



## SYNDICAT MIXTE DES BASSINS DE L'ESCOUTAY ET DU FRAYOL

Rapport  
Phase 1

# ÉTUDE DU FONCTIONNEMENT HYDROMORPHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DU FRAYOL ET ÉLABORATION D'UN PLAN DE GESTION PHYSIQUE Phase 1 : État des lieux – Diagnostic



ARI-16-021  
HYDRETUDES  
Septembre 2017

Émetteur

**HYDRETUDES**

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



Agréé digues et barrages

15 novembre 2012 JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Texte D1 n° 119

**Décrets, arrêtés, circulaires**

TEXTES GÉNÉRAUX

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

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

www.zpprincipal

IV. – Digues et petits barrages - études et diagnostics

NUMERO D'ARREMENT	DESIGNATION DE L'ENTREPRISE OU DE L'ORGANISME AGREÉ : digues et barrages - études et diagnostics	AGREÉ JUSQU'AU
14	HYDRETUDES	10 jan 2017

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

NUMERO D'ARREMENT	DESIGNATION DE L'ENTREPRISE OU DE L'ORGANISME AGREÉ : digues et petits barrages - études, diagnostics et suivi des travaux	AGREÉ JUSQU'AU
14	HYDRETUDES	10 jan 2017

Réf. affaire : ARI-16-021

Titre : Étude du fonctionnement hydromorphologique du bassin versant du Frayol et élaboration d'un plan de gestion physique

Indice	Date	Description	Statut	Établi par	Vérifié par	Approuvé par
01	01/09/2017	Première diffusion Pièce jointe : Annexes + Atlas carto.	<input checked="" type="checkbox"/> Provisoire <input type="checkbox"/> Définitif	JMD-CM	BC	PM

Directeur de projet : Benoit Chapon

Chef de projet : Jean-Manuel Deleuze

Maître d'Ouvrage : Syndicat Mixte des Bassins de l'Escoutay et du Frayol (SMBEF)

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

## SOMMAIRE

1	Préambule.....	8
1.1	Contexte et motivation de la mission.....	8
1.2	Replacer le Frayol dans son contexte dynamique .....	8
1.3	Périmètre d'étude et données disponibles.....	9
1.4	Une démarche scientifique .....	10
2	Rappel de quelques notions de l'hydromorphologie .....	11
2.1	L'équilibre dynamique .....	11
2.2	Les modes de transport des matériaux.....	12
2.3	L'évolution granulométrique amont → aval, des lits à blocs aux lits à graviers .....	13
2.4	La trajectoire géomorphologique d'un cours d'eau .....	15
2.5	L'incision .....	15
2.6	Métamorphose fluviale et temporalité .....	16
3	Présentation du bassin versant du Frayol .....	19
3.1	Contexte physique .....	19
3.2	Contexte géologique .....	24
3.3	Contexte hydrologique .....	28
4	Sectorisation morphodynamique du Frayol .....	30
4.1	Méthodologie.....	30
4.2	Description des tronçons .....	30
5	Héritage géomorphologique du Frayol.....	32
5.1	Forçage climatique.....	32
5.2	Forçage anthropique .....	33
5.3	Analyse diachronique .....	49
6	Fonctionnement dynamique du Frayol.....	67
6.1	État de la recharge sédimentaire .....	67
6.2	Capacité de charriage du Frayol.....	78
6.3	Bilan sédimentaire semi-quantitatif du Frayol.....	86
7	Évolution dynamique du Frayol.....	88
8	Synthèse du diagnostic hydromorphologique .....	89
9	Espaces de bon fonctionnement .....	90
9.1	Définition et objectifs .....	90
9.2	Méthodologie.....	90
9.3	Espace de bon fonctionnement nécessaire .....	91
10	Glossaire .....	94
11	Références bibliographiques .....	101

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Démarche globale utilisée pour analyser la trajectoire géomorphologique du Frayol .....	9
Figure 2 : Les trois zones fonctionnelles d'un cours d'eau (d'après Sear & Newson, 1993) .....	11
Figure 3 : Représentation du principe d'équilibre d'après Lane (1955) et Borland (1960) .....	12
Figure 4 : Schéma montrant les modes de transport solide .....	13
Figure 5 : Gradient morphologique des lits fluviaux .....	14
Figure 6 : Les trois composantes de la trajectoire géomorphologique d'un cours d'eau .....	15
Figure 7 : Réponse temporelle à une perturbation suivant l'impact sur le profil en long (Malavoi & Bravard, 2010 d'après Knighton, 1984) .....	17
Figure 8 : Temps de réponse d'un cours d'eau suite à une perturbation (d'après Knighton, 1984) .....	17
Figure 9 : Exemple de trajectoire géomorphologique perturbée suite à un déséquilibre sédimentaire lié aux métamorphoses hydroclimatiques et anthropiques .....	18
Figure 10 : Localisation du bassin versant du Frayol .....	19
Figure 11 : Cartographie du relief du bassin versant du Frayol .....	20
Figure 12 : Profil en long 2016 du lit du Frayol (Source : HYDRETTUDES, 09/2016) .....	22
Figure 13 : Cartographie de l'occupation du sol du bassin versant du Frayol (Source : Corine Land Cover 2012) .....	23
Figure 14 : Ammonite .....	24
Figure 15 : Localisation des tronçons du Frayol .....	31
Figure 16 : Localisation des perturbateurs hydromorphologiques du Frayol selon leur nature et leur degré d'impact .....	34
Figure 17 : Perturbateurs anthropiques secondaires présents sur les parties amont et médiane du bassin versant (a) Pont d'Aubignas ; (b) Pont La Mure ; (c) Passerelle en bois à Rabayast ; (d) Pont SNCF de Rabayast .....	35
Figure 18 : Perturbateurs anthropiques majeurs (rouge) et secondaires (orange) présents au hameau Les Combes (a) Seuil maçonné d'une hauteur de 3,2 m ; (b) Passage à gué Ø600 ; (c) Passage à gué Ø1000 ; (d) Seuil maçonné partiellement détruit d'une hauteur de 1,2 m ; (e) Pont Les Combes .....	36
Figure 19 : Perturbateurs géomorphologiques majeurs (rouge) et secondaires (orange) présents sur les parties amont et médiane du bassin versant (a) Cascade n°1 (hauteur de 12,5 m) ; (b) Cascade n°2 ; (c) Cascade n°4 en amont du pont La Mure (hauteur de 7,1 m) ; (d) Cascade n°6 (hauteur de 6,4 m) ; (e) Seuil naturel en aval du gué Les Combes ; (f) Seuil naturel en amont immédiat du pont Les Combes (hauteur de 1,6 m) .....	37
Figure 20 : Perturbateurs géomorphologiques présents sur la partie aval du bassin versant du Frayol (a) Seuil naturel à l'aval immédiat du pont Le Pontet ; (b) et (c) Affleurements rocheux et seuils naturels au niveau de la gendarmerie du Teil ; (d) Seuil naturel parafouille à l'aval de la passerelle du stade Mélas .....	38
Figure 21 : Perturbateurs anthropiques majeurs (rouge) et secondaires (orange) présents sur la partie aval du bassin versant (a) Pont ferroviaire ; (b) Seuil partiellement détruit (flèche) et pont au hameau Le Pontet ; (c) Seuil maçonné atterri (hauteur de 3,8 m) ; (d) Passage à gué du Mélas ; (e) Seuil en amont du pont de la Liberté (hauteur de 2,3 m) ; (f) Pont de la Liberté et son seuil parafouille partiellement détruit (hauteur de 1,5 m) .....	39

Figure 22 : Perturbateurs anthropiques majeurs présents sur la partie aval du bassin versant (a) Pont à créneaux ; (b) Pont Matteoti avec son seuil parafouille (hauteur de 1,9 m) ; (c) Pont SNCF ; (d) Pont de la D86 avec son seuil parafouille partiellement détruit.....	40
Figure 23 : Falaise contraignant la divagation latérale du Frayol .....	43
Figure 24 : Localisation des éléments de corsetage anthropique sur le tronçon FRA_2.....	44
Figure 25 : Localisation des éléments de corsetage anthropique sur le tronçon FRA_3.....	45
Figure 26 : Localisation des éléments de corsetage anthropique sur le tronçon FRA_4.....	46
Figure 27 : Autorisation d'extraction de graviers dans le Frayol pour la société Blondet-St-Paul datant du 18 juin 1931 dans le cadre de travaux de terrassement pour l'agrandissement de la gare du Teil (Source : Archives départementales de l'Ardèche, n°7S29) .....	47
Figure 28 : Extraits du bordereau des prix d'application dans le cadre du projet de construction d'un pont de 3 arches sur la rivière de Frayol à Mélas datant de juillet 1894 (Source : Archives départementales de l'Ardèche, n°30479) .....	48
Figure 29 : Migration de méandres par expansion à l'aval immédiat de la confluence avec le ruisseau de Marsac représentée par la flèche rouge entre les apex 1947 et 2013 (à gauche) et évolution du lit contraint par la géologie entre les pont d'Aubignas et La Mure (à droite) (Fond de plan : BD ORTHO 2013) .....	51
Figure 30 : Tracés du Frayol pour le tronçon FRA_4 sur la période 1947-2013 (Fond de plan : BD ORTHO 2013) et carte de l'État-major .....	52
Figure 31 : Comparaison des profils en long levés sur la période 2005-2016 dans le tronçon FRA_4 Les flèches rouge indiquent les secteurs incisés par rapport à 2005 et les flèches vertes les secteurs en exhaussement.....	65
Figure 32 : Boisement des versants limitant le couplage sédimentaire latéral en amont du pont Neuf 67	
Figure 33 : Ruisseau de Thieulat contributeur basaltique faible (à gauche) et ruisseau de Marsac contributeur marneux peu important (à droite) .....	69
Figure 34 : Ruisseau des Avents présentant un faible couplage latéral (versants végétalisés et prairies) (à gauche) et ravin de Courion végétalisé sur son linéaire (faible couplage) (à droite) .....	69
Figure 35 : Ruisseau de l'Étang, le couplage sédimentaire latéral et l'exutoire sans véritable cône de déjection construit montrent la faiblesse de ce contributeur sédimentaire. ....	69
Figure 36 : Localisation des érosions de berge présentes sur le Frayol selon leur superficie.....	71
Figure 37 : Surfaces d'érosion présentes sur le Frayol au hameau Les Combes (a), en aval du pont Neuf (b) et au niveau de l'extrados du méandre à l'aval du pont de la Liberté.....	72
Figure 38 : Mesures effectuées sur les structures alluvionnaires .....	73
Figure 39 : Localisation des structures alluvionnaires du Frayol selon le volume stocké et leur degré de mobilité .....	74
Figure 40 : Répartition du stock alluvial du Frayol par stade d'évolution En vert : très mobile ; en orange : mobile et en rouge : quasi fixée.....	76
Figure 41 : Répartition du stock alluvial par tronçon et par degré de mobilité.....	76
Figure 42 : Structures alluvionnaires présentes sur le Frayol et caractérisées par des degrés de mobilité différents (a) (b) En intrados de méandre en amont proche d'Aubignas ; (c) Au droit du lieu-dit Devois de Joviac ; (d) En amont de la gendarmerie du Teil ; (e) En aval du pont de la Liberté ; (f) En amont du pont à créneaux En vert : très mobile ; en orange : mobile et en rouge : quasi fixée .....	77
Figure 43 : Granulométrie du lit du tronçon FRA_1. (a) Mélange de matériaux basaltiques et de matériaux marneux et calcaires issus des marnes supérieures de Valvignères incisées par la tête du	

Frayol entre la Borie d'Entraigues et le Bois Val et (b) matériaux basaltiques aux contours émoussés témoin de leur présence ancienne dans le stock alluvial .....	79
Figure 44 : Exemples de matériaux basaltiques. (a) Sur le tronçon FRA_1, les matériaux sont pour certains encore anguleux mais globalement déjà émoussés et (b) sur le tronçon FRA_3, suite au processus de transport fluvial, les matériaux basaltiques sont émoussés (mire photographique de 20 cm) .....	79
Figure 45 : Matériaux du lit du Frayol dans le tronçon FRA_2 (partie exondée). Beaucoup de matériaux apparaissent émoussés, rares sont les matériaux encore anguleux (notés A) .....	80
Figure 46 : Exemple de matériaux prélevés dans l'échantillon (a) du tronçon FRA_2 montrant quelques matériaux anguleux mais en cours d'émoussage et (b) du tronçon FRA_3 où la majorité des grains du lit sont émoussés (mire photographique de 20 cm) .....	80
Figure 47 : Matériaux du lit du Frayol sur le tronçon FRA_3. Les matériaux sont quasiment tous émoussés ce qui indique qu'ils sont dans le stock alluvial depuis très longtemps et que la recharge sédimentaire est inefficace.....	80
Figure 48 : Armure du lit du Frayol (en assec) sur le tronçon FRA_4 montrant des matériaux de faible taille et fortement émoussés .....	81
Figure 49 : Exemple de matériaux prélevés dans l'échantillon du tronçon FRA_4 montrant (a) des grains basaltiques émoussés et (b) des grains marneux émoussés (mire photographique de 20 cm) .....	81
Figure 50 : Courbe des débits classés à l'exutoire des tronçons du Frayol .....	85
Figure 51 : Capacité théorique annuelle de charriage par tronçon .....	85
Figure 52 : Bilan sédimentaire semi-quantitatif du Frayol .....	87
Figure 53 : Cartographie des périmètres nécessaires obtenus par la méthode simplifiée sur le Frayol dans la traversée du Teil.....	93

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Bibliographie existante sur le bassin versant du Frayol .....	10
Tableau 2 : Hiatus entre le temps géomorphologique et le temps de gestion .....	18
Tableau 3 : Échelle de résistance à l'érosion de différentes roches .....	26
Tableau 4 : Description des formations traversées par le Frayol .....	27
Tableau 5 : Synthèse des événements historiques du Frayol .....	29
Tableau 6 : Débits caractéristiques de crue du Frayol à l'exutoire du bassin versant .....	29
Tableau 7 : Principales caractéristiques des tronçons morphodynamiques du Frayol .....	30
Tableau 8 : Évolutions hydroclimatiques et incidences probables sur le Frayol.....	32
Tableau 9 : Répartition des perturbateurs anthropiques du Frayol par tronçon, type et degré d'impact .....	41
Tableau 10 : Répartition des perturbateurs géomorphologiques du Frayol par tronçon et type .....	41
Tableau 11 : Synthèse du corsetage du lit du Frayol par type.....	42
Tableau 12 : Synthèse du corsetage du lit du Frayol par tronçon.....	42
Tableau 13 : Photographies aériennes disponibles sur le Frayol.....	49
Tableau 14 : Principaux contributeurs sédimentaires potentiels du Frayol .....	68

Tableau 15 : Superficies de berge érodées du Frayol par tronçon .....	70
Tableau 16 : Répartition des volumes de matériaux stockés dans le lit mineur du Frayol par tronçon	75
Tableau 17 : Synthèse granulométrique du Frayol par tronçon .....	78
Tableau 18 : Paramètres d'entrée hydrauliques retenus .....	82
Tableau 19 : Synthèse des données exploitées.....	83
Tableau 20 : Courbe des débits classés de la Cèze à Bessèges calculée sur 28 047 données .....	83
Tableau 21 : Débits classés extrapolés au Frayol .....	84
Tableau 22 : Largeur de pleins bords de référence obtenue pour quelques profils en travers .....	91

## LISTE DES ENCARTS

Encart 1 : Pente, torrent et rivière torrentielle .....	21
Encart 2 : Les orogénèses.....	24
Encart 3 : Les périodes glaciaires du Quaternaire .....	25
Encart 4 : Échelle de dureté de Mohs.....	26
Encart 5 : Grandes Forces Hydrauliques.....	64
Encart 6 : Before Present.....	66
Encart 7 : Le couplage sédimentaire .....	67
Encart 8 : Les structures alluvionnaires .....	73

# 1 Préambule

## 1.1 Contexte et motivation de la mission

Le Syndicat Mixte des Bassins de l'Escoutay et du Frayol (SMBEF) souhaite définir un plan de gestion du transport solide et les espaces de bon fonctionnement du Frayol.

Le Frayol a un fonctionnement particulier dit « cévenol » caractérisé par des étiages sévères, voire des assecs, et des crues aussi soudaines que violentes. Cette situation génère un fonctionnement dynamique particulier, la charge grossière transitant rapidement dans les zones à forte pente en tête de bassin versant et s'accumulant en aval dès que la pente diminue.

Dans sa partie amont, le Frayol s'écoule directement sur le substratum et présente même par endroit des cascades parfois plurimétriques. Cette forte présence du substratum semble témoigner d'une incision caractérisée par un décapage du plancher alluvial.

La tête de bassin s'est construite dans la coulée basaltique des Coirons et une grande partie du linéaire se développe dans des terrains secondaires à dominante marneuse. Le Frayol s'est ainsi incisé dans les terrains marneux peu résistants et une partie de son cours se trouve donc contraint dans un système de gorges. La dépression d'Aubignas en amont s'individualise dans cette vallée contrainte qui ne s'ouvre véritablement qu'à l'arrivée sur Le Teil.

Ce système de gorges, cette alternance de roches dures (basaltes) et plutôt tendres (marnes) ne favorisent pas la présence de matériaux le long du linéaire du cours d'eau et les atterrissements sédimentaires y sont ainsi plutôt limités. On note la présence des matériaux basaltiques jusqu'à la confluence avec le Rhône et les matériaux présents en lit sont généralement émoussés témoignant certainement d'un faible renouvellement du stock alluvial.

Ce tracé particulier a limité l'anthropisation du bassin qui se cantonne pour l'essentiel à l'aval au niveau de l'ouverture de la vallée au contact de la plaine de Rhône.

Ces différents éléments semblent être les manifestations d'un déséquilibre morphodynamique hérité (*i.e.* de dysfonctionnements sédimentaires durant depuis un certain temps), lié au tarissement sédimentaire directement imputable aux évolutions climatiques de ces cent cinquante dernières années. Les conséquences de l'évolution du Frayol, par réajustements successifs lors des crues morphogènes, conduisent ainsi à de l'incision ou de l'érosion menaçant infrastructures, ouvrages d'art et zones habitées dans la traversée du Teil.

Il convient donc d'étudier le fonctionnement dynamique de ce cours d'eau pour mieux comprendre cet héritage et appréhender ces dysfonctionnements, et ainsi construire un plan de gestion cohérent et adapté.

## 1.2 Replacer le Frayol dans son contexte dynamique

Pour comprendre le fonctionnement dynamique du Frayol, il est absolument essentiel de le **replacer dans son contexte dynamique**. Cette mise en contexte dynamique doit apporter une nouvelle dimension à la fois dans la compréhension de l'héritage, du diagnostic fonctionnel et des solutions préconisées pour s'adapter au mieux au fonctionnement et à l'évolution dynamiques du Frayol.

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

Cette démarche permettant de replacer le Frayol dans son contexte dynamique s'appuie sur le concept de la **trajectoire géomorphologique** (au sens de Wiederkehr *et al.*, 2008) caractérisée par trois éléments en interrelations :

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

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

Le présent rapport a donc pour objet de présenter l'état des lieux-diagnostic du bassin versant du Frayol à partir de l'analyse de la trajectoire géomorphologique selon la méthodologie globale présentée à la Figure 1.

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

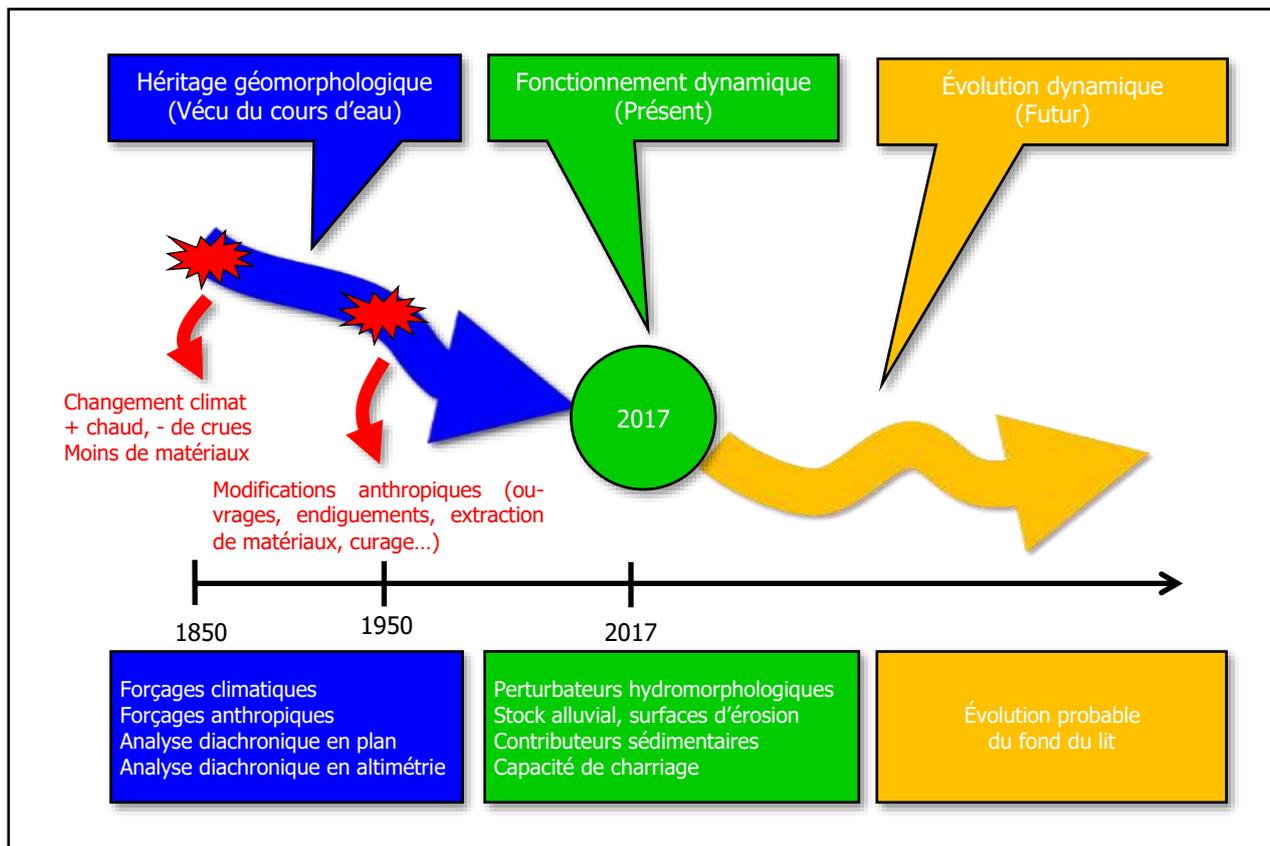


Figure 1 : Démarche globale utilisée pour analyser la trajectoire géomorphologique du Frayol

### 1.3 Périmètre d'étude et données disponibles

La présente étude concerne le bassin versant du Frayol depuis sa source jusqu'à la confluence avec le Rhône. L'étude de chaque composante de la trajectoire géomorphologique du Frayol repose sur le couplage de différents éléments mis à disposition dans le cadre de la mission :

- **Données bibliographiques** existantes sur le bassin versant du Frayol (cf. Tableau 1) ;
- **Entretiens** des personnes ressource du territoire dont les comptes-rendus sont disponibles en Annexe 1 ;
- **Investigations de terrain** réalisées par HYDRETTUDES durant l'automne 2016 consistant en un parcours pédestre de l'ensemble du linéaire du Frayol avec relevé de divers indicateurs hydromorphologiques (surfaces d'érosion, structures alluvionnaires, traces d'incision, ouvrages transversaux, ouvrages longitudinaux, confortements de berge, prélèvements granulométriques) ;
- **Levés topographiques terrestres** réalisés par HYDRETTUDES en septembre 2016 constitués d'un profil en long du Frayol hors zone de gorge et de 66 profils en travers répartis sur le linéaire du Frayol dont 24 réalisés aux mêmes emplacements que ceux levés en 2007 (cf. Annexe 2).

BIBLIOGRAPHIE DISPONIBLE SUR LE BASSIN VERSANT DU FRAYOL		
Nom de l'étude	Maître d'œuvre	Année
Étude hydraulique de la rivière le Frayol	SOGREAH	1984
Étude hydraulique de la rivière : le Frayol	IATE	2007
Étude hydraulique complémentaire au PPRI suite à la crue du Frayol du 14 et 15 novembre 2014	SAFEGE	09/2016
Programme Pluriannuel de Restauration et d'Entretien de la ripisylve et du lit du Frayol	SMBEF	2016
Schéma global de gestion du risque inondation du bassin versant du Frayol	SAFEGE	02/2017

Tableau 1 : Bibliographie existante sur le bassin versant du Frayol

#### 1.4 Une démarche scientifique

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

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

## 2 Rappel de quelques notions de l'hydromorphologie

### 2.1 L'équilibre dynamique

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

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

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

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

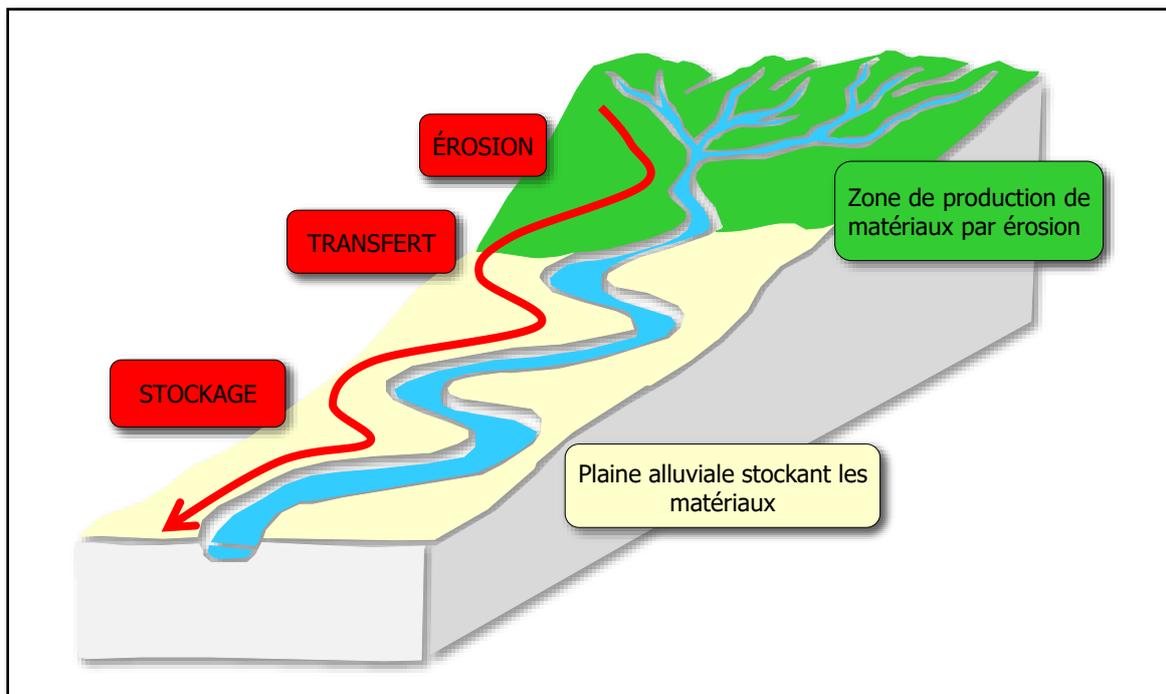


Figure 2 : Les trois zones fonctionnelles d'un cours d'eau (d'après Sear & Newson, 1993)

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

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

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

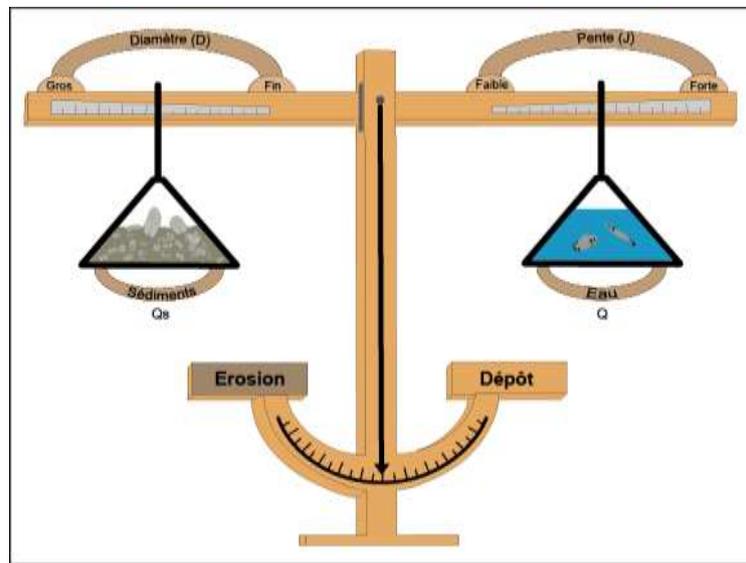


Figure 3 : Représentation du principe d'équilibre d'après Lane (1955) et Borland (1960)

