



l'oxygène
à la source

Maître d'Ouvrage

SILA Syndicat Mixte du Lac d'Annecy

Marché 2019-003 Etude pour l'élaboration du plan de gestion sédimentaire des cours d'eau du bassin versant du Fier et du Lac d'Annecy et définition des espaces de bon fonctionnement complémentaires



Phase 4 Suivi



N° d'Affaire : ARI 18-076

Version 3

Avril 2022

SUIVI ET VISA DU DOCUMENT

Maitre d'ouvrage : SILA Syndicat Mixte du Lac d'Annecy
7 rue des Terrasses
74962 CRAN GEVRIER

0450667777

sil@sil.fr

Affaire : Marché 2019-003 Etude pour l'élaboration du plan de gestion sédimentaire des cours d'eau du bassin versant du Fier et du Lac d'Annecy et définition des espaces de bon fonctionnement complémentaires Ruisseau d'Entrevernes

ARI 18-076

Lionel GUITARD

Phase Etat des lieux - EPCI

Emetteur : HYDRETUDES - Centre technique principal
815, route de Champ Farçon
74370 ARGONAY
04.50.27.17.26
contact@hydretudes.com



Document : Rapport Suivi
3

Indice	Date	Mise à jour	Rédigé par	Vérifié par
1	20/04/2021		JB	LG
2	16/03/2022	V2 selon remarques SILA	JB	LG
3	20/04/2022	V3 selon remarques COTECH	JB	LG
4				
5				

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	5
1.1. Objectifs du CCTP :.....	5
1.2. Le suivi météorologique	5
1.3. Généralités sur le suivi dynamique.....	6
2. LE SUIVI DYNAMIQUE A L'ECHELLE D'UN TRONÇON.....	8
2.1. Suivi topographique.....	8
2.1.1. Suivi topographique par campagnes répétées de topographie et bathymétrie	8
2.1.2. Suivi topographique par campagnes répétées de Lidar ou de photogrammétrie.....	9
2.2. Suivi des structures alluvionnaires et suivi de la propagation de charge alluviale.....	11
2.2.1. Quantification surfacique de la bande active et des structures alluvionnaires.....	11
2.2.2. Quantification volumétrique des structures alluvionnaires	12
2.2.3. Suivi des atterrissements et de la propagation de charge alluviale par placettes peintes sur les structures alluvionnaires (Chapuis, 2012 ; Liébault et Laronne, 2008).....	13
3. LE SUIVI DYNAMIQUE A L'ECHELLE LOCALE.....	15
3.1. Suivi photographique et re-photographique	15
3.2. Suivi du remplissage des plages de dépôts et des volumes curés	19
3.3. Suivi granulométrique.....	21
3.4. Suivi localisé du stock alluvial	23
3.5. Suivi du transport solide par puçage RFID	24
3.6. Suivi du colmatage	28
3.7. Suivi de l'érosion latérale.....	32
3.7.1. Le suivi photographique à partir de plusieurs points fixes (Cf 3.1).....	32
3.7.2. Le suivi par tiges d'érosions	33
3.7.3. Le suivi par photogrammétrie " Structure from Motion " (SfM) (Westoby et al., 2012 ; Micheletti et al., 2015).....	34
3.8. Suivi local 5 : Suivi de l'évolution des faciès d'écoulement	35
4. PRECONISATIONS DE SUIVI DYNAMIQUE.....	37
4.1. Préconisations à l'échelle des fiches actions.....	37
4.2. Préconisations à l'échelle globale.....	43
4.2.1. Vol Lidar	43
4.2.2. Suivi photographique et granulométrique.....	44
4.2.3. Suivi des volumes curés dans les plages de dépôts	44

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma de l'approche métrologique.	6
Figure 2 : Comparaison des données Lidar 2012 et 2018 sur le vallon du Fier.....	10
Figure 3 : Exemple de la classification utilisée pour estimer la mobilité des particules (Gave de Pau, Yassine, 2020).....	14
Figure 4 : Exemple de suivi de routine d'un ouvrage de type piège à embâcle sur le torrent du Furon (38).	16
Figure 5 : Exemple de suivi de travaux de renaturation de la Rhune (86) dans le Guide de l'AFB, 2019 avec a) cours d'eau en phase travaux (dérivation avec lit emboîté), b) débit plein bord avant débordement, c) crue débordant sur le lit majeur restreint, d) 4 ans après travaux.	17
Figure 6 : Exemple des fiches disponibles dans les annexes du Guide de l'AFB de 2019.	19
Figure 7 : Exemple du fichier excel INRAE sur la plage de dépôts du Bresson.....	20
Figure 8 : Feuille de calculs automatisée de la granulométrie.....	22
Figure 9 : Matériel nécessaire pour la granulométrie.	23
Figure 10 : Exemple de mesure d'un atterrissement.....	24
Figure 11 : (a)Pit-tag de 23 et 19 mm, petite antenne de recherche (b) et (c) galets percés avant insertion d'un PIT-tag.	25
Figure 12 : Représentation schématique d'un dispositif de traçage sédimentaire RFID (Pêche aux outils scientifiques – 9 octobre 2020 –Niévroz et Miribel (01)).....	26
Figure 13 : Exemple de carte de mobilité de traceurs RFID sur le torrent du Bastan (65).....	27
Figure 14 : Caractéristiques techniques des traceurs RFID actifs et passifs (Pêche aux outils scientifiques – 9 octobre 2020 –Niévroz et Miribel (01)).	28
Figure 15 : Comparaison entre deux nuages de points et utilisation du Plugin M3C2 pour quantifier le recul d'une berge (Virmoux et al., 2016).	35
Figure 16 : Clés de classification des faciès d'écoulement et illustrations photographiques des faciès rencontrés sur le Chéran (Chéran.fr à partir de Malavoi et Souchon, 2002).	36
Figure 17 : Délimitation des vols Lidar.....	44

LISTE DES TABLEAUX

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

1. Introduction

1.1. Objectifs du CCTP :

Cette phase a pour objectif de proposer les modalités de suivi approprié permettant de déclencher les opérations d'entretien, de gestion et de restauration ainsi que les opérations post-crue préconisées en phase 3.

Le programme de suivi permettra de pouvoir suivre l'impact et l'efficacité des actions réalisées sur l'évolution morphologique globale des cours d'eau.

Le prestataire proposera un protocole de suivi qui déterminera, si nécessaire :

- une méthodologie de suivi global, à conduire sur tout ou partie du bassin versant Fier et Lac d'Annecy, qui pourrait être portée par le SILA dans son rôle de coordination et d'animateur du Contrat de bassin ;
- une méthodologie de suivi local, permettant notamment de piloter les actions opérationnelles locales, avec des points précis de vigilance.

Les cadres techniques de ces protocoles devront être définis précisément : démarche à suivre, objectifs, indicateurs de suivi, fréquence de suivi, moyens humains et techniques à mobiliser, etc. Ces protocoles devront être pragmatiques. Les coûts liés à la mise en place et au fonctionnement du protocole de suivi seront précisément évalués.

1.2. Le suivi métrologique

L'ensemble des éléments présentés dans le présent rapport pour établir le diagnostic hydromorphologique du bassin versant du Fier 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 peu 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.

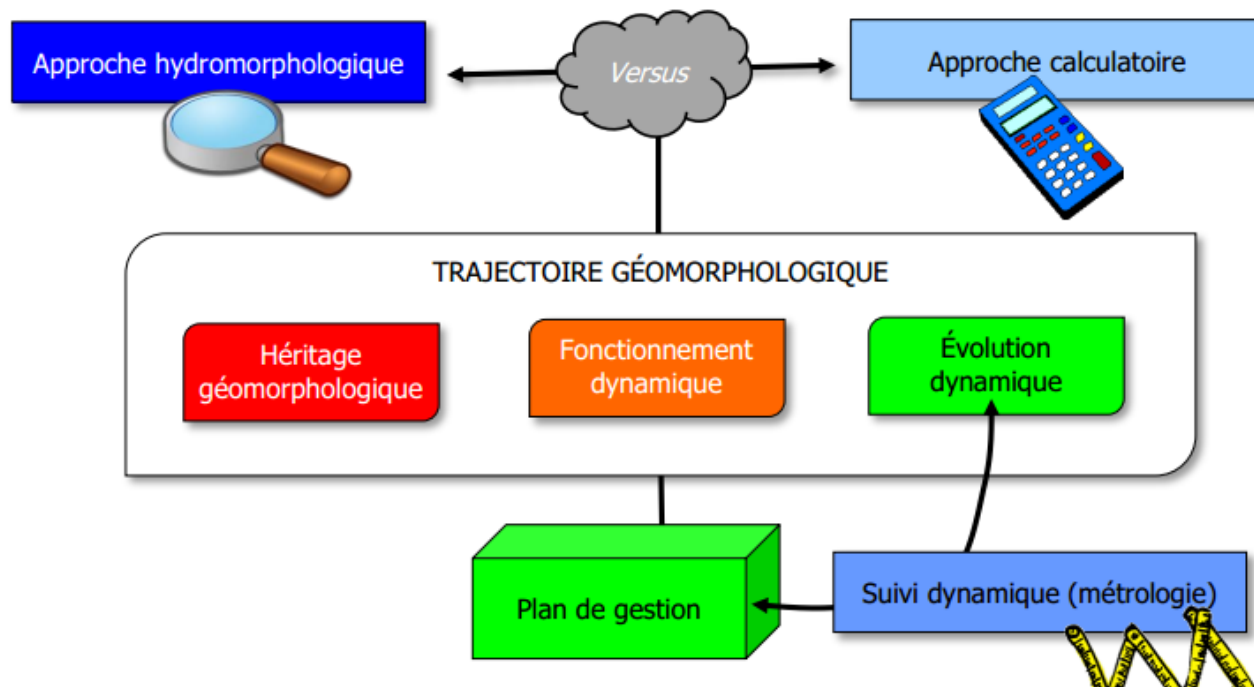


Figure 1 : Schéma de l'approche métrologique.

1.3. Généralités sur le suivi dynamique

L'hydromorphologie est une science récente et dans la plupart des bassins versants, le recul en termes de connaissance des processus géomorphologiques actifs et de la trajectoire géomorphologique est insuffisant. En effet, le recul en termes d'observations, de suivi et de mesures effectives (volume de la ressource sédimentaire, transfert du stock alluvial, nature des alluvions...) est encore assez limité.

Un suivi dynamique est une démarche scientifique basée sur des indicateurs simples qui permet :

- d'améliorer la connaissance sur la trajectoire hydromorphologique du cours d'eau ;
- d'adapter de manière permanente l'accompagnement dynamique à la réalité de l'évolution dynamique du cours d'eau ;
- d'améliorer la gestion sur le long terme.

Ce suivi se veut adapté à chaque cours d'eau et repose sur des méthodes rustiques et robustes, c'est-à-dire simple à mettre en œuvre et facile à interpréter dont une partie pourrait être mise en œuvre directement par le SILA, s'il le souhaite, après une formation dispensée à cet effet par HYDRETUDES.

Il peut être appliqué à différentes échelles (globales et locales) et permet de suivre plusieurs objectifs :

- suivi de la trajectoire géomorphologique du cours d'eau pour évaluer et améliorer les opérations dynamiques ;
- Suivi post-crue morphogène afin de caractériser la dynamique de la crue ;

- suivi des actions proposées ou d'opérations de restauration hydromorphologique afin d'évaluer leurs impacts et éventuellement préciser et affiner ces opérations ;
- suivi de la dynamique hydromorphologique à l'échelle locale.

2. Le suivi dynamique à l'échelle d'un tronçon

Ce suivi à l'échelle globale d'un tronçon doit permettre de mieux apprécier la trajectoire géomorphologique du cours d'eau et la dynamique de crue mais aussi d'évaluer et éventuellement adapter les actions du PGS en fonction des résultats. Pour ce faire, il s'agit d'assurer le suivi des différents compartiments par la mise en place de mesures rustiques et robustes.

Cette partie vise à expliquer la méthodologie des différents types de suivis à l'échelle d'un tronçon. Les préconisations en lien avec les fiches actions seront présentées dans la dernière partie.

2.1. Suivi topographique

Objectifs :

Le diagnostic a montré que l'incision se développe sur une bonne partie des linéaires étudiés de manière plus ou moins importante.

Le suivi topographique permettra de connaître :

- l'incision effective du lit et son évolution ;
- les zones d'exhaussement du chenal ;
- l'impact des actions menées sur le cours d'eau et/ou des forçages.

En fonction des résultats, les actions à mener pourront être adaptées.

2.1.1. Suivi topographique par campagnes répétées de topographie et bathymétrie

Objectifs :

Amélioration de la connaissance de l'évolution précise du fond du lit par comparaison de profil en long voire de profils en travers.

Protocole de mise en place du suivi :

La comparaison d'un profil avec un autre doit intégrer les éléments suivants :

- Prendre le profil fond du lit,
- Utiliser un pas (espacement des points) pertinent (le plus réduit surtout si le linéaire est faible pour avoir des éléments de comparaison très robustes,
- Prendre le profil à l'axe, en privilégiant les zones les plus profondes,
- Réalisation de profils en long identiques, c'est-à-dire même pas d'espacement des points et mêmes points.

Cette technique sera ainsi très précise et permettra de suivre concrètement l'évolution du lit (comblement de fosses d'incision, passage de bouffées sédimentaires, impact des injections et/ou réinjection, etc...). montrant la comparaison de profils à précision différente.

Pour le **profil en long** les éléments à lever (en suivant les directives *supra*) sont les suivants :

- Les **singularités topographiques** rencontrées éventuellement (seuils, mouille, haut-fond...). En excluant les obstacles en lit tels que les embâcles de bois,
- Pour les **confluences**, le point de confluence doit être le point aval du chenal du cours d'eau secondaire (affluent) et un point à l'axe du cours d'eau principal
- Les **bras secondaires** avec leurs raccordements avec le chenal principal (amont et aval), c'est-à-dire que leur tracé doit intégrer obligatoirement en amont comme en aval un point du chenal principal. Comme les chenaux principaux, les chenaux des bras doivent être levés à l'axe.

Dans le cas où des **profils en travers** seront levés les préconisations suivantes pourront être mises en œuvre :

- Les **berges latérales** (RD et RG). Ces berges latérales doivent être marquées dans la topographie et caractérisées *a minima* par un point bas et un point haut. Toutefois si la berge est haute ou complexe (glissement de berge...) plus de points seront nécessaires
- **Plusieurs points** permettant d'appréhender la nature de la section du chenal principal dont deux décrivent les limites RD et RG du chenal (notés ici : 1 et 2), un (noté ici : x) est positionné au point le plus profond
- Le (ou les) **chenal(ux) secondaire(s) rencontré(s)** dans le profil en travers, levés notamment par 3 points caractéristiques, dont deux forment les limites latérales entre la zone en eau et les berges (noté ici 1 et 2) et un est positionné à l'axe du chenal (noté ici x), c'est-à-dire la zone la plus profonde. Ces points seront complétés autant que de besoins par des points complémentaires pour permettre d'appréhender la configuration du profil du bras
- Les **singularités topographiques** telles que les atterrissements de galets, clairement identifiés par plusieurs points dont deux délimitant leur début et leur fin dans le profil en travers (notés ici 1 et 2), et un leur point haut (noté ici x), complétés par autant de points que de besoin pour appréhender la morphologie du bras secondaire
- Les **zones végétalisées** seront également indiquées dans les rendus (notamment *via* des carnets de profils en travers).

La comparaison des profils en long s'effectuera par superposition du profil ancien et du profil levé post-crue morphogène.

Qui, Matériel et coût de l'opération :

A externaliser

1200€ par jour pour 5km de profil en long au GPS différentiel

1200€ par jour pour 2km de profil en long au théodolite dans un chenal plus encaissé

2.1.2. Suivi topographique par campagnes répétées de Lidar ou de photogrammétrie

Objectifs :

Cette répétition de Lidar ou de Modèle Numérique d'Élévation est très utilisée pour caractériser et quantifier la distribution spatiale des changements morphologiques, les processus et les transferts sédimentaires (Heckmann et Véricat, 2018). Cette méthode est communément appelée le MNT des différences (DoD « DEM of Difference »). La comparaison de différentes années permettra donc de

quantifier les différences altimétriques dans le chenal et ainsi comparer des profils en long mais également des profils en travers.

