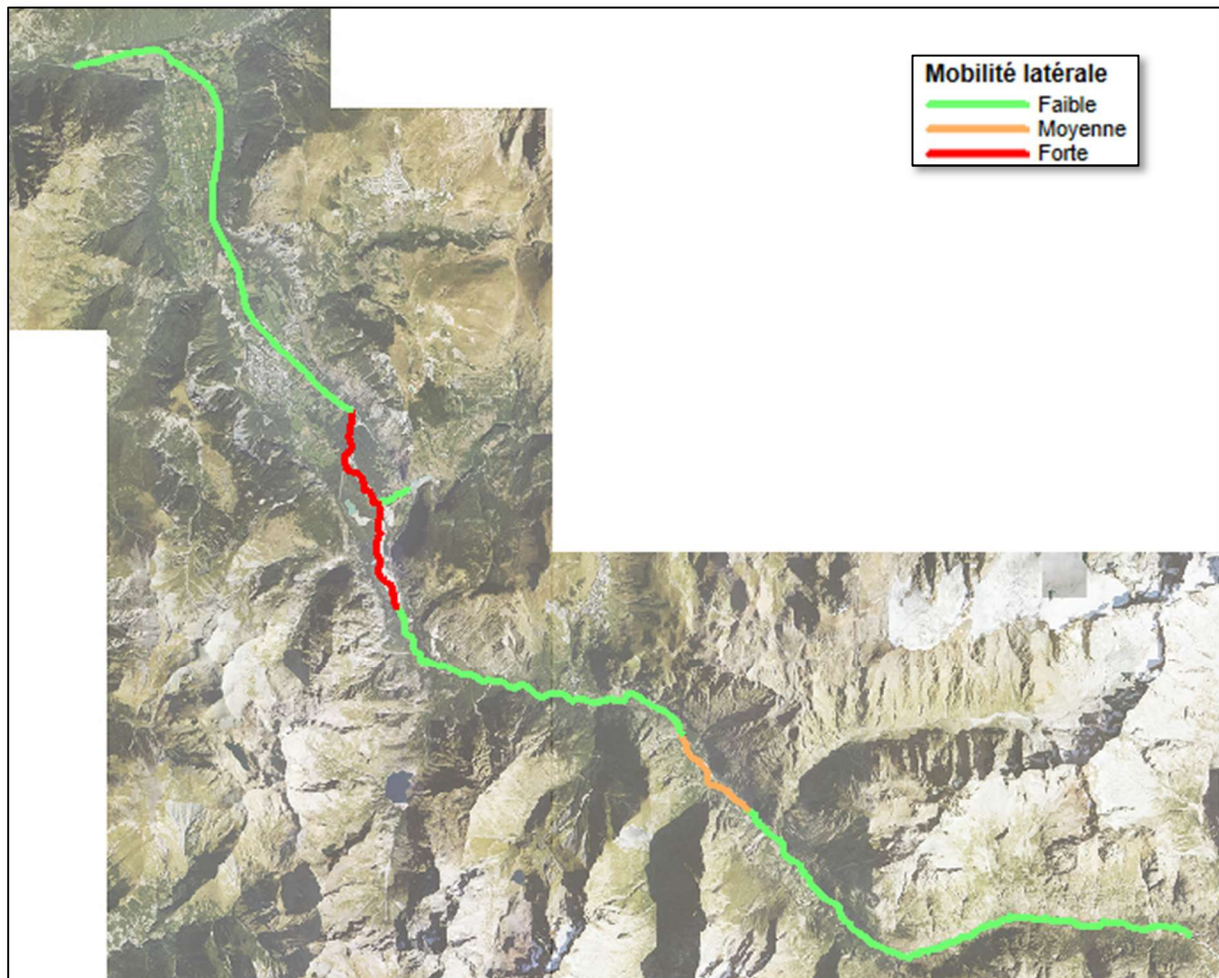


Figure 46 : Dynamique latérale de la Romanche et du Vénéon d'après l'analyse diachronique

❖ Évolution de la bande active de la Romanche et du Vénéon

L'évolution de la superficie de la bande active est présentée à la Figure 47 en distinguant les trois secteurs suivants :

- Le Vénéon depuis la confluence avec le torrent des Étançons jusqu'à l'usine Pont Escoffier ;
- La zone Buclet-Bayette depuis l'usine de Pont Escoffier à l'entonnement de La Bayette ;
- La Romanche depuis l'entonnement de La Bayette à la confluence avec l'Eau d'Olle.

Globalement, l'évolution des bandes actives est fluctuante depuis 1948 sous l'effet des conditions hydrologiques et des forçages anthropiques, mais présente une **tendance à la rétraction** nettement identifiable sur le Vénéon et la zone du Buclet (cf. Figure 47).

Pour le secteur Buclet-Bayette, on constate :

- Entre 1948 et 1956, la bande active est plutôt stable, voire en légère expansion avec +4 ha en 8 ans, ceci étant probablement lié aux crues de septembre 1948 et 1953 qui rajeunissent fréquemment la bande active en purgeant la végétation (*cf.* § 2.7D et Encart 15) ;

Bande active et crue morphogène

La bande active large, qui a été activée pendant la crue morphogène, se contracte ensuite du fait de la végétalisation. En effet, après la crue, le cours d'eau n'utilise plus la totalité de la bande activée. Cette crue a toutefois apporté des sédiments, des nutriments et des diaspores permettant la dissémination des espèces végétales.

Ainsi, sur les parties non régulièrement remaniées, la végétation se développe, conduisant ainsi à la réduction de la bande activée pendant la crue morphogène. La bande active va ainsi s'auto-ajuster... jusqu'à la prochaine crue morphogène et l'activation d'une plus grande largeur de bande active.

Encart 15 : Évolution de la bande active et crue

L'impact des crues ayant eu lieu en 1987 et 1994 n'apparaît pas sur cette période ;

- Dans la dernière période 2003-2016, la bande active semble se stabiliser autour de 70 ha. On note toutefois une légère expansion entre 2003 et 2010 de +7 ha certainement due à l'influence de la crue de 2008. La superficie de la bande active fluctue ensuite de quelques hectares seulement (2010-2016) avec une tendance à la rétraction (-0,8 ha en 6 ans).

À noter que les études récentes réalisées dans le cadre de la Zone Atelier Bassin du Rhône sur l'évolution des tressages alpins montrent une rétraction des bandes actives des rivières étudiées, dont le Vénéon, de -1,14 m/an en moyenne (Piégay *et al.*, 2008).

Concernant la bande active du **Vénéon depuis le torrent des Étançons jusqu'à l'usine de Pont Escoffier**, on constate des évolutions similaires mais moins importantes en termes de perte et de gain :

- Entre 1952 et 1981, la bande active se contracte régulièrement perdant ainsi 20 ha en 29 ans, soit -0,7 ha/an en moyenne sur la période. L'impact des crues n'apparaît donc pas sur cette période. On note également que la bande active pour le tronçon VEN_3 à Plan du Lac représentant 41% de la bande active totale du Vénéon sur cette période se rétracte également de -10 ha ;
- Entre 1981 et 1993, la rétraction de la bande active du Vénéon s'accélère avec une perte de 15 ha, soit -1,3 ha/an en moyenne sur la période, c'est-à-dire une perte équivalente à 75% des pertes de la période antérieure. On constate la même évolution pour le tronçon VEN_3 à Plan du Lac, où la perte en superficie est de -11 ha, soit -1,0 ha/an sur cette période de 12 ans contre -0,4 ha/an pour la période antérieure. L'impact des curages et des aménagements de la fin des années 80 (camping, parking, RD530 – *cf.* § 6.2) apparaît donc bien sur cette période ;
- Entre 1993 et 2010, la bande active apparaît en expansion avec un gain de 12 ha, soit un gain moyen annuel de +0,7 ha, lié probablement aux crues ayant eu lieu en 1994 et 2008. On note toutefois qu'à Plan du Lac, la bande active semble se stabiliser avec une superficie de 16 ha, soit 30% environ de la bande active totale du Vénéon.

Dans la traversée de Bourg d’Oisans, la bande active de la Romanche est relativement stable sur la période [1948-2016] du fait de l’endiguement du cours d’eau sur ce secteur, la superficie de la bande active oscillant autour de 40 ha.

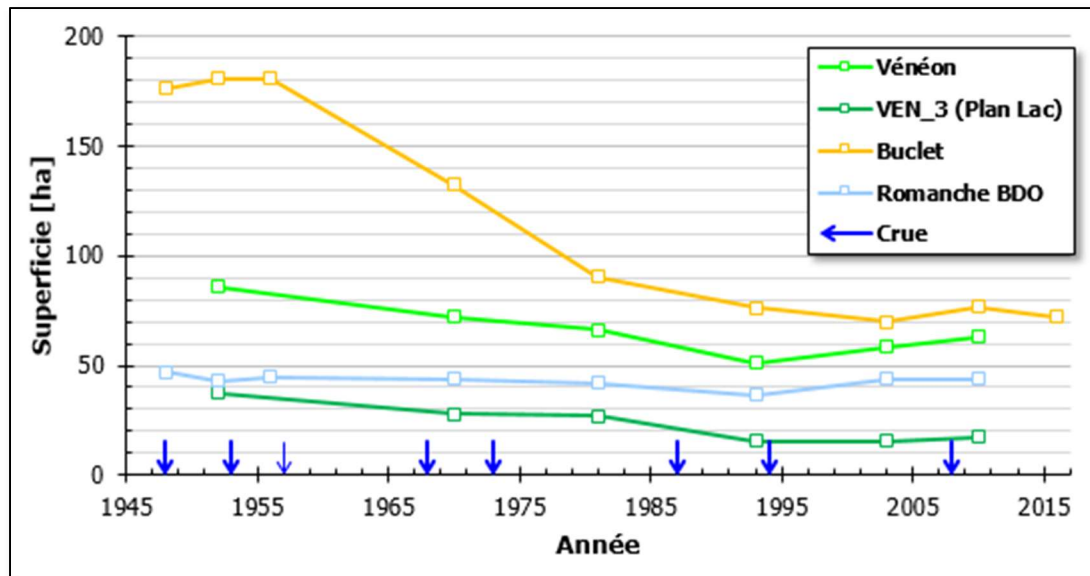


Figure 47 : Évolution de la superficie de la bande active de la Romanche et du Vénéon

❖ Les espaces construits et les espaces perdus

Compte tenu de la dynamique latérale relativement faible sur le Vénéon et la Romanche dans la traversée de Bourg d’Oisans (cf. Figure 46), l’évolution de la bande active en termes d’espaces construits et perdus est analysée pour la zone du Buclet et le tronçon VEN_3 au niveau de Plan du Lac.

La comparaison des bandes actives de la zone du Buclet par rapport à l’année de base 1948 montre une évolution à la contraction qui se stabilise depuis 1993 (cf. Figure 48) :

- Sur la période [1948-1956], la bande active semble stable avec des espaces perdus et construits relativement équivalents de l’ordre de 5-10 ha ;
- Les pertes de superficie par rapport à 1948 sont ensuite très importantes pour les années 1970 (-63 ha) et 1981 (-107 ha), du fait du temps de relaxation entre les crues de 1957 et 1968 relativement long propice au développement de la végétalisation, ainsi qu’aux extractions massives de matériaux ;
- Sur la période [1993-2016], la bande active au niveau de la zone du Buclet connaît quelques fluctuations de l’ordre de ± 1 à 4 ha, mais les espaces perdus, et donc la contraction de la bande active, n’évoluent quasiment plus et sont limités à -115 ha en moyenne.

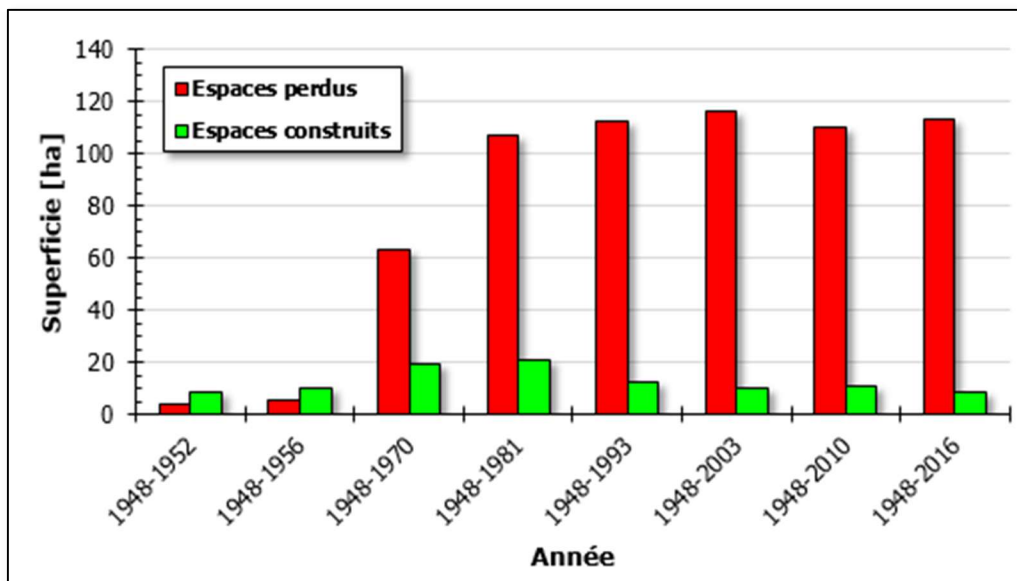


Figure 48 : Évolution de la bande active au niveau de la zone du Buclet par rapport à l'année de base 1948

L'évolution de la bande active du tronçon VEN_3 du Vénéon (Plan du Lac) par rapport à l'année 1952 montre également quelques disparités (cf. Figure 49) :

- Les pertes de superficie par rapport à 1952 semblent relativement stables pour les années 1970 et 1981, les espaces perdus étant de l'ordre de -10 ha. La contraction de la bande active est donc plutôt limitée sur la période [1952-1981] ;
- Entre les années 1984 et 1993, la bande active connaît une contraction relativement importante de -10 ha liée notamment à la construction de la RD530 en rive droite diminuant l'espace de divagation du Vénéon ;
- À partir des années 1993, la tendance à la contraction n'évolue plus, la superficie des espaces perdus se stabilisant autour de -20 ha.

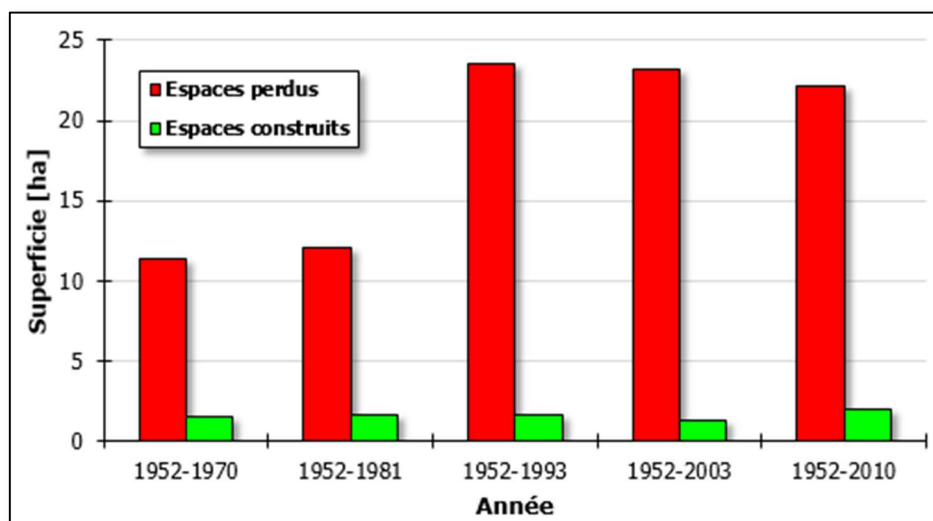


Figure 49 : Évolution de la bande active pour le tronçon VEN_3 à Plan du Lac par rapport à l'année 1952

❖ Haute-Romanche (ROM_1) et principaux affluents

La bibliographie disponible sur le secteur Haute-Romanche (ROM_1) et les principaux affluents de la Romanche (Ferrand, Lignarre, Sarenne et Eau d'Olle) n'indique pas d'éléments de diachronie en plan, à l'exception de la Lignarre (RTM, 2012).

En effet, dans son étude de 2012, le service de la RTM a étudié l'évolution historique de la bande active de la Lignarre au niveau de son cône de déjection entre 1750 et 2009. L'impact des modifications anthropiques et des crues apparaît nettement. Au XVIII^e siècle, avant d'être rectifiée, la Lignarre s'écoulait dans la plaine et rejoignait la Romanche 800 mètres en amont par rapport à la situation de 1828.

Depuis, le cours d'eau présente une dynamique latérale faible du fait de son endiguement sur l'ensemble du linéaire entre 1845 et 1848. On note toutefois sur le tracé de 1860 une zone de divagation en rive droite en amont immédiat de la confluence avec la Romanche, résultant de l'ouverture d'une faille dans la digue pour éviter sa rupture.

Le service de la RTM indique également une rétraction très nette de la bande active entre 1948 et 2009 en amont de la zone des cinq barrages de sédimentation et au droit de ces ouvrages, du fait du développement de la végétation. A l'aval des barrages de sédimentation, on observe également une fermeture progressive du lit dont la largeur était quatre fois plus importante en 1948 qu'en 2009.

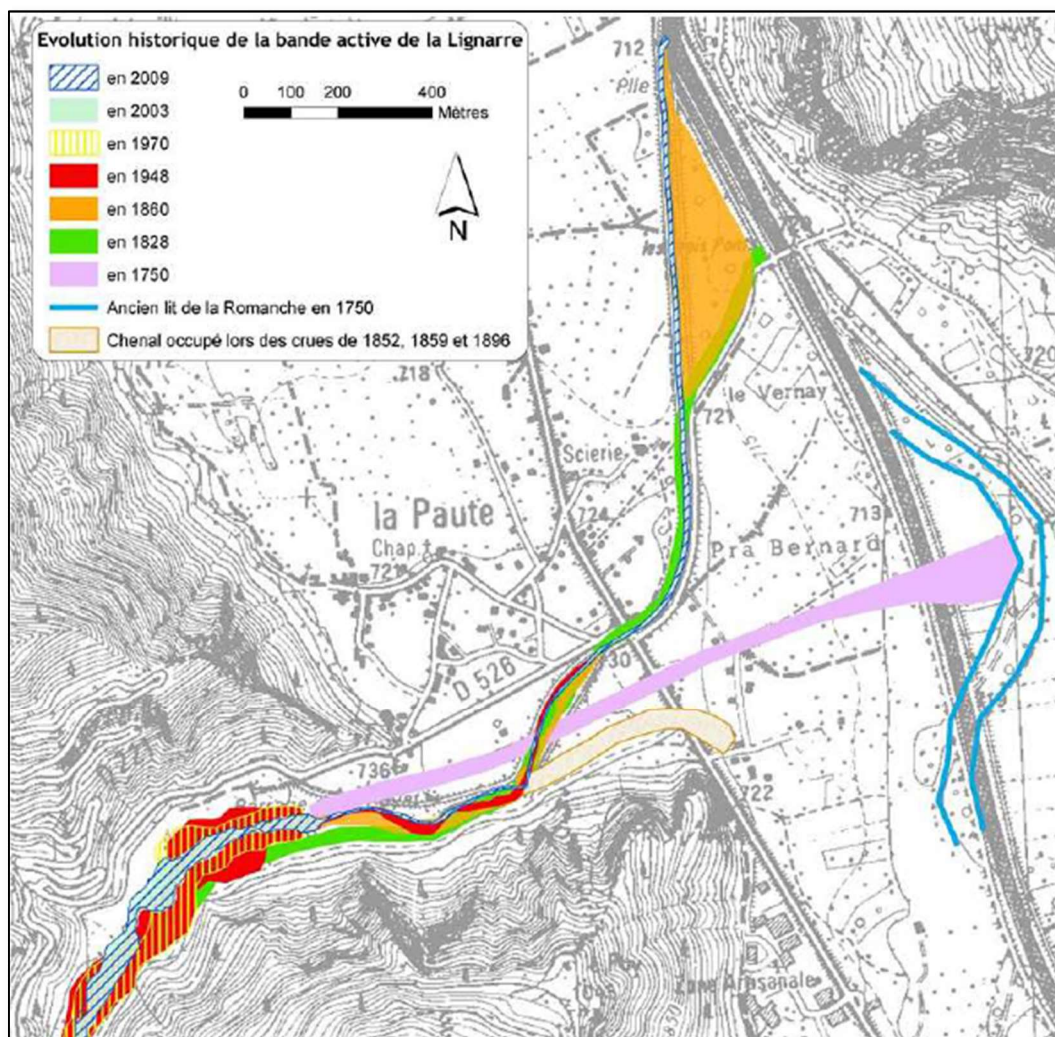


Figure 50 : Analyse diachronique en plan de la Lignarre au niveau de son cône de déjection de 1750 à 2009
(Source : RTM, 2012, p. 28)

B L'évolution en altimétrie

❖ Principes et méthodologie

L'analyse diachronique en altimétrie consiste à comparer divers profils en long des cours d'eau, afin d'évaluer l'évolution verticale de leur lit et identifier ainsi les secteurs en incision, en stabilité et/ou en exhaussement.

Plusieurs profils en long sont disponibles selon les secteurs du bassin versant amont de la Romanche. Le Tableau 31 synthétise l'ensemble des données utilisées pour l'analyse diachronique en altimétrie.

À titre de rappel, deux degrés de précision sont attendus selon les cours d'eau concernés :

- L'analyse pour la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans (ROM_2 à ROM_4) et le Vénéon depuis sa confluence avec le torrent des Étançons (VEN_1 à VEN_7) est réalisée de manière approfondie en fonction des linéaires disposant de profils en long ;
- La Haute-Romanche (ROM_1) est traitée pour ce point de la même façon que les deux cours d'eau précédents, afin de mettre à profit le profil en long levé dans le cadre de la présente mission ;
- Pour les principaux affluents (Ferrand, Lignarre, Sarenne, Eau d'Olle), l'analyse repose sur les éléments bibliographiques disponibles à ce sujet et exploitables.

Les profils des Grandes Forces Hydrauliques

Ces profils ont été levés dans certains cours d'eau entre 1910 et 1970 par le service du Nivellement Général de la France (ancêtre de l'IGN), afin d'évaluer le potentiel hydroélectrique de ces cours d'eau.

Ces profils qui correspondent aux lignes d'eau ne sont pas mis en référence avec le débit s'écoulant lors des levés, mais seulement avec leur date de réalisation. Toutefois, les topographes parcouraient à pied les cours d'eau préférentiellement à l'étiage ou en basses eaux. Les cotes sont en NGF Lallemand orthométriques et doivent être converties en NGF69 normales.

Il est à noter que les cours d'eau ont fait l'objet d'investigations par le service des Grandes Forces Hydrauliques (*cf.* Encart 16).

Ainsi, le profil en long Grandes Forces Hydrauliques de 1911 sert de base à la comparaison et permet d'avoir une vision de l'évolution altimétrique sur un pas de temps séculaire (1911-2016), ce qui constitue une bonne échelle de temps.

Il convient également de souligner que la comparaison des profils présente quelques difficultés liées au :

Encart 16 : Grandes Forces Hydrauliques

- **Recalage des profils en long** : le pas de temps entre les profils étant variable, le tracé en plan des cours d'eau a pu évoluer fortement. Entre deux points fixes (*e.g.* deux ponts), le cours d'eau peut donc se rallonger (nouveau méandre) ou se raccourcir (recoupement de méandre, rectification du lit...). De plus, la densité de points de chaque profil peut également faire évoluer à tort les abscisses (multiplication de points dans les parties sinueuses ou points isolés). Pour tenir compte de cette problématique de recalage, les ouvrages transversaux (ponts, seuils et barrages) et les confluences sont privilégiés comme point de recalage.

- **Conditions hydrologiques** : les profils Grandes Forces Hydrauliques représentent le fil d'eau et non le fond du lit. Aucun débit n'étant mentionné, il est complexe de réaliser un levé dans les mêmes conditions hydrologiques. Bien que la plupart des profils aient été levés durant la période hivernale, donc d'étiage, hors lâchers éventuels des barrages, la comparaison des fils d'eau peut donc être biaisée par les variations de débit d'un levé à l'autre. C'est pourquoi la plupart des auteurs considèrent une différence d'altitude comme représentative d'une incision ou d'un exhaussement à partir de 0,50 m (Landon 1996 ; Malavoi & Bravard, 2010), valeur que l'on retiendra pour l'analyse.

| PROFILS EN LONG EXISTANTS POUR L'ANALYSE DIACHRONIQUE EN ALTIMÉTRIE | | | |
|---|---|---|---|
| Bassin versant | Localisation du linéaire levé | Fil d'eau | Fond du lit |
| Haute-Romanche (ROM_1) | Val Fourche → Barrage du Chambon | 08-09/1911 | |
| | Base de loisir de Villar-d'Arène → Retenue du Chambon | 11/2016 | 11/2016 |
| Romanche dans les gorges du Freney | Barrage du Chambon → Pont de St-Guillaume | 08/1911 | |
| Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans (ROM_2 à ROM_4) | Pont de St-Guillaume → Confluence Eau d'Olle ⁵ | 08-09/1911 1929 10/1959 07/1984 1987-1988 03/1998 12/2002-02/2003 12/2006 09-11/2016 ⁶ | 07/1984 03/1998 12/2002-02/2003 09-11/2016 |
| Ferrand | Bibliographie inexistante pour ce type d'analyse | | |
| Lignarre | Seuil La Poyat → Confluence Romanche | 08/1911 2015 | 1928 1998 2001 2003 2011 |
| Sarenne | Pont de Sarret → Confluence Romanche | 09/1911 | |
| | Pont CD211 → 200 mètres à l'aval | | 2001 2004 |
| | Pont CD211 → Confluence Romanche | 2015 | 2003 2006 |
| Eau d'Olle | Bibliographie inexistante pour ce type d'analyse | | |
| Vénéon | Glacier de la Pilatte → Confluence de la Romanche | 08-09/1911 | |
| | Amont hélistation → Aval camping de la Béarde | 03-04/11/2005 | |
| | Via ferrata à La Ville → Barrage EDF Plan Lac (VEN_3) | 07-11/10/2005 | |
| | Parking La Béarde → Les Étages (VEN_1) | 11/2016 | |
| | Amont passerelle Lanchâtra → Barrage EDF Plan Lac (VEN_3) | 11/2016 | |
| | Bourg d'Arud → Usine Pont Escoffier (VEN_5 à VEN_7) | 11/2016 | |
| | Usine Pont Escoffier → Confluence de la Romanche (VEN_7) | 1984 12/1998 17/04/2003 03/2007 08/2016 ⁷ | 12/1998 17/04/2003 |

Tableau 31 : Profils en long de la Romanche et du Vénéon utilisés pour l'analyse diachronique en altimétrie

⁵ Sur ce secteur, les profils sont recalés suivant les points kilométriques définis dans le SAGE (SOGREAH, 2001).

⁶ Profil en long reconstitué à partir des profils en travers levés de septembre à novembre 2016 par SINTEGRA dans le cadre de l'étude pour la réduction de l'inondabilité de la plaine de Bourg d'Oisans menée par le SYMBHI.

⁷ Profil en long extrait du levé topographique par drone réalisé dans le cadre de la présente étude.

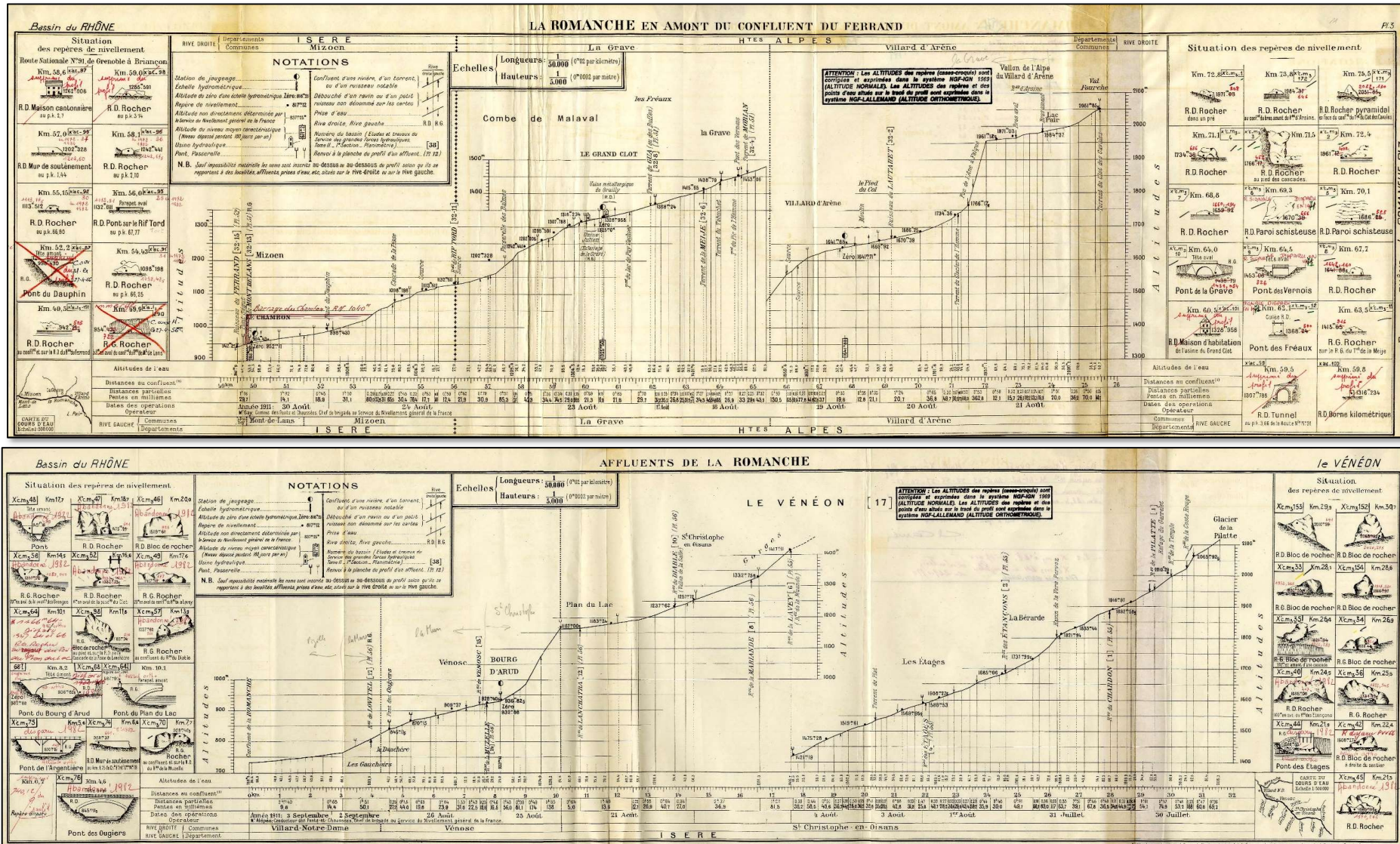


Figure 51 : Profils en long de la Haute-Romanche (en haut) et du Vénéon (en bas) levés en août/septembre 1911 par Grandes Forces Hydrauliques

HYDRETUDES

SACO – Plan de gestion du transport solide du bassin versant amont de la Romanche

❖ *Évolution verticale de la Romanche*

Tronçon ROM 1

L'évolution verticale de la Romanche en amont du barrage du Chambon entre 1911 et 2016 présentée à la Figure 53 montre une incision généralisée du tronçon ROM_1 :

- Le secteur de Pied du Col (→ pK = 7,2 km) est relativement stable. On note toutefois localement quelques points incisés, tels que le pont des Brebis avec -0,85 mètres ;
- De Villar-d'Arêne jusqu'à environ 500 mètres en amont de la confluence avec le Morian (pK = 7,2 à 10,1 km), la tendance est à l'incision avec des évolutions importantes de l'ordre du mètre pouvant atteindre -1,7 mètres au pont de Villar-d'Arêne. On remarque par ailleurs que le secteur Les Vernois (pK = 9,5 à 10 km) est nettement incisé par rapport à 1911, les différences étant de l'ordre de -5 m, voire davantage. Dans ce secteur, la densité de points du profil de 1911 est très faible (un seul point) par rapport à celle du profil 2016, ce qui peut maximiser les évolutions verticales ;
- Du Morian jusqu'à la cascade de la Meije (pK = 10,1 à 12 km), la tendance reste à l'incision avec un enfoncement du lit de l'ordre du demi-mètre (-0,44 m au Morian, -0,31 m au pont La Grave et -0,43 m à la cascade de la Meije) ;
- De la cascade de la Meije jusqu'à la retenue du Chambon, le profil est incisé, les différences d'altitude étant supérieures au mètre, notamment au droit de la confluence avec le Rif Tord (-1,7 m) et de la cascade de la Pisse (-1,4 m).

Tronçons ROM 2 et ROM 3

La comparaison des profils en long depuis le pont de St-Guillaume jusqu'à l'Eau d'Olle met en avant plusieurs éléments selon la période (cf. Figure 54 et Figure 55).

Jusque dans les années 60, la tendance est globalement à l'exhaussement par rapport à 1911 de par le cône de déjection du Vénéon créant une rehausse jusqu'à +2,5 m au Buclet.

À partir des années 80, le profil de la Romanche s'incise sans toutefois atteindre le niveau de 1911, la zone de La Bayette (ROM_3) se désengravante. La tendance à l'incision progresse et se généralise à la fin des années 1990 avec des évolutions importantes par rapport à 1911 de l'ordre de -2,5 à -3,0 mètres pour le tronçon ROM_2 et de -1,2 à -2,0 mètres pour ROM_3. Cette incision généralisée est la réponse morphologique de la Romanche au déficit sédimentaire généré d'une part, par les extractions massives de matériaux qui se sont produites entre 1971 et 1989 dans la zone du Buclet, et d'autre part, par la création du seuil sur le Vénéon en 1989 perturbant, voire bloquant, le transit sédimentaire de la charge grossière vers la Romanche.

Après une période de stabilisation entre 1998 et 2003, le fond du lit poursuit son incision en 2016 sur le tronçon ROM_2 avec un abaissement de -0,50 à -1 m par rapport au fond de 2003.

Sur le secteur de La Bayette (ROM_3), la tendance est plutôt à l'exhaussement depuis 1998, nettement perceptible sur les fonds avec des remontées de +50 cm à +1 m en 2003 jusqu'à 400 mètres en amont de l'entonnement, tandis que les fils d'eau évoluent peu. La tendance reste à l'exhaussement et s'accroît en 2016 avec un fond à +1,5 m par rapport à 1998 et +40 cm par rapport à 2003. Ce réengraissement observé notamment sur la dernière décennie est probablement un artéfact sédimentaire lié à la ruine partielle du seuil lors de la crue de 2008 puis à sa destruction en 2014 qui ont ainsi permis de libérer des matériaux stockés en amont du seuil.

Tronçon ROM 4

Dans la traversée de Bourg d'Oisans depuis l'entonnement de La Bayette, la tendance est à l'incision durant la première moitié du XX^{ème} siècle, avec un enfoncement par rapport à 1911 de -0,7 à -1,0 m en amont du pont de Bourg d'Oisans et de -1,2 à -1,7 m en aval jusqu'à l'Eau d'Olle (cf. Figure 54). L'endiguement de la Romanche dans ce secteur empêche toute divagation latérale au profit de l'érosion verticale.

Depuis les années 80, le profil en long de la Romanche est remarquablement stable, tendance qui semble se poursuivre en 2016. On note toutefois une rehausse du fond par rapport à 1998 au droit de la confluence avec la Lignarre de l'ordre de +50 cm en 2003 et de +70 cm en 2016 (cf. Figure 55), générée vraisemblablement par des apports de la Lignarre non repris par la Romanche.

❖ *Évolution verticale du Vénéon*

L'évolution verticale du Vénéon sur le **secteur de la Bérarde** (cf. Figure 57) montre que le profil s'est notablement incisé par rapport à 1911 jusqu'au hameau Les Étages, en particulier au droit de l'actuel parking, de la confluence avec le torrent des Étangons avec -1,0 m et au pont des Étages avec -1,2 m sur la période 1911-2016. Les modifications anthropiques dont le secteur de La Bérarde a fait l'objet (extractions de matériaux entre 1975-1979, rétraction de la zone de divagation par l'implantation du parking et du camping et dynamique latérale affaiblie par la mise en œuvre de confortements de berge en enrochement) ont conduit à un enfoncement généralisé du lit. À l'aval des Étages, la tendance semble s'inverser avec un exhaussement métrique par rapport au profil de 1911.

Pour le tronçon **VEN_3 dans le secteur de Plan du Lac** (cf. Figure 58), on constate une rehausse du fil d'eau par rapport à 1911 de +50 cm à +1,0 m (+1,3 m au pont de la RD530), voire +2,5 m au droit de la cascade de la Pisse. On note toutefois que les levés de 2005 et 2016 sont relativement stables. Cet exhaussement de la ligne d'eau généralisé au tronçon VEN_3 est certainement sous l'influence du barrage EDF de Plan du Lac et de l'ouverture des vannes au moment des levés.

Pour le tronçon **VEN_5 de Bourg d'Arud au pont Les Ougiers** (cf. Figure 59), la comparaison 1911-2016 est relativement stable. On note toutefois localement des exhaussements essentiellement liés à des apports provenant d'affluents, en particulier au droit de la confluence avec la Muzelle (+30 cm) et du Merdaret (+80 cm).

Le tronçon **VEN_6 du pont Les Ougiers jusqu'à Pont Escoffier** apparaît nettement en incision avec un enfoncement de l'ordre du mètre, voire supérieur à -4 mètres à partir de la confluence avec le Lauvitel. L'abaissement considérable du fil d'eau sur cette partie aval (à partir du Lauvitel) est probablement lié au fait que la densité de points du profil de 1911 est nettement inférieure à celle du profil de 2016 (un seul point), ce qui peut maximiser les différences d'altitudes.

Sur la **zone du Buclet (VEN_7)**, la comparaison des différents profils met en avant les points suivants :

- Globalement, l'ensemble des profils sont incisés par rapport au levé de 1911, à l'exception peut-être de la partie amont où le recalage des abscisses est plus délicat, compte tenu de la multichenalisation du Vénéon dans ce secteur, caractéristique du style en tresses.
- Les extractions massives de matériaux de 1974-1989 dans la zone du Buclet ont conduit à un abaissement du profil allant jusqu'à -3 m sur la période 1911-1984, notamment en amont de l'ancien seuil.
- Les profils de 1998 et 2003 ne montrent pas d'évolutions particulières. On retrouve des niveaux proches de ceux de 1984 en amont de l'ancien seuil, mais près de -1,8 m en 1998 et de -1,4 m en 2003 en aval.
- Sur la période 2003-2007, la tendance est à l'exhaussement avec une rehausse moyenne du fil d'eau de l'ordre du mètre, atteignant, voire dépassant par endroit, le niveau de 1984. À

l'amont immédiat de l'ancien seuil, on relève un exhaussement de +40 cm par rapport à 2003, celui-ci étant le premier bénéficiaire de l'engravement de par la singularité qu'il crée sur le profil. À l'aval du seuil, le profil est également remonté en moyenne de +50 cm, l'accumulation de matériaux semble donc se propager vers l'aval.

- Le profil actuel de 2016 met en évidence un abaissement du fil d'eau par rapport à 2007 de l'ordre de -30 cm sur 660 mètres en amont de l'ancien seuil, et un exhaussement de l'ordre du mètre en aval retrouvant ainsi la configuration de 1984. L'évolution de cette dernière décennie (2007-2016) montre donc un début d'incision en amont par érosion régressive, liée à la destruction du seuil lors de la crue de 2014 et qui va très certainement progresser.

À noter que les études récentes réalisées dans le cadre de la Zone Atelier Bassin du Rhône sur l'évolution des tressages alpins, montrent que le tressage du Vénéon pencherait vers une incision de -0,54 mètres sur la période 1911-2009 (cf. Figure 52 – Piégay *et al.*, 2008). Il convient toutefois de considérer cette comparaison avec précaution, dans la mesure où le levé de 2009 a lieu dans la période post-crue 2008 avec reconstruction de la partie busée du seuil détruite lors de la crue. L'analyse sur la période 1911-2009 pourrait donc être biaisée par les événements de 2008-2009 et refléter simplement le démarrage d'une incision par érosion régressive suite à la ruine partielle du seuil, sa reconstruction palliant cet enfoncement.

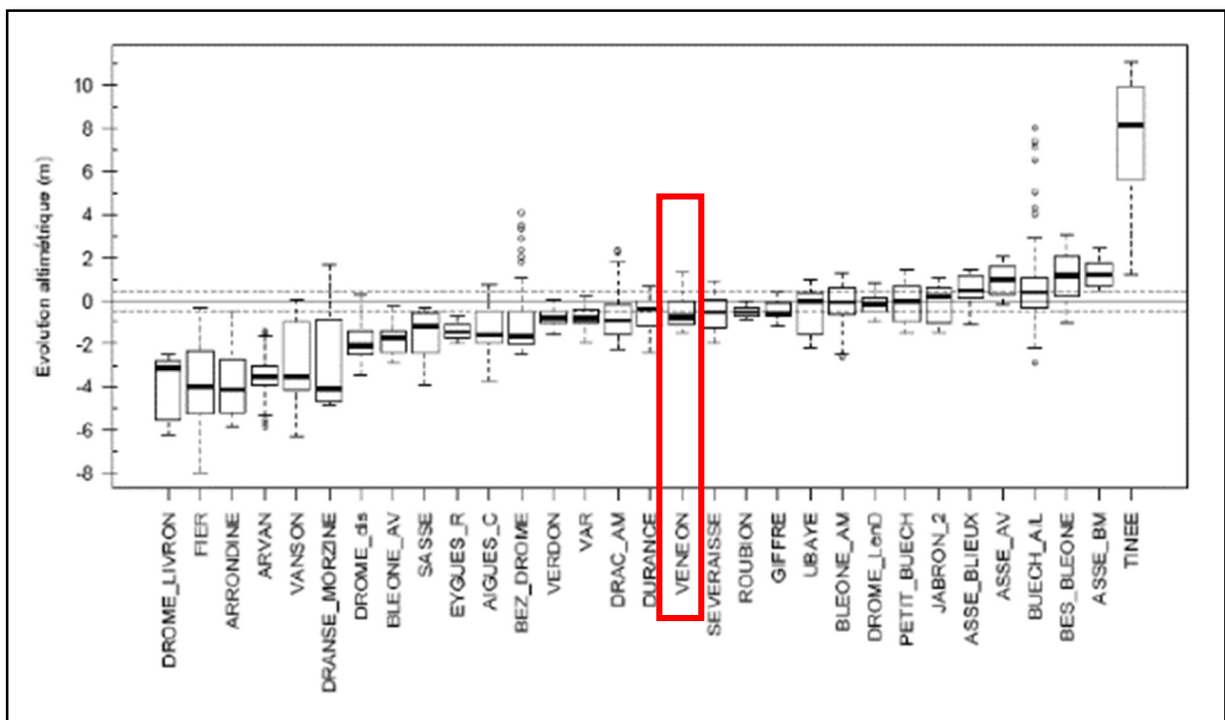


Figure 52 : Évolution altimétrique des tressages étudiés dans le cadre de la Zone Atelier Bassin du Rhône, dont le Vénéon (Source : Piégay *et al.*, 2008)

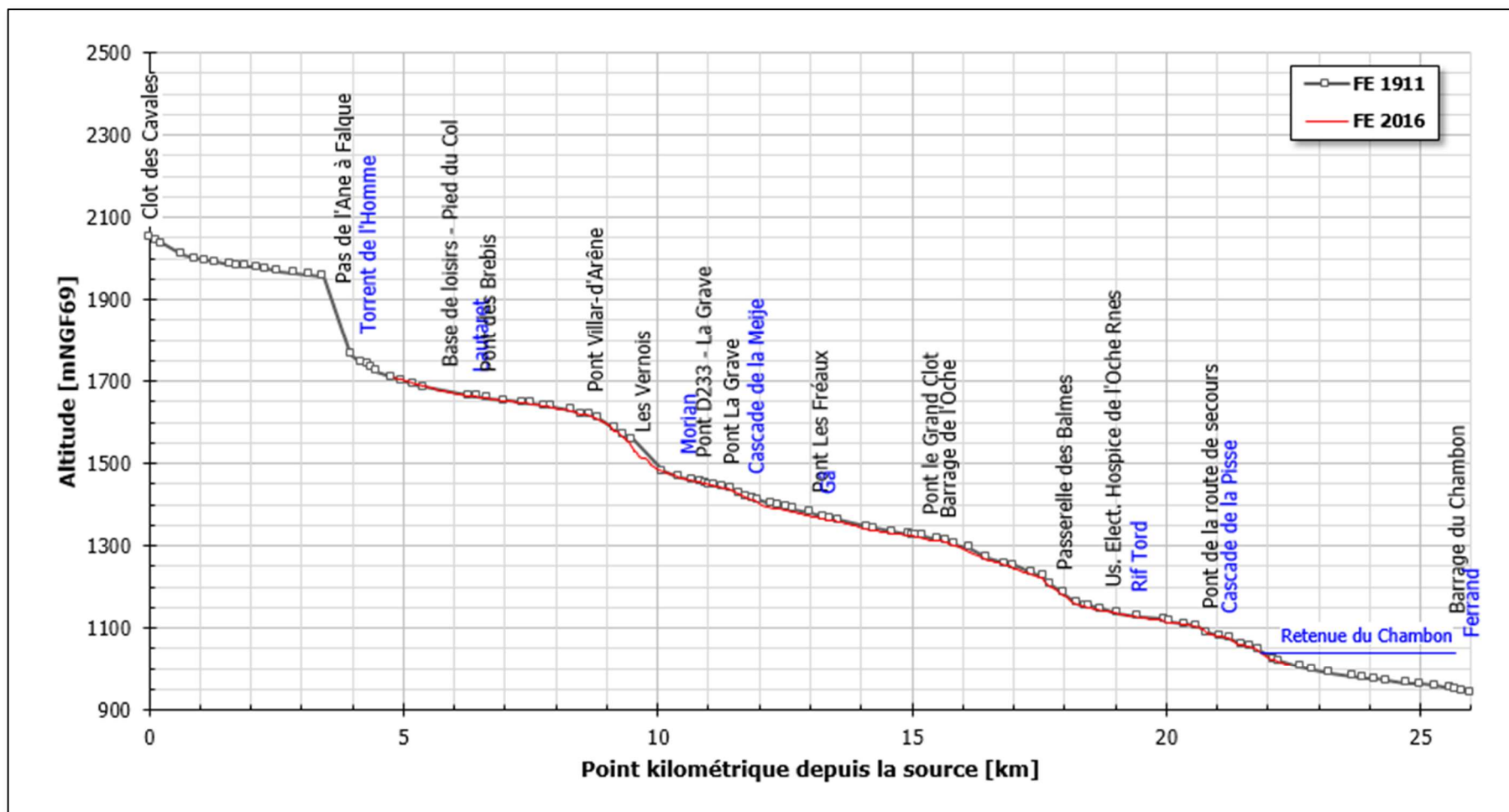


Figure 53 : Comparaison des fils d'eau de la Romanche en amont du Barrage du Chambon (tronçon ROM_1)

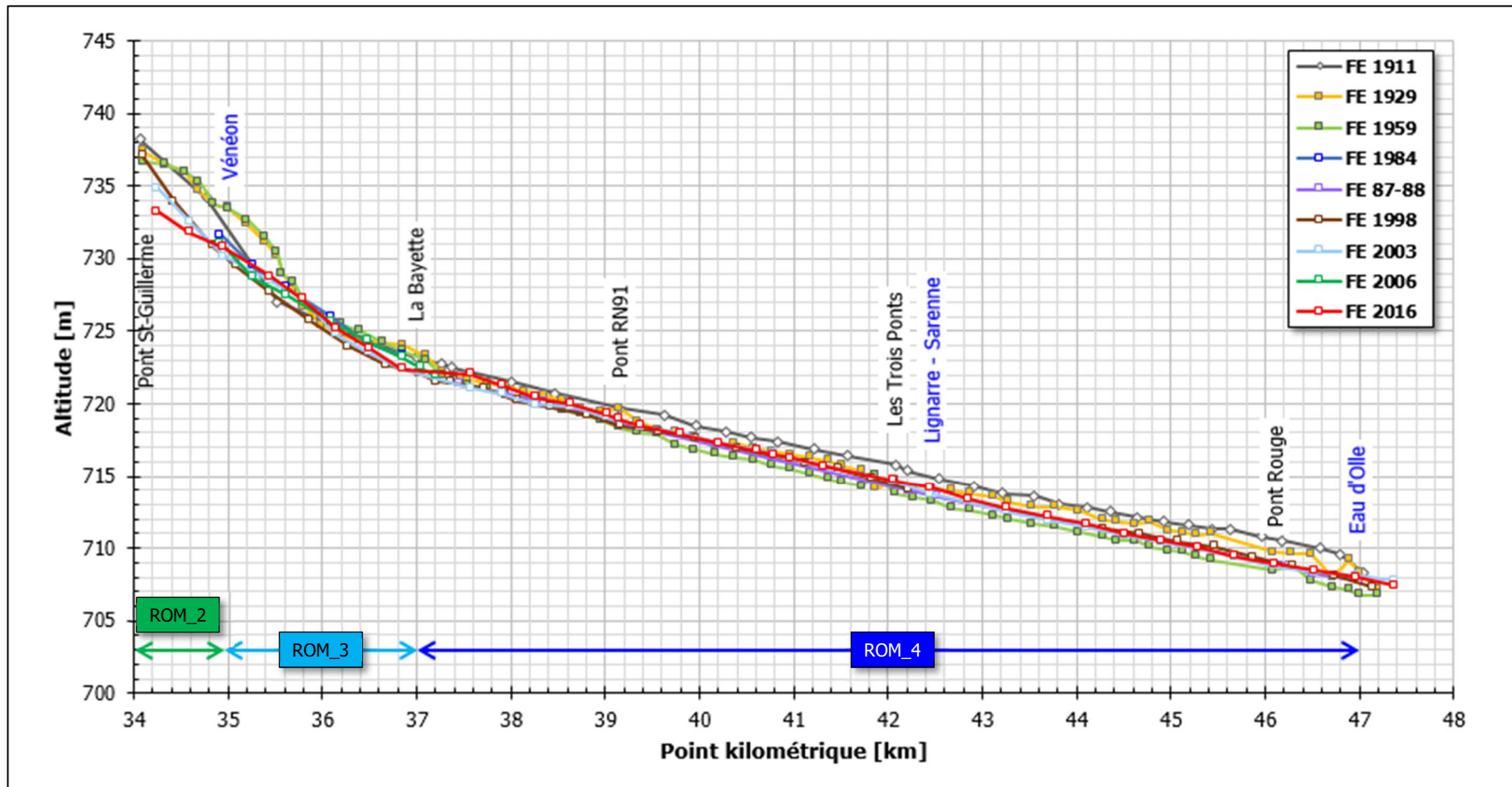


Figure 54 : Comparaison des fils d'eau de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans (ROM_2 à ROM_4)

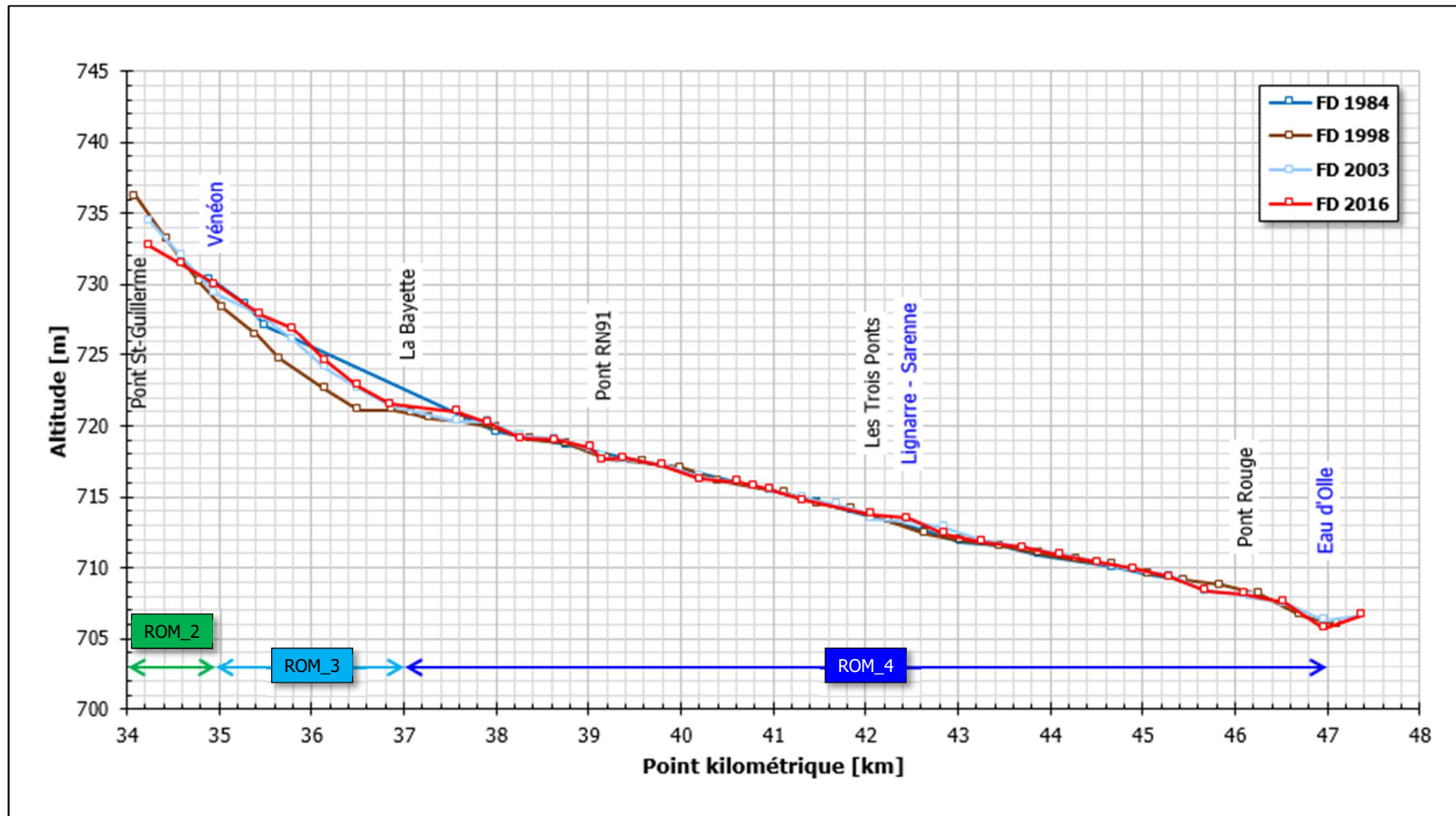


Figure 55 : Comparaison des profils en long du fond de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans