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

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

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

## 2.2 Les modes de transport des matériaux

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

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

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

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

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

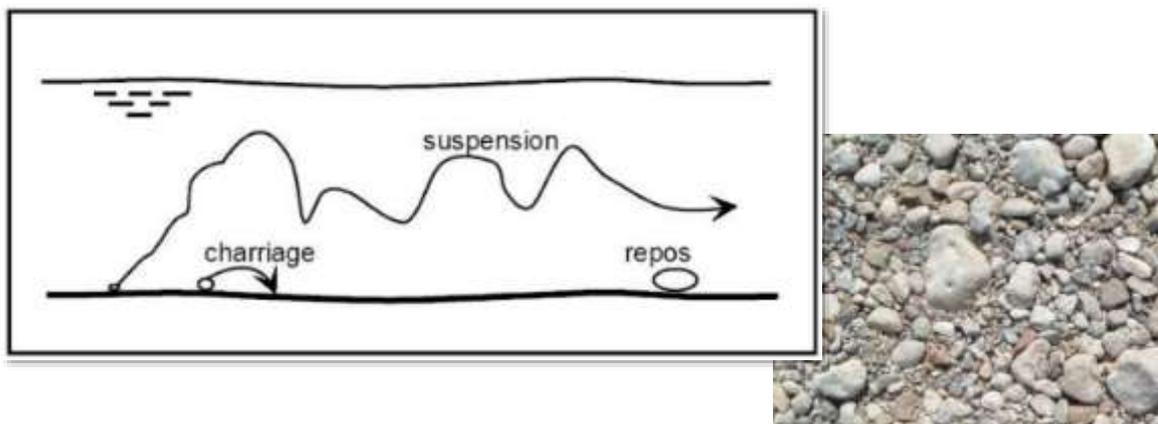


Figure 4 : Schéma montrant les modes de transport solide

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

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

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

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

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

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

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

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

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

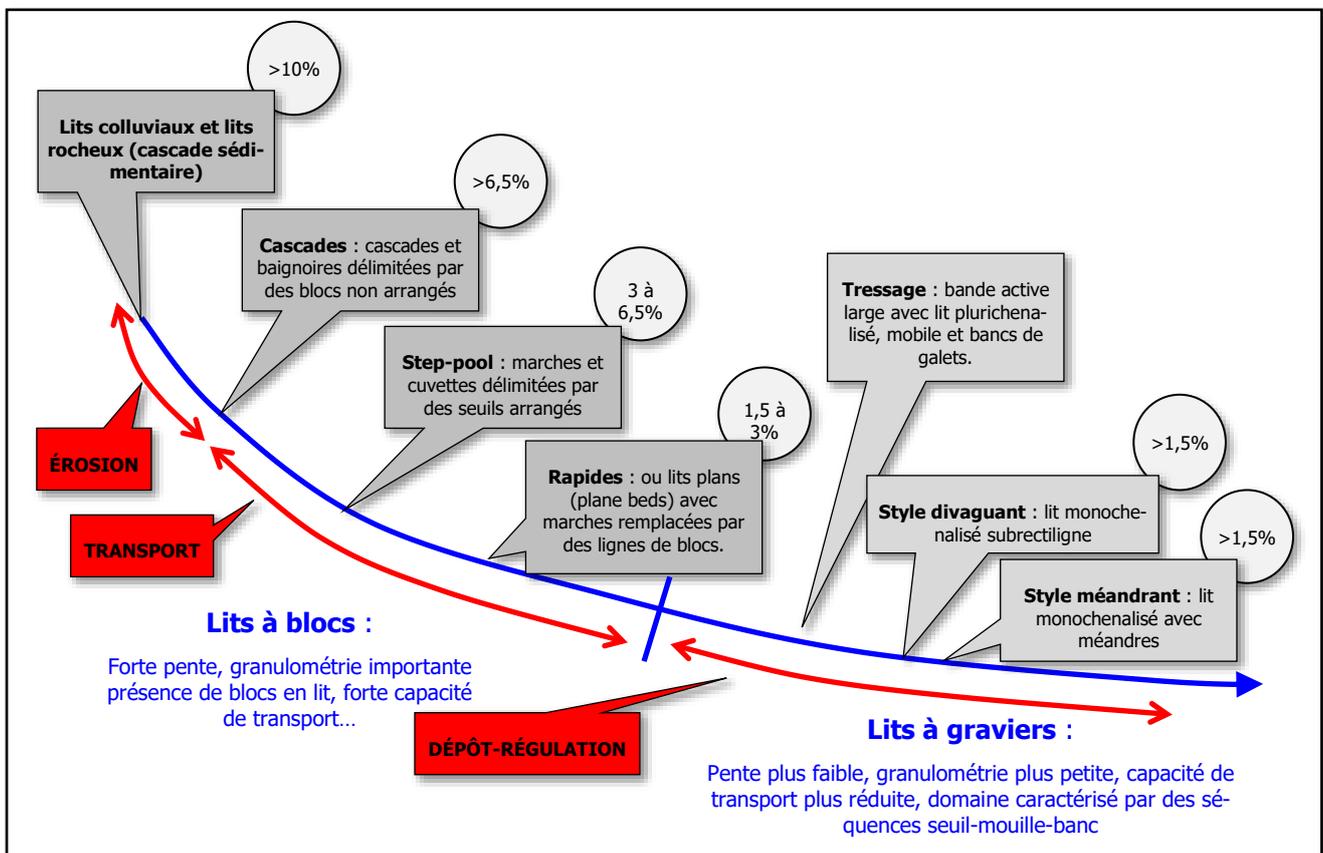


Figure 5 : Gradient morphologique des lits fluviaux

## 2.4 La trajectoire géomorphologique d'un cours d'eau

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

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

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

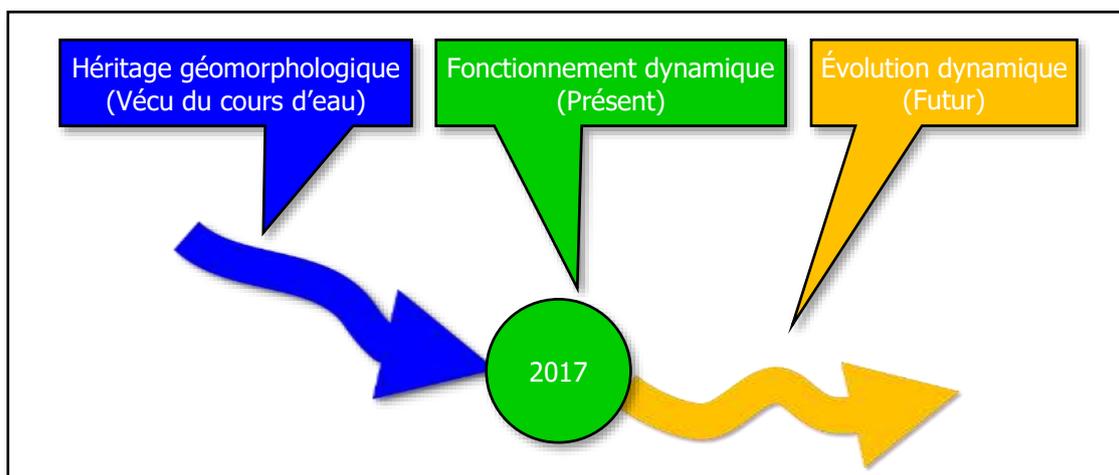


Figure 6 : Les trois composantes de la trajectoire géomorphologique d'un cours d'eau

## 2.5 L'incision

### A Une tendance durable

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

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

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

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

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

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

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

## B Les effets de l'incision

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

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

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

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

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

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

## 2.6 Métamorphose fluviale et temporalité

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

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

Le temps de réponse à ces forçages externes est plus ou moins long. Knighton (1984) a proposé un schéma spatio-temporel illustrant la réponse d'un cours d'eau à différents forçages (*cf.* Figure 7). Ce schéma met en relation la longueur du profil en long perturbé et les ajustements dans le temps permettant de retrouver un équilibre dynamique cohérent.

Toujours d'après Knighton (1984), la réponse dynamique aux différents forçages externes comprend plusieurs temps (*cf.* Figure 8).

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

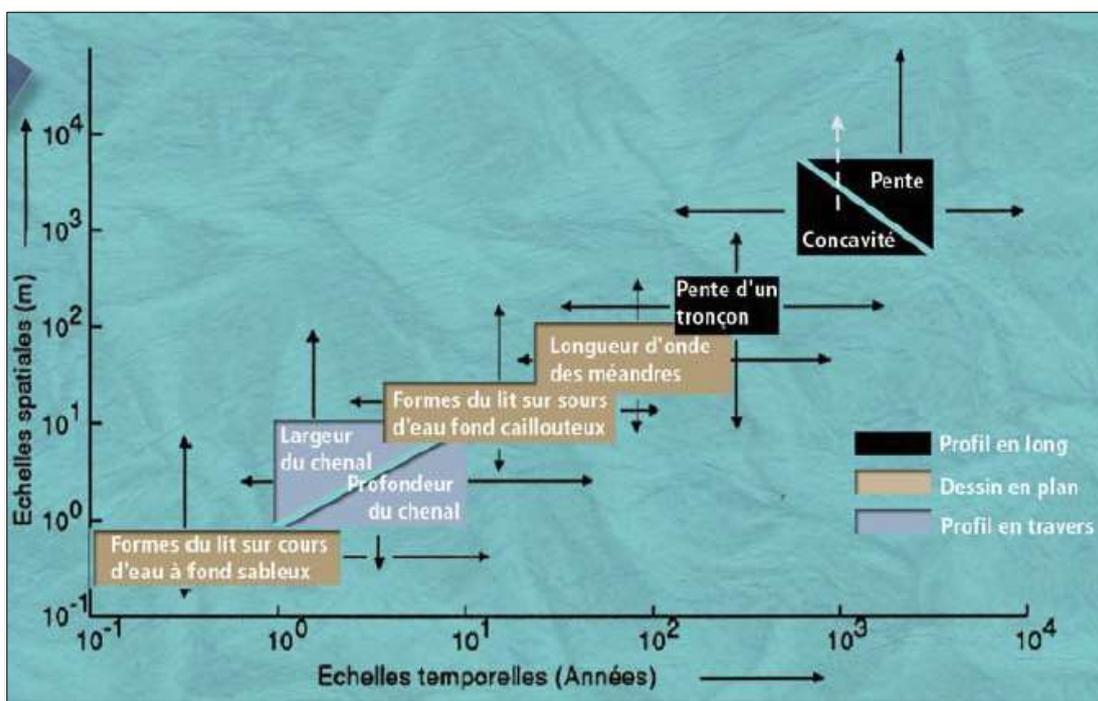


Figure 7 : Réponse temporelle à une perturbation suivant l'impact sur le profil en long (Malavoi & Bravard, 2010 d'après Knighton, 1984)

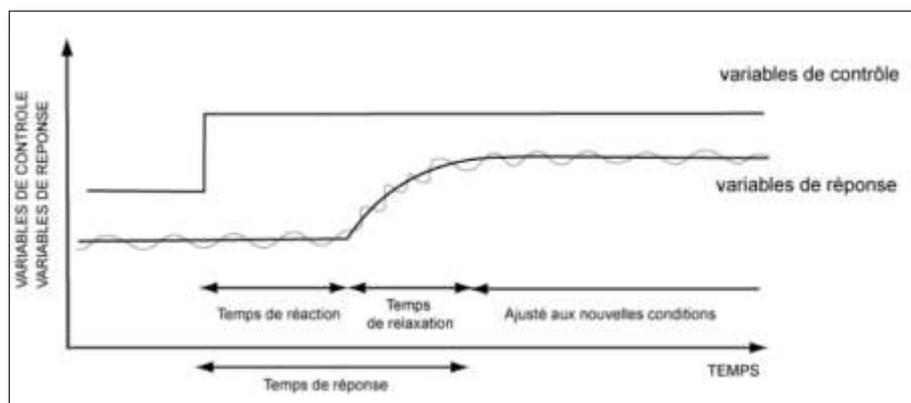


Figure 8 : Temps de réponse d'un cours d'eau suite à une perturbation (d'après Knighton, 1984)

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

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

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

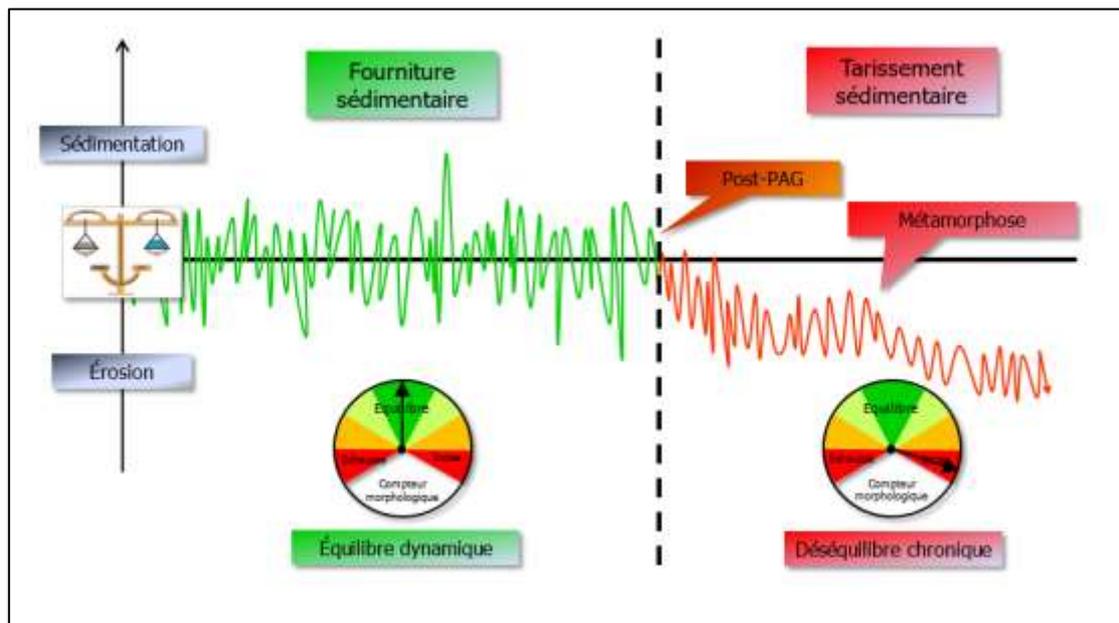


Figure 9 : Exemple de trajectoire géomorphologique perturbée suite à un déséquilibre sédimentaire lié aux métamorphoses hydroclimatiques et anthropiques

### 3 Présentation du bassin versant du Frayol

#### 3.1 Contexte physique

##### A Géographie

Le Frayol prend sa source dans la commune de Sceautes en Ardèche méridionale (07) à 640 mètres d'altitude environ au hameau la Borie d'Entraigues et rejoint le Rhône dans la commune du Teil après un parcours d'environ 14 kilomètres. Affluent de rive droite du Rhône, le Frayol draine ainsi un bassin versant orienté Nord-Nord-Ouest/Sud-Sud-Est d'une superficie de 26 km<sup>2</sup>.

Le réseau hydrographique du Frayol présente de nombreux affluents, tels que les ruisseaux du Thieulat, des Avents, du Vauderon et du Courion en rive gauche, et les ruisseaux de Marsac, de l'Étang et de la fontaine de Mouzelas en rive droite.

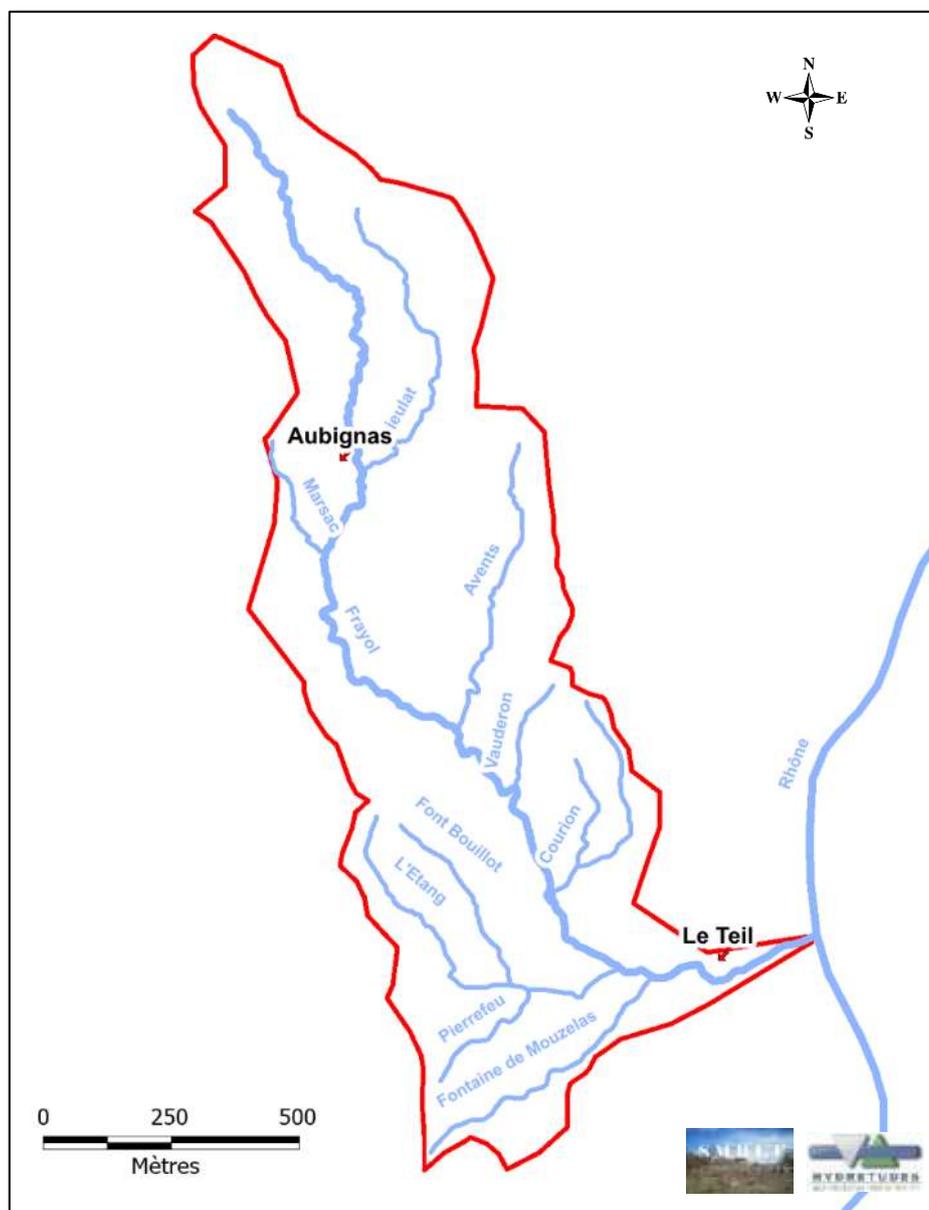


Figure 10 : Localisation du bassin versant du Frayol

## B Topographie

Le bassin versant du Frayol présente une altitude comprise entre 73 et 613 mètres d'altitude (cf. Figure 11). Il est principalement marqué par le massif volcanique du Coiron qui délimite le bassin versant au Nord et dans lequel le Frayol prend sa source. Ce massif influence par sa géologie le tracé du Frayol, en témoignent les matériaux basaltiques présents dans son stock alluvial.

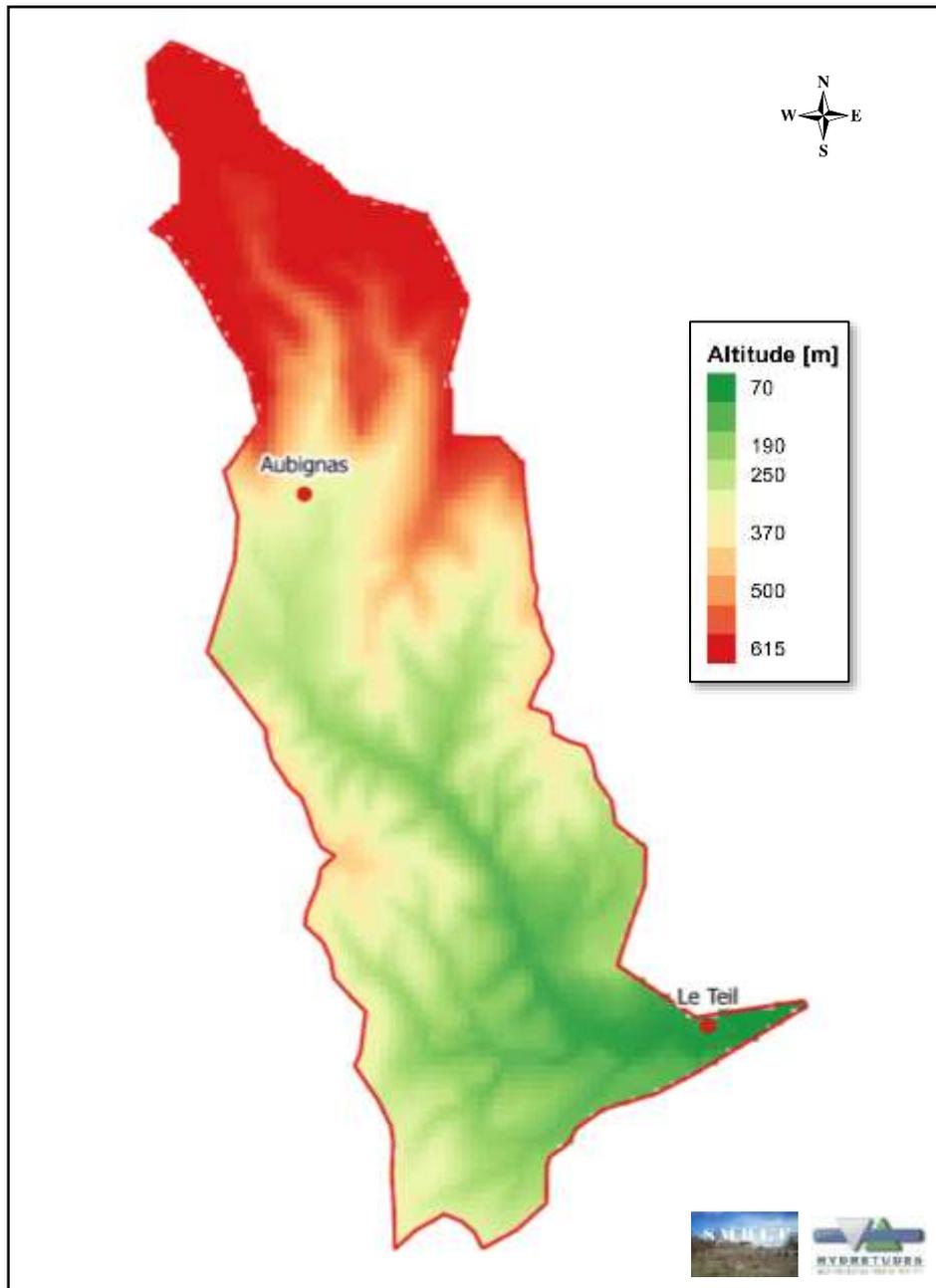


Figure 11 : Cartographie du relief du bassin versant du Frayol

Par ailleurs, le Frayol est caractérisé par des ruptures de pente le long de son linéaire (cf. Figure 12) liées à la présence de perturbateurs hydromorphologiques (seuils/cascades naturels et seuils anthropiques) et au style fluvial dominant en gorges, 77% de son linéaire étant concerné par ce style.

Seule la dépression d'Aubignas constitue une petite ouverture de la vallée. En effet, le vaste glacis de Saint-Pons (rive gauche de la haute vallée de l'Escoutay) dégagé dans les marnes hauteriviennes remonte quasiment jusqu'à Aubignas. Le raccordement de ce glacis avec la topographie de la vallée du Frayol en gorge donne un interfluve plus bas en rive droite. Côté Frayol, ce glacis marneux est disséqué par de petits affluents (ruisseau Font, Ruisseau de Marsac, Ravin de Rabayast) qui entaillent les marnes hauteriviennes.

#### **Pente, torrent et rivière torrentielle**

Dans son étude sur les torrents des Hautes-Alpes de 1841, Surret s'est intéressé au profil en long d'un cours d'eau.

Il a ainsi distingué les torrents dont la pente est supérieure ou égale à 6% et les rivières torrentielles dont la pente s'étend entre 1 et 6%.

*Encart 1 : Pente, torrent et rivière torrentielle*

Jusqu'au Bois de Val, ces gorges sont dans les terrains de la coulée volcanique des Coirons (basaltes aphyriques<sup>1</sup>, scories basaltiques, basaltes porphyriques<sup>2</sup>, basanites noires<sup>3</sup>). Le Frayol est une rivière torrentielle avec une pente de 5% (cf. Encart 1).

Les gorges sont ensuite entaillées dans les terrains sédimentaires secondaires, essentiellement des formations marneuses de l'Hauterivien inférieur (d'abord des marnes grises alternant avec des grès et ensuite les marnes grises de Valvignères). À partir du lieu-dit Les Combes, le lit s'incise dans les cal-

caires hauteriviens. Puis, on rencontre au Pontet les terrains barrémiens (calcaires), oligocènes (poudingues) et turoniens (calcaires gréseux et conglomérats).

Dans les marnes hauteriviennes, la pente est marquée et le Frayol présente un caractère torrentiel fort avec une pente moyenne de 8,3%. Ensuite, la pente s'adoucit, le Frayol restant tout de même une rivière torrentielle avec une pente relativement encore importante de 2,5%.

La partie aval du bassin versant concerne la traversée du Teil. Le caractère de rivière torrentielle reste marqué avec une pente de 1,6%.

Le Frayol est donc une rivière torrentielle sur 77% de son linéaire et un torrent sur 33%.

<sup>1</sup> Une roche volcanique aphyrique ne présente pas de cristaux visibles à l'œil nu

<sup>2</sup> Une roche volcanique porphyrique présente des cristaux visibles à l'œil nu (son antonyme est donc aphyrique)

<sup>3</sup> Laves alcalines effusives (se mettant en place en coulée)

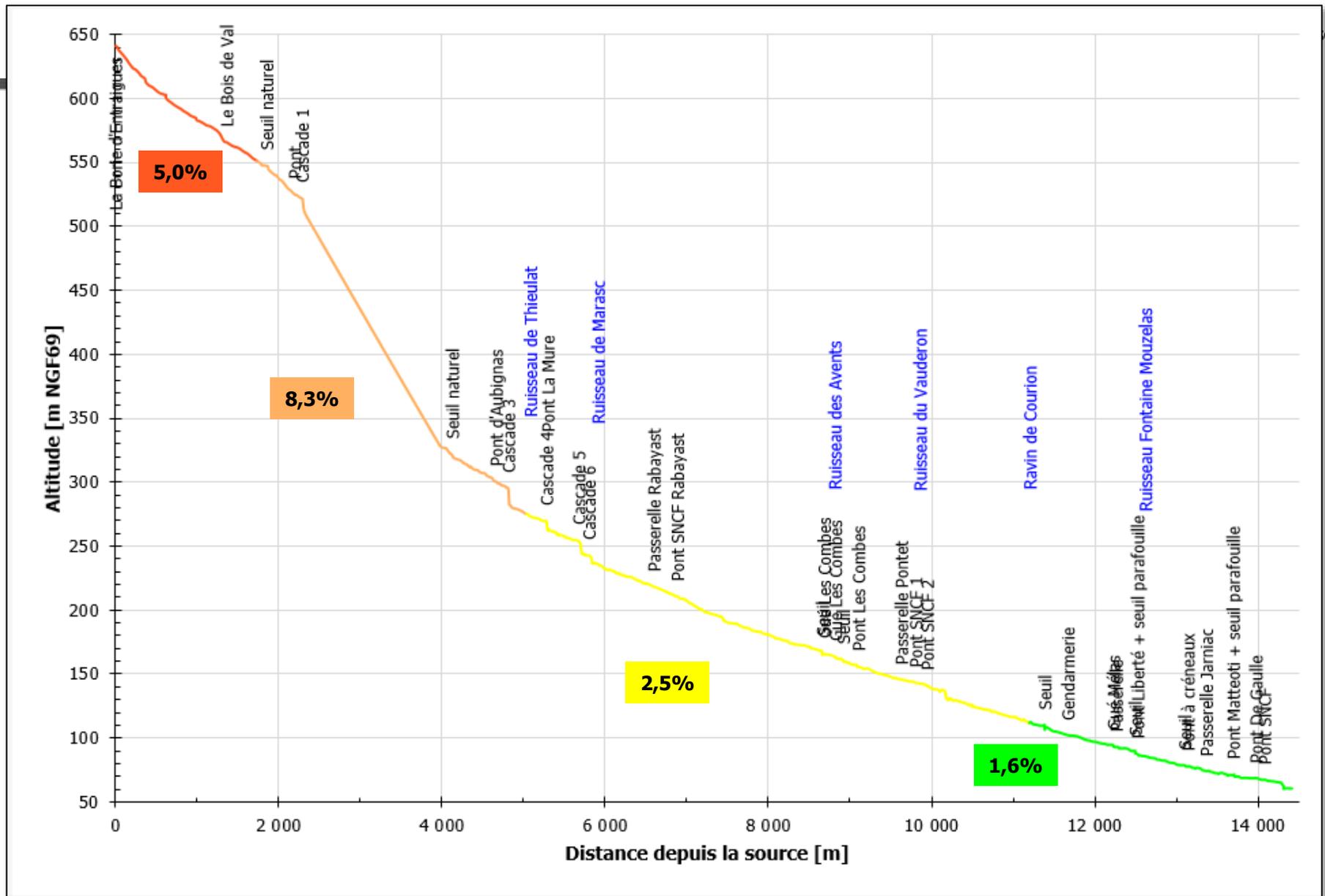


Figure 12 : Profil en long 2016 du lit du Frayol (Source : HYDRETTUES, 09/2016)

### C Occupation du sol

Le bassin versant du Frayol montre une disparité d'occupation du sol entre sa partie aval fortement urbanisée (Le Teil) et sa partie amont et médiane plutôt rurale. On distingue ainsi trois grandes zones d'occupation du sol :

- La tête de bassin en amont d'Aubignas se caractérise par des parcelles agricoles et des prairies de fauche. Les parcelles agricoles exploitent les replats ;
- Entre Aubignas et l'amont du Teil, le bassin versant est essentiellement marqué par des boisements ;
- La partie aval du bassin est urbanisée avec la commune du Teil.