Différences d'altitude mesurées à partir
des données LIDAR 2012 et 2018.

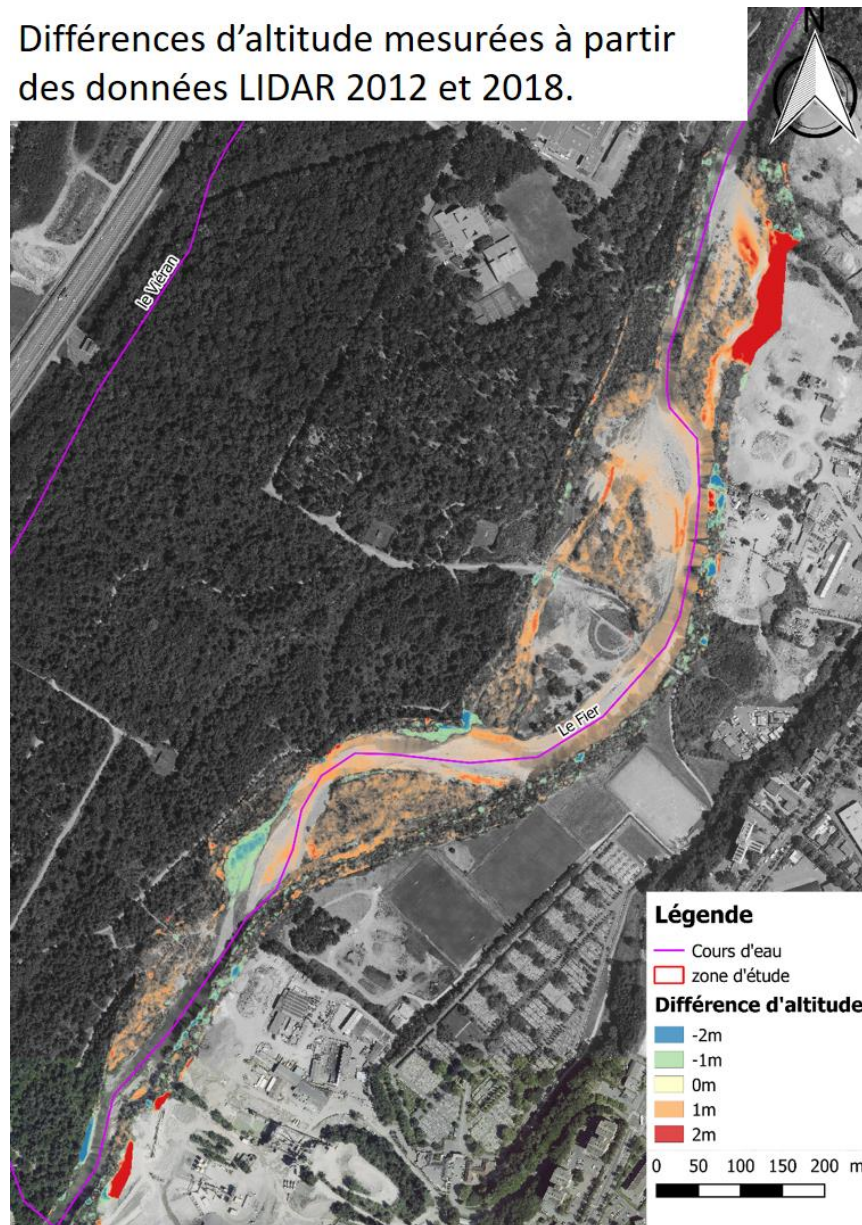


Figure 2 : Comparaison des données Lidar 2012 et 2018 sur le vallon du Fier.

Qui, Matériel et coût de l'opération :

A externaliser

Campagne photogrammétrique = 1500€ par jour pour un linéaire survolé d'environ 2km

Prix d'une acquisition Lidar de 2 à 10€/ha selon les conditions de vol et les densités de points requises

2.2. Suivi des structures alluvionnaires et suivi de la propagation de charge alluviale

Objectifs :

Pour un fonctionnement d'un tronçon, ces deux suivis sont abordés simultanément. Il est essentiel de connaître et de suivre les structures alluvionnaires et la vitesse de propagation de la charge alluviale pour améliorer la connaissance du transit sédimentaire, lisser une éventuelle incision et en ultime recours pour mieux cibler la recharge sédimentaire. Ce suivi permet également de caractériser le rôle des structures alluvionnaires dans l'alimentation en charge solide de l'écoulement de crue puis d'améliorer la connaissance de la propagation des matériaux injectés en fonction des sites et des techniques de réinjection.

Ces suivis sont à la base des suivis locaux mais la mise en place de **plusieurs suivis locaux** identiques en différents points du bassin versant permet une meilleure compréhension du fonctionnement global. **Les campagnes Lidar** permettant d'effectuer le suivi topographique génèrent **des orthophotographies**. Ces images permettent également d'effectuer un suivi des structures alluvionnaires par l'intermédiaire :

- **De la quantification de la taille de la bande active et des structures alluvionnaires.** La bande active se définit comme l'emprise des chenaux en eau et des bancs de galets non végétalisés remaniés lors des crues morphogènes (Bravard et Petit, 1997 ; Fort et al., 2002 ; Brousse et al., 2011). Répéter dans le temps, la vectorisation permettra de quantifier l'évolution de la largeur de la bande active et de la superficie des atterrissements et de fait, de caractériser la potentielle dynamique d'ouverture ou de fermeture de la bande active ;


- **De la quantification du volume des structures alluvionnaires.** Il est possible à partir du Lidar de mesurer la superficie et la hauteur moyenne de chaque atterrissement afin d'en extraire les volumes. Ces mesures de hauteur et de superficie peuvent être complétées si besoin par des visites de terrain. ;

- **De la quantification de la surface des affleurements/seuils rocheux.** L'apparition des seuils rocheux sont des marqueurs du tarissement sédimentaire et de la dynamique d'incision ;

- **D'une analyse qualitative du stade d'évolution** de chaque atterrissement à partir de l'analyse de son degré de végétalisation (Rapport entre la surface végétalisée et la surface dénudée de l'atterrissement, la hauteur et le type de strate végétale qui composent l'atterrissement).

2.2.1. Quantification surfacique de la bande active et des structures alluvionnaires

Protocole de mise en place du suivi :

- (1) Créer une couche SIG vecteur de type polygone ;
- (2) Vérifier que la couche se trouve dans le même système de projection que l'orthophotographie ;
- (3) Vectoriser la bande active ;
- (4) Création d'un champ SURFACE dans la table attributaire ;
- (5) Calcul de la superficie avec l'outil Open Field Calculator  ;
- (6) Diviser la superficie par la longueur du cours d'eau vectorisé afin d'obtenir la largeur moyenne de la bande active ;

(7) Comparer cette superficie avec les années précédentes.

Il est possible de faire la même opération sur des orthophotographies et photographies anciennes géoréférencées.

L'analyse de l'évolution de la taille de la bande active se fait également par mesure de la largeur de la bande active par transect. Une couche polygone avec des transects tous les 50m perpendiculaires au cours d'eau est créée. Il faut ensuite remplir la largeur de la bande active pour chaque transect. Il est également possible de vectoriser uniquement le chenal en eau (en étiage) et de le comparer avec les années précédentes afin d'observer la mobilité des chenaux en eau.

Qui, Matériel et coût de l'opération :



A externaliser pour le Lidar et l'orthophotographie

Logiciel de SIG Qgis

En interne pour le traitement cartographique sous Qgis

2.2.2. Quantification volumétrique des structures alluvionnaires

Protocole de mise en place du suivi :

- (1) Sous QGis, créer une couche SIG vecteur de type polygone ;
- (2) Vectoriser les atterrissements ;
- (3) Création d'un champ SURFACE dans la table attributaire ;
- (4) Calcul de la superficie avec l'outil Open Field Calculator  ;
- (5) Création d'un champ hauteur ;
- (6) Renseigner ce champ par l'estimation de la hauteur moyenne à l'aide des profils en travers du Lidar avec l'outil Terrain Profile  (Plugin Qgis gratuit) ou à l'aide de mesure sur le terrain ;
- (7) Calculer les volumes $V = \text{Hauteur} \times \text{Superficie}$;
- (8) Comparer ces volumes entre les années.

Qui, Matériel et coût de l'opération :

A externaliser pour le Lidar et l'orthophotographie

Logiciel de SIG Qgis

En interne pour le traitement cartographique sous Qgis (Possible pour un stagiaire) – 1 jour

2.2.3. Suivi des atterrissements et de la propagation de charge alluviale par placettes peintes sur les structures alluvionnaires (Chapuis, 2012 ; Liébault et Laronne, 2008)

Protocole de mise en place du suivi :

- (1) Au préalable, sélectionner des emplacements des placettes selon les fiches actions, l'accessibilité de l'atterrissement ou du dépôt de charriage, de la fréquentation touristique (un carré bleu ou orange attire l'œil des curieux et perturbe le suivi !!!)
- (2) Prendre une photo à la verticale de cette placette et de l'atterrissement avec une mire photographique ;
- (3) effectuer une granulométrie via cette photo sous basegrain ou effectuer une granulométrie de surface par la méthode Wolman Pebble Count (développé dans le paragraphe 3.1) sur une zone à proximité de la placette (cf fiche granulométrie) ;
- (4) Peindre à l'aide d'une bombe de peinture à l'huile une placette de 1m² ;
- (5) Suivre la placette (photo à la verticale) après chaque crue ou annuellement (repeindre si besoin) ;
- (6) Comparer les deux photographies ;
- (7) Renseigner dans un tableau Excel la gamme granulométrique des dépôts ou des particules exportés, les débits, la dynamique (en cas de colmatage ou de végétalisation). Cela permettra de définir des seuils de mise en charriage des différentes gammes granulométriques et donc de pouvoir estimer le transport et la mobilité de la charge alluviale ;
- (8) s'il n'y a pas de crue, un suivi après les hautes eaux annuelles permettra aussi d'estimer la potentielle (im)mobilité des particules. Lors ces visites annuelles, la placette peut être repeinte au cas où la peinture se soit effacée. L'absence de mobilité des particules est un résultat en soit et permet de caractériser l'immobilité d'un atterrissement et donc sa potentielle vulnérabilité face à la végétalisation.
- (9) Pour faciliter l'interprétation des résultats, il est possible de suivre la classification suivante (Chapuis 2012 in Yassine, 2020) :

Proposition de classification de la mobilité des particules :

- 1 => Aucune mobilité ni dépôt ;
- 2 => Dépôt de sédiment fins ;
- 3 => Mobilité partielle faible : peu de particules sont mobilisées, mais les limites de la placette sont toujours clairement visibles, la placette n'est pas complètement déstructurée ;
- 4 => Mobilité partielle moyenne : de nombreuses particules sont mobilisées, mais les limites de la placette sont toujours clairement visibles, la placette n'est pas complètement déstructurée ;
- 5 => Mobilité partielle forte : seules quelques particules restent en place couvrant moins de 10% de la surface de la placette. Les contours originels de la placette ne sont plus identifiables ;
- 6 => Disparition de la placette peinte : mobilité totale.

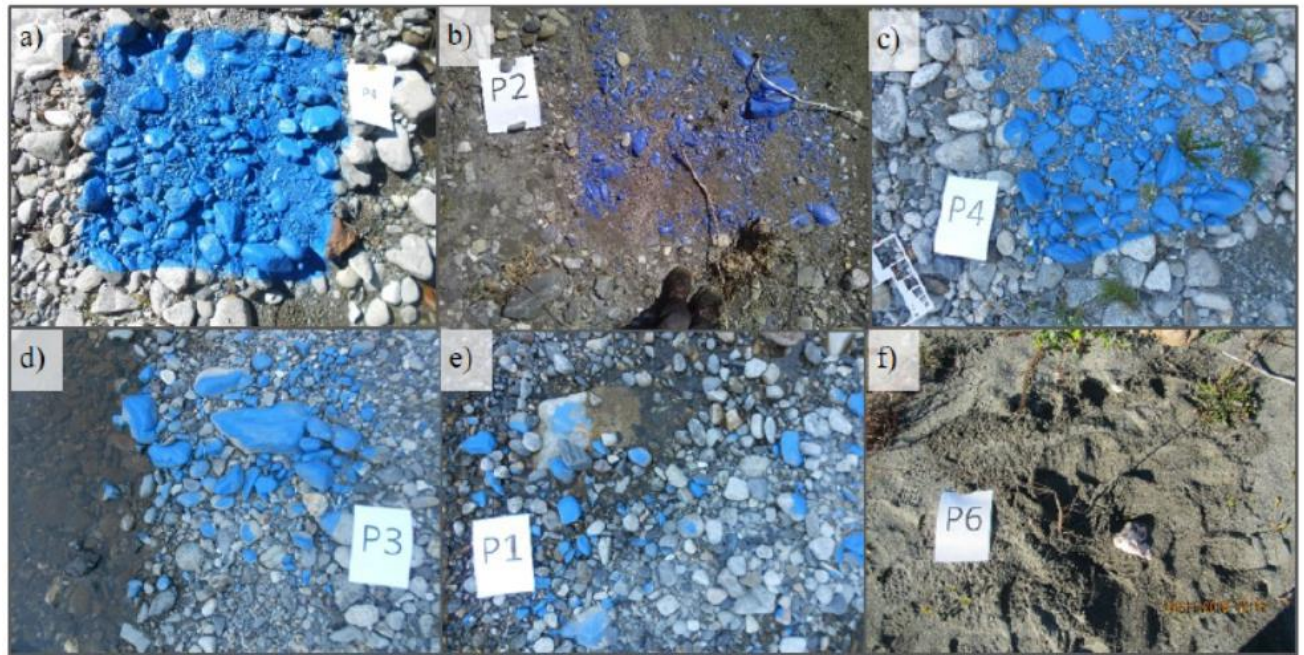


Figure 3 : Exemple de la classification utilisée pour estimer la mobilité des particules (Gave de Pau, Yassine, 2020).

S'il n'y a pas de crue, un suivi après les hautes eaux annuelles permettra aussi d'estimer la potentielle (im)mobilité des particules.

Lors des visites annuelles, la placette peut être repeinte au cas où la peinture se soit effacée. L'absence de mobilité des particules est un résultat en soit et permet de caractériser l'immobilité d'un atterrissement et donc sa potentielle vulnérabilité face à la végétalisation.

Qui, Matériel et coût de l'opération :

En interne

Mètre : 6.50€

Bombe de peinture à l'huile : 50€ les 12

Appareil photo : 250€

3. Le suivi dynamique à l'échelle locale

Ces suivis sont à la base des suivis locaux mais la mise en place de **plusieurs suivis locaux** identiques en différents points d'un tronçon voire du bassin versant permet une meilleure compréhension du fonctionnement global.

Cette partie vise à expliquer la méthodologie des différents types de suivis à l'échelle locale. Les préconisations en lien avec les fiches actions seront présentées dans la dernière partie.

3.1. Suivi photographique et re-photographique

Objectifs :

Le suivi par rephotographie est largement utilisé lors des analyses diachroniques. Il consiste à venir reprendre année après année et crue après crue la même photographie avec le même point de vue afin de pouvoir caractériser des potentielles évolutions. Ce suivi est inspiré du Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau de l'AFB, 2019 et de l'Observatoire des paysages de la Garonne mis en place par le SMEAG et le laboratoire GEODE. L'objectif est de mettre en place un **observatoire photographique** à l'échelle du bassin versant du Fier en menant des campagnes de rephotographies (la même photographie avec le même point de vue) après chaque crue ou lors de visite de routine annuelle. La construction d'une base de données photographiques permettra à terme de caractériser et d'illustrer les potentielles évolutions.