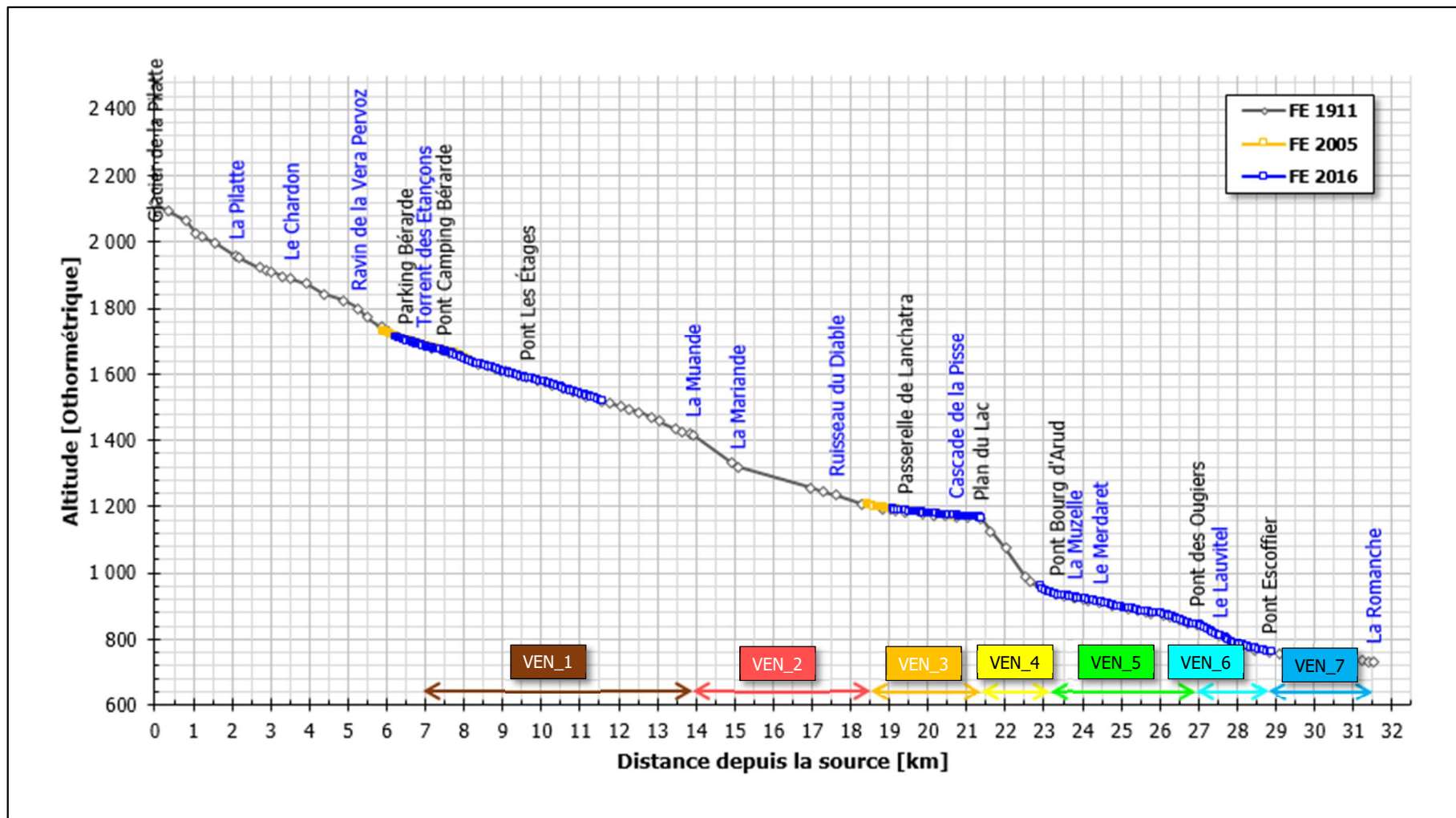


Figure 56 : Comparaison générale des profils en long du fil d'eau du Vénéon jusqu'à l'usine de Pont Escoffier

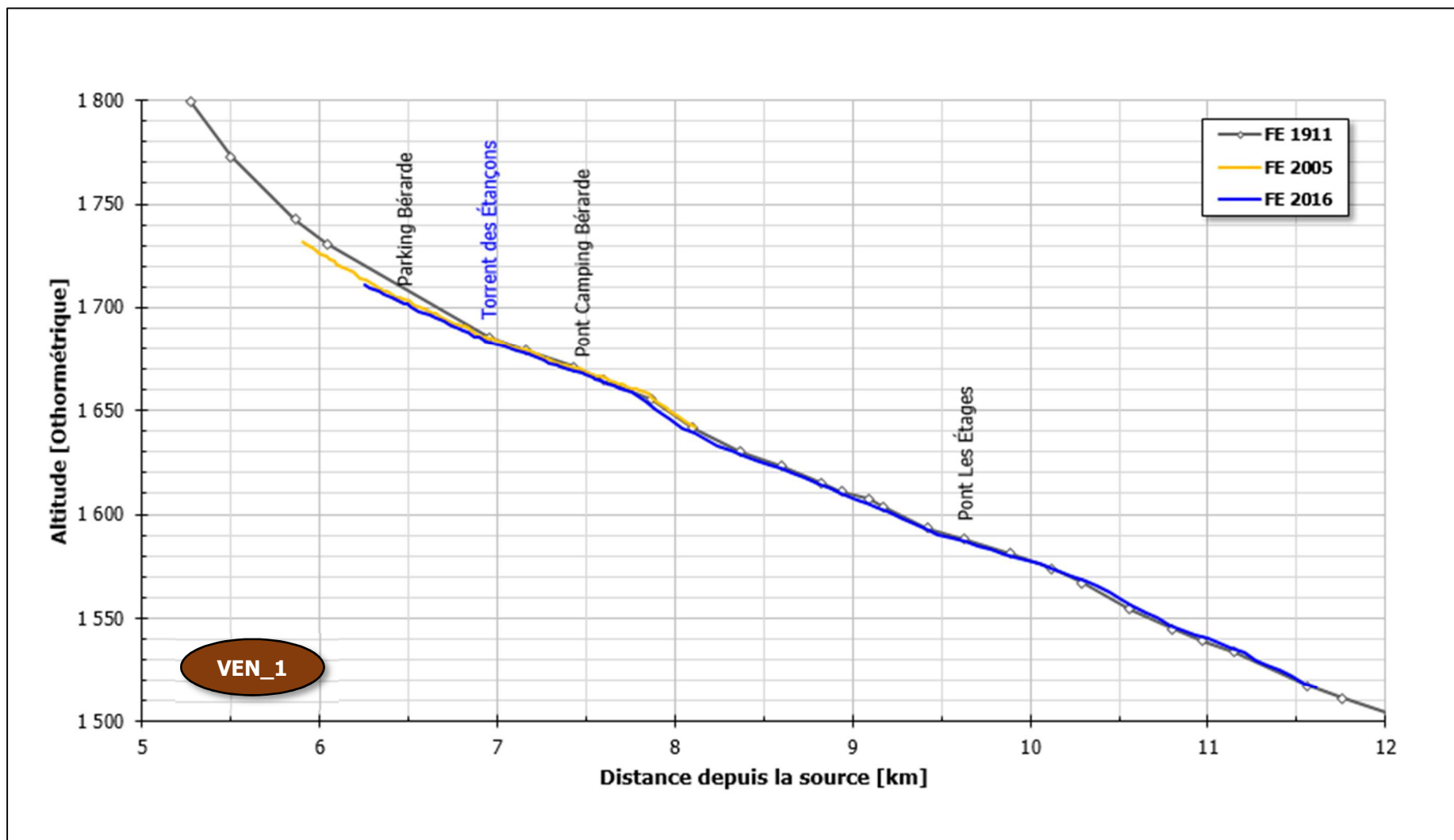


Figure 57 : Comparaison des fils d'eau du Vénéon dans le secteur de La Béarde (amont du tronçon VEN_1)

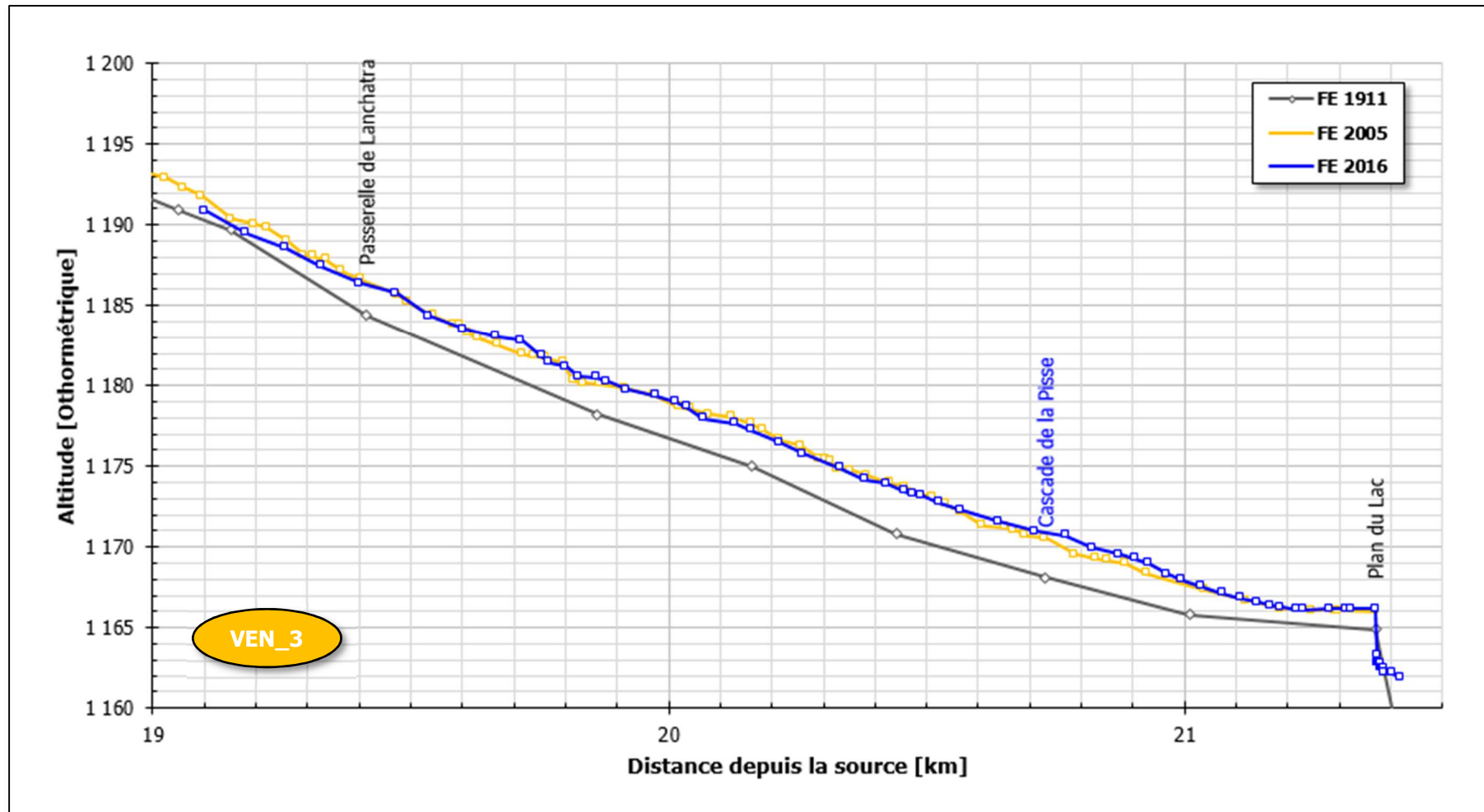


Figure 58 : Comparaison des fils d'eau du Vénéon dans le secteur Plan du Lac (tronçon VEN_3)

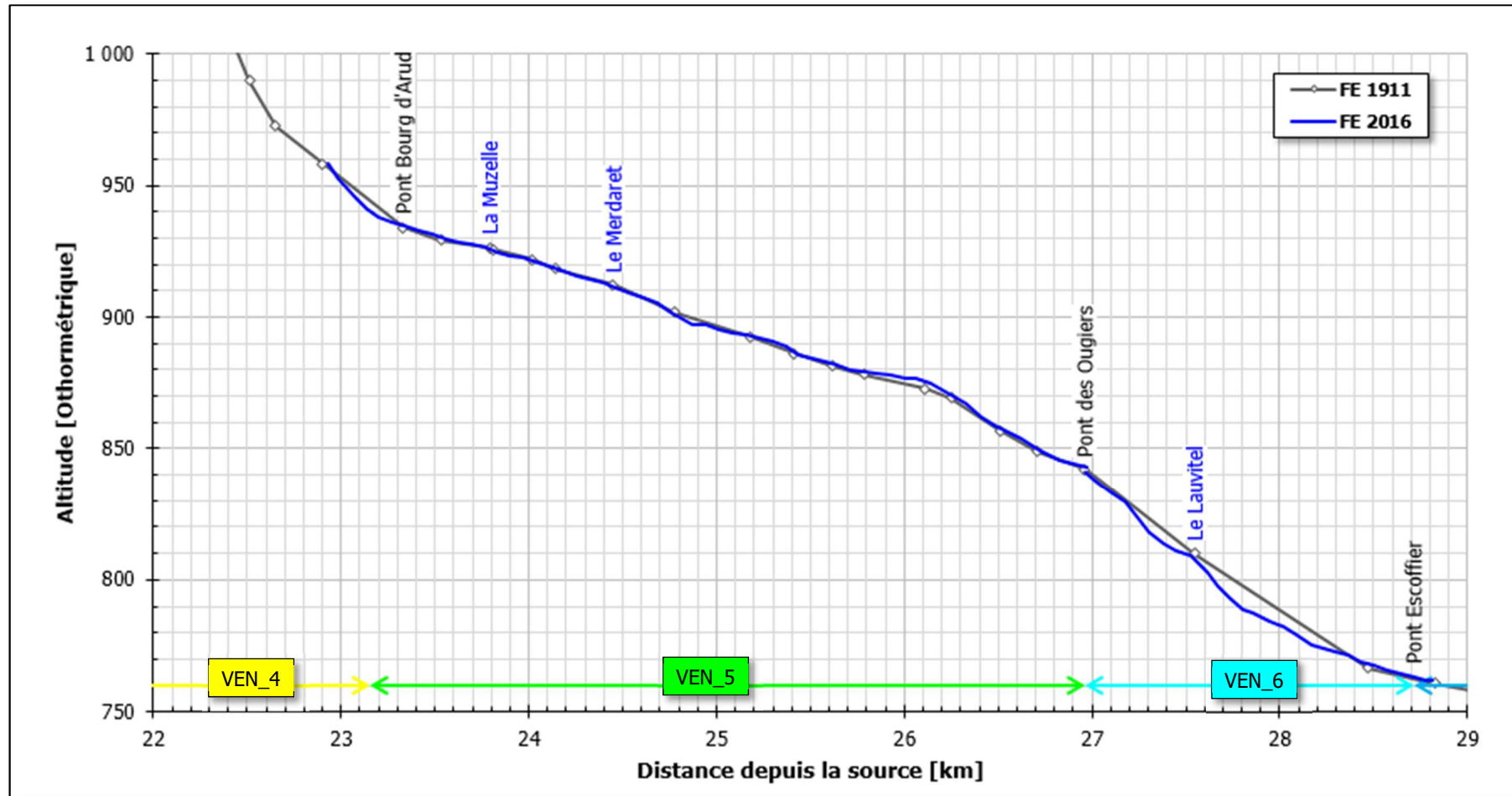


Figure 59 : Comparaison des fils d'eau du Vénéon de Bourg d'Arud à l'usine de Pont Escoffier

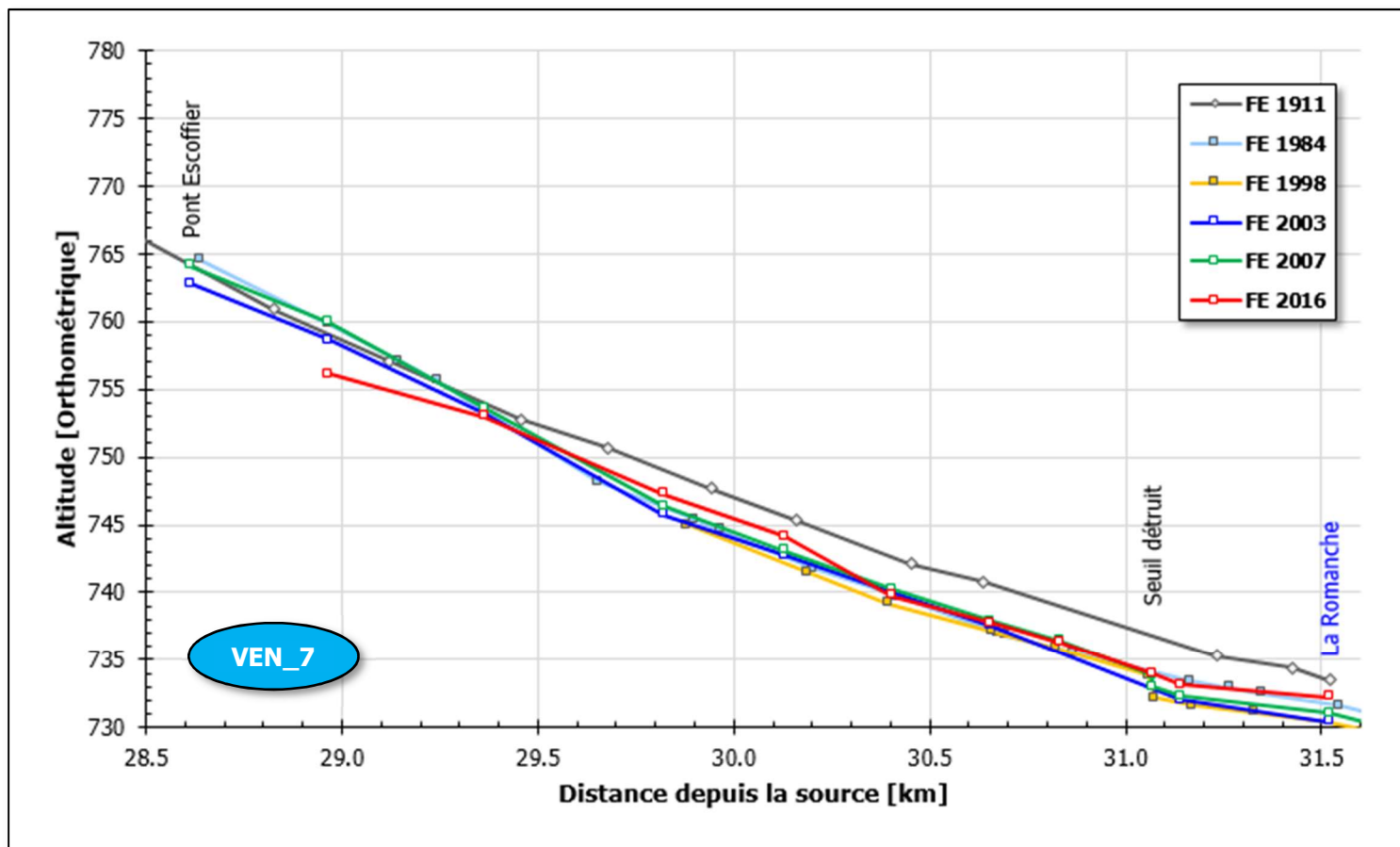


Figure 60 : Comparaison des fils d'eau du Vénéon de l'usine de Pont Escoffier à la confluence avec la Romanche

❖ Évolution verticale des principaux affluents

L'analyse diachronique en altimétrie des principaux affluents (Ferrand, Lignarre, Sarenne et Eau d'Olle) relève de la bibliographie existante. Seules la Lignarre et la Sarenne disposent de ce type d'analyse, mais sur un linéaire restreint en amont proche de la confluence avec la Romanche (depuis le barrage de la Poyat pour la Lignarre et depuis la cascade de la Sarenne pour la Sarenne), comme indiqué au Tableau 31.

Dans son étude de 2012, le service de la RTM montre que le lit de la Lignarre s'est incisé de -4 à -5 mètres entre 1911 et 2011 en amont du pont de la RN91. À l'aval de ce même ouvrage, les écarts diminuent mais restent importants de l'ordre de -2 à -3 mètres. Au niveau de la confluence Lignarre-Romanche, les profils se confondent. Même constat pour BURGEAP (2016) qui indique une incision généralisée historique par rapport à 1911 avec un maximum de -5 mètres en aval du barrage de la Poyat inexistant à l'époque, et une incision moins marquée en aval du pont de la RD1091 (incision métrique).

Le service de la RTM (2012) souligne également l'impact de la crue de 1928 sur le profil en long de la Lignarre. L'engravement consécutif à cet événement jusqu'à la confluence avec la Romanche correspond à un exhaussement de près de +2,5 mètres par rapport au niveau de 2011.

Sur la dernière décennie (1998 et 2011), la tendance est à l'incision jusqu'au pont de la RN91, les barrages de sédimentation et en particulier la plage de dépôt réduisant les apports en matériaux bloqués partiellement en leur amont.

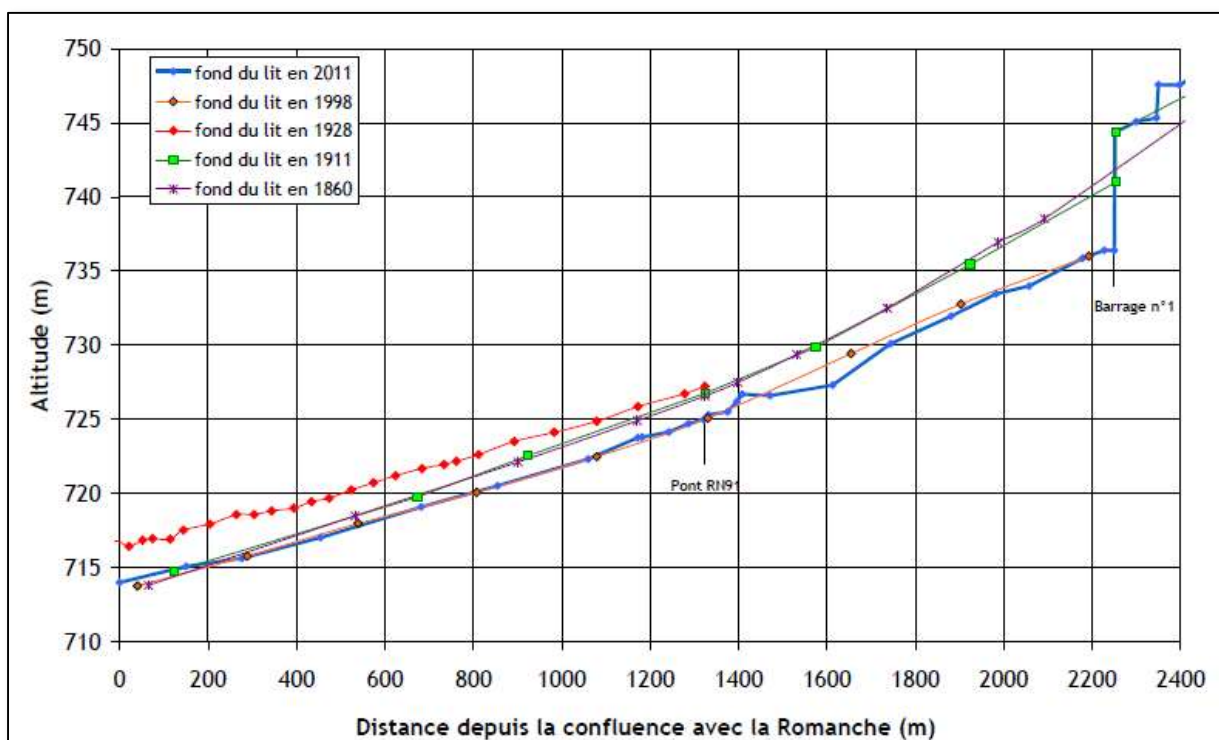


Figure 61 : Évolution du profil en long de la Lignarre entre 1860 et 2011 en aval du barrage de la Poyat
(Source : RTM, 2012, p. 33)

Concernant la Sarenne, BURGEAP (2016) met en évidence un repositionnement de la confluence après 1911. En 1911, celle-ci se situait 420 mètres en aval des Trois Ponts alors qu'aujourd'hui, elle se situe à 800 mètres. Par ailleurs, BURGEAP (2016) indique un engraissement progressif du lit de la Sarenne.

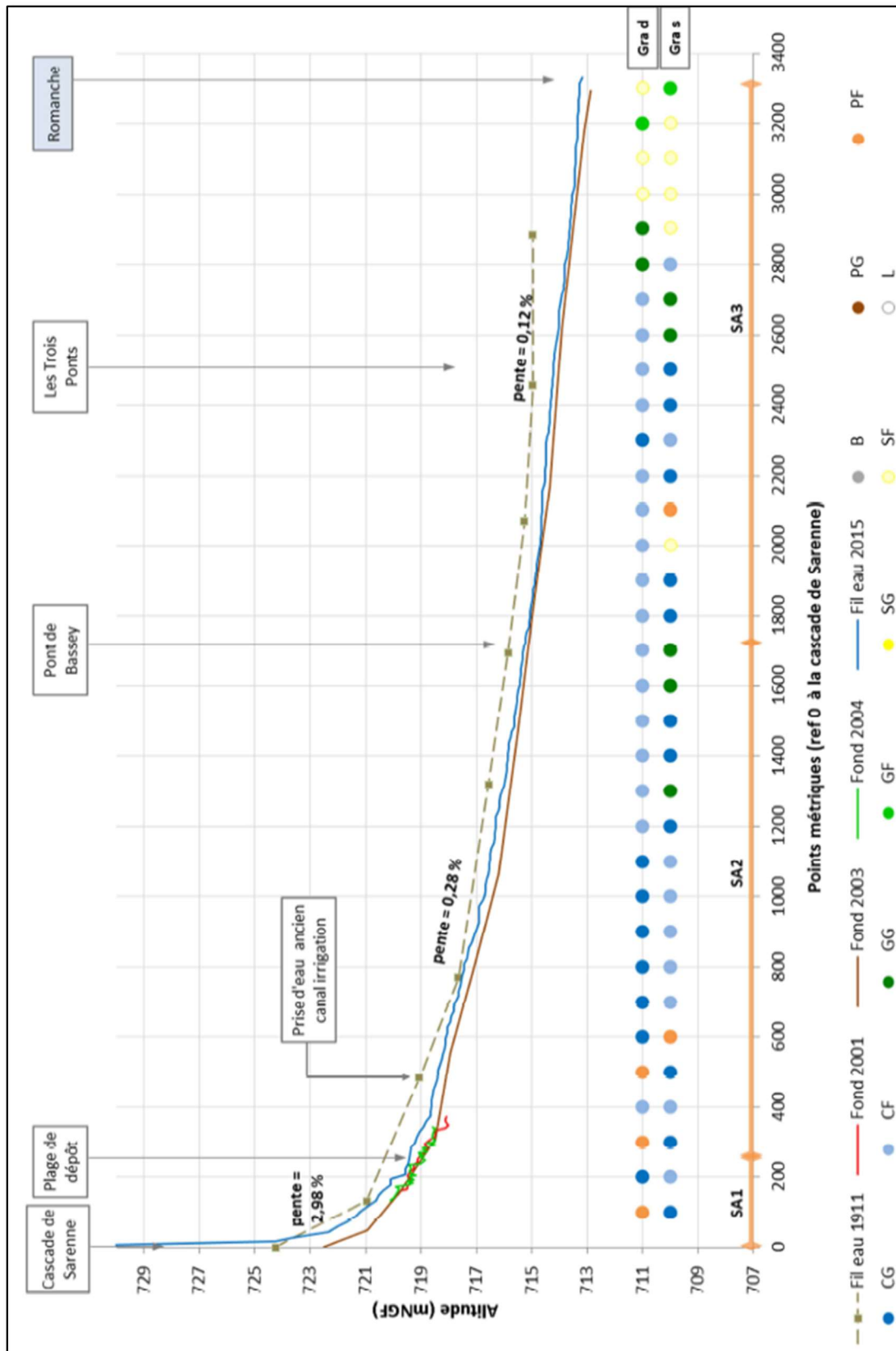


Figure 62 : Évolution du profil en long de la Sarenne depuis la cascade
(Source : BURGEAP, 2016, p. 55)

SYNTHÈSE DE L'HÉRITAGE GÉOMORPHOLOGIQUE

L'analyse de l'héritage géomorphologique montre que le bassin versant amont de la Romanche est sous influence de modifications climatiques et anthropiques :

- **Fin de la séquence paraglaciale** limitant les injections de matériaux dans le stock alluvial* de la Romanche et du Vénéon, et donc provoquant une baisse générale de la fourniture sédimentaire ;
- **Sortie de la période froide du Petit Âge Glaciaire** conduisant à la raréfaction des événements morphogènes de type Basse Fréquence Haute Magnitude* et provoquant également une baisse de la fourniture sédimentaire ;
- **Aménagements anthropiques** importants (parking, camping, route...) dans la bande active des cours d'eau avec corsetage du lit (confortements de berge, digue...), contraignant latéralement la Romanche (La Grave, La Bayette, Bourg d'Oisans...) et le Vénéon (Bérarde, Plan du Lac, Bourg d'Arud, Buclet...) au détriment de la divagation latérale des lits ;
- **Perturbateurs hydromorphologiques majeurs** tels que le barrage du Chambon, du Clapier et dans une moindre mesure Plan du Lac, compartimentant les lits ;
- **Extractions de matériaux conséquentes** durant la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, notamment dans la zone du Buclet avec des prélèvements estimés à 2,8-3,6 millions de m³ entre 1971 et 1984.

L'ensemble de ces forçages externes ont impacté fortement le bilan sédimentaire et la dynamique fluviale de la Romanche et du Vénéon, dont la réponse morphologique a été la suivante :

- **Rétraction de la bande active** du Vénéon de 27% sur la période [1952-2010], soit une perte moyenne annuelle de -0,4 ha/an, avec des secteurs plus touchés que d'autres tels que Plan du Lac avec une rétraction de 54% (soit -0,3 ha/an) et la zone Buclet-Bayette avec une rétraction de 60% depuis 1948 (soit -1,5 ha/an sur la période 1948-2016) ;
- **Profil en long de la Romanche compartimenté** déconnectant sédimentairement la Haute-Romanche (ROM_1) du bassin de la plaine de Bourg d'Oisans (ROM_2 à ROM_4) ;
- **Incision généralisée du profil en long de la Romanche** à la fin de années 90 avec des évolutions importantes par rapport à 1911 de l'ordre de -2,5 à -3,0 mètres en amont du Vénéon (ROM_2) et de -1,2 à -2,0 mètres pour le secteur La Bayette (ROM_3), tendance qui se poursuit en 2016 sur ROM_2 mais qui s'inverse sur ROM_3 avec des exhaussements de +50 cm à +1 m en 2003 par rapport à 1998 et de +40 cm en 2016 par rapport à 2003 liés probablement à la destruction du seuil ;
- **Profil en long du Vénéon globalement incisé** par rapport au levé 1911 avec des enfoncements de l'ordre du mètre notamment dans les secteurs La Bérarde et Les Ougiers. La zone du Buclet est particulièrement incisée jusqu'à -3 m entre 1911 et 1984 mais connaît une tendance au ré-engravement depuis l'arrêt des extractions de matériaux (+1 m entre 2003 et 2007), tendance perturbée par la destruction du seuil avec en 2016 l'apparition d'un début d'incision par érosion régressive de l'ordre de -30 cm sur 660 mètres en amont de l'ancien seuil et un exhaussement métrique en aval.

7 Fonctionnement dynamique

7.1 État de la recharge sédimentaire

Le réseau hydrographique du bassin versant amont de la Romanche mobilise des volumes de matériaux relativement importants. Il suffit pour s'en persuader d'examiner le nombre de structures alluvionnaires. Les matériaux produits ainsi dans le bassin appartiennent au stock alluvial.

Ce stock alluvial est donc composé de l'ensemble des matériaux alluvionnaires disponibles en lits mineur et majeur, et participant actuellement ou de manière différée (lors des épisodes de crues) à la dynamique de la Romanche et du Vénéon et au transit sédimentaire.

Toutefois, le barrage du Chambon, perturbateur anthropique majeur, empêche la connexion sédimentaire entre le bassin de la Haute-Romanche, zone de production sédimentaire disposant de sources sédimentaires et de réservoirs paraglaciers importants, et celui de la plaine de Bourg d'Oisans.

L'objet de ce chapitre est donc d'évaluer l'état de la recharge sédimentaire du territoire d'étude, notamment du Vénéon principal affluent de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans, en distinguant les apports solides externes provenant des versants et des affluents, et les apports solides internes constituant le stock alluvial.

A Les apports solides externes

❖ *Les apports externes primaires : la connexion-versant lit*

Principes et méthodologie

Les apports externes primaires concernent les matériaux provenant des versants. L'érosion de surface des versants (ablation ou décapage) ou l'érosion profonde (mouvements rotationnels, solifluxion...), les écroulements et éboulements de falaises contribuent à la fourniture d'une charge solide principalement grossière. La connexion versant-lit constitue un élément important en termes de charge solide.



Figure 63 : Exemple de connexion versant-lit sur le Vénéon par talus d'éboulis

Toutefois, la connexion versant-lit peut être altérée par une végétalisation qui limite ou empêche les apports de matériaux en lit, favorisant ainsi leur stockage dans les versants. Le reboisement a d'ailleurs largement été utilisé pour « tarir la fourniture sédimentaire des torrents » en montagne par les services de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) dès la deuxième partie du XIX^{ème} siècle.

Dans le cas du bassin versant amont de la Romanche, la charge sédimentaire grossière est préférentiellement fournie dans le cadre de la cascade sédimentaire* paraglacière (au sens de Caine, 1974, précisé par Chorley & Kennedy, 2003), liée à la déglaciation des vallées de la Romanche et du Vénéon.



Figure 64 : Partie distale du glacier de la Pilatte. On note les épandages proglaciaires tapissant la vallée en aval
(Source : RTM38)

Ainsi, les matériaux dégagés par la phase paraglaciale concernent les moraines latérales et frontales, les matériaux de décompression, et les matériaux issus du raidissement des talus.

Ces différents matériaux sont présents sous la forme de sources et réservoirs sédimentaires connectés par le biais d'agents de transport (*e.g.* gravité...). Les sources sédimentaires sont toutefois très rarement connectées avec la Romanche, le Vénéon et leurs principaux affluents. Ce sont principalement les réservoirs sédimentaires qui sont en connexion avec les cours d'eau (souvent indirectement).

Nos recherches bibliographiques n'ont pas montré d'éléments suffisants sur les avancées glaciaires dans le bassin versant de la Romanche lors de la phase de péjoration climatique du Petit Âge Glaciaire (Leroy Ladurie, 1967). Néanmoins, il est probable que les glaciers relictuels existant encore aujourd'hui (*e.g.* glacier de la Pilatte, du Chardon, de la Bonne Pierre, du Vallon des Étages, Lombard) aient avancé pendant cette période (crue glaciaire du Petit Âge Glaciaire). Lors du réchauffement post-Petit Âge Glaciaire, les glaciers se sont alors rétractés (décrue glaciaire post- Petit Âge Glaciaire), libérant alors des matériaux (moraines) dans une courte séquence paraglaciale.

En tout état de cause, le paysage a bien évolué depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (*cf.* Figure 65). Le secteur de la Bérarde semblait ainsi présenter un fort couplage versant-lit, ce qui est loin d'être le cas actuellement. De plus, la végétalisation a fixé les éboulis et a fortement contribué à ce découplage. La faiblesse actuelle du couplage entre le stock sédimentaire paraglaciale et le stock alluvial* doit avoir un impact important en matière d'injection de matériaux en lit. Cet impact est de nature à modifier la trajectoire géomorphologique du cours d'eau en y générant une métamorphose sous forçage climatique.



Figure 65 : Évolution du couplage versant-lit et donc de la fourniture sédimentaire dans le Vénéon entre la fin du XIX^{ème} siècle et maintenant

L'analyse de la connexion versant-lit reste difficilement quantifiable, car il est complexe de mesurer les hauteurs et les volumes de matériaux qui participent effectivement par injection à la charge grossière. De plus, il est également difficile d'évaluer les mécanismes de recharge (solifluxion, reptation...). La méthodologie employée s'appuie donc sur le croisement des contextes géologique et géomorphologique du territoire d'étude, complété par l'analyse de photographies aériennes.

Ne disposant pas d'éléments bibliographiques sur ce point d'analyse pour les affluents (Ferrand, Lignarre, Sarenne et Eau d'Olle) et le secteur de la Haute-Romanche (ROM_1), l'analyse est réalisée à l'échelle des tronçons morphodynamiques pour le Vénéon, principal contributeur sédimentaire de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans.

Connexion versant-lit du tronçon VEN_1

À partir du secteur de La Bélarde, le Vénéon s'écoule en étant bordé de part et d'autre par des versants granitiques (roche dure) peu végétalisés, particulièrement en rive droite, accumulant en pied des matériaux intéressants pour le cours d'eau (charge solide grossière). Les sources sédimentaires élevées sont potentiellement connectées par les torrents.

Néanmoins, le pied de versant est tapissé de matériaux (vraisemblablement d'origine paraglaciale) qui sont végétalisés, les réservoirs sédimentaires ne pouvant donc pas injecter de matériaux dans le Vénéon. La cascade sédimentaire est donc globalement inefficace. Les jupes d'éboulis visibles constituent ainsi des réservoirs sédimentaires (stockages durables sur les versants). Cette situation perdure jusqu'en aval du tronçon VEN_1. Le couplage versant-lit est toutefois présent à certains endroits, surtout en partie aval du tronçon (aval du lieu-dit Pièces du Clot).

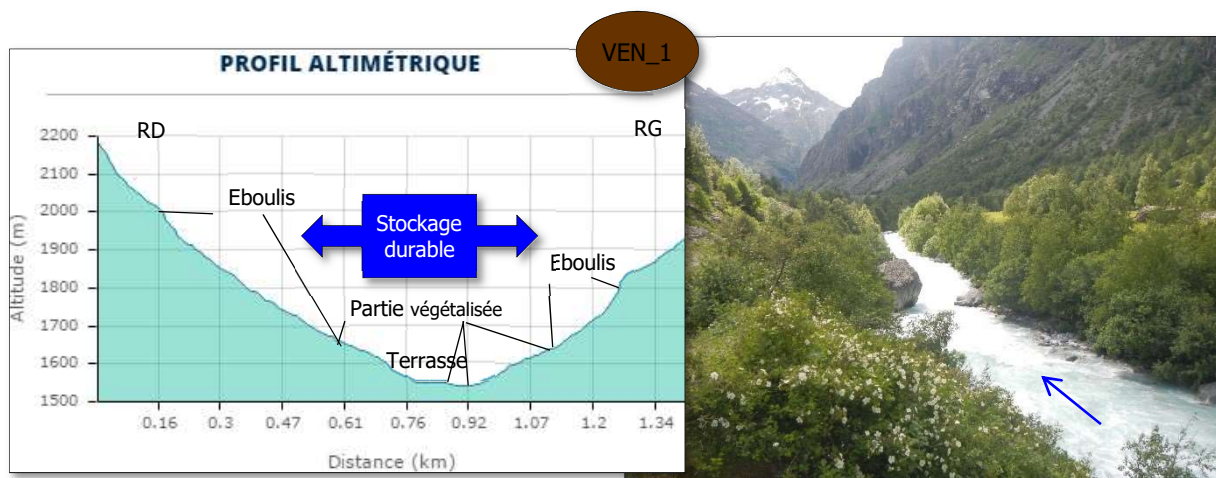


Figure 66 : Profil en amont du ruisseau d'En Bas (à gauche) et vue depuis la rive gauche dans ce secteur (à droite), les éboulis en rive droite apparaissent végétalisés et découplés du Vénéon.

Les premiers cônes de déjection des contributeurs sédimentaires apparaissent importants et actifs car assez peu végétalisés (Combe de la Pierre Noire, Combe de la Pierre Blanche... cf. Figure 67). Puis, plus aval, ces cônes sont moins puissants (Draye de Lachal, ruisseau d'Amont, ruisseau d'En bas, Combe Belliou...).



Figure 67 : Cône de déjection de la combe de la Pierre Blanche. On remarque une végétalisation commençant à fixer le cône sur les parties les moins actives lors des événements Basse Fréquence Haute Magnitude*.



Figure 68 : Carte géologique montrant les éboulis en partie basse des versants taillés dans le granite



Figure 69 : Vue aérienne du Vénéon en aval des Étages montrant le contraste entre les deux versants : celui de rive droite présente des talus d'éboulis actifs mais déconnectés par végétalisation en pied, alors que le versant de rive gauche est végétalisé (Source : Géoportail)

Le versant Sud correspondant à la rive gauche du Vénéon est globalement plus végétalisé que le versant de rive droite. Là encore, les jupes d'éboulis apparaissent végétalisées en pied de versant et les talus sont plus raides qu'en versant opposé. La cascade sédimentaire est ici totalement inefficace.

Les cônes déjection des contributeurs potentiels présents sont de faible taille et végétalisés. Seuls ceux de la combe de la Pierre Blanche et du Cros de l'Ours apparaissent actifs et non végétalisés.



Figure 70 : Vue aérienne de la partie aval du tronçon VEN_1 montrant certains talus d'éboulis de rive droite (flèches jaunes) connectés au Vénéon et injectant probablement des matériaux. Ceux de la rive gauche sont moins actifs et moins connectés, du fait notamment de leur degré de végétalisation (Source : Géoportail)

Connexion versant-lit du tronçon VEN 2

Le tronçon VEN_2 présente un style fluvial en gorge où la vallée est fortement encaissée. En rive droite, les sources sédimentaires sont présentes à partir des anciens cirques glaciaires, notamment sous l'aiguille du Plat de la Selle (ancien glacier du plat...). Ces matériaux sont toutefois stockés dans un réservoir sédimentaire sur un épaulement à environ 2 500 mètres d'altitude.

Les principaux éboulis présents sur les versants sont bloqués sur les parties basses par des forêts de versants, limitant ainsi très fortement la connexion versant-lit en aval du tronçon. Sous la tête de la Marsare (cf. Figure 71), des éboulis sont nettement visibles entre 1 500 et 1 900 mètres d'altitude. On note toutefois que la forêt se développe depuis le Vénéon jusqu'à 1 500 mètres et déconnecte ainsi les éboulis. Même le ruisseau de Champhorent, qui présente une source sédimentaire importante et une bonne connexion versant-lit, est mal connecté au Vénéon et n'est donc pas un contributeur important en termes de recharge sédimentaire (cf. Figure 71).

En rive gauche, les versants présentent des éboulis plus importants, en cours de végétalisation pour certains, mais qui ne semblent pas connectés au Vénéon, à l'exception du couloir d'avalanches de la Grande Ruine (cf. Figure 72).

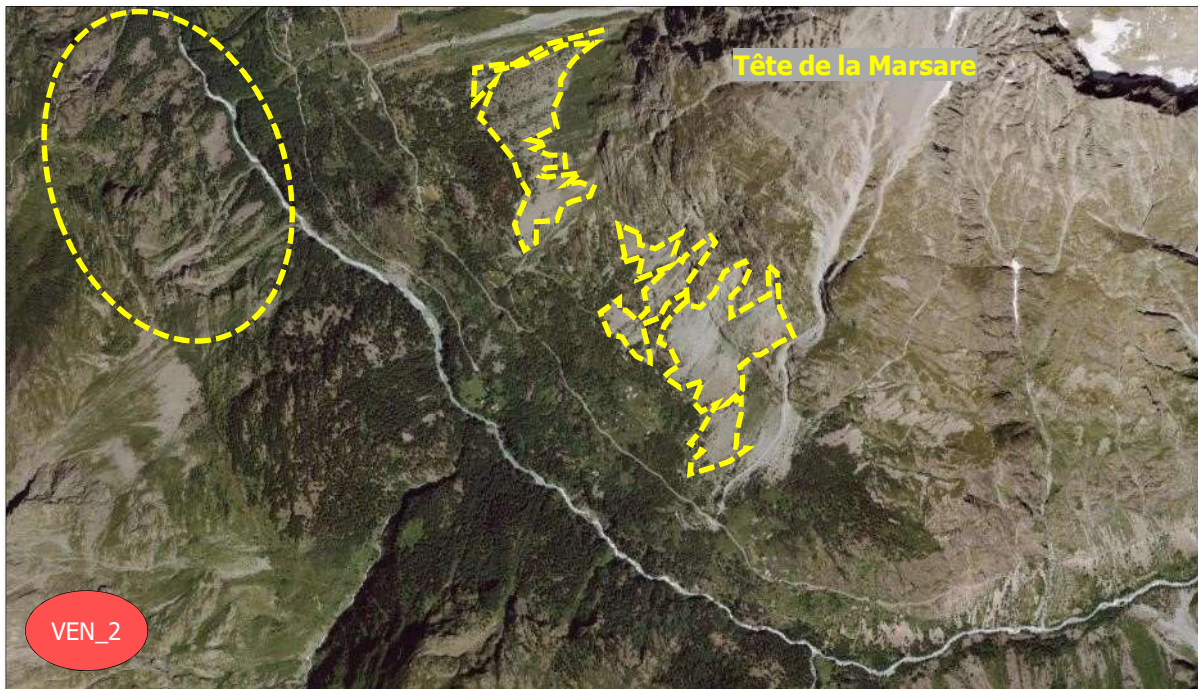


Figure 71 : Vue aérienne de l'amont du tronçon VEN_2. Les éboulis sont peu représentés. En rive gauche, entre 1500 et 1900 m, ils sont déconnectés et le ruisseau de Champhorent apparaît comme un faible contributeur pour le Vénéon. En rive droite, à partir de l'aval, des éboulis apparaissent mais semblent déconnectés du Vénéon (Source : Géoportail)



Figure 72 : Les éboulis sont bien présents en rive gauche mais leur connexion avec le Vénéon est limitée du fait de la végétation. La rive droite présente des éboulis sous la forme de ravinelements mais très au-dessus du Vénéon et sans couplage avec ce dernier qui est 270 mètres plus bas. La Grande Ruine, connectée au Vénéon, est bien visible (flèche jaune) (Source : Géoportail)

On rencontre un écoulement localisé sous la route conduisant au Clot d'Outre en aval du lieu-dit Pré Clot (cf. Figure 73). Ce mouvement de masse concerne des gneiss qui sont faillés à cet endroit. Les matériaux dégagés par cet écoulement localisé récent pourra être remobilisé lors d'une crue de type Basse Fréquence Haute Magnitude* et sera pourvoyeur de matériaux, mais à l'échelle du tronçon les volumes sont faibles.

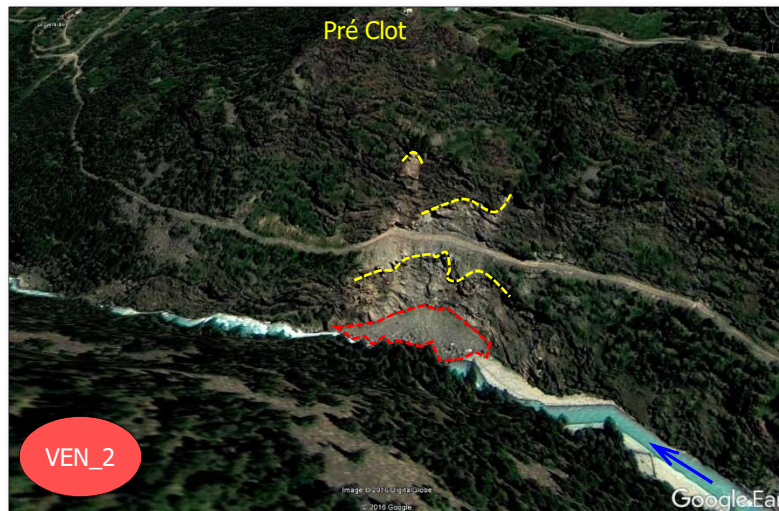


Figure 73 : Écoulement sous le lieu-dit "Pré Clot" dans les gneiss formant un cône d'éboulis rechargeant localement le Vénéon. En jaune, les cicatrices d'arrachement et en rouge, le cône d'éboulis empiétant sur la bande active du Vénéon (Source : Google Earth)

Connexion versant-lit du tronçon VEN_3

Dans le tronçon VEN_3, la vallée s'ouvre et le Vénéon présente un début de tressage dans le petit ombilic de Plan du Lac. Ce changement de style fluvial indique qu'à cet endroit la charge grossière est importante, ou du moins l'a été, les stocks sédimentaires présents étant encore actifs malgré une période de déstockage.

L'ombilic de Plan du Lac est rempli de matériaux semblant provenir d'un écoulement de versant (mouvement de masse) qui a bouché partiellement la vallée et sur lequel s'appuient les ouvrages hydroélectriques.

Il s'agit d'une obturation paraglacière, dont le volume de matériaux provenant de la face Nord du Cloutet, est estimé à 40 millions de m³ (Montjuvent & Marnezy, 1986). Cette obturation a généré un niveau de base local, sur lequel les alluvions se sont aggradées. Le tressage s'y est ainsi développé.

Cette courte zone de tressage s'appuie sur la retenue de Plan du Lac. Le tressage s'y explique par la rupture de pente et le stockage sédimentaire provenant de l'amont et du ruisseau de la Pisse qui semble être un contributeur sédimentaire intéressant. On note ainsi des éboulis de versants connectés à partir de 1 600 mètres depuis la confluence ruisseau de la Pisse/Vénéon, qui semblent actifs. Toutefois, au droit de la confluence, le cône de déjection visible est présent mais peu puissant.



Figure 74 : Tressage de Plan du Lac lié à l'aggradation des matériaux en appui sur un éboulement ancien qui a créé un niveau de base local. On note la végétalisation des versants et les stockages sédimentaires paraglaciers en pied de versant qui sont déconnectés (rouge) (Source : Géoportail)

Le secteur de Plan du Lac est un secteur encore peu végétalisé au début du XX^{ème} siècle. Actuellement, les versants sont en cours de fixation par la végétation, ce qui limite la connexion versant-lit et ne manquera pas à terme d'avoir une incidence sur le tressage.

On note également l'apparition d'îles végétalisées au niveau du tressage (cf. Figure 74 – flèches jaunes), dénotant que ce patron fluvial est en baisse d'activité et donc certainement en début de métamorphose fluviale (au sens de Bravard, 1989).

Cette évolution de la végétalisation des versants (malgré leur forte pente) est attestée en comparant des photographies anciennes et plus récentes. En effet, au début du XX^{ème} siècle, la connexion entre les versants et le lit est importante dans ce secteur, notamment en rive gauche, et le tressage apparaît actif (rajeuni souvent). Ainsi, il y a un fort indice de tressage et aucune végétation sur les structures alluvionnaires. La bande active est très large et occupe tout le fond de vallée, à l'exception de la partie supportant la route qui est topographiquement liée à l'éboulement. Le versant de rive gauche est tapissé par des talus d'éboulis paraglaciers connectés au lit (cf. Figure 75).

Sur les photographies actuelles, l'ambiance est tout autre. La bande active est contractée, les versants végétalisés et les talus d'éboulis bordiers sont découplés du lit et en cours de fixation par la végétation. Les structures alluvionnaires se végétalisent (cf. Figure 76 et Figure 77).