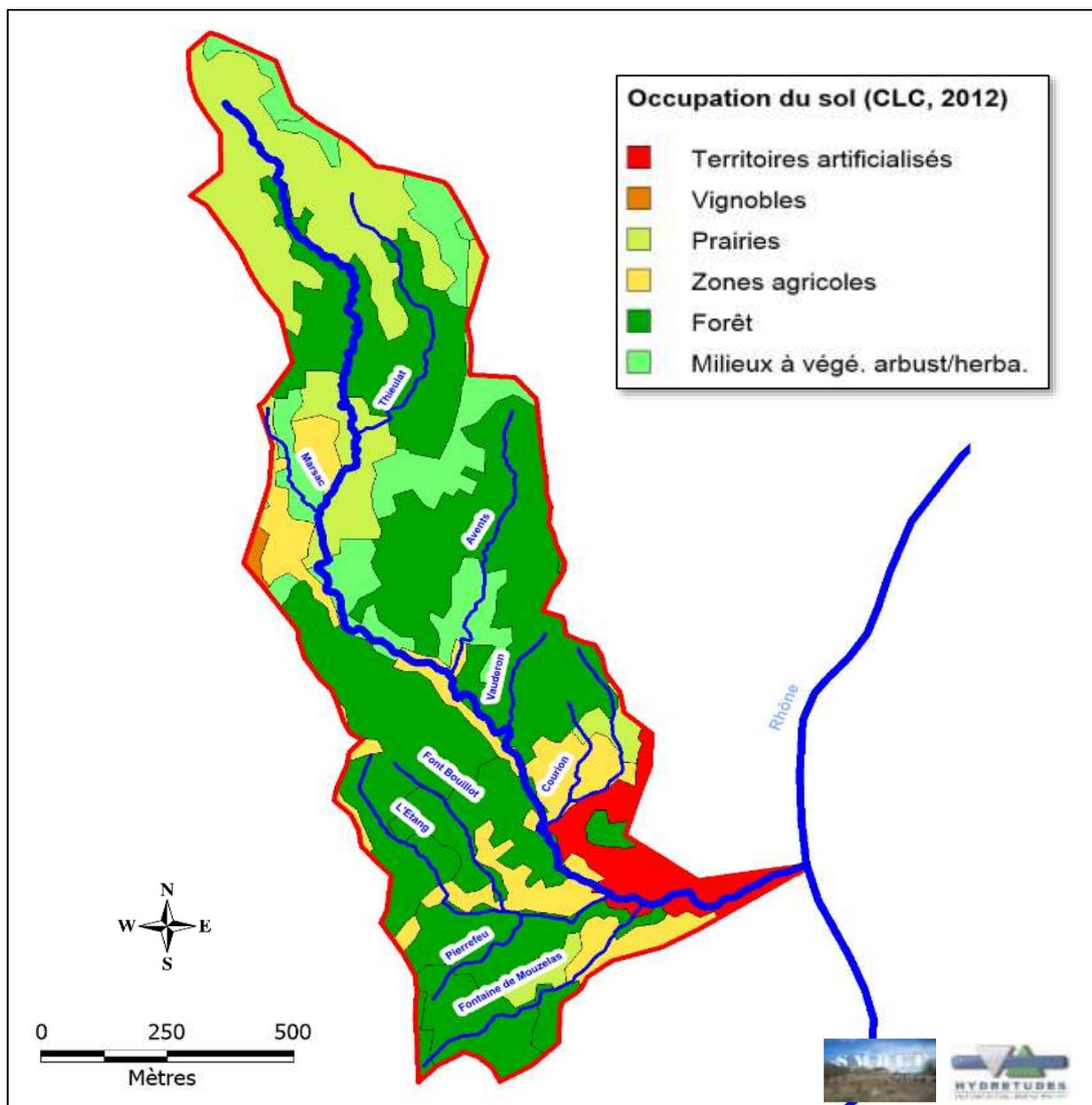


Figure 13 : Cartographie de l'occupation du sol du bassin versant du Frayol  
(Source : Corine Land Cover 2012)

## 3.2 Contexte géologique

### A Histoire géologique de la région

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

##### Les orogénèses hercyniennes et pyrénéennes

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

Le cycle orogénique hercynien débute au Dévonien (- 400 Ma) et se termine avec le Permien (- 245 Ma). Ce cycle est dû au rapprochement de trois masses continentales aboutissant à la formation de la Pangée. Certaines structures de la chaîne hercynienne sont encore visibles aujourd'hui comme les Appalaches aux Etats-Unis ou le Massif Central en France.

Beaucoup plus récente, l'orogénèse pyrénéenne débute il y a 40 Ma d'années avec la collision des plaques ibérique et eurasiennne. Ce cycle a remanié des roches formées au moment de l'orogénèse hercynienne. Ainsi, bien que la chaîne soit jeune au sens géologique du terme, elle est composée en partie de roches métamorphiques très anciennes.

L'ensemble des formations secondaires reposent sur un socle métamorphique et cristallin hercynien. Non affleurantes au niveau même du Frayol mais à l'ouest de sa source, ces formations de micaschiste, gneiss, quartzite, migmatite et granite datent du carbonifère supérieur (Pennsylvanien). Leur dépôt et leur structure sont dus à l'orogénèse hercynienne (*cf.* Encart 2).

#### Encart 2 : Les orogénèses

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

La fin de l'orogénèse hercynienne s'accompagne dans la région d'une longue période d'érosion. La pénéplation\* du relief, ainsi qu'une reprise de l'activité tectonique à la fin du Trias inférieur font baisser le niveau global des terres. Le domaine ardéchois se différencie alors en cuvette évaporitique\* qui va être sujette à une série de cycles de régressions/transgressions marines (avancées et reculées des mers) durant le Secondaire. C'est durant un de ces cycles du Crétacé inférieur que se déposent les formations sur lesquelles s'écoule le Frayol.



Figure 14 : Ammonite

Au cours du Valanginien inférieur, le niveau des mers est haut et permet le dépôt de faciès marneux à faune pélagique (Ammonites – *cf.* Figure 14). L'Hauterivien voit le niveau des mers varier mais rester assez profond pour permettre le dépôt de marnes hémipélagiques et de calcaires « à miches » (affleurant à Aubignas, au niveau du hameau Les Combes jusqu'au Pontet).

À partir du Barrémien inférieur, s'installe la plate-forme carbonatée urgonienne, marquant la fin du grand cycle de premier ordre commencé avec la Trias. Les dépôts, affleurant autour et en aval de Saint-Thomé, ont une succession classique : sables bioclastiques épais et grossiers à la base, niveaux intermédiaires à récifs coralliens isolés, calcaires à rudistes au sommet, caractéristiques de mers peu profondes. Ces différents faciès sont séparés par des vires marneuses.

La fin des épisodes urgoniens est due à une baisse du niveau des eaux jusqu'à une faible émergence des terres et la mise en place d'un cycle régression/transgression à l'Aptien, traduit par le dépôt des calcaires grésogloconieux lors du Bédoulien supérieur. Le début de l'orogénèse pyrénéo-provençale pendant le Santonien cause une émergence totale et définitive des terres.

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

Le Néogène est marqué par des dépôts de laves massives (coulée des Coirons) de composition basaltique ainsi que par des dépôts scoriacés (*e.g* en aval du Bois de Val). Le volcanisme concerne la haute vallée du Frayol, en particulier le secteur des sources vers la Borie d'Entraigues.

Les matériaux basaltiques ont alimenté le transport solide en galets très résistants à l'érosion. Ces matériaux sont visibles sur l'ensemble du linéaire du Frayol dans la masse des matériaux présents en lit avec un gradient bien marqué amont → aval.

Ères glaciations du Quaternaire		
Les glaciations désignent une succession de périodes glaciaires survenant régulièrement et séparées par des périodes interglaciaires.		
Quatre glaciations se sont déroulées durant le Quaternaire entre 600 000 et 12 000 ans BP :		
ÈRES GLACIAIRES DE LA FIN DU PLEISTOCÈNE		
Période glaciaire	Périodes interglaciaire	Années (BP)
Günz	→	600 000 540 000
-	Inter Günz-Mindel	540 000 480 000
Mindel	→	480 000 430 000
-	Inter Mindel-Riss	430 000 240 000
Riss	→	240 000 180 000
-	Inter Riss-Würm	180 000 120 000
Würm	→	120 000 12 000

Les années sont exprimées en années BP (*Before Present*) ou « avant le présent », c'est-à-dire en années en comptant depuis 1950 (année de référence et des premières datations absolues au carbone 14 : <sup>14</sup>C).

Enfin, les derniers dépôts sédimentaires sont des alluvions quaternaires formées par les anciennes bandes actives du Frayol à une époque où le cours d'eau était plus haut et plus puissant. Ces matériaux sont visibles en aval du bassin versant dans la traversée du Teil et sont donc absents en amont (gorges) compte tenu de la topographie particulière :

- Des **alluvions anciennes de basses terrasses** déposées au Würm (période glaciaire du Quaternaire – *cf.* Encart 3) bordent le lit notamment dans le quartier du Mélas Ce sont des alluvions sablo-limoneuses avec quelques galets ;

- Les **alluvions actuelles et récentes** présentes en lit dans les zones d'accumulation aval sont constituées d'un mix de galets basaltiques et calcaires.

Le lit du Frayol se raccorde ensuite aux dépôts alluvionnaires latéraux du Rhône (correspondant notamment à la terrasse würmienne inférieure) sur lesquelles s'est construite une partie de la ville du Teil.

Encart 3 : Les périodes glaciaires du Quaternaire

## B Quantification de l'érodabilité des formations

Les formations constituant le substratum sur lequel s'écoule le Frayol ont toutes une résistance à l'altération propre. Il est possible de les classer par rapport à leur degré d'érodabilité\*, ce qui permet d'avoir une idée plus précise des zones sensibles au phénomène d'érosion.

La résistance à l'érosion physique (désagrégation) d'une roche est estimée à partir de sa composition minérale, qui elle-même permet d'évaluer la dureté de la roche par l'échelle de Mohs (*cf.* Encart 4).

La résistance à l'érosion chimique (dissolution) d'une roche est déterminée par sa composition chimique.

### Dureté des minéraux

En 1812, Friedrich Mohs crée une échelle permettant de classer les minéraux par leur dureté en les comparant avec d'autres matériaux dont la dureté est déjà connue.

Si cette échelle ne s'applique qu'aux minéraux, il est possible de se baser sur celle-ci pour estimer la dureté d'une roche (en fonction d'autres paramètres tels que la consolidation de la roche).

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

L'analyse des différentes formations traversées par le Frayol (*cf.* Tableau 4) montre que celui-ci s'écoule sur des terrains sédimentaires marno-calcaires, dont on peut établir les critères suivants :

- Les **marnes** (présentes dans les parties amont et médiane du bassin versant) sont constituées d'un mélange de calcite et d'argiles. La calcite a une dureté de Mohs égale à 3 et présente une faible résistance chimique car elle se dissout dans une eau acide. Les argiles ont une dureté de Mohs comprise entre 1 et 2 et ont une faible résistance chimique car elles sont facilement hydrolysées et faiblement consolidées. La résistance des marnes à l'érosion, tant physique que chimique, est donc faible voire très faible.
- Les **calcaires** présents dans la partie aval du bassin versant à Charonsac et Mélas sont composés majoritairement de calcite, ce qui leur confère une faible résistance à l'altération chimique. Toutefois, leur consolidation est en général bien supérieure à celle des marnes.

Encart 4 : Échelle de dureté de Mohs

Ainsi, on peut construire une échelle d'érodabilité des formations géologiques s'échelonnant de 1 à 10, 1 faisant référence à un sable non consolidé et 10 à un basalte massif (*cf.* Tableau 3). Les différentes formations constituant le substratum du Frayol sont placées selon cette échelle en fonction de leur nature et de leur proportion marnes/calcaires (*cf.* Tableau 8).

ÉCHELLE DE RESISTANCE A L'ÉROSION DES PRINCIPALES ROCHES		
Résistance	Formation	Propriétés
1	Sable	Aucune cohésion
2		
3	Marnes	Faible cohésion et faible dureté des minéraux (1-2)
4		
5		
6		
7	Calcaire massif	Forte cohésion, faible dureté des minéraux (3) et faible résistance chimique
8		
9		
10	Basalte	Forte cohésion, moyenne à forte dureté des minéraux et forte résistance chimique

Tableau 3 : Échelle de résistance à l'érosion de différentes roches

DESCRIPTION DES FORMATIONS TRAVERSÉES PAR LE FRAYOL				
Formation traversée	Nom commun	Épaisseur [m]	Description	Résistance
SCβ	Scories basaltiques	-	Scories basaltiques superficielles	?
β	Basaltes	-	Basaltes aphyriques	10
βπ	Basaltes	-	Basaltes porphyriques	10
n3d (Hauterivien inférieur)	Marnes	100	Marnes supérieures de Valvignères : formation subhorizontale composée presque exclusivement de marnes grises à bleu-grises	3
n3e (Hauterivien inférieur)	Calcaires à miches	80	Calcaires à miches de la Croix Juliau : alternance de marnes et de banc à miches	5
n3d (Hauterivien inférieur)	Marnes	100	Marnes supérieures de Valvignères : formation subhorizontale composée presque exclusivement de marnes grises à bleu-grises	3
n3c (Hauterivien inférieur)	Marnes	250	Marnes grises (6-11m) en alternance avec des faisceaux de calcarénites diffuses (5-8m) avec un débit en corps ovoïdes (micoïde)	3
n3d (Hauterivien inférieur)	Marnes	100	Marnes supérieures de Valvignères : formation subhorizontale composée presque exclusivement de marnes grises à bleu-grises	3
n3e (Hauterivien inférieur)	Calcaires à miches	80	Calcaires à miches de la Croix Juliau : alternance de marnes et de banc à miches	5
n4 (Barrémien)	Calcaires	-	Calcaires barrémiens indifférenciés	5
c3 (Turonien)	Calcaires	40	Calcaires gréseux blancs	6
g (Oligocène indéterminé)	Poudingue	-	Poudingue et remplissage continental	5
c3 (Turonien)	Calcaires	40	Calcaires gréseux	6
n6a (Bédoulien)	Marnes	40-50	Marnes jaunes détritiques fortement bioturbées	2
n5c (Bédoulien supérieur)	Calcaires gréseux glauconieux	8	Calcarénites fines bioturbées	4
n5b (Bédoulien inférieur)	Marnes	40-50	Marnes bleues	3
n6 (Aptien supérieur)	Marnes	300	Marnes bleues à bancs de grés roux	3

Tableau 4 : Description des formations traversées par le Frayol

### 3.3 Contexte hydrologique

Le Frayol présente un régime hydrologique « cévenol » caractérisé par des étiages sévères, voire des assecs, et des crues aussi soudaines que violentes.

Plusieurs événements historiques se sont produits par le passé, les crues de novembre 2014 et septembre 2015 étant les plus récentes et donc les plus marquées dans la mémoire. Le Tableau 5 synthétise l'ensemble de ces événements d'après les éléments disponibles dans la bibliographie et recueillis auprès des personnes ressource du territoire lors des entretiens. Globalement, les crues historiques du Frayol se sont produites durant l'été et l'automne.

SYNTHÈSES DES ÉVÈNEMENTS HISTORIQUES SURVENUS SUR LE FRAYOL			
Date	Observations	Période de retour	Source
1902	Sensiblement plus forte que 1982 et « aucune indication sur l'intensité des pluies lors de la crue de 1902 » Hauteurs d'eau supérieures de 1 m par rapport à la crue de 1982	?	Sogreah, 1984 Safège, 2017
1942	« Aurait été proche de la crue de septembre 1982 ou même l'aurait égalée »	?	Sogreah, 1984
08/1958	« Crue cévenole généralisée, elle n'a pas atteint la puissance de la crue de septembre 1981 »	≈ 10 ans	Sogreah, 1984
12/09/1976	« Le niveau d'eau aurait été plus faible de 0,25 m que la crue de 1982. La rive en face du stade de Mélas a subi une forte érosion (50 m <sup>2</sup> estimé par les riverains) »	≈ 6 ans	Sogreah, 1984 Safège, 2016
20-21/09/1982	La crue a été générée par un « orage ayant succédé à plusieurs jours secs » $Q_{\max}$ à l'exutoire = 100 m <sup>3</sup> /s « Évènement rare mais pas exceptionnel » Il ne s'agit pas de la crue la « plus forte dont les riverains aient conservé ou transmis le souvenir ; elle a été sensiblement dépassée par la crue de 1902 » La crue « aurait été tout aussi forte que la crue de septembre 1976, malgré des pluies plus modestes mais très homogènes » La rive en face du stade de Mélas a subi une forte érosion (200 m <sup>2</sup> estimé par les riverains) État de catastrophe naturelle	Entre 28 et 42 ans	Sogreah, 1984
11-12/10/1988	État de catastrophe naturelle	?	IATE, 2007
17-18/06/1992	État de catastrophe naturelle	?	IATE, 2007
01-14/10/1993	État de catastrophe naturelle	?	IATE, 2007
06-11/01/1994	État de catastrophe naturelle	?	IATE, 2007
25-26/09/1999	État de catastrophe naturelle	?	IATE, 2007
16-17/11/2002	État de catastrophe naturelle	?	IATE, 2007
24-26/11/2002	État de catastrophe naturelle	?	IATE, 2007
01-02/12/2003	Crue générée par un épisode pluviométrique « violent non pas par sa quantité d'eau tombée par heure mais plutôt par sa longueur. [...] qui à saturer en eau le sol [...] favorisant ainsi le ruissellement quasi-total des eaux par la suite. »	?	IATE, 2007

	Évènement pluviométrique d'occurrence 20 ans État de catastrophe naturelle		
12/08/2008	État de catastrophe naturelle	?	Hydrétudes, 2017
03/09/2008	État de catastrophe naturelle	?	Hydrétudes, 2017
20/09/2014	État de catastrophe naturelle	?	Hydrétudes, 2017
14-15/11/2014	Crue très soudaine avec rupture d'embâcles ayant engendré de sérieux dégâts au Teil (débordements, érosions...) Crue générée par un évènement pluviométrique intense avec un cumul de pluie de 101 mm en 24h (image Radar) et faisant suite à une succession d'épisodes pluvieux automnaux, saturant donc préalablement le sol en eau État de catastrophe naturelle $Q_{max}$ à l'exutoire = 109 m <sup>3</sup> /s	50 ans	Safège, 2016
12-15/09/2015	Crue soudaine suite à un évènement pluviométrique d'occurrence 20 à 50 ans (cumul de pluie de 187 mm en 24h) Dégâts moins importants que ceux engendrés par la crue de 2014, le lit ayant été purgé lors de la crue de 2014 État de catastrophe naturelle	« Occurrence similaire à la crue de 2014 »	Safège, 2016 Safège, 2017

Tableau 5 : Synthèse des événements historiques du Frayol

L'analyse hydrologique réalisée dans le cadre de l'étude hydraulique de la rivière Frayol par Sogreah en 1984 a permis de déterminer les débits caractéristiques de crue pour différentes occurrences de crue à l'exutoire du bassin versant. Le bassin versant n'étant pas jaugé, les résultats reposent sur une analyse statistique des données pluviométriques enregistrées aux stations les plus proches du réseau d'observation Météo France (Montélimar, Alba et Mirabel), puis sur une transformation pluie/débit par abaque (abaque Sogreah).

L'étude réalisée par IATE en 2007 dans le cadre de la révision du document d'urbanisme du Teil a permis de mettre à jour cette analyse hydrologique en actualisant l'analyse statistique des pluies et de valider les débits de pointe obtenus par Sogreah (1984). Le Tableau 6 synthétise les débits caractéristiques de crue du Frayol.

DÉBITS CARACTÉRISTIQUES AU TEIL		
Période de retour	Débit de pointe	Source
2 ans	32 m <sup>3</sup> /s	Sogreah, 1984 IATE, 2007
10 ans	70 m <sup>3</sup> /s	Sogreah, 1984 IATE, 2007
35 ans	100 m <sup>3</sup> /s	Sogreah, 1984 IATE, 2007
100 ans	124 m <sup>3</sup> /s	Sogreah, 1984 IATE, 2007
Crue extrême (1,8 Q <sub>100</sub> )	223 m <sup>3</sup> /s	Safège, 2016

Tableau 6 : Débits caractéristiques de crue du Frayol à l'exutoire du bassin versant

## 4 Sectorisation morphodynamique du Frayol

### 4.1 Méthodologie

La sectorisation morphodynamique consiste à découper le Frayol en tronçon morphologiquement homogène, entité spatiale la plus pertinente pour décrire et gérer un cours d'eau (Malavoi & Adam, 2007). Ce compartimentage est réalisé à partir de celui du SYRAH tenant compte des caractéristiques morphométriques du lit et des discontinuités sédimentaires.

Par cette méthodologie, on délimite ainsi quatre tronçons présentés sur la Figure 16 ci-après. Chaque tronçon est désigné par un identifiant qui comprend les trois premières lettres du cours d'eau suivies du numéro de tronçon donné de l'amont vers l'aval.

### 4.2 Description des tronçons

Les principales caractéristiques de chacun des tronçons sont présentées dans le Tableau 7. À titre informatif, la pente moyenne des tronçons est déterminée à partir du profil en long réalisé par HYDRETTUES en septembre 2016 dans le cadre de la présente étude.

CARACTÉRISTIQUES DES TRONÇONS MORPHODYNAMIQUES DE L'ESCOUTAY					
Identifiant	Localisation	Longueur [km]	Style fluvial	Pente [%]	Sinuosité*
FRA_1	Source → Le Bois Val	1,7	Gorges	5,0	1,07
FRA_2	Le Bois Val → Amont ruisseau de Thieulat	3,3	Gorges	8,3	1,19
FRA_3	Amont ruisseau de Thieulat → Ravin de Courion	6,0	Gorges	2,5	1,16
FRA_4	Ravin de Courion → Confluence Rhône	3,3	Subrectiligne	1,6	1,08

Tableau 7 : Principales caractéristiques des tronçons morphodynamiques du Frayol

Chaque tronçon morphodynamique du Frayol fait l'objet d'une fiche descriptive mettant en relation les données suivantes :

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

Les fiches-tronçon sont disponibles en [Annexe 3](#).



## 5 Héritage géomorphologique du Frayol

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

### 5.1 Forçage climatique

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

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

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

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

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

ÉVOLUTION HYDROCLIMATIQUES ET INCIDENCES SUR LE FRAYOL			
Modifications hydroclimatiques	Effets principaux induits	Impacts sur les cours d'eau	Frayol
Réchauffement	Remontée de la couverture végétale en montagne ⇒ Baisse de l'érosion et déconnexion versants/lit ⇒ <b>Baisse de la fourniture sédimentaire</b>	Incision des lits fluviaux	Certainement impacté
Baisse de la pluviométrie	Raréfaction des crues BFHM* : (i) Végétalisation des structures alluvionnaires et des bandes actives ⇒ Baisse de la mobilité des structures alluvionnaires (ii) Baisse de la morphogénie ⇒ Baisse de la mobilité des structures alluvionnaires (iii) Baisse de l'érosion ⇒ <b>Baisse de la fourniture sédimentaire</b>	Incision des lits fluviaux	Certainement impacté

Tableau 8 : Évolutions hydroclimatiques et incidences probables sur le Frayol

## 5.2 Forçage anthropique

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

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

Cette analyse repose sur la bibliographie existante et sur les investigations de terrain menées par HYDRETUDES durant l'automne 2016.

### A Les aménagements

#### ❖ *Les perturbateurs hydromorphologiques*

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

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

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

L'ensemble des perturbateurs hydromorphologiques du Frayol ont été recensés dans le cadre des investigations de terrain, afin de connaître leur impact sur la continuité sédimentaire. La Figure 16 localise les perturbateurs hydromorphologiques en fonction de leur type et de leur degré d'impact.

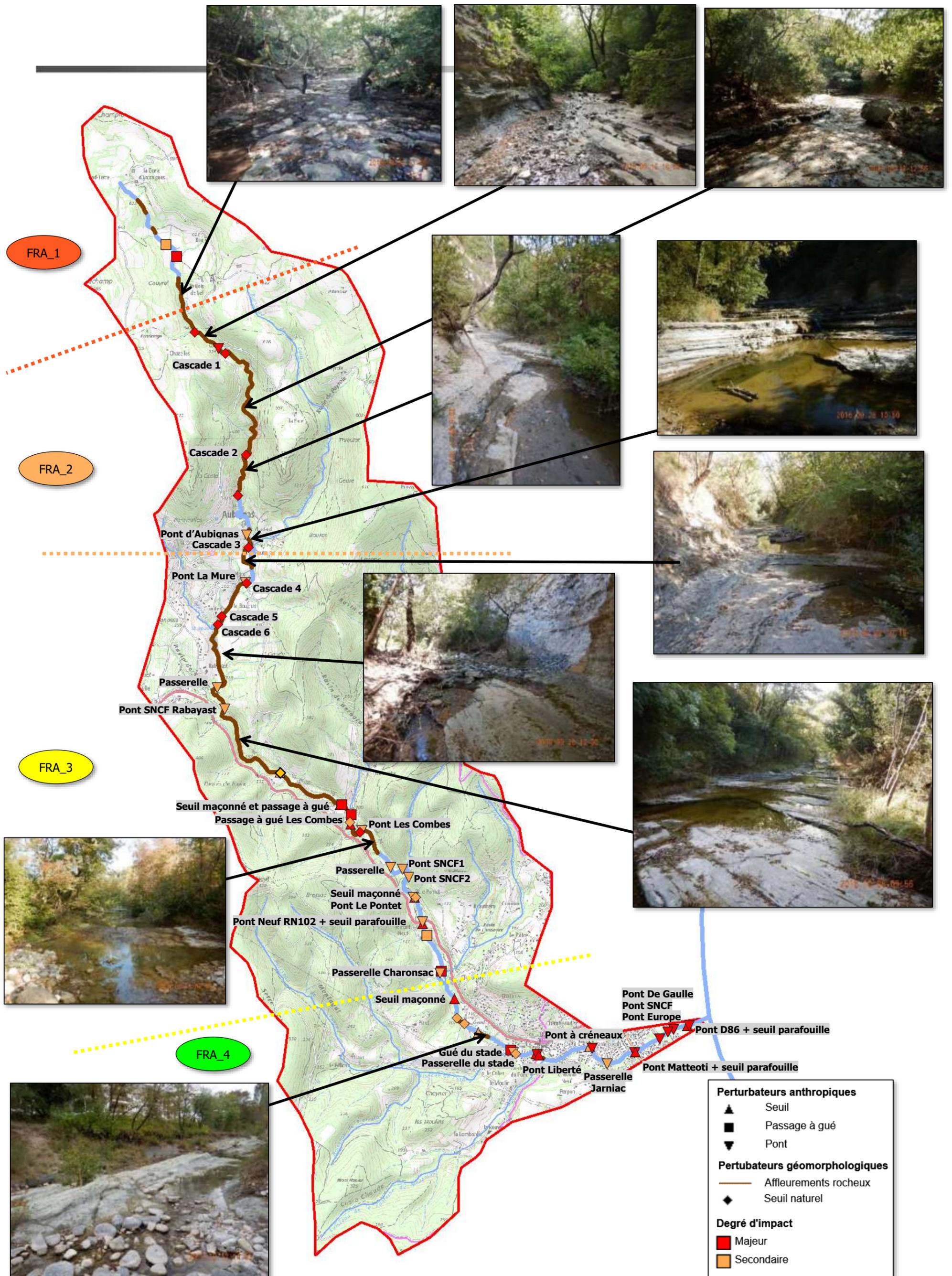


Figure 16 : Localisation des perturbateurs hydromorphologiques du Frayol selon leur nature et leur degré d'impact

Les parties amont et médiane du bassin versant concernant les tronçons FRA\_1, FRA\_2 et FRA\_3 jusqu'au hameau Les Combes présentent peu de perturbateurs anthropiques, soit douze au total. Il s'agit principalement de ponts ayant un impact secondaire sur le transit sédimentaire, tels que le pont d'Aubignas, le pont La Mure, la passerelle en bois à Rabayast, le pont SNCF de Rabayast et le pont Les Combes (cf. Figure 17).

Au hameau Les Combes, on rencontre toutefois quatre perturbateurs anthropiques majeurs situés en enfilade sur environ 280 mètres. Il s'agit d'un seuil maçonné de 3,2 mètres de hauteur, un passage à gué constitué de quatre buses de 600 mm de diamètre, un passage à gué de quatre buses de 1 000 mm de diamètre au droit de la confluence avec le ruisseau des Avents et un seuil maçonné partiellement détruit d'une hauteur d'environ 1,2 mètres (cf. Figure 18).

On constate par ailleurs la présence de perturbateurs géomorphologiques, notamment onze seuils naturels situés sur les tronçons FRA\_2 et FRA\_3 (cf. Figure 19), dont cinq d'entre eux possèdent une hauteur de chute comprise entre 6,4 et 13,3 mètres. Il s'agit de cascades naturelles (liées à la géologie) qui compartimentent le profil en long du Frayol et perturbent, voire bloquent, la continuité sédimentaire.