La création de cette **base de données photographique** doit se coupler avec la connaissance des débits de la station de référence du bassin la plus proche pour chaque cliché. La campagne photographique est à mener de préférence en période hivernale lorsque la végétation est la moins présente avec un débit faible sauf en cas de photographie liée à la végétalisation de la bande active et des atterrissements.

Pour aller plus loin, ce suivi peut aussi se baser sur des clichés anciens retrouvés dans les archives. La comparaison des photographies avec des clichés anciens, avant et après crue, avant et après travaux... peut aussi être un support de communication vers le grand public sur des thématiques de paysage et d'évolution des milieux. La comparaison pourra être valoriser sur les promenades ou dans des conférences, livrables...

En fonction des sites et des formes rephotographiés, ce suivi permet de compléter :

- **Le suivi topographique** du chenal et notamment de l'incision. Par exemple, la rephotographie de point singulier comme les seuils rocheux. En effet, l'augmentation de la superficie de ces seuils rocheux est un indicateur du déficit sédimentaire. De même que la rephotographie d'ouvrages affouillés permet aussi de suivre l'incision au droit de ces ouvrages et de la quantifier ;
- **Le suivi des structures alluvionnaires** via la rephotographie d'atterrissements. La comparaison entre photographies permettra de connaître la mobilité ou l'absence de mobilité de chaque forme ;
- **Le suivi de la propagation de la charge alluviale et du transport solide** via la rephotographie d'atterrissements, de plages de dépôts, d'ouvrages perturbant le transit sédimentaire...;
- **Le suivi des apports sédimentaires** au chenal via la rephotographie des érosions de berges remarquables et des confluences ;
- **Le suivi des ouvrages ;**

- Le suivi des actions.**Juin 2018****Septembre 2019****Aout 2020**

Figure 4 : Exemple de suivi de routine d'un ouvrage de type piège à embâcle sur le torrent du Furon (38).

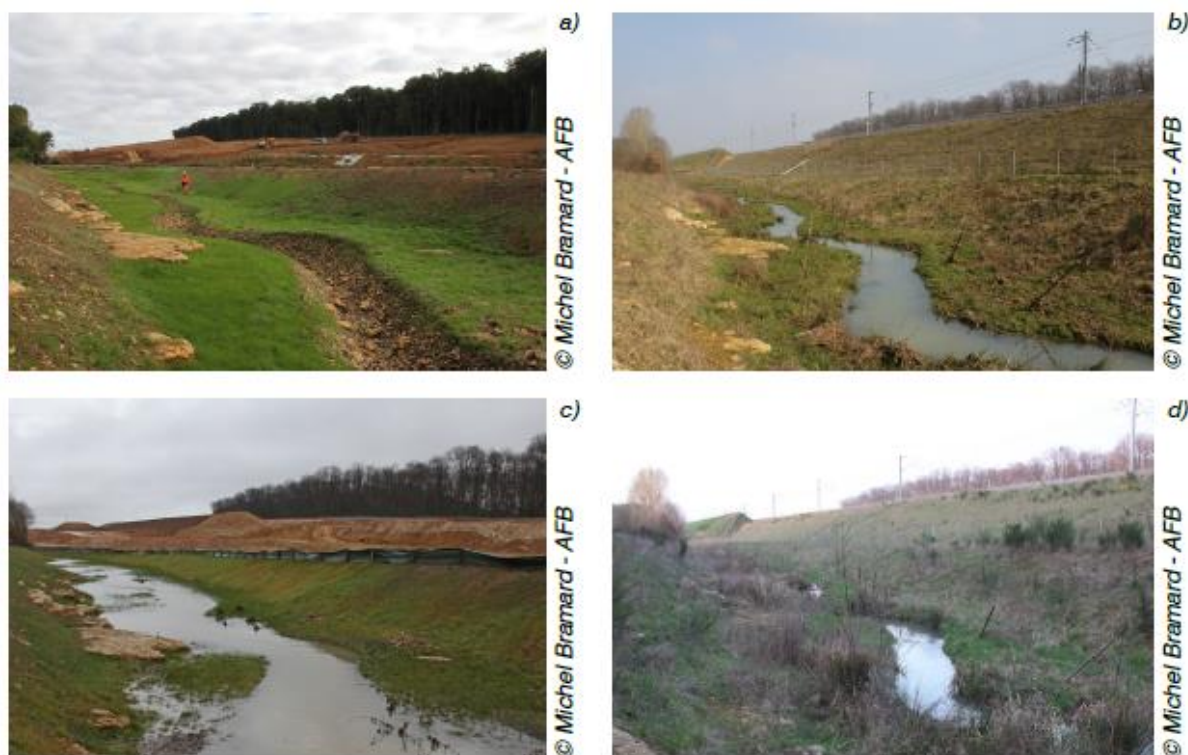


Figure 5 : Exemple de suivi de travaux de renaturation de la Rhune (86) dans le Guide de l'AFB, 2019 avec a) cours d'eau en phase travaux (dérivation avec lit emboîté), b) débit plein bord avant débordement, c) crue débordant sur le lit majeur restreint, d) 4 ans après travaux.

Protocole de mise en place du suivi :

Le préalable nécessaire à ce suivi est d'identifier **les points à suivre** à partir des paramètres suivants :

- **un point de vue pertinent** pour un ou différents types de suivi ;
- **une bonne accessibilité** ;
- **une durabilité** malgré le développement de la végétation à proximité.

Il peut être utile d'effectuer une cartographie de ces points de vue sous Qgis ou Geoportail afin de pérenniser ce suivi dans la structure.

L'appareil photographique doit permettre de prendre des clichés à haute définition (à minima 10 Mpix) et haute résolution (300 dpi). Pour améliorer la qualité du suivi, un trépied est conseillé.

Faire le premier suivi photographique et créer une fiche **Observatoire Photographique** par site.

La fiche Observatoire comprend :

- Le nom du site, le nom du cours d'eau, les coordonnées GPS de la prise de vue (pour faire plus simple que les coordonnées GPS, il faut activer la géolocalisation de l'appareil photo puis via le Plugin

QGIS Import Photos



une couche de la localisation des photos et de leur numéro sera extraite) ;

- La date et l'heure ;

- Nom de l'opérateur ;
- Météo ;
- L'angle de la prise de vue, orientation (N,S,E,O, aval, amont, rive droite, rive gauche), positionnement vertical et horizontal (généralement hauteur de vue humaine) ;
- **La période de l'année** ciblée pour la photographie (étiage, hiver). Pour certains sites, il sera préférable d'y aller lors l'étiage estival pour d'autres, il sera préférable d'y aller pendant l'étiage hivernal. Il faut juste s'assurer de bien choisir les mêmes conditions d'une photographie à l'autre ;
- Type de suivi que doit cibler l'opérateur de la photographie (critères hydromorphologiques) ;
- Les débits à la station la plus proche à l'heure de la prise de vue ;
- Date de la dernière crue ;
- Remarque (Observation sur le terrain) et première analyse de l'évolution ;
- Numéro de la ou des photographies.

Avant de prendre la photographie ; il faut :

- S'assurer d'avoir le même angle de vue, la même hauteur et le même cadrage que les photographies précédentes.... Il peut être pertinent d'effectuer un marquage fixe au sol (peinture, piquets...) pour repérer le lieu de la prise de vue ;
- Nettoyer si besoin la végétation qui gênerait pour prendre le cliché. Il est donc utile de se munir d'une serpe ou d'un sécateur ;
- D'avoir des bonnes conditions de luminosité pour le type de suivi (un temps nuageux, assez lumineux, sans précipitations permet d'avoir assez de luminosité et d'éviter les ombres portées).

Par ailleurs, il peut être intéressant de venir prendre une photographie sur chaque site lors d'une crue et en post-crue afin de voir comment le site réagit.

Il est également possible d'effectuer un suivi avec des panoramas.

Une fois que plusieurs photographies ont été prises sur un même site, la mise en forme peut se faire par des planches photographiques. Ces planches seront la base de l'analyse de l'évolution du site.

Qui, Matériel et coût de l'opération :

En interne

Mire photographique

Appareil photo : 250€

Trépied : 50€

Serpe : 30€

Date et heure		
N° du point de vue		
N° de la photo donnée par l'appareil		
Repères/positionnement appareil		
Coordonnées GPS (Lambert 93 ou WGS 84)		
Précision GPS (en m)		
Description points de repères	<input type="checkbox"/> N <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> E <input type="checkbox"/> O <input type="checkbox"/> Vers amont <input type="checkbox"/> Vers aval <input type="checkbox"/> Rive droite <input type="checkbox"/> Rive gauche	
Orientation		
Hauteur de prise de vue		
Objectifs et critères hydromorphologiques	Tracé en plan/profil en travers/faciès d'écoulement/ripisylve/habitats/ouvrages	
Schéma de positionnement de l'appareil et/ou remarques		

Localisation	
Code Sandre réseau et nom du réseau	
Date	
Nom opérateur	
Météo	
Créneau horaire	
N° de la série photographique	

Appareil/Réglages			
Type d'appareil			
Focale			
	Manuel	Automatique	
Ouverture (facultatif) :		Types de modes automatiques :	
Vitesse (facultatif) :			

Remarques/Schémas/Autre

Figure 6 : Exemple des fiches disponibles dans les annexes du Guide de l'AFB de 2019.

Pour en savoir plus sur la mise en place d'un observatoire photographique :

Rolan-Meynard, M et al., 2019. Guide AFB pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau.

L'observatoire photographique des paysages garonnais :

[L'observatoire photographique des paysages garonnais \(Page : 1\) \(developpement-durable.gouv.fr\)](https://developpement-durable.gouv.fr)

Valette, P., Eléments de méthodologie pour construire un observatoire des paysages de la Garonne.

Valette, P., 2020. Eléments de méthodes pour rephotographier, analyser, valoriser les observatoires.

3.2. Suivi du remplissage des plages de dépôts et des volumes curés

Objectifs :

Les plages de dépôts possèdent une importance primordiale pour la mesure du transport solide et pour l'amélioration de la connaissance de chaque système torrentiel. En effet, elles permettent de renseigner sur la capacité de transport de différentes crues mais également sur la capacité de production sédimentaire de bassin versant ou de tronçon. In fine, cela a pour but de mieux prendre en compte les sédiments dans la gestion du risque liés aux crues torrentielles.

Protocole de mise en place du suivi :

Ce suivi des plages de dépôts se fait selon **le protocole mis en place par l'INRAE** (fiche inventaire + notice explicative). Différents champs sont à remplir comme :

Avril 2022

ARI 18-076/Phase Etat des lieux - EPCI



Généralités sur l'ouvrage (taille, enjeux, type d'ouvrage, défaillance...) ;

- Phénomènes naturels du bassin versant ;
- Ouvrages en amont et en aval ;
- Granulométrie ;
- Gestion et entretien de la plage de dépôts (volume curé)...

GÉNÉRALITÉS							
commune de :	Sainte-Marie-du-Mont			département :	38 - Isère		
torrent de :	Le Bresson			bassin de :	L'Isère		
inventaires existants :							
N° Enq. 2017 :	140	N° Enq. 1997 :	65	N° dispositif BD-RTM :	DI_2162	N° ouv. fermeture BD-RTM :	OU_16870
éléments sur la construction :							
année de réalisation :	1987			maître d'œuvre :	RTM		
maître d'ouvrage (et participation financière) :	Etat (RTM)			concepteur(s) :	P. Mériaux		
					[kF ou k€]	[k€ - 2016]	
entreprise ayant réalisé les travaux :	Barassi			coût TTC de la construction :	357	87	
localisation plage de dépôt (ouv. fermeture) :							
altitude PDD [m] :	900 m			coordonnées SIG : X =	928612 m	Y=	6479896 m
ouvrage en forêt domaniale :	oui			si oui, nom de la DD RTM :	Ste-Marie du Mont / St-Bernard du Touvet : le Bresson		
GESTION / ENTRETIEN DE LA PLAGE DE DÉPÔT							
gestionnaire :	RTM 38		appui technique :	RTM 38		entreprise :	Barrassi
				condition d'accès :	piste RG		
critère de lancement du curage :							
	année	apports [m³]	curage [m³]	méthode évaluation	destination des matériaux	caractéristiques particulières	coût TTC [kF ou k€]
crues / curages / travaux de reprises	1 987		5700 m³			curage suppose car bouchait le pond de la rd	
	1 994		1500 m³			sommier de la forêt	
	1 998		3000 m³			concessions d'extraction	
	1 999		3000 m³			concessions d'extraction	
si pas de données sur dates indiquer fréquence: Annuelle / 1-5 ans/5-10 ans,...	2 002		2000 m³			Sommier de la forêt	
	2 004		800 m³			Sommier de la forêt	
	2 005		3000 m³			Sommier de la forêt	
	2 008		1500 m³			BD événement	

Figure 7 : Exemple du fichier excel INRAE sur la plage de dépôts du Bresson.

Hors plage de dépôts, des tableurs excel doivent être tenus pour chaque cours d'eau avec les curages, la localisation et les volumes extraits.

[Qui, Matériel et coût de l'opération :](#)

En interne

Tableau Excel

3.3. Suivi granulométrique

Objectifs :

La connaissance de la granulométrie est une donnée de base dans toute analyse hydromorphologique. Il est complémentaire avec le suivi des structures alluvionnaires et le suivi de la propagation de la charge alluviale.

Le suivi de l'**évolution de la granulométrie** du lit s'effectue via la comparaison de courbes granulométriques, mesurées au même endroit à plusieurs périodes post-crue.

Cette méthode permet ainsi une double lecture : on peut comparer les courbes une à une (évolution de la granulométrie en un point) et globalement (évolution du gradient granulométrique amont → aval). Ces comparaisons peuvent ainsi mettre en avant divers éléments : évolution ponctuelle (changement significatif de la taille des matériaux ou dans la forme des matériaux...) ou évolution globale (modification de l'évolution amont → aval de la taille des matériaux).

En effet, lorsque les **diamètres de matériaux** augmentent significativement, cela témoigne généralement d'une incision du lit (Komura & Simon, 1967 ; Williams & Wolman, 1984...). Le substrat initialement de type armure se transforme en pavage (au sens de Bray & Church, 1980). Cela peut également montrer le passage d'une bouffée sédimentaire et non une modification structurelle du substrat du lit.

La mesure de la granulométrie permettra également de savoir si le substrat est **biogène**, c'est à dire bon support à la vie aquatique. En effet, les substrats biogènes intéressants comme habitat pour la faune aquatique sont les substrats dont la granulométrie est supérieure à 20 mm (Williams & Mundie, 1978 ; Jowett *et al.*, 1991). Les diversités biologiques les plus importantes se rencontrent dans des alluvions présentant un diamètre moyen de 40 à 50 mm (Evrard & Micha, 1995).

En complément, on pourra également examiner la **forme des matériaux** (anguleux, cassés, roulés), témoignant du renouvellement ou non de la charge solide puis les potentielles dynamiques de colmatage.

L'analyse de l'évolution globale (amont aval) de la taille (ou de la forme) des matériaux donnera également des indications intéressantes en post-crue morphogène : passage d'une bouffée sédimentaire, relation avec une érosion importante, apports d'un affluent, incision localisée ou globale...

De plus, ces données granulométriques ponctuelles peuvent permettre de mieux estimer le transport solide en implémentant le D_{50} , le D_{84} ou le D_{90} dans des formules de transport solide.

Localisation :

- aux mêmes endroits que celles effectuées dans le cadre de l'étude ou dans les études précédentes qui servent ainsi de « point zéro » ;
- au droit de points singuliers ;
- au droit des zones où des actions vont être menées (Amont, au droit du chantier, Aval) ;
- au droit des atterrissements.