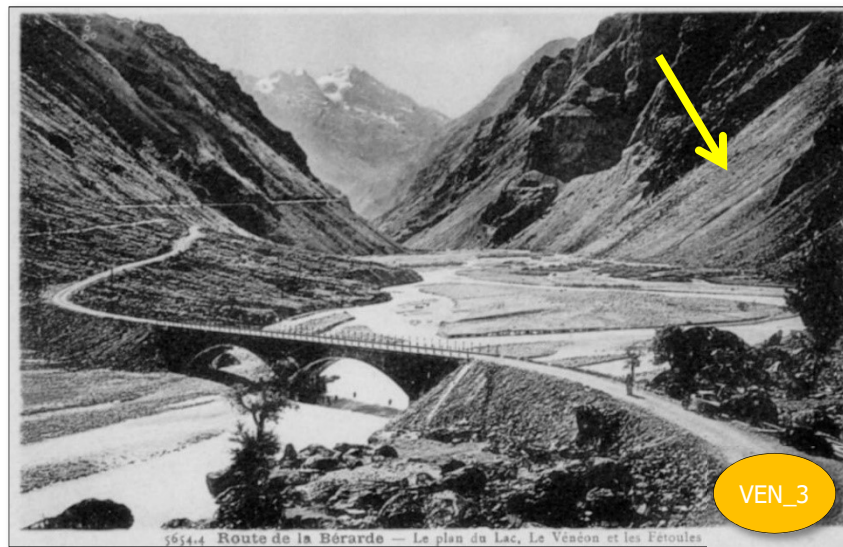


Figure 75 : Carte postale ancienne de Plan du Lac. On note la bonne connexion versant-lit et le peu de végétalisation des versants. La connexion versant-lit est importante (flèche jaune).



Figure 76 : Vue générale du Vénéon depuis le pont du barrage de Plan du Lac. On constate une végétalisation très forte de la zone et même une structure alluvionnaire en lit qui se végétalise (flèche jaune).

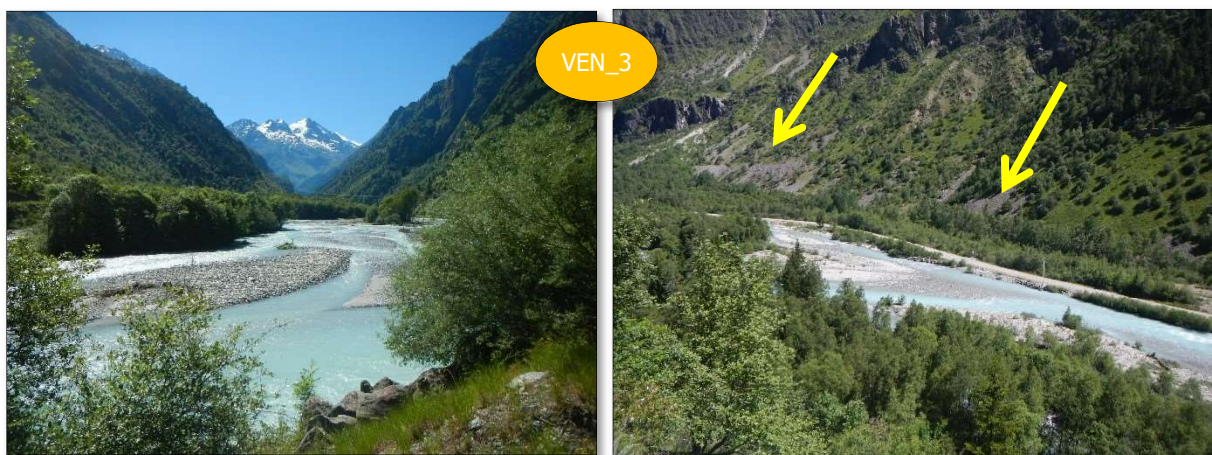


Figure 77 : Le Vénéon à Plan du Lac. On note la végétalisation très importante du secteur (à gauche) et les talus d'éboulis paraglaciers déconnectés du lit et en cours de végétalisation (à droite) (flèche jaune).

Connexion versant-lit du tronçon VEN 4

Le tronçon VEN_4 présente une vallée très pentue qui se resserre, du fait du décrochement lié à l'éboulement de Plan du Lac. La connexion versant-lit semble intéressante en rive droite. En effet, le versant taillé dans les gneiss de Lavey est dénudé et pentu, de sorte qu'il doit être sujet à l'éboulisation, notamment par l'action gel/dégel, et donc pourvoyeur de matériaux. Toutefois, cette éboulisation concerne probablement des volumes peu importants. Par ailleurs, en aval du tronçon, à la confluence de la Combe Fort et de la Combe du Croix, on note la présence d'un talus d'éboulis important mais qui apparaît végétalisé.



Figure 78 : Éboulisation en rive droite avec en aval le talus d'éboulis actif de Bourg d'Arud (flèche). En rive gauche, les talus d'éboulis sont en cours de végétalisation (Source : Géoportail)

La rive gauche au relief moins accentué présente des talus d'éboulis partiellement végétalisés qui semblent toutefois peu connectés au Vénéon. Là-encore, la cascade sédimentaire paraglacière est peu fonctionnelle et les versants sont découplés.



Figure 79 : Versant de rive gauche sujet à l'éboulisation (action gel/dégel) (à gauche), on note la végétalisation de la rive droite ainsi que celle du talus d'éboulis bien visible en aval (flèche). Vue d'éboulis piégés en pied de versant (à droite) susceptibles d'être réinjectés lors d'une crue Basse Fréquence Haute Magnitude (flèche).*



Figure 80 : Pied de talus quasiment au contact du Vénéon mais qui se végétalise (à gauche) et pied du talus d'éboulis en équilibre sur des matériaux très gros (à droite) liés vraisemblablement à un éboulement ancien et végétalisé, le couplage est donc limité avec le Vénéon.

Connexion versant-lit du tronçon VEN 5

À partir de Bourg d'Arud, la vallée du Vénéon s'ouvre un peu et la pente diminue. Toutefois, le tronçon VEN_5 reste encaissé et la vallée étroite. La lithologie et la géologie changent puisque l'on trouve une passée de terrains détritiques sédimentaires (calcaires et schistes gréseux du Domérien-Toarcien) avant de retrouver des terrains métamorphiques (gneiss du lauvitel avec passée d'amphibolite).

La rive droite jusqu'à la Drave de Crémieu est soit végétalisée, soit exploitée (cône de Vénosc sur lequel s'étage le village). Les sources sédimentaires potentielles sont hautes dans les versants végétalisés et découplées du lit (*cf.* Figure 81).

On rencontre ainsi une source sédimentaire importante dans les marnes noires du Toarcien (combe Hochue proche de l'Alpe de Vénosc vers 2 000 mètres d'altitude). En effet, ces roches de faible dureté sont érodées sous formes de ravines donnant naissance à des ravins profonds par coalescence. En revanche, elles fournissent des matériaux fins peu intéressants au niveau de la fourniture sédimentaire des cours d'eau.

Les stockages sédimentaires proches du Vénéon sont végétalisés et la route départementale (RD 530) montre bien le découplage des sources comme par exemple le cône d'éboulis du Plan Verney (*cf.* Figure 81) sur lequel passe le sentier de Grandes Randonnées (GR 50).

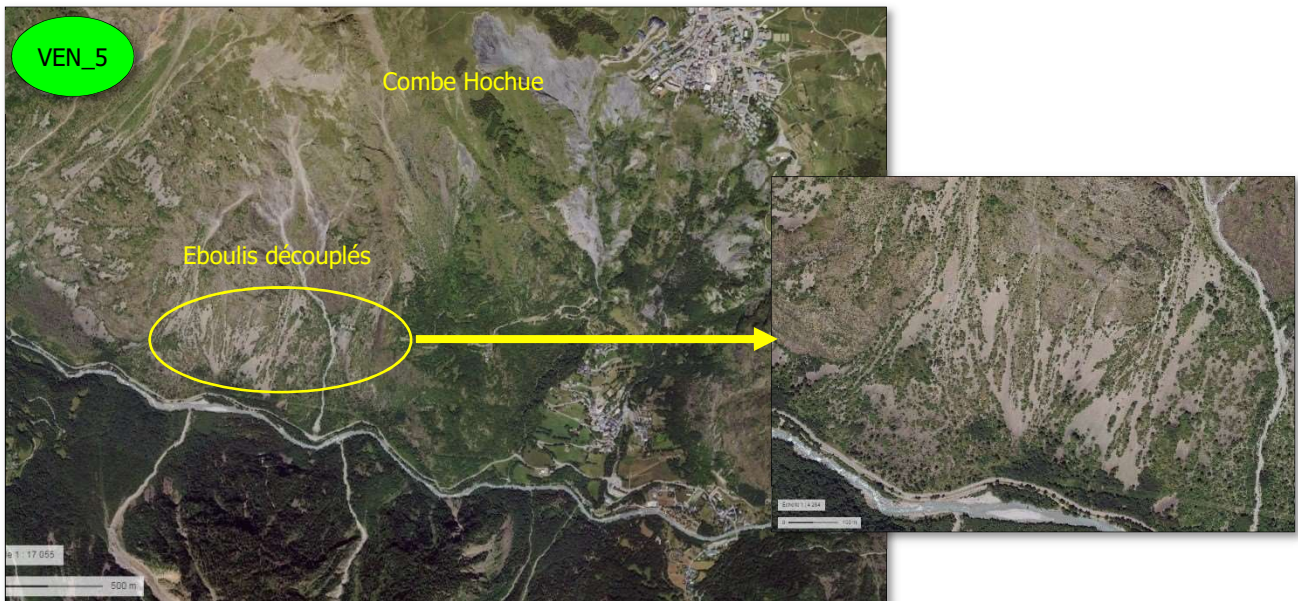


Figure 81: Rive droite du tronçon VEN_5 (à gauche), les sources et réservoirs sédimentaires sont importants dans les versants, mais le couplage en pied est très limité. On note à l'Alpe de Vénosc la Combe Hochue, source sédimentaire dans les marnes noires du Toarcien, mais qui est haut dans les versants et totalement découplée. Gros plan sur les éboulis découplés de Plan Verney (à droite).

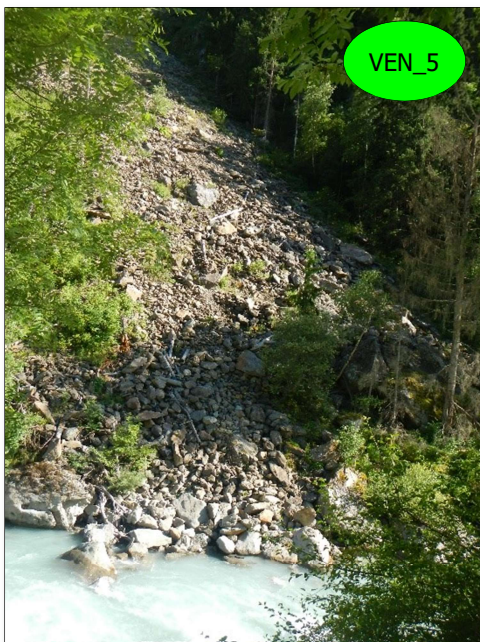


Figure 82 : Talus d'éboulis couplé au Vénéon

La rive gauche est quasi totalement végétalisée. Les sources sédimentaires y sont donc rares et essentiellement liées à des zones très pentues marquées par une éboulisation localisée.

On note ainsi un éboulis entre le lieu-dit Sous les Combes et le lieu-dit Vers le Coin qui fournit des matériaux de granulométrie intéressante. Mais les volumes injectés ne sont pas très importants même à l'échelle du tronçon (cf. Figure 82).

Connexion versant-lit du tronçon VEN 6

Le tronçon VEN_6 débutant au pont des Ougiers jusqu'à l'usine de Pont Escoffier constitue une zone de transition entre les tronçons amont resserrés et la partie aval où se développe la plaine du Buclet et son tressage en amont de la confluence avec la Romanche.

La rive droite se caractérise par une végétalisation des éboulis de pied de versant au contact du Vénéon. Toutefois, au niveau du Clot, la carte géologique indique que les matériaux en pied de versants sont des matériaux du Würm indifférencié (Gw). Cette topographie est représentative d'une moraine würmienne latérale. Par sa présence, elle obère toute possibilité de couplage avec la cascade sédimentaire. Ce replat a piégé les matériaux et est d'ailleurs exploité par une carrière (lieu-dit Balme-Rousset) autorisée en 2008 pour 15 ans. Elle exploite ainsi une superficie de 12 450 m² avec possibilité d'extraire au maximum 10 000 T/an pour une réserve totale de matériaux exploitables estimée à 75 000 tonnes (cf. Figure 83).

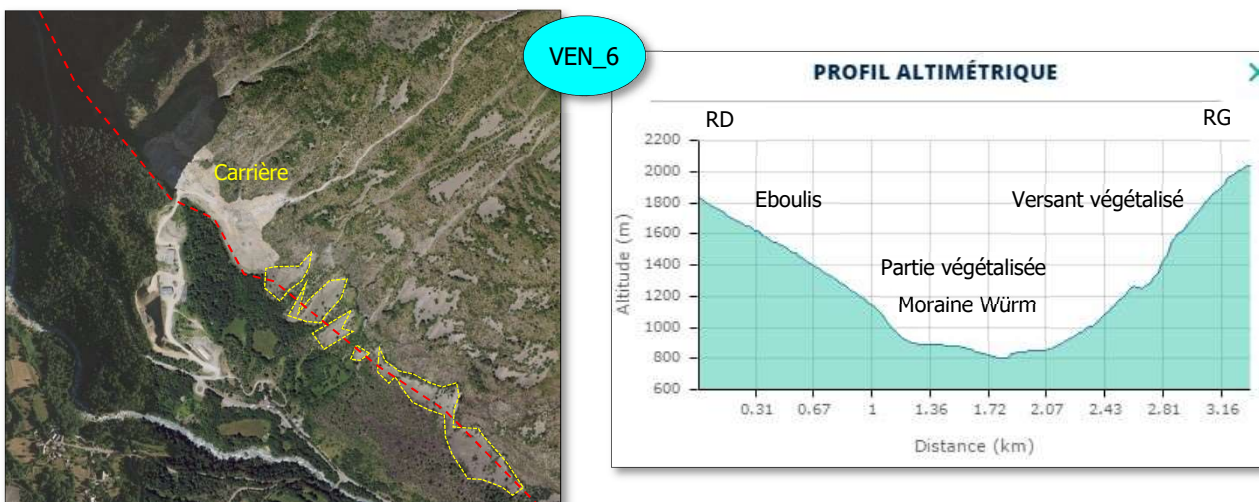


Figure 83 : Carrière et moraine würmienne (à gauche) (limite amont en rouge), les éboulis de pied calés dessus sont en jaune et profil de la vallée (à droite) montrant la moraine en pied et les profils de versant.

La rive gauche voit son versant végétalisé jusqu'à environ 1 000-1 100 mètres d'altitude. Les sources sédimentaires visibles sont au-delà de cette altitude. Bien qu'elles apparaissent importantes en superficie, étant donné que la partie basse du versant est pratiquement totalement végétalisée, le couplage entre stock sédimentaire et stock alluvial est très limité et donc la fourniture également. Le versant présente toutefois une forte pente.

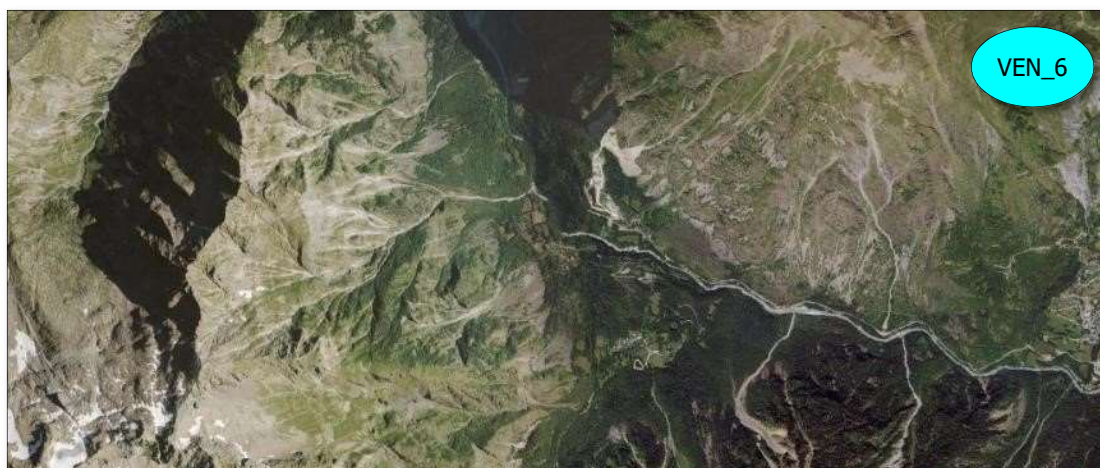


Figure 84 : Rive gauche du tronçon VEN_6 avec les parties hautes dénudées et les parties basses végétalisées

Connexion versant-lit du tronçon VEN 7

Le tronçon VEN_7 constitue le tronçon distal s'étendant de l'usine de Pont Escoffier à la confluence avec la Romanche (zone du Buclet). Il présente un style fluvial en tresses.

La plaine du Buclet vient en tête de l'ombilic du Bourg d'Oisans qui a été rempli par les matériaux proglaciaires et paraglaciers depuis notamment la fin du Dernier Maximum Glaciaire (Würm III). L'auge de Bourg d'Oisans constitue l'archétype de ce type de modelé glaciaire.

La bande active du tressage qui se rétracte depuis 1948 ne se déploie pas dans la totalité de l'espace valléen, y compris dans la partie amont contrainte par rapport à l'aval (ombilic du Bourg d'Oisans).

Le secteur est également caractérisé par des versants très pentus en rive droite comme en rive gauche (profil en auge glaciaire) avec une éboulisation encore potentiellement active (action gel/dégel).

Les pieds de versant en rives droite et gauche sont tapissés d'éboulis (sous forme de stockages durables) non connectés au stock alluvial (cf. Figure 87). La route a d'ailleurs été installée dans ce secteur, le plus loin possible de la bande active du Vénéon.



Figure 85 : Profil en auge glaciaire entre la Pétaure (1 566 m) et la Côte Belle (1 789 m)

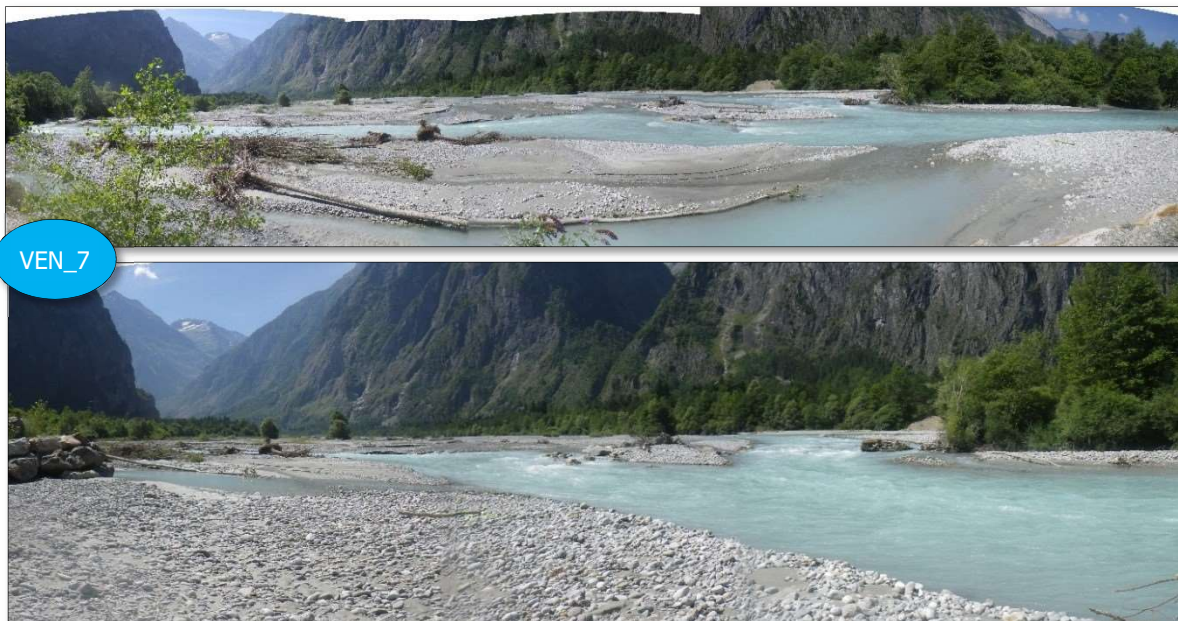


Figure 86 : Tressage du Vénéon dans l'ombilic de la plaine du Buclet. On remarque le versant subvertical et la végétalisation de la berge opposée qui témoigne d'un découplage versant-lit.

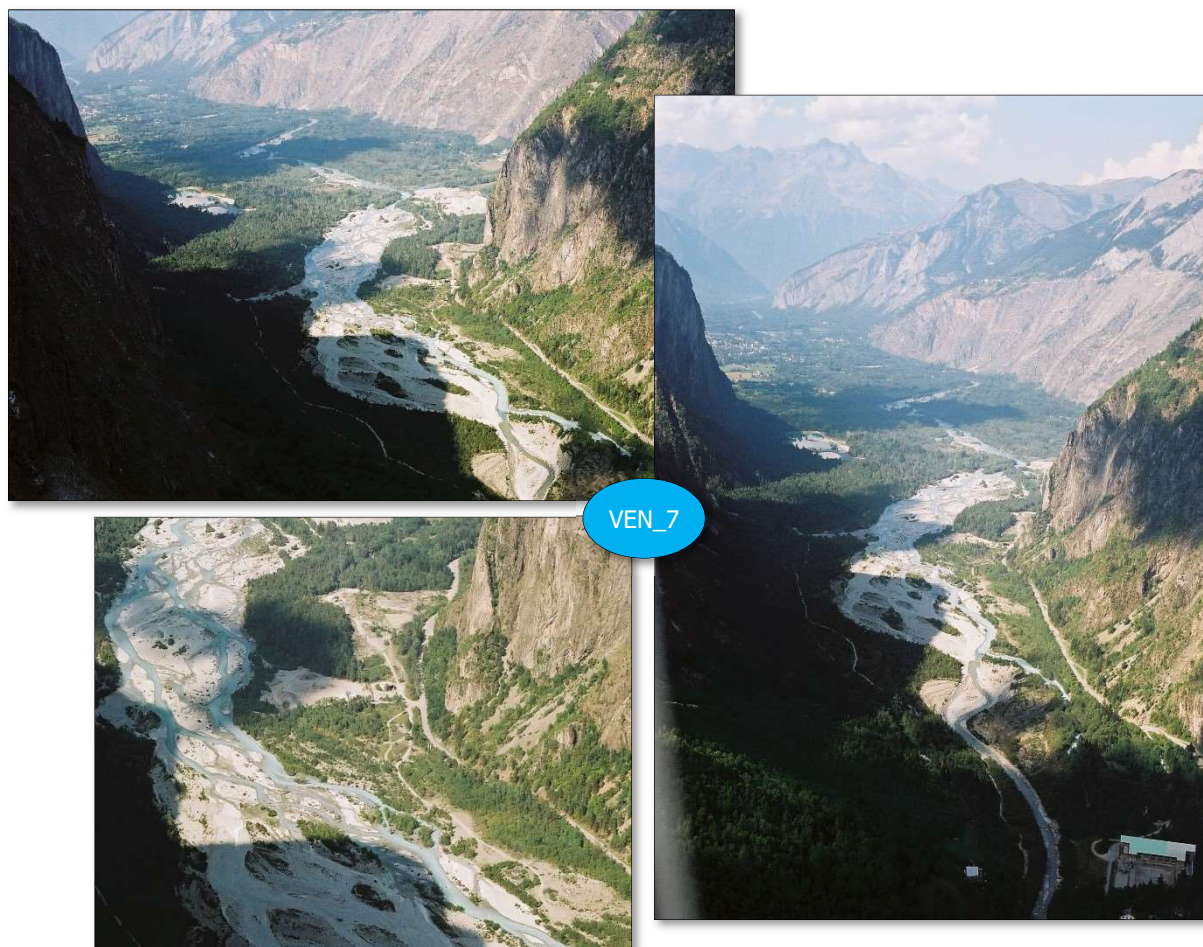


Figure 87 : Vues aériennes du tressage du Vénéon de 2011 montrant le découplage entre le stock sédimentaire et le stock alluvial

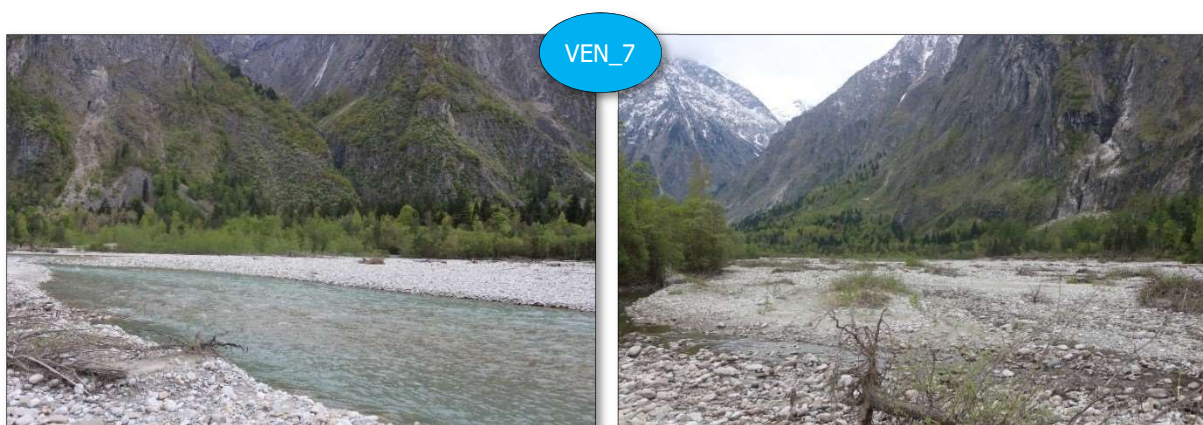


Figure 88 : Découplage des versants et du lit du Vénéon dans la plaine du Buclet

Le Tableau 32 synthétise l'ensemble des éléments de l'analyse de la connexion versant-lit du Vénéon par tronçon morphodynamique.

| SYNTHÈSE DE LA CONNEXION VERSANT-LIT DU VÉNÉON | | | |
|--|-----------------------|--|---|
| Tronçon | Connexion versant-lit | Boisement des versants | Observations |
| VEN_1 | Moyenne | Versants de rive droite quasiment dénudés, seuls les éboulis de pied de versant sont végétalisés Partie haute des versants de rive gauche dénudées et parties basses et médianes végétalisées | |
| VEN_2 | Faible | Versants relativement végétalisés | Éboulis présents mais connexion limitée du fait de la végétation |
| VEN_3 | Faible | Versants globalement végétalisés | Quelques éboulis actifs mais déconnectés du Vénéon |
| VEN_4 | Moyenne | Versants de rive gauche fortement végétalisés Versants de rive droite faiblement végétalisés | Connexion versant-lit principalement en rive droite |
| VEN_5 | Faible | Versants de rive gauche complètement végétalisés Versants de rive droite végétalisés ou exploités (agriculture) en amont, seule la partie aval est faiblement végétalisée | |
| VEN_6 | Faible | Versants de rive gauche végétalisés et de rive droite partiellement végétalisés Végétalisation concentrée sur les éboulis de pied de versant | |
| VEN_7 | Faible | Versants de rive gauche végétalisés sous les affleurements rocheux et ceux de rive droite partiellement végétalisés | La bande active du Vénéon bordée par la végétation dénote une connexion versant-lit faible. |

Tableau 32 : Synthèse de la connexion versant-lit du Vénéon par tronçon morphodynamique

❖ *Les apports externes secondaires : les affluents***Principe et méthodologie**

Les apports externes de matériaux concernent également les matériaux provenant des affluents. On préférera parler de **contributeurs sédimentaires**, dans la mesure où ces cours d'eau fournissent une charge solide au cours d'eau principal. Ils contribuent ainsi à renforcer son budget sédimentaire grâce à leurs apports.

Les affluents fonctionnent toutefois de manière particulière par rapport à la Romanche ou au Vénéon. En effet, la connexion entre les versants et leur lit est l'élément moteur de leur dynamique. C'est l'instabilité des versants (ravinement, éboulisation, solifluxion...) qui fournit ainsi aux contributeurs potentiels leur charge grossière qu'ils évacuent ensuite vers le Vénéon.

La charge de fond de ces contributeurs s'effectue sous la forme de bouffées sédimentaires, génératrices de vagues sédimentaires. Leur morphodynamique est donc active mais erratique avec des phases de dépôts et de recharge successives très importantes (Liébault *et al.*, 2013).

Ainsi, une faible connexion versant-lit laisse à penser que l'affluent apporte une charge solide limitée au cours d'eau principal. *A contrario* un fort couplage entre les versants et les chenaux indique que l'affluent apporte des bouffées sédimentaires conséquentes et constitue donc un contributeur important.

La « qualité » des apports sédimentaires est influencée par la lithologie. Par exemple, un ravinement intense dans des marnes friables apportera une charge solide différente d'un rechargement du contributeur par éboulisation de calcaires et/ou contact avec une jupe d'éboulis active. Cette qualité se différenciera par la granulométrie des matériaux injectés, leur volume et le rapport entre la fraction grossière et la fraction fine. *A contrario* un mouvement de masse, une éboulisation de versants ou un écoulement dans les roches cristallines dures comme les granits ou les gneiss, fourniront des matériaux grossiers intéressants pour la recharge grossière et donc le substrat (armure*) des lits fluviaux.

Ainsi, l'analyse des apports externes secondaires consiste à **évaluer les principaux affluents qui représenteraient des contributeurs sédimentaires potentiels importants** en termes d'apports de matériaux au stock alluvial du Vénéon (et donc de la Romanche), tant en quantité (volume) qu'en qualité (granulométrie).

À partir des investigations de terrain et du croisement des contextes géologique et géomorphologique du territoire d'étude à l'échelle des tronçons morphodynamiques du Vénéon, la méthodologie repose sur l'analyse des deux éléments suivants :

- La présence d'un **cône alluvial** non végétalisé, dans lequel le cours d'eau le construisant est peu incisé, témoignant d'une activité sédimentaire efficiente, ainsi que quelques éléments annexes comme un impact sur la morphologie du lit du cours d'eau receveur (*e.g.* lit déporté en berge antagoniste, tressage en aval...) ;
- La présence de **sources sédimentaires** en amont proche et un **couplage** *via* la cascade sédimentaire à l'instar de l'analyse de la connexion versant-lit réalisé sur le cours d'eau principal (*cf.* § A).

Ne disposant pas de données bibliographiques pour la Haute-Romanche (ROM_1), le Ferrand, la Lignarre, la Sarenne et l'Eau d'Olle, les éléments de l'analyse sont donc uniquement présentés pour le Vénéon.

Contribution sédimentaire de la tête de bassin

À titre de rappel, la partie amont du bassin versant du Vénéon abrite encore quelques glaciers relictuels (d'amont vers l'aval) tels que le glacier de la Pilatte aux sources du Vénéon, le glacier du chardon en tête du torrent éponyme, le glacier des Étançons en tête du torrent des Étançons, le glacier de la Bonne Pierre en tête du torrent de Bonne Pierre, le glacier du Vallon des Étages en tête du ruisseau du même

nom, le glacier Lombard en tête du Maurian, le glacier des Sellettes en tête du ruisseau de la Muande, le glacier de la Mariande en tête du ruisseau éponyme, le glacier du Pierroux en tête de la Grande Pisse.

Ces glaciers ont certainement subi une période de crue glaciaire pendant le Petit Âge Glaciaire et de décrue à la sortie du Petit Âge Glaciaire avec une petite séquence paraglaciale au moins liée à la libération de moraines. La documentation scientifique est plutôt limitée sur ce sujet.

Il est toutefois probable que les glaciers apportent des matériaux au Vénéon. Ainsi, le glacier de la Pilatte contribue certainement par ses matériaux au maintien des zones en tresses au plan du Carrelet, petit ombilic rempli de matériaux.

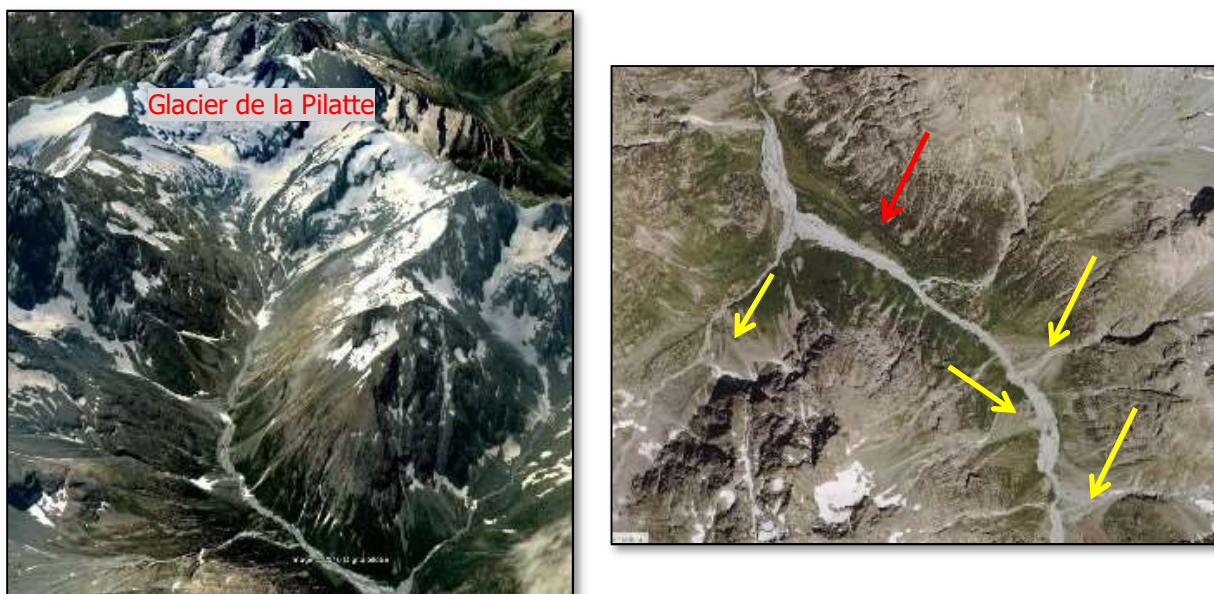


Figure 89 : Tête de bassin du Vénéon avec le glacier de la Pilatte (à gauche) et tressage dans l'ombilic du Carrelet (à droite). On note le découplage du versant de rive droite (flèche rouge) et les cônes fournissant des matériaux (flèche jaune). La bande active est bien visible.

La plupart des vallées adjacentes au Vénéon sont des vallées modelées par des glaciers dont il ne reste que des reliques. Ces vallées présentent toutes une même conformation générale :

- Un **cirque** de tête (niche glaciaire) vaste et multilobé témoignant de la présence d'un grand appareil glaciaire qui a modelé la vallée. On note des glaciers relictuels dans certains lobes en cours de résorption. C'est la zone de production de la glace ;
- Une **auge glaciaire en U** (ombilic) résultat du surcreusement par la langue glaciaire avec un remplissage de matériaux glaciaires et fluvio-glaciaires. Elle présente une faible pente, le tressage peut s'y développer pour le cours d'eau l'occupant ;
- Un **gradin de confluence** avec la vallée principale, généralement en appui sur un verrou rocheux ;
- Une **gorge de raccordement en V** descendant dans la vallée du Vénéon dans lequel le cours d'eau actuel est plus ou moins incisé. Dans cette gorge, le cours d'eau peut présenter une cascade.

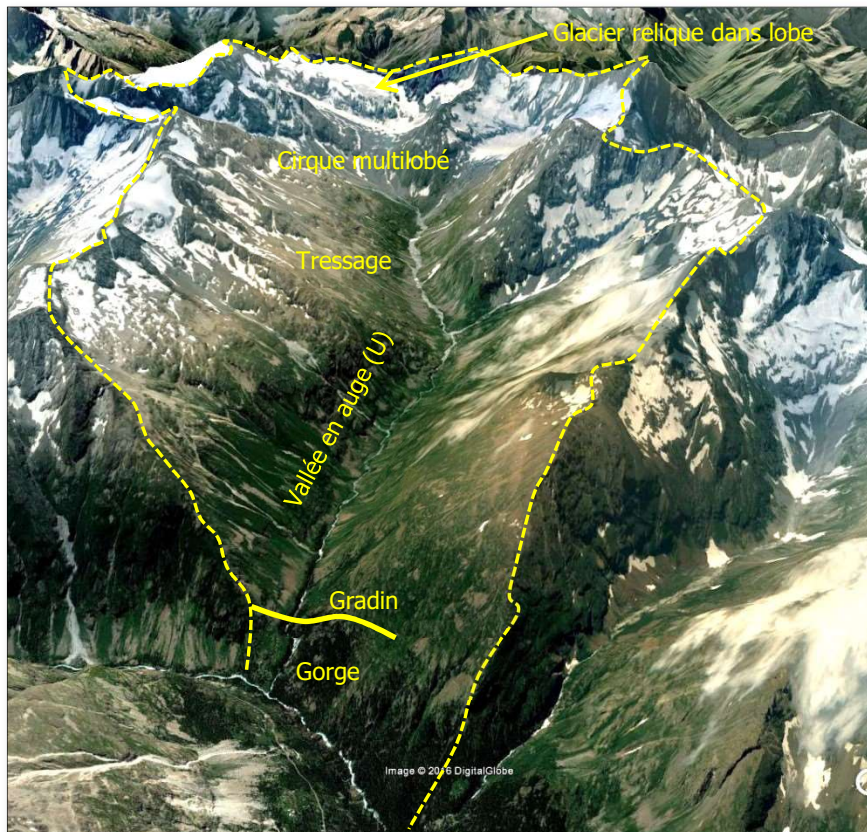


Figure 90 : Une vallée glaciaire type du bassin du Vénéon : la vallée de la Lavey

Contributeurs sédimentaires de VEN 1

Le **torrent des Étançons** prend sa source sous la Meije et conflue avec le Vénéon à la Bérarde. Le cirque de tête (sous la Meije) abrite un petit appareil glaciaire dont la capacité de production de matériaux est très limitée.

Les sources sédimentaires proches les plus importantes sont au niveau de l'ébouilisation des granites (granites de la Bérarde) vers la passerelle du Plaret Géný. Les versants de la vallée sont tapissés de matériaux d'éboulis peu actifs.

Le cône alluvial distal apparaît de faible taille et végétalisé. Il ne présente pas de trace d'activité morphogène récente et le ruisseau des Étançons y est incisé.

On peut donc considérer que les apports du torrent des Étançons ne sont pas très importants et que celui-ci constitue donc un contributeur plutôt modeste du Vénéon.

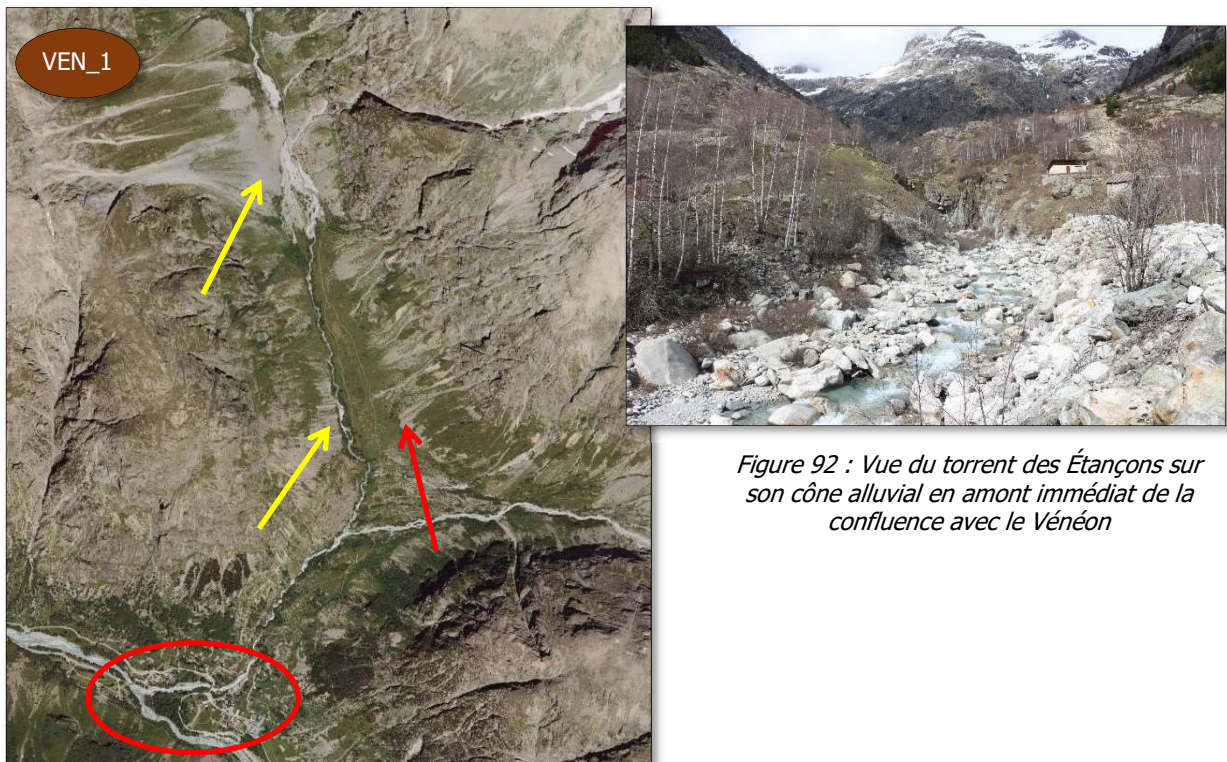


Figure 91 : Partie distale du torrent des Étançons avec deux sources sédimentaires couplées (surtout celle en amont) en rive droite, mais un versant de rive gauche découplé. Le cône de déjection est végétalisé.



Figure 92 : Vue du torrent des Étançons sur son cône alluvial en amont immédiat de la confluence avec le Vénéon

Les **Combes de la Pierre Noire** (rive droite) et de la **Pierre Blanche** (rive gauche) sont pratiquement en vis-à-vis. Les deux combes se sont disséquées dans les granites en suivant un plan de faille, celle-ci étant perpendiculaire à la vallée.

Ces deux torrents présentent des cônes de déjection actifs (peu végétalisés) ce qui indique que ce sont des contributeurs sédimentaires pour le Vénéon.

On voit d'ailleurs nettement sur la vallée la ligne vers 1 720 mètres d'altitude délimitant les éboulis de pied de versant lié à la décohéssion des versants et à la décompression paraglacière. Ces éboulis sont végétalisés et donc découplés.

Les cônes alluviaux historiques des deux torrents sont très importants, partiellement remaniés par éboulisation avec une partie encore active où s'écoule le torrent (*cf.* Figure 93).

Le couplage dans les bassins de ces deux torrents est lié particulièrement à l'éboulisation, les versants étant globalement dénudés.

Les Combes de la Pierre Noire et de la Pierre Blanche sont donc des contributeurs importants localement au Vénéon.



Figure 93 : Vue des deux cônes antagonistes avec la partie active et l'éboulisation sur le cône alluvial historique (à gauche) et détail sur le cône de la combe de la Pierre Noire (à droite). On voit en rouge la ligne délimitant les éboulis de pied de versant d'origine paraglacière et en jaune le cône alluvial historique.



Figure 94 : Vallon des Étages

Le **ruisseau des Étages**, qui est un torrent important et dont la partie proximale (tête) comprend encore un appareil glaciaire en cours de déglaciation (glacier du vallon des Étages), n'est pas un contributeur sédimentaire faible du Vénéon.

En effet, il n'a pas de cône de déjection à sa partie distale qui montre une activité sédimentaire forte. De plus, sa connexion versant-lit apparaît limitée.

Ce ruisseau s'écoule dans une auge glaciaire jusqu'à un épaulement (gradin) qui le relie à la vallée du Vénéon. En pied de glacier, les écoulements proglaciaires fournissent des matériaux qui permettent ainsi le développement de zones de tressage en amont de la confluence avec le ruisseau des Mâles (sous l'aiguille de la grande Bérarde). Puis, le tracé est monochenalisé et la pente jusqu'à l'épaulement est relativement faible ce qui ne favorise pas un transit sédimentaire intense (cf. Figure 94).

Le torrent de la **Cros de l'Ours** (rive gauche) s'écoule sur les granites des Étages. Il présente un cône alluvial actif et un couplage versant-lit en partie distale suffisamment important pour que cette combe pourvoie le Vénéon en matériaux.

Il réentaille ainsi en pied de versant partiellement les matériaux des éboulis qui tapissent le versant en dessous des parois minérales vers 1 700 mètres d'altitude (*cf.* Figure 95).

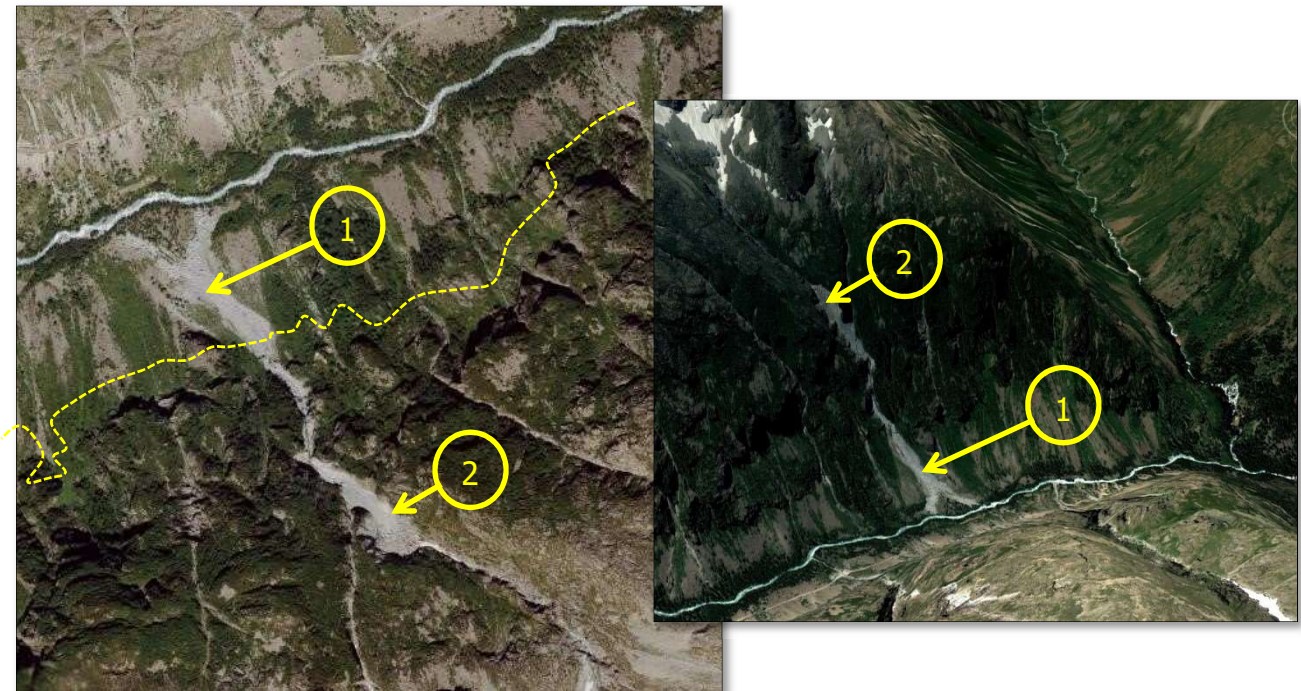


Figure 95 : Combe de la Cros de l'Ours sous deux orientations opposées. (1) Cône actif, (2) éboulisation et recharge actives en amont. La limite des placages de pied de versant est simulée en tirets jaunes.

Contributeurs sédimentaires de VEN 2

Le **Lavey** présente une vallée similaire à celle du vallon des Étages (VEN_1) : un petit glacier de tête (Entrepierrou) fortement réduit donne sur une auge glaciaire. La bande active du cours d'eau est relativement étroite et s'écoule sur des épandages fluvio-glaciaires tapissant l'auge. Le Lavey ne développe pas de tressage, ce qui ne plaide pas pour une ressource sédimentaire abondante. Le cours d'eau arrive ensuite vers le Vénéon par un épaulement en partie distale avec une cascade et un cône alluvial inexistant. On peut donc considérer qu'à l'échelle du tronçon, le Lavey un faible contributeur sédimentaire pour le Vénéon (*cf.* Figure 96).

La **Mariandre** présente sensiblement les mêmes modelés que le Lavey et le couplage versant-lit y est limité. C'est certainement là-encore un faible contributeur pour la recharge sédimentaire du Vénéon. L'épaulement entre Mariandre et Vénéon est encore plus important que celui entre le Lavey et le Vénéon (*cf.* Figure 96).

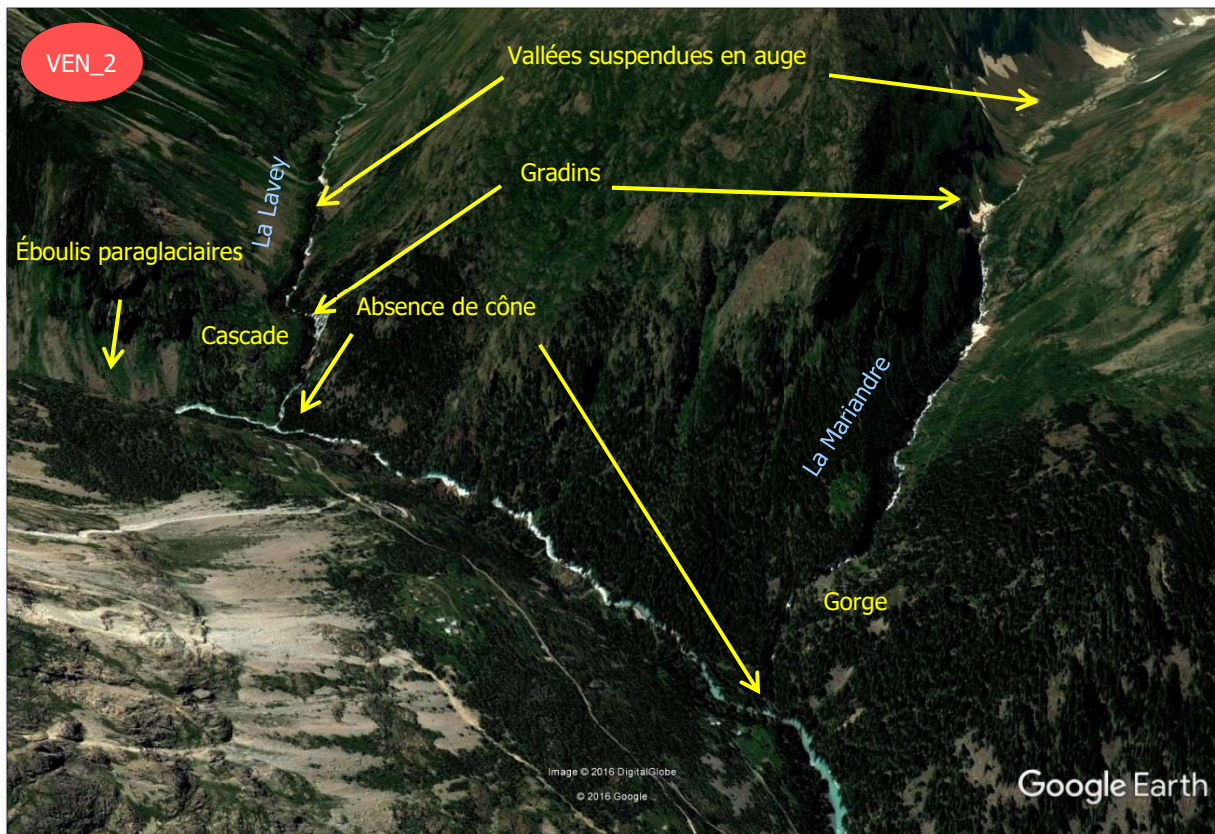


Figure 96 : Le Lavey et la Mariandre, faibles contributeurs sédimentaires du Vénéon

Contributeurs sédimentaires de VEN 3

Le **ruisseau de la Pisse (vallon de Lanchâtra)** présente le même modelé glaciaire que les principaux affluents du Vénéon : un cirque de tête vaste et multilobé avec des glaciers relictuels dans certains lobes (*e.g.* glacier du Montagnon, de la Grande Montagne...). Ce cirque se referme sur une vallée en auge qui débouche sur le cours principal par une gorge liée à la présence du gradin topographique.

Toutefois, par rapport aux autres vallées, celle-ci présente une particularité intéressante : en appui sur le gradin (épaulement), donc en tête de la gorge de raccordement, le versant de rive gauche présente une érosion généralisée (≈ 37 ha) qui est certainement productrice de matériaux lors d'événements Basse Fréquence Haute Magnitude*. Cette érosion se développe dans les marnes noires du Domérien-Toarcien.

Le ruisseau de la Pisse débouche en amont proche du tressage de Plan du Lac (en appui sur un ancien écoulement qui a rempli la vallée et créé un nouveau niveau de base). Il est donc probable que cette érosion de versant contribue à soutenir la recharge sédimentaire de ce secteur (*cf.* Figure 97).