En considérant l'ensemble des principaux seuils naturels et anthropiques majeurs présents dans cette partie du bassin versant, on obtient une hauteur de chute cumulée d'au moins 60 mètres.

De plus, il convient également de noter la présence d'affleurements rocheux sur quasiment toute la partie amont et médiane du bassin versant (cf. photographies à la Figure 16). Le Frayol s'écoule directement sur le substratum rocheux sur environ 8 kilomètres répartis entre les trois tronçons. Les affleurements rocheux se concentrent ainsi majoritairement dans les tronçons FRA\_2 et FRA\_3, avec respectivement 87% et 69% de leur linéaire affecté (38% pour FRA\_1), c'est-à-dire là où les roches sont localement relativement résistantes (bancs de calcaires, de grès...) et où les apports solides sont limités. Le plancher alluvial y est alors quasi inexistant, ce qui témoignerait d'une incision du lit.



Figure 17 : Perturbateurs anthropiques secondaires présents sur les parties amont et médiane du bassin versant  
(a) Pont d'Aubignas ; (b) Pont La Mure ; (c) Passerelle en bois à Rabayast ; (d) Pont SNCF de Rabayast



Figure 18 : Perturbateurs anthropiques majeurs (rouge) et secondaires (orange) présents au hameau Les Combes (a) Seuil maçonné d'une hauteur de 3,2 m ; (b) Passage à gué  $\Phi 600$  ; (c) Passage à gué  $\Phi 1000$  ; (d) Seuil maçonné partiellement détruit d'une hauteur de 1,2 m ; (e) Pont Les Combes



Figure 19 : Perturbateurs géomorphologiques majeurs (rouge) et secondaires (orange) présents sur les parties amont et médiane du bassin versant (a) Cascade n°1 (hauteur de 12,5 m) ; (b) Cascade n°2 ; (c) Cascade n°4 en amont du pont La Mure (hauteur de 7,1 m) ; (d) Cascade n°6 (hauteur de 6,4 m) ; (e) Seuil naturel en aval du gué Les Combes ; (f) Seuil naturel en amont immédiat du pont Les Combes (hauteur de 1,6 m)

HYDRETTUDES

SMBEF – Fonctionnement hydromorphologique et plan de gestion du bassin versant du Frayol

La partie aval du bassin versant concernant le tronçon FRA\_3 à l'aval du hameau Les Combes et le tronçon FRA\_4 présente un nombre relativement important de perturbateurs anthropiques. On compte ainsi vingt-sept perturbateurs anthropiques au total, dont dix situés sur l'aval du tronçon FRA\_3 et dix-sept sur le tronçon FRA\_4.

Parmi ces perturbateurs anthropiques, on recense principalement des ponts (15 au total) et des seuils (9 au total), plus de la moitié d'entre eux ayant un degré d'impact majeur sur le transit sédimentaire, en particulier ceux présents sur le tronçon FRA\_4. Avec des hauteurs de chute allant de 1,1 à 3,8 mètres, les seuils ont la capacité de stocker des matériaux en leur amont et ont donc un impact très fort sur le transport solide. Le profil en long du Frayol reste ainsi de manière plus modérée que dans le secteur précédent compartimenté par les ouvrages transversaux (hauteur de chute cumulée de 13 mètres).

Contrairement aux parties amont et médiane du bassin versant, cette partie présente très peu de perturbateurs géomorphologiques. On constate ponctuellement des affleurements rocheux et seuils naturels, en particulier en aval immédiat du pont le Pontet, en amont et aval immédiat de la gendarmerie du Teil, ainsi qu'à l'aval immédiat de la passerelle du stade Mélas. Il existe donc un plancher alluvial.

Il convient toutefois de souligner la présence de quatre seuils parafouille situés au droit du pont Neuf (hauteur de 1,2 m), à l'aval de la passerelle du stade Mélas, au droit du pont de la Liberté (hauteur de 1,5 m) et au droit du pont de la D86, visant à stabiliser le profil en long du cours d'eau, ce qui témoignerait d'une incision du lit au moins localement.



Figure 20 : Perturbateurs géomorphologiques présents sur la partie aval du bassin versant du Frayol  
 (a) Seuil naturel à l'aval immédiat du pont Le Pontet ; (b) et (c) Affleurements rocheux et seuils naturels au niveau de la gendarmerie du Teil ; (d) Seuil naturel parafouille à l'aval de la passerelle du stade Mélas



Figure 21 : Perturbateurs anthropiques majeurs (rouge) et secondaires (orange) présents sur la partie aval du bassin versant  
 (a) Pont ferroviaire ; (b) Seuil partiellement détruit (flèche) et pont au hameau Le Pontet ; (c) Seuil maçonné atterri (hauteur de 3,8 m) ; (d) Passage à gué du Mélas ;  
 (e) Seuil en amont du pont de la Liberté (hauteur de 2,3 m) ; (f) Pont de la Liberté et son seuil parafouille partiellement détruit (hauteur de 1,5 m)



*Figure 22 : Perturbateurs anthropiques majeurs présents sur la partie aval du bassin versant  
(a) Pont à créneaux ; (b) Pont Matteoti avec son seuil parafouille (hauteur de 1,9 m) ; (c) Pont SNCF ; (d) Pont de la D86 avec son seuil parafouille partiellement détruit*

PERTURBATEURS ANTHROPIQUES DU FRAYOL				
Tronçon	Type	Quantité	Impact	
			Majeur	Secondaire
FRA_1	Seuil Seuil parafouille Passage à gué Pont	2	1	1
FRA_2	Seuil Seuil parafouille Passage à gué Pont	1 1		1 1
FRA_3	Seuil Seuil parafouille Passage à gué Pont	3 1 4 10	3 1 3	1 10
FRA_4	Seuil Seuil parafouille Passage à gué Pont	4 3 1 9	2 4 1 7	2 3 2
<b>Total</b>		<b>39</b>	<b>21</b>	<b>18</b>

Tableau 9 : Répartition des perturbateurs anthropiques du Frayol par tronçon, type et degré d'impact

PERTURBATEURS GÉOMORPHOLOGIQUES DU FRAYOL					
Tronçon	Longueur [km]	Affleurement rocheux		Seuil naturel	
		[km]	[%]	Majeur	Secondaire
FRA_1	1,7	0,6	38%		
FRA_2	3,3	2,8	87%	5	
FRA_3	6,0	4,2	69%	4	3
FRA_4	3,3	0,3	8%		3
<b>Total</b>	<b>14,2</b>	<b>7,9</b>	<b>55%</b>	<b>9</b>	<b>6</b>

Tableau 10 : Répartition des perturbateurs géomorphologiques du Frayol par tronçon et type

### ❖ Le corsetage du lit

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

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

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

En complément, le **corsetage naturel** représentant la contrainte latérale exercée par les falaises est également intégré aux éléments de l'analyse.

Le Tableau 11 synthétise les linéaires des différents éléments de corsetage recensés lors des investigations de terrain et le Tableau 12 indique les linéaires corsetés par tronçon en distinguant les confortements de berge, les ouvrages longitudinaux et la falaise. L'ensemble des éléments de corsetage anthropique sont localisés et illustrés pour chaque tronçon à la Figure 24, la Figure 25 et la Figure 26.

NATURE DES ÉLÉMENTS DE CORSETAGE ET LEUR LINÉAIRE			
Type	Nature	Longueur [m]	
		Rive gauche	Rive droite
Corsetage anthropique	Enrochement libre	136	319
	Enrochement liaisonné	105	7
	Gabion	14	0
	Épi	0	0
	Merlons	126	10
	Mur-digue	690	419
Corsetage naturel	Falaise	3 744	5 016

Tableau 11 : Synthèse du corsetage du lit du Frayol par type

LINÉAIRES CORSETÉS DU FRAYOL [m] PAR TRONÇON				
Tronçon	Longueur [km]	Confortement de berge	Ouvrage longitudinal	Falaise
FRA_1	1,7	0	0	0
FRA_2	3,3	0	136	2 379
FRA_3	6,0	48	528	3 566
FRA_4	3,3	533	581	140

Tableau 12 : Synthèse du corsetage du lit du Frayol par tronçon

Compte tenu de la longueur totale du linéaire d'étude (14,2 km), le lit du Frayol présente un **corsetage anthropique relativement limité**. En effet, moins de 10% des berges de rive droite et gauche sont contraintes latéralement par des confortements de berge et des ouvrages longitudinaux.

Parmi les confortements de berge, les **enrochements** sont les protections les plus utilisées avec environ 570 ml au total **répartis dans leur quasi-totalité sur le tronçon FRA\_4**. Ces enrochements servent essentiellement à protéger les enjeux dans la traversée du Teil, tels que le stade du Mélas, les ponts et les routes, les dernières crues de 2014 et 2015 ayant engendrées des inondations et des dégâts importants. Il convient de noter que certaines de ces protections ont été réalisées à l'automne 2016 dans le cadre de l'étude globale sur le bassin versant du Frayol lancée par la Mairie du Teil.

Les **ouvrages longitudinaux** (merlons et murs-digue) constituent toutefois le type de corsetage anthropique le plus présent. On compte ainsi un linéaire total d'environ 1,2 km, soit 9% du linéaire du Frayol. On rencontre principalement des **murs-digue** (1,1 km), en particulier sur les tronçons FRA\_3 et FRA\_4, contraints respectivement sur 9% et 18% de leur linéaire. Pour certains d'entre eux, il s'agit d'anciens murs-digue maçonnés qui permettaient autrefois d'alimenter des canaux (bajoyers, murs guideau). Pour le tronçon FRA\_2 moins concerné par ce type de corsetage que les tronçons FRA\_3 et FRA\_4, on trouve également des murs-digue en pierre parfois obsolètes et en ruine dans le secteur d'Aubignas.

L'analyse du corsetage du Frayol met également en avant que le cours d'eau est **fortement contraint latéralement par des falaises** sur environ 6 km, soit 43% de son linéaire, tant sur la berge de rive droite que sur celle de rive gauche. Ces contraintes latérales géologiques concernent essentiellement le tronçon FRA\_2 et le tronçon FRA\_3 jusqu'au hameau Les Combes, affectés respectivement sur 73% et 59% de leur linéaire. Ces falaises constituent des points de blocage, le tracé du cours d'eau, en particulier les extrados de méandre, étant ainsi totalement contraint par l'encaissement.



Figure 23 : Falaise contraignant la divagation latérale du Frayol

FRA\_2

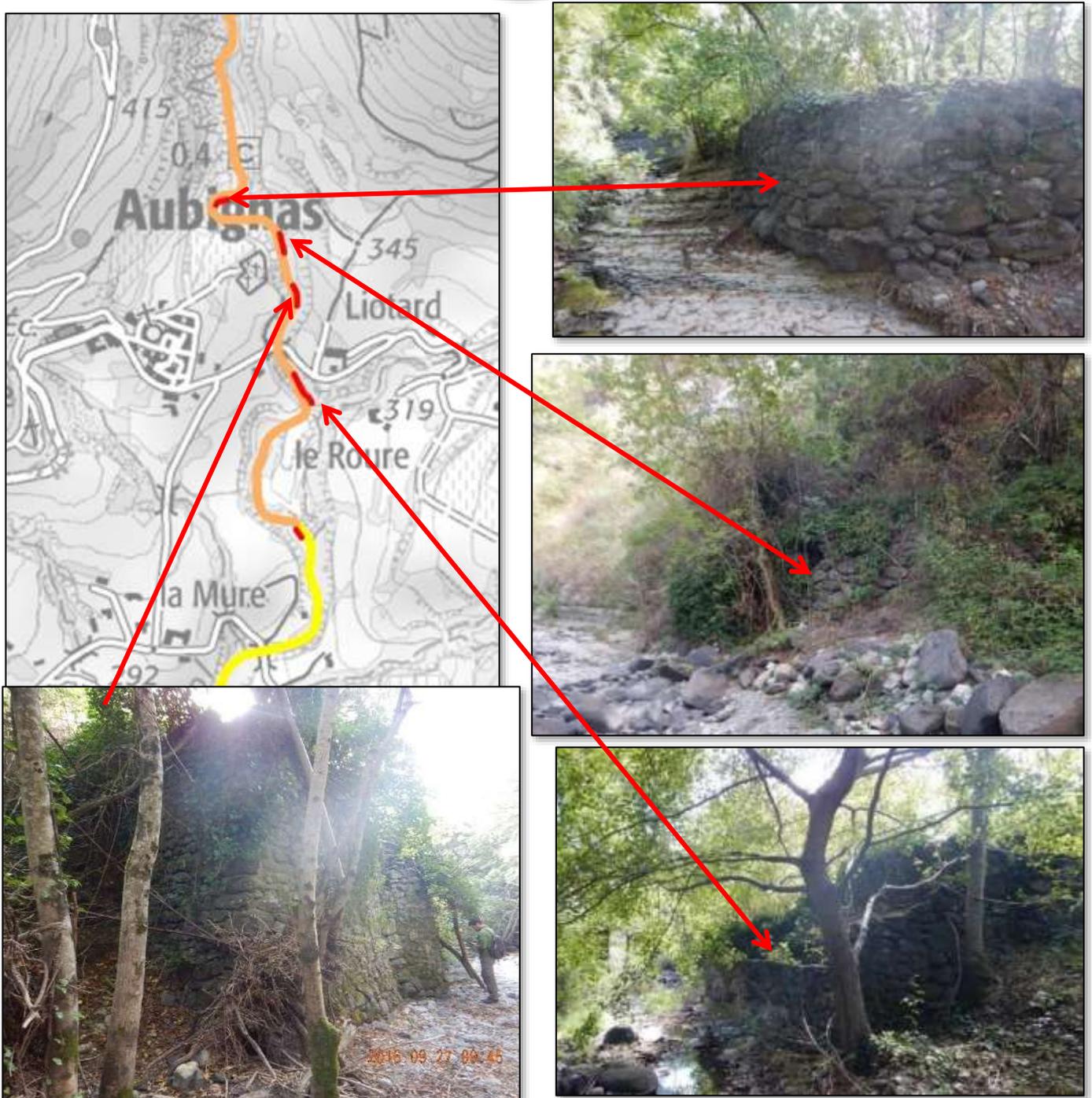


Figure 24 : Localisation des éléments de corsetage anthropique sur le tronçon FRA\_2



Figure 25 : Localisation des éléments de corsetage anthropique sur le tronçon FRA\_3



## B Les extractions de matériaux

La consultation de documents anciens aux Archives départementales de l'Ardèche montre que des extractions anciennes de matériaux alluvionnaires ont eu lieu dans le lit du Frayol notamment depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle. Les recherches n'ont pas permis de déterminer avec précision les volumes extraits, faute de documents suffisants.

Toutefois, plusieurs documents attestant de prélèvements autorisés à des entreprises ou indiquant le Frayol comme lieu d'extractions de matériaux pour la construction d'ouvrage d'art ont été trouvés :

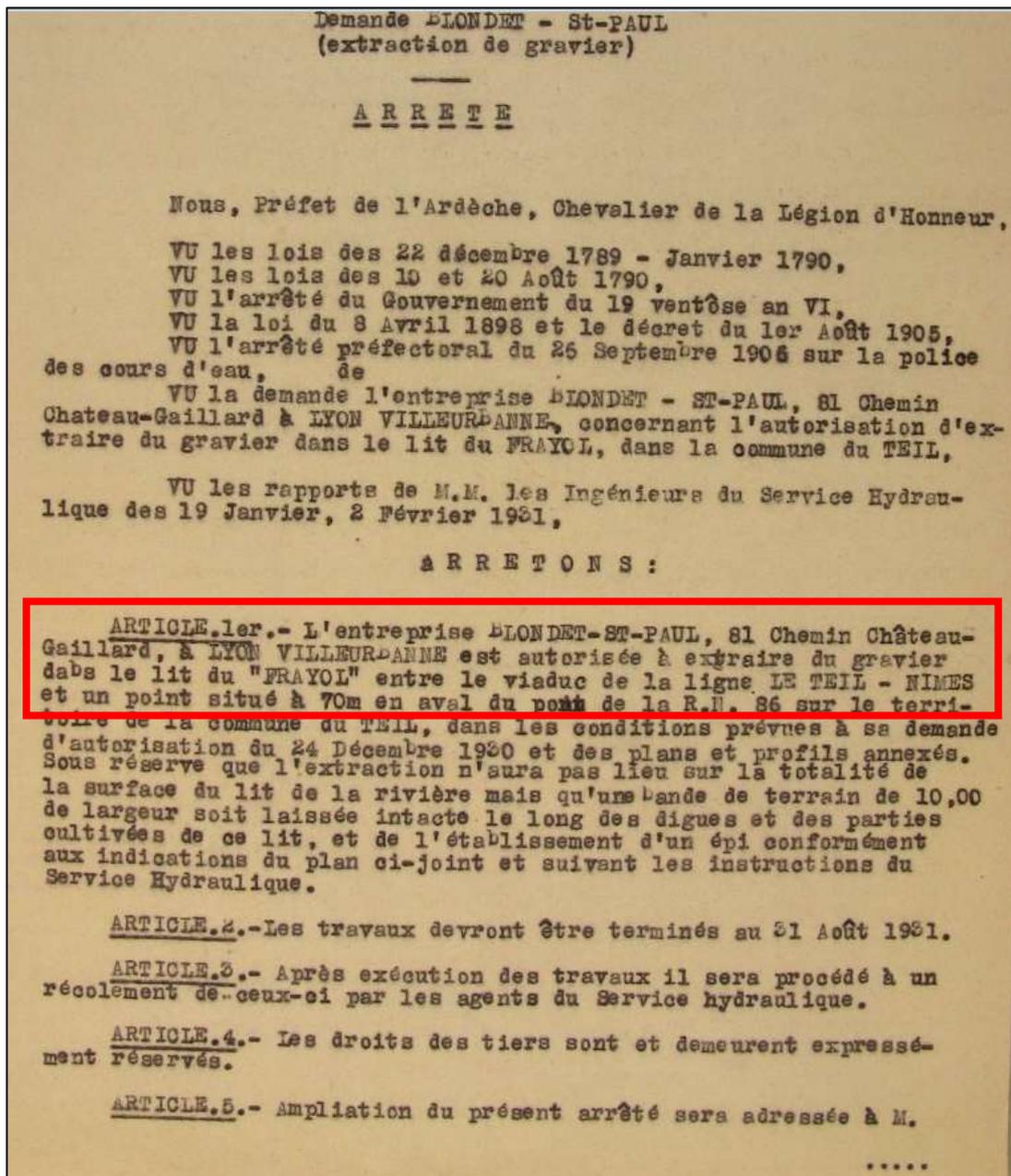


Figure 27 : Autorisation d'extraction de graviers dans le Frayol pour la société Blondet-St-Paul datant du 18 juin 1931 dans le cadre de travaux de terrassement pour l'agrandissement de la gare du Teil (Source : Archives départementales de l'Ardèche, n°7529)

3	Prix d'un mètre cube de déblai de rocher compact à la mine pour terrassements et fouilles ou fondations, y compris le dressement des talus. Une franc soixante centimes	1. <sup>60</sup>
4	Prix d'un mètre cube de terre et graviers mélangés de blocs pour emprunts se semblais à effectuer dans le lit de la rivière de Frayol non compris le transport. brente centimes	0. <sup>30</sup>
5	Prix d'un mètre cube de déblais de vicelles maçonnées	

2 <sup>e</sup> Section - Chaussée.		
9	Prix d'un mètre cube de matériaux basaltiques provenant du lit de la rivière de Frayol à une distance moyenne de 100 mètres cassés à l'anneau de 0,06 de diamètre et en mètres ronds à pied d'œuvre. quatre francs quatre-vingts centimes	4. <sup>80</sup>
10	Prix du passage à l'anneau de 0,06 de diamètre d'un mètre cube de matériaux	

Figure 28 : Extraits du bordereau des prix d'application dans le cadre du projet de construction d'un pont de 3 arches sur la rivière de Frayol à Mélas datant de juillet 1894  
(Source : Archives départementales de l'Ardèche, n°30479)

Il convient également de noter que les personnes ressources du territoire rencontrées dans le cadre de l'étude s'accordent à dire qu'il n'y a pas eu d'extractions massives et sauvages de matériaux dans le lit du Frayol, celui-ci n'étant pas facile d'accès.

Toutefois, tous indiquent que des opérations de curage ont eu lieu pour désengraver le lit du Frayol. Le cours d'eau était ainsi autrefois régulièrement curé (environ tous les deux ans) à la demande de la mairie entre les quartiers Mélas et St-Augustin, le cours d'eau « *ressemblant à un canal* » (*sic*).

Suite à la crue de 2014, des matériaux ont été prélevés au niveau du pont à créneaux pour libérer le passage au droit de l'ouvrage, les matériaux ayant été déposés en berge. L'étude hydraulique réalisée par Sogreah en 1984 indique également que le Frayol a été curé de part et d'autre du pont à créneaux suite à la crue de septembre 1982 (Sogreah, 1984, p.6).

De fait, il est certain que des matériaux ont été prélevés dans le lit du Frayol, mais aucun chiffre précis ne peut être donné. On peut toutefois estimer les quantités extraites à plusieurs milliers de mètres cubes, impactant ainsi fortement le bilan sédimentaire du Frayol, et ce d'autant plus dans le contexte de déficit de fourniture sédimentaire (sortie du Petit Âge Glaciaire – cf. § 5.1).

### 5.3 Analyse diachronique

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

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

#### A L'évolution en plan du Frayol

##### ❖ *Principes et méthodologie*

L'évolution en plan du Frayol est analysée à partir de la superposition de photographies aériennes prises à différentes époques et préalablement géoréférencées. Le pas de temps entre chaque photographie et la période totale de l'analyse dépendent de la disponibilité des photographies aériennes prises sur le secteur d'étude.

D'après les données référencées sur Géoportail, les missions aériennes réalisées sur le Frayol sont réparties entre 1947 et 2002 comme présenté dans le Tableau 13. À titre informatif, les années 2007, 2011 et 2013 correspondent aux bases de données orthophotographiques fournies par le SMBEF dans le cadre de la présente étude.

PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES DISPONIBLES SUR LE FRAYOL	
Années disponibles	Crues (Source : SAFEGE, 2017)
	09/1958
1947 ; 1955	12/09/1976
1956 ; 1959	20-21/09/1982
1961 ; 1962	11-12/10/1988
1968 ; 1969	17-18/06/1992
1973 ; 1975	01-14/10/1993
1979 ; 1981	06-11/01/1994
1986 ; 1989	25-26/09/1999
1991 ; 1997	16-17/11/2002
2002	24-26/11/2002
2007	01-02/12/2003
2011	12/08/2008
2013	03/09/2008
	14-15/11/2014
	12 et 15/09/2015

Tableau 13 : Photographies aériennes disponibles sur le Frayol

Les années privilégiées pour l'analyse diachronique sont retenues en fonction des crues les plus morphogènes qui se sont produites et de telle sorte que le linéaire du Frayol soit majoritairement couvert.

Ainsi, sont considérées les années 1947, 1961, 1981, 1986, 1991, 2007, 2011 et 2013, soit une période d'analyse de 67 ans.

La méthodologie employée pour l'analyse diachronique en plan du Frayol est la suivante :

- **Export des photographies aériennes** depuis Géoportail pour les années 1947, 1961, 1981, 1986 et 1991 ;
- **Géoréférencement des photographies aériennes** pour ces cinq années : il est à noter que le géoréférencement des photographies aériennes présente quelques difficultés pouvant induire des incertitudes liées à :
  - o La qualité des photographies du fait de leur ancienneté ;
  - o L'angle de prise de vue variable d'une année à l'autre ;
  - o La végétation et le relief qui génèrent des zones d'ombre ;
  - o Points de calage parfois difficiles à trouver et différents d'une année à l'autre.

L'ensemble de ces éléments introduit donc déjà un léger décalage de quelques mètres entre les différents tracés. Toutefois, la tendance générale est respectée.

- **Tracé de l'axe d'écoulement du Frayol pour chacune des huit années retenues** : il convient également de noter que cette étape comporte des difficultés liées à la largeur de pleins bords très étroite du Frayol, notamment pour les tronçons FRA\_1, FRA\_2 et FRA\_3 en gorges, et à une végétation très dense qui masque complètement le cours d'eau. On distingue donc très difficilement, voire pas du tout, le tracé du Frayol sur de nombreux secteurs du bassin versant. C'est la raison pour laquelle l'analyse s'appuie sur le tracé des axes d'écoulement du Frayol et est réalisée du pont d'Aubignas (aval du tronçon FRA\_2) à la confluence avec le Rhône (exutoire tronçon FRA\_4), la mobilité des tronçons en gorges étant par définition très limitée.
- **Superposition des différents axes d'écoulement et analyse de leur évolution.**

#### ❖ Résultats

L'analyse des différents tracés du Frayol sur la période 1947-2013 montre que le lit s'écoule selon un **axe globalement similaire** d'une année à l'autre :

- Le **tronçon FRA\_3** caractérisé par un style fluvial monochenalisé méandrant légèrement dans une gorge ne présente ni de recoupement de méandre, ni de migration de trains de méandres par translation vers l'aval. On constate plutôt une évolution des méandres par expansion par rapport à 1947 (*cf.* Figure 29).

Le corsetage géologique par les falaises contraint fortement la divagation latérale du lit, en particulier du pont d'Aubignas jusqu'au hameau Rabayast (amont du tronçon FRA\_3) où les extrados\* de méandres viennent buter contre l'encaissant (*cf.* Figure 29).

- Pour le **tronçon FRA\_4** dans la traversée du Teil, le lit du Frayol ne présente également pas de modification significative de son axe d'écoulement sur la période 1947-2013, les principaux travaux de recalibrage et rectification ayant été effectués durant la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, donc antérieurement à la période d'analyse.

On observe toutefois que la confluence avec le Rhône se situait en 1947 et 1961 environ 40 mètres en amont par rapport à son emplacement sur la période 1981-2013 (*cf.* Figure 30).

L'analyse de cartes anciennes telles que la carte de l'État-major (XIX<sup>ème</sup> siècle) montre que le Frayol présentait un lit large dans la traversée du Teil, le lit étant très étroit dans le reste du bassin versant.