Protocole de prélèvement :

- Choix du site : on privilégiera la couche superficielle du lit (armure ou pavage), ces opérations pourront se faire en assec pour plus de facilité ;
- Photographie du substrat du lit en mettant la mire sur la photographie (photographie subaquatique ou non suivant la période de prélèvement) ;
- Repérage de zones caractéristiques :
 - (1) discrimination des particules de colmatage ($d < 8$ mm) qui se déposent après les matériaux grossiers et qui ne participent pas directement au transit de la charge grossière ;
 - (2) discrimination des éléments de rugosité (matériaux grossiers isolés, blocs d'enrochement) souvent ancrés en lit et très peu mobilisés lors des crues, constituant l'ossature du cours d'eau et assurant sa stabilité ;
- Tirer un décimètre et prendre un pas de distance supérieur à la plus grosse particule observée sur le site. Par exemple, les plus grosses particules semblent avoir une taille de 15cm d'axe B, dans ces cas la prendre un espacement de 20cm. Tous les 20cm du décimètre, mesurez la particule. ;
- Mesure du diamètre médian, c'est-à-dire de l'axe b et la renseigner dans le tableau pour au moins 100 particules par site.

Protocole de traitement des éléments collectés :

- Comptage des particules par gramme granulométrique ;
- Calcul des effectifs cumulés ;
- Réalisation de la courbe granulométrique.

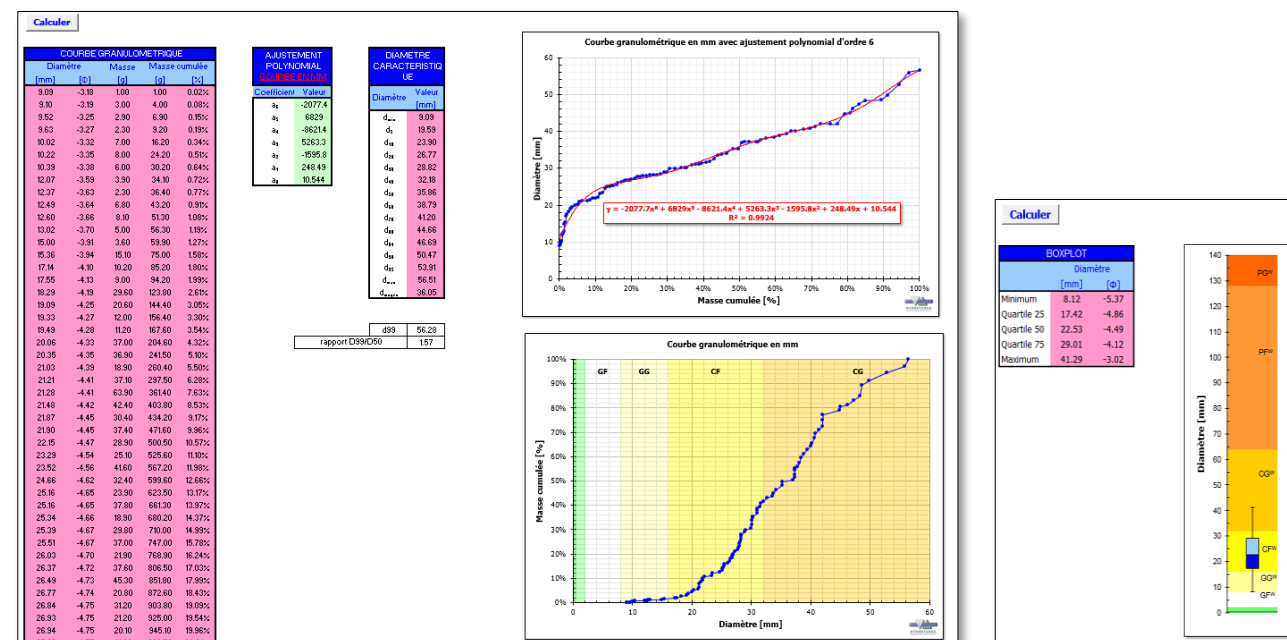


Figure 8 : Feuille de calculs automatisée de la granulométrie.

Qui, Matériel et coût de l'opération :

En interne (Possible pour un stagiaire)

Tableau Excel

Un carnet de note (tableau Excel)

Un mètre (ou un pied à coulisse numérique si la granulométrie en place ne dépasse pas la gamme),

Un appareil photo,

Une mire photographique, des sacs de prélèvement (si la granulométrie n'est pas effectuée sur place),

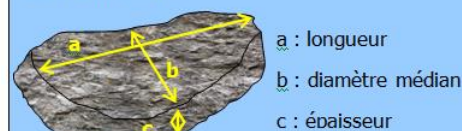
Si besoin un appareil photographique pour prendre des photographies subaquatiques ;

Si besoin une balance de poche à différents pas.



Matériel nécessaire pour la granulométrie

a : Pieds à coulisse numérique de (150 mm et 300 mm) pour mesurer le diamètre médian (b) des grains en lit.



a : longueur
b : diamètre médian
c : épaisseur

b : Appareil numérique étanche à 3 m pour prendre des photographies subaquatiques du lit.

c : Balances de poche à différents pas (0.1 g à 650 g ; 0.1 g à 850 g).

d : Echelle de Wentworth utilisée en granulométrie (Wentworth, 1922 ; Malavoi & Souchon, 2002).

Figure 9 : Matériel nécessaire pour la granulométrie.

3.4. Suivi localisé du stock alluvial

Objectifs :

Cette action permet de suivre, dans le temps et l'espace, **l'évolution des structures alluvionnaires** (volume, degré de végétalisation, degré de mobilité...), et ainsi avoir une vision en particulier sur le transit sédimentaire (propagation ou *a contrario* fixation...).

Protocole :

- Après chaque crue morphogène, lors d'un parcours pédestre du secteur étudié ou lors des débits d'étiage ;

Avril 2022

ARI 18-076/Phase Etat des lieux - EPCI



- Géoréférencer la structure alluvionnaire via un GPS ;
- Mesurer à l'aide d'un quintuple-décamètre la longueur de la structure alluvionnaire en se plaçant sur l'axe central et plusieurs largeurs selon des transects situés environ tous les 1/10^e de sa longueur ;

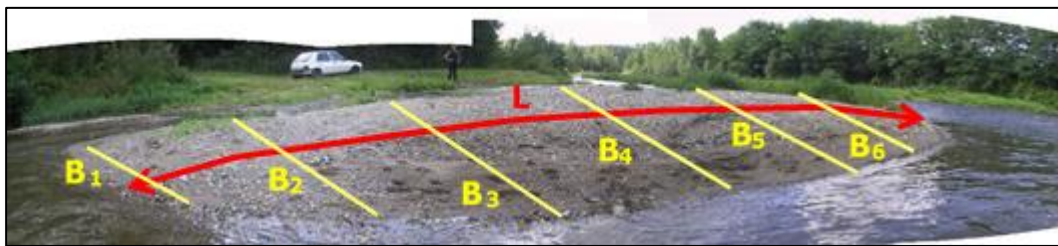


Figure 10 : Exemple de mesure d'un atterrissement.

- Mesurer la hauteur moyenne de la structure alluvionnaire par rapport au fil d'eau ;
- Déterminer le stade d'évolution (degré de végétalisation et le type de strate végétale).

L'ensemble de ces mesures permettra d'estimer le volume minimum de matériaux stockés dans chaque structure alluvionnaire (suivi local), et également d'obtenir **le volume minimum du stock alluvial** par tronçon et par degré de mobilité (suivi global). Les données collectées pourront faire l'objet **d'une base de données SIG**. Ce suivi métrologique pourra être réalisé par le personnel du SILA ou par un stagiaire dans le cadre d'un inventaire hydromorphologique.

Qui, Matériel et coût de l'opération :

En interne

Tableau Excel

GPS

Décamètre

Appareil photo

Mire photographique

3.5. Suivi du transport solide par puçage RFID

Objectifs :

La vitesse de propagation de la charge alluviale spécifique à chaque cours d'eau est très mal documentée. Il y a encore quelques années des évaluations étaient fournies pour quelques rares cours d'eau et relevaient le plus souvent d'une simple estimation ou d'une mesure sur une crue.

Depuis les années 2000, le développement de **traçage sédimentaire par transpondeur RFID** (Radio Frequency Identification) a provoqué une augmentation d'études sur le transport solide. Un « PIT-Tag » (Passive Integrated Transpondeur) est une capsule de verre, de 23 mm dans notre cas, qui contient un noyau en ferrite, un circuit intégré, un condensateur de charge et de résonance (Rollet, 2007). Ce transpondeur passif est détecté par signal électromagnétique émis par une antenne RFID

(Liébault et Laronne, 2008). La distance de détection est cependant inférieure à 1m. Les PIT-Tags ont été utilisés dans différents contextes comme les rivières (Rollet, 2007 sur l'Ain ; Jantzi, 2018 sur la Garonne...), les rivières torrentielles (Chapuis, 2012 ; Chapuis et al., 2015 sur la Durance ; Camenen et al., 2010 sur l'Arc...), les torrents à crues torrentielles (Liébault et al., 2012 sur le Bouinenc...) et torrents à laves torrentielles (Graff et al., 2018 sur la Peyronnelle...).

L'utilisation de « PIT-tags » revêtent différents intérêts :

- le calcul de volume charrié et de taux de charriage ;
- **le calcul des distances et trajectoires parcourues ;**
- **l'identification des gammes granulométriques mises en mouvement** et des débits seuil de mise en mouvement ;
- le suivi de mesures de restauration ;
- la qualification de l'effet d'ouvrages transversaux ;
- et plus généralement d'améliorer la connaissance sur la dynamique morphologique.

De plus, ce type de traçage par PIT-Tags est pertinent dans les bassins incisés pour connaître précisément la vitesse de propagation de la charge alluviale et le tri granulométrique. Cette connaissance est donc particulièrement utile pour :

- Evaluer le **déstockage du plancher alluvial** dans les parties amont où les matériaux se déstockent de manière progressive (amont → aval),
- Mesurer l'**impact des opérations de recharge sédimentaire** sur l'amélioration du compartiment physique en permettant ainsi la recréation d'un substrat biogène.



Figure 11 : (a) Pit-tag de 23 et 19 mm, petite antenne de recherche (b) et (c) galets percés avant insertion d'un PIT-tag.

Ayant ainsi une bonne **vision de la propagation générale de la charge et de la dispersion granulométrique par tri**, les stratégies de gestion pourront être affinées et ajustées. En effet, ce suivi permettra de mesurer **l'efficacité et l'impact des opérations de recharge sédimentaire** et d'amélioration du transit sédimentaire, et ainsi mieux cibler les modalités d'opération de recharge sédimentaire.

Actuellement, les PIT-Tags passifs sont préférentiellement utilisés (prix abordable) mais des perspectives très intéressantes s'ouvrent avec de nouveaux tags (UHT – Ultra Haute fréquence) actifs, beaucoup plus faciles à rechercher (distance de détection de 40m) car émettant en permanence un signal, les tags passifs ne l'émettant qu'à l'approche de l'antenne de recherche. De plus les tags actifs se retrouvent sous plusieurs mètres de matériaux.

Protocole de mise en place :

- Effectuer une granulométrie du site afin d'identifier les gammes granulométriques dominantes ;

- Choisir la distribution des matériaux sur plusieurs gammes granulométriques (Puçage d'au moins 200 particules) ;
- Percer les matériaux. Le trou peut s'effectuer avec un perforateur (taille des particules équipées supérieures à 33mm) ou une perceuse à colonne ou une meuleuse/disqueuse ;
- Insérer un PIT-tag dans le grain et reboucher le trou avec de la résine ou du ciment chimique ;
- Chaque particule possède donc **un PIT-Tag avec un numéro de série associé**. Avant la remise en eau, il faut noter dans un tableur le numéro de série avec la taille de la particule, la lithologie, le poids et la forme associées (arrondie, anguleuse, plate...) ;
- Remise en eau des particules. Différentes méthodes existent pour la remise en eau des particules : soit en placette (difficulté lors de la détection), soit en transect, soit de manière aléatoire dans le chenal en essayant de les insérer dans le pavage ;
- Une fois la remise en eau effectuée, la particule doit être géoréférencée (par un GPS différentiel). C'est la position initiale du PIT-Tag.

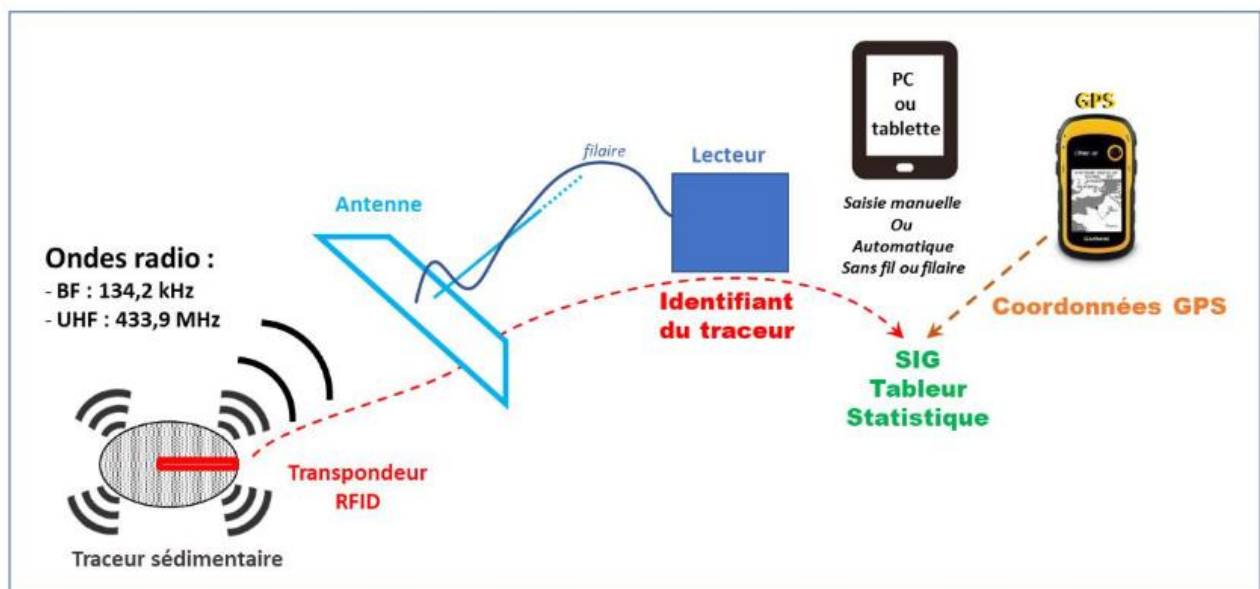


Figure 12 : Représentation schématique d'un dispositif de traçage sédimentaire RFID (Pêche aux outils scientifiques – 9 octobre 2020 –Niévroz et Miribel (01)).

Protocole de sondage :

- Le sondage s'effectue annuellement ou après chaque crue morphogène avec l'antenne et le DGPS.
- L'antenne capte le PIT-Tag et indique le numéro de série.
- Sa position doit être géoréférencée.
- Il est ensuite possible de comparer la couche SIG des positions initiales avec le 1^{er} sondage afin de d'identifier la mobilité des particules.

Attention dans certains cas, la première crue est considérée comme une réorganisation plus naturelle et stable des traceurs.