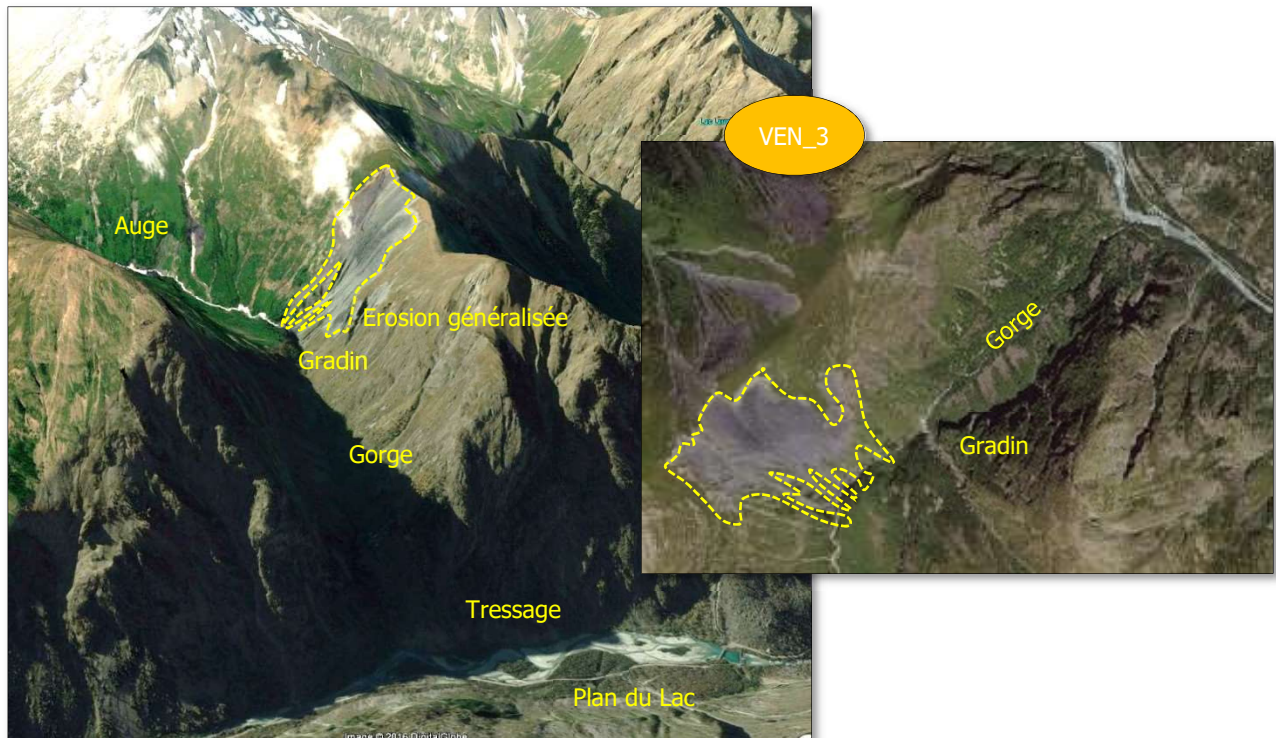
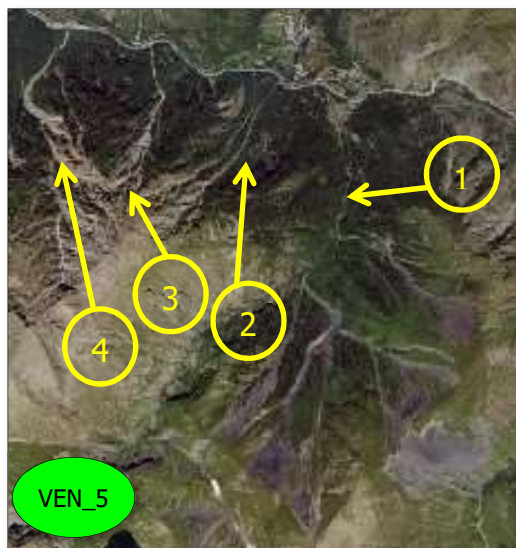


Figure 97 : Érosion de versant généralisée en amont de la gorge de la Pisse. L'orientation n'est pas la même

Contributeurs sédimentaires de VEN_4

Le tronçon VEN_4 ne présente pas de contributeurs sédimentaires.

Contributeurs sédimentaires de VEN_5



Le **ruisseau de la Pisse** (Bourg d'Arud) semble être un faible pourvoyeur (absence de cône, mauvaise connexion versant-lit...) du Vénéon dans le tronçon VEN_5. Des érosions relativement importantes sont visibles dans le bassin mais elles se développent sur des marnes du Domérien friables donc peu intéressantes en termes de recharge sédimentaire (cf. Figure 98, n° 1).

Trois petits ruisseaux apparaissent comme des contributeurs : la **Draye de Combes** (cf. Figure 98, n°2), la **Combe des Ruines** (n°3) et le couloir sans nom partant de sous l'aiguille de Vénosc (n°4). Ils drainent des zones à éboulis et fournissent certains volumes de matériaux au Vénéon. Mais compte tenu des bassins drainés et des cônes alluviaux correspondants (de faible taille et végétalisés), ce sont plutôt des contributeurs sédimentaires faibles.

Figure 98 : Petits contributeurs de VEN_5

Contributeurs sédimentaires de VEN_6

Le **ruisseau du Lauvitel** s'écoule dans une vallée glaciaire, l'auge se terminant par un lac de surcreusement (lac Lauvitel) lié à la présence d'un verrou granitique. Cette situation empêche un transit sédimentaire important piégé dans le lac d'obturation.



Figure 99 : Verrou et lac de surcreusement limitent la production sédimentaire du Lauvitel (Google Earth)



Figure 100 : Entrée de la vallée du Lauvitel vue depuis Les Ougiers

Plus en aval dans le couloir en amont de la zone du Buclet, la **Combe Blanche** semble être un contributeur intéressant comme en témoigne son petit cône de déjection. Cette combe est entaillée dans les granites et apparaît active (cône donnant dans le Vénéon et non végétalisé – cf. Figure 101). En effet, le bassin drainé montre dans sa partie haute une éboulisation importante (sous l'aiguille du midi) dans les granites qui sont pourvoyeurs de matériaux grossiers.

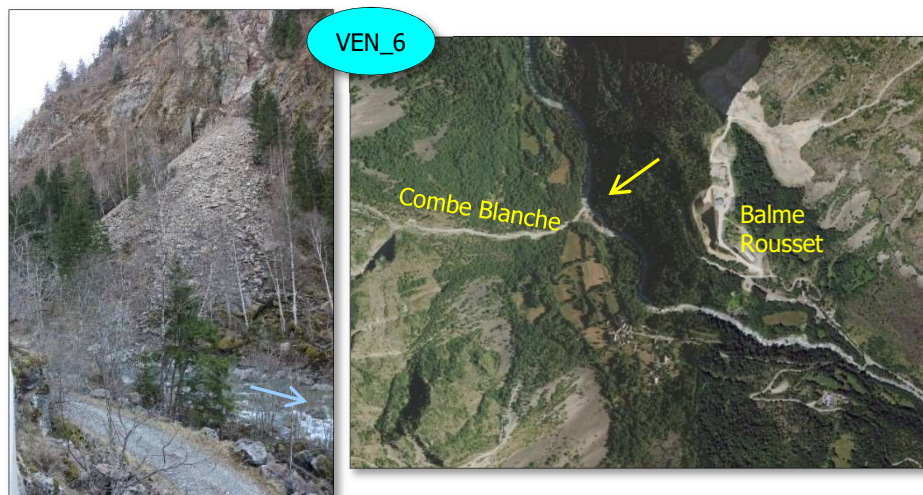


Figure 101 : Cône alluvial de la Combe Blanche (à gauche) et vue aérienne de la partie distale de la Combe Blanche (à droite) où l'on voit le cône (flèche)

Contributeurs sédimentaires de VEN 7

Le seul contributeur sédimentaire du Vénéon dans le tronçon VEN_7 (zone du Buclet) intéressant est le **ruisseau du Vallon**, qui s'écoule dans un vallon glaciaire aujourd'hui déglacé, incisé dans les granites. Ce vallon se termine par un gradin et une gorge de raccordement, puis par une bande active indiquant des apports sédimentaires importants dans la zone de tressage. Son vaste bassin dans les granites est dénudé pratiquement jusque dans sa partie distale et doit donc fournir des matériaux grossiers comme l'atteste la bande active de raccordement avec celle du tressage du Vénéon.

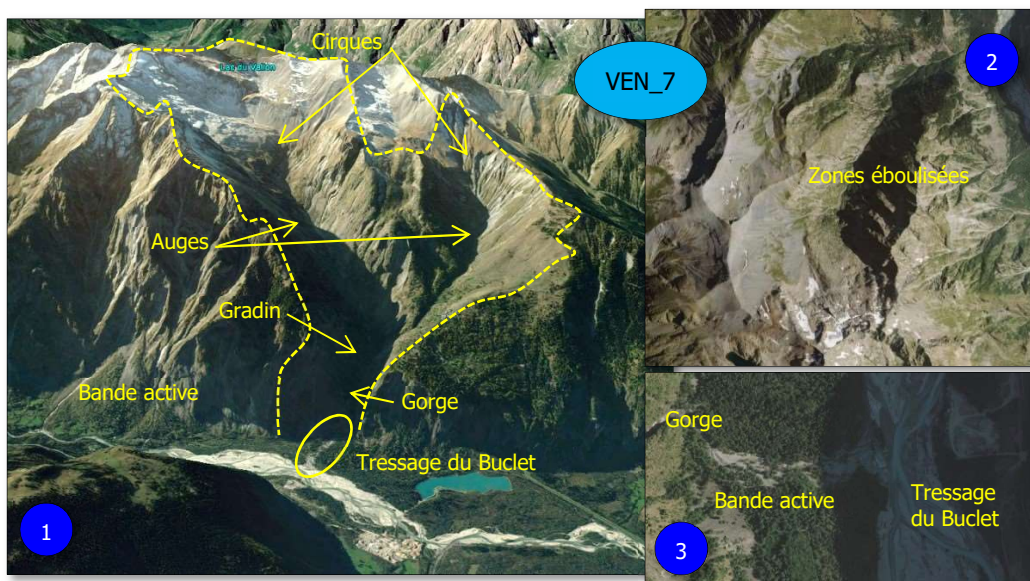


Figure 102 : (1) Vue générale du bassin avec la morphologie glaciaire héritée, (2) vue des zones éboulées en tête de bassin dans les granites, (3) vue de la partie distale avec la bande active de raccordement en sortie de gorge.

Le Tableau 33 synthétise l'ensemble des contributeurs sédimentaires du Vénéon par tronçon morphodynamique selon leur degré de contribution en termes d'apports de matériaux au stock alluvial du Vénéon.

| CONTRIBUTEURS SÉDIMENTAIRES POTENTIELS DU VÉNÉON PAR TRONÇON | | |
|--|---|-----------------------|
| Tronçon | Principaux affluents | Degré de contribution |
| VEN_1 | Torrent des Étançons | Moyen |
| | Combe de la Pierre Noire | Important |
| | Combe de la Pierre Blanche | Important |
| | Ruisseau des Étages | Faible |
| | Torrent de la Cros | Important |
| VEN_2 | Lavey | Faible |
| | Mariande | Faible |
| VEN_3 | Ruisseau de la Pisse | Moyen |
| VEN_4 | Aucun | |
| VEN_5 | Ruisseau de la Pisse | Faible |
| | Draye de Combes | Faible |
| | Combe des Ruines | Faible |
| | Couloir partant sous l'aiguille de Vénosc | Faible |
| VEN_6 | Ruisseau du Lauvitel | Faible |
| | Combe Blanche | Important |
| VEN_7 | Ruisseau du Vallon | Important |

Tableau 33 : Synthèse des contributeurs sédimentaires potentiels du Vénéon

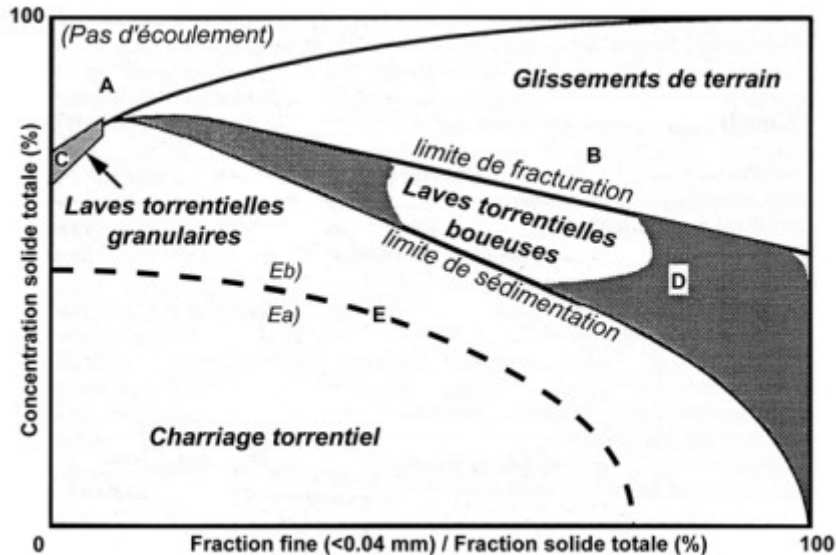
❖ Les apports sédimentaires par les laves torrentielles

Des laves torrentielles peuvent affecter certains torrents du bassin versant de la Haute Romanche, il est intéressant de savoir si les matériaux injectés par ces laves dans le bassin impactent le bilan sédimentaire en favorisant la recharge.

Les **laves torrentielles** sont des **mouvements de terrain** particuliers (glissements du type écoulement) affectant les torrents à forte pente (Rickenmann (1995) indique des pentes de 25 à 30 % minimum). En ce sens elles participent activement, dans les bassins concernés, au **couplage sédimentaire latéral** (couplage versant-lit). Leur facteur déclenchant est un forçage météorologique (forte pluviométrie).

Elles relèvent de mouvements rapides et brutaux et transportent des matériaux remaniés sous la forme de coulées (liquides à visqueuses) dans les lits des torrents. Elles constituent ainsi un processus spécifique, intermédiaire entre les crues torrentielles et les glissements de terrain. Elles se distinguent toutefois de ces processus de transport et d'érosion par des différences significatives en termes de teneur en eau, de vitesse de déplacement etc... La morphologie des dépôts post-événement est également discriminante (Remaître, 2006).

Cousot (1993) distingue les laves du charriage torrentiel et des mouvements de terrain au moyen de deux critères corrélés et discriminants : la granulométrie *versus* la concentration volumique solide totale (cf. Figure 103).



- Zone A : (pas d'écoulement) faible fraction de particules très fines et forte concentration solide totale ;
 Zone B : (glissements de terrain) grande fraction de particules très fines et forte concentration solide ;
 Zone C : (laves torrentielles granulaires) fraction de particules très fines très faible et saturation en eau ;
 Zone D : (laves torrentielles boueuses) fraction de particules très fines moyenne et concentration solide importante ;
 Zone E (charriage torrentiel) fraction de particules très fines moyenne ou faible et concentration solide faible.
 Dans la zone Ea, la concentration solide totale est trop faible pour qu'une évolution vers une lave soit possible. Le mélange conserve ses caractéristiques ou dégénère en écoulement hyperconcentré (Meunier, 1991). Dans la zone Eb, les écoulements sont suffisamment concentrés pour que l'on ait une évolution probable de l'écoulement vers une lave granulaire ou boueuse, s'il y a un apport d'énergie suffisant.

Figure 103 : Classification des écoulements naturels saturés sur forte pente en fonction de la granulométrie et de la concentration solide totale (Cousot, 1993)

Les laves torrentielles présentent un comportement fluide des matériaux les constituant et se caractérisent par :

- Un **mélange fortement concentré** (45 à 80% en volume de fraction solide dans l'écoulement, Cousot, 1996),
- La présence de **particules à granulométrie très étendue** (du micron à une taille plurimétrique, c'est-à-dire d'argiles^W à des blocs^W voire à des rochers^W (les termes présentant en exposant la lettre « W » font référence à la classification de Wentworth, 1922)). Ainsi les laves peuvent transporter de très gros grains. Les éléments les plus grossiers sont transportés en surface et les plus gros se concentrent en front de lave (ou de bouffée) et aux marges de l'écoulement (Johnson & Rodine, 1984). Le tri granulométrique n'affecte pas les laves et les dépôts se font par arrêt en masse lorsque le transport n'est plus possible.
- Des **vitesse d'écoulement** comprises entre 1 et 20 m/s,
- Des **volumes de matériaux transportés conséquents** (de quelques milliers à plusieurs centaines de milliers de m³),
- Des **distances de transport** pouvant concerner plusieurs kilomètres.

Les laves se caractérisent également par un **écoulement transitoire** fonctionnant par **bouffées successives** (Pierson, 1980). Ces bouffées sont séparées par des écoulements du type charriage hyperconcentré (au sens de Smart & Jaeggi, 1983) et peuvent être plus ou moins nombreuses.

Cet écoulement particulier va permettre le transport de blocs^W voire de rochers^W à la fois en surface et sur le front de la lave et de ses vagues successives, c'est-à-dire le front des différentes bouffées sédimentaires (Meunier, 1991).

Cet écoulement sporadique est lié à trois éléments : (1) Le gradient de vitesses au sein de l'écoulement, (2) la topographie du chenal qui influe sur la lave et (3) éventuellement une alimentation complémentaire pendant la propagation (apports supplémentaires, remaniement d'une ancienne lave), (Bardou, 2002)

Le chenal torrentiel qui constitue leur vecteur jusqu'au cône de déjection est ainsi construit et rajeuni au gré des crues et des laves torrentielles. Il est à noter qu'après une lave torrentielle survient une crue qui la lessive.

On distingue deux grands types de laves torrentielles :

- Les **laves à matrice boueuse** ou cohésive (les éléments dominants de la matrice sont les argiles^W et limons^W), présentent un **écoulement monophasique**. Elles sont caractéristiques des bassins schisteux, marneux ou argileux,
- Les **laves à matrice granulaire** (sables fins^W et au-dessus, présence de la fraction fine argiles^W et limons^W réduite) ont un **écoulement biphasique**, les deux phases étant nettement dissociées. Ces laves se développent plutôt dans les roches métamorphiques ou cristallines et sont souvent associées à des écroulements ou éboulements. Elles peuvent également être issues de la mobilisation de talus ou jupes d'éboulis.

La limite entre les laves boueuses et granulaires a été fixée par Bonnet-Staub (1998) à plus de 20 % d'argiles^W et limons^W pour les boueuses et moins de 20 % pour les granulaires.

Une lave torrentielle se développe en trois phases : (1) déclenchement, (2) propagation et (3) dépôt.

La phase de déclenchement est généralement sous l'influence de la zone-source. En effet, cette zone-source peut être unique ou multiple.

Lorsque la zone-source est unique la lave est liée à un glissement de terrain qui atteint le chenal (soit sous la forme d'une masse liquéfiée, soit en formant un embâcle qui finira par céder). Cette situation provoque généralement les laves les plus volumineuses.

La lave issue de sources multiples est généralement liée à l'érosion diffuse des versants qui se finalise en concentrant dans le chenal suffisamment de matériaux pour déclencher une lave généralement de faible volumétrie (quelques milliers de m³).

Lors de la phase de propagation la lave peut (suivant la morphologie du chenal : pente, conformation, plancher alluvial, formations superficielles) se charger en matériaux par érosion. Ainsi une lave érode des matériaux de telle sorte qu'au final son volume soit 10 à 20 fois plus important que lors de son déclenchement (Remaître, 2006).

Il est à noter que la lithologie peut sous certaines conditions constituer un facteur favorisant la génération de laves torrentielles. En effet, les roches meubles (marnes, schistes...) ou certaines formes (talus d'éboulis constitués majoritairement d'éléments fins...) favorisent les laves (D'Agostino, 1996).

D'un point de vue morphologique les laves se composent de quatre éléments (*cf.* Figure 104) :

- Le **front** présentant la granulométrie la plus grossière. Ce front s'arrête généralement sur le cône de déjection du torrent et s'y étale,
- Le **corps**, c'est la masse de la lave,
- Les **bourrelets latéraux**, constitués d'éléments grossiers de plus petite taille que ceux du front dont ils émanent. Ces bourrelets parallèles à l'axe d'écoulement apparaissent notamment lorsque l'écoulement n'est plus confiné.
- La **queue** présente une granulométrie plus fine proche de celle constatée dans les écoulements hyperconcentrés.

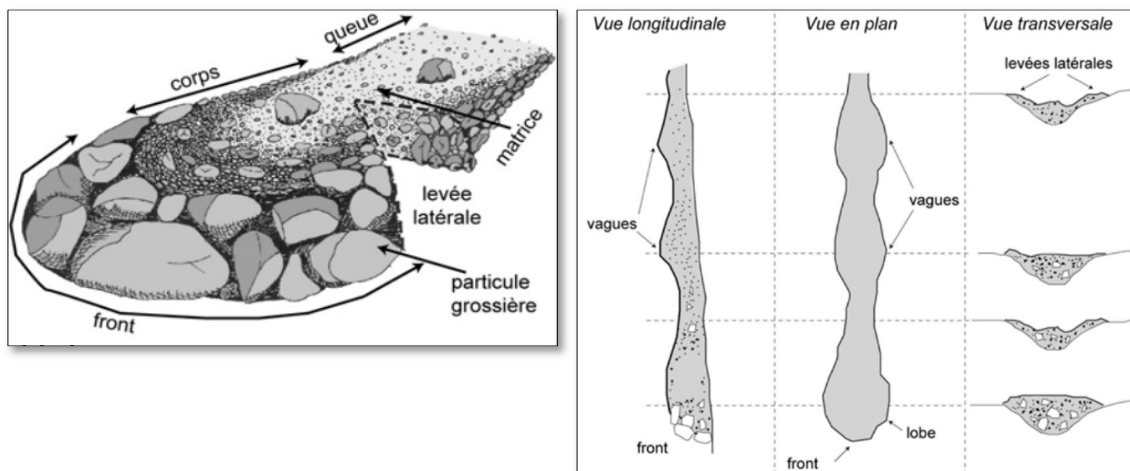


Figure 104 : à gauche, les éléments fonctionnels d'une lave torrentielle (Remaître, 2006, d'après Johnson & Rodine, 1984), à droite, profil en long, vue en plan et coupes d'une lave montrant les bouffées sédimentaires (vagues), Remaître (2006), d'après Bardou (2002).

Le problème de la fourniture sédimentaire par **connexion versant-lit** (apports externes primaires des cours principaux et apports primaires externes des affluents qui viendront ensuite recharger les cours principaux en y fournissant des apports externes secondaires) est **crucial** dans un contexte de péjoration climatique et anthropique limitant la fourniture sédimentaire.

Le couplage sédimentaire latéral entre le stock paraglacière (pourtant abondant) et le stock alluvial reste très limité du fait du système en cascades sédimentaires et du *sediment delivery problem* (Walling, 1983).

Ainsi, Otto *et al.*, (2007) considèrent que dans les bassins anciennement englacés, moins de 5 % des sédiments mobilisables depuis le DMG (Dernier Maximum Glaciaire au Würm III dans notre cas) ont été exportés *via* les cours d'eau.

Dans ce contexte ce sont essentiellement les grands **écroulements** ou **éboulements** suite au **retrait des glaciers** (décompression paraglacière) qui ont permis des couplages sédimentaires importants.

Les laves constituent des événements imprévisibles du fait même de leur genèse (*cf. supra*), mais elles peuvent participer activement à la fourniture sédimentaire en favorisant le couplage sédimentaire latéral et en fournissant des matériaux au stock alluvial en grande quantité (on peut ainsi citer comme exemple les laves de l'Armancette aux Contamines-Montjoie qui ont fourni en 2005 : 170 000 m³ ou encore en cumulé depuis 1964 environ 450 000 m³).

Les matériaux provenant des laves apportant de forts volumes restent certainement exploitables sur une durée assez longue comme apports solides internes (dans les affluents) avant d'être ensuite transférés vers les cours principal.

Compte-tenu des pentes nécessaires pour le déclenchement des laves, celle-ci n'affectent pas dans la zone d'étude les cours principaux (Romanche et Vénéon), mais plutôt certains affluents (par exemple le ruisseau du Merdaret en amont de Vénosc).

Aucune information précise ne semble disponible au sujet des événements passés, quant à la fréquence d'apparition des phénomènes et de leur intensité (volume des laves). Si le déclenchement de laves est possible sur des thalwegs latéraux du Vénéon, celles-ci sont *a priori* toujours modestes (quelques milliers de m³ mobilisés) et donc non déterminantes dans le bilan sédimentaire global du Vénéon et de la Romanche.

Les apports que les laves génèrent dans les cours d'eau principaux sont liés à plusieurs éléments :

- La **proximité** entre la source sédimentaire génératrice de la lave et le cours d'eau principal (Romanche ou Vénéon). En effet, les laves se produisent en tête de bassin dans des conditions spécifiques (versants non boisés pouvant être érodés, forte pente...), le transfert sédimentaire se fait donc sur le long terme,
- Le **passage du cône de déjection** qui constitue souvent un obstacle à la transmission des matériaux entre le torrent et le cours d'eau de rang supérieur, notamment en période de péjoration climatique qui limite les éléments BFHM,
- Et surtout les **volumes concernés** qui doivent être très importants pour être véritablement significatifs en termes de recharge sédimentaire, compte-tenu des besoins des bassins dans un contexte d'incision.

Il serait donc intéressant de suivre dans le bassin le devenir des matériaux provenant des laves torrentielles en les traçant au moyen de **traceurs RFID actifs**.

En effet, les tags actifs UHF (Ultra Haute Fréquence) qui peuvent être repérés plus facilement, notamment lorsqu'ils sont enfouis (Piégay *et al.*, 2016, Cassel *et al.*, 2017) devraient ainsi permettre de connaître les vitesses de propagation des matériaux (lors des laves et des crues torrentielles) et donc de préciser les temps de transit vers les cours principaux.

Ces tags actifs commencent ainsi à être utilisés (Ain, Rhône, Buëch, Cassel *et al.* (2017)) et les premiers retours sont très intéressants.

Cette approche améliorerait ainsi la connaissance du couplage sédimentaire latéral *via* les laves torrentielles et leur impact réel en termes de fourniture sédimentaire, élément manquant à ce jour. Elle permettrait alors de mieux considérer les bilans sédimentaires des cours d'eau du bassin en y intégrant les apports des laves.

B Les apports solides internes

L'évaluation de l'état de la recharge sédimentaire prend également en compte les apports solides internes, c'est-à-dire les matériaux qui sont « produits directement » par le cours d'eau.

Il s'agit principalement des matériaux issus de l'érosion latérale des berges ainsi que des matériaux stockés dans les structures alluvionnaires du lit mineur.

L'analyse des apports solides internes consiste donc à estimer les surfaces d'érosion et les volumes de matériaux stockés dans le lit mineur, et ce à partir des mesures réalisées lors des investigations de terrain et du Modèle Numérique de Terrain généré à partir des levés topographiques 2016 par drone.

❖ *Les surfaces d'érosion*

Les surfaces d'érosion traduisent l'activité morphogène et la mobilité latérale d'un cours d'eau. Les investigations de terrain ont permis de localiser et mesurer les surfaces d'érosion présentes sur la Romanche (Haute-Romanche inclus) et le Vénéon. La superficie érodée cumulée par tronçon est présentée au Tableau 34 et leur localisation à la Figure 106.

Globalement, les surfaces d'érosion sont peu nombreuses tant sur la Romanche que sur le Vénéon. Elles sont essentiellement localisées sur les tronçons ROM_1 et VEN_5, pour lesquels le ratio kilométrique (S/L) est de 696 m²/km et 856 m²/km, respectivement.

On remarque également que les zones en tresses présentes sur le Vénéon et la Romanche, notamment les tronçons VEN_3 (Plan du Lac), VEN_7 et ROM_3 (Buclet), présentent peu de surfaces d'érosion, ce qui corrobore le phénomène de rétraction de la bande active constatée lors de l'analyse diachronique en plan (*cf.* § 6.3A).

Ainsi, l'érosion latérale présente sur la Romanche et le Vénéon est relativement limitée et ne constitue pas une source de recharge sédimentaire importante.

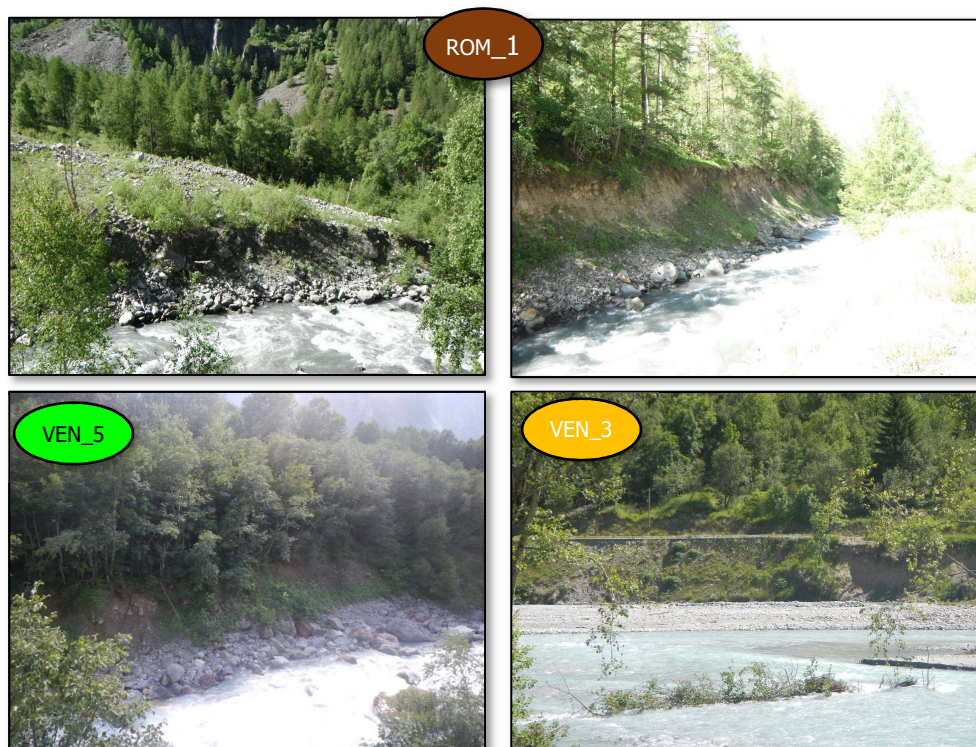


Figure 105 : Surfaces d'érosion relativement importantes sur la Romanche en aval du lieu-dit Les Fréaux (en haut) et sur le Vénéon (en bas) en amont du pont Les Ougiers (à gauche) et dans le secteur de Plan du Lac (à droite)

| SUPERFICIES ÉRODÉES DE LA ROMANCHE AMONT ET DU VÉNÉON | | | | | |
|---|---------------|-----------|----------|---------------------------|--------------------------|
| Identifiant | Longueur [km] | | Quantité | Surface [m ²] | S/L [m ² /km] |
| | Total | Parcourue | | | |
| ROM_1 | 18,5 | 17,3 | 41 | 12 880 | 696 |
| ROM_2 | 0,8 | 0,8 | 0 | 0 | 0 |
| ROM_3 | 2,0 | 1,3 | 1 | 60 | 46 |
| ROM_4 | 9,8 | 9,8 | 0 | 0 | 0 |
| VEN_1 | 6,9 | 6,9 | 10 | 1 237 | 178 |
| VEN_2 | 5,6 | 4,3 | 0 | 0 | 0 |
| VEN_3 | 2,4 | 2,4 | 7 | 1 089 | 448 |
| VEN_4 | 2,1 | 1,0 | 0 | 0 | 0 |
| VEN_5 | 3,9 | 3,9 | 7 | 3 329 | 856 |
| VEN_6 | 2,3 | 1,5 | 0 | 0 | 0 |
| VEN_7 | 2,8 | 2,8 | 0 | 0 | 0 |

Tableau 34 : Superficies érodées de la Romanche amont et du Vénéon par tronçon

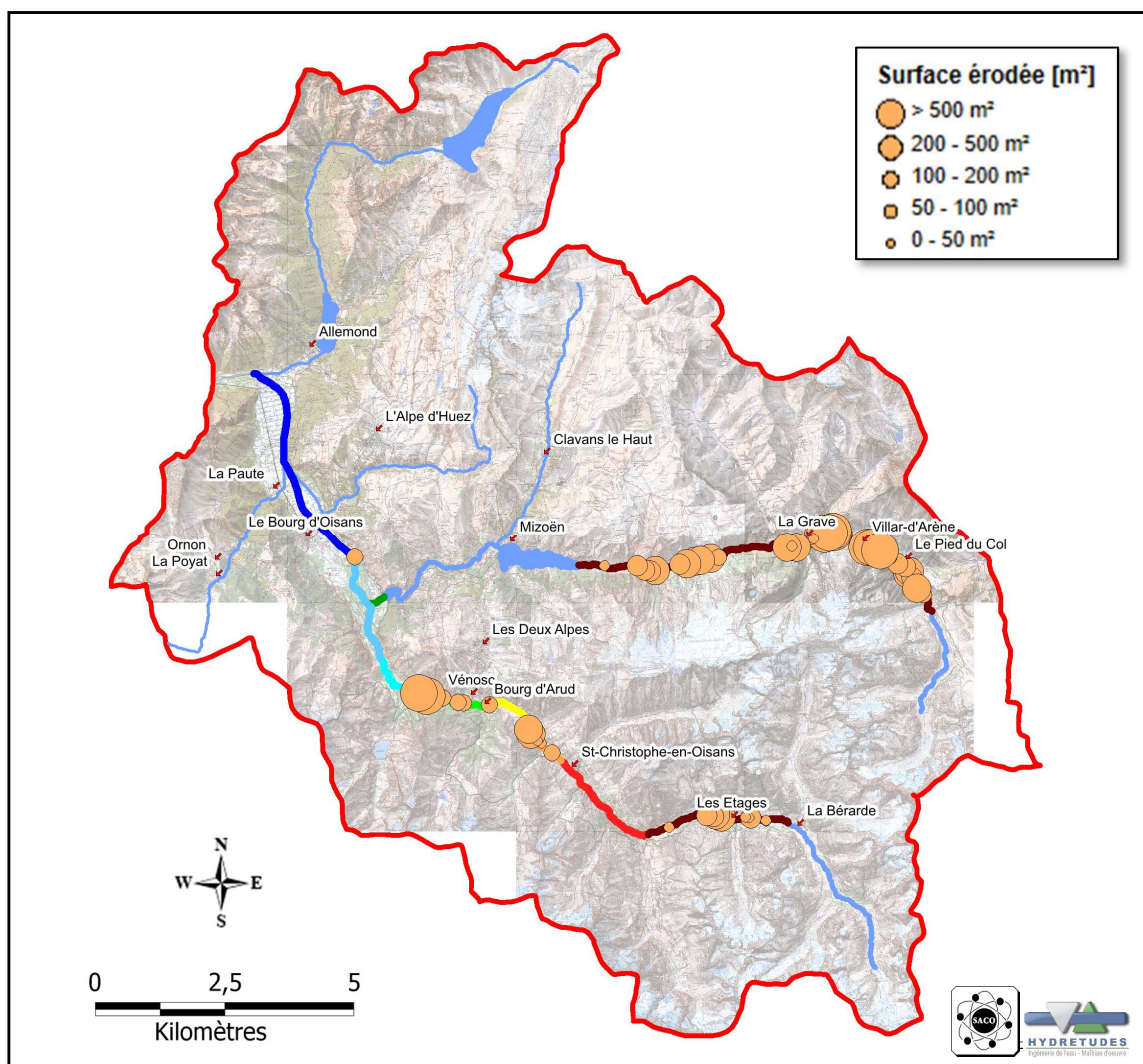


Figure 106 : Localisation des surfaces d'érosion sur la Romanche amont et le Vénéon

❖ Les structures alluvionnaires

Principes et méthodologie

Structures alluvionnaires et stock alluvial

Les **bancs ou atterrissements** correspondent à des exhaussements locaux liés à des réajustements géométriques du lit lors des crues morphogènes. Ils présentent une surface et une subsurface et sont remobilisables tant qu'ils ne sont pas végétalisés.

Les **terrasses alluviales** témoignent de la contraction de la bande active et de l'enfoncement du lit. Elles sont liées à une diminution des apports solides (Malavoi *et al.*, 2011). Elles sont principalement végétalisées, c'est-à-dire quasi fixées, quelques structures dans les zones les plus incisées sont perchées. Leur remobilisation est éventuellement possible par érosion latérale.

Les structures alluvionnaires concernent les bancs ou atterrissements de galet, ainsi que les terrasses alluviales (*cf.* Encart 17).

Elles évoluent dans le temps en fonction de leur niveau de végétalisation. Ainsi, du dépôt originel jusqu'à leur évolution en île (pour les structures centrales) ou en terrasse (pour les structures latérales), leur végétation grandit et se densifie.

Cette évolution du niveau de végétalisation limite puis rend quasiment impossible la remobilisation des matériaux déposés initialement. Suivant leur stade d'évolution, elles participent donc plus ou moins au transit sédimentaire lors des crues morphogènes, et à terme ne représentent qu'un volume dans le stock alluvial, mobilisable éventuellement sous des conditions très spécifiques (crue Basse

Encart 17 : Les structures alluvionnaires

Fréquence Haute Magnitude* de très faible occurrence).

HYDRETTUES a codifié une **typologie des stades d'évolution** des structures alluvionnaires en distinguant les structures latérales des structures centrales. Cette typologie définit des stades d'évolution allant de la naissance à la sénescence, intégrant la végétalisation et donc leur capacité de mobilisation lors des crues morphogènes (*cf.* Annexe 2).

La connaissance des structures alluvionnaires permet donc d'avoir une vision complète du stock alluvial et de sa dynamique à travers : le volume global de matériaux stockés en lit et le « volume utile » stocké en lit, c'est-à-dire le volume de matériaux potentiellement remobilisables lors d'une crue morphogène.

Ainsi, l'analyse des structures alluvionnaires de la Romanche (Haute-Romanche inclus) et du Vénéon consiste à localiser et quantifier les volumes de matériaux stockés dans le lit mineur, et identifier leur degré de mobilité. La méthodologie utilisée s'appuie sur deux méthodes, afin de disposer d'éléments précis sur chacune des structures alluvionnaires (position, surface, volume, degré de végétalisation et stade d'évolution) :

- **Pour l'ensemble des tronçons hors zone de gorges** : les volumes sont calculés à partir des mesures réalisées lors des investigations de terrain, dont le protocole consiste à mesurer la longueur, plusieurs largeurs de transect et la hauteur moyenne de la structure par rapport au fil d'eau. En complément, on détermine sur place le stade d'évolution de la structure alluvionnaire selon la typologie développée par HYDRETTUES (*cf.* Annexe 2) ;

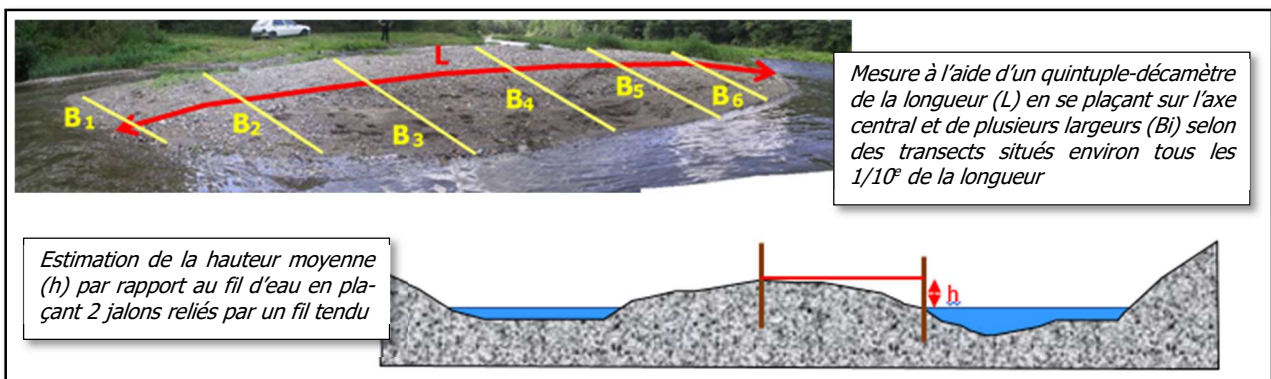


Figure 107 : Protocole de mesure des caractéristiques morphométriques des structures alluvionnaires

- **Pour la zone du Buclet-Bayette (VEN_7 et ROM_3)** : les calculs de volume reposent sur le traitement du Modèle Numérique de Terrain et de l'orthophotographie 2016 levés par drone dans le cadre de la présente étude.

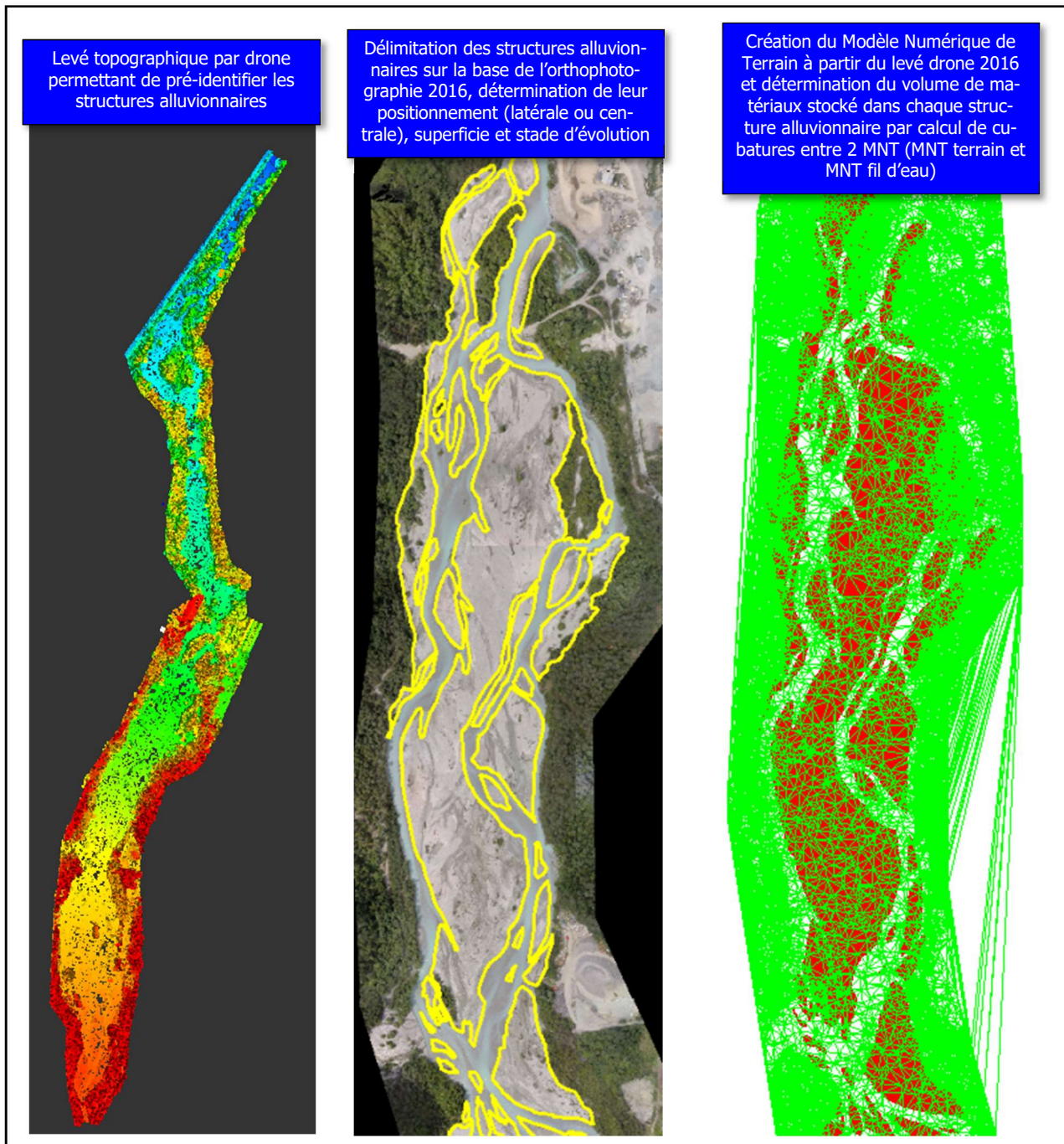


Figure 108 : Extrait de l'analyse des structures alluvionnaires de la zone du Buclet

Il convient de noter que l'ensemble de ces éléments permettra d'initier le suivi dynamique du stock alluvial proposé dans le cadre de l'élaboration du plan de gestion. En effet, les résultats (position, surface, volume...) constitueront le « **point zéro** » de ce suivi dynamique et permettront de suivre dans le temps et l'espace l'évolution des structures alluvionnaires et donc du stock alluvial.

La Figure 109 présente l'ensemble des structures alluvionnaires identifiées sur la Romanche et le Vénéon selon leur volume et leur degré de mobilité.

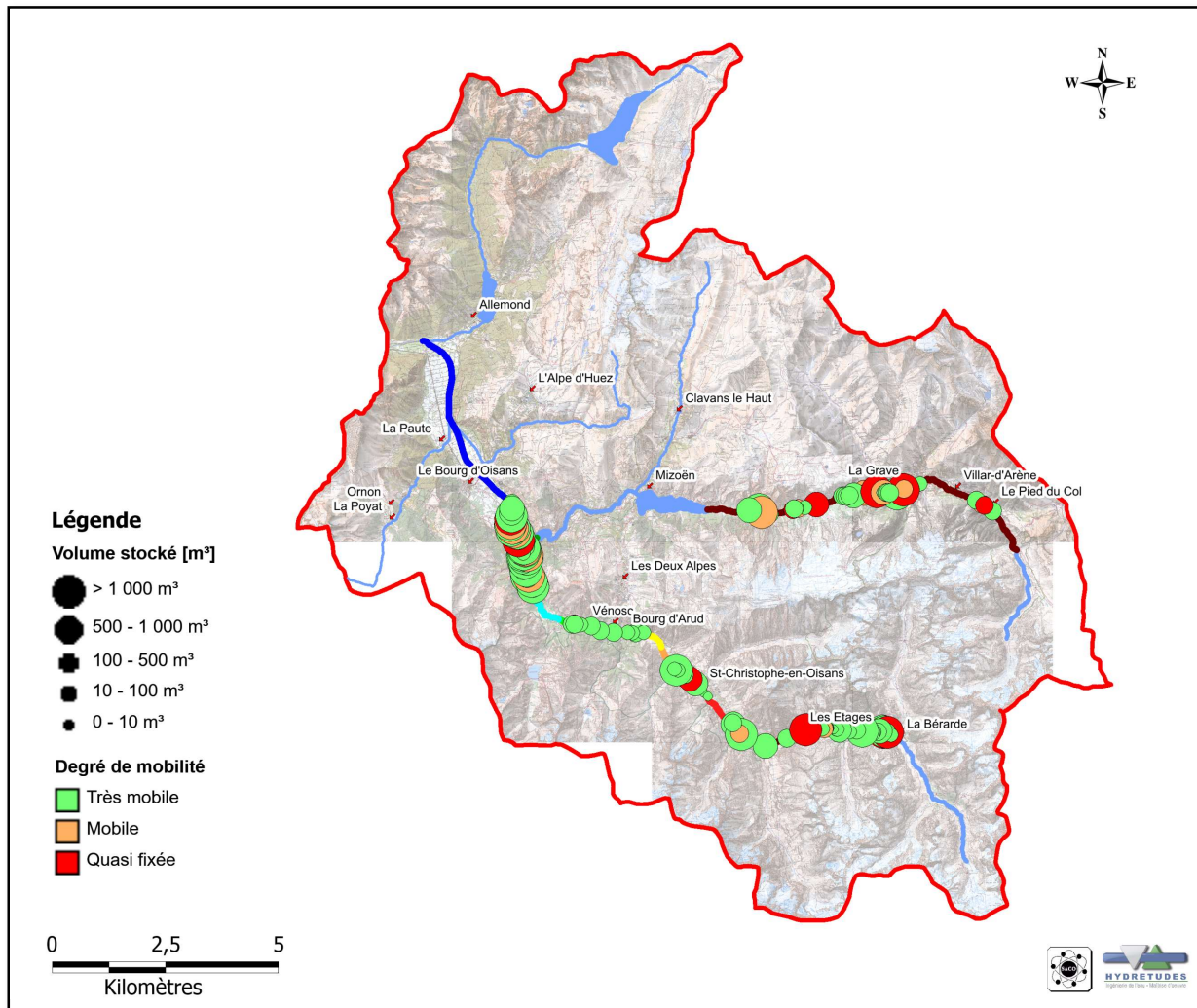


Figure 109 : Localisation des structures alluvionnaires sur la Romanche amont et le Vénéon selon le volume de matériaux stockés et leur degré de mobilité

Résultats : Les volumes stockés

L'analyse des structures alluvionnaires montre un volume de matériaux stockés dans la Romanche et le Vénéon relativement limité de l'ordre de **100 000 m³** et **210 000 m³**, respectivement (cf. Tableau 35 et Tableau 36).

On compte ainsi 117 structures alluvionnaires sur la Romanche réparties entre les tronçons ROM_1 et ROM_3, le tronçon ROM_3 présentant toutefois un volume stocké plus important de l'ordre de 70 000 m³ de matériaux, soit 75% du stock alluvial de la Romanche. Le transit des matériaux stockés dans le tronçon ROM_1 (24 000 m³) est par ailleurs perturbé, voire bloqué, par le barrage du Chambon.

Sur le Vénéon, on compte 144 structures alluvionnaires présentes majoritairement dans le tronçon VEN_7 qui stocke à lui seul 179 000 m³ de matériaux, soit 87% du stock alluvial du Vénéon.

Le ratio kilométrique (V/L) est particulièrement faible pour tous les tronçons de la Romanche et du Vénéon, à l'exception des tronçons présentant un tressage (ROM_3 et VEN_7) où il est supérieur à 35 000 m³/km.

| STOCK ALLUVIAL DE LA ROMANCHE | | | | | | |
|-------------------------------|---------------|-------------|------------|-------------------|-----|-----------------------------|
| Tronçon | Longueur [km] | | Quantité | Volume cumulé | | V/L [m ³ /km] |
| | Total | Investiguée | | [m ³] | [%] | |
| ROM_1 | 18,5 | 18,5 | 66 | 24 257 | 25% | 1 311 |
| ROM_2 | 0,8 | 0,8 | 0 | 0 | 0% | 0 |
| ROM_3 | 2,0 | 2,0 | 51 | 72 739 | 75% | 35 500 |
| ROM_4 | 9,8 | 9,8 | 0 | 0 | 0% | 0 |
| Total | 31,2 | 30,3 | 117 | 96 996 | | 3 198 |

Tableau 35 : Répartition des volumes de matériaux stockés dans la Romanche par tronçon

| STOCK ALLUVIAL DU VÉNÉON | | | | | | |
|--------------------------|---------------|-------------|------------|-------------------|-----|-----------------------------|
| Tronçon | Longueur [km] | | Quantité | Volume cumulé | | V/L [m ³ /km] |
| | Total | Investiguée | | [m ³] | [%] | |
| VEN_1 | 6,9 | 6,9 | 41 | 17 635 | 9% | 2 544 |
| VEN_2 | 5,6 | 4,3 | 11 | 4 924 | 2% | 1 144 |
| VEN_3 | 2,4 | 2,4 | 10 | 3 281 | 2% | 1 350 |
| VEN_4 | 2,1 | 1,0 | 3 | 289 | 0% | 284 |
| VEN_5 | 3,9 | 3,9 | 9 | 1 234 | 1% | 317 |
| VEN_6 | 2,3 | 1,5 | 0 | 0 | 0% | 0 |
| VEN_7 | 2,8 | 2,8 | 70 | 178 857 | 87% | 64 445 |
| Total | 25,9 | 22,9 | 144 | 206 220 | | 9 012 |

Tableau 36 : Répartition des volumes de matériaux stockés dans le Vénéon par tronçon

Le stock alluvial de la Romanche et du Vénéon est nettement réparti dans le secteur Buclet-Bayette (VEN_7 et ROM_3) qui concentre à lui seul **251 596 m³ de matériaux**, dont 178 857 m³ appartiennent au stock alluvial du Vénéon (soit 87% de son stock alluvial) et 72 739 m³ à celui de la Romanche (soit 75% de son stock alluvial).

Ce secteur est marqué par une **rupture de pente** relativement importante par rapport aux tronçons amont : la pente passe ainsi brusquement de 2,5%-4,6% (rivière torrentielle au sens de Surell, 1870) à 0,75% (cf. Figure 110), favorisant ainsi grandement l'accumulation de matériaux.

Le secteur Buclet-Bayette constitue donc naturellement une **zone de stockage-régulation du transport solide**, s'effectuant dans le Vénéon (VEN_7) sous la forme d'un **tressage** à bande active large, également présent dans la Romanche (ROM_3) sous une forme atténuée, c'est-à-dire sous la forme d'un style tressant-divagant avec une bande active beaucoup plus contrainte, du fait de la digue de la Croix du Plan et de la végétalisation.