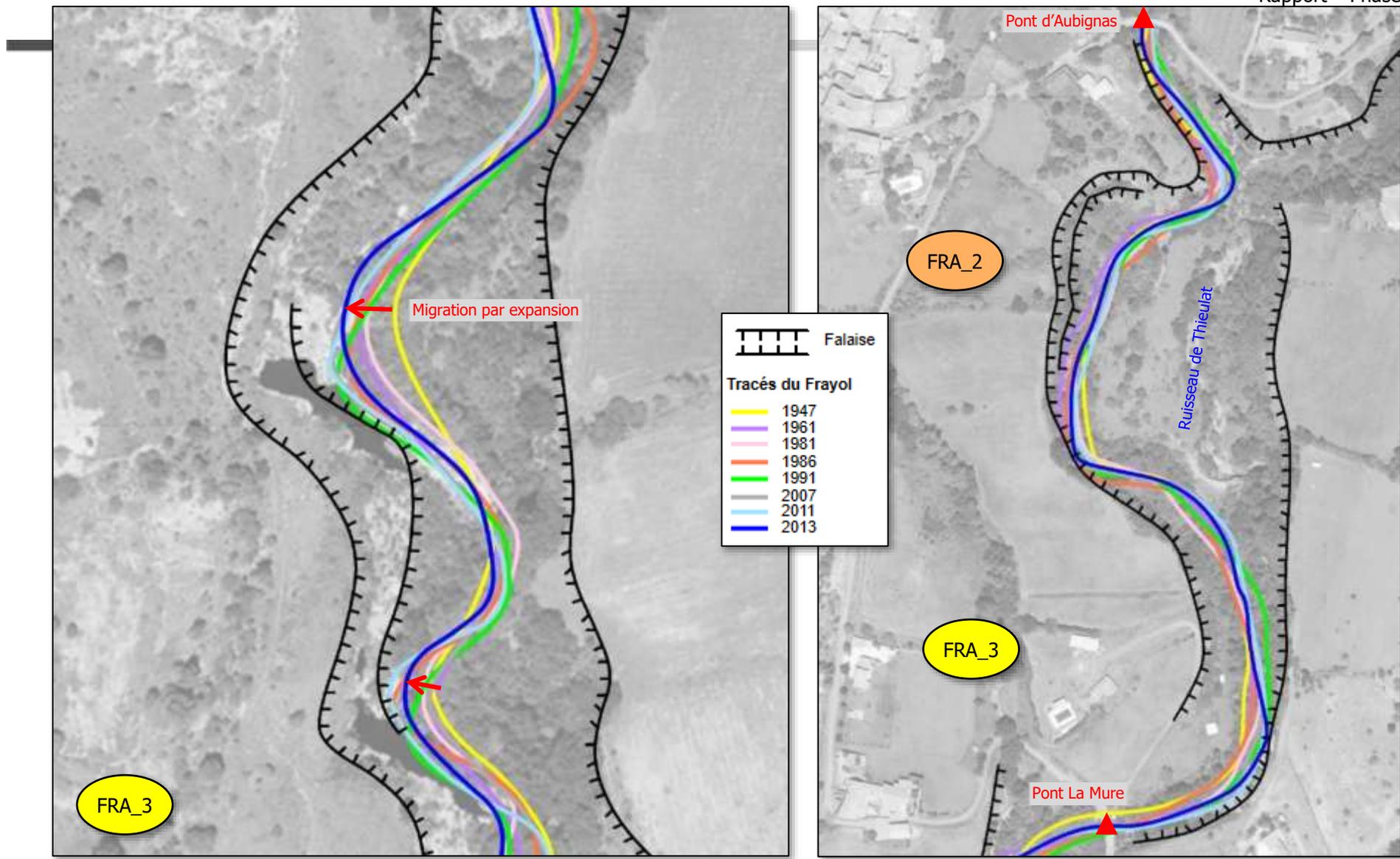


Figure 29 : Migration de méandres par expansion à l'aval immédiat de la confluence avec le ruisseau de Marsac représentée par la flèche rouge entre les apex 1947 et 2013 (à gauche) et évolution du lit contraint par la géologie entre les pont d'Aubignas et La Mure (à droite) (Fond de plan : BD ORTHO 2013)

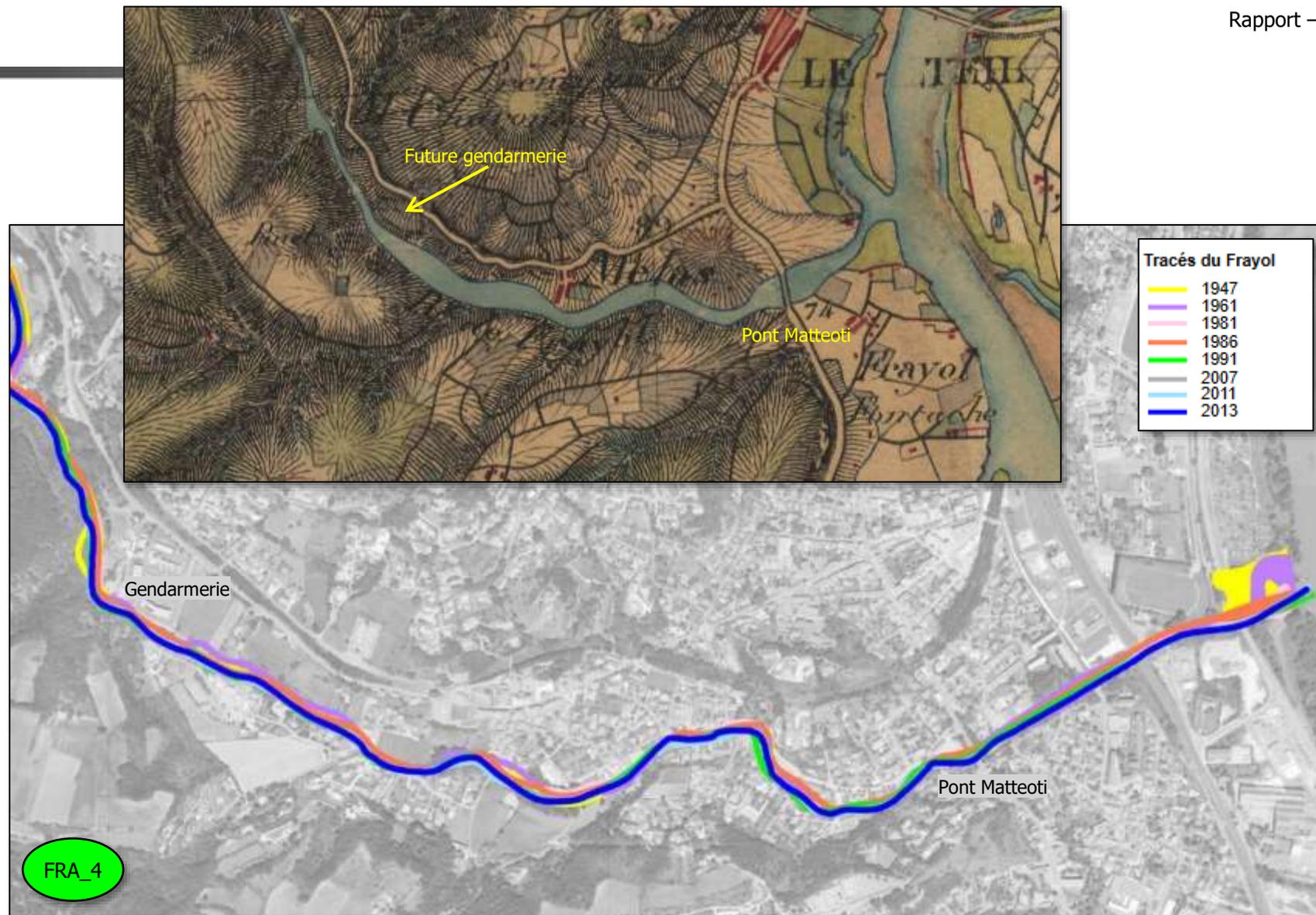


Figure 30 : Tracés du Frayol pour le tronçon FRA\_4 sur la période 1947-2013 (Fond de plan : BD ORTHO 2013) et carte de l'État-major

L'analyse diachronique met par ailleurs en évidence une forte et constante végétalisation du Frayol sur la période 1947-2013, et ce malgré les crues qui permettent généralement de rajeunir le lit en purgeant la végétation. On observe ainsi que le lit du Frayol s'est rétracté par rapport à 1947 par végétalisation de ses marges avec des secteurs plus touchés que d'autres :

### **Aubignas avec la confluence du ruisseau de Thieulat**

Entre le pont d'Aubignas et le pont La Mure, le Frayol présente un méandrage qui évolue peu sur la période 1947-2013. L'amplitude des trois méandres restent similaire entre 1947 et 2013, en moyenne 60-65 mètres environ pour le premier méandre à l'aval immédiat du pont d'Aubignas, 90 mètres pour le deuxième et 120 mètres pour le troisième en amont du pont La Mure. La présence de falaise en rives droite et gauche (dans les marnes hauteriviennes) contraint latéralement les méandres dont les extrados s'écrasent contre l'encaissant, d'où une mobilité réduite.

Ce constat est par ailleurs évoqué par les personnes rencontrées dans le cadre de l'étude et qui indiquent que le Frayol « *n'a pas eu d'évolutions particulières dans la traversée d'Aubignas suite à des crues ou à des aménagements du territoire* » (*sic*).

L'analyse diachronique montre également que le secteur présente une végétalisation relativement importante dès 1947 qui s'amplifie au fur et à mesure des années, rendant le tracé du Frayol quasiment invisible à partir de 1981 en particulier à l'aval du secteur. On remarque un atterrissement végétalisé présent au niveau du pont La Mure avec des chenaux en 1947 qui se déconnecteront par la suite du fait du développement de la végétation.

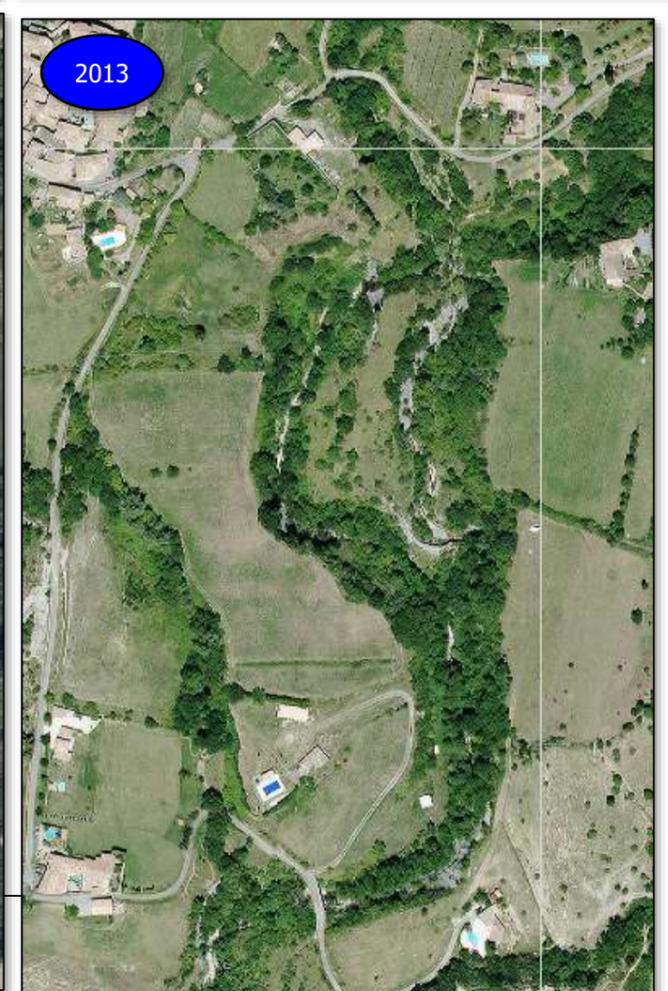
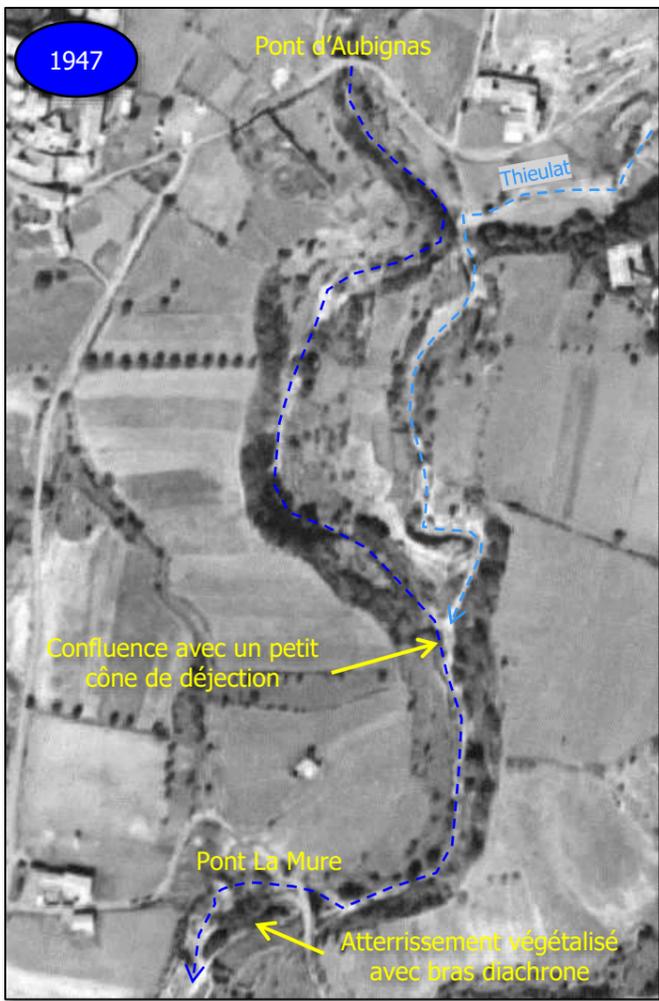
La confluence avec le ruisseau de Thieulat visible en 1947 avec un petit cône de déjection se végétalise également, limitant ainsi l'activité sédimentaire de l'affluent vers le Frayol.

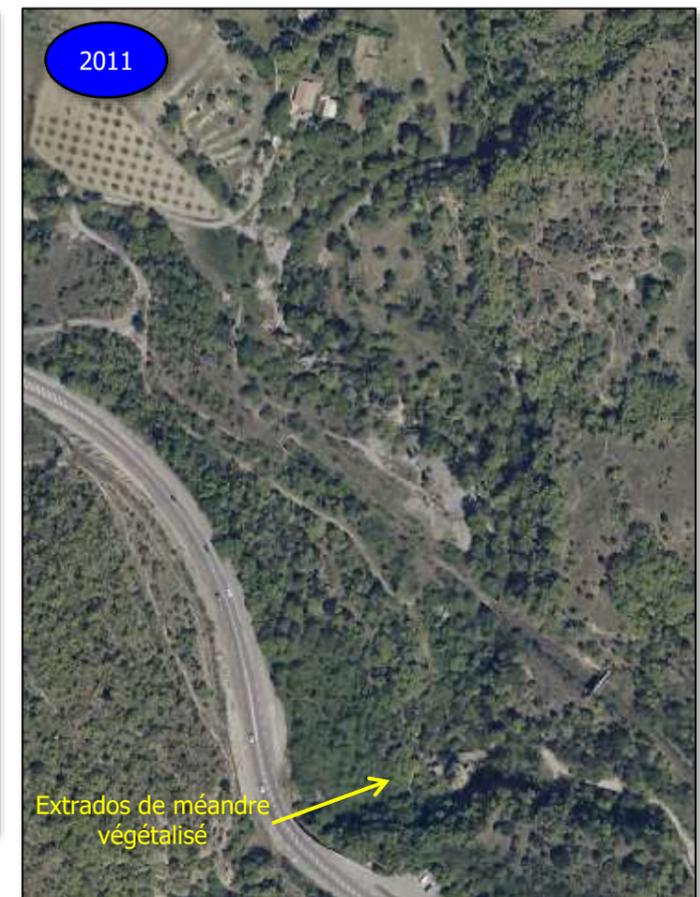
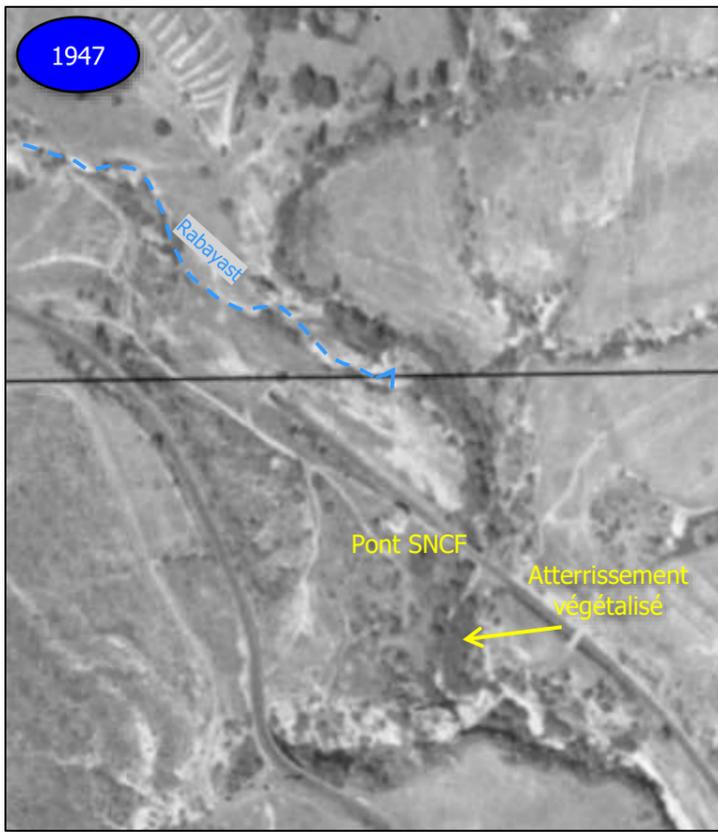
### **Méandres de Rabayast**

Au niveau du hameau de Rabayast, le Frayol effectue un méandrage bloqué naturellement par la falaise en rive droite (marnes de l'Hauterivien inf.) où vient confluer le ravin de Rabayast, et franchissant le pont ferroviaire environ 160 mètres en aval de la confluence.

De la même manière que le secteur précédent, les tracés du Frayol restent quasiment superposables sur la période 1947-1961 du fait de la contrainte latérale géologique. Les méandres voient également leur intrados et leur extrados se végétaliser fortement entre 1947 et 2013, en particulier à l'aval du pont ferroviaire totalement envahi par des atterrissements végétalisés.

La confluence avec le ravin de Rabayast disparaît également sous la végétation, alors qu'un petit cône de déjection était visible jusque dans les années 2000.





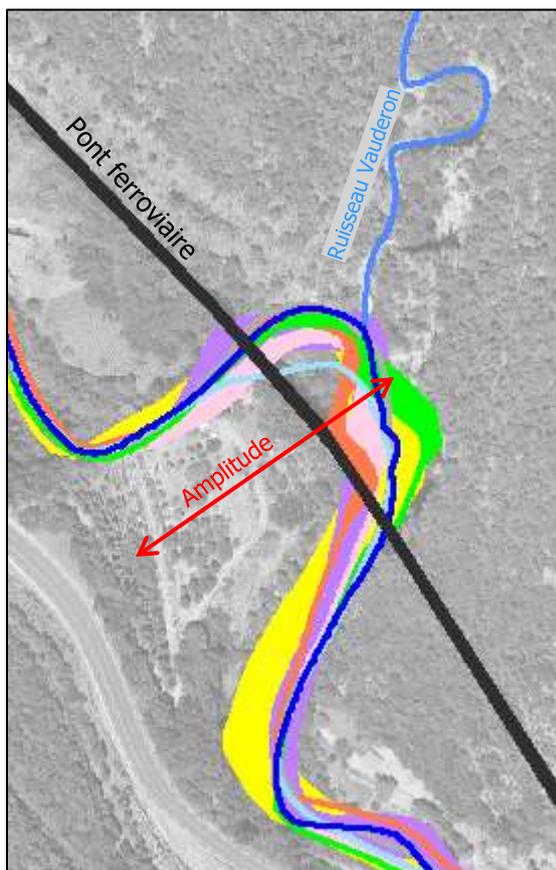
### Les Combes avec la confluence du ruisseau des Avents

**Sur la période 1947-1961**, le Frayol en amont de la confluence avec le ruisseau des Avents présente un lit étroit guidé par des atterrissements fortement végétalisés.

La confluence est nettement remarquable avec un lit large sans végétation. On note toutefois à l'aval immédiat de la confluence un atterrissement végétalisé avec un bras diachrone qui disparaît en 1961, certainement suite à la crue de 1958, laissant ainsi une largeur de pleins bords plus importante.

Le Frayol présente ensuite deux méandres répartis en amont et en aval du pont Les Combes. Le premier méandre qui vient buter en rive droite contre l'encaissant (calcaire hauterivien) est en cours de végétalisation au niveau de son intrados, dans lequel on aperçoit des chenaux. Le deuxième méandre est contraint en rive droite par un atterrissement végétalisé formé à partir du pont. On observe également une forte végétalisation en rive gauche, qui a probablement réduit l'espace de divagation du Frayol et le développé de la sinuosité.

**À partir de 1981 et jusqu'en 2013**, le secteur se végétalise fortement, masquant quasiment le tracé du Frayol qui évolue peu sur la période. Les structures alluvionnaires sont fixées par la végétation, les crues (en particulier celle de 1982) ne semblent pas avoir eu de gros effets morphogènes sur les atterrissements de ce secteur. La confluence avec le ruisseau des Avents se végétalise et la section d'écoulement se rétrécit, la construction du gué favorisant également le rétrécissement du lit à son aval immédiat. Le double méandrage est également complètement végétalisé et le lit du Frayol se simplifie en un lit monochenalisé, les bras diachrones visibles en 1947 et 1961 sont envahis par la végétation et disparaissent.

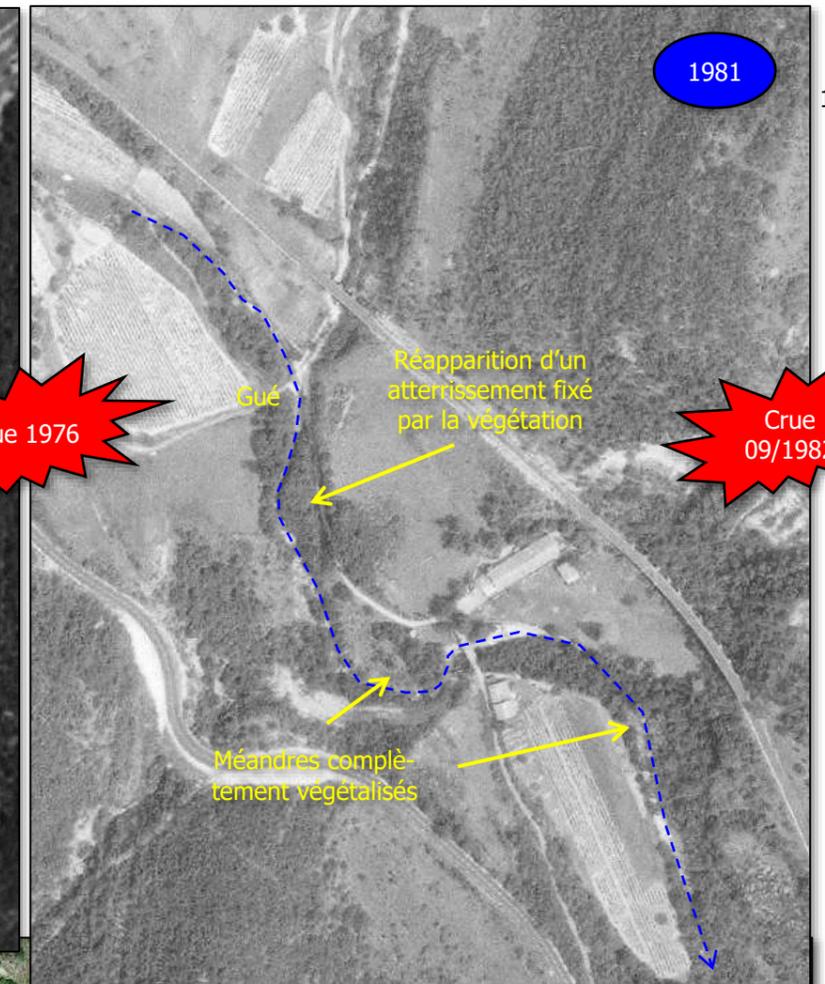
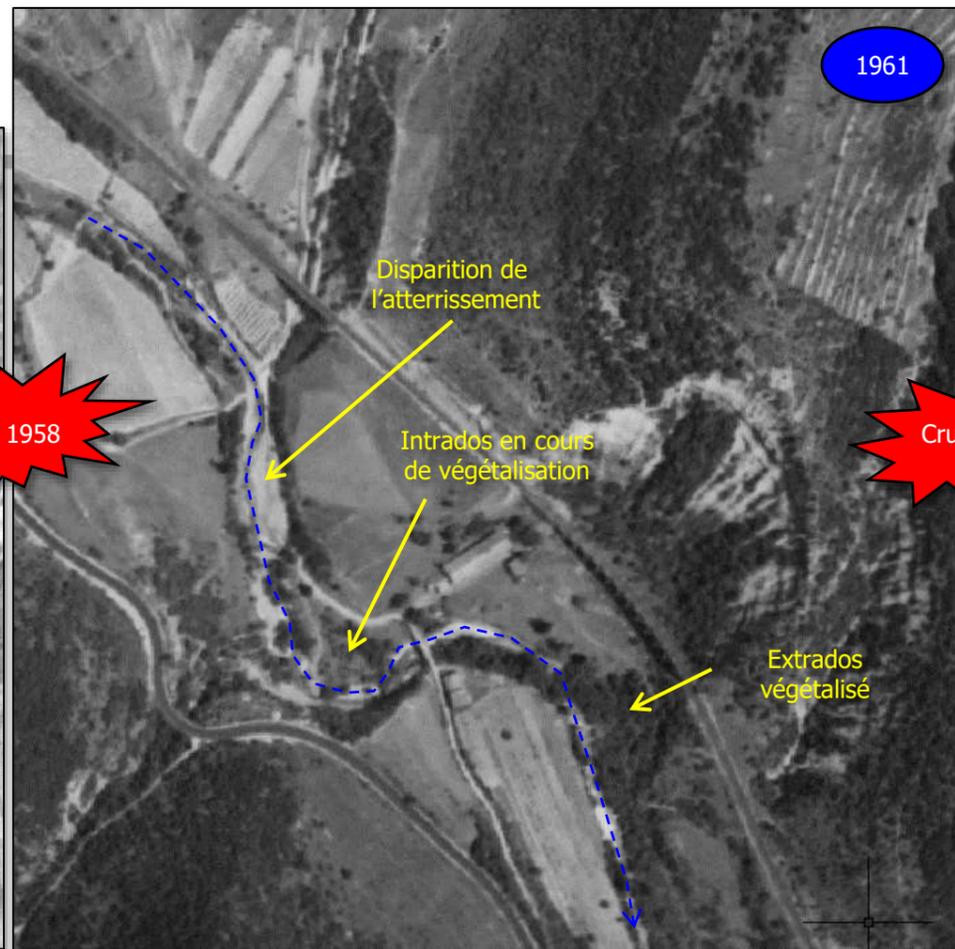
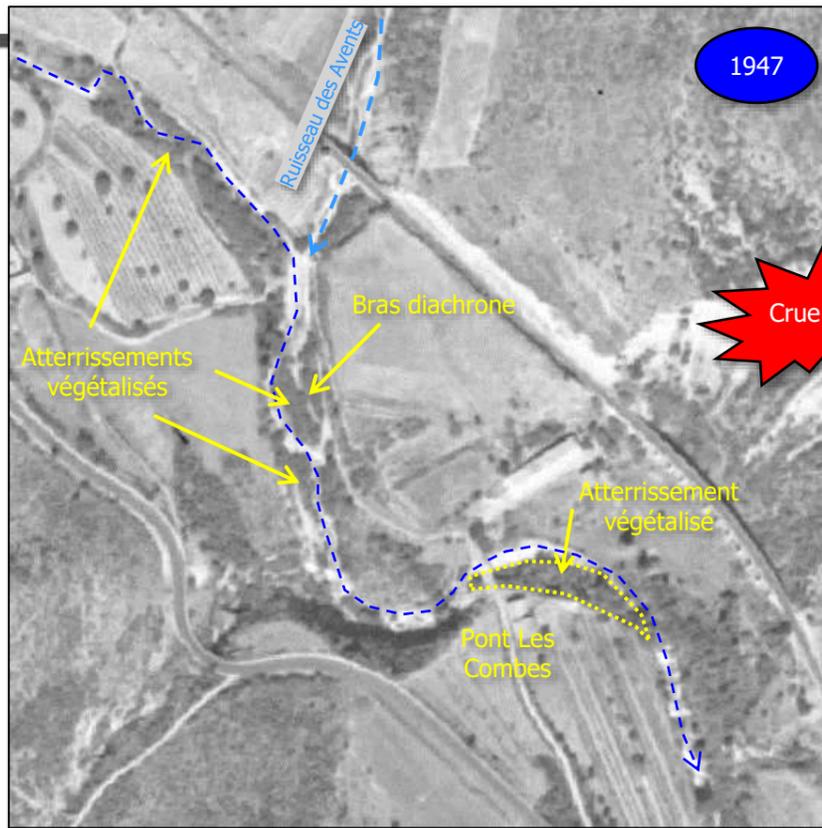


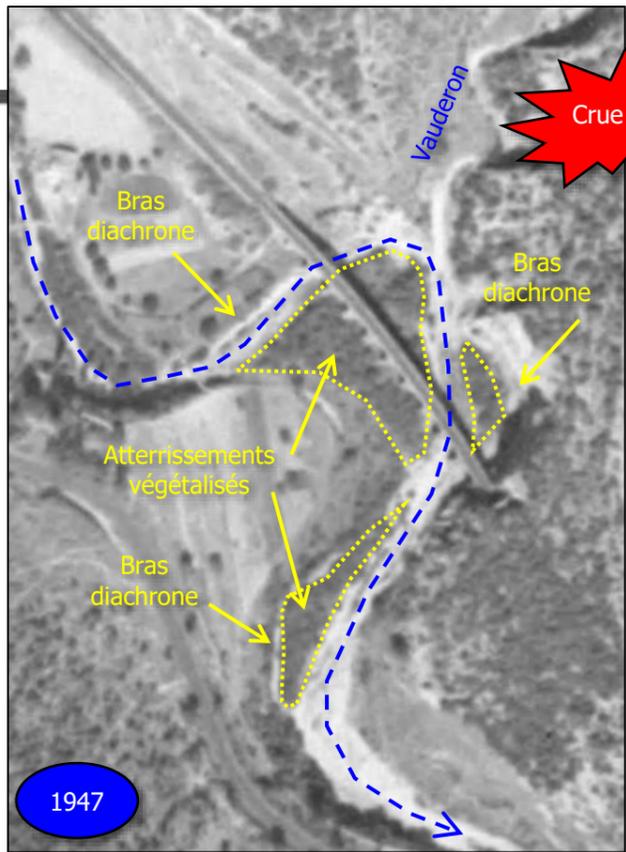
### Méandre du double pont ferroviaire

En amont du hameau le Pontet, le Frayol présente un méandre bien développé dans les calcaires hauteriviens d'une amplitude d'environ 165 mètres franchissant à deux reprises le pont ferroviaire et dans lequel vient confluer le ruisseau du Vauderon. À l'aval de la confluence, le méandre est contraint par l'encaissant en rive gauche.

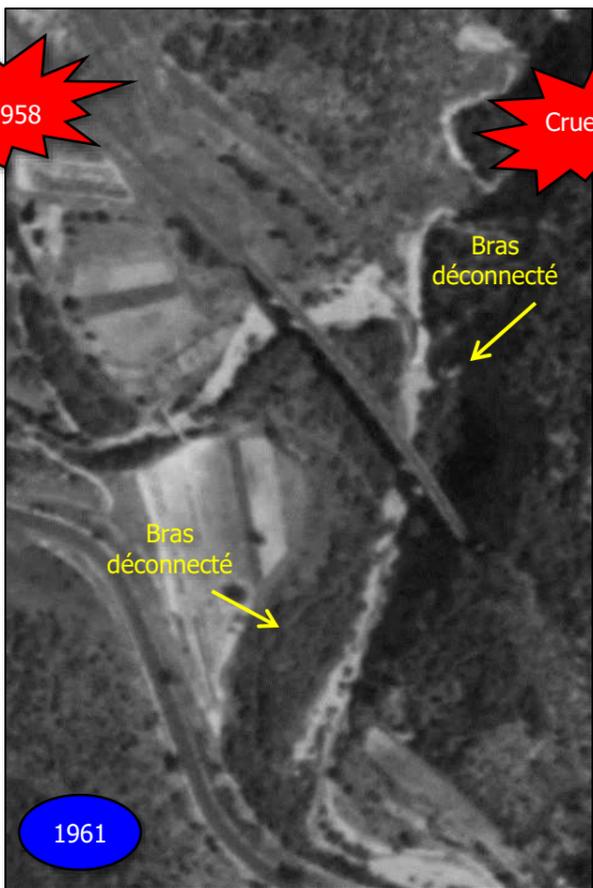
L'analyse diachronique montre une évolution du méandre sous influence directe de la végétalisation. En effet, le tracé du Frayol s'est simplifié depuis 1947, passant d'un lit large (15 à 20 mètres de large en 1947) avec des bras diachrones à un lit étroit monochenalisé (5 à 10 mètres de large en 2013). L'amplitude du méandre est toutefois restée sensiblement similaire sur l'ensemble de la période (entre 160 et 165 mètres environ).