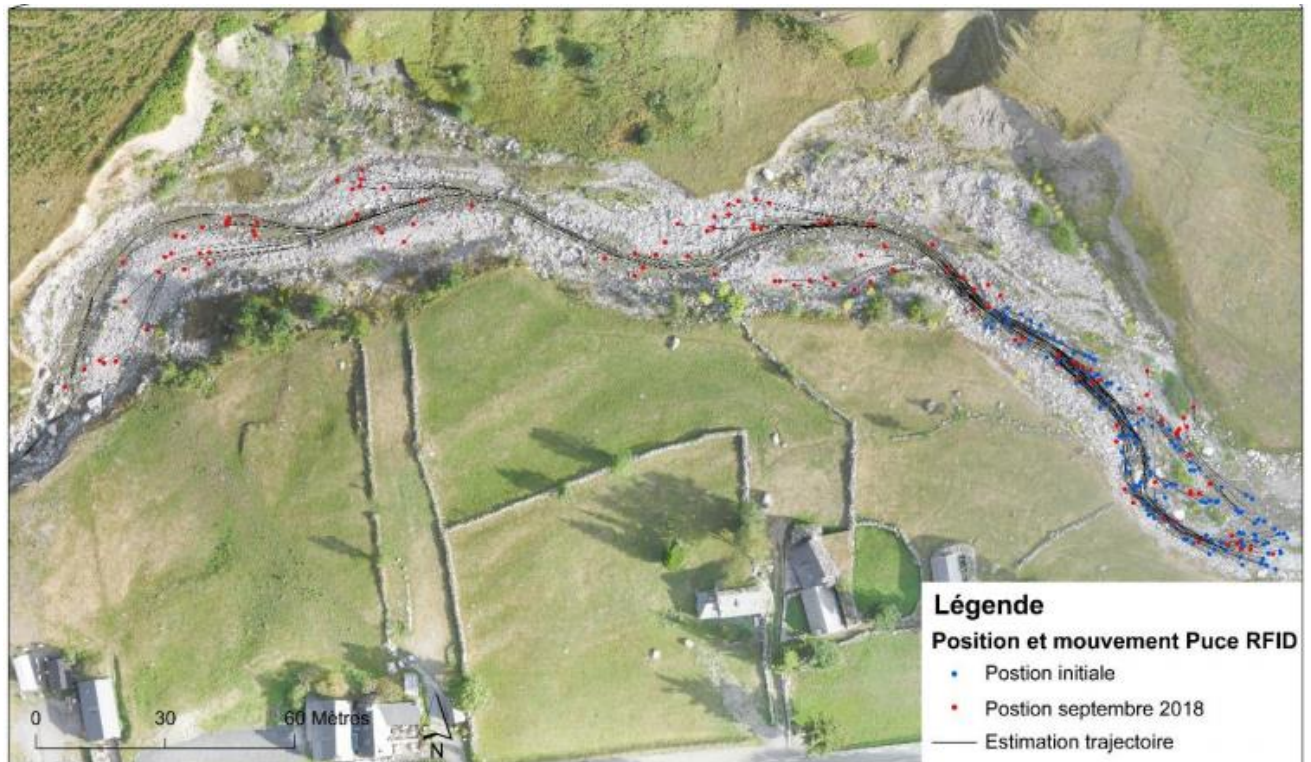


Figure 13 : Exemple de carte de mobilité de traceurs RFID sur le torrent du Bastan (65).

Fréquence :

Ce suivi est à effectuer après les travaux ou au moment de la réinjection. Les sondages doivent être fait annuellement ou après chaque crue morphogène.

Qui, Matériel et coût de l'opération :

A externaliser

Antenne

Puce RFID (200 par site étudié)

DGPS

10 000€ pour 200 PIT Tags avec installation et une prospection (pour des PIT Tags passives)



	PIT-tags	a-UHF-tags
		
Taille des transpondeurs	Long.: 12-23-32 mm Diam.: 2 mm	Diam.: 31 mm Épaisseur : 8-15 mm
Taille min. des particules équipées	{16-22} {22-32} {32-45}	{32-45}
Distance max. de détection	< 1 m	< 40 m
Précision de géolocalisation	~ 0,5 m	0,5 m à 20 m
Signal radio	134.2 kHz Binaire (présence/absence) Problème de collision	433.9 MHz Trame RSSI (intensité de la détection) Protocole anti- collision
Coût unitaire de fabrication	10€	80€

Figure 14 : Caractéristiques techniques des traceurs RFID actifs et passifs (Pêche aux outils scientifiques – 9 octobre 2020 – Niévroz et Miribel (01)).

Pour plus d'informations sur les traceurs sédimentaires :

Acte et synthèse : Les traceurs sédimentaires pour comprendre la trajectoire morphologique d'un cours d'eau (Pêche aux outils scientifiques – 9 octobre 2020 – Niévroz et Miribel (01)).

http://www.graie.org/graie/graiedoc/reseaux/riviere/synthese-actes_PO_traceursRFID_Graie.pdf

3.6. Suivi du colmatage

Objectifs :

La recharge sédimentaire par transfert de matériaux pourrait éventuellement induire un colmatage du lit plus ou moins important en fonction de la nature des matériaux transférés.

La maîtrise de la granulométrie des matériaux n'est pas toujours aisée et la présence de matériaux fins peut induire vers l'aval un éventuel colmatage du substrat du lit. Ce colmatage pourrait impacter ainsi la qualité du milieu.

Pour appréhender cette éventualité de transfert de fines et de colmatage, il serait intéressant d'effectuer un suivi en aval immédiat des zones de réinjection qui permettrait (en cas de colmatage) de mieux trier les matériaux avant réinjection dans le futur.

Un suivi par **mesure de l'épaisseur hyporhéique** et/ou par **évaluation visuel du degré de colmatage** est un suivi simple, faible et facile à mettre en place et à interpréter. Elle peut être mise en œuvre directement par le SILA.

Le colmatage du substrat d'un lit se caractérise par le **dépôt de matériaux fins** (argiles, limons, sables fins et sables grossiers de la classification de Wentworth), c'est-à-dire des matériaux < 2 mm (Gayraud *et al.*, 2002). Ces 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 au sens de Balon, 1975), en diminuant les taux de survie des œufs (Chapman, 1988),
- Les habitats de reproduction et d'alimentation des **macro-invertébrés** (Hynes, 1970 ; Minshall, 1984) comme leur répartition (Cummins & Lauff, 1969) et la structure de leur population (Richards, Host & Arthur, 1994),
- Les **biofilms épilithiques** communauté de micro-organismes (bactéries, champignons, algues ou protozoaires) enchâssée 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-épuratoire 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). Cette faune est importante pour notamment maintenir la capacité d'auto-épuration du cours d'eau,
- Les **processus d'érosion** en limitant fortement la mobilisation des alluvions en période de crue.

La mesure de **l'épaisseur hyporhéique** consiste à mesurer l'impact effectif de la réinjection de matériaux sur un éventuel colmatage du lit, en particulier sur une éventuelle diminution de l'épaisseur hyporhéique du lit. Cette épaisseur généralement d'une trentaine de centimètres comprend l'armure et la partie sommitale de la couche interne. Elle se caractérise par une circulation d'eau chargée en dioxygène dans les espaces interstitiels permettant une vie interstitielle. Cette épaisseur hyporhéique est notamment importante pour la capacité auto-épuratoire du cours d'eau.

Le colmatage est le facteur qui limite notamment les échanges d'eau et de nutriments, la circulation des invertébrés et micro-organismes entre la surface et le milieu interstitiel, et banalise ainsi ces habitats interstitiels. Le colmatage est donc un élément pénalisant l'intérêt du substrat pour la vie aquatique (aspect biogène du substrat).

La recharge sédimentaire pouvant contribuer à colmater certaines zones, il est donc important de suivre ce facteur.

Protocole :

Il s'agira à l'aval de chaque point d'injection de mesurer l'épaisseur hyporhéique via le protocole suivant :

- Réaliser des mesures-témoin avant l'injection des matériaux (point zéro servant de référence),
- Réaliser de nouveau les mêmes mesures après l'injection et la première crue morphogène susceptible de disséminer les matériaux injectés,

- Comparer les résultats post-réinjection/post-crue avec les résultats témoins, afin d'analyser s'il y a équilibre, amélioration ou péjoration,

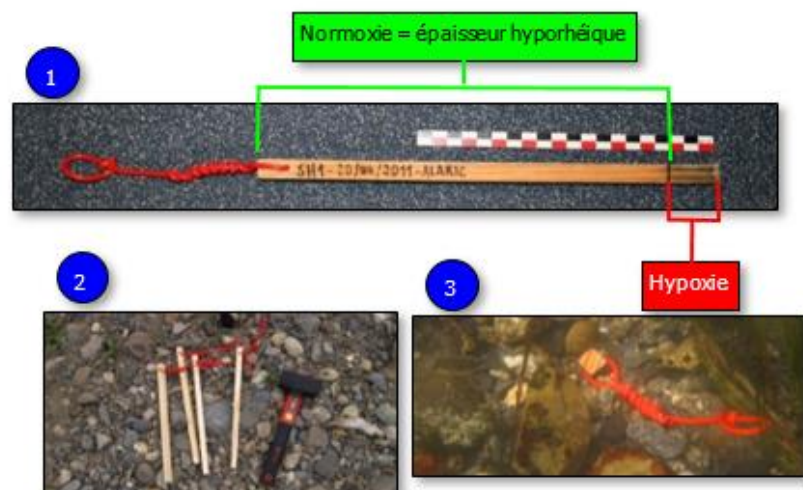
La technique de mesure de l'épaisseur hyporhéique :

L'épaisseur hyporhéique concerne l'épaisseur du lit (armure et couche interne), dans laquelle s'infiltre et circule de l'eau et du dioxygène. Cette partie du lit est dite en normoxie (*i.e.* suffisamment chargée en dioxygène pour satisfaire aux besoins des espèces présentes). La partie du lit où le dioxygène est insuffisant pour satisfaire les besoins de la vie aquatique interstitielle est dite en hypoxie.

Il y a donc dans la partie de l'épaisseur du lit en normoxie une vie riche (micro-invertébrés, bactéries...). Elle participe activement aux réactions biogéochimiques du lit et à la capacité auto-épuratoire du cours d'eau. Elle garantit également le non-colmatage des frayères lors de leur constitution par les géniteurs.

L'épaisseur hyporhéique sera mesurée au moyen de **sticks hypoxiques** (Tremblay, 2006) répartis à l'aval de chaque point de réinjection, et consistant à planter en lit des tasseaux de pin non traités de section 10 x 10 x 300 mm et de les y laisser incuber un mois.

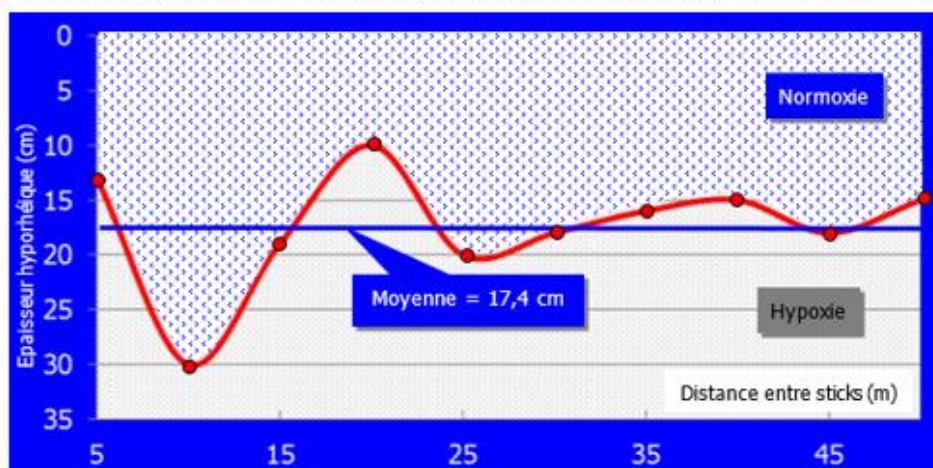
Au retrait, la partie en normoxie (eau + dioxygène) est restée normale. Au contraire, la partie en hypoxie a pris une teinte grisée ou est rayée de gris. Cette teinte est due à la présence de bactéries sulfato-réductrices qui sont des micro-organismes anaérobies produisant leur énergie en réduisant les sulfates en sulfure, d'où leur nom. C'est cette réduction qui colore le tasseau en gris.

**Stick hypoxique**

(1) → stick après incubation de un mois en lit, la partie grisée montre la zone en hypoxie où le dioxygène ne parvient pas. La partie sans modification de couleur du stick (ici environ 27 cm) donne l'épaisseur hyporhéique efficace. La mire photographique fait 20 cm de longueur.
 (2) → sticks avant implantation et lit et incubation d'un mois.
 (3) → stick en lit, le fil rouge (simple câble électrique permet de retrouver après incubation) le stick.

Nota-Bene: la lecture de l'épaisseur hyporhéique efficace doit s'effectuer à la récupération, c'est-à-dire stick encore mouillé.

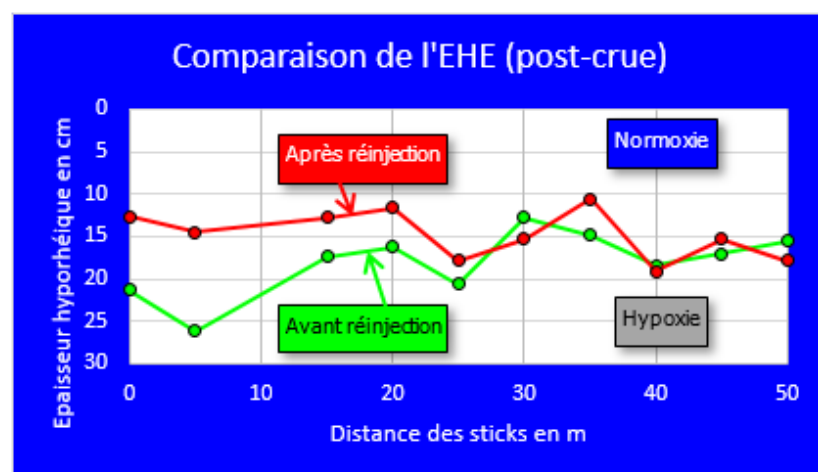
On obtiendra ainsi une courbe montrant l'évolution de l'épaisseur hyporhéique en aval de la zone de réinjection :

**Courbe d'EHE**

Ce graphique montre l'épaisseur hyporhéique efficace (EHE) dans notre cas 50 m en aval de la zone de réinjection.

Cela donne une bonne vision de l'épaisseur du lit et de son fonctionnement. Dans notre cas l'EHE est correcte proche d'une vingtaine de centimètres.

Par comparaison avec la même opération menée après réinjection et une crue on pourra ainsi mesurer le

**Comparaison**

Exemple de comparaison. L'EHE initiale semble avoir été impactée sur sa partie amont au contact quasiment de la zone de réinjection. Par contre en aval ce n'est pas le cas, les courbes étant proches.

Les moyennes ont légèrement varié (avant = 18.05 cm et après = 14.75 cm). Ces éléments montrent que le colmatage est certainement limité et que les matériaux injectés ont un impact minime sur le substrat du lit.

L'évaluation du degré de colmatage peut également reposer sur un test visuel. Il s'agit de soulever un élément du substrat identifié comme « substrat dominant ». On estime alors son degré de facilité d'extraction, ainsi que la densité à l'œil du nuage de Matières En Suspension (MES) éventuellement soulevé. En fonction de ces deux critères, on obtient le degré de colmatage selon la classification d'Archambaud *et al.* (2005).

DEGRÉ DE COLMATAGE	
Classe	Caractéristiques déterminantes
1	Eléments se soulevant facilement. Les éléments sont posés sur la sous-couche granulométrique et ne génèrent pas de MES.
2	Eléments se soulevant plus difficilement que la classe 1. Toutefois le nuage de MES généré est peu dense, le pavage est « collé » par une couche limoneuse légèrement colmatante et qui lie les éléments entre eux.
3	Les éléments sont très enchâssés et se soulèvent avec un nuage de MES assez épais.
4	La structure est enchâssée dans une sous-couche très colmatante dont l'emprise est forte sur les éléments. Le nuage de MES est très dense.
5	Les éléments ne se soulèvent pas ou très difficilement (structure cimentée ou sous forme d'un dallage). C'est le cas lorsque la granulométrie est recouverte par une épaisse couche de limon.

Degré de colmatage (d'après Archambaud et al., 2005)

Qui, Matériel et coût de l'opération :

En interne

Matériel (Tasseaux de bois, barre à mine, scie, fil électrique) 150€

3.7. Suivi de l'érosion latérale

Objectifs :

Les érosions de berge ou de pieds de versant sont un des processus majeurs de la fourniture sédimentaire pour les cours d'eau de fond de vallée. Depuis les années 2000, on assiste à un développement de l'utilisation des données topographiques à haute résolution en géomorphologie.

Le suivi global par superposition de données Lidar en est un exemple et peut permettre selon sa précision et de la taille de l'érosion de berge de quantifier le recul de berge.