Les structures alluvionnaires de la zone Buclet-Bayette ont donc un rôle particulièrement important dans le fonctionnement dynamique de la Romanche et du Vénéon, leur évolution pouvant impacter fortement la trajectoire géomorphologique (évolution dynamique), d'autant plus que le tressage présenterait des signes de métamorphose (rétraction de la bande active, incision... cf. § 2.7 et § 5). Cet élément sera donc à prendre en compte lors de l'élaboration du plan de gestion.

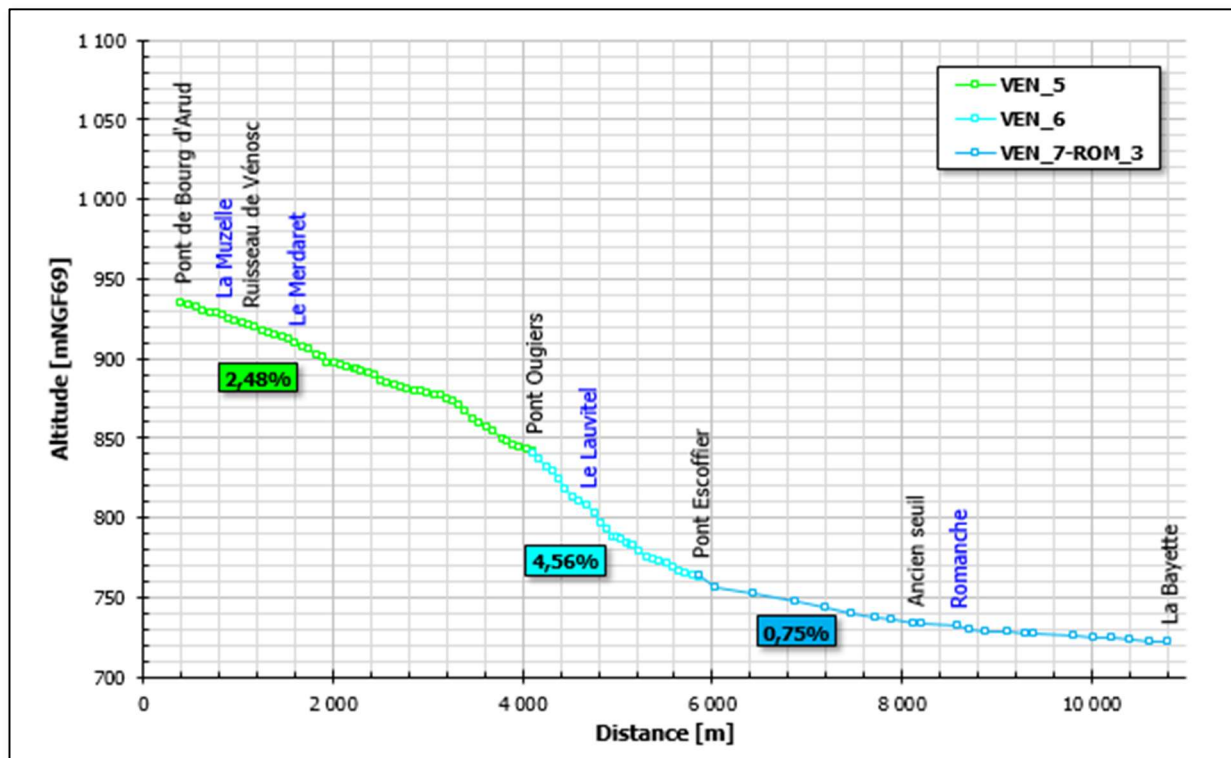


Figure 110 : Profil en long 2016 de la zone du Buclet-Bayette (VEN_7-ROM_3) et du Vénéon depuis le pont de Bourg d'Arud montrant ainsi la rupture de pente

Résultats : La mobilité des volumes stockés

Connaitre les volumes de matériaux stockés dans les structures alluvionnaires est un élément essentiel, mais n'est pas suffisant à lui seul pour appréhender la qualité du stock alluvial d'un cours d'eau. Cet élément doit ainsi être couplé à la mobilité des structures alluvionnaires représentative de l'activité sédimentaire, ce qui permettra de bâtir une stratégie de gestion des structures alluvionnaires adaptée au fonctionnement et à l'évolution dynamiques des cours d'eau.

La caractérisation des 117 structures alluvionnaires de la **Romanche** selon la typologie des stades d'évolution développée par HYDRETUDES montre une végétalisation relativement limitée, tant pour les structures centrales que latérales, et donc une **bonne capacité de remobilisation** des structures alluvionnaires. Ainsi, 38% du volume de matériaux stockés est très mobile et 39% du volume total de matériaux est mobile (cf. Tableau 37).

Concernant les 144 structures alluvionnaires présentes dans le lit mineur du **Vénéon**, 91% du stock alluvial est très mobile, témoignant d'une très faible végétalisation, et donc d'une **très bonne capacité de remobilisation** (cf. Tableau 38).

Il convient toutefois de rappeler que le niveau de végétalisation évolue avec le temps et en particulier en fonction des crues morphogènes qui rajeunissent les bandes actives. Lors des périodes inter-crues, la bande active a donc tendance à se végétaliser et à limiter la mobilité des structures.

Il est donc important que cette mobilité soit conservée pour éviter de fixer les bancs alluvionnaires, ce qui aurait une incidence forte sur la morphologie des lits et le transit sédimentaire. Il est particulièrement important d'éviter de trop fortes rétractions de bande active dans la zone de stockage-régulation que constitue les secteurs du Buclet (VEN_7) et La Bayette (ROM_3), en gérant la végétation.

| STADES D'ÉVOLUTION DES STRUCTURES ALLUVIONNAIRES ROMANCHE | | | | |
|---|-------------------|-------------------|-----|----------|
| Localisation | Stade d'évolution | Volume cumulé | | Quantité |
| | | [m ³] | [%] | |
| Structures latérales | SL1 | 9 547 | 10% | 27 |
| | SL2 | 2 464 | 3% | 9 |
| | SL3 | 4 976 | 5% | 7 |
| | SL4 | 9 631 | 10% | 10 |
| Structures centrales | SC1 | 24 847 | 26% | 45 |
| | SC2 | 400 | 0% | 6 |
| | SC3 | 33 242 | 34% | 11 |
| | SC4 | 11 888 | 12% | 2 |
| Total | | 96 996 | | 117 |

Tableau 37 : Répartition du stock alluvial de la Romanche par stade d'évolution
En vert : très mobile ; en orange : mobile et en rouge : quasi fixée

| STADES D'ÉVOLUTION DES STRUCTURES ALLUVIONNAIRES – VÉNÉON | | | | |
|---|-------------------|-------------------|-----|----------|
| Localisation | Stade d'évolution | Volume cumulé | | Quantité |
| | | [m ³] | [%] | |
| Structures latérales | SL1 | 128 189 | 62% | 49 |
| | SL2 | 8 752 | 4% | 9 |
| | SL3 | 468 | 0% | 2 |
| | SL4 | 3 877 | 2% | 3 |
| Structures centrales | SC1 | 49 582 | 24% | 66 |
| | SC2 | 1 357 | 1% | 4 |
| | SC3 | 12 838 | 6% | 10 |
| | SC4 | 1 158 | 1% | 1 |
| Total | | 206 220 | | 144 |

Tableau 38 : Répartition du stock alluvial du Vénéon par stade d'évolution
En vert : très mobile ; en orange : mobile et en rouge : quasi fixée

L'analyse du degré de mobilité du stock alluvial du Vénéon par tronçon (cf. Figure 111) montre également que pour chaque tronçon, ce sont les structures alluvionnaires très mobiles qui dominent, les structures quasi fixées étant minoritaires, voire inexistantes. Ainsi, 93% du stock alluvial du tronçon VEN_7 est très mobile et 0% est quasi fixé.

Pour la Romanche, on constate que les tronçons présentent une mobilité de leur stock alluvial plus limitée que ceux du Vénéon (cf. Figure 111). En particulier, le tronçon ROM_3 du secteur de La Bayette dont 45% de son stock alluvial est mobile, 33% très mobile et 22% quasi fixé.

Dépôt-obstruction-défluviation

Lorsque le cours d'eau ne peut plus transporter sa charge grossière (lorsqu'il y a par exemple une rupture de pente) et qu'il la dépose en lit, ou lorsque des embâcles bloquent partiellement (voire totalement) son lit, le cours d'eau va se désaxer et changer de cours en se créant un nouveau tracé par érosion pour contourner l'obstacle qu'il s'est créé.

On appelle ce changement de lit une défluviation (ou une avulsion). Il peut alors se créer un bras de décharge, voire un nouveau tracé du chenal principal.

Bien que le stock alluvial de la zone Buclet-Bayette présente globalement une bonne capacité de remobilisation (76% très mobile, 18% mobile et 6% quasi fixé), sa mobilité est réduite dans la partie aval (ROM_3) par une végétalisation relativement importante qu'il conviendra de gérer dans le cadre du plan de gestion du transport solide, afin de limiter le risque d'embâcle à l'entrée de Bourg d'Oisans caractérisée par l'entonnement de La Bayette et une rupture de pente propice au dépôt (0,15%), et éviter ainsi des débordements consécutifs et/ou des ajustements pouvant conduire à des avulsions* par dépôt-obstruction-défluviation (cf. Encart 18), ou encore des érosions importantes dans les zones à enjeux...

Encart 18 : Dépôt-obstruction-défluviation

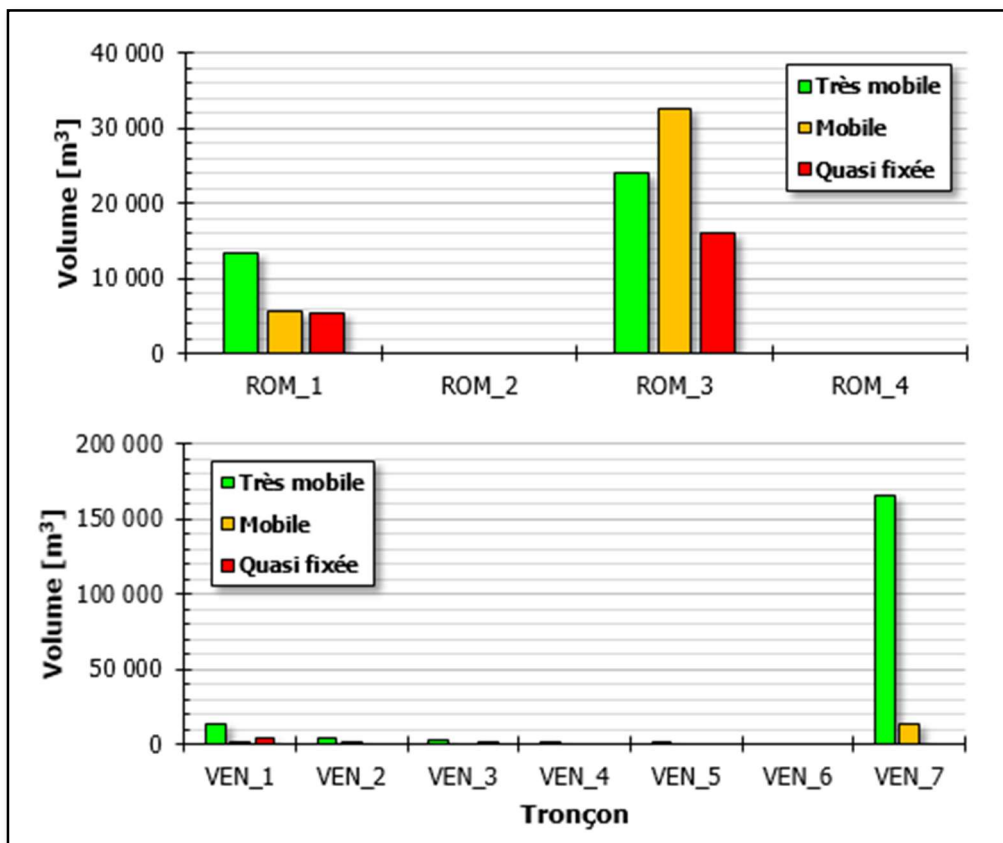


Figure 111 : Répartition du stock alluvial de la Romanche et du Vénéon par tronçon selon le degré de mobilité

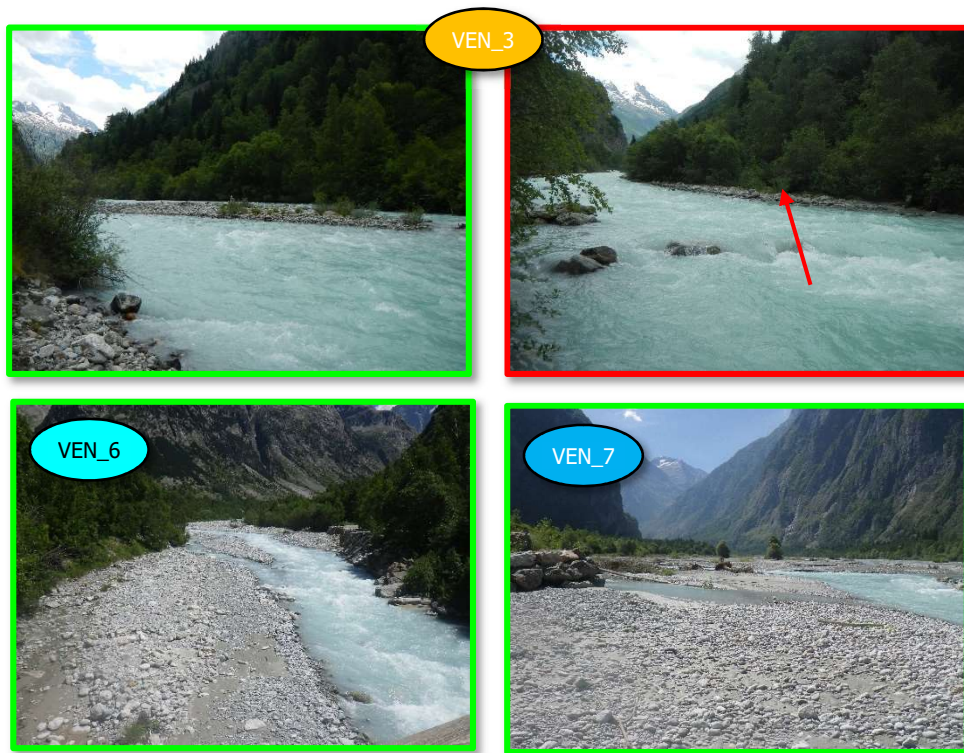


Figure 112 : Structures alluvionnaires très mobile (en vert) et quasi fixée (en rouge) présentes sur le Vénéon

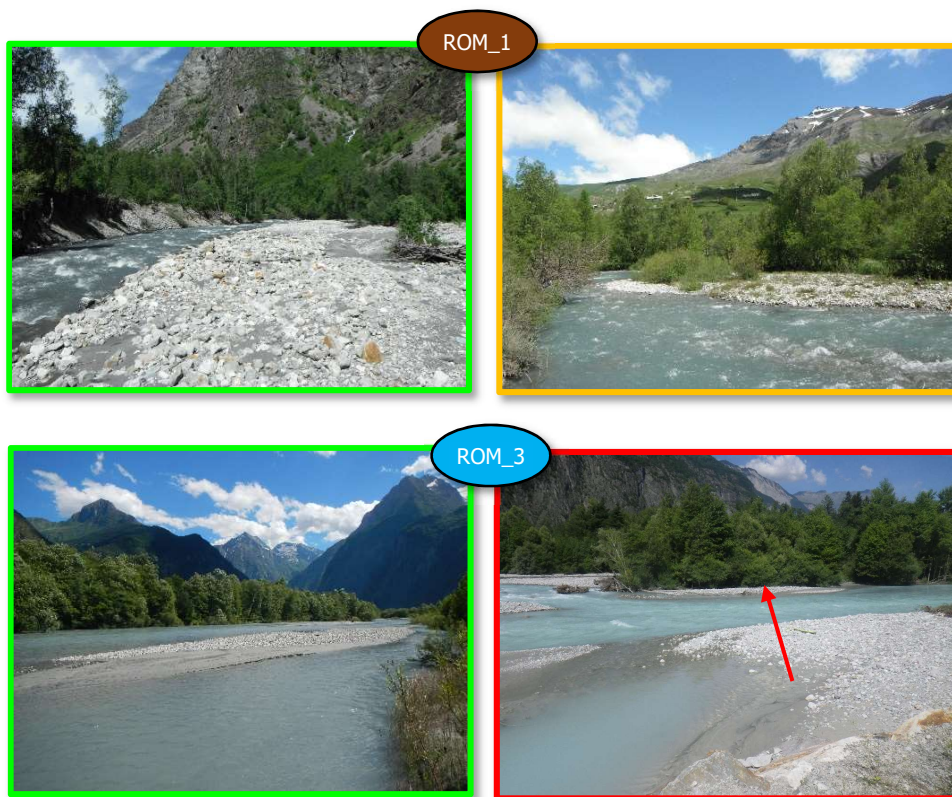


Figure 113 : Structures alluvionnaires très mobile (en vert), mobile (en orange) et quasi fixée sur la Romanche

7.2 Capacité de charriage

A Principe et méthodologie

Il s'agit ici de déterminer la capacité théorique annuelle de charriage de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans et du Vénéon, c'est-à-dire le volume maximum de matériaux potentiellement transportés par an par les cours d'eau.

Les calculs sont effectués en appliquant la formule de transport solide de **Recking (2010)** en raison de sa plage de validité étendue aux pentes (0,01%-7%) et à la granulométrie (0,5-600 mm) adaptée aux bassins versants de la Romanche et du Vénéon (à l'exception du tronçon VEN_4, pente de 14%), permettant ainsi l'utilisation d'une seule et même formule sur l'ensemble du linéaire d'étude.

Par ailleurs, cette formule permet de prendre en compte l'étendue granulométrique du substrat du lit et donc l'existence d'un transport partiel. En effet, la plupart des formules ne considèrent le transport qu'en relation avec la mobilité d'un diamètre caractéristique unique lié à une valeur unique de débit de mise en mouvement (Q_0). Autrement dit, lorsque le débit liquide est inférieur à Q_0 , le transport est nul et Q_0 est donc un seuil pour tout le mélange sédimentaire réduit à un diamètre médian unique (donc une granulométrie uniforme).

Or, sur des granulométries étendues, même les plus faibles débits peuvent être associés à un transport de sédiments. La formule de Recking (2010) intègre ce phénomène en considérant les deux phases du transport solide : (1) la mobilité partielle représentant un seuil à la fraction grossière uniquement, une partie des granulométries en présence est tout de même transportée, (2) et la mobilité totale, tous les sédiments composant le lit sont transportés.

Ainsi, la formule de Recking (2010) semble pertinente et plus adaptée à la réalité des cours d'eau présentant généralement une granulométrie étendue, comme c'est le cas sur la Romanche et le Vénéon.

Toutefois, il convient de noter que la principale difficulté réside dans les **paramètres d'entrée** nécessaires à l'application de la formule, notamment la pente, la granulométrie (d_{50} , d_{84}), la largeur active du transport solide et le débit. Les calculs sont donc menés **à l'échelle des tronçons**, pour lesquels les paramètres d'entrée sont considérés constants.

Les données d'entrée retenues et les résultats obtenus font l'objet des parties suivantes. Concernant le secteur Haute-Romanche et les principaux affluents (Ferrand, Lignarre, Sarenne et Eau d'Olle), l'analyse est extraite de la bibliographie existante.

B Les données granulométriques

Les données granulométriques sont issues des prélèvements granulométriques réalisés directement sur le substrat du lit à l'exutoire des tronçons de la Romanche et du Vénéon selon le protocole développé à HYDRETTUES disponible en [Annexe 3](#).

Le Tableau 39 présente les diamètres caractéristiques issus des analyses granulométriques et dont certains (d_{50} et d_{84}) sont nécessaires à l'application de la formule de Recking (2010). À titre de rappel, le diamètre d_i signifie que $i\%$ en masse cumulée de l'échantillon possède un diamètre inférieur à d_i .

L'évolution du diamètre caractéristique d_{50} sur le Vénéon et la Romanche (depuis le pont de Saint-Guillaume) est présentée à la Figure 114.

Globalement, on peut considérer qu'il existe un gradient granulométrique sur le Vénéon, c'est-à-dire une décroissance logique du diamètre de l'amont vers l'aval liée au transport solide. Un gradient aussi marqué semble montrer un faible impact des contributeurs sédimentaires (affluents) qui peuvent, comme sur certains cours d'eau, modifier significativement la granulométrie après la confluence par mélange.

Pour la Romanche, on constate une granulométrie plus grossière pour le tronçon amont (ROM_2) par rapport aux tronçons aval. Le tronçon ROM_2 est sous influence directe du barrage du Clapier qui retient

les matériaux. Cette différence élevée des diamètres caractéristiques montre que le substrat du lit est en train d'évoluer d'une armure* vers un pavage*, témoignant d'une incision et corroborant ainsi l'analyse diachronique en altimétrie (cf. § 0.0.0.0.).

| DIAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Tronçon | d ₃₀ | d ₅₀ | d ₈₄ | d ₉₀ | d _m ⁸ | Étendue granulométrique | |
| | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | d ₉₀ /d ₃₀ | d ₈₄ /d ₅₀ |
| ROM_2 | 108,62 | 121,61 | 132,71 | 140,42 | 115,30 | 1,29 > 1 | 1,09 > 1 |
| ROM_3 | 56,71 | 72,07 | 95,56 | 103,76 | 72,52 | 1,83 > 1 | 1,33 > 1 |
| ROM_4 | 57,99 | 75,00 | 115,13 | 119,69 | 79,42 | 2,06 > 1 | 1,54 > 1 |
| VEN_1 | 62,90 | 75,83 | 93,23 | 100,24 | 77,72 | 1,59 > 1 | 1,23 > 1 |
| VEN_2 | 52,52 | 68,97 | 92,49 | 97,16 | 69,28 | 1,85 > 1 | 1,34 > 1 |
| VEN_3 | 55,42 | 70,45 | 100,91 | 108,48 | 77,12 | 1,96 > 1 | 1,43 > 1 |
| VEN_4 | 51,49 | 67,48 | 82,55 | 86,72 | 64,85 | 1,68 > 1 | 1,22 > 1 |
| VEN_5 | 46,88 | 58,55 | 70,74 | 77,06 | 57,5 | 1,64 > 1 | 1,21 > 1 |
| VEN_6 | 51,33 | 60,59 | 73,99 | 77,37 | 60,21 | 1,51 > 1 | 1,22 > 1 |
| VEN_7 | 44,50 | 57,67 | 96,75 | 111,86 | 64,97 | 2,51 > 1 | 1,68 > 1 |

Tableau 39 : Diamètres caractéristiques de la Romanche et du Vénéon

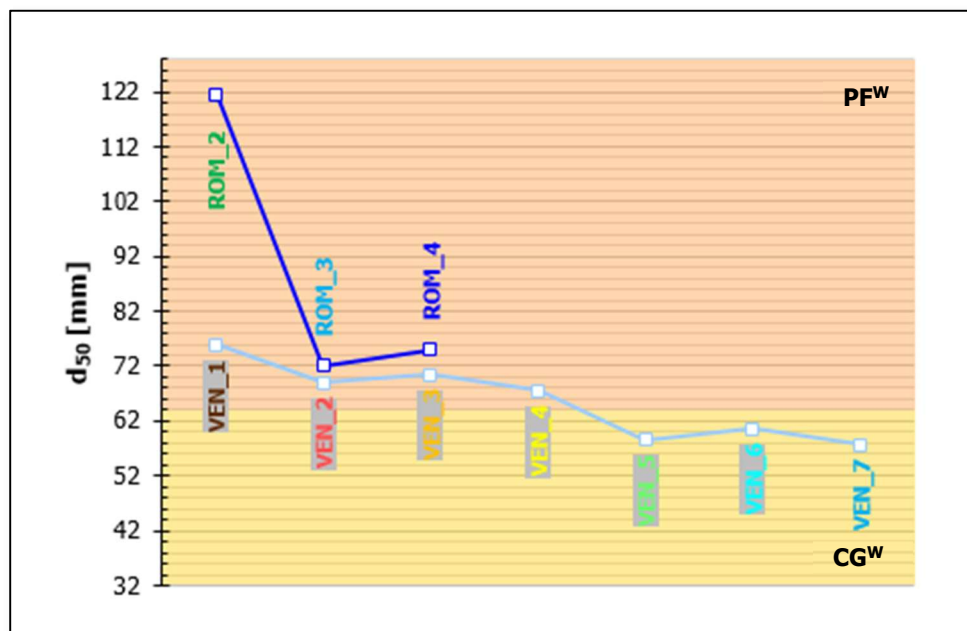


Figure 114 : Évolution du diamètre caractéristique d_{50} sur la Romanche et le Vénéon à l'exutoire de chaque tronçon selon la classification de Wentworth sandrisée (2002) (CG^W : cailloux grossiers et PFW : pierres fines)

⁸ d_m correspond au diamètre moyen arithmétique.

C Les données hydrauliques

Les données hydrauliques concernent trois paramètres :

- La **pen**te est calculée pour chaque tronçon à partir des levés topographiques 2016 réalisés par SINTEGRA en novembre 2016 dans le cadre de la présente étude, à l'exception des tronçons en gorges du Vénéon (VEN_2 et VEN_4) dont le calcul s'appuie sur les lignes topographiques de la carte IGN ;
- La **largeur** d'écoulement correspond à la largeur moyenne de la bande active de chaque tronçon déterminée à partir de l'orthophotographie aérienne, supposant que la totalité du lit participe au transport solide et ce, quel que soit le débit ;
- La **masse volumétrique des matériaux** est prise égale à 2 650 kg/m³ ce qui correspond au type de roche rechargeant les cours d'eau.

| PARAMÈTRES HYDRAULIQUES RETENUS | | | |
|---------------------------------|-----------|---------------------|---------------------------------|
| Sous bassin versant | Pente [%] | Largeur moyenne [m] | Masse vol. [kg/m ³] |
| ROM_2 | 0,67% | 20 | 2 650 |
| ROM_3 | 0,39% | 125 | 2 650 |
| ROM_4 | 0,15% | 40 | 2 650 |
| VEN_1 | 3,58% | 25 | 2 650 |
| VEN_2 | 3,32% | 25 | 2 650 |
| VEN_3 | 1,09% | 85 | 2 650 |
| VEN_4 | 14,25% | 30 | 2 650 |
| VEN_5 | 2,48% | 25 | 2 650 |
| VEN_6 | 4,56% | 25 | 2 650 |
| VEN_7 | 1,02% | 25 | 2 650 |

Tableau 40 : Paramètres d'entrée hydrauliques retenus

D Les données hydrologiques

❖ Principe et méthodologie

Les données hydrologiques utilisées sont les courbes de débits classés. Cette courbe représente le nombre de jours par an durant lesquels la valeur du débit moyen journalier a été atteinte ou dépassée, permettant ainsi d'obtenir le volume de matériaux potentiellement charriés par an.

La courbe de débits classés est déterminée pour chacun des tronçons de la Romanche et du Vénéon à partir des chroniques de débits journaliers moyens observées aux stations hydrométriques présentes sur le bassin versant, en particulier le Vénéon aux Étages, la Romanche à Champeau et l'Eau d'Olle à la Pernière dont les principales caractéristiques sont présentées au Tableau 41.

| SYNTHÈSE DES DONNÉES HYDROMÉTRIQUES EXPLOITÉES | | | | | |
|--|-------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------|--------------|
| Cours d'eau | Station | Superficie [km ²] | Période disponible | Nombre de données | Source |
| Vénéon | Les Étages | 220 | [01/03/1969 31/07/2016] | 16 979 | EDF |
| Romanche | Champeau | 1 000 | [01/01/1951 31/12/2015] | 23 688 | Banque Hydro |
| Eau d'Olle | La Pernière | 172 | [01/01/1951 31/12/2014] | 23 374 | Banque Hydro |

Tableau 41 : Synthèse des chroniques de débits journaliers moyens disponibles aux stations hydrométriques

La principale difficulté réside dans l'absence de chronique de débits à la sortie du barrage du Clapier pour la Romanche et à la sortie du barrage de Plan du Lac pour le Vénéon, rendant la répartition des débits entre la Romanche et le Vénéon difficile (tronçons ROM_2 et VEN_4 à VEN_7).

La méthodologie consiste donc dans un premier temps à reconstituer les séries manquantes de débits journaliers moyens à partir des séries mesurées aux stations, puis à calculer la courbe de débits classés.

❖ Reconstitution des séries manquantes

Le Vénéon

Jusqu'au barrage de Plan du Lac (tronçons VEN_1, VEN_2 et VEN_3), les séries de débits journaliers moyens sont reconstituées à partir des données observées à la station des Étages en appliquant la relation de Meyer (transposition de bassin versant) :

$$Q_{jm\ 1} = \frac{S_{BV\ 1}}{S_{BV\ 0}} \cdot Q_{jm\ 0}$$

Avec :

Q_{jm} – Débit journalier moyen en m³/s

S_{BV} – Superficie du bassin versant en km²

L'indice 0 se rapporte au bassin versant de référence (station Les Étages).

L'indice 1 se rapporte au bassin versant dont on recherche le débit (VEN_1, VEN_2 et VEN_3).

L'hydrologie des tronçons VEN_4, VEN_5, VEN_6 et VEN_7 est influencée par le barrage de Plan du Lac, les apports intermédiaires entre Plan du Lac et l'usine de Pont Escoffier non prélevés par EDF et les débits turbinés à Pont Escoffier. Ne disposant pas de série de débits prenant en compte ces différents éléments, les calculs sont forcément soumis à une erreur.

Toutefois, l'étude réalisée par SOGREAH en 1986 propose une relation entre les débits du Vénéon à Pont Escoffier et aux Étages : $Q_{ESCOFFIER} = 2,2 \cdot Q_{ÉTAGES}$

Faute de meilleures données, cette relation est utilisée pour reconstituer la série de débits du tronçon VEN_6 dont la limite aval est l'usine de Pont Escoffier.

Pour les tronçons VEN_4, VEN_5 et VEN_7, les séries de débits sont reconstituées à partir de celles du tronçon VEN_6 par la relation de Meyer présentée ci-dessus, l'indice 0 se rapportant au bassin versant du tronçon VEN_6 et l'indice 1 aux bassins versants des tronçons VEN_4, VEN_5 et VEN_7.

| SYNTHÈSE DE LA RECONSTITUTION DES SÉRIES DE DÉBITS AUX TRONÇONS DU VÉNÉON | | | |
|---|-----------------|-------------------------------|---|
| Cours d'eau | Nœud de calculs | Superficie [km ²] | Méthodologie |
| Vénéon | VEN_1 | 120 | $Q_{VEN_1} = \frac{S_{VEN_1}}{S_{ETAGES}} \cdot Q_{ETAGES}$ |
| | VEN_2 | 214 | $Q_{VEN_2} = \frac{S_{VEN_2}}{S_{ETAGES}} \cdot Q_{ETAGES}$ |
| | VEN_3 | 238 | $Q_{VEN_3} = \frac{S_{VEN_3}}{S_{ETAGES}} \cdot Q_{ETAGES}$ |
| | VEN_6 | 301 | $Q_{VEN_6} = 2,2 Q_{ETAGES}$ |
| | VEN_4 | 243 | $Q_{VEN_4} = \frac{S_{VEN_4}}{S_{VEN_6}} \cdot Q_{VEN_6}$ |
| | VEN_5 | 275 | $Q_{VEN_5} = \frac{S_{VEN_5}}{S_{VEN_6}} \cdot Q_{VEN_6}$ |
| | VEN_7 | 317 | $Q_{VEN_7} = \frac{S_{VEN_7}}{S_{VEN_6}} \cdot Q_{VEN_6}$ |

Tableau 42 : Synthèse de la méthodologie retenue pour reconstituer les séries de débits journaliers moyens à l'exutoire des tronçons du Vénéon

La Romanche

La station de la Romanche à Champeau demeure la station la plus fiable et la plus cohérente pour les extrapolations aux tronçons de la Romanche, à l'exception de la répartition des débits entre la Romanche et le Vénéon à la sortie du barrage du Clapier (tronçon ROM_2).

Les mesures hydrométriques de la station du Champeau prennent en compte les apports provenant de l'Eau d'Olle. Les tronçons de la Romanche étant situés en amont de l'Eau d'Olle, les débits journaliers moyens sont reconstitués au nœud de calcul « Pont Rouge » (amont immédiat de la confluence Romanche/Eau d'Olle) à partir des chroniques de débits des stations La Romanche à Champeau et l'Eau d'Olle à la Pernière selon la relation suivante : $Q_{PONT\ ROUGE} = Q_{CHAMPEAU} - Q_{PERNIERE}$

Pour les tronçons en aval du Vénéon – ROM_3 et ROM_4 – les séries de débits sont reconstituées à partir de celles du « Pont Rouge » par la relation de Meyer présentée ci-avant, l'indice 0 faisant référence au bassin versant du « Pont Rouge » et l'indice 1 aux bassins versants des tronçons ROM_3 et ROM_4.

Pour la Romanche en amont de la confluence avec le Vénéon – ROM_2 – la reconstitution de la série de débits s'appuie elle-même sur les deux reconstitutions précédentes : celle des débits de la Romanche à l'aval du Vénéon (ROM_3 à partir de « Pont Rouge ») et celle des débits du Vénéon (VEN_7 à partir

de « Pont Escoffier »). Ainsi, la série de débit pour le tronçon ROM_2 est déterminée à partir de la relation suivante : $Q_{ROM_2} = Q_{ROM_3} - Q_{VEN_7}$

| SYNTHÈSE DE LA RECONSTITUTION DES SÉRIES DE DÉBITS AUX TRONÇONS DE LA ROMANCHE | | | |
|--|-----------------|-------------------------------|---|
| Cours d'eau | Nœud de calculs | Superficie [km ²] | Méthodologie |
| Romanche | Pont Rouge | 804 | $Q_{PONT\ ROUGE} = Q_{CHAMPEAU} - Q_{PERNIERE}$ |
| | ROM_3 | 684 | $Q_{ROM_3} = \frac{S_{ROM_3}}{S_{PONT\ ROUGE}} \cdot Q_{PONT\ ROUGE}$ |
| | ROM_4 | 983 | $Q_{ROM_4} = \frac{S_{ROM_4}}{S_{PONT\ ROUGE}} \cdot Q_{PONT\ ROUGE}$ |
| | ROM_2 | 363 | $Q_{ROM_2} = Q_{ROM_3} - Q_{VEN_7}$ |

Tableau 43 : Synthèse de la méthodologie retenue pour reconstituer les séries de débits journaliers moyens à l'exutoire des tronçons de la Romanche

❖ Détermination des courbes de débits classés

La courbe de débits classés pour chacun des tronçons de la Romanche et du Vénéon est construite par analyse fréquentielle de la série de débits journaliers moyens reconstituée précédemment.

Pour chaque tronçon, les débits journaliers reconstitués sur les N jours traités sont classés par ordre décroissant et affectés d'un rang i allant de 1 à N. Pour un débit Q_i , la fréquence de dépassement (F_{q_i}) exprimée en nombre de jour par an est alors calculée par la relation suivante :

$$F_{q_i} = \frac{i}{N} \cdot 365$$

À titre informatif, les courbes de débits classés du Vénéon sont calculées sur 16 979 jours (N) et celles de la Romanche sur 15 577 jours pour ROM_2 et 23 321 jours pour ROM_3 et ROM_4.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 44 et les courbes de débits classés à l'exutoire des tronçons de la Romanche et du Vénéon à la Figure 115 et Figure 116.

| DÉBITS CLASSÉS DE LA ROMANCHE ET DU VÉNÉON À L'EXUTOIRE DES TRONÇONS | | | | | | | | | | |
|--|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| Fréquence de dépassement [jour/an] | Débit [m ³ /s] | | | | | | | | | |
| | VEN_1 | VEN_2 | VEN_3 | VEN_4 | VEN_5 | VEN_6 | VEN_7 | ROM_2 | ROM_3 | ROM_4 |
| 365 | 0,128 | 0,229 | 0,254 | 0,195 | 0,221 | 0,242 | 0,316 | 0,003 | 1,582 | 2,273 |
| 361 | 0,570 | 1,018 | 1,131 | 0,868 | 0,983 | 1,078 | 1,409 | 0,537 | 5,026 | 7,223 |
| 358 | 0,616 | 1,101 | 1,223 | 0,939 | 1,063 | 1,166 | 1,524 | 0,927 | 5,537 | 7,956 |
| 347 | 0,692 | 1,236 | 1,373 | 1,054 | 1,193 | 1,309 | 1,711 | 1,952 | 6,532 | 9,386 |
| 329 | 0,803 | 1,434 | 1,592 | 1,222 | 1,384 | 1,518 | 1,984 | 3,008 | 7,833 | 11,256 |
| 292 | 1,047 | 1,870 | 2,077 | 1,594 | 1,805 | 1,980 | 2,588 | 4,508 | 10,350 | 14,873 |
| 256 | 1,326 | 2,368 | 2,631 | 2,019 | 2,286 | 2,508 | 3,279 | 5,982 | 12,944 | 18,601 |
| 219 | 1,873 | 3,345 | 3,716 | 2,852 | 3,229 | 3,542 | 4,630 | 7,687 | 16,270 | 23,379 |
| 183 | 3,147 | 5,622 | 6,245 | 4,793 | 5,427 | 5,953 | 7,782 | 9,653 | 20,369 | 29,270 |
| 146 | 5,354 | 9,563 | 10,623 | 8,153 | 9,231 | 10,127 | 13,238 | 11,817 | 25,778 | 37,042 |
| 110 | 8,362 | 14,938 | 16,593 | 12,735 | 14,419 | 15,818 | 20,678 | 14,595 | 31,272 | 44,937 |
| 73 | 11,689 | 20,879 | 23,193 | 17,801 | 20,154 | 22,110 | 28,903 | 18,407 | 37,421 | 53,773 |
| 37 | 15,876 | 28,358 | 31,501 | 24,177 | 27,374 | 30,030 | 39,257 | 24,667 | 47,780 | 68,658 |
| 18 | 19,521 | 34,869 | 38,734 | 29,728 | 33,659 | 36,925 | 48,270 | 30,614 | 58,343 | 83,837 |
| 7 | 23,982 | 42,839 | 47,587 | 36,522 | 41,352 | 45,364 | 59,302 | 36,585 | 71,610 | 102,902 |
| 4 | 27,111 | 48,428 | 53,795 | 41,287 | 46,746 | 51,282 | 67,039 | 40,464 | 82,411 | 118,423 |
| 2 | 29,647 | 52,957 | 58,825 | 45,148 | 51,118 | 56,078 | 73,308 | 44,589 | 94,573 | 135,899 |
| 0,365 | 39,858 | 71,197 | 79,088 | 60,699 | 68,726 | 75,394 | 98,559 | 57,477 | 119,917 | 172,318 |

Tableau 44 : Débits classés aux tronçons de la Romanche et du Vénéon

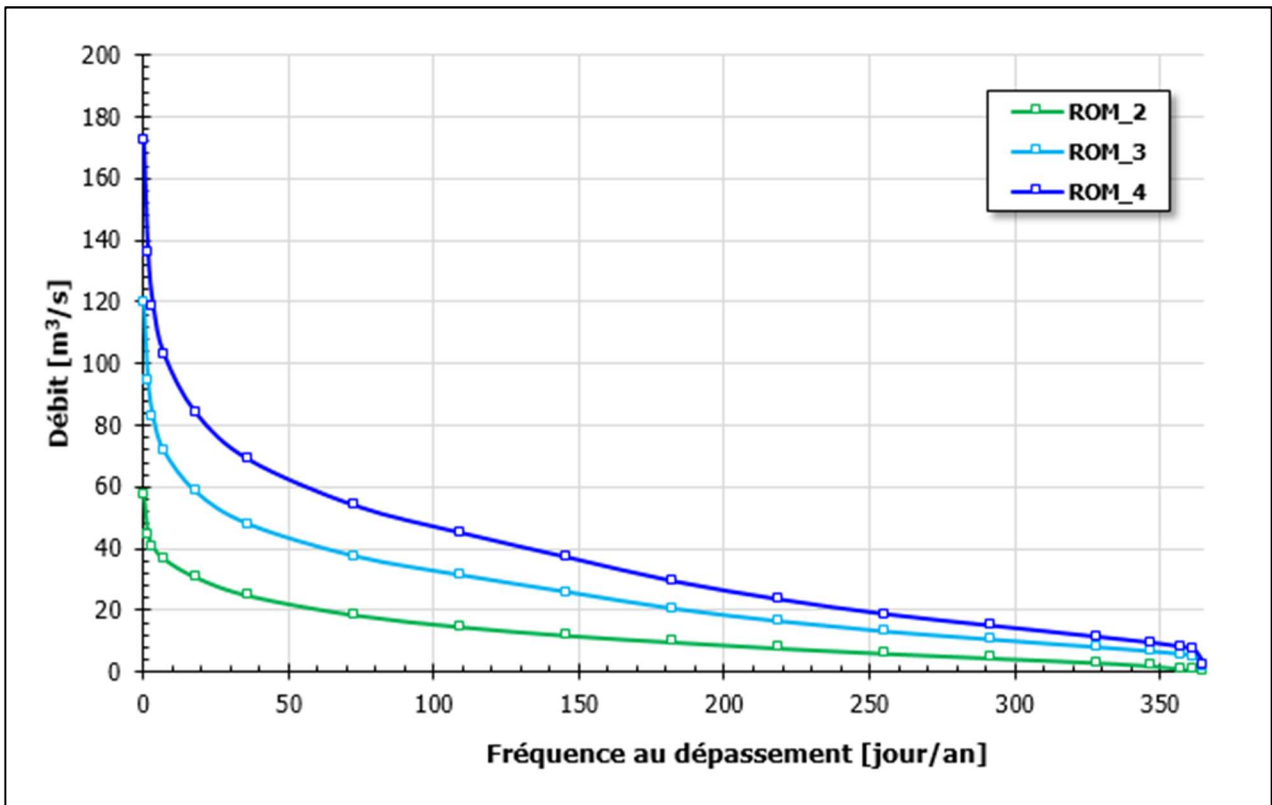


Figure 115 : Courbes de débits classés à l'exutoire des tronçons de la Romanche

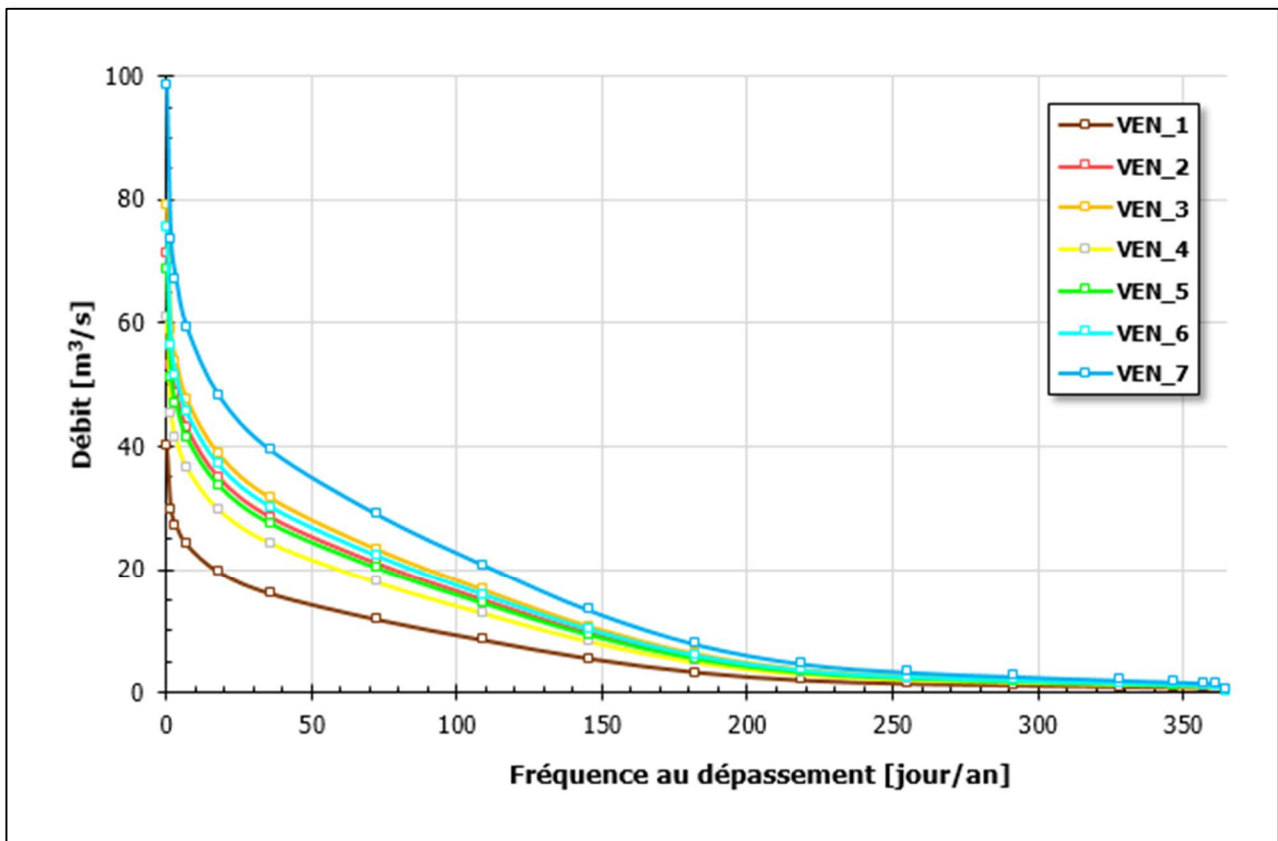


Figure 116 : Courbes de débits classés à l'exutoire des tronçons du Vénéon calculées sur 16 979 jours

E Résultats : capacité théorique annuelle de charriage

L'analyse des résultats obtenus par l'application de la formule de Recking (2010) montre que la capacité annuelle de charriage de la Romanche depuis le pont de St-Guillaume est relativement faible et diminue régulièrement du tronçon ROM_2 à ROM_4, la très faible pente (1,5‰ à 0,7‰) et sa diminution régulière d'un tronçon à l'autre favorisant le dépôt au détriment du transit sédimentaire.

Ainsi, le volume de matériaux potentiellement transportés en amont de la confluence avec le Vénéon (ROM_2) est de l'ordre de 3 840 m³/an. Dans le secteur de La Bayette (ROM_3), la Romanche présente une capacité annuelle de charriage théorique de l'ordre de 1 950 m³/an. Dans la traversée de Bourg d'Oisans depuis l'entonnement de La Bayette jusqu'à l'Eau d'Olle (ROM_4), la capacité de transport est inférieure à 1 000 m³/an.

Concernant le Vénéon, les volumes de matériaux potentiellement charriés sont plus conséquents. Les tronçons encaissés (faible largeur) et de forte pente (> 2,5‰) ont tendance à transporter un volume de matériaux important. C'est notamment le cas des tronçons monochenalisés et en gorges VEN_1, VEN_2, VEN_5 et VEN_6 qui présentent une capacité de charriage annuelle théorique supérieure à 100 000 m³/an, voire davantage. Ces résultats contrôlés par la forte pente des tronçons paraissent toutefois surestimés au vu de l'état de la recharge sédimentaire du bassin versant.

Les tronçons en tresses VEN_3 (Plan du Lac) et VEN_7 (Buclet) caractérisés par une plus faible pente (≈ 1‰) et une bande active large, présente une capacité de charriage plus faible de l'ordre de 10 000 m³/an.

| VOLUME DE MATÉRIEAUX POTENTIELLEMENT CHARRIÉS PAR AN | | | | | |
|--|-------------------------|-------------------------|--------------|----------------|--------------------------------|
| Tronçon | d ₅₀ [mm] | d ₈₄ [mm] | Pente [%] | Largeur [m] | Volume [m ³ /an] |
| ROM_2 | 121,61 | 132,71 | 0,67% | 20 | 3 839 |
| ROM_3 | 72,07 | 95,56 | 0,39% | 125 | 1 952 |
| ROM_4 | 75,00 | 115,13 | 0,15% | 40 | 965 |
| VEN_1 | 75,83 | 93,23 | 3,58% | 25 | 100 387 |
| VEN_2 | 68,97 | 92,49 | 3,32% | 25 | 257 843 |
| VEN_3 | 70,45 | 100,91 | 1,09% | 85 | 13 652 |
| VEN_5 | 58,55 | 70,74 | 2,48% | 25 | 176 953 |
| VEN_6 | 60,59 | 73,99 | 4,56% | 25 | 606 415 |
| VEN_7 | 57,67 | 96,75 | 1,02% | 195 | 12 218 |

Tableau 45 : Capacité théorique de charriage obtenue par tronçon

Il convient toutefois d'interpréter les valeurs théoriques obtenues avec circonspection, en faisant notamment le lien avec les investigations de terrain et l'approche hydromorphologique développée notamment pour caractériser l'état de la recharge sédimentaire (cf. § 7.1).

En effet, comme vu précédemment, les trajectoires géomorphologiques de la Romanche et du Vénéon sont sous influence directe de la fin de la séquence paraglaciale (cf. § 3.6), des modifications climatiques (sortie du Petit Âge Glaciaire – cf. § 6.1) et des forçages anthropiques (extractions de matériaux... – cf. § 6.2), conduisant à une baisse générale de la fourniture sédimentaire. Dans le contexte de déficit de fourniture sédimentaire que l'on connaît donc actuellement, la formule tend à **surestimer la capacité de charriage**.

De plus, quelle que soit la pertinence de la formule utilisée, la qualité des résultats reste liée à la **qualité des données d'entrée**, en particulier :

- **L'hydrologie** : les calculs s'appuient pour certains tronçons sur les courbes de débits liquides reconstituées. Il est bien évident que des débits mesurés sur la Romanche à la sortie du barrage du Clapier et sur le Vénéon à la sortie du barrage de Plan du Lac seraient moins sujet à erreurs ;
- **La largeur d'écoulement** : les calculs reposent sur la largeur moyenne de la bande active, et ce quel que soit le débit. Or, cette largeur d'écoulement peut être différente de la largeur active, c'est-à-dire la portion du lit qui participe réellement au transport solide, même si l'on considère que les deux largeurs sont similaires en crue.

Un test de sensibilité au regard de ce paramètre a été effectué pour les tronçons en tresses (VEN_3, VEN_7 et ROM_3) caractérisés par une variabilité importante de la largeur de la bande active (cf. Tableau 46). On constate que les volumes potentiellement charriés annuellement varient dans un rapport de 2,0 à 3,6, voire 4,5 pour le tronçon ROM_3 qui présente la plus forte amplitude de largeur.

Ces résultats semblent en cohérence avec la littérature scientifique. En effet, ce paramètre reste la source d'erreur la plus impactante. On estime que, dans le meilleur des cas, les valeurs seront toujours au minimum entachée d'une erreur dans un rapport de 1 à 2 (Mathys *et al.*, 2013).

| TEST DE SENSIBILITÉ | | |
|---------------------|-------------|-------------------------------------|
| Tronçon | Largeur [m] | Volume charrié [m ³ /an] |
| VEN_3 | 30 – 170 | 27 940 – 7 810 |
| VEN_7 | 120 – 280 | 18 065 – 8 940 |
| ROM_3 | 45 – 250 | 4 975 – 1 110 |

Tableau 46 : Test de sensibilité de la formule par rapport à la largeur

Ainsi, pour préciser et affermir la connaissance sur la capacité de charriage de la Romanche et du Vénéon, notamment sur la zone du Buclet, il est essentiel de coupler les approches calculatoire et hydromorphologique avec des mesures de terrain (approche métrologique). C'est l'objectif du suivi dynamique qui sera proposé dans le cadre du plan de gestion (cf. § 9).

F Bilan sur la zone du Buclet

En croisant les résultats de capacité théorique annuelle de charriage avec le stock alluvial* présent dans les tronçons, on peut réaliser un bilan, notamment sur la plaine du Buclet (VEN_7 et ROM_3).

Pour le calcul, on considère le stock alluvial très mobile ($\approx 166\,020\text{ m}^3$ pour VEN_7 et $24\,005\text{ m}^3$ pour ROM_3 – cf. § 7.1B), dans la mesure où il s'agit du volume facilement remobilisable lors d'une crue morphogène (degré de végétalisation très faible).

Par ailleurs, le calcul nécessite également de prendre en compte les apports de matériaux provenant de l'amont du bassin versant du Vénéon. Étant donné qu'il n'existe aucune mesure de transport solide sur le Vénéon et compte tenu du tarissement actuel de la fourniture sédimentaire, les calculs sont effectués selon deux *scenarii* :

- **Les apports provenant de l'amont du bassin versant du Vénéon sont nuls** : dans ce cas, le Vénéon nécessiterait de 15 ans environ pour déstocker son stock alluvial très mobile de la zone du Buclet. Ces matériaux transitant vers la Bayette (ROM_3) et s'ajoutant ainsi annuellement au stock alluvial très mobile de la Romanche, il faudrait environ un siècle à la Romanche pour déstocker les matériaux accumulés dans le secteur de La Bayette.