On note également que la confluence avec le ruisseau Vauderon est nettement visible et peu végétalisée sur l'ensemble de la période, ce qui dénote une certaine activité sédimentaire de la part de l'affluent.





**Crue 1958**



**Crue 1976**



**Crue 09/1982**

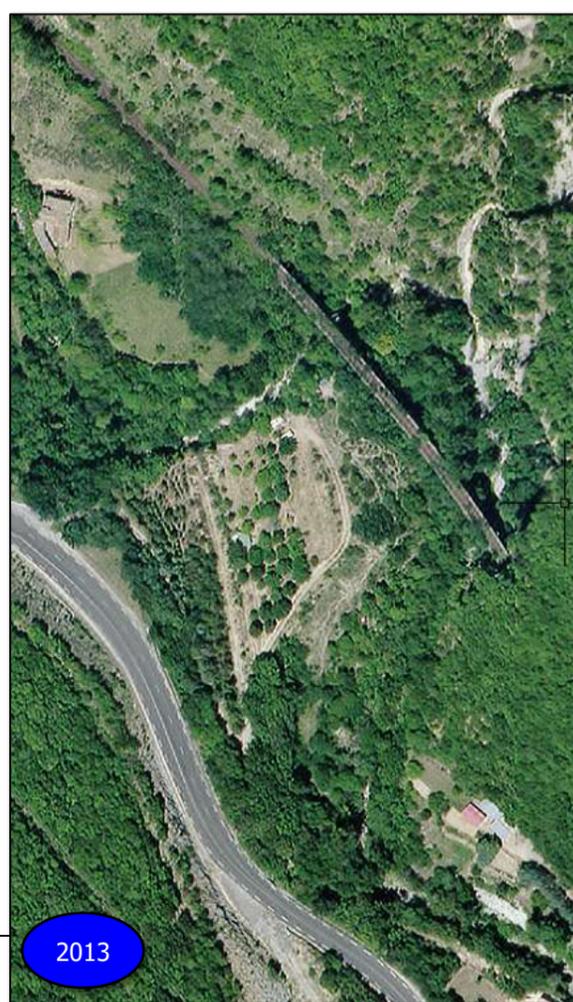
Phase 1



**Crues 1992-1993-1994-1999-2002-2003**



**Crue 2008**



## **Le Teil**

Dans la traversée du Teil, l'analyse diachronique montre que l'espace de divagation du Frayol a nettement diminué sur la période 1947-2013.

**En 1947**, le lit du Frayol est globalement identifiable. Jusqu'au pont de la Liberté, le lit subrectiligne apparaît large et peu végétalisé, la largeur de pleins bords étant en moyenne de 10-15 mètres. Dans la partie amont du tronçon, on constate également que le Frayol présente un bras diachrone en rive droite séparé du cours d'eau principal par un atterrissement en cours de végétalisation.

Entre les ponts de la Liberté et Matteoti, le Frayol présente un méandrage et un lit moins visible et large que dans la partie amont. Le premier méandre à l'aval immédiat du pont de la Liberté est contraint par des atterrissements végétalisés en rives droite et gauche, engendrant un rétrécissement du lit par rapport à l'amont (environ 5 mètres de largeur). On devine d'anciens bras diachrones dans l'extrados du méandre, laissant penser que le Frayol présentait une zone de divagation plus large avant la fixation des atterrissements par la végétation, et donc une amplitude de méandre plus développée (86 mètres en 1947). Le deuxième méandre à l'amont du pont à créneaux présente une amplitude plus importante que le précédent (142 mètres). Le lit du Frayol y est monochenalisé et se rétrécit encore à environ 3 mètres de largeur. Le troisième méandre situé entre les ponts à créneaux et Matteoti est aussi bien développé que le précédent avec une amplitude de 161 mètres. Le méandre est toutefois perturbé dans sa partie aval par la structure alluvionnaire végétalisée en amont immédiat du pont Matteoti côté rive droite, repoussant ainsi le lit en rive gauche contre la route. On note également que le lit s'ouvre passant de 3 mètres de largeur à 8-10 mètres environ.

Entre les ponts Matteoti et ferroviaire, le lit s'élargit mais présente des structures alluvionnaires centrales végétalisées. On observe également une importante encoche d'érosion en rive gauche à l'aval immédiat du pont Matteoti.

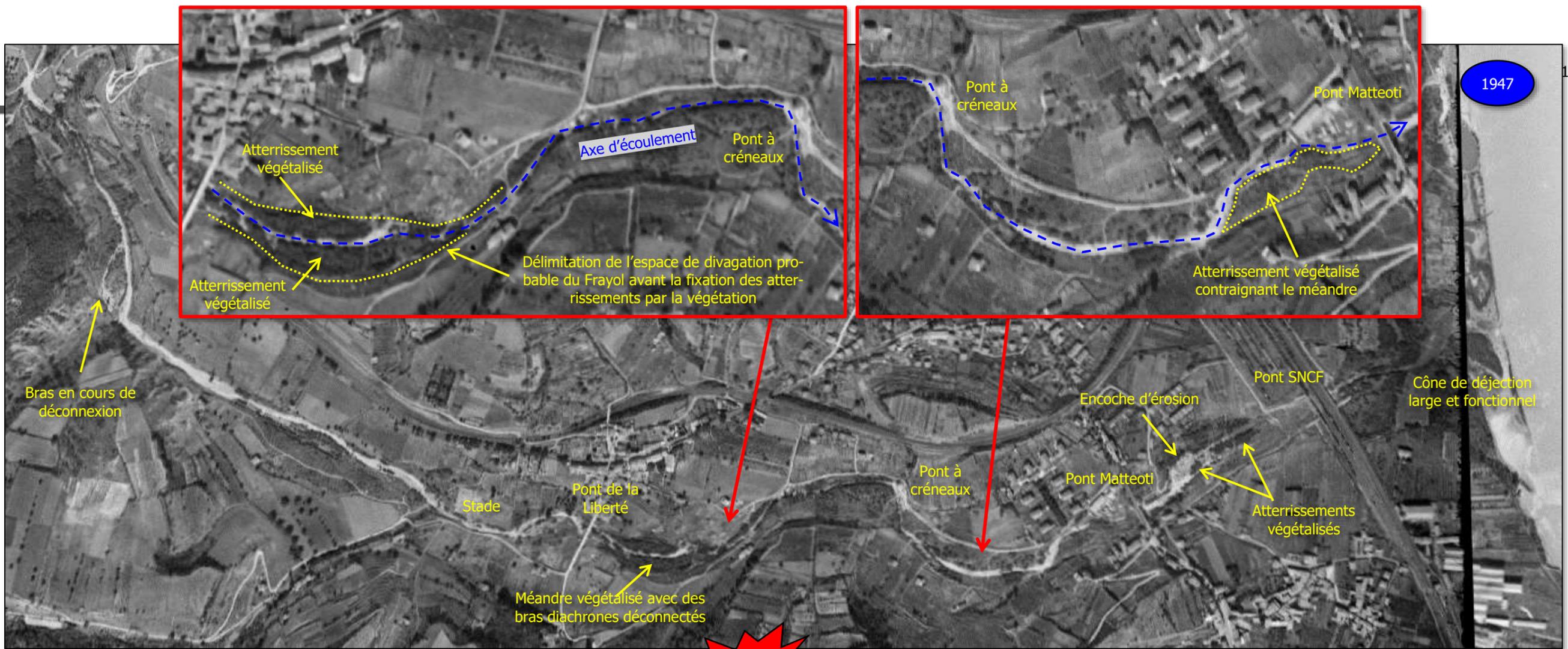
À partir du pont ferroviaire, le lit se rétrécit considérablement et s'écoule plutôt rive gauche, avant de s'ouvrir et confluer avec le Rhône, le cône de déjection étant nettement visible et fonctionnel mais obstrué par une structure alluvionnaire complètement végétalisée.

**En 1961**, le Frayol évolue peu par rapport à 1947 malgré la crue de 1958. Le Frayol est toujours facilement repérable jusqu'au pont de la Liberté, mais connaît un rétrécissement de son lit passant d'une largeur de 10-15 mètres en 1947 à 7-8 mètres environ en 1961. On note également la disparition (végétalisation) du bras diachrone en amont du tronçon, la crue de 1958 n'ayant pas permis sa reconnexion. Des structures alluvionnaires végétalisées en amont du gué se sont développées.

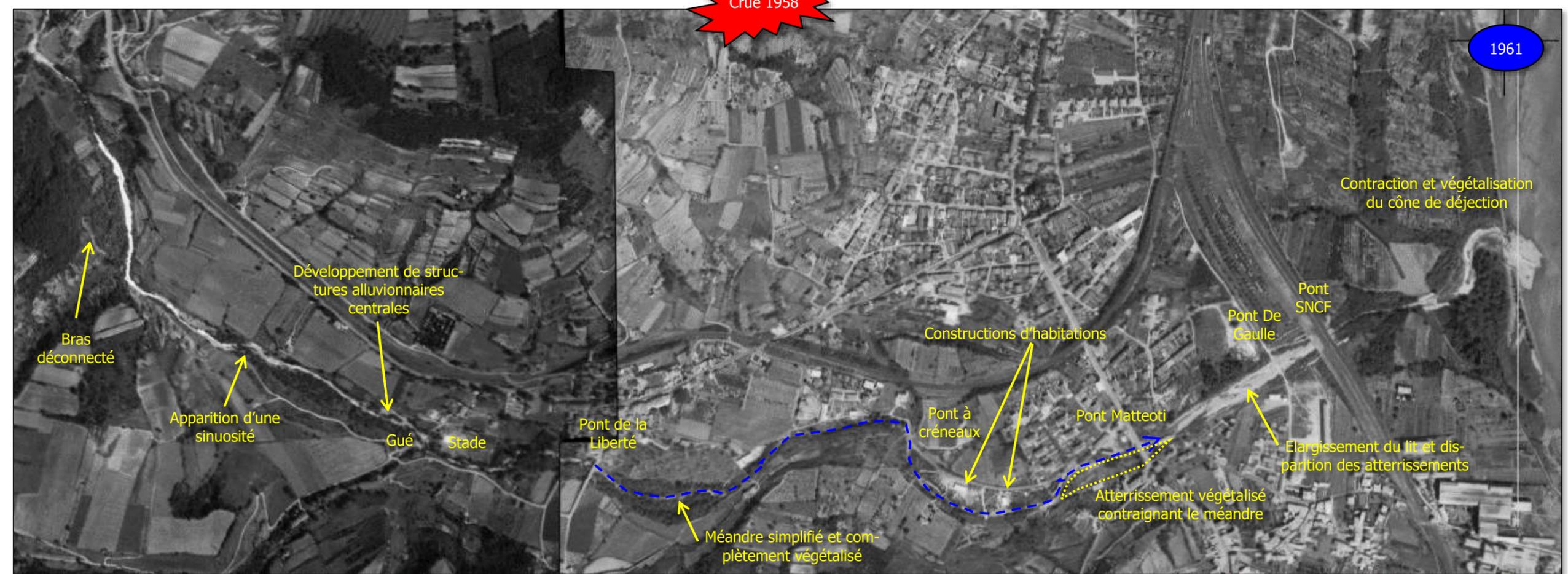
Les trois méandres situés entre les ponts de la Liberté et Matteoti sont difficilement identifiables et contraints complètement par la végétation tant en rive droite qu'en rive gauche, en particulier celui situé à l'aval immédiat du pont de la Liberté. La largeur de pleins bords du lit est sensiblement similaire qu'en 1947. On remarque par ailleurs que le troisième méandre en amont du pont Matteoti présente des structures alluvionnaires plus ou moins végétalisées par rapport à 1947, ainsi que la construction d'habitations entre le lit du Frayol et la rue Alphonse Daudet. L'atterrissement en amont immédiat du pont Matteoti contraint toujours le Frayol qui vient buter contre la berge de rive gauche.

C'est la partie aval du tronçon FRA\_4 qui connaît l'évolution la plus significative. En effet, on observe nettement le tracé du Frayol entre le pont Matteoti et le pont ferroviaire. Les atterrissements végétalisés présents en 1947 ont disparu et le lit paraît plus large. La construction du pont de Gaulle a vraisemblablement entraîné des travaux de refaçonnage du lit. De plus, on constate que le cône de déjection s'est rétracté et végétalisé par rapport à 1947.

**Sur la période 1981-2013**, le lit du Frayol ne connaît pas d'évolution significative, si ce n'est le développement de l'urbanisation de la commune du Teil. Les tracés du Frayol sont quasi-superposables malgré les différentes crues qui se sont produites. En effet, à partir de 1981 et jusqu'en 2013, on constate une forte végétalisation des abords du lit par rapport à la période 1947-1961 qui efface complètement le tracé du Frayol. La largeur de pleins bords se voit également réduite à environ 5-10 mètres sur l'ensemble du tronçon. Le cône de déjection du Frayol continue de se contracter et se végétaliser, avant de disparaître totalement en 1991.



**Crue 1958**





1981

Disparition du bras dans la végétation

Crue 09/1982



1986

1991

Phase 1

Pont  
D86

Cruces  
1992-1993-1994-  
1999-2002-2003

2007

HY  
SM



2011



2013



## B L'évolution altimétrique du Frayol

### ❖ *Principe et méthodologie*

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

Dans le cas du Frayol, deux profils en long sont disponibles, l'un levé en février 2005 par le cabinet géomètre Lemoine et l'autre levé en avril 2015 par GEOSIAAP. Ces profils concernent un linéaire restreint du Frayol s'étendant de la gendarmerie (265 mètres en amont) jusqu'à la confluence avec le Rhône, c'est-à-dire le tronçon FRA\_4.

#### **Les profils des Grandes Forces Hydrauliques**

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

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

La comparaison avec le profil en long 2016 levé dans le cadre de la présente mission concernera ce linéaire sur la dernière décennie (2005-2016).

Il est à noter également qu'il n'existe pas de profils en long du type Grandes Forces Hydrauliques (*cf.* Encart 5). Le Frayol n'a pas fait l'objet d'investigations par ce service. Le profil Grandes Forces Hydrauliques aurait permis d'avoir une vision de l'évolution altimétrique sur un pas de temps séculaire (1910-2016).

*Encart 5 : Grandes Forces Hydrauliques*

### ❖ *Résultat*

L'analyse diachronique par comparaison des différents profils en long est présentée à la Figure 31. Globalement, il n'y a pas d'évolution significative entre les profils en long 2015 et 2016, à l'exception de la partie amont du tronçon FRA\_4 dans le secteur de la gendarmerie où le profil 2016 s'est incisé par rapport à celui de 2015 de -50 à -80 cm.

La comparaison des profils 2015-2016 par rapport à celui de 2005 montre des secteurs incisés et exhaussés indiqués respectivement par des flèches rouge et verte sur la Figure 31.

La tendance est ainsi à l'incision par rapport à 2005 en amont de la gendarmerie ( $\approx -50$  cm), en amont proche du gué du stade Mélas ( $> -50$  cm), à l'aval de la confluence avec le ruisseau de la Fontaine Mouzelas ( $\approx -50$  cm), et entre la passerelle Jarniac et le pont Matteoti (-60 cm à -1 m). Sur ces quatre secteurs identifiés comme incisés, on note des évolutions altimétriques relativement modérées de l'ordre du demi-mètre au mètre et affectant un linéaire d'un kilomètre, soit 30% du tronçon FRA\_4.

On remarque également quatre secteurs où le lit du Frayol connaît des exhaussements par rapport à 2005, à savoir à l'aval de la gendarmerie ( $\approx +50$  cm), entre la passerelle du stade du Mélas et le seuil du pont de la Liberté (+60 à +80 cm), en amont proche du seuil du pont à créneaux (+60 à +90 cm) et en amont de la passerelle Jarniac (+50 cm à +1 m). Ces exhaussements concernent des évolutions altimétriques allant de +50 cm à +1 m, et sont répartis sur un linéaire de 850 mètres, soit 25% du tronçon FRA\_4.

Il convient également d'indiquer qu'à partir du pont Matteoti, le profil semble plutôt stable sur la période 2005-2016, les seuils parafouilles du pont Matteoti et du pont de la D86 contribuant à stabiliser le profil en long et témoignant d'une probable incision passée du lit. On retrouve par ailleurs cette même tendance au niveau des seuils du pont de la Liberté et du pont à créneaux, où le profil se stabilise.

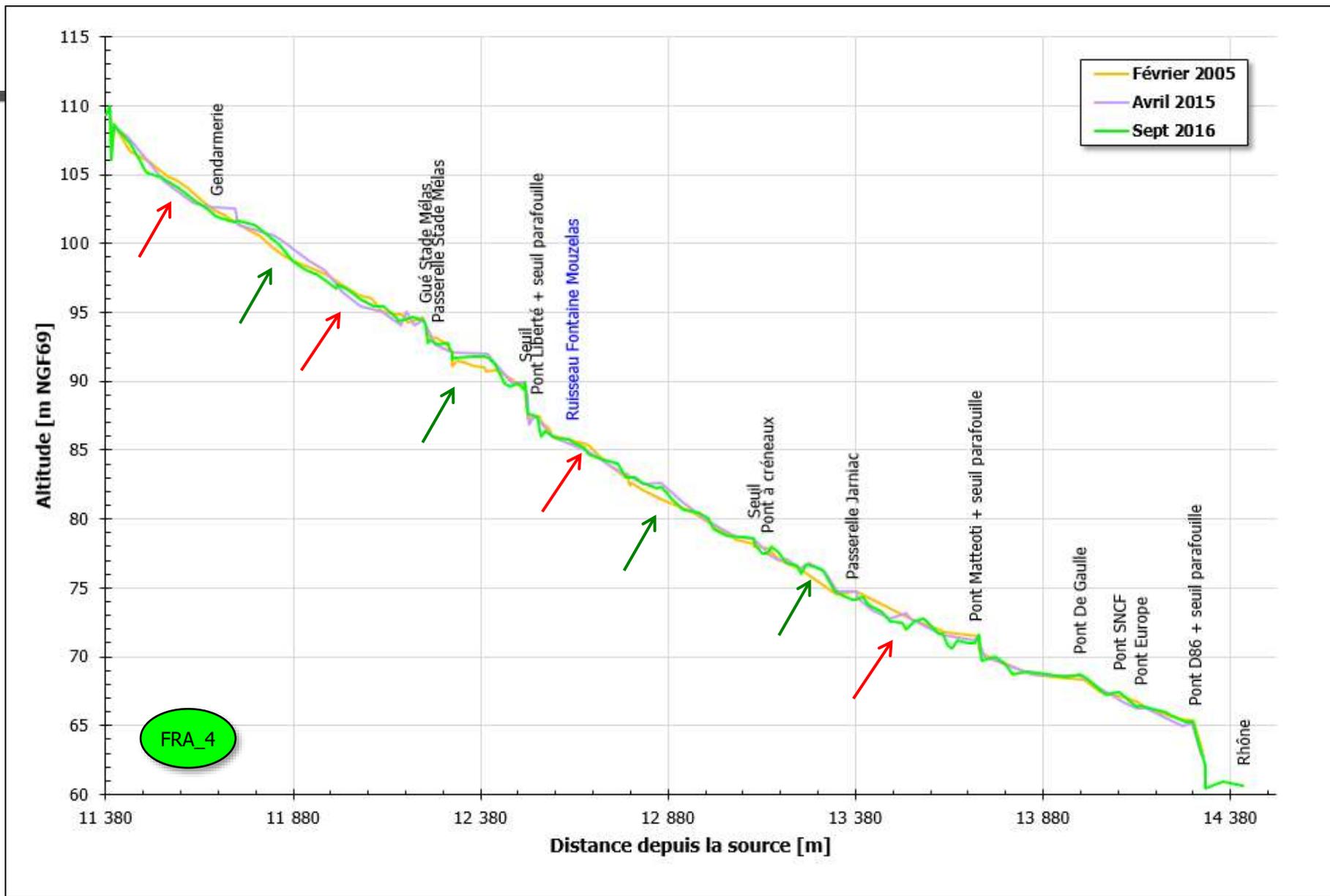


Figure 31 : Comparaison des profils en long levés sur la période 2005-2016 dans le tronçon FRA\_4  
 Les flèches rouge indiquent les secteurs incisés par rapport à 2005 et les flèches vertes les secteurs en exhaussissement

Il n'existe pas de profils en long anciens sur les tronçons en gorge FRA\_1, FRA\_2 et FRA\_3 permettant une comparaison avec le levé de 2016. Néanmoins, on peut suspecter une incision importante sur la majorité de ces tronçons, le Frayol s'écoulant directement sur le substratum sans plancher alluvial comme analysé précédemment (*cf.* § 5.2A).

#### Dater le passé : Before Present (BP)

La datation de périodes révolues il y a fort longtemps est exprimée en années BP c'est-à-dire *Before Present* signifiant littéralement « avant le présent ».

Cette datation exprime l'âge d'un fait en nombre d'années compté à rebours (*i.e.* vers le passé) à partir du passé fixé à 1950 date des premières datations au Carbone 14. C'est pour cela qu'il n'y a pas d'années négatives.

On peut également employer AA pour « avant aujourd'hui ».

#### Encart 6 : Before Present

En effet, à l'instar des gorges du Chassezac (affluent de l'Ardèche) étudiées par Jacob et al. (2006) entre le Tardiglaciaire (18 000 à 10 000 ans BP, *cf.* Encart 6) et l'Holocène (depuis 10 000 BP), les parties en gorge du Frayol ont certainement connu une phase de stockage (construction d'un plancher alluvial) lors de la dernière crise morphogénique froide favorable à l'alluvionnement. La période actuelle, déficitaire sédimentairement, a conduit au déstockage de ces matériaux jusqu'à l'affleurement des roches en place (marnes, calcaires...).

En effet, le climat a connu au Quaternaire des phases périglaciaires (périodes de climat froid favorisant les apports sédimentaires notamment par le processus de gélifraction\*) et périodes de réchauffement (comme la période actuelle moins prolifique

en matériaux). Cette évolution climatique s'est traduite par une succession de phases de stockage et de déstockage du plancher alluvial.

Cette situation est à mettre en relation avec celle de l'Escoutay dont la partie amont s'écoule également partiellement sur le substratum.

Compte tenu de la lithologie, les intercalations de bancs durs ont conduit à l'émergence de cascades métriques, voire plurimétriques, favorisant le compartimentage du lit. Par exemple :

- Les marnes grises de Valvignères qui sont présentes entre la Fare et le pont La Mure ou encore de la confluence Frayol-ravin de Rabayast jusqu'au hameau Les Combes incorporent des passées calcaires sporadiques favorisant ce phénomène ;
- Les marnes grises qui sont présentes en aval du pont La Mure jusqu'en amont de la confluence Frayol-ravin de Rabayast comportent des intercalations de calcarénites (grès), pouvant conduire à individualiser des cascades.

## 6 Fonctionnement dynamique du Frayol

### 6.1 État de la recharge sédimentaire

#### A Les apports solides externes

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

##### Le couplage sédimentaire

La charge solide d'un cours d'eau est constituée de plusieurs sources qui fournissent, généralement de manière concomitante à ce dernier, des matériaux de nature (granulométrie) et de volume divers.

On parle alors de couplage sédimentaire (Fryirs, 2013). Ce couplage peut ainsi être de trois ordres :

Le **couplage sédimentaire longitudinal** qui correspond au *continuum* sédimentaire amont-aval et qui reflète les relations hiérarchiques (*i.e.* rang de Strahler) du réseau hydrographique. Il peut être affecté de discontinuités, on parle alors de **barrière** (*e.g.* barrage ou seuil).

Le **couplage sédimentaire latéral** qui concerne alors les apports de matériaux érodés sur les versants et sur les berges. Là-encore, cette continuité peut être altérée, on parle dans ce cas de **tampon** entre les sources sédimentaires et le cours d'eau (*e.g.* un confortement de berge, une route pour un versant).

Le **couplage sédimentaire vertical** qui fait référence à la capacité à remobiliser le substrat de son lit (respiration du lit). Ce type de couplage est limité par des obstacles appelés **couverts** qui limitent la remobilisation des alluvions (*e.g.* armure).

La connexion versant-lit ou couplage sédimentaire latéral (*cf.* Encart 7) constitue un élément important en termes de charge solide. L'érosion de surface des versants (ablation ou décapage) ou l'érosion profonde (mouvements rotationnels, solifluxion...), les écroulements et éboulements de falaises contribuent à la fourniture d'une charge solide grossière.

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

Dans le cas du bassin versant du Frayol, la connexion versant-lit est assez **limitée** :

- Il ne s'agit pas d'un bassin versant en tête de bassin montagnard où la connexion versant-lit prend une importance toute particulière avec les phénomènes de cascade sédimentaire ;
- En second lieu, les versants du Frayol sont fortement végétalisés, ce qui réduit l'érosion et donc le couplage sédimentaire latéral, la végétation formant tampon (*cf.* Figure 32).

Encart 7 : Le couplage sédimentaire



Figure 32 : Boisement des versants limitant le couplage sédimentaire latéral en amont du pont Neuf

❖ *Les apports externes secondaires : les affluents*

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

L'analyse des apports externes liés aux affluents vise à évaluer les affluents qui représenteraient des contributeurs sédimentaires potentiels importants en termes d'apports de matériaux au Frayol. La méthodologie utilisée repose sur l'analyse des confluences (cônes de déjection et bande active du Frayol en aval) à partir des investigations de terrain, des cartes géologiques et des photographies aériennes du bassin versant. Elle est complétée par une lecture du couplage sédimentaire latéral (*cf.* Encart 7) de l'affluent.

En premier lieu, il convient de constater que les affluents du Frayol sont des affluents à faible linéaire et souvent au style en gorge. Les bassins versants de ces affluents apparaissent végétalisés dénotant un couplage latéral inefficace.