Le suivi des érosions latérales est d'un intérêt majeur d'une part dans un contexte d'un cours d'eau en incision (amélioration de la connaissance de zones de fourniture sédimentaire de qualité) et d'autre part lorsqu'une érosion de situe à proximité d'une zone à enjeux.

3.7.1. Le suivi photographique à partir de plusieurs points fixes (Cf 3.1)

Protocole :

- Mettre en place des cibles fixes (les éléments naturels comme les troncs d'arbres ou les gros blocs peuvent être des éléments cibles sur lesquels la comparaison photographique va se baser). Sinon il est possible à la bombe de faire des points sur les particules les plus grossière de la berge.
- Mettre une mire photographique sur la berge afin d'avoir une échelle.
- Prendre des photos de la berge sous différents angles afin de pouvoir estimer l'ordre de grandeur du recul de la berge, la pente et le type de processus d'érosion de berge.

Durant ce suivi, une évaluation de la dynamique de la recharge sédimentaire par érosion de berge peut être effectuée en analysant la taille, la forme, la lithologie des matériaux de la berge et sa dynamique de recolonisation végétale.

Qui, Matériel et coût de l'opération :

En interne

Un appareil photo

Une mire photographique

3.7.2. Le suivi par tiges d'érosions

Protocole :

- Acheter des fers en béton dans un magasin de bricolage (la longueur du fer à béton est à ajuster selon le recul de berge potentiel) + Bouchons de protection ;
- Avec un maillet enfoncé, la tige de sorte qu'il ne reste qu'un tirant d'air de quelques centimètres ;
- -Faire un croquis et/ou prendre une photo de la berge avec le numéro des tiges et le tirant d'air mesurée de chaque tige ;
- Revenir tous les ans ou post-crue pour mesurer le tirant d'air de chaque tige et ainsi estimer le recul de berge.
- Précaution : Cette technique de mesure de l'érosion latérale ne doit pas être utilisée dans les zones de passage au bord du cours d'eau. Les bouchons s'enlèvent relativement facilement et laisse la tige pointée sans être signalées.

Durant ce suivi, une évaluation de la dynamique de la recharge sédimentaire par érosion de berge peut être effectuée en analysant la taille, la forme, la lithologie des matériaux de la berge et sa dynamique de recolonisation végétale.

Qui, Matériel et coût de l'opération :

En interne

Un appareil photo

Une mire photographique

Une bombe de peinture

Des fers à béton

Un maillet

3.7.3. [Le suivi par photogrammétrie " **Structure from Motion** " \(SfM\) \(Westoby et al., 2012 ; Micheletti et al., 2015\)](#)

[Objectifs :](#)

Cette approche est une alternative moins coûteuse que le Lidar et utilisable par le plus grand nombre grâce à l'automatisation des processus de traitement photogrammétrique (Fonstad et al., 2013). Initialement développée pour la vision d'objets et, ou, de bâtiments en 3 dimensions, la méthode photogrammétrique SfM permet la reconstruction de la structure tri-dimensionnelle d'un objet ou d'une surface à partir de photographies numériques (Stumpf et al., 2014).

[Protocole :](#)

Elle consiste à prendre plusieurs photographies d'un objet à fort pourcentage de chevauchement et à différents angles de vue. Contrairement à la photogrammétrie stéréoscopique traditionnelle, la méthode SfM n'a pas besoin de renseigner les paramètres de prise de vue (focale, orientation, position...) car elle les calcule à partir de la corrélation d'images et d'ajustements de faisceaux. La corrélation spatiale entre images est réalisée par un algorithme itératif très redondant de minimisation non linéaire des moindres carrés, à partir de points remarquables homologues (Snavely, 2008 ; Westoby et al., 2012). Elle permet de corriger les déformations photographiques et aboutit à la création d'un nuage de points puis d'un Modèle Numérique d'Élévation (MNE). La répétition des opérations photographiques dans le temps permet l'utilisation diachronique de la photogrammétrie et donc d'identifier puis de quantifier les changements de surfaces qu'il est possible de corréler à des processus géomorphologiques d'érosion ou de dépôt. L'utilisation du plugin M3C2 (Model to Model Cloud Comparison) sous Cloud Compare est actuellement largement utilisé en géomorphologie. Ce type de suivi devra être externalisé.

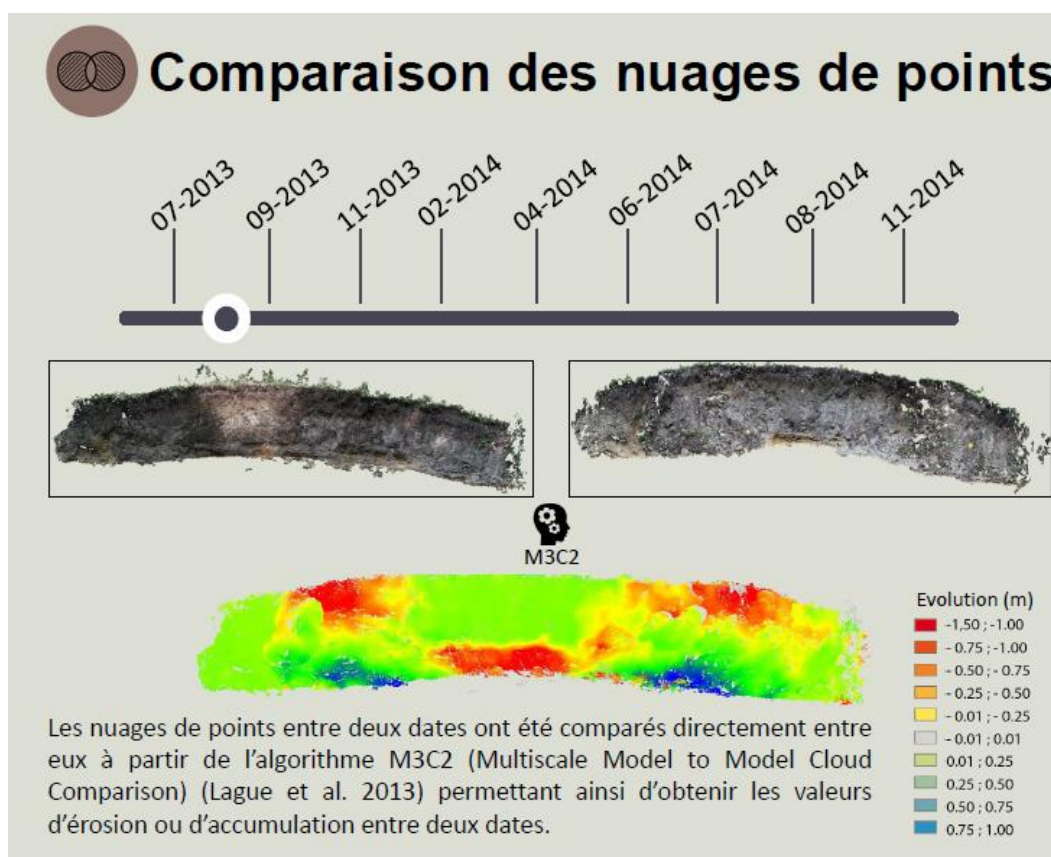


Figure 15 : Comparaison entre deux nuages de points et utilisation du Plugin M3C2 pour quantifier le recul d'une berge (Virmoux et al., 2016).

Qui, Matériel et coût de l'opération :

En interne (possible avec un stagiaire formé sur des logiciels de photogrammétrie)

3.8. Suivi local 5 : Suivi de l'évolution des faciès d'écoulement

Objectifs :

Dans la mouvance actuelle des projets de renaturation de tronçon de cours d'eau, le suivi de l'évolution des faciès d'écoulement est un paramètre à étudier. D'après le Guide AFB (2019), les objectifs de ce suivi sont de pouvoir :

- caractériser l'évolution de la morphologie du lit (adaptation à plus ou moins long terme des faciès en fonction de la variabilité des différents forçages hydro-climatiques et anthropiques) ;
- quantifier la diversification post-restauration de ces faciès.

Un faciès d'écoulement représente "des petites portions de cours d'eau (d'une longueur comprise entre 1 et 10 fois la largeur à pleins bords environ) présentant une homogénéité, de l'échelle de quelques m², sur le plan des vitesses, des profondeurs, de la granulométrie, de la pente du lit et de la ligne d'eau, des profils en travers" (Malavoit et Bravard, 2010).

Protocole :

Avril 2022

ARI 18-076/Phase Etat des lieux - EPCI



- Ce suivi peut être effectué à l'échelle globale mais paraît bien chronophage.

Un suivi par tronçon est recommandé à partir de la typologie des faciès d'écoulement de Malavoi et Souchon (2002).

- A partir de l'expertise de terrain, il faudra distinguer et délimiter (par GPS) les faciès d'écoulement parmi 8 faciès majeurs (Chenal lentique/Mouille/Plat lentique/Plat courant/Radier/Rapide/Step-pool/Cascade).

- Ces faciès sont ensuite délimiter sous QGis et réanalyser avec la photographie aérienne et le profil en long.

Ce suivi est à effectuer à la même période (même gamme de débits).

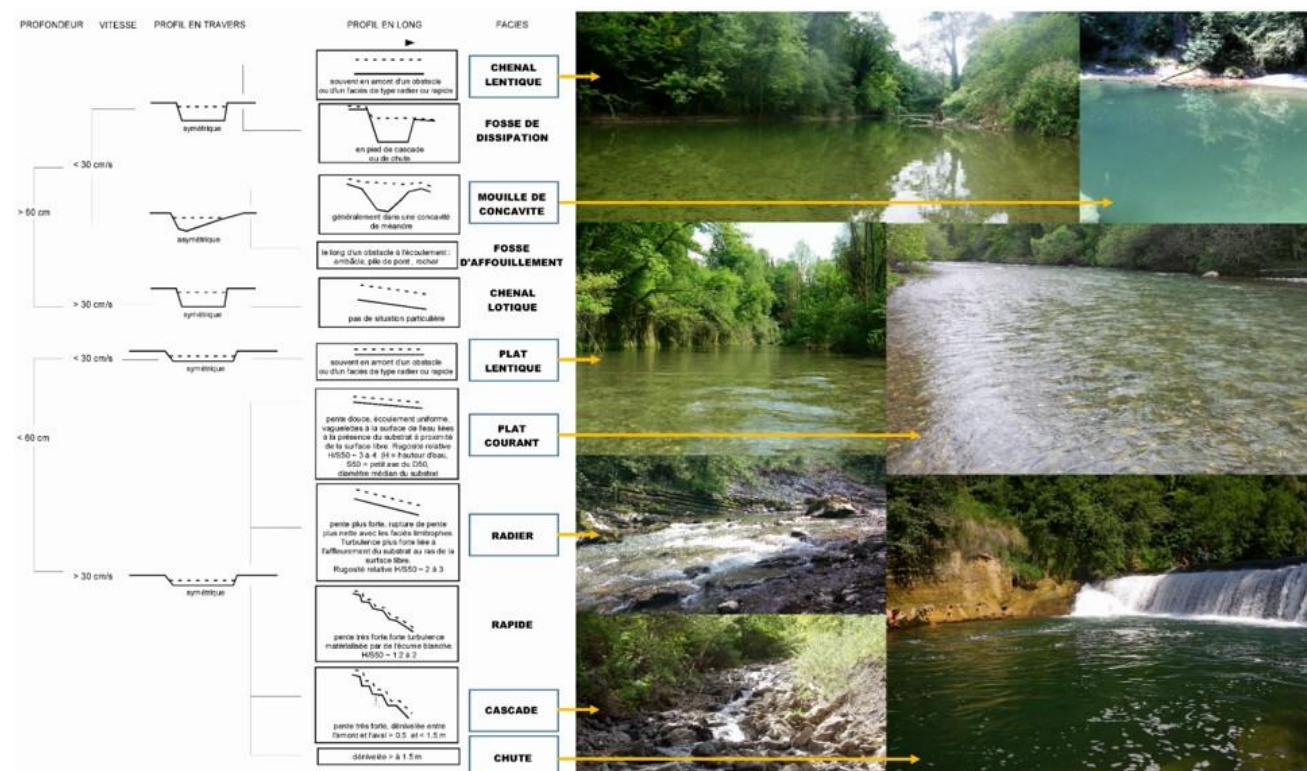


Figure 16 : Clés de classification des faciès d'écoulement et illustrations photographiques des faciès rencontrés sur le Chéran (Chéran.fr à partir de Malavoi et Souchon, 2002).

Qui, Matériel et coût de l'opération :

En interne

4. Préconisations de suivi dynamique

4.1. Préconisations à l'échelle des fiches actions

En concertation avec le Sila, le type de suivi, la fréquence, l'emprise, la densité, la priorité et le budget sont préconisés par fiches actions. Certains tronçons comme la plaine du Fier et les vallons du Fier englobent plusieurs fiches actions. Un suivi dynamique global à l'échelle du tronçon sera alors préconisé et représenté en bleu clair dans le tableau comme sur les tronçons de la plaine du Fier et du Vallon du Fier. Par ailleurs, le nombre de jour agent par unité de suivi (c'est-à-dire combien de temps est nécessaire pour externaliser un suivi topographique, pour faire en interne un suivi granulométrique de x échantillons, un suivi photographiques de x photos) ainsi que le coût en budget externe sont des estimations et peuvent varier. De plus, il est inséré dans le tableau une ligne d'analyse et interprétation des données dans le cadre du suivi de la plaine du Fier et du Vallon du Fier. La synthèse de ces données est à effectuer régulièrement (après chaque grosse acquisition de données c'est-à-dire après acquisition d'un lidar et d'une orthophotographie). L'objectif est de pouvoir adapter le suivi et déclencher d'éventuels opérations.

Tronçon	FA	Objet	Type de suivi	Fréquence	Emprise	Densité	Priorité de la typologie du suivi	Nb de j/ag/unité de suivi	Budget externe (€)
Fier amont	Langogne LN-2-1/2	Restauration morphologique au Frenay	Suivi photographique des points singuliers de la dynamique hydromorphologique (charge alluviale, recolonisation végétale, mobilité du chenal, érosion latérale...) et de l'évolution du site post-travaux	Etat 0 avant chantier Suivi annuel après chantier	Linéaire de la FA + 100m amont et aval	5 points photographiques	1	0.2	
			Suivi granulométrique	Etat 0 Avant chantier Après 2 ans Puis tous les 3 ans	En amont du chantier Au droit du passage à gué En aval	3 sites échantillonnés	3	0.5	
			Suivi topographique du profil en long	Etat 0 2 ans après travaux Après chaque crue morphogène	Linéaire de la FA + 100m amont et aval (environ 700m)	1 PL	2	0.5	1000
			Suivi des faciès d'écoulement	Etat 0 Après 2 ans	Linéaire de la FA + 100m amont et aval (environ 700m)		2	0.1	
			Suivi floristique de la zone restaurée Suivi de la colonisation par les espèces exotiques envahissantes Suivi de la fonctionnalité écologique du lit.	Etat 0 avant chantier Suivi annuel pendant 3 ans		5 stations	1	1	5000
	Champfroid CH-2-1/2	Restauration de zone humide au col du mrais	Suivi topographique du profil en long	Etat 0 2 ans après travaux Tous les 3 ans ou post crue morphogène jusqu'à stabilisation	Depuis l'amont de la dernière maison en rive gauche jusqu'au pont de La Perrière (environ 500m)	1 PL	1	0.5	1000
			Suivi photographique des points singuliers de la dynamique hydromorphologique (mobilité verticale, connexion entre le chenal et la zone humide...)	Etat 0 avant chantier Suivi annuel après chantier		5 points photographiques	1	0.2	
			Suivi des faciès d'écoulement	Etat 0 Après 2 ans	Depuis l'amont de la dernière maison en rive gauche jusqu'au pont de La Perrière (environ 500m)		2	0.1	
			Suivi granulométrique	Etat 0 Avant chantier Après 2 ans Puis tous les 3 ans		3 sites échantillonnés	2	0.5	
	Var VA-2-1/2	Régulation des apports sédimentaires dans la traversée de la Clusaz	Suivi topographique du profil en long	Etat 0 2 ans après travaux Tous les 3 ans ou post crue morpho jusqu'à stabilisation	Depuis l'amont du ranch jusqu'à l'aval de la confluence avec le Nant (600m)	1 PL	2	0.5	1000
			Suivi photographique des points singuliers de la dynamique hydromorphologique (du fonctionnement de cette zone d'expansion, de la charge alluviale, de l'état des ouvrages, de la mobilité verticale)	Etat 0 avant chantier Suivi annuel après chantier		5 points photographiques	1	0.2	
			Suivi granulométrique	Avant travaux Après la 1ère crue morpho Tous les 5 ans ou post crue morpho	Dans le chenal en amont de la zone d'expansion Dans la zone d'expansion Dans le nant en aval	3 sites échantillonnés	2	0.5	
			Suivi des volumes curés à la plage de dépôts	A chaque curage			1	0.1	