- **Les apports provenant de l'amont du bassin versant du Vénéon sont égaux à 5% du stock alluvial très mobile du Vénéon ($\approx 8\,300\text{ m}^3/\text{an}$)** : dans ce cas, le Vénéon nécessiterait d'environ 42 ans pour déstocker son stock alluvial très mobile de la zone du Buclet et la Romanche quasiment trois siècles pour déstocker les matériaux accumulés dans le secteur de La Bayette.

G Haute-Romanche et principaux affluents

Les capacités de charriage de la Haute-Romanche (ROM_1) et des principaux affluents (Ferrand, Lignarre, Sarenne et Eau d'Olle) sont indiquées dans le Tableau 47, et relèvent d'une analyse des données bibliographiques disponibles et exploitables sur ces cours d'eau. Ne disposant pas d'éléments bibliographiques sur le Ferrand et l'Eau d'Olle, la capacité de charriage de ces deux affluents n'est pas indiquée.

Il convient toutefois de noter que les valeurs reportées pour les autres cours d'eau résultent de l'application de différentes formules de transport solide sur des linéaires restreints des cours d'eau (Pont CD211 à la Romanche pour la Sarenne, cône de déjection de la Lignarre...), déconnectée de toute approche géomorphologique, dont les domaines d'application ne sont pas toujours respectés et dont les paramètres d'entrée ne sont pas toujours explicites.

On constate que la Haute-Romanche n'est pas le lieu d'un transport solide grossier intense ($15\,000\text{ m}^3/\text{an}$). Elle se démarque en cela du Vénéon (Sogreah, 2009).

En tête de bassin versant, la Lignarre et la Sarenne sont des cours d'eau torrentiels à forte pente et à forte capacité de transport solide (BURGEAP, 2016). Dans la partie aval de leur bassin versant en amont proche de la confluence avec la Romanche, la Lignarre et la Sarenne présentent une capacité annuelle de charriage modérée, voire faible pour la Sarenne, de l'ordre de $1\,000\text{ m}^3/\text{an}$ et dont la majorité des matériaux sont piégés dans les plages de dépôts aménagées.

| CAPACITÉS DE CHARRIAGE DE LA HAUTE-ROMANCHE ET DES AFFLUENTS | | | | |
|--|---|--|------------------|-----------------------------------|
| Cours d'eau | Source | Secteur concerné | Formule utilisée | Volume [m^3/an] |
| Haute-Romanche (ROM_1) | Sogreah, 2009 | Amont du Chambon | Lefort 2005 | 15 000 |
| Ferrand | Bibliographie inexistante sur ce type d'analyse | | | |
| Lignarre | BURGEAP, 2016 | Cône de déjection | Lefort 2007 | 500 à 1 500 |
| Sarenne | SOGREAH, 2006 | Pont CD211 → Romanche | Meyer-Peter | NC « capacité forte » |
| | HYDRETTUDES, 2012 | Confluence Romanche | | < 1 000 |
| | BURGEAP, 2016 | Au niveau de la cascade Confluence Romanche | Lefort 2007 | 600 à 900 400 à 700 |
| Eau d'Olle | Bibliographie inexistante sur ce type d'analyse | | | |

Tableau 47 : Capacité de charriage de la Haute-Romanche et des affluents issus de la bibliographie existante sur ces secteurs

H Complément : le transport par suspension

❖ Eléments généraux sur les MES

Les sédiments fins (fines, farines ...) font partie intégrante du transport solide. Ils transitent dans les cours d'eau en occupant la colonne d'eau, contrairement aux éléments grossiers qui avancent en lit par charriage de fond (par glissement, roulement, ou saltation).

La limite charriage-suspension habituellement retenue est de 8 mm (Kellerhals & Bray, 1971 ; Moss, 1972 ; Middleton, 1978 ; Bray & Church, 1980 ; Brierley & Hickin, 1985, Rice, 1995 ; Kondolf, 1997...).

En fait la limite entre suspension et charriage est graduelle. Ainsi entre 2 et 8 mm on considère qu'il n'y a pas de mode de transport dominant.

Le transport en suspension d'après Couvert *et al.*, (1999) n'a pas d'influence directe sur l'équilibre ou la morphologie des lits fluviaux. Mano (2008) précise que le volume de matériaux en suspension exportés est conséquents mais interagit peu avec le lit et n'impacte pas sa morphologie. Il précise ainsi que l'intérêt de l'étude des flux de MES est important en termes de qualité de l'eau, de transfert de polluants ou de comblement de retenues.

Au niveau du transport solide les matériaux en suspension ont une influence sur le volume transporté mais leur impact morphologique est très limité. C'est donc le processus de charriage, et les matériaux grossiers qu'il fait transiter, qui contribue à construire les lits fluviaux.

Cela se traduit directement sur le substrat constitutif des lits et des structures alluvionnaires, dans les rivières à blocs et à graviers (comme la Romanche ou le Vénéon).

Le substrat d'un lit est ainsi composé d'une couche superficielle poreuse de matériaux grossiers (> 8 mm) dit « substrat grossier » recouvrant une couche interne au lit constituée de matériaux plus fins dit « substrat fin » (*cf.* : Figure 117).



Figure 117 : à gauche → substrat grossier vs. substrat fin (Gayraud *et al.*, 2002) ; à droite → coupe de l'armure d'une structure alluvionnaire.

Les pores (espaces interstitielles) permettent la circulation de l'eau superficielle vers les eaux souterraines rechargeant la nappe d'accompagnement, voire des nappes plus profondes.

Ils déterminent également l'*Hyporheos*, épaisseur du lit dans laquelle circule suffisamment d'eau superficielle chargée en dioxygène pour permettre la vie interstitielle.

Adams (1979) précise que les éléments de taille inférieure à 8 mm se fixent en lit en récession de crue et peuvent ainsi pénétrer plus ou moins profondément les pores du substrat.

Les matières en suspension peuvent avoir ainsi deux effets sur les substrats grossiers de lits fluviaux en **colmatant** ou en **cimentant** l'armure.

Le **colmatage** est dû à l'infiltration de matériaux fins dans les pores du substrat du lit. Les matériaux peuvent s'infiltrer plus ou moins profondément entre les matériaux constitutifs du substrat du lit. Cette infiltration remplit les espaces interstitiels et altère le fonctionnement du substrat (Gayraud *et al.*, 2002).

Ainsi, le colmatage impacte principalement :

- Les **habitats des poissons** (Bjornn *et al.*, 1977 ; Alexandre & Hansen, 1986) et en particulier les habitats de reproduction des espèces lithophiles (pondeurs sous gravier utilisant des frayères), et de fait le recrutement, en diminuant les taux de survie des œufs (Chapman, 1988).
- Les **habitats de reproduction et d'alimentation des macroinvertébrés** (Hynes, 1970 ; Minshall, 1984) comme leur répartition (Cummins & Lauff, 1969) et la structure de population (Richards, Host & Arthur, 1994).
- Les **biofilms épilithiques** enchâssés dans une matrice (ou mucus) d'exopolymères (Lock *et al.*, 1984 ; Costerton, 2000) et adhérent à la surface du substrat grossier), diminuant ainsi le fonctionnement biogéochimique des cours d'eau (Push *et al.*, 1998 ; Battin *et al.*, 2003).
- La **circulation hyporhéique** (l'*Hyporhéos* est l'épaisseur de substrat dans lequel circule de l'eau et du dioxygène) ce qui va limiter les échanges avec la nappe ou la capacité auto-épuration du cours d'eau (Vervier *et al.*, 1992 ; Datry *et al.*, 2008).
- La **faune hyporhéique** que l'on peut rencontrer jusqu'à 30 cm de profondeur dans l'*Hyporhéos* (Gayraud *et al.*, 2002).

Les processus d'érosion en limitant fortement la mobilisation des alluvions en période de crue.

Le tableau ci-dessous résume suivant la taille des particules de colmatage l'impact principal qu'elles génèrent (Gayraud *et al.*, 2002) :

| TAILLE DES PARTICULES DE COMATAGE ET TYPE D'IMPACT | | | | | |
|--|--------------------------|--------|---------|--------------|------------------|
| Taille des grains | Classes Wentworth (1922) | | | | Impact |
| | Argiles | Limons | Sables | | |
| | | | S. fins | S. grossiers | |
| $\phi < 2 \text{ mm}$ | | | | | <i>Benthos</i> |
| $\phi < 0,8 \text{ mm}$ | | | | | Frayeres |
| $\phi < 0,0625 \text{ mm}$ | | | | | <i>Hyporhéos</i> |

Tableau 48 : taille des particules de colmatage et impact associé

La **cimentation** est un processus de colmatage avec liaison des grains précipités qui forme ainsi une sorte de ciment sur le substrat et dans les espaces interstitiels. La cimentation renforce voire étanchéfie la matrice de colmatage. Cet type de colmatage avec cimentation est très mal documenté et semble avoir fait l'objet de peu d'études.

La cimentation constitue un niveau de perturbation du fonctionnement du substrat (en termes d'échanges courts d'eau-nappes, de support de vie pour la faune aquatique, d'intérêt pour les réseaux trophiques...) encore plus important que le colmatage du lit.

| Code | Classes de Colmatage | Représentation du degré de colmatage (lorsque l'on soulève un élément du fond) |
|------|----------------------|---|
| 1 |] 0 - 25%] | <p>Les éléments sont posés. On peut observer soit un dépôt fin de limons peu colmatant (cas de gauche) soit aucun dépôt (cas de droite)</p> |
| 2 |] 25 - 50%] | <p>Les éléments sont collés par une sous-couche de limon (avec ou sans limon en dépôt). Le nuage de limon qui se soulève est peu dense.</p> |
| 3 |] 50 - 75%] | <p>Les éléments sont légèrement enchâssés et provoquent un nuage de limon assez épais lorsqu'ils se désolidarisent de la sous-couche.</p> |
| 4 |] 75 - 90%] | <p>Les éléments sont très enchâssés et provoquent un nuage épais de limons (accentué ou non par un dépôt de limons)</p> |
| 5 |] 90 - 100%] | <p>Les éléments sont recouverts de limons et provoquent un nuage très épais (cas de gauche) ou bien sont entièrement cimentés dans la sous-couche et impossibles à soulever (cas de droite)</p> |

Figure 118 : représentation imagée du test développé par Archambaud *et al.*, (2005).

En effet, ce processus de cimentation va non seulement rendre abiotique le substrat du lit (plus d'échanges, plus d'épaisseur hyporhéique, plus de possibilité de frai...) mais va quasiment empêcher toute remobilisation du substrat lors des phases morphogènes en constituant une sorte de dallage qu'il faudra rompre avant toute possibilité de remobilisation.

Lors de la phase de terrain nous avons examiné la présence éventuelle de processus de colmatage (important, c'est-à-dire visible) ou de cimentation sur les structures alluvionnaires lors de la phase terrain.

En cas de doute nous avons un protocole particulier pour évaluer le colmatage voire la sédimentation.

En effet, nous utilisons le protocole mise en place par Archambaud *et al.*, (2005) qui est simple et efficace (*cf.* Figure 118). Le test visuel développé par ces auteurs consiste donc à soulever un élément du substrat dominant. On estime alors le degré de facilité d'extraction et la densité à l'œil du nuage de MES éventuellement soulevé. Ce test permet de classer le substrat testé en cinq classes.

En complément nous avons également développé notre

test de cohésion du substrat d'un lit fluvial.

Nous avons ainsi développé une échelle de 0 à 5, qui est synthétisée dans le tableau ci-dessous :

| Echelle de cohésion du substrat d'un lit (Test Hydrétudes) | | | | |
|--|-----------------|---|---|---|
| Cohésion du substrat | Meuble | Ferme | Dur | Cimenté |
| Texture au toucher | Aucune cohésion | Ferme au toucher, mais assez facilement déstructuré à la main | Dur au toucher et difficilement déstructuré | Compact et très dur, très difficilement déstructuré à la main |
| Indice de cohésion | 0 | 1 | 3 | 5 |

Tableau 49 : Echelle de cohésion du substrat des lits fluviaux

Nous évaluons ainsi « à la main », en déstructurant l'armure, la cohésion des grains constitutifs du lit.

Il est à noter que la cohésion 0, correspond à des fonds de lit sans pavage (sablonneux). Les cohésions 1 à 5 correspondent à des lits présentant une armure, dont l'épaisseur est de la taille de l'ordre du diamètre des plus gros éléments (Simon, 1986).

En particulier ces éléments sont systématiquement évalués lorsque nous effectuons les granulométries.

Lors des investigations de terrain nous n'avons pas constaté de zones où le substrat apparaissait fortement colmaté ou cimenté lors de nos investigations sur la Romanche et le Vénéon.

❖ *La thèse de Vincent Mano (2008) une première approche des MES*

Les seules données disponibles dans la bibliographie concernent la thèse de Mano (2008). Dans cette thèse qui concerne plusieurs bassins-versant (Asse, Bléone, Romanche, Ferrand, Isère), l'auteur a essayé de reconstituer, par modélisation, les flux de MES à partir des conditions hydroclimatiques de la période étudiée (Ferrand du 27/04/2002 au 13/10/2004 et Romanche du 3/06/2002 au 17/12/2003).

Le travail sur la Romanche a concerné le bassin du Ferrand (82 km²) et une partie du bassin de la Romanche (230 km²) qui correspond à la haute Romanche en amont du barrage du Chambon. **Mano (2008) précise que les deux bassins sont les sources d'approvisionnement principales du Chambon, alors que seule la haute Romanche se situe en amont du Chambon.** Le Ferrand se jette dans la Romanche en amont des gorges de l'Infernet et les MES qu'il produit aboutissent dans la retenue du Clapier.

Le Ferrand aurait 85% de son bassin composé de roches sensibles à l'érosion (10% de marnes du Toarcien, très favorables à la production de MES et 75 % de roches schisteuses et carbonatées (conglomérats, grès et schistes du Carbonifère sup., Schistes roux et blancs, calcaires roux du Domérien, Schistes tendres de l'Aalénien, Schistes marneux, marnes et calcaires sableux du Dogger...).

La Romanche présente des roches érosives concentrées principalement en rive droite (schistes et dolomies du Keuper, calcaires du Lias inf., schistes et calcaires du Domérien, Schistes noirs du Domérien-Toarcien, schistes aaléniens et calcaires sableux du Dogger) ainsi que des roches métamorphiques de la zone dauphinoise plus résistantes (granites, amphibolites, granites migmatitiques, gneiss...) qui sont plutôt positionnées en rive gauche.

Comme nous sommes sur les parties supérieures des bassins, domaine d'altitude systématiquement supérieure à 1000 m et à forte pente, la faiblesse de de la forêt (< 5% ce qui laisse au prime abord à penser que les versants seraient érodables) est compensée par notamment la présence de la neige 6-7 mois dans l'année qui limite ainsi l'érosion.

La modélisation des flux de MES a été effectuée par Mano (2008) en deux étapes : une **modélisation hydrologique** préalable puis la **modélisation des flux de MES**. La modélisation hydrologique est basée sur le modèle MORDOR. A partir des données de précipitation et de température, elle permet de fournir au modèle de transport solide les données de **débit**, de **ruissellement de surface** et de **fusion nivale**. A partir de ces données modélisées, des **précipitations** et des **températures**, le modèle de transport solide peut alors simuler les flux de MES sur le bassin versant (cf. Figure 124).

L'origine des données hydrologiques utilisées dans le cadre de la modélisation des flux de MES est présentée dans le tableau suivant :

| Données utilisées pour modéliser les flux de MES (Mano, 2008) | | | |
|---|---------|--------------------|---|
| Données | Sources | | Observations |
| | Ferrand | Haute Romanche | |
| Pluies (stations) | Besse | La Grave et Arsine | - |
| Débits | Capteur | Courbe de tarage | Pas de recul historique sur la station du Ferrand, mise en place en 2002 pour l'étude. Reconstitution des débits journaliers par calage statistique sur les débits classés de la Romanche et du Ferrand (2002-2004, R ² = 0,93) + modélisation hydrologique (modèle MORDOR). |

Tableau 50 : pluies et débits utilisés pour modéliser les MES (Mano, 2008)

Mano (2008) présente le contexte hydroclimatique des années étudiées (2002-2004) et montre que :

- 2002 est une année à précipitations fortes, mais à débits moyens annuels très légèrement inférieurs à la moyenne (hivers à neige limitée avec fusion nivale limitée, péjorant les débits),
- 2003 se situe (précipitations et débits) autour de la moyenne,
- 2004 a eu des précipitations faibles, générant des débits particulièrement faibles.

⇒ La mesure de la concentration en MES

Deux stations de mesure des MES ont été mises en place (une sur le Ferrand en amont de la confluence avec la Romanche et une sur la Romanche en amont du Chambon).

Les stations de mesure ont été équipées de turbidimètres et de préleveurs.

Ainsi on installe dans la colonne d'eau la sonde de turbidité et la crépine d'aspiration du préleveur en veillant à ne pas interférer les deux dispositifs.

Le préleveur est asservi au turbidimètre de la façon suivante :

- Lorsque le turbidimètre mesure des concentrations < 3 g/l un prélèvement journalier est réalisé à 10 h (TU),
- Lorsque les concentrations mesurées sont ≥ 3 g/l le pas de temps est alors horaire.

Les turbidimètres utilisés présentaient un mode de mesure en g/l (en plus du NTU⁹), mais cette mesure demande une calibration régulière entre mesure directe par l'appareil et prélèvement puis mesure en laboratoire des MES.

Les mesures et prélèvements coordonnés et en continu (pas de temps horaire) des deux appareils permettent de réaliser une relation concentration – turbidité sous la forme d'une relation linéaire (coefficient de détermination $R^2 = 0,98$).

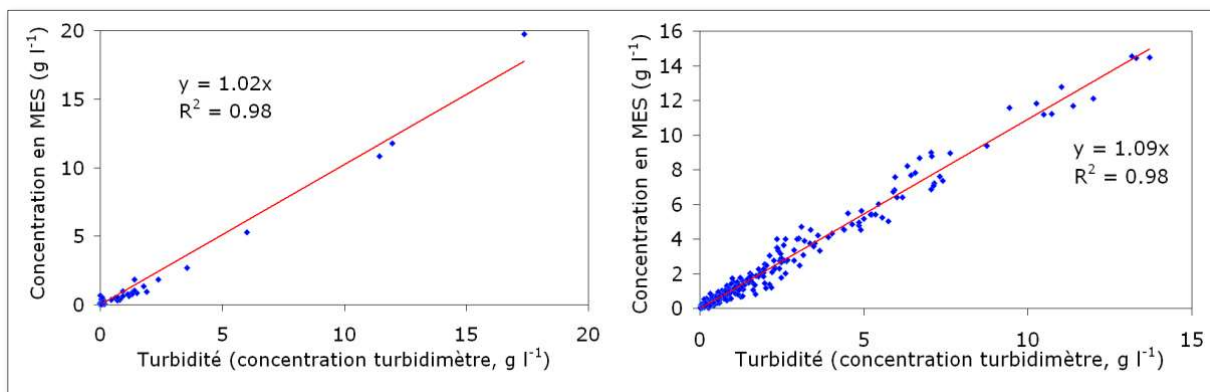


Figure 119 : relation entre la concentration en MES et la turbidité (1) sur le Ferrand et (2) sur la Romanche (Mano, 2008).

Mano (*ibid.*) met en avant les incertitudes liées à la méthode :

- Pour le turbidimètre à sonde optique :
 - Encrassement des sondes de turbidité, particulièrement lors des épisodes de forte concentration en MES dans la colonne d'eau
 - Encrassement progressif biaisant la mesure,

⁹ NTU = *Nephelometric Turbidity Unit* unité de mesure de la turbidité par mesure optique (par mesure optique de la lumière diffusée à 90° par rapport à la lumière incidente).

- Surévaluation liée à la présence d'un élément obturant la sonde (comme une feuille d'arbre...),
 - Le signal produit par des alluvions à granulométrie fine est plus élevé que celui produit par un échantillon caractérisé par des grains plus grossiers (Downing, 2005). C'est le facteur qui affecte le plus la relation concentration-turbidité (Downing, 2005 et 2006), la variation induite pouvant être d'un facteur de 10.
 - La couleur et la brillance des alluvions affecte également la mesure de la turbidité (Downing, 2005).
- Pour le préleveur :
- Orientation de la sonde,
 - Vitesse d'aspiration (en particulier variation du rapport entre vitesse d'aspiration et vitesse de l'écoulement).

Un autre biais peut également être dû à l'unicité du point de mesure qui est supposé être représentatif de la section, ce serait la source d'incertitude la plus importante de la méthode développée.

La dispersion de la relation concentration-turbidité peut également générer un biais.

⇒ La mesure des flux de sédiments

Des mesures de débits ont été effectuées en parallèle des mesures de turbidité et des prélèvements dans la colonne d'eau, permettant d'obtenir ainsi des chroniques de concentration pour le Ferrand et la Romanche.

Ces flux sédimentaires de MES sont présentés dans les deux graphiques ci-dessous :

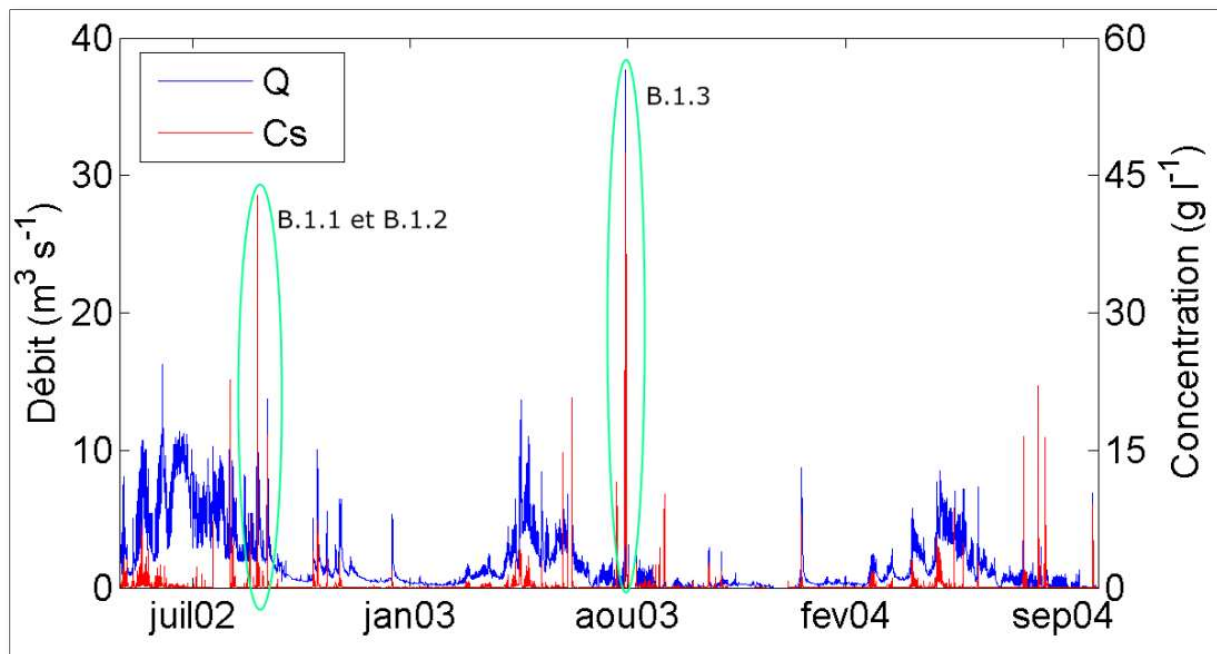


Figure 120 : Chroniques de concentration en MES vs. débits mesurés (07-2002 à 04-2014) pour le (Mano, 2008)

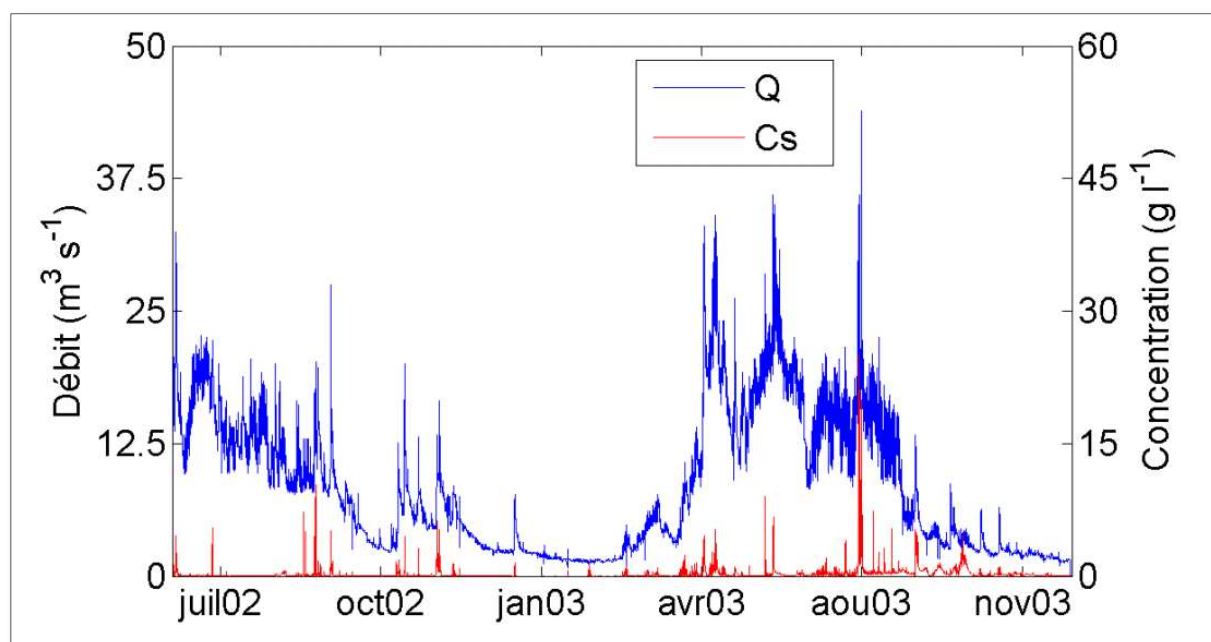


Figure 121 : Chroniques de concentration en MES vs. débits mesurés (07-2002 à 11-2003) pour la Romanche (Mano, 2008)

Le tableau ci-dessous résume les différents éléments mesurés et calculés sur les périodes étudiées :

| Valeurs extrêmes rencontrées sur le Ferrand et la Romanche (Mano, 2008) | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|----------------------|-------|-----------------|------|---------------------|-------|-----|------------------------|------|-----|
| Cours d'eau | Période | Concentrations [g/l] | | | | Flux horaires [t/h] | | | Flux journaliers [t/j] | | |
| | | Instantannée | | Journalière max | Moy | Max | Min | Moy | Max | Min | Moy |
| | | Max | Min | | | | | | | | |
| Ferrand | 07-2002/09-2004 | 47,5 | 0,001 | 9,9 | 0,20 | 6 500 | 0,001 | 3,8 | 11 800 | 0,01 | 92 |
| Romanche | 07-2002/11-2003 | 25,0 | 0,002 | 5,7 | 0,25 | 2 000 | 0,04 | 7,5 | 9 900 | 0,16 | 180 |

Tableau 51 : valeurs extrêmes de concentration et de flux de MES sur le Ferrand et la Romanche (Mano, 2008)

Les flux annuels sur les périodes étudiées sont présentés dans le tableau suivant :

| Flux annuels de MES (Ferrand et Romanche) | | | |
|---|------------------|---------|--------|
| Cours d'eau | Flux annuels [t] | | |
| | Années étudiées | | |
| | 2001 | 2002 | 2003 |
| Ferrand | 32 000 | 37 000 | 14 000 |
| Romanche | 31 000 | 125 000 | - |

Tableau 52 : flux de sédiments annuels

Mano (*ibid.*) indique également quelques éléments complémentaires :

- Les conséquences en termes de transport solide en suspension des épisodes de crues torrentielles sur le Ferrand semblent très importantes. Ainsi la seule crue importante de la période d'étude (4/08/2003 avec $35 \text{ m}^3/\text{s}$) a généré un pic de concentration de $\approx 47 \text{ g/l}$.
- Les événements pluvieux généralisés (pluie durant plusieurs jours) arrivant dans des périodes où les débits sont faibles peuvent générer des flux de MES importants. Ainsi sur le Ferrand trois jours de pluies cumulées (59 mm, avec le dernier jour à 50 mm) donnent un pic à 15 g/l .
- Un orage d'été en haute montagne comme le 31/08/2002 sur le Ferrand (pluie inférieure à 5 mm), génère une réponse en débit très limitée mais un pic de MES de 35 g/l (soit un flux de 3 500 t de MES).
- La fusion nivale impacte également la concentration en MES tant sur le Ferrand que sur la Romanche, augmentant la concentration en MES selon un rythme circadien (de $0,05 \text{ g/l}$ à plus de 1 g/l , la pluviométrie nulle ne pouvant être mise en cause dans ce phénomène), cf. Figure 122.

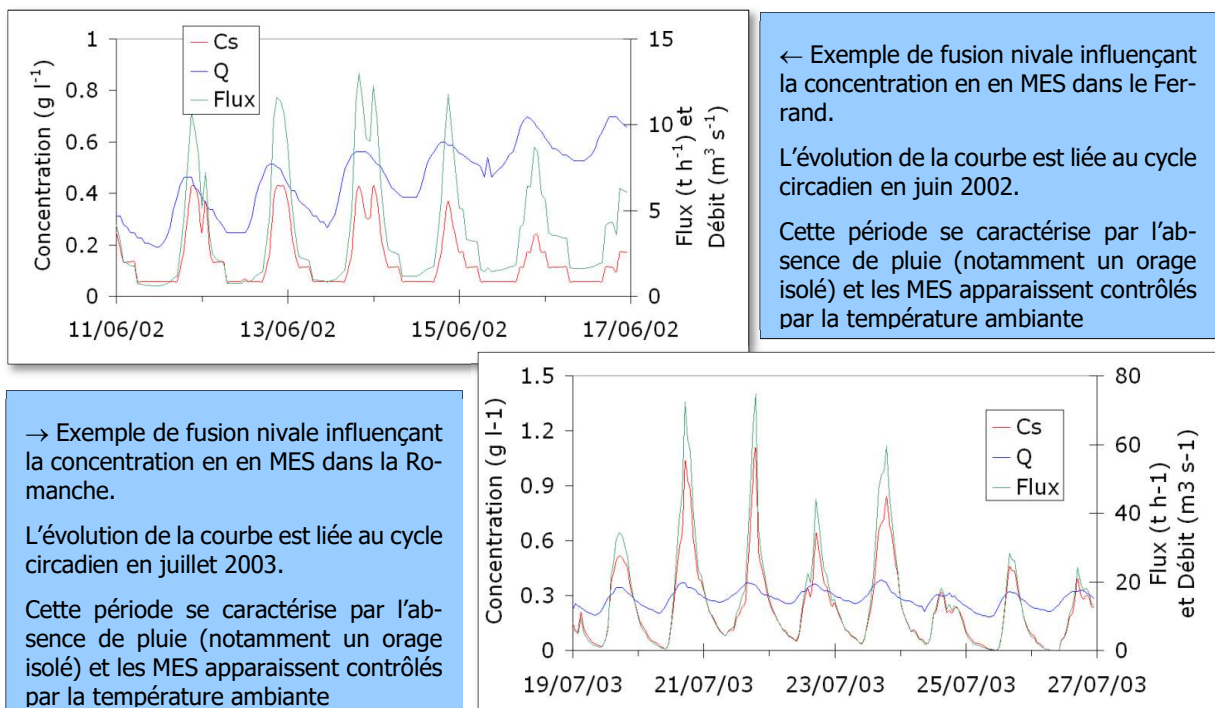


Figure 122 : impact de la fusion nivale sur les MES sur le Ferrand et la Romanche (Mano, 2008)

La relation débit-concentration présente un caractère hystérétique à l'échelle d'un événement pluvieux lié à la distance entre les sources sédimentaires et le réseau hydrographique (Benkhaled & Remini, 2003).

C'est le cas sur les deux cours d'eau étudiés (boucles d'hystérésis anti-horaires lors des crues car les précipitations sont souvent plus intenses en haute montagne (Rotunnon & Ferretti, 2003)).

⇒ Utilisation d'indicateurs statistiques pour mieux comprendre le transport en suspension

Une analyse statistique des résultats a été effectuée par Mano. Pour cela il s'est notamment servi d'indicateurs statistiques issus des travaux de *Meybeck et al.*, (2003).

Le caractère événementiel du transfert des MES est bien démontré par le calcul de $T_{s50\%}$ (temps nécessaire pour transporter 50% du flux de MES) montre que ce flux est transporté en 0,6% (Ferrand) et 2% (Romanche) du temps (soit entre ≈ 2 et 8 jours par an).

Ce caractère est également visible sur les courbes de flux cumulés (cf. Figure 123) qui présentent une forme en « marches d'escalier » (période où le flux est constant puis brusque augmentation sous la forme d'un palier). Ces brusques augmentations sont corrélées aux crues morphogènes (crues avec transport solide important).

Sur le Ferrand, un événement particulier (4/08/2003, cf. Figure 123) a transporté 20 000 t, soit environ le quart de la masse cumulée transportée sur la période d'étude (83 000 t).

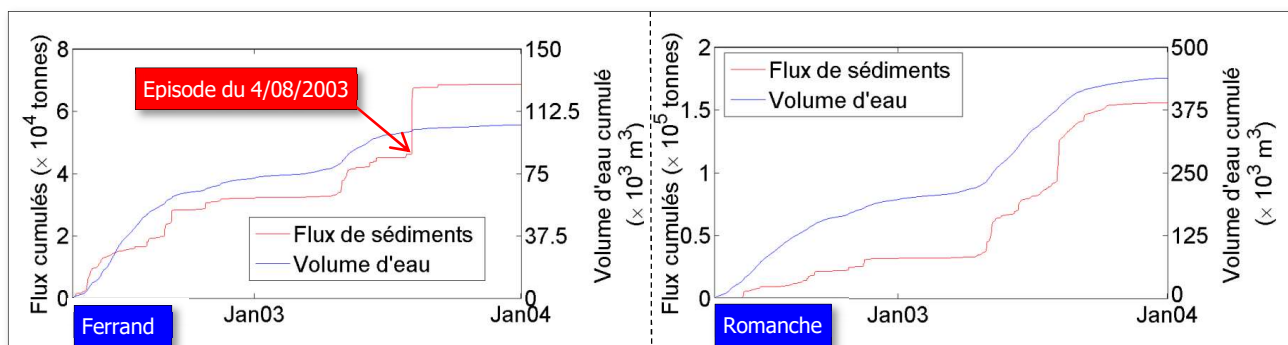


Figure 123 : Evolution des flux de sédiments et volumes d'eau cumulés sur les périodes d'étude pour le Ferrand et la Romanche (d'après Mano, 2008) :

Il est également à noter que pour nos deux bassins 35% du flux annuel transite d'avril à septembre pendant des jours secs (influence de la fusion nivale sur le Ferrand, fusion nivale qui est cumulée avec la fusion glaciaire sur la haute Romanche).

A partir de l'indicateur Y_{90} qui caractérise la valeur du flux horaire non dépassé pendant 90% du temps, les événements de fort transport en suspension ont été déterminés. Ces événements sont ainsi bornés par l'instant où le flux horaire dépasse Y_{90} et l'instant où ce flux devient inférieur ou égal la valeur de Y_{90} . Mano en utilisant cette méthode simple a obtenu pour le Ferrand et la Romanche le tableau suivant :

| Événements de fort transport pour le Ferrand et la Romanche (Mano, 2008) | | |
|--|---------|----------|
| Caractéristiques | Ferrand | Romanche |
| Nombre d'événements moyen par an | 16 | 18 |
| Durée moyenne [h] | 12 | 14 |
| Temps de concentration [mn] | 100 | 175 |
| Nombre d'événements par période de mesure | 41 | 26 |
| Flux cumulé au cours de ces événements [t] | 48 000 | 65 000 |
| Flux total sur les périodes de mesure [t] | 83 000 | 156 000 |
| Contribution [%] | 58% | 42% |

Tableau 53 : caractéristiques des événements de fort transport de MES (Ferrand et Romanche), Mano (2008)

Ainsi sur le Ferrand 16 événements génèrent 58% de la charge annuelle en MES et sur la Romanche 18 génèrent 42% du transport de MES.

⇒ Modélisation statistique des flux de MES

La modélisation des transports solides a été effectuée au moyen d'un modèle statistique du transport solide à réservoirs dont le principe est synthétisé dans la figure ci-dessous :

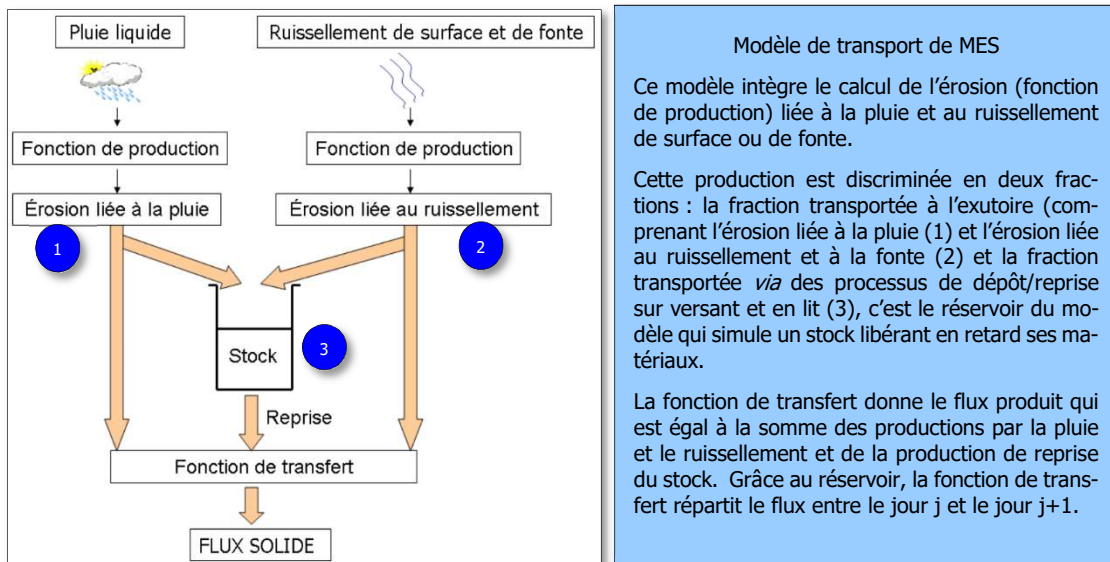


Figure 124 : Modèle du transport des MES à réservoir (Poirel & Bessy, 2004)

Le modèle a été appliqué de manière **uniforme** (données moyennes appliquées à tout le bassin, les paramètres de calage peuvent néanmoins intégrer de manière implicite la variabilité spatiale des données) et **spatialisée** (précipitations et sensibilité à l'érosion variable dans l'espace et prise en compte de l'altitude, mais ruissellement et fusion nivale uniformes sur le bassin).

Les résultats obtenus avec le modèle uniforme et le modèle spatial sont très proches. Les phases de calage et de validation sont cependant meilleures avec le modèle uniforme. Cela peut s'expliquer par le manque données observées et par la prise en compte implicite de la répartition des précipitations dans certains paramètres de calage.

Ainsi, les résultats présentés dans la thèse ne concernent que le modèle uniforme. Ils sont présentés dans les graphiques suivants :

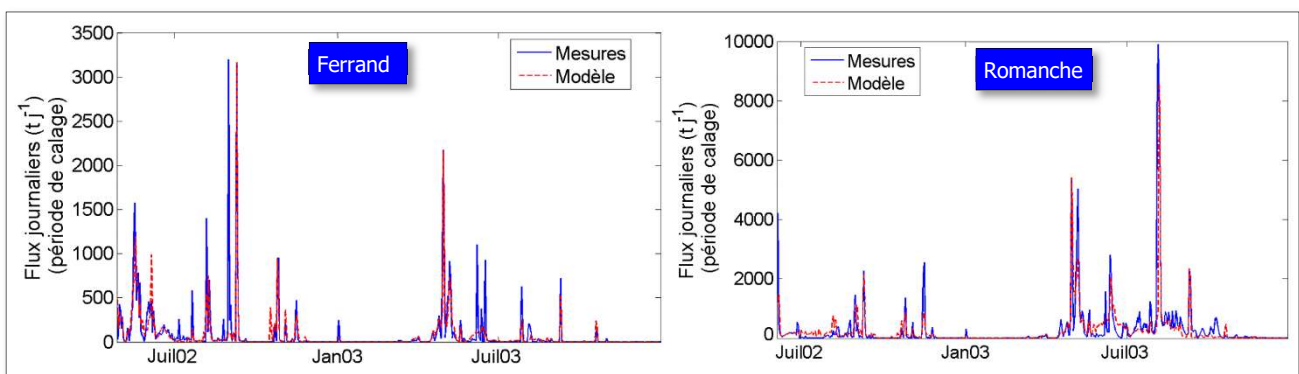


Figure 125 : comparaison des flux mesurés et simulés sur le Ferrand et la Romanche

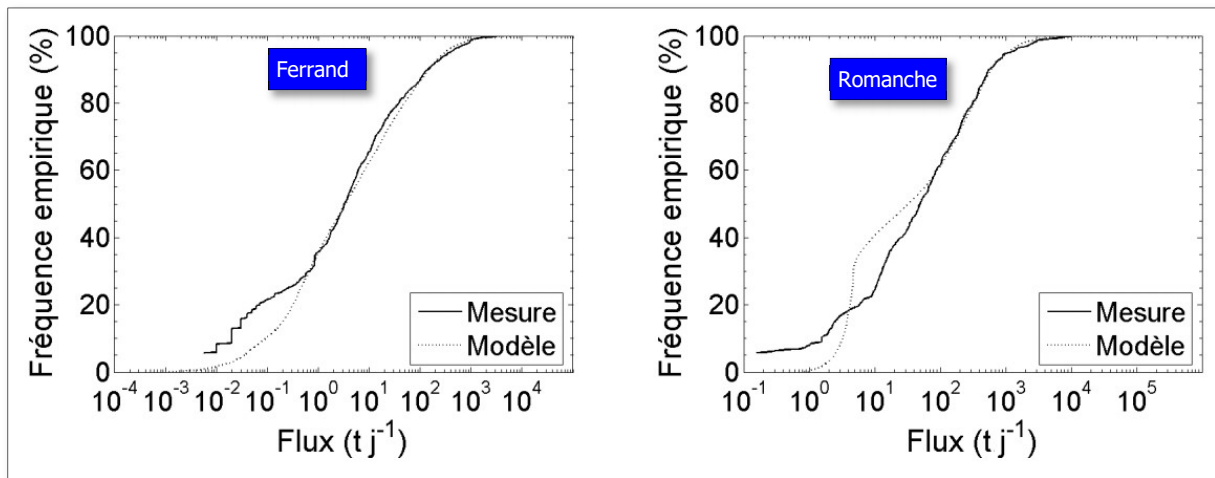


Figure 126 : Comparaison des flux journaliers mesurés et simulés sur le Ferrand et la Romanche

D'une manière globale, le modèle représente correctement les flux de MES, même s'il a tendance à sous-estimer les événements de crues solides.

En effet, le modèle génère des chroniques de flux sur le long terme répondant aux indicateurs statistiques établis par Meybeck *et al.* (2003). Ces indicateurs expriment le fonctionnement d'un bassin versant. La cohérence entre indicateurs calculés sur les données observées et simulées indique donc que les résultats de simulation sont corrects et réalistes.

Mano (2008) a aussi comparé les résultats du modèle à réservoir (données au pas de temps journalier) avec les résultats de transport obtenus par la formule de Ludwig et Probst (formule globale basée sur des données moyennes annuelles) (cf. Figure 127). Le modèle à réservoir donne globalement des résultats de flux inférieurs et présentant une variabilité interannuelle supérieure à ceux obtenus avec la formule de Ludwig et Probst. Mais d'une manière générale, les deux approches permettent une bonne restitution des années de faible et fort transport.

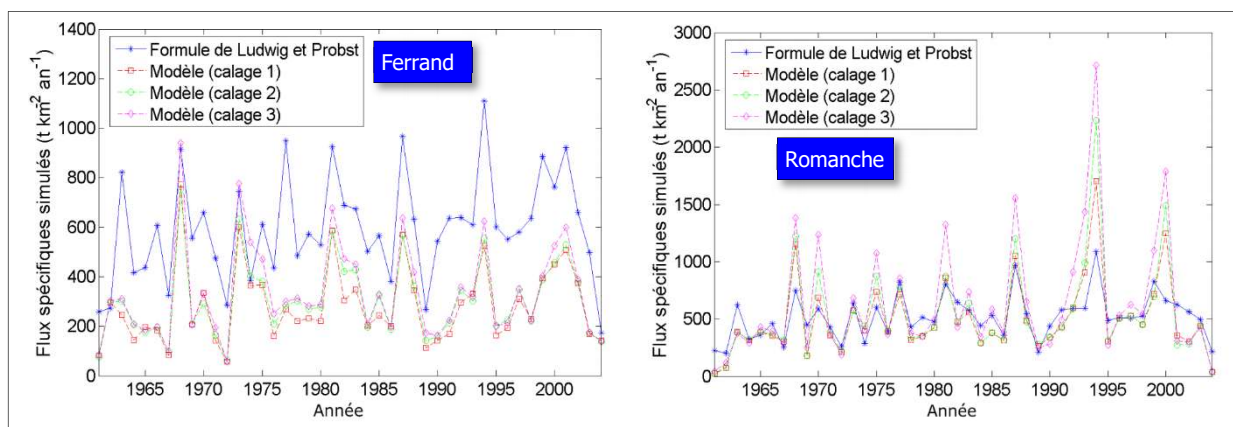


Figure 127 : Flux spécifiques simulés 1961-2004 sur le Ferrand et la Romanche (comparaison des résultats obtenus avec la formule de Ludwig & Probst (1998) et le modèle (avec 3 calages différents))

Le modèle utilisé pour simuler les flux de MES présente, comme tout modèle, des limites liées à la structure du modèle (simplification de la réalité) et aux incertitudes de mesures (données d'entrée et données observées) et de calcul. De plus, il y a un lien direct entre le modèle hydrologique et de transport solide. Ainsi, si le modèle hydrologique ne détecte pas une crue (ex : orage localisé non intercepté par le pluviomètre), les flux de transport solide seront sous-estimés.

Autre point, les incertitudes structurelles du modèle, le choix du paramétrage pour le calage, le manque de données de calage et les incertitudes sur les données d'entrée et observées entraînent un biais dans l'estimation des paramètres de calage du modèle. Afin prendre en compte ces incertitudes, la notion de calage unique a été écartée au profit de l'utilisation des trois meilleurs jeux de paramètres. Il est ainsi possible de modéliser trois flux de MES distincts mais tous réalistes. Cela permet de visualiser les variations de flux possibles en fonction de différents calages. Les résultats issus de ces différents calages restent néanmoins très proches (*cf.* Figure 127).

En conclusion, la thèse de Mano (2008) regroupe des informations intéressantes sur le fonctionnement des quatre bassins étudiés. Elle fournit aussi des résultats de mesure sur la concentration en MES de la Romanche et du Ferrand. Le modèle de transport appliqué par Mano (2008) semble intéressant, il présente toutefois des limites et pourrait être mieux exploité (ex : qualité et quantité des données d'entrées et de sortie). De plus, certains points méritent encore d'être développés (ex : approche spatialisée). Dans le cadre de la thèse, le modèle n'a été utilisé que pour reconstituer des chroniques passées mais il pourrait peut-être avoir un objectif de prévision à terme.

7.3 Cinématique du transport solide

La chaîne cinématique du transport solide de la Romanche et du Vénéon est présentée sur la Figure 128 et montre schématiquement la liaison des différents tronçons les uns par rapport aux autres en termes d'apports et de capacité de transport d'après les analyses présentées ci-avant. Les deux chaînes raboutées donnent ainsi la chaîne cinématique de bassin versant amont de la Romanche.

Le schéma est construit de la manière suivante :

- Les différents tronçons morphodynamiques sont représentés sous la forme d'un rectangle dont la longueur est proportionnelle à la longueur du tronçon, la largeur à celle de la capacité de charriage annuelle et la couleur aux apports externes (connexion versant-lit et affluents). Il est à noter que ce dernier élément est plus qualitatif que quantitatif car nous ne disposons pas pour cette étude des moyens de mesurer le couplage sédimentaire latéral (*cf.* Encart 20) et n'avons pas étudié l'ensemble des contributeurs sédimentaires du bassin (approche bibliographique pour certains) ;
- Les *hiatus* sédimentaires (*cf.* Encart 19) importants qui impactent le transit sédimentaire à l'échelle du bassin versant sont symbolisés dans les chaînes cinématiques de la Romanche et du Vénéon par des flèches dont la couleur et la taille indiquent le niveau de la perturbation géomorphologique. Les *hiatus* naturels (tressages) sont également précisés par des flèches rouges.

N.B. : Pour des commodités de lecture et de réalisation du schéma, la partie représentant la Haute-Romanche et les gorges de Freney (amont tronçon ROM_2) est mise à part. Elle est reliée par une flèche au trait discontinu bleu. Dans cette partie amont, le tronçon Chambon → Clapier qui n'a pas fait l'objet de relevés à pied (gorges) et dont la synthèse bibliographique n'a pas apporté d'éléments suffisants est en gris.

Le couplage sédimentaire

La charge solide d'un cours d'eau est constituée de plusieurs sources qui fournissent généralement de manière concomitante à ce dernier des matériaux de nature (granulométrie) et de volume divers.

On parle alors de couplage sédimentaire (Fryirs, 2013). Ce couplage peut ainsi être de trois ordres :

Le **couplage sédimentaire longitudinal** qui correspond au *continuum* sédimentaire amont-aval et qui reflète les relations hiérarchiques (*i.e.* rang de Stralher) du réseau hydrographique. Il peut être affecté de discontinuités, on parle alors de **barrière** (*e.g.* barrage ou seuil).

Le **couplage sédimentaire latéral** qui concerne alors les apports de matériaux érodés sur les versants et sur les berges. Là-encore cette continuité peut être altérée, on parle dans ce cas de **tampon** entre les sources sédimentaires et le cours d'eau (*e.g.* un confortement de berge, une route pour un versant).

Le **couplage sédimentaire vertical** qui fait référence à la capacité à remobiliser le substrat de son lit (respiration du lit). Ce type de couplage est limité par des obstacles appelés **couverts** qui limitent la remobilisation des alluvions (*e.g.* armure).

Encart 20 : Le couplage sédimentaire

Les *hiatus* sédimentaires

Les *hiatus* sédimentaires sont des discontinuités dans le couplage sédimentaire longitudinal des cours d'eau. Ils affectent plus ou moins profondément le transit sédimentaire en ayant un effet retard ou bloquant.

Le brusque changement de pente naturel ou artificiel y favorise l'accrétion de la charge transportée qui y est stockée plus ou moins longtemps. Ce stockage peut même être quasi définitif. Ils peuvent ainsi constituer des réservoirs sédimentaires.

Les *hiatus* sont de deux ordres :

- Les *hiatus* anthropiques qui sont associés aux perturbateurs anthropiques (seuils, barrages).
- Les *hiatus* géomorphologique générés par les perturbateurs géomorphologiques (seuils naturels, gradins glaciaires...). Les zones de stockage-régulation sédimentaires comme les tressages constituent également des *hiatus*. Les matériaux peuvent y être stockés massivement sur des périodes importantes.