PRINCIPAUX CONTRIBUTEURS SÉDIMENTAIRES POTENTIELS DU FRAYOL					
Tronçon	Principaux affluents	Géologie	Cône de déjection	Observations	Degré de contribution
FRA_2	Ruisseau de Thieulat	Basaltes Calcaires Marnes	Peu marqué	Contributeur basaltique et bassin fortement végétalisé	Faible
FRA_3	Ruisseau de Marsac	Marnes	Peu marqué	Contributeur essentiellement marneux, faible couplage sédimentaire	Faible
	Ravin de Rabayast	Marnes	Marqué jusqu'en 2000 et végétalisé depuis	Contributeur marneux intéressant localement mais les alluvions marneuses sont de faible taille	Faible
	Ruisseau des Avents	Marnes Calcaires à miches	Végétalisé	Contributeur marno-calcaire avec faible couplage sédimentaire	Faible
	Ruisseau du Vauderon	Calcaires à miches	Visible mais petit	Contributeur calcaire à petit cône intéressant localement mais la taille du bassin ne peut contribuer à apporter une forte charge à l'échelle du bassin du Frayol	Moyen
FRA_4	Ravin de Courion	Marnes rouges Conglomérat de calcaire	Non visible	Faible couplage sédimentaire	Faible
	Ruisseau de l'Étang	Poudingue Calcaires gréseux Marnes Grès	Non visible	Faible couplage sédimentaire et sans cône à son exutoire	Faible

Tableau 14 : Principaux contributeurs sédimentaires potentiels du Frayol

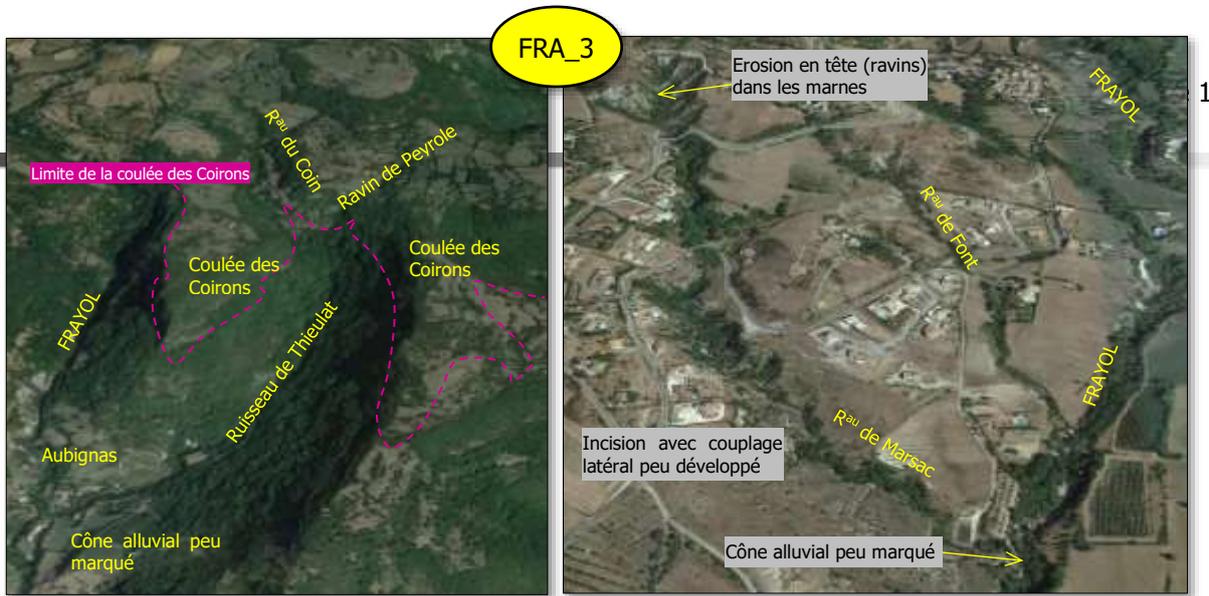


Figure 33 : Ruisseau de Thieulat contributeur basaltique faible (à gauche) et ruisseau de Marsac contributeur marneux peu important (à droite)

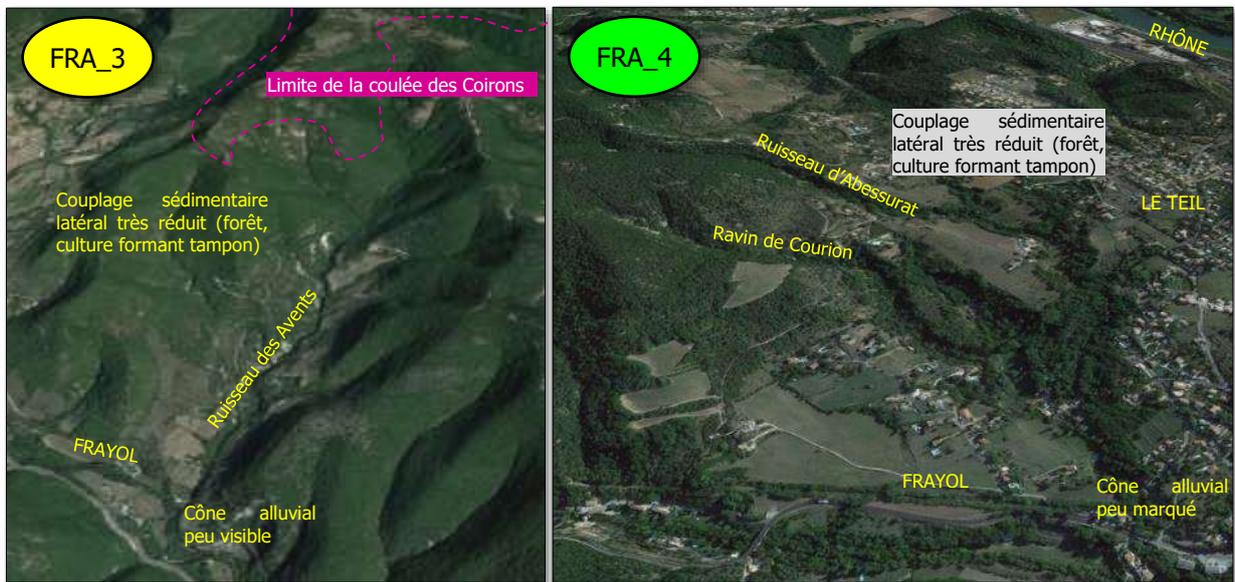


Figure 34 : Ruisseau des Avents présentant un faible couplage latéral (versants végétalisés et prairies) (à gauche) et ravin de Courion végétalisé sur son linéaire (faible couplage) (à droite)

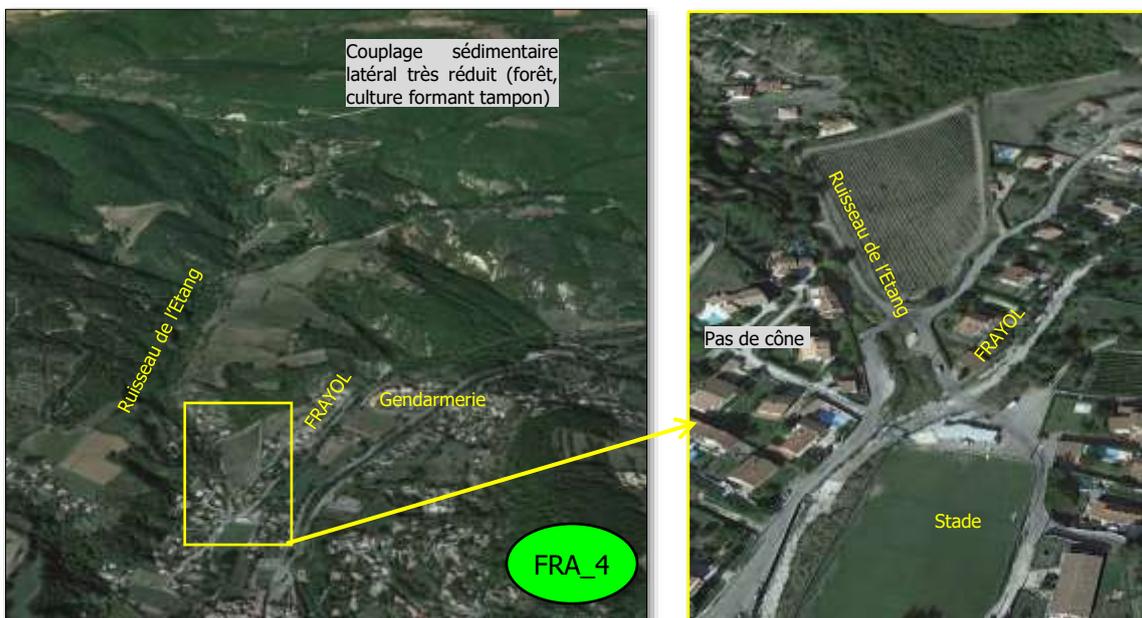


Figure 35 : Ruisseau de l'Étang, le couplage sédimentaire latéral et l'exutoire sans véritable cône de déjection construit montrent la faiblesse de ce contributeur sédimentaire.

## B Les apports solides internes

L'évaluation de l'état de la recharge sédimentaire prend également en compte les apports solides internes, c'est-à-dire les matériaux qui sont produits « directement » par le Frayol. Il s'agit principalement des matériaux issus de l'érosion latérale des berges ainsi que des matériaux stockés dans les structures alluvionnaires du lit mineur.

### ❖ Les surfaces d'érosion

Les érosions de berge traduisent l'activité morphogène et la mobilité latérale d'un cours d'eau. Elles se concentrent particulièrement dans les extradoss\* de méandre et sont alors des signes de migration de ces derniers avec dépôts de matériaux dans l'intradoss\*.

Les investigations de terrain ont permis de localiser les érosions de berge présentes sur le Frayol et mesurer leur surface comme indiqué sur la Figure 36. La superficie érodée cumulée par tronçon est présentée au Tableau 15.

SUPERFICIE ÉRODÉE DU FRAYOL				
Tronçon	Longueur [km]	Quantité	Surface cumulée [m <sup>2</sup> ]	Ratio kilométrique [m <sup>2</sup> /km]
FRA_1	1,7	0	0	0
FRA_2	3,3	1	13	4
FRA_3	6,0	8	367	61
FRA_4	3,3	29	2 133	652

Tableau 15 : Superficies de berge érodées du Frayol par tronçon

On observe un gradient amont → aval très net des surfaces d'érosion, c'est-à-dire une croissance des superficies érodées de l'amont vers l'aval.

Les parties amont et médiane du bassin versant (FRA\_1, FRA\_2 et FRA\_3) sont très peu sujettes au phénomène d'érosion latérale. En effet, comme vu précédemment, le Frayol est caractérisé par un style fluvial en gorges (FRA\_1 et FRA\_2), s'écoule majoritairement sur le substratum et est contraint latéralement par les falaises. Il présente donc logiquement peu, voire aucune, surface d'érosion.

On note toutefois deux importantes encoches d'érosion sur le tronçon FRA\_3 au niveau du hameau Les Combes cumulant à elles seules une surface érodée de 240 m<sup>2</sup>.

La partie aval du bassin versant correspondant au tronçon FRA\_4 est la plus affectée par le phénomène d'érosion latérale avec une superficie de berges érodées d'environ 2 130 m<sup>2</sup>.

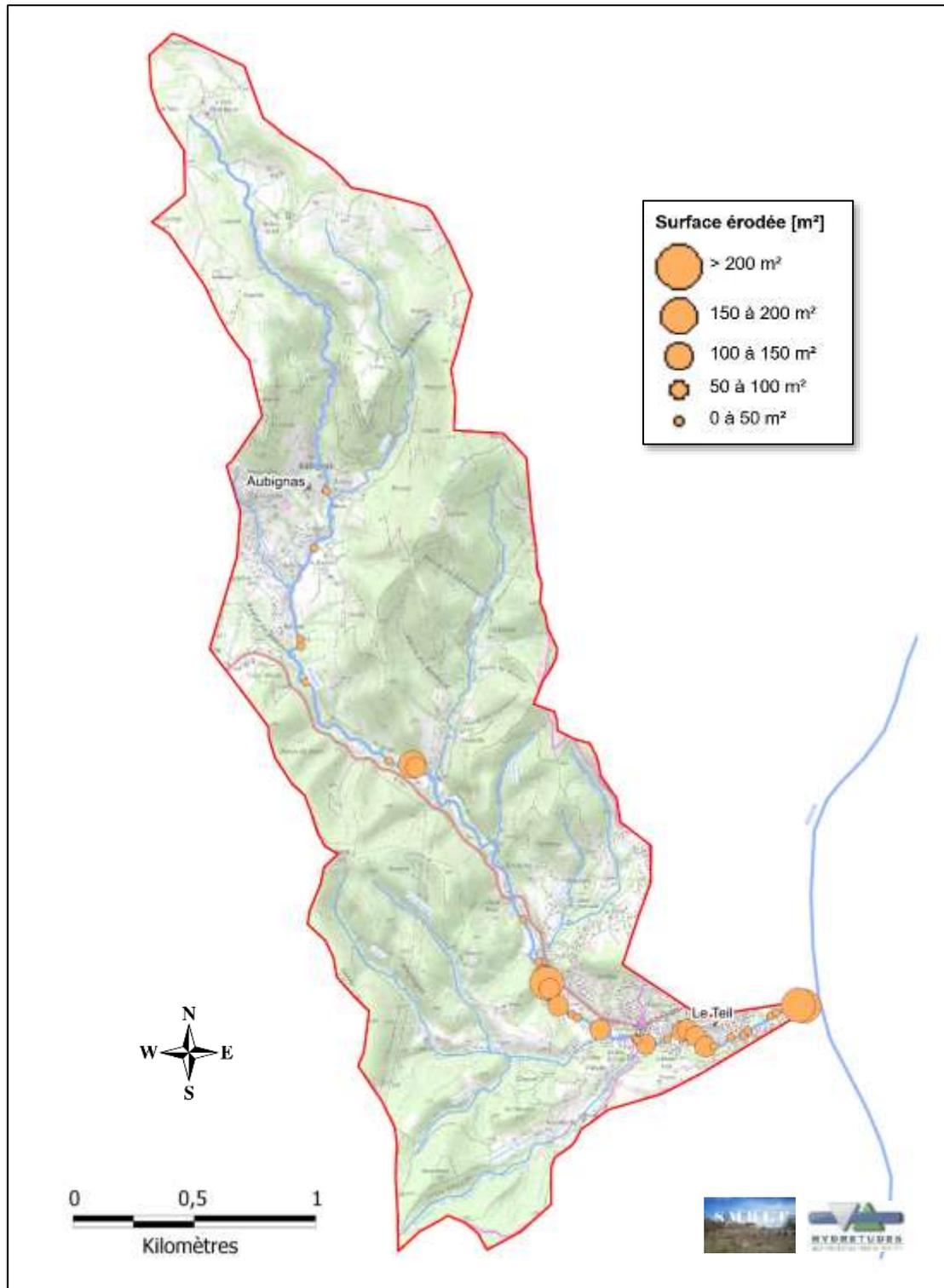


Figure 36 : Localisation des érosions de berge présentes sur le Frayol selon leur superficie



Figure 37 : Surfaces d'érosion présentes sur le Frayol au hameau Les Combes (a), en aval du pont Neuf (b) et au niveau de l'extrados du méandre à l'aval du pont de la Liberté

## ❖ Les structures alluvionnaires

**Principes et méthodologie****Structures alluvionnaires et stock alluvial**

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

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

Les structures alluvionnaires concernent les bancs ou atterrissements de galet, ainsi que les terrasses alluviales (*cf.* Encart 8).

Elles évoluent dans le temps en fonction de leur niveau de végétalisation. Ainsi, du dépôt originel jusqu'à leur évolution en île (pour les structures centrales) ou en terrasse (pour les structures latérales), leur végétation grandit et se densifie.

Cette évolution du niveau de végétalisation limite puis rend quasiment impossible la remobilisation des matériaux déposés initialement. Suivant leur stade d'évolution, elles participent donc plus ou moins au transit sédimentaire lors des crues morphogènes, et à terme ne représentent qu'un volume dans le stock alluvial, mobilisable éventuellement sous des conditions très spécifiques (crue Basse Fréquence Haute Magnitude\* de très faible occurrence).

Encart 8 : Les structures alluvionnaires

HYDRETTUES a codifié une typologie des stades

d'évolution des structures alluvionnaires en distinguant les structures latérales des structures centrales. Cette typologie définit des stades d'évolution allant de la naissance à la sénescence, intégrant la végétalisation et donc leur capacité de mobilisation lors des crues morphogènes (*cf.* Annexe 4).

Ainsi, la connaissance des structures alluvionnaires permet d'avoir une vision complète du stock alluvial et de sa dynamique à travers : le volume global de matériaux stockés en lit et le « volume utile » stocké en lit, c'est-à-dire le volume de matériaux potentiellement remobilisables lors d'une crue morphogène (matériaux situés dans des structures non ou faiblement végétalisées).

L'analyse des structures alluvionnaires du Frayol consiste à localiser et quantifier les volumes de matériaux stockés dans le lit mineur, et identifier leur degré de mobilité. Les investigations de terrain ont permis de recenser l'ensemble des structures alluvionnaires et d'effectuer des mesures, afin de disposer d'éléments précis sur chacune d'entre elles (position, surface, volume et stade d'évolution).

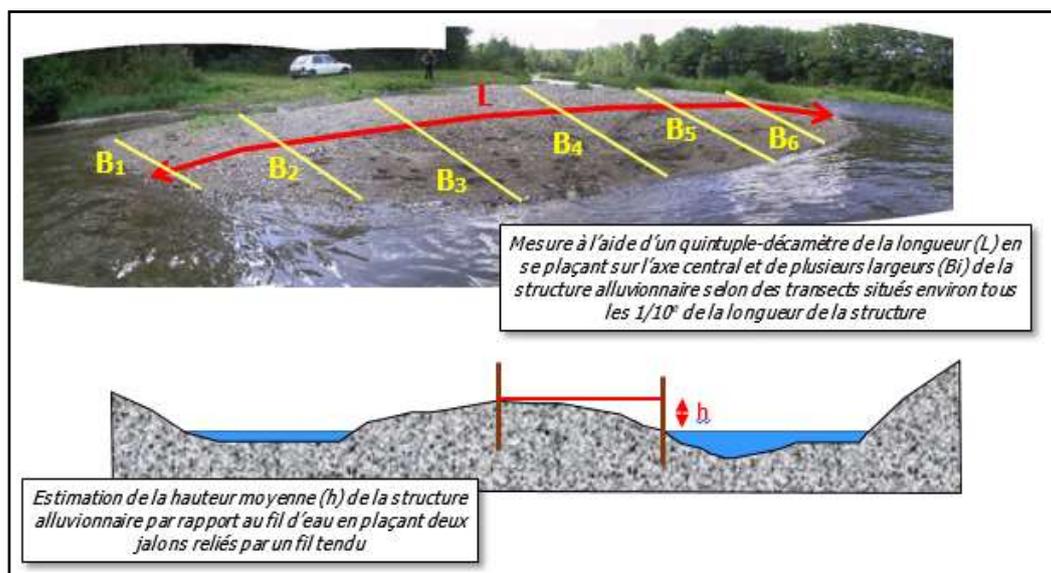


Figure 38 : Mesures effectuées sur les structures alluvionnaires

La Figure 39 présente l'ensemble des structures alluvionnaires identifiées sur le Frayol selon leur volume et leur degré de mobilité.

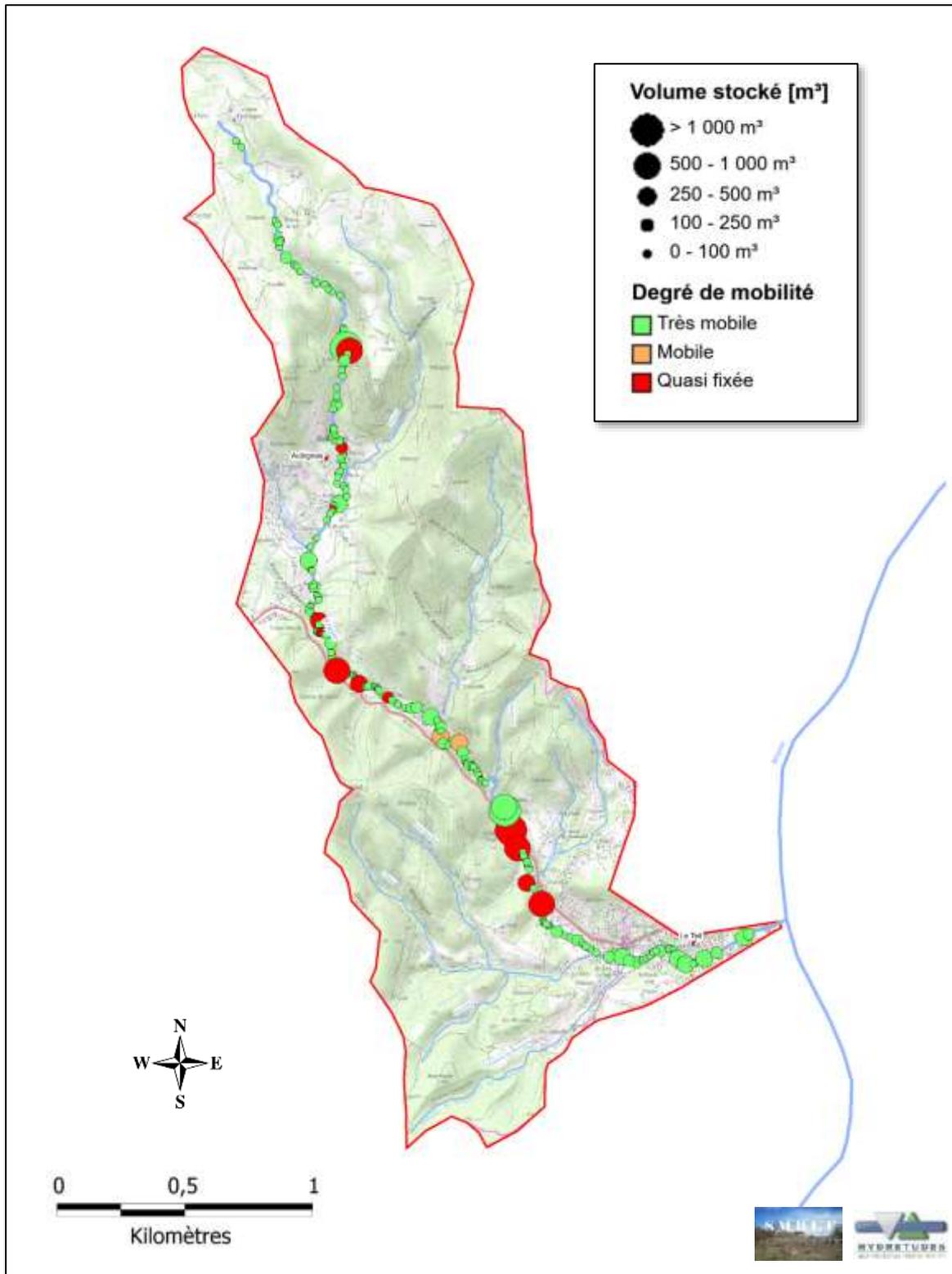


Figure 39 : Localisation des structures alluvionnaires du Frayol selon le volume stocké et leur degré de mobilité

### **Résultats : Les volumes stockés**

L'analyse des structures alluvionnaires montre un volume de matériaux stocké dans le Frayol de l'ordre de **21 000 m<sup>3</sup>** (cf. Tableau 16) réparties sur l'ensemble du linéaire dans **259 structures alluvionnaires**.

Le tronçon FRA\_3 stocke toutefois un volume de matériaux plus important de l'ordre de 11 000 m<sup>3</sup>, soit 55% du stock alluvial du Frayol. Ce stockage se fait dans un tronçon étroit après une partie torrentielle à forte pente, la pente passant ainsi de 8,3% à 2,5%.

Les structures alluvionnaires présentes sont nombreuses pour un volume total de matériaux relativement faible. Les structures alluvionnaires sont donc de faible volume et de faible taille (83 m<sup>3</sup> en moyenne par unité avec des ratios unitaires parfois très faibles par tronçon : FRA\_1 : 25 m<sup>3</sup> ; FRA\_2 : 76 m<sup>3</sup> ; FRA\_3 : 89 m<sup>3</sup> et FRA\_4 : 86 m<sup>3</sup>).

**Le stock alluvial du Frayol est donc modeste tant en volume qu'en taille.** À titre de comparaison, la moyenne unitaire en volume des structures alluvionnaires de l'Escoutay est de 1 965 m<sup>3</sup> et le ratio kilométrique de 27 950 m<sup>3</sup>/km contre 1 507 m<sup>3</sup>/km pour le Frayol.

STOCK ALLUVIAL DU FRAYOL PAR TRONCON					
Tronçon	Longueur [km]	Quantité	Volume cumulé [m <sup>3</sup> ] [%]		Ratio kilométrique [m <sup>3</sup> /km]
FRA_1	1,7	12	306	1%	183
FRA_2	3,3	50	3 789	18%	1 164
FRA_3	6,0	132	11 781	55%	1 952
FRA_4	3,3	65	5 572	26%	1 703
<b>Total</b>		<b>259</b>	<b>21 448</b>		<b>1 507</b>

Tableau 16 : Répartition des volumes de matériaux stockés dans le lit mineur du Frayol par tronçon

### **Résultats : La mobilité des volumes stockés**

Connaitre les volumes de matériaux stockés dans les structures alluvionnaires est un élément essentiel, mais n'est pas suffisant à lui seul pour appréhender la qualité du stock alluvial d'un cours d'eau. Cet élément doit ainsi être couplé à la mobilité des structures alluvionnaires représentative de l'activité sédimentaire, ce qui permettra de bâtir une stratégie de gestion des structures alluvionnaires adaptée au fonctionnement et à l'évolution dynamiques du cours d'eau.

La caractérisation des 259 structures alluvionnaires selon la typologie des stades d'évolution développée par HYDRETTUDES montre que le stock alluvial du Frayol se répartit principalement entre les stades naissance-adolescence (1 et 2) et sénescents (4), le stade intermédiaire (3) étant quasiment inexistant (cf. Figure 40).

Ainsi, 93% des structures alluvionnaires identifiées présentent un stade d'évolution qui n'est pas suffisamment avancé pour qu'elles soient fixées (stades de 1 à 2), 2% avec un stade intermédiaire (SL3 et SC3) risquant à court terme d'évoluer vers un stade supérieur (stade 4), et 5% avec un stade sénescents (SL4 et SC4), c'est-à-dire quasiment fixées et présentant une strate arborée pourvoyeuse d'embâcles pour le cours d'eau.

La végétalisation du stock alluvial est donc relativement limitée, notamment pour les structures centrales, et globalement caractéristique d'une bonne capacité de remobilisation des structures alluvionnaires.

Il convient de rappeler que ce niveau de végétalisation évolue avec le temps et en particulier en fonction des crues morphogènes qui rajeunissent la bande active. Lors des périodes inter-crues, la bande active

a donc tendance à se végétaliser et à limiter la mobilité des structures. Il est donc important que cette mobilité soit conservée pour éviter de fixer les bancs alluvionnaires, ce qui aurait une incidence forte sur la morphologie du lit et le transit sédimentaire.

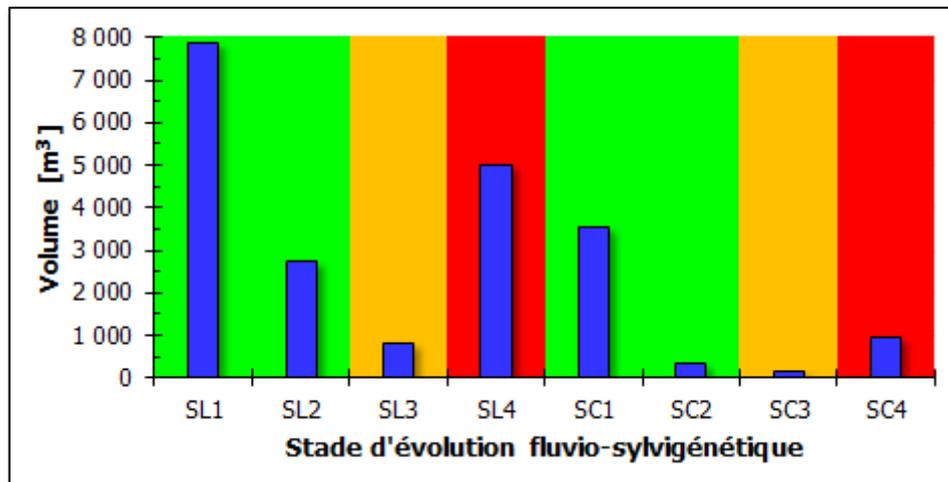


Figure 40 : Répartition du stock alluvial du Frayol par stade d'évolution  
En vert : très mobile ; en orange : mobile et en rouge : quasi fixée

L'analyse du degré de mobilité du stock alluvial par tronçon (cf. Figure 41) montre également que pour chaque tronçon du Frayol ce sont les structures alluvionnaires très mobiles qui dominent (stades 1 à 2), mais qu'il existe néanmoins des structures alluvionnaires quasi fixées.

Il convient de noter que le tronçon FRA\_3, intégrant 55% du stock alluvial du Frayol (11 781 m<sup>3</sup>), présente 35% de ses structures alluvionnaires (4 128 m<sup>3</sup>) qui sont quasi fixées (stade 4), moins de 60% des structures alluvionnaires seraient facilement mobilisables en cas de crue morphogène. Ce pourcentage relativement important de structures quasi fixées montre que le stock alluvial est en cours de fixation dans ce tronçon.