Tronçon	FA	Objet	Type de suivi	Fréquence	Emprise	Densité	Priorité de la typologie du suivi	Nb de j/ag/unité de suivi	Budget externe (€)
Fier amont Thônes	Fier-1-2-3	Restauration morphologique en aval du pont de Chamossière et confortement du seuil du pont de Tronchine	Suivi topographique du profil en long	Annuel si crue morphogène si non tous les 2 ans	Pont de Chamossière jusqu'au Pont de Tronchine	1 PL	1	0.5	1500
			Suivi photogrammétrique	Tous les 3/4 ans et post-crue morphogène Pas besoin de campagne photogrammétrique en cas de campagne Lidar	Au droit de l'emprise de la FA sur un linéaire de 500m		2	0.5	1500
			Suivi photographique de la charge alluviale, suivi de l'état du seuil de Tronchine et des points singuliers de la dynamique hydromorphologique (structures alluvionnaires ou des dépôts de charriage, de la végétalisation du bras secondaire et de la bande active, de la mobilité latérale et verticale...).	Annuel Post crue morphogène	Pont de Chamossière jusqu'au Pont de Tronchine	8 Points photographiques	1	0.4	
			Suivi de la surface de la bande active	Au gré des campagnes photogrammétriques et Lidar	Au droit de l'emprise de la FA sur un linéaire de 500m		2	1	
			Suivi granulométrique	Avant travaux et Post travaux Tous les 3 ans	2 dans la zone de travaux et 2 en aval	4 Sites échantillonnés	2	0.8	
Plaine du Fier (Thônes à Morette)	Fier-1-1/2-3	Restauration de la dynamique sédimentaire par reconnexion des bancs et terrasses, des apports du Malnant et retraits de protections de berges	Suivi topographique du profil en long	Annuel si crue morphogène si non tous les 2 ans	De Thônes à Morette	1 PL	1	0.5	1500
			Suivi photogrammétrique	Tous les 3/4 ans et post-crue morphogène Pas besoin de campagne photogrammétrique en cas de campagne Lidar	De Thônes à Morette		2	0.5	2500
			Suivi photographique de la charge alluviale, suivi de l'état des seuils, suivi du retrait de la protection de berge (RG amont confluence Malnant) et des points singuliers de la dynamique hydromorphologique (structures alluvionnaires ou des dépôts de charriage, de la végétalisation des bancs, de la mobilité latérale et verticale...), suivi de la réinjection interne au droit de la confluence du Malnant	Annuel Post crue morphogène	De Thônes à Morette	Environ 20 (1 par seuils, 1 par banc traité, 3 à la confluence avec le Malnant et 2 par tronçon entre seuils)	1	0.8	
			Suivi granulométrique de la charge réinjectée au droit du Malnant	Avant travaux à la confluence avec le Malnant Après la première crue morphogène Suivi tous les 3 ans	De la confluence avec le Malnant jusqu'au pont de Morette	4 sites échantillonnés (1 dans le Malnant 200m à l'aval du pont Bellossier, 1 à la confluence, 2 à l'aval)	2	0.8	
			Suivi topographique par superposition de Lidar ou suivi photogrammétrique	Au gré des campagnes photogrammétriques et Lidar	De Thônes à Morette en prenant le cône du Malnant		1	0.5	1500
			Suivi des volumes et des surfaces des structures alluvionnaires et suivi de la surface de la bande active	Au gré des campagnes photogrammétriques et Lidar	Même emprise que le vol photogrammétrique ou Lidar		1	3	
			Analyse et interprétation des données	Au gré des campagnes topographiques (Lidar/profil en long)	De Thônes à Morette		1	0.5	4000

Plaine du Fier	Fier 1-1-1 1-2-1 1-2-2 1-4/5-1	Suivi global de la plaine du Fier Maintien de la dynamique sédimentaire en plaine du Fier par préservation de la mobilité des structures alluvionnaires Restauration de la dynamique sédimentaire en plaine du Fier par retrait des ouvrages latéraux Restauration de la dynamique sédimentaire en plaine du Fier par remobilisation des réserves sédimentaires latérales existantes Soutien de la fourniture sédimentaire en plaine du Fier par réinjection d'apports externes issus de travaux ou d'entretiens de cours d'eau dans la vallée	Suivi topographique du profil en long	Annuel si crue morphogène si non tous les 2 ans	Pont de Morette au Pont de Dingy Saint Clair	1 PL	1	0.5	800
			Suivi photogrammétrique	Ts les 3/4 ans et post-crue morphogène Pas besoin de campagne photogrammétrique en cas de campagne Lidar	Pont de Morette au Pont de Dingy Saint Clair		1	0.5	2500
			Suivi photographique de la charge alluviale et des points singuliers de la dynamique hydromorphologique (structures alluvionnaires ou des dépôts de charriage, de la végétalisation des bancs, de la mobilité latérale et verticale...) et des travaux (bancs, terrasses, cordon de réinjection).	Annuel Post crue morphogène	Pont de Morette au Pont de Dingy Saint Clair	Une tous les 50m	1	1	
			Suivi granulométrique	Avant travaux Après la première crue morphogène	Pont de Morette au Pont de Dingy Saint Clair	3 sites échantillonnés	3	0.8	
			Suivi topographique par superposition de Lidar ou suivi photogrammétrique	Au gré des campagnes photogrammétriques et Lidar	Même emprise que le vol photogrammétrique ou Lidar		2	0.5	1500
			Suivi des volumes et des surfaces des structures alluvionnaires et suivi de la surface de la bande active	Au gré des campagnes photogrammétriques et Lidar	Même emprise que le vol photogrammétrique ou Lidar		1	3	
			Suivi de la mobilité des structures alluvionnaires	Suivi annuel et suivi post-crue morphogène	Emprise de la FA + 200m amont et 500m aval	10 placettes (à répartir sur les bancs et terrasses reconnectés) Localisation à définir à l'issue des premières observations post-travaux	3	2	150
			Analyse et interprétation des données	Au gré des campagnes topographiques (Lidar/profil en long)	Pont de Morette au Pont de Dingy Saint Clair		1	0.5	10000

Plaine du Fier	Fier 1-4/5-1	Soutien de la fourniture sédimentaire en plaine d'Alex par réinjection d'apports externes issus de travaux ou d'entretiens de cours d'eau dans la vallée	Cf suivi global de la plaine du Fier ci-dessus						
			Suivi du colmatage	Avant travaux 1 mois après travaux (suivi par stick hypoxiques) Après 1 an et après la 1ère cure morphogène (Suivi visuel)	Sur les atterrissements en aval du cordon de réinjection	20 sticks à disperser sur plusieurs atterrissements	2	3	
			Suivi granulométrique	Avant travaux et après la première crue morphogène puis suivi annuel pendant 3 ans	Le long du cordon de réinjection + Tronçon aval jusqu'au seuil intermédiaire (aval rond point d'Alex)	3 sites échantillonnés	2	0.8	
			Suivi PIT Tags	Post-travaux pour l'installation et après chaque crue morphogène pendant une période de 5 ans	Le long du cordon de réinjection + Tronçon de 1km à l'aval du site de réinjection	250 PIT Tags	1	3	10000 (PIT Tags passifs)
	Fier 2-2-1	Préservation des ouvrages stabilisateurs en plaine d'Alex : Contre seuil du seuil naturel	Suivi photographique de l'état de l'ouvrage et des points singuliers de la dynamique hydromorphologique à proximité de l'ouvrage	Suivi annuel et post-cru morphogène	Au droit de l'ouvrage	3 Points photographiques (amont, ouvrage, aval)	1	0.2	
	Nant d'Alex Fier 1-3-1	Gestion de la continuité sédimentaire à la confluence avec le Fier	Suivi topographique du profil en long et des profils en travers	Avant et après intervention Tous les 2 ans - Post Q5-Q10	550ml depuis la confluence	1 PL + 8 PT	1	0.5	2000
			Suivi photographique de la charge alluviale, des repères d'engravements et des points singulier de la dynamique hydromorphologique (structures alluvionnaires ou des dépôts de charriage, de la mobilité latérale et verticale...)	Annuel Post crue morphogène	550ml depuis la confluence	8 points photographiques	1	0.4	
			Suivi des volumes curés	A chaque curage			1	0.1	
			Suivi des repères d'engravement	Suivi annuel du repère et post-cru morphogène		4 repères	1	0.2	
			Suivi granulométrique	Avant travaux Après chaque crue morphogène ou à chaque curage	Amont du pont et aval du pont	2 sites échantillonnés	1	0.5	

Tronçon	FA	Objet	Type de suivi	Fréquence	Emprise	Densité	Priorité de la typologie du suivi	Nb de j/ag/unité de suivi	Budget externe (€)
Fier médian	Isernon IS-2-1-1	Restauration hydro-éco-morphologique	Suivi topographique du profil en long	Avant travaux Après travaux Tous les 2 ans 5 ans en fonction crue morphogène	600m en amont depuis l'entrée du busage de Vovray	1 PL	2	0.5	1000
			Suivi des volumes curés à la plage de dépôts	A chaque curage			1	0.1	
			Suivi granulométrique	Etat 0 Avant chantier Après 2 ans Puis tous les 3 ans		2 sites échantillonnés	3	0.4	
			Suivi photographique de la géométrie de la section, de la végétation (Espèces Exotiques Envahissantes), de la charge alluviale et du transport solide, de l'état des ouvrages et du remplissage de la plage de dépôts	Etat 0 avant chantier Suivi annuel après chantier	600m en amont depuis l'entrée du busage de Vovray	5 points photographiques	1	0.2	
			Suivi du faciès d'écoulement	Etat 0 Après 2 ans	600m en amont depuis l'entrée du busage de Vovray		3	0.2	
Fillière	Daudens DA-2-2-1	Confortement du seuil au lieu-dit le Plot	Suivi topographique du profil en long et de profils en travers Suivi photographique des points singuliers de la dynamique hydromorphologique et de l'état de l'ouvrage	Suivi annuel	Ouvrage jusqu'à la confluence avec la Fillière	5 points photographiques	1	0.2	
	Fillière FL-1-4-1	Accompagnement des travaux de restauration de la continuité piscicole au seuil du moulin	Suivi topographique du profil en long et de profils en travers (Suivi du destockage sédimentaire entre les phases d'arasement et suivi de l'adaptation morphologique du site) (Zone à inclure en cas de vol Lidar sur le Fier)	Entre chaque phase d'arasement Après travaux : suivi tous les 2 à 5 ans Après crue morphogène (Q2 à Q5)	Depuis le pont des sauts jusqu'au parc de la Fillière (1.2km)	1 PL + 1 PT (les 100m en moyenne, densification sur le remous solide de l'ancien ouvrage)	1	0.5	3000
			Suivi granulométrique	Avant chaque arasement Après 1 an Puis tous les 3 ans	2 sites en amont du seuil 1 site en aval 1 site en aval (Parc de la Fillière)	4 sites échantillonnés	1	0.7	
			Suivi photographique de l'évolution du stock de matériaux, des structures alluvionnaires ou dépôts de charriage	Suivi annuel Post-crue morphogène	Depuis le pont des sauts jusqu'au parc de la Fillière (1.2km)	10 points photographiques	1	0.4	
Fier aval	Lagnat LG-2-1/2	Gestion des apports sédimentaires du Lagnat	Suivi topographique du profil en long et des profils en travers	Avant et après intervention Ts les 2 ans - Post Q5-Q10	900m en partant de 100m en amont de la plage de dépôts	1 PL + 3 PT au droit de la plage de dépôts	1	0.5	1500
			Suivi photographique de la charge alluviale, des repères d'engrèvement et des points singuliers de la dynamique hydromorphologique	Annuel Post crue morphogène	100m à l'amont de la plage de dépôts jusqu'à l'aval de la zone urbaine	10 points photographiques	1	0.4	
			Suivi des volumes curés	A chaque curage			1	0.1	
			Suivi des repères d'engrèvement	Suivi annuel du repère et post-crue morphogène	A définir pendant les travaux pour la localisation des repères	3 repères d'engrèvement	1	0.2	
			Suivi granulométrique	Avant travaux Après chaque crue morphogène ou à chaque curage	Dans la plage de dépôts	2 sites échantillonnés	2	0.5	
Vallon du Fier	Fier-2-2-1 Fier-2-2-2	Gestion du risque inondation induit par l'exhaussement du cours d'eau Optimisation de la gestion sédimentaire	Suivi photographique de la charge alluviale, des repères d'engrèvement et des points singuliers de la dynamique hydromorphologique	Annuel Post crue morphogène	Pont de Brogny au Pont de Tasset	10 points photographiques	1	0.4	
			Suivi des repères d'engrèvement	Suivi annuel du repère et post-crue morphogène	5 repères d'engrèvement : 1 repère à la confluence avec le Vieran, 1 repère à 100m en aval du Pont Belley puis tous les 200m pour la FA Fier-2-2-1 2 repères de plus au droit de la zone de régulation aménagée en amont de la confluence du Vieran pour la FA Fier-2-2-2	5 repères d'engrèvement	1	0.5	
			Suivi topographique du profil en long et des profils en travers (bathymétrie)	Ts les 4 ans et après chaque crue morphogène	Pont de Brogny au Pont de Tasset	1 PL et 30 PT	1	0.5	8000
			Balisage des profils en travers	1	Pont des Ilettes au Pont de Tasset	15 balises	1	0.5	5000
			Suivi des volumes curés	A chaque curage	Entre le Pont de Belley et le pont de Tasset		1	0.1	
			Suivi granulométrique des volumes curés	A chaque curage	Entre le Pont de Belley et le pont de Tasset	2 par curage	2	0.5	3000
			Analyse et interprétation des données	Au gré des campagnes topographiques (Lidar/PL)	Entre le Pont de Brogny et le Pont de Tasset		1	0.5	5000