Encart 19 : Les hiatus sédimentaires

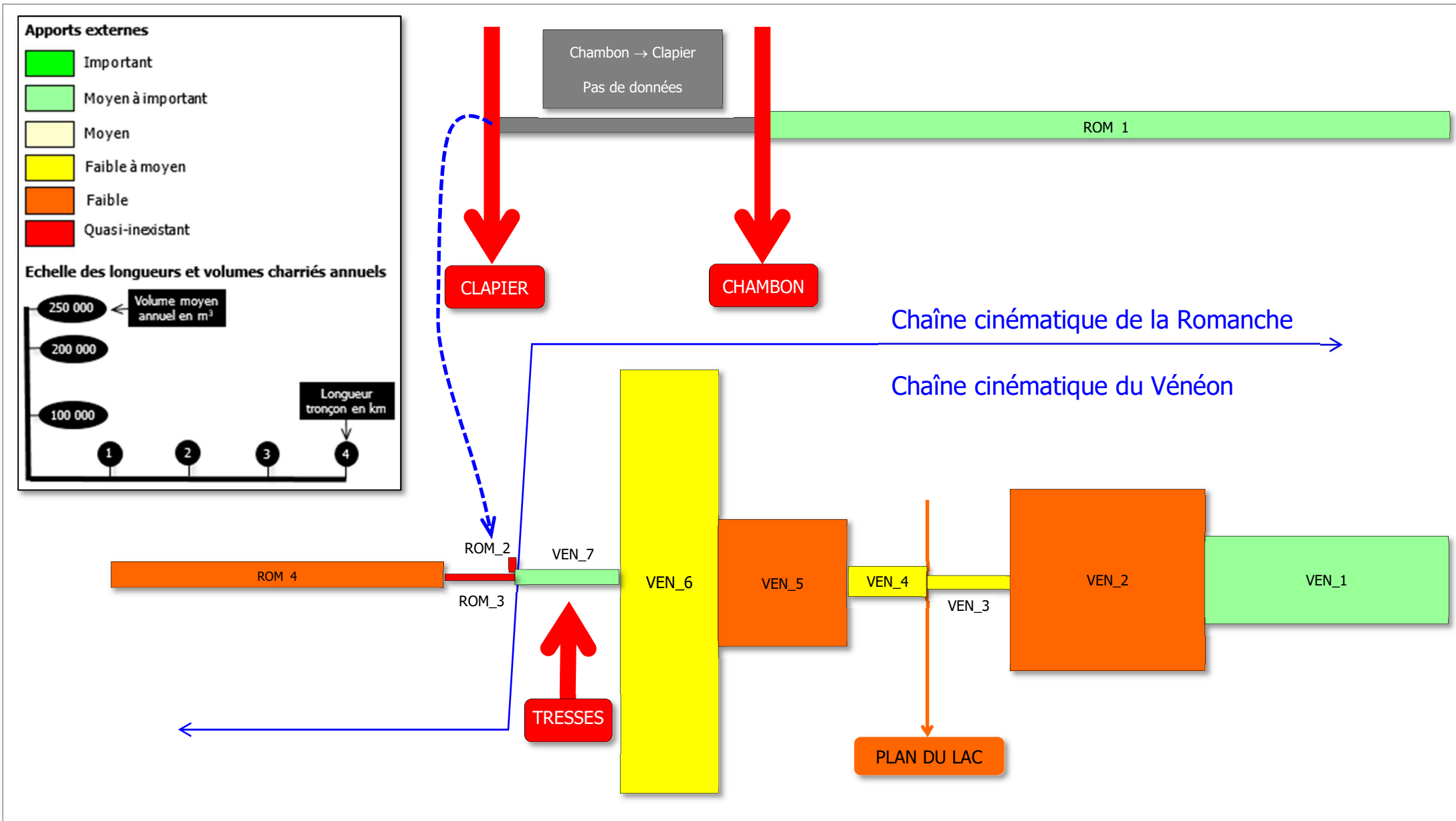


Figure 128 : Chaîne cinématique du transport solide de la Romanche et du Vénéon

A La cinématique du transport solide du Vénéon

Les capacités de charriage calculées sont très variables d'un tronçon à l'autre du Vénéon (*e.g.* VEN_3 *versus* VEN_6, c'est-à-dire 13 650 m³/an *versus* 600 000 m³/an).

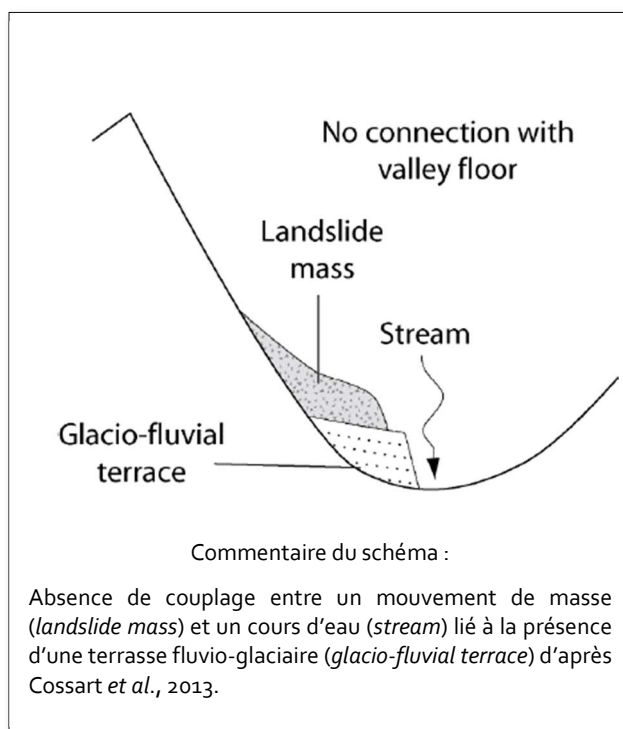
Le **couplage sédimentaire longitudinal** du Vénéon est globalement efficient, la seule rupture reste Plan du Lac, mais ne constitue pas un blocage. Le transport solide est donc fonctionnel dans le Vénéon. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'il y a un tressage à son débouché sur VEN_7.

L'amont est constitué des tronçons VEN_1 et VEN_2, dont la capacité de transport est importante (> 100 000 m³/an), puis on arrive au tronçon VEN_3 à faible capacité (lit large, pente faible suite à l'éboulement historique ayant modifié le niveau de base local, on passe ainsi de 3,3% à 1,1%). Malgré cette situation, le stock alluvial de VEN_3 n'est pas très conséquent, ce qui tend à montrer que la production amont reste faible, l'effet de cassure (*i.e.* rupture de pente) ne se concrétise pas par une masse particulièrement importante de matériaux stockés.

Les tronçons VEN_5 et VEN_6 présentent une forte capacité de transport (respectivement 177 000 et 600 000 m³/an), qui baisse ensuite drastiquement au tronçon VEN_7 (largeur du tressage, pente passant de 4,6% à 1%, c'est-à-dire sortant quasiment du domaine des rivières torrentielles au sens de Surell (1840)). Le tronçon VEN_7 constitue ainsi un hiatus sédimentaire naturel dans la cinématique du transport solide du Vénéon.

Globalement, les **contributeurs sédimentaires potentiels** du Vénéon sont certainement affectés par les mêmes problématiques que le Vénéon (*cf.* infra) et participent de manière modérée au couplage sédimentaire, à l'exception de la Combe de la Pierre Noire, de la Combe de la Pierre Blanche et du torrent du Cros pour le tronçon VEN_1, de la Combe Blanche sur VEN_6 et du ruisseau du Vallon pour VEN_7 (*cf.* Tableau 33).

Le **couplage sédimentaire latéral** reste limité pour diverses raisons, notamment la fin de la séquence paraglaciale, la fin du Petit Âge Glaciaire (avec le retrait des derniers petits appareils glaciaires comme



celui de la Pilatte en tête de bassin), le remblaiement post-glaciaire, l'incision du lit, le boisement de certains versants...). La quasi-totalité des tronçons morphodynamiques du Vénéon sont affectés par une faible productivité sédimentaire liée à un couplage latéral limité (*cf.* Tableau 32) mais également à des apports de contributeurs restreints (sauf VEN_1, et VEN_7, *cf.* Tableau 33).

Certains éléments viennent en complément apporter des indications allant dans le sens d'une fourniture sédimentaire limitée :

- L'**incision** métrique témoigne de l'enfoncement du lit dans le remblaiement de fond de vallée (remblaiement postglaciaire principal) laissant en bordure des terrasses d'origine fluvio-glaciaire (*cf.* Figure 129) contribuant ainsi au découplage des versants et du lit ;

- Le **stock alluvial** est limité en partie amont, de VEN_1 à VEN_6. En effet, le stock cumulé n'est que de 14 % du volume total du stock du cours d'eau (soit 27 363 m³ pour un total de 206 220 m³).

Figure 129 : Impact des terrasses fluvio-glaciaires sur le couplage sédimentaire latéral

B La cinématique du transport solide de la Romanche

Le **couplage sédimentaire longitudinal** présente des *hiatus* sédimentaires conséquents, de telle sorte que le transit sédimentaire s'en trouve compartimenté :

- La Haute-Romanche (ROM_1) constitue une zone de production mais qui est déconnectée du reste du bassin versant par le barrage du Chambon ;
- Le tronçon intermédiaire entre la Haute-Romanche et la plaine de Bourg d'Oisans est autonome et déconnecté également du reste du bassin versant car borné par deux barrages (Chambon et Clapier), le Ferrand y constitue un contributeur sédimentaire à charge fine ;
- La Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans (ROM_2 à ROM_4) se caractérise par des tronçons à faible et moyenne capacité de transport (entre 1 000 et 3 800 m³/an). En effet, on se trouve dans l'auge glaciaire du Bourg d'Oisans où la pente est très faible (0,15% à 0,70%). Ceci s'explique par le niveau de base local généré par le verrou aval à l'auge ainsi qu'à son remblaiement par des matériaux essentiellement fluvio-glaciaires (mis en place par des processus proglaciaires, paraglaciaires et périglaciaires) ;
- Le tronçon ROM_3 constitue une discontinuité sédimentaire naturelle, dans la mesure où sa faible capacité de transport liée à une rupture de pente, favorise le dépôt des matériaux provenant du Vénéon.

Les **contributeurs sédimentaires** sont peu actifs pour la Romanche :

- Les apports de la Sarenne sont faibles, sa charge solide restant captive de son lit jusqu'au Trois Ponts, sa contribution sédimentaire à la Romanche est donc très limitée ;
- Pour la Lignarre, le transit sédimentaire est un peu plus important, mais est régulé par les barrages successifs et la plage de dépôts ;
- L'Eau d'Olle présente des discontinuités sédimentaires importantes (barrage de Grand'Maison et du Verney) qui réduisent les apports à la Romanche. Ce contributeur constitue donc un faible contributeur qui se positionne en partie distale de la zone d'étude.

Le **couplage latéral** est globalement limité dès l'arrivée dans la plaine de Bourg d'Oisans, la Romanche s'écoulant généralement loin des versants. Seul le tronçon ROM_1 présente un couplage latéral relativement important.

C La cinématique du transport solide à l'échelle du bassin versant

La cinématique actuelle du bassin versant de la Romanche se caractérise par un couplage sédimentaire longitudinal Vénéon-Romanche, dont la liaison est effectuée par une discontinuité sédimentaire naturelle représentée par la zone de stockage-régulation des tronçons VEN_7-ROM_3 (Buclet-Bayette) prenant la forme d'un style fluvial en tresses. Cette discontinuité semble menacée de métamorphose (au sens de Bravard, 1989) et donc de disparition en cas d'incision et de baisse de la fourniture sédimentaire.

La cinématique sédimentaire entre le bassin versant de la Haute-Romanche (ROM_1) et celui de la plaine de Bourg d'Oisans (ROM_2 à ROM_4) est rompue par la présence de barrières (au sens de Fryirs, 2013 – cf. Encart 19) que constituent les barrages du Chambon et du Clapier.

Globalement, le couplage sédimentaire latéral est limité, les tampons (au sens de Fryirs, 2013) sont liés à la fin de la séquence paraglaciale et au boisement. Les sources sédimentaires (stocks paraglaciaires ubiquistes non couplés au stock alluvial) sont importantes.

Les contributeurs sédimentaires restent limités (mauvais couplage...).

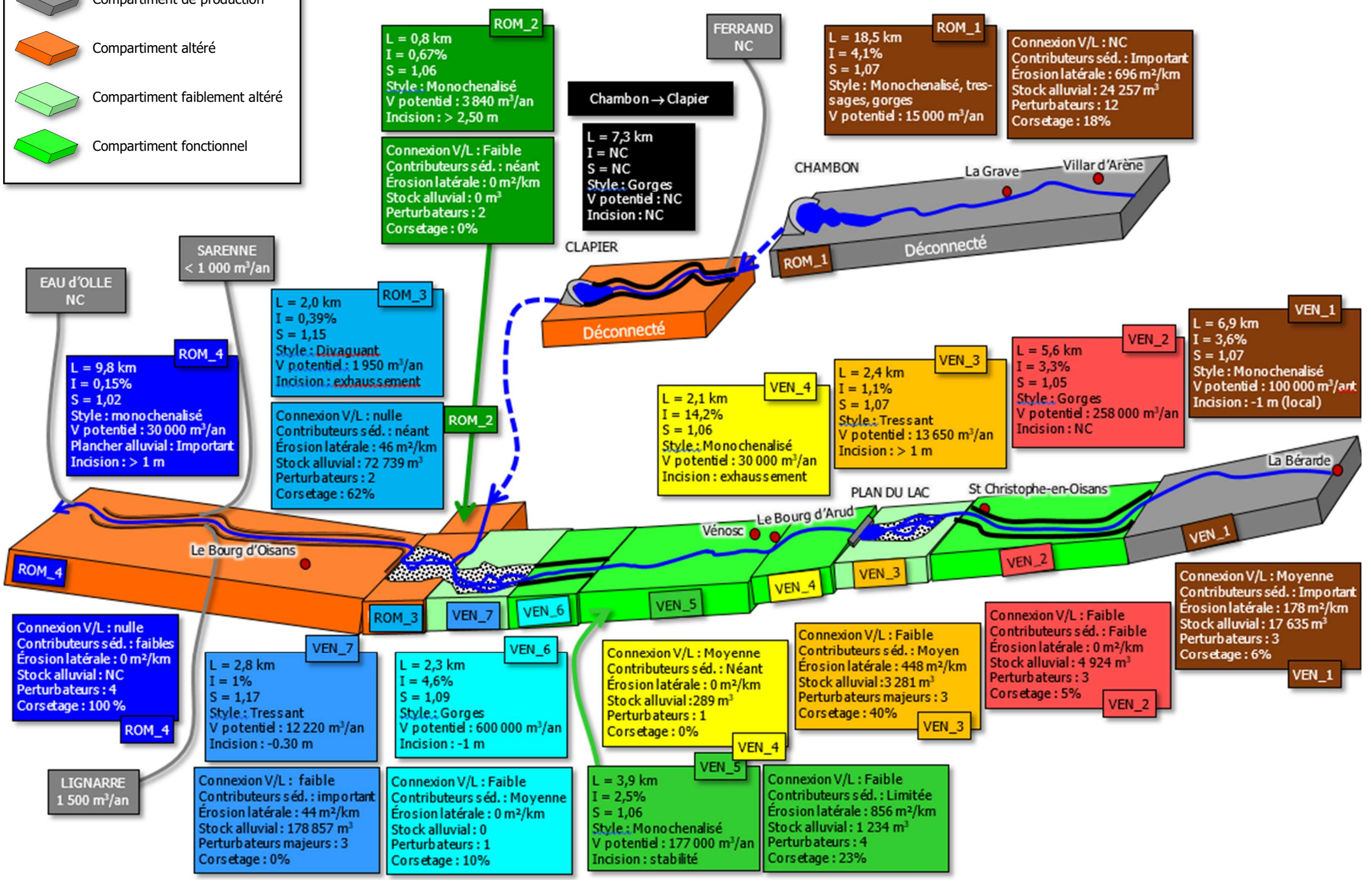
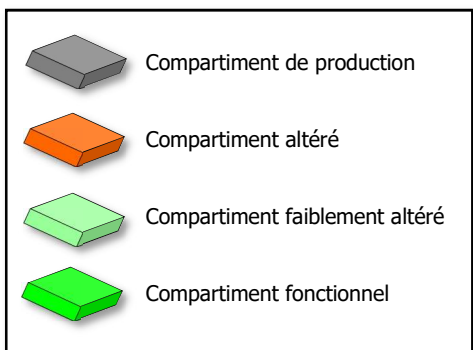
SYNTHÈSE DU FONCTIONNEMENT DYNAMIQUE

L'analyse du fonctionnement dynamique met en évidence un **potentiel de recharge sédimentaire limité**, et ce d'autant plus dans le contexte actuel de tarissement sédimentaire :

- La **contribution sédimentaire des affluents** (Ferrand, Lignarre, Sarenne et Eau d'Olle) semble plutôt modérée, voire faible. Certains contributeurs sédimentaires du Vénéon donnent également des signes de faiblesse (Torrent des Étançons, Ruisseau des Étages, Ruisseau de la Pisse, Ruisseau du Lauvitel...) tandis que d'autres semblent encore être des contributeurs importants (Combe de la Pierre Noire, Combe de la Pierre Blanche, Ruisseau du Vallon...);
- La **connexion versant-lit du Vénéon** et de la Romanche est limitée et ne constitue pas une source de recharge sédimentaire suffisante, à l'exception de la Haute-Romanche (ROM_1) où le couplage latéral est relativement important ;
- **La plaine de Bourg d'Oisans (ROM_2 à ROM_4) est découplée sédimentairement de la partie amont du bassin versant (ROM_1)** du fait de la présence des barrages du Chambon et du Clapier. La Haute-Romanche (ROM_1) ne peut donc pas apporter sa production par transfert vers l'aval, et renforcer ainsi la recharge sédimentaire de la Romanche dans la plaine de Bourg d'Oisans ;
- Les **érosions latérales** sur le Vénéon et la Romanche sont faibles et constituent une source de recharge sédimentaire anecdotique.

Malgré un potentiel de recharge sédimentaire limité, le **stock alluvial** de la Romanche et du Vénéon est relativement important, mais concentré dans le secteur Buclet-Bayette avec environ 250 000 m³ de matériaux stockés en lit sous la forme de structures alluvionnaires et répartis pour 30% dans la Romanche et 70% dans le Vénéon. Le degré de remobilisation de ce stock est par ailleurs important, à l'exception de la partie aval du secteur La Bayette, où sont présentes des structures alluvionnaires végétalisées.

Le secteur Buclet-Bayette (VEN_7 et ROM_3) constitue donc naturellement une **zone de stockage-régulation** favorisée par une rupture de pente importante et une compétence au transport relativement faible, et fonctionnant, en condition d'apports sédimentaires soutenus et continus (fourniture sédimentaire importante et crues morphogènes régulières), comme une « **plage de dépôt auto-curant** ».



8 Évolution dynamique

8.1 Vers une métamorphose fluviale

La compréhension de l'héritage géomorphologique et du fonctionnement dynamique de la Romanche et du Vénéon a mis en évidence certains éléments de diagnostic à partir desquels une tendance d'évolution peut être dégagée, notamment pour le secteur Buclet-Bayette-Bourg d'Oisans (tronçons VEN_7, ROM_3 et ROM_4) qui apparaît comme le plus exposé à une **métamorphose fluviale** :

- **Le contexte sédimentaire du bassin versant amont de la Romanche est péjoré** par le double forçage climatique et anthropique : fin de la séquence paraglaciale et sortie de la période froide du Petit Âge Glaciaire limitant la fourniture sédimentaire, forçages anthropiques tels que les extractions de matériaux notamment dans la zone du Buclet, impactant fortement le bilan sédimentaire de la Romanche et du Vénéon déjà perturbé ;
- **Le potentiel de recharge sédimentaire de la Romanche apparaît limité** : la plaine de Bourg d'Oisans est déconnectée sédimentairement de la Haute-Romanche par les barrages du Chambon et du Clapier, bloquant la recharge sédimentaire des tronçons ROM_2 à ROM_4. Même constat pour le Vénéon qui ne présente pas de contributeurs sédimentaires très importants et dont la connexion versant-lit est moyenne ;
- **Un volume important de matériaux** est toutefois stocké dans la plaine du Buclet, qui concentre à elle seule **251 596 m³ de matériaux** répartis pour environ 30% dans la Romanche et 70% dans le Vénéon. Or, il s'agit d'un **stock hérité** (car peu de renouvellement) issu des processus paraglaciales du Vénéon et de la Romanche ;
- **Les ajustements morphologiques** de la Romanche et du Vénéon dans le secteur (rétraction de la bande active depuis 1948, incision des lits par rapport à 1911, style tressant-divagant sur ROM_3...) témoigneraient de signe de métamorphose ;
- **Le seuil** construit en 1989 sur le Vénéon et ruiné en 2014 constitue également un élément essentiel à prendre en compte. En effet, ce perturbateur hydromorphologique a vraisemblablement fonctionné comme un **artéfact sédimentaire** : de par sa présence, le seuil a permis l'accumulation de matériaux. En stockant et bloquant ainsi les matériaux, on peut supposer que le seuil a favorisé le maintien du tressage sur le Vénéon et a lissé dans le temps une évolution vers la rétraction du tressage.

Or, la destruction totale du seuil lors de la crue de 2014 change la donne et pourrait avoir un impact sur le transit sédimentaire, les évolutions en plan et en altimétrie... Les effets commencent d'ailleurs tout juste à apparaître. La tendance au ré-engraissement observée depuis 1998 s'accroît sur la dernière décennie avec une rehausse moyenne du fond de la Romanche (ROM_3) de +40 cm en 2016 par rapport à 2003, liée probablement au déstockage des matériaux à l'origine retenus en amont du seuil (VEN_7). Sur le Vénéon, on observe un début d'incision par érosion régressive avec un abaissement du fil d'eau en 2016 de l'ordre de -30 cm sur 660 mètres en amont de l'ancien seuil par rapport à 2007.

Ainsi, le contexte général de tarissement sédimentaire est peu favorable au maintien du tressage. L'alimentation en matériaux de la zone en tresses est limitée, la condition *sine qua non* d'un tressage étant l'abondance de la charge de fond, voire sa surabondance.

Sans intervention humaine, on peut donc s'attendre à une poursuite du **déstockage des matériaux du Vénéon (VEN_7) par pulsations sédimentaires vers la Romanche (ROM_3 – La Bayette)**, et ce en quelques décennies compte tenu de la compétence au transport du tronçon VEN_7 et de son stock alluvial actuel, et donc à terme à la **disparition du tressage** avec une contraction de la bande active par végétalisation et une réduction du nombre de chenaux, voire une monochenalisation.

8.2 Un *scenario* d'évolution très pénalisant pour Bourg d'Oisans

Ce *scenario* d'évolution reposant sur le déstockage sédimentaire depuis le Vénéon (VEN_7) vers la Romanche (ROM_3 et ROM_4), qui devra toutefois être précisé par le suivi dynamique, engendrerait des difficultés très pénalisantes pour Bourg d'Oisans.

En effet, la Romanche dans le secteur de La Bayette (ROM_3) et la traversée de Bourg d'Oisans (ROM_4) ne présente pas une morphologie adaptée à un transport solide intense lié à des bouffées sédimentaires de déstockage.

Dans le secteur de La Bayette (ROM_3), la bande active de la Romanche est relativement étroite et la morphologie générale n'est pas adaptée en l'état à évacuer des masses de matériaux importantes correspondant à des pulsations sédimentaires importantes :

- La très faible pente (0,39%) ne permet pas une évacuation rapide de la charge solide, de l'ordre du siècle pour évacuer son stock alluvial actuel ainsi que celui du tronçon VEN_7 (cf. § 7.2F) ;

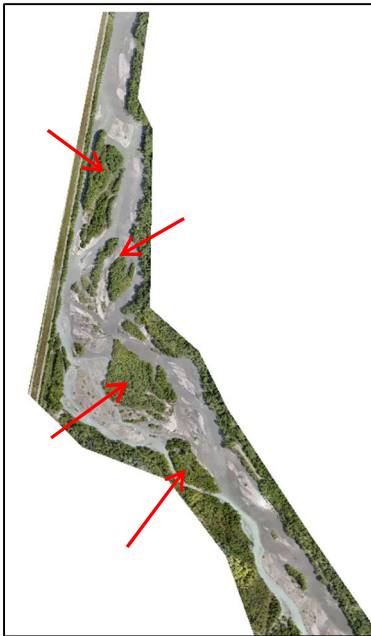


Figure 130 : Structures alluvionnaires végétalisées dans la bande active de ROM_3

- Le désaxement de la Romanche qui vient buter sur la digue de la Croix du Plan favorise l'accrétion* de matériaux ;
- La présence de structures alluvionnaires végétalisées (4,7 ha) risque de bloquer la charge grossière, voire de générer des embâcles (cf. Figure 130) ;
- L'entonnement de La Bayette à l'entrée de Bourg d'Oisans, dont l'effet d'étranglement est accentué par un nouveau désaxement du lit, n'est pas dimensionné pour évacuer une charge grossière importante et des embâcles en complément.

Le tracé artificiel en baïonnette de la Romanche dans le secteur de La Bayette (aval) liés aux désaxements favorise donc une avancée lente de la charge solide et un style tressant-divagant en générant des dépôts par rétrogradation* et un tri granulométrique, au détriment du transport solide.

Ainsi, une obstruction du lit dans le secteur de La Bayette est prévisible, ce qui induirait **une rehausse de la ligne d'eau** et un risque de sur-inondation, voire une **surverse** et des **brèche(s)** au droit de la digue de la Croix du Plan, avec même une possibilité de **défluviation de la Romanche**, situation qui serait catastrophique.

Dans la traversée de Bourg d'Oisans (ROM_4), si la charge solide ne se bloque pas en tête, l'endiguement de l'ombilic du Bourg d'Oisans et la faible pente (0,15%) généreront des accrétions importantes sous la forme de **bancs alternés**. Cette situation aurait évidemment un impact important, en réduisant la section d'écoulement et limitant ainsi l'efficacité de l'endiguement.

8.3 Préconisations d'amélioration de l'évolution dynamique

Pour pallier ce *scenario* d'évolution (sans intervention humaine d'accompagnement), on peut d'ores et déjà préconiser la mise en œuvre d'actions qui feront bien évidemment l'objet de fiches-action précises et spécifiques dans le cadre de l'élaboration du plan de gestion, et qui s'inscriront dans un programme de suivi dynamique afin d'accompagner et ajuster les opérations :

- **Accompagnement de l'onde sédimentaire de déstockage dans le secteur de La Bayette** : il consiste à éviter un encombrement des sections d'écoulement par des matériaux déstockés et/ou des embâcles liés à l'arrachage des arbres bordant la bande active ou fixant les structures alluvionnaires, notamment à la suite d'une crue morphogène.

Il s'agit donc d'augmenter la capacité de stockage du tronçon ROM_3 jusqu'à environ une capacité du double des matériaux actuellement stockés (cette capacité de stockage devant rester intacte entre deux crues morphogènes), en élargissant la bande active et en dévégétalisant les structures alluvionnaires en lit. Le secteur de La Bayette deviendrait ainsi une plage de dépôt curée artificiellement, accompagnant la dynamique sédimentaire de déstockage.

Il convient de noter que la remise en lit des matériaux extraits générerait un coût très élevé et un bilan carbone très défavorable (il faudrait ainsi les transporter loin en amont sur le Vénéon pour effectuer de la recharge). Éventuellement, une partie pourra être stockée sur place pour être réinjectée en cas de forte incision.

En ce qui concerne le devenir des matériaux piégés, plusieurs solutions sont possibles :

- o Les exporter du bassin directement par le gestionnaire et les vendre comme granulats pour minimiser le coût de cette opération ;
 - o Passer pour cette opération d'exportation *via* un appel d'offres par un prestataire privé (carrier) maîtrisant la totalité de l'opération (curage, exportation, vente) ;
 - o Éventuellement combler la gravière du Vénéon, mais en préalable, il faudra vérifier (étude hydrogéologique) que cette opération ne modifie pas les écoulements souterrains et donc n'engendre pas un impact sur l'alimentation en eau potable.
- **Recharge sédimentaire du Vénéon en amont de la plaine du Buclet** : elle consiste à injecter des matériaux, dont la granulométrie est compatible avec le substrat, en amont relativement proche du tressage du Buclet, afin de limiter le tarissement sédimentaire et éviter une incision importante du Vénéon (VEN_7) lors du déstockage des matériaux actuellement présents.

La temporalité des injections

Les injections de matériaux peuvent se faire sur le long terme. Dans ce cas, les matériaux arriveront dans la zone cible des décennies après. On prépare ainsi l'avenir dans un contexte de tarissement sédimentaire. On distingue donc :

- Les **injections à long terme** utilisent un secteur à forte capacité de charriage et relativement court pour injecter des matériaux qui arriveront dans la zone cible des décennies plus tard. Les injections long terme seront récurrentes après les crues BFHM. Leur efficacité est à long terme.
- Les **injections à court terme** directement dans les zones cible ou leur proximité amont sans parcours kilométrique. Leur efficacité est donc à court terme.

Il s'agit de réaliser des injections à long terme à l'amont du tronçon VEN_6 (*cf.* Encart 21). En effet, celui-ci présente un style en gorges avec une capacité théorique de charriage conséquente ($\approx 600\,000\text{ m}^3/\text{an}$), propice à transporter les matériaux injectés à l'échelle de plusieurs décennies vers le tronçon VEN_7. On utilisera les éboulis paraglaciers présents comme source sédimentaire. L'utilisation de matériaux source sur place évitera des remontées coûteuses (financièrement et en bilan carbone), et peu compatibles avec les infrastructures routières du secteur.

Ces injections seront complétées par des injections à court terme, c'est-à-dire effectuées directement dans le tronçon VEN_7, dont les matériaux proviendront de la plage de dépôt du tronçon ROM_3.

Encart 21 : Temporalité des injections

L'ensemble des matériaux injectés sera tracé, afin de mieux appréhender effets et impacts de ce type d'opération, et d'affiner la connaissance du transport solide du Vénéon et de la Romanche (vitesse de propagation de la charge, tri granulométrique...).

- **Éviter le risque de capture du Vénéon par la gravière** : la disparition du seuil pourrait favoriser la divagation du Vénéon, et donc un éventuel risque de capture par la gravière qui impacterait un secteur déjà particulièrement sensible (amont proche de La Bayette, digue de la Croix du Plan) compte tenu de la profondeur de la gravière (-23 m par rapport au fond du Vénéon, ETRM, 2014). Toutefois, l'éloignement de la gravière par rapport à la bande active du Vénéon (≈ 220 m) et de la Romanche (entre 380 et 420 m) rend fort peu probable ce phénomène. Néanmoins, le lit du tronçon ROM_3 sera travaillé, de sorte que les matériaux se déposent dans un secteur particulier, évitant ainsi la capture par la gravière.

En complément, le **suivi dynamique** (en particulier topographique) permettra de mieux appréhender l'évolution dynamique de la zone, et précisera l'impact effectif des différentes solutions préconisées ci-dessus. Toutefois, si cette évolution conduit à un déstockage trop rapide des matériaux de la partie amont, une réflexion devra être menée sur la mise en place d'un **ouvrage de régulation** sous la forme d'un point dur de contrôle au niveau du seuil ruiné (radier avec entonnement amont permettant de contrôler l'incision et le transport solide).

9 Suivi dynamique

9.1 Le suivi métrologique

L'ensemble des éléments présentés dans le présent rapport pour établir le diagnostic hydromorphologique du bassin versant amont de la Romanche résulte de la confrontation entre une approche hydromorphologique et une approche calculatoire.

L'**approche hydromorphologique** est une approche par la recherche et l'analyse d'indices de terrain permettant la compréhension des phénomènes spatio-temporels (*e.g.* la photographie aérienne croisée avec la carte géologique permet d'identifier les sources sédimentaires et de qualifier la production sédimentaire d'un contributeur...).

L'**approche calculatoire** est une approche basée sur des formules et/ou des codes numériques (*e.g.* volume de matériaux potentiellement charriés durant une année...), dont les paramètres d'entrée ne sont pas toujours évidents à choisir et les domaines de validité pas toujours adaptés au cours d'eau.

La confrontation de ces éléments permet de mieux appréhender l'héritage géomorphologique et le fonctionnement dynamique du cours d'eau et de pouvoir prédire les principales tendances évolutives (évolution dynamique).

Cette démarche reste toutefois au niveau de tendances. Le niveau de précision est inhérent au degré de précision des données collectables et collectées. Il est également difficile de trouver des formules et/ou des données adaptables strictement au cours d'eau étudié.

Ainsi, le **suivi métrologique**, c'est-à-dire le suivi dynamique « par la mesure », est un élément complémentaire à ces deux types d'approches. À titre d'exemple, la vitesse de propagation de la charge alluviale est très mal connue et est pourtant un élément très important pour la connaissance du transport solide (déplacement des matériaux, tri granulométrique...), et ce d'autant plus dans le contexte de déficit de fourniture sédimentaire que l'on connaît actuellement.

L'approche métrologique est donc pertinente et primordiale pour affiner la compréhension de l'évolution dynamique, et ainsi engager un suivi dynamique du cours d'eau, afin d'évaluer l'impact des actions proposées dans le cadre du plan de gestion sur l'évolution dynamique, et éventuellement de préciser et ajuster dans le temps ces opérations.

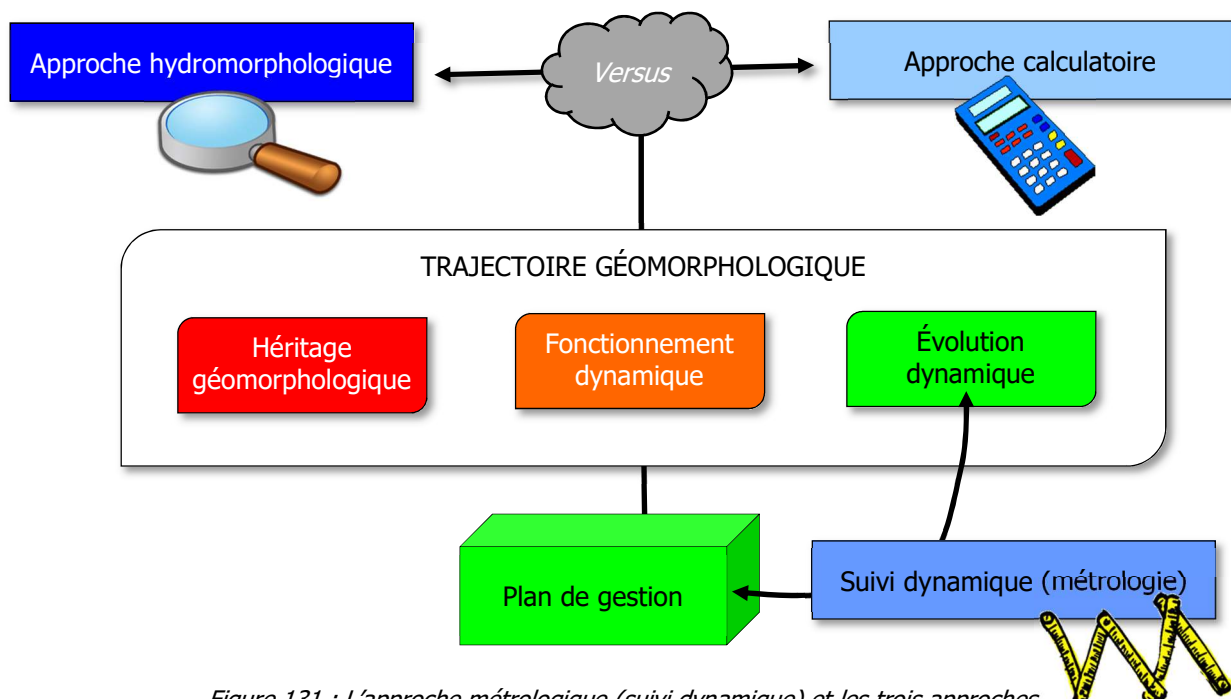


Figure 131 : L'approche métrologique (suivi dynamique) et les trois approches

9.2 Éléments du suivi dynamique

Le suivi dynamique constitue donc un moyen de valider, voire d'affiner, dans le temps les tendances mises en avant dans l'étude par une approche représentant véritablement la Romanche et le Vénéon.

Ce suivi dynamique doit être **rustique**, c'est-à-dire simple à mettre en œuvre et à interpréter, et **robuste**, c'est-à-dire être fiable sur les données obtenues.

Ainsi, le SACO pourra réaliser une partie des suivis proposés, moyennant une formation du personnel (interventions de terrain et exploitation des données collectées). Pour certain type de suivi, celui-ci devra être externalisé, dans la mesure où la technique de collecte des données ou l'exploitation nécessitent des appareils spécifiques coûteux (y compris en location) et/ou complexes à mettre en œuvre.

Compte tenu de la trajectoire géomorphologique de la Romanche et du Vénéon, on peut dès à présent préconiser un suivi dynamique du transport solide, de l'incision, de la zone de tressage et de la recharge sédimentaire (cf. Tableau 54). L'ensemble du programme de suivi dynamique sera précisé dans les fiches-action réalisées dans le cadre de l'élaboration du plan de gestion.

9.3 Une vision globale grâce au suivi dynamique

L'ensemble des éléments fournis par cette approche métrologique permettra :

- **Affermir le point zéro** que constitue la présente étude en le complétant par des données mesurées précises, et pouvoir engager un suivi dynamique permettant d'acquérir et de bancariser de la donnée qui est pour l'heure indisponible et méconnue (nature et vitesse de la charge solide...) ;
- **Affiner la stratégie et le plan de gestion** en fonction des données collectées témoignant de l'évolution temporelle de la Romanche et du Vénéon. Ces éléments sont particulièrement importants à deux niveaux :
 - o La plupart des données bancarisées permettront de mieux connaître les phénomènes hydromorphologiques (*e.g.* évolution des tressages, vitesse de propagation du transport solide, évolution du fond du lit aux endroits critiques...) ;
 - o Ces données et d'autres (*e.g.* colmatage du lit) permettront de suivre les actions et d'en mesurer l'impact.

Ainsi, on pourra **faire évoluer le plan de gestion** en fonction du suivi dynamique, c'est-à-dire l'adapter en fonction de données mesurées et suivies. Ce suivi dynamique constitue une interaction favorisant à la fois la connaissance du fonctionnement et de l'évolution dynamiques, et ouvrant ainsi des perspectives d'adaptation fines du plan de gestion (affinement – amélioration, voire correction).

Mené par les gestionnaires du bassin versant amont de la Romanche, il constitue une véritable action-connaissance permanente et permettra ainsi de suivre efficacement un milieu particulièrement dynamique dans un contexte défavorable (forçages climatiques et anthropiques), tout en y réalisant les nécessaires travaux d'accompagnement dynamique.

| ÉLÉMENTS DE SUIVI DYNAMIQUE PRÉCONISÉS POUR LA ROMANCHE ET LE VÉNÉON | | | | | |
|--|---|--|--|------|---|
| Éléments suivis | Type de suivi | Technique | Localisation | SACO | Objectifs – Intérêt – Méthodologie |
| Transport solide | Volume matériaux | Helley-Smith | À préciser | | Mesurer la fraction charriée pour affiner la connaissance du transport solide sur le bassin versant et comparer les données avec l'approche calculatoire |
| | Granulométrie | Granulométrie en lit | Exutoire tronçons et affluents | ✓ | Analyser l'évolution du substrat du lit après chaque crue et l'aspect biogène du substrat |
| | Bilans de masse | Levé bathymétrique | VEN_1, VEN_3, VEN_5 à VEN_7 ROM_2 à ROM_4 | | Affiner la compréhension du transport solide sur le bassin versant Suivi d'une série de profils en travers espacés régulièrement Après chaque crue, réalisation d'un bilan par bief de cours d'eau consistant à déterminer la variation du stock sédimentaire |
| | Vitesse de propagation de la charge alluviale | Traçage pit-tags | | ✓ | Affiner la compréhension du transport solide sur le bassin versant en obtenant des informations sur le transfert des matériaux. Mesurer la distance parcourue lors d'une crue par les matériaux du lit, évaluer précisément le temps de transit des matériaux et définir le tri granulométrique |
| | Stock alluvial | LIDAR | VEN_1 à VEN_7 ROM_2 à ROM_4 | | Évaluer l'évolution du stock alluvial (volume et degré de mobilité). Le point zéro : Analyse de 2016 |
| Incision | Évolution verticale du lit | Levé bathymétrique | VEN_1 à VEN_7 ROM_2 à ROM_4 | | Réaliser un profil en long post-crue pour suivre l'évolution verticale du lit (comparaison avec 1910 et 2016) |
| Tressage | Morphométrie | LIDAR et orthophoto | VEN_7 et ROM_3 | | Détermination de paramètres hydromorphologiques et comparaison des LIDAR suite à une crue permettant d'évaluer l'évolution du tressage (expansion, stabilité, rétraction) et le stock alluvial. Le point zéro : 2016 |
| | Stock alluvial | LIDAR et orthophoto | | | |
| Recharge sédimentaire | Granulométrie | Granulométrie en lit | Aval des points d'injection | ✓ | Évaluer l'impact des opérations d'injections de matériaux à long et court termes (notamment pour maintenir une charge grossière en amont des zones tressage et accompagner, voire lisser, leur métamorphose) sur le substrat du lit |
| | Colmatage | Sticks hypoxiques et/ou conductivité hydraulique | | ✓ | |
| | Vitesse de propagation de la charge alluviale | Traçage pit-tags | | ✓ | |

Tableau 54 : Suivi dynamique préconisé pour la Romanche et le Vénéon

9.4 Focus sur le suivi de la plaine du Buclet

Il convient de noter que le suivi de la plaine du Buclet (VEN_7 et ROM_3) est un point essentiel du suivi dynamique. En effet, comme vu précédemment, le tressage du Buclet est un style relictuel certainement en voie de métamorphose, voué à disparaître par déstockage des matériaux vers la plage de dépôt de La Bayette. La présence du seuil pendant 25 ans a probablement retardé ce phénomène, en permettant l'accumulation et le blocage de matériaux en son amont.

Compte tenu des actions préconisées et qui seront précisées dans le cadre du plan de gestion (*cf.* § 8.3), il est primordial d'effectuer un suivi dynamique du secteur par **l'acquisition d'un levé LIDAR et d'une orthophotographie aérienne après chaque crue morphogène ou à défaut de crue tous les cinq ans.**

À partir de ces deux éléments, le suivi sera constitué *a minima* de l'analyse des indices hydromorphologiques présentés au Tableau 55, permettant d'en déduire l'évolution dynamique du tressage par comparaison aux levés antérieurs et de **mesurer le transfert réel de matériaux** du tronçon VEN_7 vers le secteur de La Bayette (ROM_3).

| INDICES HYDROMORPHOLOGIQUES ET ÉVOLUTION DYNAMIQUE D'UN TRESSAGE | | |
|--|------------------------|------------------------|
| Indices | Tendances | |
| Largeur de la bande active | Expansion | Contraction |
| Taux de végétalisation | Faible | Élevé |
| Indice de sinuosité du chenal dominant | Subrectiligne | Sinueux |
| Indice de tressage | Fort | Faible |
| Évolution altimétrique du lit | Stabilité/Exhaussement | Incision |
| Conclusion : | Tressage durable | Tressage en rétraction |

Tableau 55 : Indices hydromorphologiques d'un tressage révélateurs de son évolution dynamique

Afin d'initier le suivi dynamique de la plaine du Buclet, son analyse morphométrique est réalisée à partir des levés topographiques par drone réalisés dans le cadre de la présente étude, **l'année 2016 constituant ainsi le « point zéro » pour comparaison.**

Différents paramètres morphométriques correspondant à des mesures de surface, volume ou transects sont déterminés, afin de caractériser le tressage du Buclet. À cet effet, la zone du Buclet a fait l'objet du travail ci-dessous présenté à la Figure 132 :

- Délimitation de la bande active ;
- Tracé de l'axe du chenal dominant et des chenaux secondaires ;
- Délimitation des structures alluvionnaires en distinguant les parties végétalisées ;
- Positionnement d'un transect tous les 100 mètres.

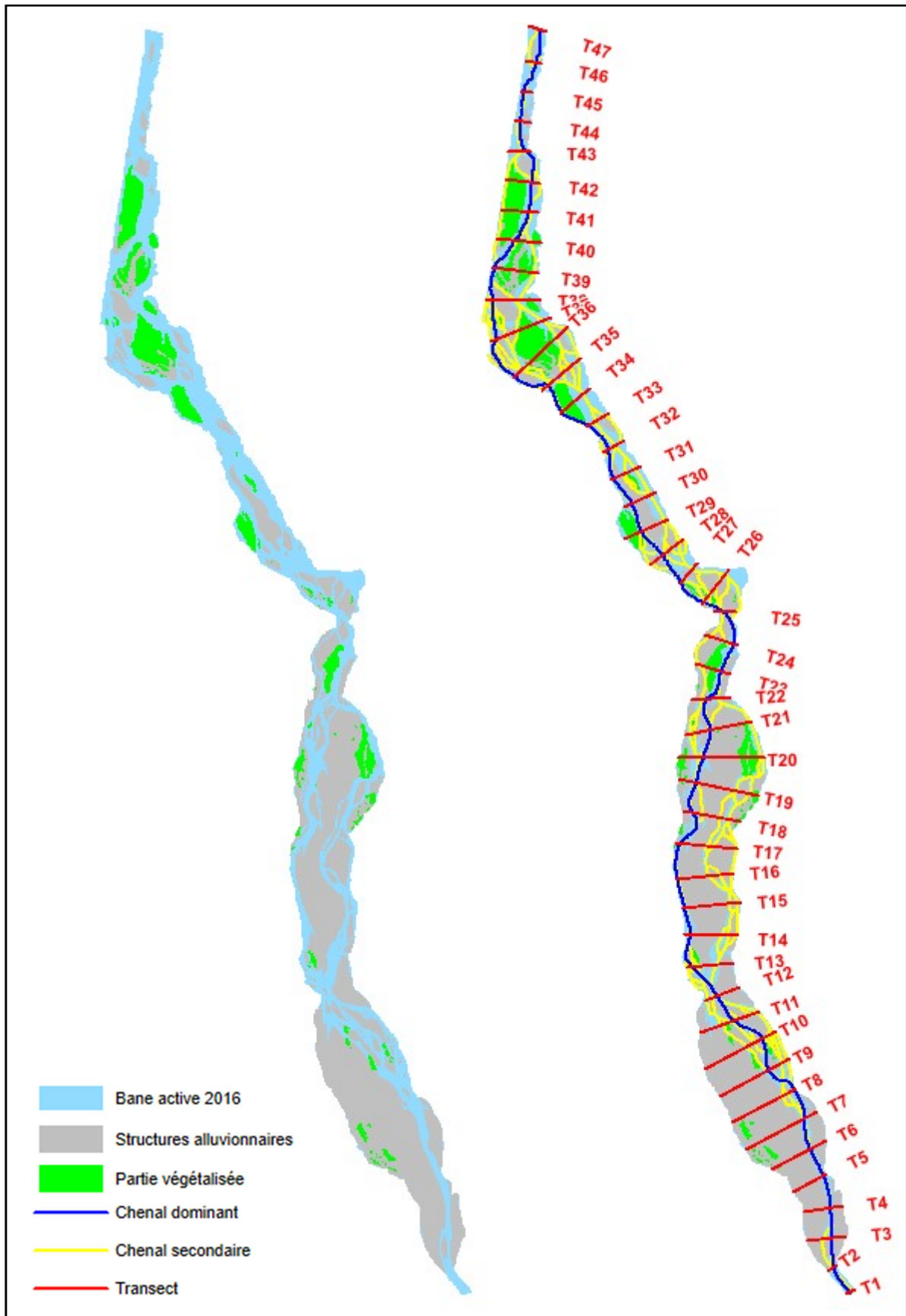


Figure 132 : Éléments préliminaires pour le suivi dynamique 2016 de la plaine du Buclet

Le Tableau 56 présente les différents paramètres et indices hydromorphologiques du tressage du Buclet pour l'année 2016, point zéro du suivi dynamique.

| POINT ZÉRO DU SUIVI DYNAMIQUE DE LA PLAINE DU BUCLET | | | |
|--|---|---|--|
| Nature | Paramètres | Résultats 2016 | Description |
| Morphométrie de la bande active | Largeur à pleins bords | Min : 33 m Moy : 152 m Max : 286 m | Correspond à la largeur de la bande active par transect (Malavoi & Bravard, 2010) |
| | Superficie de la bande active (S) | 72 ha | |
| | Surface des atterrissements | 43 ha | |
| | Surface des bras en eau (S_b) | 30 ha | |
| | Rapport S_b/S | 41% | Correspond au taux de chenalisation |
| | Volume de matériaux stockés | ROM_3 : 70 000 m ³ VEN_7 : 180 000 m ³ | Correspond au stock alluvial |
| | Vitesse de rétraction [1948-2016] | -1,5 ha/an | Permet de connaître la respiration latérale de la bande active (Piégay <i>et al.</i> , 2009) |
| Végétalisation | Taux de végétalisation | 18% | Rapport entre la surface végétalisée des structures alluvionnaires et la surface totale des structures alluvionnaires caractérisant la fixation des structures alluvionnaires et leur niveau de mobilité, et donc la rétraction de la bande active |
| | Stade évolution des structures alluvionnaires | 19% | Correspond au % de structures alluvionnaires ayant atteint un stade d'évolution mature (<i>i.e.</i> structures quasiment non mobilisables – SL ₃ , SL ₄ et SL ₅ et SC ₃ et SC ₄) |
| Sinuosité | Coefficient de sinuosité | ROM_3 : 1,15 VEN_7 : 1,17 | L'augmentation de la sinuosité du chenal dominant de tressage est un indice de rétraction de la bande active, voire de métamorphose du style fluvial (Malavoi & Bravard, 2010). |
| Indices de tressage | Indice de tressage | Min : 1 Moy : 3 Max : 5 | Correspond au nombre de chenaux actifs par transect (Ashmore, 1991) |
| | Indice de longueur | 3,7 | Correspond à la longueur cumulée des chenaux sur la longueur de la bande active (Hong & Davies, 1979 ; Mosley 1981 ; Richards, 1982) |
| Incision | Incision chenal dominant | - | Bon indicateur d'un déficit sédimentaire. Dans ce cas, l'élément moteur du style fluvial en tresses serait altéré, pouvant ainsi conduire à une métamorphose évoluant vers la disparition du tressage. |

Tableau 56 : Synthèse du suivi dynamique 2016 de la plaine du Buclet

L'analyse de l'évolution amont → aval de la largeur de la bande active ne montre pas l'existence d'un gradient, c'est-à-dire une décroissance ou une croissance depuis l'amont vers l'aval (cf. Figure 133). La largeur de la bande active du tressage varie ainsi entre 33 et 286 mètres avec une moyenne de 152 mètres. On constate également l'impact des perturbateurs hydromorphologiques sur la largeur de la bande active :

- Rétrécissement de la bande active provoqué par l'ancien seuil, la largeur de la bande active passant en moyenne de 206 mètres en amont de l'ouvrage à 115 mètres en aval. ;
- Rétraction régulière nettement identifiable de la bande active dans la partie aval du tressage (pK 3 500 mètres) contrainte en rive gauche par la digue de la Croix du Plan et l'entonnement de La Bayette, la bande active perdant ainsi 126 mètres de large depuis l'amont de la digue de la Croix du Plan pour se stabiliser autour de 60 mètres à l'entrée de Bourg d'Oisans.

L'indice de tressage (Ashmore, 1991) ne répond pas non plus à un gradient amont → aval, évoluant entre 1 (monochenalisé) et 5 (tressage) avec un indice moyen de 3. On voit ainsi nettement les tronçons en tresses et la variabilité importante de l'indice de tressage fluctuant régulièrement entre deux et cinq chenaux.

La superposition de l'évolution de la largeur de la bande active avec celle de l'indice de tressage montre qu'il existe une corrélation positive entre les deux paramètres. Lorsque le cours d'eau est monochenalisé (indice de tressage faible égal à 1), la largeur de la bande active a tendance également à être faible (30-60 mètres), ce qui est cohérent, la bande active étant liée à l'étalement et au nombre de bras.

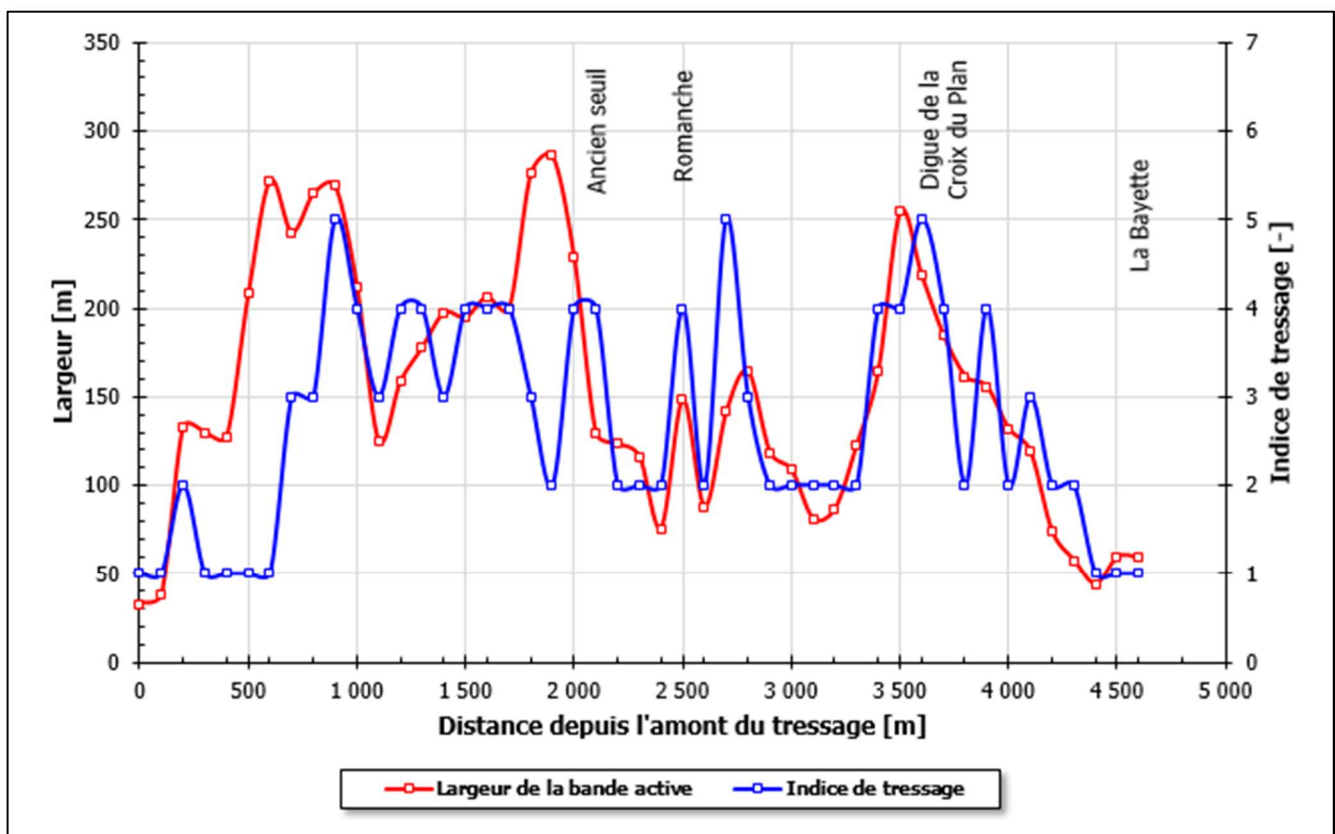


Figure 133 : Évolution amont-aval de la largeur de la bande active et de l'indice de tressage

10 Glossaire

ACCRETION

L'accrétion pour un banc de galets (structure alluvionnaire) est l'action de croître par juxtaposition de matériaux alluvionnaires à la structure préexistante. Ce terme est synonyme plus généralement de dépôt en lit.