Tronçon	FA	Objet	Type de suivi	Fréquence	Emprise	Densité	Priorité de la typologie du suivi	Nb de j/ag/unité de suivi	Budget externe (€)
Affluents du bout du lac	Bornette BO-2-1/2	Restauration d'un espace alluvial fonctionnel à la traversée du marais des plaffes	Suivi photographique de la charge alluviale, des repères d'engravements et des points singuliers de la dynamique hydromorphologique (érosions de berge, seuil, mobilité verticale et latérale, faciès d'écoulement...)	Annuel Post crue morphogène	Sur des points fixes à définir après travaux + au droit des repères d'engravement	10 points photographiques dont les photos au droit des repères d'engravement	1	0.4	
			Suivi des repères d'engravement	Annuel Post crue morphogène	Emplacement des repères à définir pendant les travaux	4 repères d'engravement	1	0.2	
			Suivi topographique du profil en long et des profils en travers (Zone à intégrer en cas de vol Lidar)	Tous les 3 ans Post Q5-Q10	Emprise des travaux +100m amont et aval pour le PL	1PL + 4 PT	1	0.5	1500
			Suivi de l'évolution des faciès d'écoulement	Avant travaux Un juste après Tous les 5 ans ou post Q5-Q10	Emprise des travaux +100m amont et aval		2	0.2	
	Eau Morte EM-2-1/2	Restauration d'un espace alluvial fonctionnel du pont Laffin au marais de Giez	Suivi photographique de la charge alluviale, des repères d'engravement, et des points singuliers de la dynamique hydromorphologique (végétation, érosion, mobilité verticale, faciès d'écoulement...)	Annuel Post-crue morphogène	Emprise de la FA	10 points photographiques	1	0.4	
			Suivi topographique du profil en long et des profils en travers (Zone à intégrer en cas de vol Lidar)	Tous les 3 ans ou post Q10	2,5km	1 PL + 12 PT	1	0.5	3000
			Suivi des repères d'engravement avant travaux et suivi des nouveaux repères après travaux	Annuel Post crue morphogène	Repères actuels : Amont et aval Pont de la Brévière et entrée du Marais de Giez Nouveaux repères : Voir FA	6 repères d'engravement	1	0.3	
			Suivi granulométrique	Avant travaux Après travaux Tous les 5 ans ou post-crue	A repartir sur l'emprise des travaux	4 sites échantillonnés	2	0.7	
	Ire IR-2-3	Amélioration de la connaissance entre RD1508 et lac	Suivi photographique des points singuliers de la dynamique hydromorphologique (charge alluviale, mobilité verticale, végétalisation du chenal, érosions de berge, faciès d'écoulement...)	Annuel et post crue morphogène		5 points photographiques	1	0.2	
	Nant de Montmin MONT-2-1/2	Restauration espace alluvial fonctionnel en plaine de Verthier	Suivi photographique de la charge alluviale, des repères d'engravement et des points singuliers de la dynamique hydromorphologique (Erosions de berge, mobilité verticale, faciès d'écoulement...)	Annuel Post-crue morphogène	2km	10 points photographiques	1	0.4	
			Suivi topographique du profil en long	Tous les 3 ans ou post Q10	2km	1 PL	1	0.5	800
			Suivi photogrammétrique	Avant après travaux et tous les 3 ans	2km		1	0.5	2500
			Suivi des nouveaux repères après travaux	Annuel Post crue morphogène	A définir pendant les travaux	4 repères d'engravement	1	0.2	
			Suivi granulométrique	Avant travaux Après travaux Tous les 5 ans ou post-crue	En amont et en aval et une à l'aval de la confluence	3 sites échantillonnés	2	0.5	
	Saint-Ruph RU-2-2	Restauration d'un espace alluvial fonctionnel en amont du barrage des Roux	Suivi photographique de la charge alluviale, des repères d'engravement et des points singuliers de la dynamique hydromorphologique (Erosions de berge, mobilité verticale, faciès d'écoulement...)	Annuel Post-crue morphogène	Sur l'emprise de la FA	2 points photos	1	0.2	
			Suivi granulométrique	Avant travaux Après crue morphogène		1 site échantillonné	2	0.2	
			Suivi topographique par vol drone photogrammétrique	1er vol après la gestion de la végétation Tous les 3 ans en période hivernale sans neige	A inclure en cas de vol LIDAR sur l'eau morte		1		1500

Tronçon	FA	Objet	Type de suivi	Fréquence	Emprise	Densité	Priorité de la typologie du suivi	Nb de j/ag/unité de suivi	Budget externe (€)
Affluents médians du lac	Laudon, Villard, Entrevernes, Craz, Bluffy Affl-Lac-2-1/2	Gestion des apports sédimentaires à l'embouchure du lac	Suivi photographique des dépôts aux embouchures et des repères d'engravement (repères installés dans le cadre de la FA et non du suivi)	Suivi annuel Post-crue morphogène	Aux embouchures et dans le chenal à l'amont (100 à 200m selon FA)	A minima 1 à l'embouchure et 1 dans le chenal	1	0.5	
			Suivi topographique du profil en long (Zone à intégrer en cas de vol Lidar)	Tous les 2 ans Post Q5-Q10	De l'embouchure et remonter dans le chenal selon l'emprise de la FA	1 PL + 3 PT	1	0.2	800 par embouchure
			Suivi des volumes curés	A chaque curage			1	0.1	
	Nant de Craz CR-2-2	Gestion des apports sédimentaires du Nant de Craz à l'aval de la RD909A	Suivi de l'engravement par suivi des repères d'engravement	Suivi annuel du repère et post-crue morphogène	Position des repères : à 20m et 50m en amont du pont de la rue Noblemaire	2 repères + 1 suivi à chaque repère	1	1	1500
			Suivi photographique de la charge alluviale et des repères d'engravement	Annuel Post-crue morphogène	Au droit des deux repères + vue amont depuis le pont + 1 point dans le chenal entre les 2 ponts	4 points photos	1	0.2	
			Suivi topographique du profil en long (Zone à intégrer en cas de vol Lidar)	Tous les 2 ans Post Q5-Q10	Tronçon entre les 2 ponts	1 PL + 3 PT	1	0.5	800
			Suivi des volumes curés	A chaque curage			1	0.1	
	Nant du Villard VL-2-1/2	Restauration d'un EBF et de régulation sur le secteur de Tavan	Suivi photographique de la charge alluviale, des repères d'engravement, de la végétation (EEE)	Annuel Post crue morphogène	Emprise des travaux(500ml) +100m amont et aval	5 points photographiques	1	0.2	
			Suivi des repères d'engravement	Annuel Post crue morphogène	A définir pendant les travaux	4 repères d'engravement	2	0.2	
			Suivi topographique du profil et des profils en travers (Zone à intégrer en cas de vol Lidar)	Tous les 3 ans Post Q5-Q10	PL 500ml + 100m aval	1 PL + 4 PT	1	0.5	1500
			Suivi de l'évolution des faciès d'écoulement	Avant travaux Un juste après Tous les 5 ans ou post Q5-Q10	Emprise des travaux +100m amont et aval		2	0.2	
			Suivi floristique de la zone restaurée						
			Suivi de la colonisation par les espèces exotiques envahissantes						
			Suivi de la fonctionnalité écologique du lit.	Etat 0 avant chantier Suivi annuel pendant 3 ans		5 stations	1	1	5000

4.2. Préconisations à l'échelle globale

Tous ces suivis à l'échelle de la fiche action sont une base très intéressante du suivi dynamique à l'échelle du bassin versant du Fier. Afin de renforcer, ce suivi à l'échelle globale, HYDRETUDES préconise également d'effectuer les suivis suivants :

4.2.1. Vol Lidar

Pour permettre la mise en place d'un suivi à l'échelle globale, les données Lidar sont un préalable. Il est préconisé d'effectuer un vol tous les 4 ans ou suite à une crue très morphogène (supérieure à la Q10). Cette acquisition Lidar doit tant que possible s'accompagner d'une orthophotographie.

Les cartes suivantes présentes les tronçons prioritaires à survoler :

- La plaine du Fier du Pont de Chamossière au Pont de Dingy. Le tronçon prioritaire restant la plaine du Fier entre Thônes et le pont de Dingy (Estimation autour de 10 000 €) ;
- Le vallon du Fier et l'aval de la Filière (Pont des Sauts). Le tronçon prioritaire est le tronçon entre le Pont de Brogny et le Pont de Tasset (Estimation autour de 4 000 €).

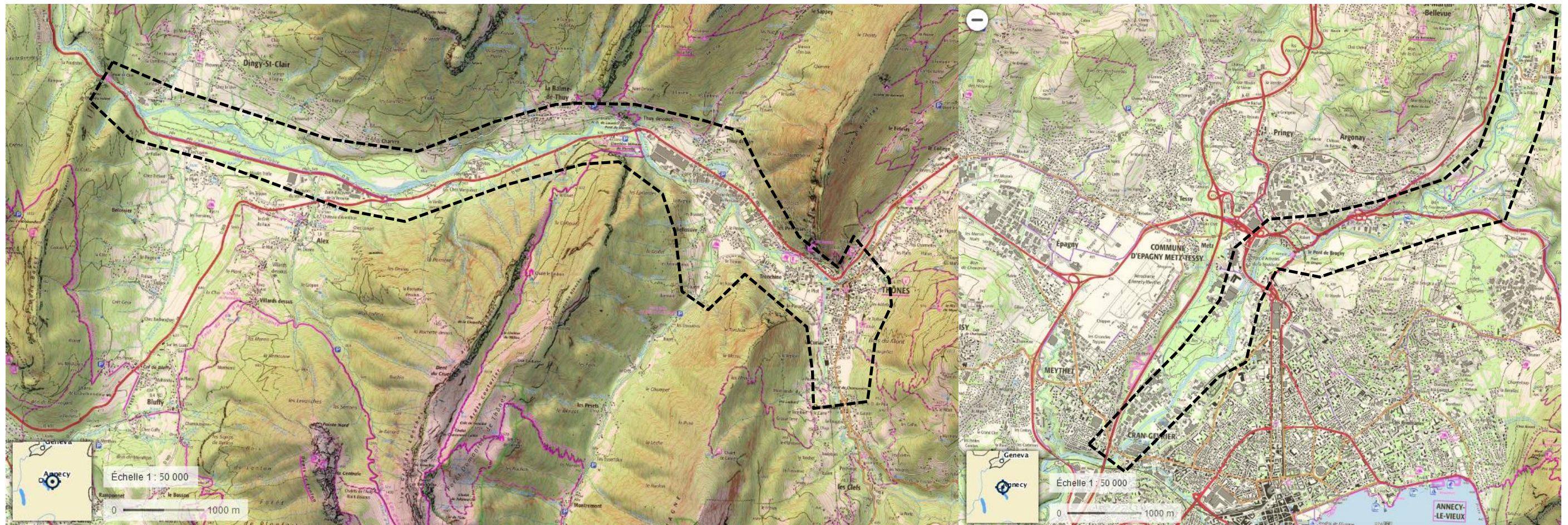


Figure 17 : Délimitation des vols Lidar.

4.2.2. [Suivi photographique et granulométrique](#)

Plusieurs suivis photographiques et granulométriques sont préconisés dans le cadre du suivi des fiches actions. Ils vont permettre la création d'une large base de données. Il est cependant préconisé, dans la mesure du possible, d'étendre les sites de suivi sur les tronçons du Fier non concernés par les fiches actions et sur les affluents.

4.2.3. [Suivi des volumes curés dans les plages de dépôts](#)

Dans le cadre de l'amélioration de la connaissance sur la fourniture sédimentaire des affluents du Fier, il est préconisé de bien suivre tous les volumes curés dans les différentes plages de dépôts et les chenaux sur tout le territoire dans un fichier Excel.



Bibliographie

- Agence Française pour la Biodiversité., Irstea., 2019. Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau.
- Archambaud, G., Giodano, B., Dumont, B., 2005. Description du substrat minéral et du colmatage. Aix en Provence, CEMAGREF, 7p.
- 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.
- Bjornn, T.C., Brusven, M.A., Molimau, M.O., Miligan, 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 p.
- Camenen, B., Le Coz, J., Paquier, A., Lagouy, M., 2010. An estimation of gravel mobility over an alpine river gravel bar (Arc en Maurienne, France) using PIT-tag tracers. 5th International Conference on Fluvial Hydraulics, 8p.
- 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), 1-21.
- Chapuis, M., 2012. Mobilité des sédiments fluviaux grossiers dans les systèmes fortement anthropisés : éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille.
- Chapuis, M., Dufour, S., Provansal, M., Couvert, B., De Linares, M., 2015. Coupling channel evolution monitoring and RFID tracking in a large, wandering, gravel-bed river : Insights into sediment routing on geomorphic continuity through a riffle-pool sequence. *Geomorphology* 231, 258-269.
- Costerton, J.W., 2000. Biofilms in the New Millennium : musings from a peak in Xanadu. Symposia-Society for general microbiology, Cambridge, Cambridge University Press, 329-344.
- Cummins, K.W., Lauff, G.H., 1969. The influence of substrate particle size on the microdistribution of stream macrobenthos. *Hydrobiologia*, 34(2), 145-181.
- Datry, T., Dole-Olivier, M.J., Marmonier, P., Claret, C., Perrin, J.F., Lafont, M., Breil, P., 2008. La zone hyporhéioque, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. *In : Ingénieries – EAT*, 54, 3-18.
- Fonstad, M.A., Dietrich, J.M., Courville, B.C., Jensen, J.L., Carbonneau, P.E., 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms* 38, 421-430.
- 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), 339-355.
- Graff, K., Viel, V., Carlier, B., Lissak, C., Madelin, M., Arnaud-Fassetta, G., Fort, M., 2018. Traçage sédimentaire d'une lave torrentielle dans le bassin de Peyronnelle, Queyras, Alpes françaises du Sud. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 24 (1), 43-57.
- Heckmann, T., Véricat, D., 2018. Computing spatially distributed sediment delivery ratios : inferring functional sediment connectivity from repeat high-resolution digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms* 43, 1547-1554.
- Hynes, H.B.N., 1970. The ecology of running waters. Liverpool University Press, Liverpool. 555 p.



- Jantzi, H., 2018. Incision fluviale et transition d'une rivière alluviale vers une rivière à fond rocheux : formation et évolution des seuils molassiques de la moyenne Garonne toulousaine au cours du 20e siècle. Thèse de doctorat, Université Toulouse Jean-Jaurès, 336p.
- Liébault, F., Laronne, J.B., 2008. Evaluation of bedload yield in gravel-bed rivers using scour chains and painted tracers ; the case of the Esconavette torrent (southern French alps). *Geodinamica Acta*, 21 (1-2), 23-34.
- Liébault, F., Bellot, H., Chapuis, M., Klotz, S., Deschâtres, M., 2012. Bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 385–399.
- Lock, M., Wallace, R., Costerton, J., Ventullo, R.M., Charlton, S.E., 1984. River epilithon : toward a structural-functional model. *Oikos*, 10-22.
- Malavoi, J.R., Bravard, J.P., 2010. Elements d'hydromorphologie fluviale. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*. 224p.
- Malavoi, J.R., Souchon, Y., 2002. Standardized description of streams and rivers channel geomorphic units : Qualitative description key and physical measurements. *Bulletin Français De La Pêche Et De La Pisciculture*, (365-66): p. 357-37.
- Micheletti, N., Chandler, J.H., Lane, S.N., 2015. Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. *British Society for Geomorphology, Geomorphological techniques* (2), 2.2.
- 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.
- Push, M., Fiebig, D., Brettar, I., Eisenmann, H., Ellis, B.K., Kaplan, L.A., Lock, M.A., Naegeli, M.W., Traunsperger, W., 1998. The role of micro-organisms in the ecological connectivity of waters. *Freshwater Biology*, 40(3), 453-495.
- Richards, C., Host, G.E., Arthur, G.W., 1994. Identification of predominant environmental factors structuring stream macroinvertebrates communities within a large catchment. *Freshwater Biology*, 29, pp. 285-294.
- Rollet, A.J., 2007. Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain. Thèse de doctorat, Université de Lyon 3, 305p.
- Snavely, N., Seitz, S.M., Szeliski, R., 2008. Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision* 80 (12), 189–210.
- Stumpf, A., Malet, J.P., Allemand, P., Pierrot-Deseilligny, G., Skupinski, G., 2014. Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. *Geomorphology*.
- 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.
- Virmoux, C., Jugie, M., Gob, F., Brunstein, D., 2016. Suivi de l'érosion d'une berge par photogrammétrie Structure from Motion. *Photogrammétrie Numérique et Perception 3D : les nouvelles conquêtes*, ENSG.
- Yassine, R., 2020. Evaluation de l'efficacité probable d'un projet de restauration fonctionnelle et durable d'un cours d'eau. Thèse de doctorat. Université de Toulouse. 347p.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M., 2012. Structure-from-Motion photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.

Williams, G.P., Wolman, M., 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. *USGS Professional Paper*, 1286.

The collage consists of three distinct images. The top image shows a vast mountain landscape with a large reservoir or lake in the foreground, surrounded by dense evergreen forests and steep, rocky slopes. The bottom-left image depicts a stone-lined channel or culvert, with a concrete structure featuring a square opening, possibly a valve or access point. The bottom-right image is a close-up of blue industrial pipes and valves, showing a complex arrangement of fittings and a large handwheel.

RETUDES

Appuy / Argenvaux

©istock

©istock - svaretudes. Photos non contractuelles. Clarification: sedemarguer.com