AFFOUILLEMENT

Creusement produit lors des crues morphogènes, dans le lit d'un cours d'eau, par opposition à l'érosion qui concerne les berges.

ALLUVIONS

Dépôts meubles d'un cours d'eau (tant en lit mineur que majeur) formés de matériaux ayant été transportés par le transit sédimentaire.

AMORTISSEUR ALLUVIAL

Ce terme présente de manière plus pédagogique les systèmes de stockage-régulation du stock alluvial, *i.e.* les zones de dépôt permettant la régulation du transit sédimentaire.

APPORTS EXTERNES

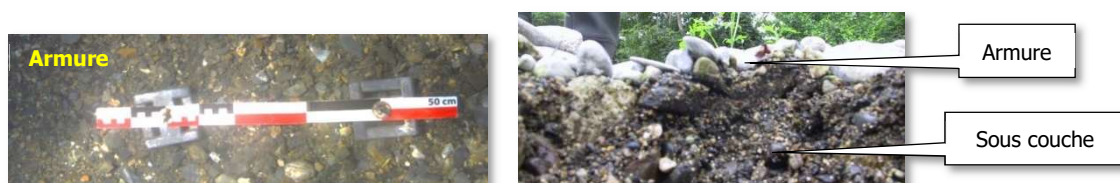
Matériaux provenant du bassin versant mais qui ne viennent pas directement du cours d'eau. Ce sont donc les matériaux issus essentiellement des versants (talus, cônes ou tabliers d'éboulis) ou d'autres cours d'eau (affluents)

APPORTS INTERNES

Matériaux produits directement par le cours d'eau. Ce sont des matériaux stockés en lit tels que les structures alluvionnaires. Les apports internes concernent également les matériaux stockés dans le lit majeur éventuellement sous la forme de terrasses anciennes, la remobilisation de ces matériaux se produisant alors par érosion latérale.

ARMURE

Matériaux alluvionnaires déposés en lit constituant la partie supérieure d'un lit fluvial (rivières à graviers à lit mobile), dont l'épaisseur est celle des plus grosses particules la constituant (Simon, 1986). L'armure masque la sous-couche constituée de matériaux plus fins.



AVULSION

Changement brutal et radical du tracé d'un lit sur plusieurs centaines de mètres, voire kilomètres, lors d'une crue morphogène. Cette situation peut être due à un embâclage généralisé du lit par des bois flottés, une charge alluviale obstruant le lit et favorisant son basculement dans un ancien chenal ou une

gouttière topographique. C'est généralement un phénomène relativement courant dans les styles en tresses où les secteurs s'exhausent (cône torrentiel, delta...).

BANDE ACTIVE

Espace dans lequel s'écoule un cours d'eau et où se concentre l'activité morphogène, notamment les chenaux et dépôts sédimentaires. C'est pour les systèmes en tresses qu'on parle préférentiellement de bande active. En effet, la bande active des cours d'eau en tresses se caractérise par des chenaux et des structures alluvionnaires* non végétalisées qui sont très mobiles. Elle est donc très facilement identifiable.

BASSE FREQUENCE HAUTE MAGNITUDE

Crues globalement supérieures ou égales à la décennale, fortement morphogènes. Il s'agit donc de crues plutôt rares présentant une forte morphogénie.

CASCADE SEDIMENTAIRE

Ensemble d'éléments interconnectés (sources sédimentaires, connecteurs, réservoirs sédimentaires, exutoires) qui produisent et exportent des sédiments. Ces sont de véritables machines à produire, transporter et exporter des sédiments. Spécifique au domaine torrentiel.

CHUTE ALLUVIALE

Chenal de décharge naturel situé entre une structure alluvionnaire latérale et la berge contre laquelle la structure s'est développée. Généralement, cette chute n'est fonctionnelle qu'en crue.

CONTEXTE DYNAMIQUE

Le contexte dynamique se caractérise par deux éléments : le fonctionnement dynamique* et son évolution dynamique*. Ces deux éléments sont intrinsèquement liés et évoluent essentiellement au gré des aléas climatiques et hydrologiques. On pourrait également parler de système dynamique.

CONTRIBUTEUR SEDIMENTAIRE

Affluent du cours d'eau principal contribuant par des apports d'alluvions à son bilan sédimentaire

CORRIDOR ALLUVIAL

Zone de transition entre le milieu aquatique *stricto sensu* (bande active du cours d'eau) et le milieu terrestre *stricto sensu*

CORSETAGE DU LIT

Actions répétitives sur une portion significative de cours d'eau consistant à tenter de se protéger contre l'érosion et/ou les inondations par des travaux lourds (enrochements, épis, endiguements...). L'attendu de ce corsetage est de fixer le tracé en plan du lit. Les aménagements ainsi réalisés constituent alors un véritable corset.

L'effet induit de ce corset est d'enlever au cours d'eau toute possibilité d'évolution latérale (multichenalisation, méandrage...) et donc d'impacter fortement et durablement sa dynamique en limitant sa bande active* et son espace de mobilité*. Cette solution génère souvent lors des crues morphogènes* des risques importants de changement de lit.

DEFLUVIATION

Changement de lit temporaire lors d'une crue, le cours d'eau revenant après la crue dans son lit.

DERNIER MAXIMUM GLACIAIRE

Période la plus proche dans le temps où le glacier atteint un maximum d'expansion dans l'espace. Il ne s'agit pas forcément de son extension maximale qui peut être antérieure à cette période.

DIASPORE

Élément permettant la dissémination d'une espèce végétale (*e.g.* graines, boutures...)

ECOTONE

Transition entre la bande active *stricto sensu* et le boisement latéral

ERODABILITE

Capacité d'une roche à être érodée

ESPECE LITHOPHILE

Espèce se reproduisant sur un substrat grossier en construisant des frayères (comme la truite commune ou le saumon atlantique) ou en collant ses eaux directement sur les matériaux constituant le substrat du lit (comme le chabot). Également appelée « pondeur sous graviers ».

ÉVOLUTION DYNAMIQUE

Évolution du fonctionnement dynamique* liée à des modifications anthropiques et/ou des crues morphogènes*. Cette évolution crée de nouvelles conditions de fonctionnement dynamique*.

EXTRADOS

Berge de rive concave d'un méandre

FONCTIONNEMENT DYNAMIQUE

Dynamique fluviale actuelle d'un cours d'eau. Ce fonctionnement évolue forcément (impact des activités humaines, succession de crues morphogènes* qui le modifie substantiellement). La dynamique d'un cours d'eau est évolutive et est constituée d'une succession de fonctionnements dynamiques différents.

GESTION DYNAMIQUE

Méthode consistant à gérer un cours d'eau en connaissant son fonctionnement dynamique* et en intervenant par des techniques de génie dynamique pour favoriser des réponses dynamiques* acceptables tendant à impacter l'évolution dynamique*.

INCISION

Efoncement vertical du lit, généralement lié à un déficit sédimentaire (modifications climatiques et anthropiques) ou à une érosion régressive.

INRADOS

Berge de rive convexe dans un méandre

METAMORPHOSE FLUVIALE

Évolution dynamique* marquée par une rupture définitive (sans possibilité de restauration à l'identique) dans le fonctionnement dynamique* qui a été initiée par l'anthropisation du cours d'eau.

Les usages ont dans un premier temps pesé sur le fonctionnement dynamique* (extraction de matériaux alluvionnaires, destruction de la végétation – ripisylve et végétation alluvionnaire*, seuils et barrages pour exploiter l'énergie hydraulique...).

Puis, au fil des réajustements géométriques* du lit et à l'effet amplifié de certains phénomènes (débordements, érosion...), les cours d'eau ont été corsetés avec des techniques contraignantes et déconnectées de son fonctionnement (enrochements, seuils, digues...). La métamorphose conduit inéluctablement à une évolution dynamique* irréversible.

MORPHOGENE

Action ou agent susceptible de modifier les formes fluviales. Une crue morphogène engendre des modifications des formes du cours d'eau (lit, berges...).

OSSATURE

Partie du lit formée par les éléments de rugosité, éléments les plus grossiers et les moins mobiles qui peuvent prendre plusieurs formes.

Ces éléments de rugosité peuvent se déposer sur le tapis ou être ancrés en lit (c'est-à-dire imbriqués dans le tapis), c'est en ce sens qu'ils forment l'ossature du lit, leur ancrage et leur masse les rendant peu mobiles.

PAVAGE

Matériaux constitutifs du fond du lit liés à un tri granulométrique et formant une carapace. Le pavage protège les matériaux de la couche interne. Le pavage présente une granulométrie très nettement supérieure à celle de la sous-couche avec une imbrication des matériaux sans tuilage (Bray & Church, 1980).

Un pavage se forme lorsque la charge de fond est inexistante (*e.g.* bloquée en amont par un barrage, supprimée par un reboisement intensif...), voire lorsque le cours d'eau s'est incisé pendant une longue période (Bray & Church, 1980). L'absence de fourniture sédimentaire conduit alors à un tri granulométrique des particules grossières, ce tri s'exerçant de manière permanente. Le pavage est ainsi souvent très stable.

PERTURBATEUR HYDROMORPHOLOGIQUE

Élément transversal présent en lit mineur ayant un impact sur le fonctionnement dynamique* d'un cours d'eau. Il peut ainsi altérer la continuité sédimentaire et/ou écologique.

Cette altération peut conduire à une modification du style fluvial en aval (*e.g.* barrage, seuil altérant fortement la continuité sédimentaire...) : on parle alors de perturbateur majeur. Dans le cas où l'impact n'est que local, on parle de perturbateur secondaire (*e.g.* radier, gué...).

Les perturbateurs peuvent avoir une origine naturelle (seuil naturel), ce sont les perturbateurs géomorphologiques, ou une origine anthropique (barrage, seuil, pont, radier, gué...), il s'agit alors de perturbateurs anthropiques.

PROCESSUS ALLOGENIQUES

Processus externe d'évolution et de régénération. Dans notre domaine, il s'agit des crues débordantes qui viennent régénérer les boisements alluviaux. Ces crues purgent les arbres vieillissants et créent ainsi des taches (au sens biologique du terme) qui sont rapidement exploitées par des espèces pionnières, et ce d'autant plus que la crue aura amené des diaspores*. Cette régénération permet aux boisements alluviaux d'évoluer en présentant des successions végétales adaptées.

PUISSANCE SPECIFIQUE

Energie nécessaire au cours d'eau pour évacuer la charge solide qui lui est imposé. Elle se calcule à partir du poids volumique de l'eau, du débit, de la pente et de la largeur à plein bord.

REAJUSTEMENTS GEOMETRIQUES

Ensemble des réponses physiques (érosion, incision*, sédimentation...) ayant des effets sur la géométrie (latérale et longitudinale) du lit d'un cours d'eau. Ces réponses peuvent être initiées par des à-coups hydrauliques (liés aux crues, inondations, étiages...), mais aussi par des modifications anthropiques.

RECHARGE SEDIMENTAIRE

Technique de génie dynamique consistant à intégrer des matériaux exogènes de forme et de granulométrie compatibles avec le cours d'eau, dans des tronçons à apports insuffisants. L'objectif de cette technique étant de compenser un apport naturel déficitaire.

REMOUS REGRESSIF SOLIDE

Dépôt de matériaux dans la retenue d'un ouvrage transversal (seuil, barrage). Ce remous se dépose d'abord au niveau de l'ouvrage, puis la retenue se remplit en remontant vers l'amont petit à petit au gré des crues.

Les matériaux manquant (piégés dans la retenue) vont générer à l'aval de l'ouvrage une incision* du lit par déficit sédimentaire.

RESILIENCE DYNAMIQUE

Capacité d'un cours d'eau à répondre à un stimulus extérieur (*e.g.* une crue) et à retrouver ainsi un fonctionnement dynamique* équilibré proche du fonctionnement ante-stimulus.

C'est donc la capacité de cicatrisation d'un cours d'eau après une perturbation de sa trajectoire géomorphologique*. Elle est fonction de la réactivité géodynamique (Malavoi & Bravard, 2010).

On considère que les cours d'eau ayant une puissance spécifique supérieure à 35 W/m² ont des capacités de réajustements propres (Brookes, 1988) donc de résilience dynamique.

RESPIRATION

Variations altitudinales du niveau du lit autour d'un niveau moyen. Ces variations sont liées aux crues et au transit sédimentaire. La respiration d'un lit est ainsi caractérisée par le charriage des matériaux le constituant pendant les crues et leur remplacement en fin de crue par d'autres, de telle sorte que le niveau du lit reste quasiment constant.

On parle de respiration latérale pour caractériser l'évolution en plan de la bande active* d'un cours d'eau.

RETROGRADATION

Phénomène d'aggradation d'alluvions formant généralement un dépôt en lit qui se développe de l'aval vers l'amont par appui sur un élément (pile de pont, embâcle, seuil...).

RIFT OU RIFTING

Amincissement de la croûte terrestre formant une dorsale sous-marine

SINUOSITE

Rapport entre la longueur développée du cours d'eau entre deux points en suivant l'axe du lit mineur et la longueur entre les deux mêmes points en suivant l'axe de la vallée.

STOCK ALLUVIAL

Ensemble des matériaux alluvionnaires (alluvions) disponibles en lits mineur et majeur (fond du lit, berges, terrasses alluviales...) et participant actuellement ou de manière différée (lors des épisodes de crues) à la dynamique alluviale d'un cours d'eau.

STRUCTURES ALLUVIONNAIRES

Bancs ou atterrissements correspondant à des exhaussements locaux liés à des réajustements géométriques du lit lors des crues morphogènes. Ils présentent une surface et une subsurface et sont remobilisables tant qu'ils ne sont pas végétalisés.

STYLE FLUVIAL

Morphologie du lit représentative d'un tronçon de cours d'eau. Cette morphologie dépend de divers paramètres (pente, fourniture sédimentaire...) et est variable en fonction de la position du tronçon dans le profil en long du cours d'eau (cf. Figure 4)

SUBSIDENCE

Diminution de la hauteur des fonds marins

SUBSTRAT

Éléments grossiers tapissant le fond d'un lit fluvial. Ce tapis* exclut les éléments de rugosité* et les patches de colmatage* (matériaux fins – argiles, limons et sables – masquant généralement le substrat).

Ainsi, l'armure* et le pavage* (au sens de Bray & Church, 1980) sont des types de substrat liés notamment à la fourniture sédimentaire (plutôt abondante pour l'armure et déficitaire pour le pavage qui est un substrat associé à l'incision du lit).

SUSPENSION

Mode de transport solide concernant les matériaux fins (diamètre > 2 mm) s'effectuant dans la colonne d'eau.

TAPIS

Partie pavée tapissant le fond du lit qui se développe le plus souvent sur des surfaces importantes et qui constitue la partie la plus mobile du lit. Le tapis se développe en surface et son épaisseur est généralement faible (centimétrique à décimétrique). C'est donc le pavage* stricto sensu.

TRANSFERT-REINJECTION DE MATERIAUX

Technique de gestion du stock alluvial* qui consiste à accompagner la dynamique fluviale en transférant des matériaux bloqués (soustrait au stock alluvial*) ou impactant trop fortement le fonctionnement dynamique* et/ou certains usages, et à les transférer mécaniquement dans des zones repérées préalablement où ils pourront être réinjectés dans le stock alluvial* (zone déficitaire) soit par injection-retard* ou directe*, suivant l'effet recherché.

WENTWORTH

Classification granulométrique établie par Wentworth (1922) et adaptée au format Sandre (2002)

| CLASSIFICATION DE WENTWORTH SANDRISEE (2002) | | | | | |
|--|----------|-----------------------|--------------------|------------------------|---|
| Diamètres | | Classification | | | |
| mm | ϕ | Code | Classes | Code | Fractions |
| > 1024 | < -10 | R^W | Rochers | GRO^W | Grossière <i>Fraction charriée lors du transit</i> |
| 256 à 1024 | -8 à -10 | B^W | Blocs | | |
| 128 à 256 | -7 à -8 | PG^W | Pierres Grossières | | |
| 64 à 128 | -6 à -7 | PF^W | Pierres Fines | | |
| 32 à 64 | -5 à -6 | CG^W | Cailloux Grossiers | | |
| 16 à 32 | -4 à -5 | CF^W | Cailloux Fins | | |
| 8 à 16 | -3 à -4 | GG^W | Graviers Grossiers | | |
| 2 à 8 | -1 à -3 | GF^W | Graviers Fins | INT^W | Intermédiaire (gravelo-sablonneuse) <i>Fraction en suspension et charriée</i> |
| 0,5 à 2 | 1 à -1 | SG^W | Sables Grossiers | | |
| 0,0625 à 0,5 | 4 à 1 | SF^W | Sables Fins | FIN^W | Fine <i>Fraction en suspension et colmatante</i> |
| 0,0039 à 0,0625 | 8 à 4 | L^W | Limons | | |
| <0,0039 | > 8 | A^W | Argiles | | |

11 Références bibliographiques

- ADAMS, J., 1979. Gravel size analysis from photographs. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(10).
- AMEZAL, A., CACAS, J., DUTARTRE, M., DEMEYER, P., 1987. L'architecture naturelle des rivières, un atout pour l'aménagement. Casette VHS, Production Agence de l'Eau Seine-Normandie, CEMAGREF.
- ANTOINE, J.M., 2010. Géohistoire des catastrophes et des risques torrentiels. Une histoire de l'environnement pyrénéen (Doctoral dissertation, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II).
- ARCHAMBAUD, G., GIORDANO, L., DUMONT, B., 2005. Description du substrat minéral et du colmatage. Note technique provisoire - CEMAGREF Aix-en-Provence, UR hydrobiologie, 7.
- ARNAUD-FASSETA, G., FORT, M., 2004. La part respective des facteurs hydroclimatiques et anthropiques dans l'évolution récente (1956 - 2000) de la bande active du haut Guil, Queyras. Méditerranée, Géosystèmes montagnards et méditerranéens - mélange offert à Maurice Jorda, 102, pp. 143-156.
- ARNAUD-FASSETA, G., COSSART, E., FORT, M., 2005. Hydro-geomorphic hazards and impact of man-made structures during the catastrophic flood of June 2000 in the upper Guil catchment (Queyras, French Alps). *Geomorphology*, 66, pp. 41-67.
- ARCHAMBAUD, G., GIORDANO, L., DUMONT, B., 2005. Description du substrat minéral et du colmatage. Note technique provisoire - CEMAGREF Aix-en-Provence, UR hydrobiologie, 7.
- ARTELIA, 2012. Etude de danger des travaux de confortement des digues de l'Eau d'Olle. AD Isère Drac Romanche.
- ARTELIA, 2012. Plan de gestion des cours d'eau Haut-Alpins - Phase 2 - Mise en place d'un réseau de suivi géomorphologique. Conseil Général Hautes-Alpes.
- ASHMORE, P. E., 1991. How do gravel bed rivers braid?
- BAILLY-MAITRE, M.C., MONTJUVENT, G., MATHOULIN, V., 1997. Les quatre anciens lacs de l'Oisans (Alpes françaises du Nord). *Revue de Géographie Alpine*, 1, pp. 33-52.
- BALLANTYNE, C.K., 2002. Paraglacial geomorphology. *Quaternary Science Review*, 21, pp. 1935-2017.
- BALLANTYNE, C.K., BENN, D.I., 1994. Paraglacial slope adjustment during recent deglaciation and its implications for slope evolution in formerly glaciated environments. In : Anderson, M.G., & Brooks, S., (eds.), *Advances in hillslope processes*, Wiley and sons, Chichester, pp. 1173-1195.
- BALON, E.K., 1975. Reproductive guilds of fishes: a proposal and definition. *J. Res. Bd. Can.*, 32, pp. 827-864.
- BARDOU, E., 2002. Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin. Thèse de Doctorat. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 188 p.
- BARTSCH, A., GUDE, M., GURNEY, S. D., 2009. Quantifying sediment transport process in periglacial mountain environments at a catchment scale using geomorphic process units. *Geogr. Ann.*, 91A(1), pp. 1-9.
- BATTIN, T.J., KAPLAN, L.A., NEWBOLD, J.D., HANSEN, C.E, 2003. Contributions of microbial biofilms to ecosystem processes in stream mesocosms. *Nature* 426, 439-442.
- BAUDEVIN, C., 2001. Contribution à l'étude de l'altitude atteinte par les glaciers quaternaires dans quelques vallées alpines. *Géol. Alp.*, 76, pp. 83-116.
- BEAUDOIN, A.B., KING, R.H., 1994. Holocene, paleoenvironment record preserved in a paraglacial alluvial fan, Sunwapta pass, Jasper National Park, Alberta, Canada. *Catena*, 22, pp. 227-248.

- BECKER, B., 1982. Dendrochronologie und Paläoökologie subfossiler Baumstämme aus Flußablagerungen. Ein Beitrag zur nacheiszeitlichen Auenentwicklung im südlichen Mitteleuropa. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, vol. 5.
- BELETTI, B., DUFOUR, S., PIEGAY, H., 2010. Typologie des rivières en tresses du bassin RMC. Rapport, ZABR, 105 p.
- BENTTITI, F., GAUDILLAT, V., MALENGRAU, D., QUERE, E., 2002. Cahiers d'habitats Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 6. Espèces Végétales. La Documentation française. 271 pp.
- BENTTITI, F., GAUDILLAT, 2002. Cahiers d'habitats Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 7. Espèces animales. La Documentation française. 353 pp.
- BJORNN, T.C., BRUSVEN, M.A., MOLIMAU, M.O., MILLIGAN, J.H., KLANT, J.H., CHACHO, E., SCHA, C., 1977. Transport of granitic sediment in streams and its effects on insects and fish. Rapport B-036-IDA, College of Forestry, Wildlife and range sciences, 43 BONNET-STAU, I., 1998. Mécanismes d'initiation et facteur déclenchants des laves torrentielles dans les Alpes françaises – Contribution à la maîtrise du risque. Thèse de Doctorat. Ecole des Mines de Paris, 230 p.
- BORLAND, W.M., 1960. Stream channel stability. United States Bureau of Reclamation. Denver.
- BOURDIN, L., 2004. Les rivières en tresses sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse, bilans et perspectives de gestion. ENGREF, mémoire de Master, 57 p.
- BRAVARD, J.P., 1986. Le Rhône du Léman à Lyon. La Manufacture, Lyon, 451 p.
- BRAVARD, J.P., 1989. La métamorphose des rivières des Alpes françaises à la fin du Moyen-Âge et à l'époque moderne. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 25, pp. 145-157.
- BRAVARD, J.P., PEIRY, J.L., 1993. La disparition du tressage fluvial dans les Alpes françaises sous l'effet de l'aménagement des cours d'eau. *Zeitschrift. Geomorph. Suppl. Bd.*, 88, pp. 67-79.
- BRAVARD, J.P., 1994. L'incision des lits fluviaux : du phénomène morphodynamique naturel et réversible aux impacts irréversibles. *Revue de Géographie de Lyon*, 69(1), pp. 5-10.
- BRAVARD, J.P., 1998. Deux dimensions spécifiques de l'approche géomorphologique : le temps et l'espace dans les systèmes fluviaux. *Annales de Géographie*, 599, pp. 3-15.
- BRAVARD, J.P., 2001. Les réponses des systèmes fluviaux à une réduction des flux d'eau et des sédiments sous l'effet du reboisement en montagne. 168ème session du Comité technique de la Société Hydrotechnique de France, colloque forêts et eau, 26 au 28 septembre 2001. Nancy.
- BRAY, D.I., CHURCH, M., 1980. Armored versus paved gravel beds. *Jour. Hydraul. Div.*, 106, pp. 1937-1940.
- BRICE, J.C., 1960. Index for description of channel braiding, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 71, 1833.
- BRIERLEY, G.J., HICKIN, E.J., 1985. The downstream gradation of particle sizes in the Squamish River, British Columbia. *Earth, Surface, Process and Landforms*, 10, pp. 597-606.
- BROOKES, A., 1988. Channelized rivers: perspectives for environmental management. John Wiley & Sons, Chichester.
- BROUSSE, G., ARNAUD-FASSETTA, G., CORDIER, S., 2011. Evolution hydrogéomorphologique de la bande active de l'Ubaye (Alpes française) de 1956 à 2004 : contribution à la gestion des crues. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 3/2011, pp. 307-318.
- BRUNKE, M., GONSER, T., 1997. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biol.*, 37, pp. 1-33.
- BURGEAP, 2009. Connaissance de la nappe de la plaine de Bourg d'Oisans. SACO.

- BURGEAP, 2012. Etude de faisabilité pour la restauration des habitats aquatiques – Affluents de la Romanche. Fédération de Pêche de l'Isère.
- CAINE, N., 1974. The geomorphologic processes of the alpine environment, in: Ives, J.D., Barry, R.G. (des.), *Arctic and Alpine Environment*, London, Methuen, pp. 721-748.
- CAIN, N., MOOL, P.K., 1982. Landslides in the Kolpu Khola drainage, Middle Mountains, Nepal. *Mountain Research and development*, 22, pp. 157-173.
- CASSEL, M., FANTINO, G., DEPRET, T., BULTINGAIRE, L., PIEGAY, H., LAVAL, F., GILLES, G., 2017. Premiers retours d'expérience sur l'utilisation des transpondeurs actifs Ultra Haute Fréquence pour le suivi de la mobilité des galets en rivières. Transport Solide et Morphodynamique des Rivières, 8-9 novembre 2017, Villeurbanne.
- CATER 65, 2003. Plan de gestion des structures alluvionnaires de l'Adour entre Aurensan et Castelnau-Rivière-Basse. SIDCEA.
- CHAPMAN, D.W., 1988. Critical review of variable used to define effects of fine redds of large salmonids. *Transactions of the American Fisheries Society*, 117(1), pp. 1-21.
- CHIN, C., MELVILLE, B., RAUDKIVI, A., 1994. Streambed armoring. *Jour. Hydraul. Eng.*, 120, pp. 899-918.
- CHORLEY, R.J., KENNEDY, B.A., 2003. *Physical geography: a system approach*. Prentice Hall International, London, 370 p.
- CHURCH, M., RYDER, J.M., 1972. Paraglacial sedimentation: consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. *Geological Society of America Bulletin*, 83, pp. 3059-3072.
- CHURCH, M., JONES, D., 1982. Channel bars in gravel-bed rivers. In: Gravel-bed rivers, Hey R.D., Bathurst J.C., Thorne C.R. (éds.), John Wiley & Sons: Chichester, pp. 291-338.
- CHURCH, M., 1983. Pattern of instability in a wandering gravel bed channel. *Special Publication of the International Association of Sedimentologists*, 6, pp. 169-180.
- CHURCH, M., MC LEAN, D., WOLCOTT, J., 1987. River bed gravels : sampling and analysis. Thorne C.R., Barthurst J.C., Hey R.D. (éds), *Sediment transport in gravel-bed rivers*, Wiley, Chichester, pp. 43-88.
- CHURCH, M., ZIMMERMAN, A., 2007. Form and stability of step-pool channels. *Research Progress. Water Resources Research*, 43W03415, pp. 1-21.
- COSSART, E., FORT, M., 2008. Consequences of landslides dams on alpine river valleys: examples and typology from the French Southern Alps. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 62, pp. 75-88.
- COSSART, E., BRAUCHER, R., FORT, M., BOURLES, D.L., CARCAILLET, J., 2008. Slope instability in relation to glacial debulking in alpine areas Upper Durance catchment, southeastern France : evidence from field data and ¹⁰Be cosmic ray exposure ages. *Geomorphology*, 95, pp. 3-26.
- COSSART, E., 2014. Des sources sédimentaires à l'exutoire : un problème de connectivité ? Réflexion sur le fonctionnement géomorphologique des bassins montagnards. HDR, Université Blaise Pascal – Clermont III, 208 p.
- COSTERTON, J.W., 2000. Biofilms in the New Millennium : musings from a peak in Xanadu. *Symposia-Society for general microbiology*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 329-344.
- COUSSOT, P., 1993. Rhéologie des boues et des laves torrentielles. Etude de dispersions et suspensions concentrées. CEMAGREF éditions, Anthony. 415 p.
- COUSSOT, P., 1996. Les laves torrentiels. *Connaissances à l'usage du praticien*. CEMAGREF éditions, Anthony. 177 p.
- COUTTERAND, S., 2010. Etude géomorphologique des flux glaciaires dans les Alpes Nord-occidentales au Pléistocène récent, du maximum de la dernière glaciation aux premières étapes de déglaciation, Université de Savoie, thèse, 468 p.

- COUVERT, B., LEFORT, P., PEIRY, J.L., BELLEUDY, P., 1999. La gestion des rivières. Transport solide et atterrissements. Etude des agences de l'eau n°65, 94 p.
- CRUDEN, D.M., HU, X.Q., 1993. Exhaustion and steady state models for predicting landslide hazards in the Canadian Rocky Mountains. *Geomorphology*, 8, pp. 279-285.
- CUMMINS, K.W., LAUFF G.H., 1969. The influence of substrate particle size on the microdistribution of stream macrobenthos. *Hydrobiologia*, 34(2), 145-181.
- D'AGOSTINO, V., 1996. Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto torrentizio nei bacini montani del Trentino Oriental. AIIA. I problemi dei grandi comprensori irrigui. Novara 6-7 giugno 1996. Pp. 111-123.
- DATRY, T., DOLE-OLIVIER, M.J., MARMONIER, P., CLARET, C., PERRIN, J.F., LAFONT, M., BREIL, P., 2008. La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. *In* : Ingénieries – EAT, 54, 3-18.
- DENIAU, 1997. Rapport expertise sur le torrent de l'Eau d'Olle. AD Isère Drac Romanche.
- DOWNING, J., 2005. Environmental instrumentation and analysis handbook. John Wiley and sons, London.
- DOWNING, J., 2006. Twenty-five years with OBS sensors : the good, the bad and the ugly. *Continental Shelf Research*, 26(17-18), pp. 2299-2318.
- ERTM, BURGEAP, 2006. Etude hydraulique et de transport solide du Vénéon - Secteur La Béarde et Plan du Lac. Commune de St-Christophe-en-Oisans.
- ETRM, 2007. Etude de transport solide et des dépôts dans la zone du Buclet. Gravières du Vénéon.
- EVARD, M., MICHA, J.C., 1995. Relation entre la diversité du substrat et la diversité biologique dans un bief belge de la rivière Meuse. *Annis Limnol.* (31), pp. 93-103.
- FERGUSSON, R.I., 1993. Understanding braiding processes in gravel-bed rivers : progress and unsolved problems. In: Best, J.L. & Bristow C.S. (éds.). Braided Rivers, *Geological Society Special Publications*, n° 75, 73-87.
- FLEZ, C., LAHOUSSE, P., 2004. Example of Holocene alpine torrent response to environmental change: contribution to assessment of forcing factors. *Quaternaire*, 15(1-2), pp. 167-176.
- FLEZ, C., GARITTE, G., 2005. Contribution à la connaissance des facteurs responsables de la rétraction des bandes actives torrentielles. Tentative de régionalisation à travers l'exemple de quatre bassins-versants élémentaires (Ubaye et haute Durance). L'érosion entre société, climat et paléo-environnement, pp. 291-296.
- FORMAN, R.T., GODRON, M., 1986. Landscape ecology. John Wiley and sons, Chichester. 620 p.
- FRYIRS, K., BRIERLEY, G.J., 2001. Variability in sediment delivery and storage along river courses in Bega catchment, NSW, Australia: implications for geomorphic river recovery, *Geomorphology*, 38(3), pp. 237-265.
- GARDENT, M. (2014) Inventaire et retrait des glaciers dans les Alpes françaises depuis la fin du Petit Âge Glaciaire. Thèse, Université de Grenoble, 444 p.
- GASOWSKI, Z., 1994. L'enfoncement du lit de la Loire. *Revue de géographie de Lyon*. 69(1). pp. 41-45.
- GAYRAUD, S., HEROUIN, E., PHILIPPE, M., 2002. Le colmatage minéral des cours d'eau : revue bibliographique des mécanismes et des conséquences sur les habitats et les peuplements de macroinvertébrés. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* (365/366), pp. 339-355.
- GILBERT, C.K., 1914. The transportation of debris by running water. *US Geological Survey Professional Paper* 86, p. 221.
- GILVEAR, D., BRAVARD, J., 1993. Dynamique fluviale. Amoros C. & Petts G.E., Hydrosystèmes fluviaux, Masson, pp. 61-82.

- GLEYZE, J.F., 2001. Etude topologique de la fonctionnalité des réseaux. Géomatique et espace rural. Journées Cassini, 26-28 septembre, Montpellier, pp. 235-252.
- GODARD, A., 1961. L'efficacité de l'érosion glaciaire en Ecosse du Nord, *Revue de Géomorphologie dynamique*, 12, pp. 32-42.
- HABIDIS, S., 2006. L'évolution contemporaine du bassin versant de la Drôme : le banc de galets un indicateur du tarissement de la charge de fond. Mémoire de Master II, Université de Lyon.
- HARVEY, A.M., 2001. Coupling between hillslopes and channels in upland fluvial systems: implications for landscape sensitivity, illustrated from the Howgill Fells, northwest England. *Catena*, 42(2), pp. 225-250.
- HEY, R.D., THORNE, C.R., 1983. Accuracy of surface samples from gravel bed material. *Journal of Hyd. Eng.*, 109, pp. 842-851.
- HJULSTROM, F., 1935. Studies of the Morphological Activity of Rivers as Illustrated by the River Fyris. *Geografiska Annaler*, Vol. 18, pp. 121-123.
- HONG, L.B., DAVIES, T.R.H., 1979. A study of stream braiding, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 79, pp. 391-394,
- HOWARD, A.D., KEETCH, M.E., VINCENT C.L., 1970. Topological and geometrical properties of braided rivers., *Wat. Resour. Res.*, 6, pp. 1659-1667.
- HUGGETS, R.J., 2007. Fundamentals of geomorphology, Routledge, 2nd edition, 458 p.
- HYDRETTUES, 2007. Schéma d'aménagement de la Romanche - Etat des lieux, diagnostic et scenario. SYMBHI.
- HYDRETTUES, 2010. Dignes de la Romanche, Lignarre et l'Eau d'Olle. AD Isère Drac Romanche.
- HYDRETTUES, 2012. Etude multifonctionnelle des rivières et milieux aquatiques du bassin versant de la Romanche. SACO.
- HYNES, H.B.N., 1970. The ecology of running waters. Liverpool University Press, Liverpool. 555 p.
- JONES, A.P., 2000. Late quaternary sediment sources, storage and transfers within mountain basin using clast lithological analysis Pineta Basin, central Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, 34, pp. 145-161.
- JONHSON, A-M. & RODINE, J-R., 1984. Debris flow. *In* Brundsen, D. & Prior, D-B. (eds.) : slope Instability, Wiley and sons, Chichester, pp. 257-361.
- KELLERHALS, R., BRAY, D., 1971. Sampling procedures for coarse fluvial sediments. *Journal of the Hydraulics Division*, 97(8).
- KLINGEMAN, P., EMMETT, W., 1982. Gravel bed load transport processes. Hey R.D., Barthust J.C., Thorne C.R. (éds), Gravel bed rivers, Wiley, Chichester, 875 p.
- KNIGHTON, A.D., 1984. Fluvial forms and processes. Edouards Arnold e.d., London, 218 p.
- KONDOLF, G., 1997. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environnemental Management*, 21(4), pp. 533-551.
- LANDON, N., 1996. L'évolution du profil en long des affluents du Rhône moyen : du constat aux principes de gestion. *Revue de Géographie de Lyon*, 71(4), pp. 363-376.
- LANE, E., 1955. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. Proceedings of the America Society of Civil Engineers. *Journal of the Hydraulics Division*, 81, pp. 745-761.
- LEDUC, P., 2013. Étude expérimentale de la dynamique des rivières en tresses. Thèse, Université de Grenoble, 234 p.
- LE LAY, Y.F., PIEGAY, H., 2007. Le bois mort dans les paysages fluviaux français : éléments pour une gestion renouvelée. *L'Espace géographique*, 1, pp. 51-64.

- LÉOPOLD, L., WOLMAN, M., 1957. River channel patterns-braided, meandering and straight. *US Geol. Surv. Prof. Paper*, 282B, pp. 39-85.
- LE ROY LADURIE, E., 1967. Histoire du climat depuis l'An Mil. Paris : Flammarion.
- LIÉBAULT, F., TAILLEFUMIER, F., 2000. L'évolution contemporaine de la bande active des principaux affluents de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion (Préalpes du Sud, France). *Géocarrefour*, 75(4), pp. 327-336.
- LIÉBAULT, F., PIEGAY, H., 2002. Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of Southeastern France. *Earth, Surface, Processes and Landforms*, 27(4), pp. 425-444.
- LIÉBAULT, F., GOMEZ, B., PAGE, M., MARDEN, M., PEACOCK, D., RICHARD, D., TROTTER, C.M., 2005. Land-use change, sediment production and channel response in upland regions. *River Research and Applications* (21), pp. 739-756.
- LIÉBAULT, F., PIEGAY, H., FREY, P., LANDON, N., 2008. Tributaries and the management of main-stem geomorphology. In : Rice S.P., Roy A., Rhoads B.L., (Eds.) *River confluences, tributaries and the fluvial network*. John Wiley & Sons, Chichester., pp. 243-270.
- LIÉBAULT, F., REMAITRE, A., PETEUIL, C., 2013. Géomorphologie des rivières de montagne. In : Recking, A., Richard, D., Degoutte, G., (éds.). *Torrents et rivières de montagne. Dynamique et aménagement*. Editions Quae, pp. 15-89.
- LOCK, M., WALLACE, R., COSTERTON, J., VENTULLO, R.M., CHARLTON, S.E., 1984. River epilithon : toward a structural-fonctional model. *Oikos*, 10-22.
- LUDWIG, W. & PROBST, J.L., 1998. River sediment discharge to the oceans : present days controls and global budgets. *American Journal of Science*. 298, pp. 265-295.
- MACKIN, J.F., 1948. Concept of the graded river. *Geological Society of America Bulletin*, 59, pp. 463-512.
- MADEJ, M. A., OZAKI, V., 1996. Channel response to sediment wave propagation and movement, Redwood Creek, California, USA. *Earth, Surfaces, Processes and Landforms*, 21, pp. 911-927.
- MALAVOI, J.R., 1989. Typologie des faciès d'écoulement ou unités morphodynamiques des cours d'eau à haute énergie. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 315, pp. 189-210.
- MALAVOI, J.R., SOUCHON, Y., 1996. Dynamique fluviale et dynamique écologique. *La Houille Blanche* (6/7), pp. 98-107.
- MALAVOI, J.R., SOUCHON, Y., 2002. Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 365/366, pp. 357-372.
- MALAVOI, J.R., BRAVARD, J.P., 2010. Éléments d'hydromorphologie fluviale. ONEMA, Comprendre pour agir, 223 p.
- MALAVOI, J.R., GARNIER, C.C., LANDON, N., RECKING, A., BARAN P., 2011. Éléments de connaissances pour la gestion du transport solide. ONEMA, 213 p.
- MANO, V., 2008. Processus conditionnant les apports fins dans les retenues. Optimisation des méthodes de mesures et modélisation statistique. Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 289 p.
- MEUNIER, M., 1991. Éléments d'hydraulique torrentielle. Etudes Montagne, n°1. CEMAGREF, Anthony. 278 p.
- MEYBECK, M., LAROCHE, L., DURR, H.H., SYVITSKI, J.P.M., 2003. Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers. *Global and Planetary Change*. 39(1-2), pp. 65-93.
- MIDDLETON, G.V., 1978. Hydraulic interpretation of sand size distributions. *Jour. Geology*, 84, pp. 405-426.

- MINSHALL, G.W., 1984. Aquatic insect-substratum relationships. Resh, V.H. and Rosenberg, D.M. (eds) *The Ecology of Aquatic Insects*. Praeger Publishers, New York.
- MIRAMONT, C., GUILBERT, X., 1997. Variations historiques de la fréquence des crues et évolution de la morphogenèse fluviale en moyenne Durance. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, pp. 325-338.
- MONJUVENT, G., 1978. Le Drac, morphologie, stratigraphie et chronologie quaternaire d'un bassin alpin, USTM, Thèse, Grenoble, 430 p.
- MONJUVENT, G., MARNEZY, A., 1986. Processus d'évolution des versants dans les Alpes françaises. *Revue de Géologie Alpine*, 62, pp. 87-105.
- MONTGOMERY, D.R., BUFFINGTON, J.M., 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 1095, pp. 596-611.
- MOSLEY, M.P., 1981. Semi-determinate hydraulic geometry of river channels, south island, new zealand, *Earth surf. Proc. Land.*, 6, pp. 127-137.
- MOSLEY, M.P., 1983. Variability of water temperature in the braided Ashley and Rakaia Rivers. *New Zealand Journal of Marine and freshwater Research*, 17, pp. 341-342.38.
- MOSS, A.J., 1972. Bed-load sediments. *Sedimentology*, 18, pp. 159-219.
- OLIVE, L.J., OLLEY, J.M., MURRAY, A.S., WALLBRINK, P.J., 1994. Spatial variation in suspended sediment transport in the Murrumbidgee River, NSW, Australia, IAHS publication, 224, pp. 241-250.
- OSTERKAMP, W.R., HEDMAN, E.R. Perennial-streamflow characteristics related to channel geometry and sediment in Missouri River basin. *USGS, Professional Paper* 1242.
- OTTO, J. C., 2006. Paraglacial sediment storage quantification in the Trutmann Valley, Swiss Alps. Thèse de doctorat non publiée, cité par Kummert M. (2012) Cartographie géomorphologique de la dynamique sédimentaire et torrentielle de haute montagne. Le cas du bassin-versant des aiguilles rouges d'Arolla, val d'Hérens (V.S.). Univ. Lausanne.
- OTTO, J.C., KLEINOD, K., KÖNIG, O., KRAUTBLATTER, M., NYENHUIS, N., ROER, I., SCHNEIDER, M., SCHREINER, B., DIKAU, R., 2007. HRSC-A data: a new high-resolution data set with multi-purpose applications in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 312, pp. 179-197.
- PACCAUD, G., ROULIER, C., 2010. Espace nécessaire aux cours d'eau à méandres. Rapport final pour l'Office Fédéral de l'Environnement (Suisse), Division Préventions des Dangers., p. 101.
- PATERSON, W.S.B., 1994. The physics of glaciers, UK, Pergamon, 3ème édition, 480 p.
- PAUTOU, G., PONSERO, A., JOUANNAUD, P., 1997. Les changements de biodiversité dans les interfaces alluviales. Application à la plaine d'inondation du Rhône entre Genève et Lyon et à la réserve naturelle du marais de Lavours. *Revue d'écologie alpine*, 4, 35-63.
- PEIRY, J.L., SALVADOR, P.G., NOUGUIER, F., 1994. L'incision des rivières dans les Alpes du Nord : état de la question. *Revue de Géographie de Lyon*, 69(1), pp. 47-56.
- PELLEGRINI, M., PEREGO, S., TAGLIAVINI, S., TONI, G., 1979. La situazione morfologica degli alvei dei corsi d'acqua emiliano-romagnoli : stato di fatto, cause et effetti. La programmazione per la difesa attiva del suolo e la tutela delle sue risorse. Modena, 28/29 juin 1979.
- PIEGAY, H., PAUTOU, G., RUFFINONI, C., 2003. Les forêts riveraines des cours d'eau: écologie, fonctions et gestion. Forêt privée française.
- PIEGAY, H., BELETTI, B., LIEBAULT, F., 2009. Typologie des rivières en tresses du bassin RMC. ZABR, rapport de l'année 1, 99 p.
- PIEGAY, H., ARNAUD, F., CASSEL, M., DEPRET, T., ALBER, A., MICHEL, K., ROLLET, A-J., VAUDOR, L., 2016. Suivi par RFID de la mobilité des galets : retour sur 10 ans d'expérience en grandes rivières. *Bulletin de la Société de Géographie de Liège*. 67, pp. 77-91.

- PIERSON, T.C., 1980. Erosion and deposition of debris flows at mount Thomas, North Canterbury, New Zealand. *Earth, Surface, Processes and landforms*, 5, pp. 227-247
- RICHARDS, K., 1982. *Rivers : forms and process in alluvial channels*. (L. a. Methuen, Ed.).
- POIREL, A. & BESSY, P., 2004. Etude du transport solide dans la retenue du Chambon ; Mesures 2002-2003 et extension par modélisation. Rapport interne, EDF.
- PUSH, M., FIEBIG, D., BRETTAR, I., EISENMANN, H., ELLIS, B.K., KAPLAN, L.A., LOCK, M.A., NAEGELI, M.W., TRAUNSPURGER, W., 1998. The role of micro-organisms in the ecological connectivity of waters. *Freshwater Biology*, 40(3), 453-495
- REMAÎTRE, A., 2006. Morphologie et dynamique des laves torrentielles : application aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud). Thèse de Doctorat. Université de Caen – Basse Normandie.
- RICE, S., 1995. The spatial variation and routine sampling of spawning gravels in small coastal stream. Working paper, 06/1995. British Columbia Ministry of Forest, Victoria B. C., 41 p.
- RICHARDS, C., HOST, G.E., ARTHUR, G.W, 1994. Identification of predominant environmental factors structuring stream macroinvertebrates communities within a large catchment. *Freshwat. Biol.*, 29, pp. 285-294.
- RTM, 2008. Etude hydraulique du Vénéon et de la Muzelle pour la protection du camping Le Champ du Moulin. Commune de Vénosc
- RTM, 2012. Etat des lieux et programme d'actions du bassin versant de la Lignarre. Commune de Bourg d'Oisans.
- ROTUNNO, R., & FERRETTI, R., 2003. Orographic effects on rainfall in MAP cases IOP 2b and IOP 8. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 129(588), pp. 373-390.
- RUNDLE, A., 1985. Braid morphology and the formation of multiple channels, Rakaia River, *New Zealand. Z. F. Geomorph. N. F. Suppl. Bd.*, 55, pp. 15-37.
- RYDER, J.M., 1971. The stratigraphy and morphology of para-glacial alluvial fans in the South-central British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, pp. 423-433.
- SAULNIER, D., 1999. Analyses comparées de l'instabilité latérale de six secteurs en tresses : Giffre, Drôme, Roubion, Aigues, Bléone, Asse, Université Lumière, Lyon, p. 62.
- SCHUMM, S.A., 1977. The fluvial system. John Wiley & Sons, Chichester, 338 p.
- SEAR, D., NEWSON, M., 1993. Sediment and gravel transportation in rivers, including the use of gravel traps. Final report n° C5/384/2 - National River Authority.
- SHARP, M., 1984. Annual moraine ridges at Skalafelljökull, South-East Iceland. *Journal of Glaciology*, 30, pp. 82-93.
- SIMON, L., 1986. Transports solides de sédiments de granulométrie non uniforme. Mémoire de DEA - Laboratoire National d'Hydraulique - EDF - Chatou.
- SITZMANN, P., 1961. Les variations récentes des glaciers du bassin de la Romanche. *Revue de Géographie Alpine*, 49(1), pp. 167-178.
- SLAYMAKER, O., 1977. Estimation of sediment yield in temperate alpine environments. *In: Erosion and solid matter transport in inland waters*. IAHS Publ., 122, pp.
- SMART, G.M., JAEGGI, M., 1983. Sediment transport on steep slopes. *Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, 68 p.
- SOGREAH, 2006. Etude relative au curage de la Sarenne. Syndicat Unique de l'Oisans.
- SOGREAH, 2009. Etude de transport solide de la Haute Romanche. DDAF Hautes-Alpes.
- STARKEL, L., 1987. Long-term and short-term rhythmicity in terrestrial landforms and deposits. *In: Rampino, M.R., Sanders, J.E., Newman, W.S., Königsson, L.K. (eds.), Climate : history, periodicity and predictability?* New York, Van Nostrand Reinhold, pp. 323-332.

- TAGLAVINI, S., 1978. Le modificazioni geomorfologiche e idrogeologiche conseguenti all'attività estrattiva nella conoide del torrente Enza. Attività estrattiva dei materiali inerti da costruzioni : effetti sugli ambienti e risorse alternative. 17 mars 1978.
- TAL, M., GRAN, K., MURRAY, B., PAOLA, C., HICKS, M., 2004. Riparian vegetation as a primary control on channel characteristics in multi-thread rivers. pp. 1-16.
- TRICART, J., 1977. Types de lits fluviaux en Amazonie brésilienne. *Annales de Géographie*, 473, pp. 1-54.
- TRIMBLE, S.W., 1983. A sediment budget for the Coon Creek Basin in the Driftless area, Wisconsin, 1853-1977, *Am. Journ. of Science*, 283, pp. 454-474.
- VACHER, J.P., GENIEZ, M., 2010. Les reptiles de France, Belgique, Luxembourg et Suisse. Collection Parthénope. Editions Biotope. Mèze. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris. 544 p.
- VANNOTE, R., MINSHALL, G., CUMMINS, K., SEDELL, J., CUSHING, C., 1980. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 371, pp. 130-137.
- VERNEAUX, J., 1973. Cours d'eau de Franche-Comté Recherches écologiques sur le réseau hydrographique du Doubs Essai de biotypologie. *Ann. Scient. Univ. Fr. Comté Biol. Anim.*, 3(9), pp. 1-260.
- VERVIER, P., GIBERT, J., MARMONIER, P., DOLE-OLIVIER, M.J., 1992. A perspective on the permeability of the surface freshwater-groundwater ecotone, *Journal of the North American Benthological Society*, 11, 93-102.
- VIERS, G., 1967. Eléments de géomorphologie. Fernand Nathan, 207 p.
- WALKER, R.G., 1990. Perspective, facies modelling and sequence stratigraphy, *Jour. Sediment. Petrol.*, 60, pp. 777-786.
- WALLING, D.E., 1983. The sediment delivery problem, *Hydrology*, 69.
- WECH, D.M., 1970. Substitution of space for time in a study of slope development, *Journal of Geology*, 78, pp. 234-239.
- WENTWORTH, C., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, pp. 311-327.
- WIEDERKEHR, E., DUFOUR, S., PIÉGAY, H., 2008. Suivi physique et biologique des rivières en tresses. Zone Atelier Bassin du Rhône, 41 p.
- WILLIAMS, G.P., MUNDIE, J.H., 1978. Substrate size selection by stream invertebrates and the influence of sand. *Limnol. Oceanogr.* 23, pp. 1030-1033.
- WILLIAMS, G., WOLMAN, M., 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. *USGS Professional Paper*, 1286.



HYDRETUDES

Ingénierie de l'eau - Maîtrise d'œuvre

Conseil - Etudes - Maîtrise d'œuvre - Assistance technique - Formation

Eau et infrastructures hydrauliques

- Eau potable/Traitement
- Irrigation
- Eau usée/Epuration
- Eau pluviale

- Risques naturels
- Aménagements fluviaux et portuaires
- Dignes, ouvrages de protection

Environnement aquatique

- Gestion des ressources
- Préservation, restauration, valorisation
- Développement durable
- Règlementation



Siège social Centre technique principal

851 Route de Champ Fuzon
74 370 ARGONAY

Tél : 04 50 27 27 26
Fax : 04 50 27 25 64
contact@hydretudes.com

Agence Dauphiné-Provence

3, rue Pradier
26 100 VOMANS SUR ISERE

Tél : 04 78 40 30 07
Fax : 04 78 31 04 37
contact-romans@hydretudes.com

SARL Océan Indien

« Les Kréolis »
8-10, rue Axel Doreuil
97 410 SAINT PIERRE

Tél : 01 62 96 82 45
Fax : 01 62 92 69 05
contact.reunion@hydretudes.com

SARL Alpes du Sud

Bât 2 - 106 Forest d'Entrail
29, rue du Forest d'Entrail
04 000 GAP

Tél : 04 92 21 92 26
Fax : 04 92 22 87 83
contact-gap@hydretudes.com

SARL Grand Sud-Pyrénées

15 bis, chemin du Chapitre
31 100 TOULOUSE

Tél : 05 62 24 07 43
Fax : 05 62 24 07 39
contact-toulouse@hydretudes.com

Agence Sud-Ouest

41, Rue des Fontaines
64 100 LÈZE

Tél : 05 64 27 02 76
contact-toulouse@hydretudes.com

SARL Alpes du Nord

Alpicoor
50, Voie Albert Einstein
73 800 FRANCIN

Tél : 04 79 96 46 57
Fax : 04 79 23 02 59
contact-savoie@hydretudes.com