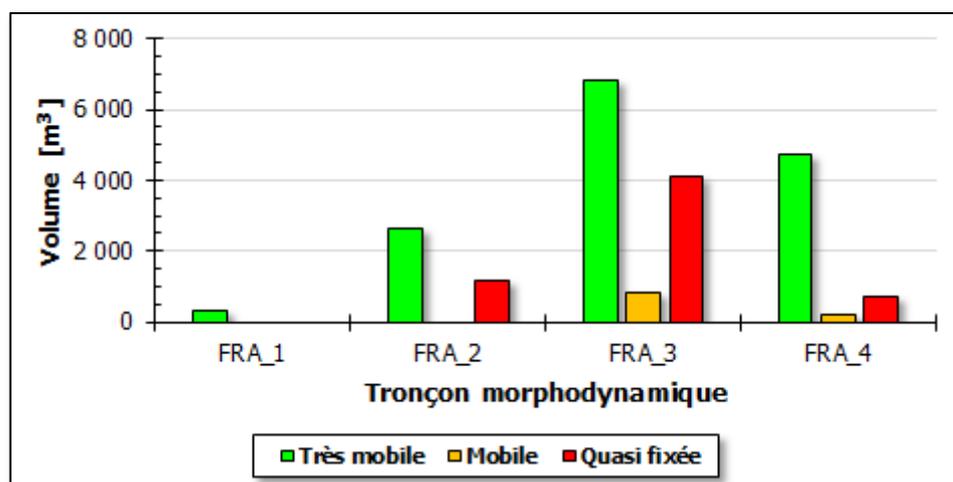


Figure 41 : Répartition du stock alluvial par tronçon et par degré de mobilité

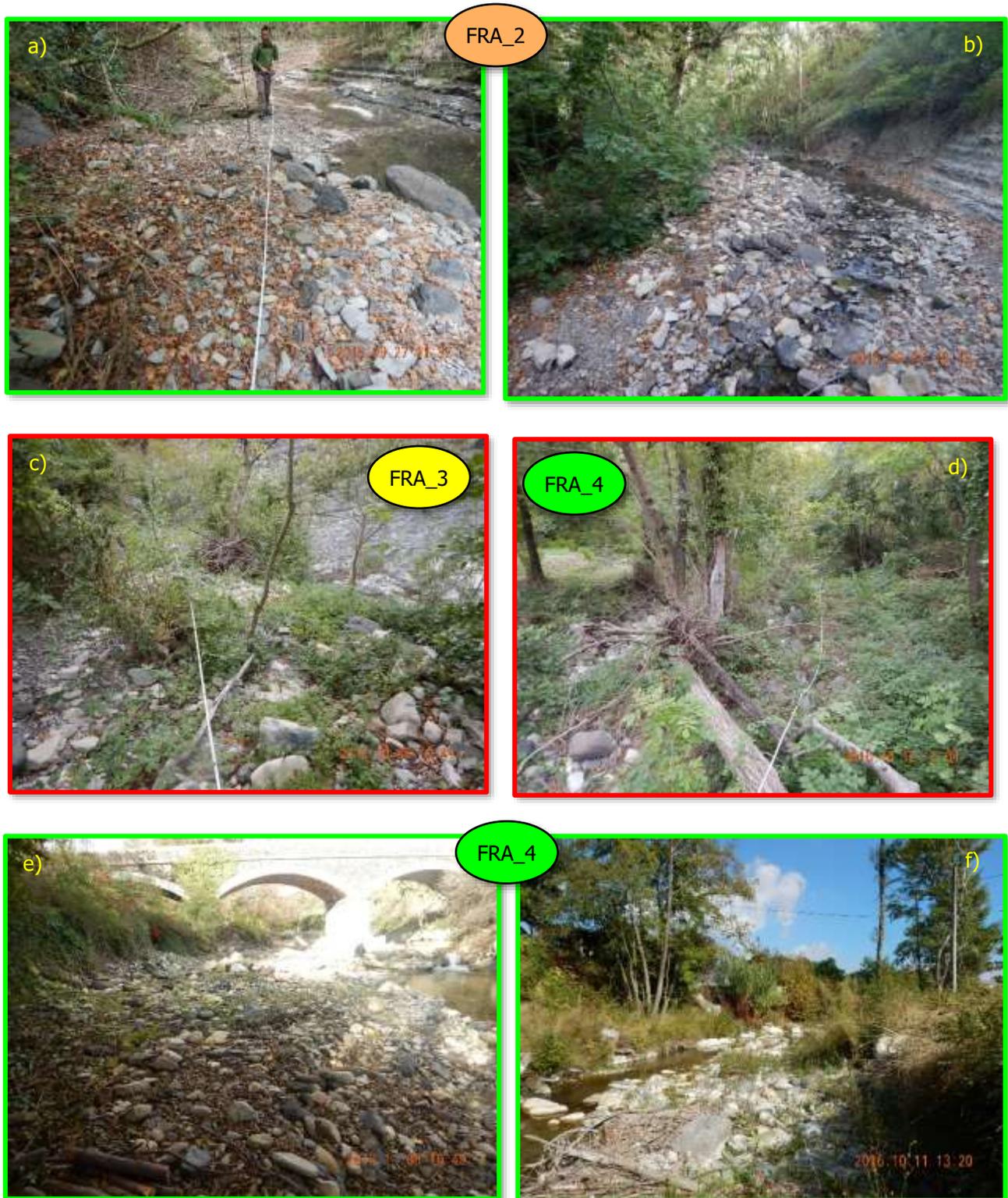


Figure 42 : Structures alluvionnaires présentes sur le Frayol et caractérisées par des degrés de mobilité différents  
 (a) (b) En intrados de méandre en amont proche d'Aubignas ; (c) Au droit du lieu-dit Devois de Joviac ;  
 (d) En amont de la gendarmerie du Teil ; (e) En aval du pont de la Liberté ; (f) En amont du pont à créneaux  
 En vert : très mobile ; en orange : mobile et en rouge : quasi fixée

## 6.2 Capacité de charriage du Frayol

### A Objectifs et méthodologie

Il s'agit ici de déterminer la capacité théorique annuelle de charriage du Frayol, c'est-à-dire le volume de matériaux potentiellement transportés par an.

Les calculs sont effectués en appliquant la formule de transport solide de **Recking (2013)** en raison de sa plage de validité étendue aux pentes (0,01%-7%) et à la granulométrie (0,5-600 mm) adaptée au bassin versant du Frayol et permettant l'utilisation d'une seule et même formule sur l'ensemble du linéaire d'étude.

Par ailleurs, cette formule permet de prendre en compte l'étendue granulométrique du substrat du lit et donc l'existence d'un transport partiel. En effet, la plupart des formules ne considèrent le transport qu'en relation avec la mobilité d'un diamètre caractéristique unique lié à une valeur unique de débit de mise en mouvement ( $Q_0$ ) (*e.g.* diamètre moyen pour la formule de Lefort). Autrement dit, lorsque le débit liquide est inférieur à  $Q_0$ , le transport est nul et  $Q_0$  est donc un seuil pour tout le mélange sédimentaire réduit à un diamètre médian unique (donc une granulométrie uniforme).

Or, sur des granulométries étendues, même les plus faibles débits peuvent être associés à un transport de sédiments. La formule de Recking (2013) intègre ce phénomène en considérant les deux phases du transport solide : (1) la mobilité partielle représentant un seuil à la fraction grossière uniquement, une partie des granulométries en présence est tout de même transportée, (2) et la mobilité totale, tous les sédiments composant le lit sont transportés.

Ainsi, la formule de Recking (2013) apparaît pertinente et plus adaptée à la réalité des cours d'eau présentant généralement une granulométrie étendue, comme c'est le cas sur le Frayol.

Toutefois, il convient de noter que la principale difficulté réside dans les **paramètres d'entrée** nécessaires à l'application de la formule, notamment la pente, la granulométrie ( $d_{50}$ ,  $d_{84}$ ), la largeur active du transport solide et le débit. Les calculs sont donc menés **à l'échelle des tronçons**, pour lesquels les paramètres d'entrée sont considérés constants.

### B Les données granulométriques

Les données granulométriques proviennent des mesures granulométriques réalisées directement sur le substrat du lit à l'exutoire des quatre tronçons du Frayol selon le protocole développé à HYDRETTUES disponible en [Annexe 5](#). Le Tableau 17 présente les diamètres caractéristiques issus des analyses granulométriques et dont certains ( $d_{50}$  et  $d_{84}$ ) sont nécessaires à l'application de la formule de Recking (2013).

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TRONCON								
Sous bassin versant	Diamètres caractéristiques [mm]					Étendue granulométrique		Matériaux basaltiques <sup>b</sup> [%]
	$d_{30}$	$d_{50}$	$d_{84}$	$d_{90}$	$d_m^a$	$d_{90}/d_{30}$	$d_{84}/d_{50}$	
FRA_1	58,17	70,91	96,16	101,14	72,72	1,7	1,4	62%
FRA_2	47,88	65,90	85,54	92,98	66,34	1,9	1,3	29%
FRA_3	52,52	61,03	81,35	88,00	65,44	1,7	1,3	19%
FRA_4	34,42	42,58	58,11	60,92	42,97	1,8	1,4	11%

<sup>(a)</sup> $d_m$  représente le diamètre moyen arithmétique ; <sup>(b)</sup>le pourcentage de matériaux basaltiques dans l'échantillon prélevé

Tableau 17 : Synthèse granulométrique du Frayol par tronçon

Globalement, on peut considérer qu'il existe un gradient granulométrique, c'est-à-dire une décroissance du diamètre de l'amont vers l'aval.

Les analyses granulométriques ont également mis en évidence la présence de matériaux basaltiques sur l'ensemble du linéaire du Frayol, notamment dans le tronçon FRA\_1 (cf. Figure 43), tronçon le plus proche de la coulée basaltique. Les matériaux en lit sont toutefois souvent de forte taille et relativement émoussés (cf. Figure 44). Le basalte est une roche dure, difficilement érodable et qui met du temps à s'émousser. Il semble donc que le renouvellement du stock alluvial par érosion (processus fluvial, météorique, gélifraction\*) de la coulée basaltique soit très limité.

La granulométrie du tronçon FRA\_3 montre encore des matériaux grossiers ( $d_{50} = 61$  mm) et un pourcentage de matériaux basaltiques proche de 20%, la pente de ce tronçon est encore élevée (2,5%), tandis qu'à l'aval (FRA\_4) la granulométrie est moins grossière ( $d_{50} = 42,58$  mm) et la proportion de basalte limitée (11%). Même si ce dernier tronçon présente encore une pente importante (1,6%), l'armure du lit moins grossière laisse penser que le tronçon FRA\_4 favorise le dépôt des matériaux les plus grossiers par tri granulométrique.

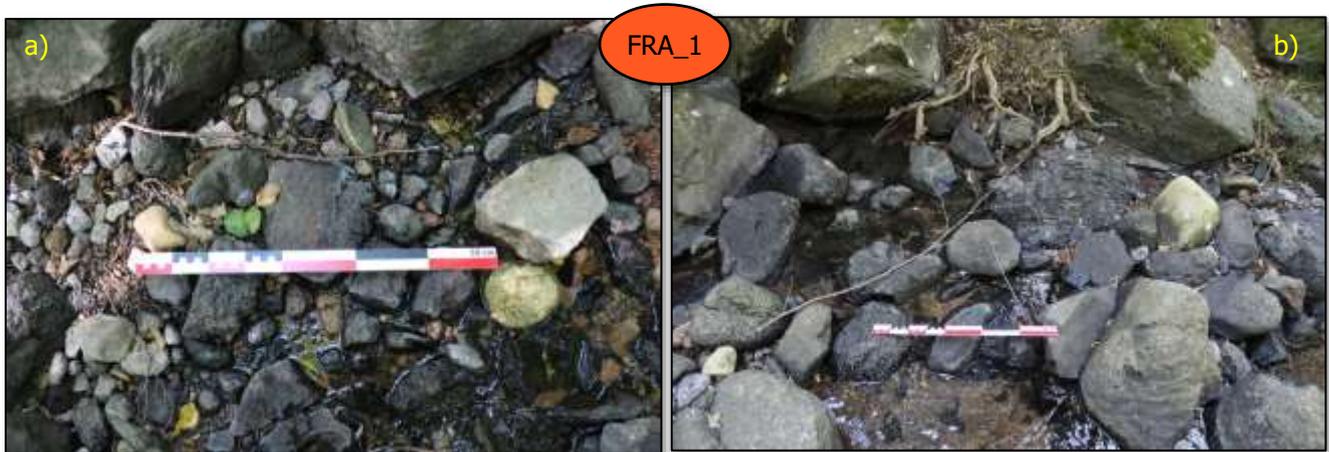


Figure 43 : Granulométrie du lit du tronçon FRA\_1. (a) Mélange de matériaux basaltiques et de matériaux marneux et calcaires issus des marnes supérieures de Valvignères incisées par la tête du Frayol entre la Borie d'Entraigues et le Bois Val et (b) matériaux basaltiques aux contours émoussés témoin de leur présence ancienne dans le stock alluvial

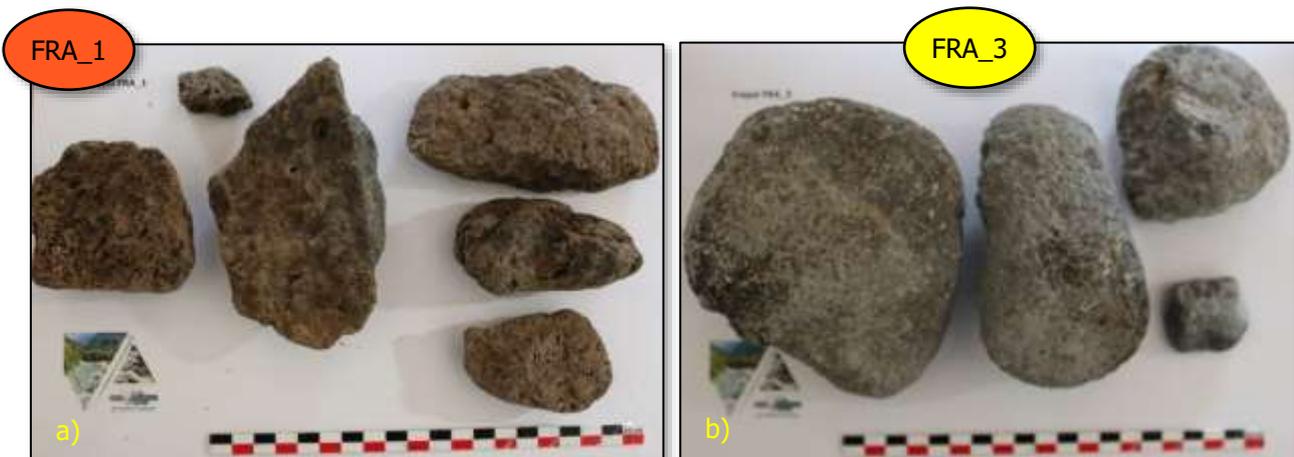


Figure 44 : Exemples de matériaux basaltiques. (a) Sur le tronçon FRA\_1, les matériaux sont pour certains encore anguleux mais globalement déjà émoussés et (b) sur le tronçon FRA\_3, suite au processus de transport fluvial, les matériaux basaltiques sont émoussés (mire photographique de 20 cm)

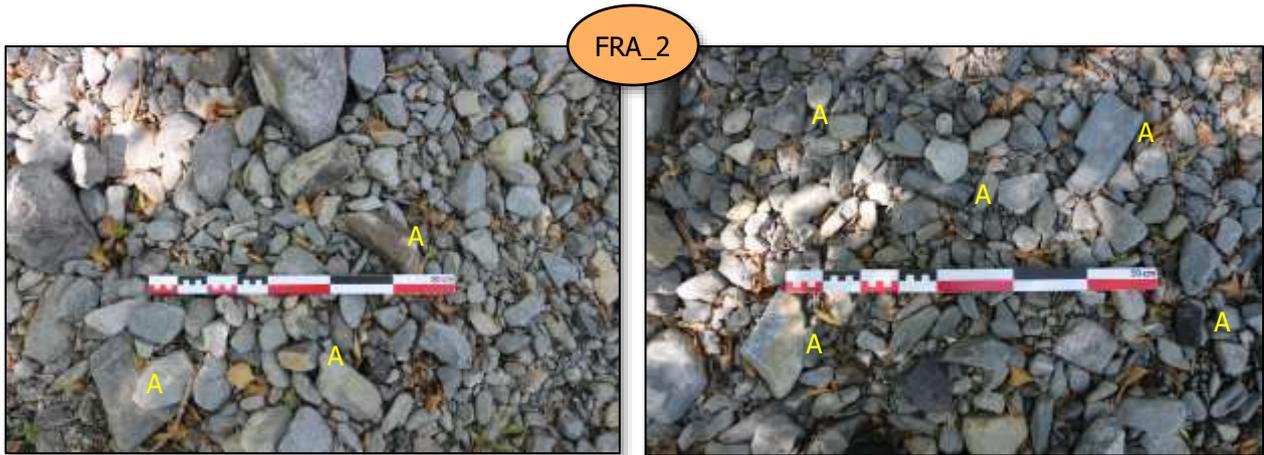


Figure 45 : Matériaux du lit du Frayol dans le tronçon FRA\_2 (partie exondée). Beaucoup de matériaux apparaissent émoussés, rares sont les matériaux encore anguleux (notés A)

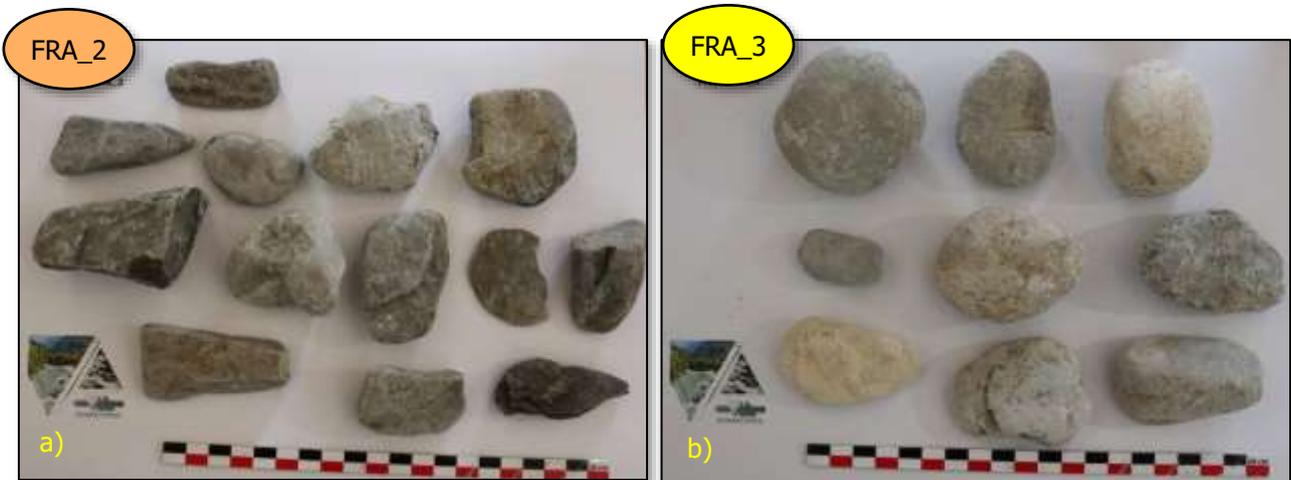


Figure 46 : Exemple de matériaux prélevés dans l'échantillon (a) du tronçon FRA\_2 montrant quelques matériaux anguleux mais en cours d'émoussage et (b) du tronçon FRA\_3 où la majorité des grains du lit sont émoussés (mire photographique de 20 cm)

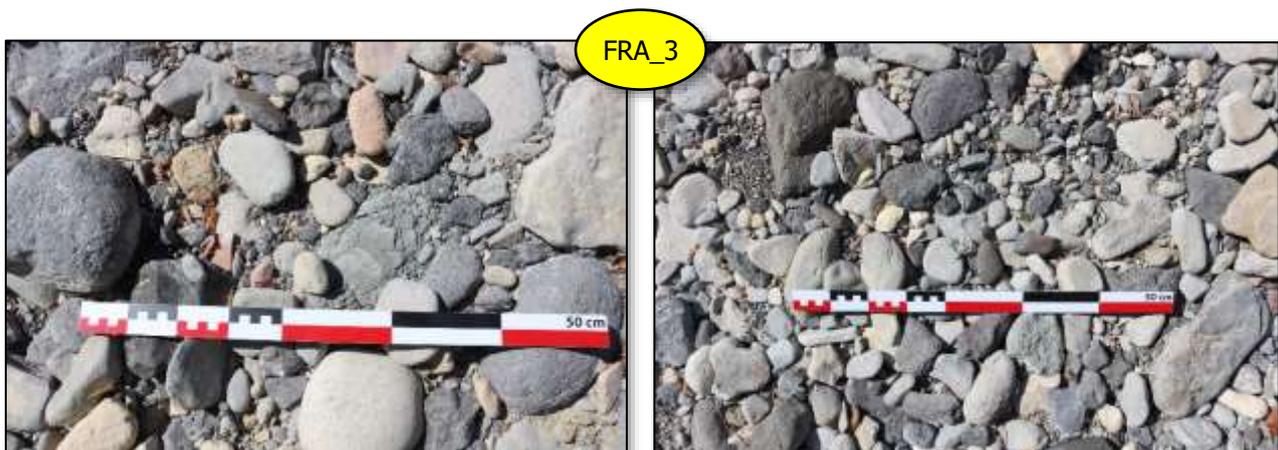


Figure 47 : Matériaux du lit du Frayol sur le tronçon FRA\_3. Les matériaux sont quasiment tous émoussés ce qui indique qu'ils sont dans le stock alluvial depuis très longtemps et que la recharge sédimentaire est inefficace.

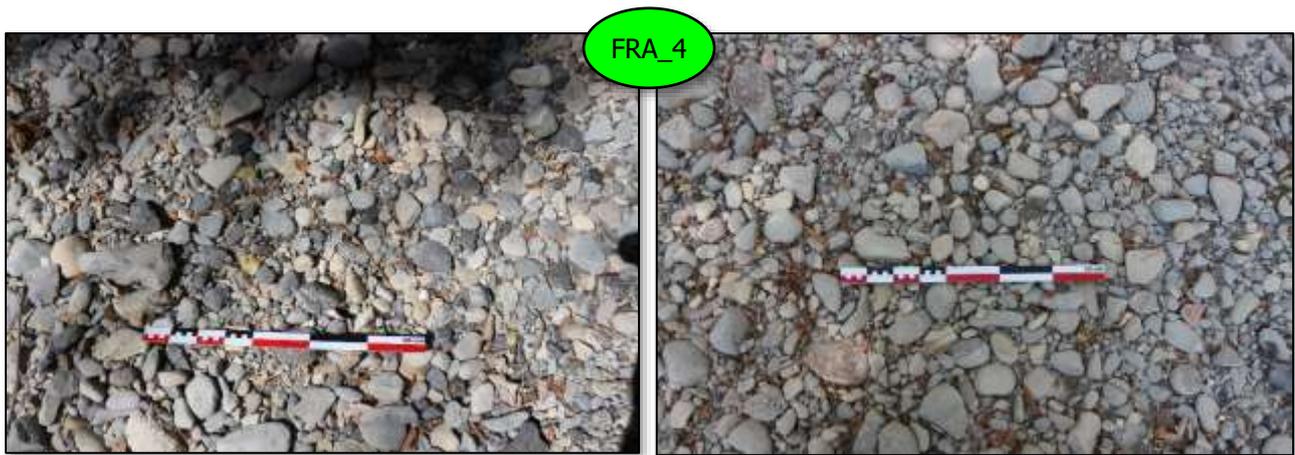


Figure 48 : Armure du lit du Frayol (en assec) sur le tronçon FRA\_4 montrant des matériaux de faible taille et fortement émoussés

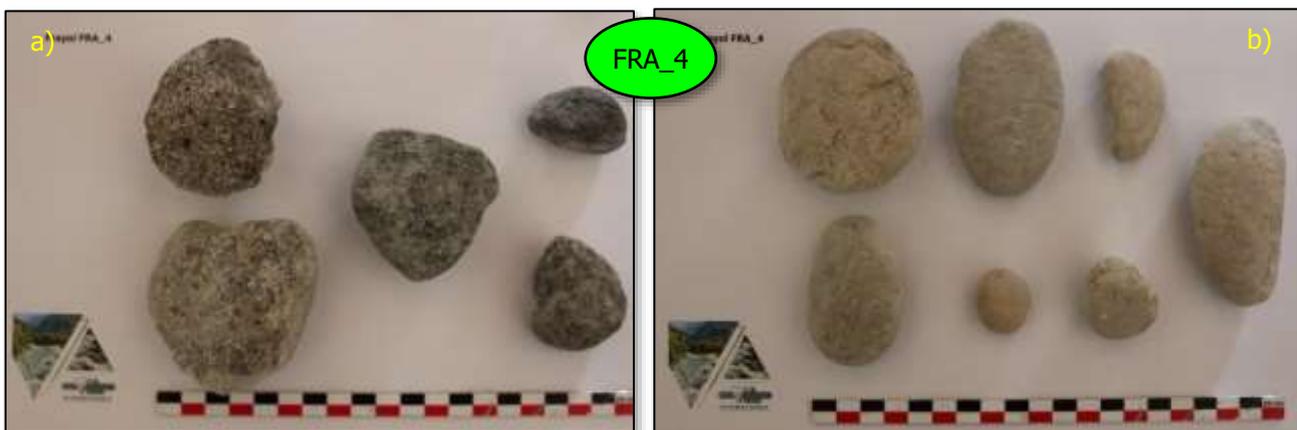


Figure 49 : Exemple de matériaux prélevés dans l'échantillon du tronçon FRA\_4 montrant (a) des grains basaltiques émoussés et (b) des grains marneux émoussés (mire photographique de 20 cm)

Compte tenu de la géologie du bassin versant et donc de la nature des matériaux susceptibles de recharger le Frayol, la densité des matériaux retenue varie entre 2,2 (FRA\_2) et 2,4 (FRA\_1, FRA\_3 et FRA\_4).

### C Les données hydrauliques

Les données hydrauliques concernent deux paramètres :

- La **pente** : elle est calculée pour chaque tronçon à partir du profil en long 2016 levé par HYDRETTUDES dans le cadre de la présente étude ;
- La **largeur** d'écoulement : elle est déterminée à partir des profils en travers 2016 et correspond à la largeur moyenne du fond du lit, supposant que la totalité du fond du lit participe au transport solide et ce, quel que soit le débit.

PARAMÈTRES HYDRAULIQUES		
Tronçon	Pente [%]	Largeur moyenne [m]
FRA_1	5,0%	1,0
FRA_2	8,3%	3,0
FRA_3	2,5%	6,0
FRA_4	1,6%	10,0

Tableau 18 : Paramètres d'entrée hydrauliques retenus

## D Les données hydrologiques

Les données hydrologiques utilisées sont les courbes de débits classés. La courbe des débits classés représente le nombre de jours durant lesquels la valeur du débit moyen journalier a été atteinte ou dépassée. Cette courbe est essentielle pour mener à bien les calculs de transport solide. En effet, elle permet de définir la relation liant les débits solides aux débits liquides et d'obtenir ainsi la courbe des débits solides classés en différents nœuds du bassin versant, et donc le volume annuel de matériaux potentiellement charriés par le cours d'eau.

Le Frayol n'étant pas jaugé, la courbe de débits classés pour chacun des nœuds de calculs du bassin versant (exutoire des quatre tronçons) est déterminée à partir des données disponibles à une station hydrométrique de référence. La méthode employée consiste ainsi à :

- Exporter depuis la Banque Hydro les chroniques de débits journaliers mesurées à la station de référence ;
- Construire la courbe de débits classés pour la station de référence à partir de ces données (méthode globale sur une longue période) ;
- Extrapoler les courbes de débits classés de la station de référence aux nœuds de calculs par transposition des bassins versants.

### ❖ *Choix de la station de référence*

Il existe différents bassins versants jaugés à proximité du bassin versant du Frayol, tels que la Cèze, l'Ardèche et l'Ouvèze. Toutefois, le bassin versant de la Cèze présente un comportement hydroclimatique et hydrologique similaire à celui du Frayol : absence d'ouvrages hydrauliques influençant le régime hydrologique contrairement à l'Ardèche par exemple, présence d'assecs non observés sur l'Ouvèze... On retient donc le bassin versant jaugé de la Cèze, en particulier la station de la Cèze à Bessèges comme station de référence.

### ❖ *Courbe de débits classés à la station de référence*

L'analyse des chroniques de débits journaliers observés sur la Cèze à Bessèges montre qu'il s'agit d'une chronique suffisamment longue pour être exploitée et construire les courbes de débits classés, et ce malgré quelques années où des données sont indisponibles.

DONNÉES EXPLOITÉES À LA STATION DE RÉFÉRENCE				
Station de référence	Superficie [km <sup>2</sup> ]	Type de chronique	Période disponible	Années indisponibles
La Cèze à Bessèges	230	Qjm*	[1980-2011]	1989 ; 1990 2001 ; 2002

(\*) Qjm : Débits journaliers moyens

Tableau 19 : Synthèse des données exploitées

La courbe des débits classés pour la station de référence est construite par analyse fréquentielle de l'ensemble des valeurs journalières. Les débits journaliers observés sur les N jours traités sont classés par ordre décroissant et affectés d'un rang i allant de 1 à N. Pour un débit  $Q_i$ , la fréquence de dépassement ( $F_{q_i}$ ) exprimée en nombre de jour par an est alors calculée par la relation suivante :

$$F_{q_i} = \frac{i}{N} \cdot 365$$

DÉBITS CLASSÉS	
Fréquence de dépassement [jour/an]	Débit [m <sup>3</sup> /s]
365	0,0
361	0,11
358	0,21
347	0,39
329	0,60
292	0,92
256	1,30
219	1,87
183	2,97
146	4,55
110	7,42
73	14,6
37	36,1
18	68,6
7	153,0
4	206,0
2	276,0
0,365	407,0
0,037	539,0

Tableau 20 : Courbe des débits classés de la Cèze à Bessèges calculée sur 28 047 données

## E Extrapolation aux sous bassins versants

Les courbes de débits classés à l'exutoire des quatre tronçons du Frayol sont déterminées en extrapolant celles obtenues aux stations de référence selon la relation de Meyer :

$$Q_{BV1} = \frac{S_{BV1}}{S_{BV0}} \cdot Q_{BV0}$$

Avec :

Q – Débit en m<sup>3</sup>/s

S – Superficie du bassin versant en km<sup>2</sup>

L'indice BV0 se rapporte au bassin versant de référence.

L'indice BV1 se rapporte au bassin versant dont on recherche le débit : 2,1 km<sup>2</sup> pour le tronçon FRA\_1, 7,5 km<sup>2</sup> pour FRA\_2, 19,5 km<sup>2</sup> pour FRA\_3 et 26,6 km<sup>2</sup> pour FRA\_4.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 21 et les courbes de débits classés à l'exutoire des tronçons à la Figure 50.

DÉBITS CLASSÉS EXTRAPOLÉS AU FRAYOL				
Fréquence de dépassement [jour/an]	Débit [m <sup>3</sup> /s]			
	FRA_1	FRA_2	FRA_3	FRA_4
365	0,00	0,00	0,00	0,00
361	0,00	0,00	0,01	0,01
358	0,00	0,01	0,02	0,02
347	0,00	0,01	0,03	0,05
329	0,01	0,02	0,05	0,07
292	0,01	0,03	0,08	0,11
256	0,01	0,04	0,11	0,15
219	0,02	0,06	0,16	0,22
183	0,03	0,10	0,25	0,34
146	0,04	0,15	0,39	0,53
110	0,07	0,24	0,63	0,86
73	0,14	0,48	1,24	1,69
37	0,33	1,17	3,06	4,17
18	0,64	2,23	5,81	7,93
7	1,42	4,98	12,97	17,68
4	1,91	6,70	17,46	23,81
2	2,56	8,98	23,39	31,90
0,365	3,78	13,24	34,49	47,04
0,037	5,00	17,54	45,68	62,29

Tableau 21 : Débits classés extrapolés au Frayol

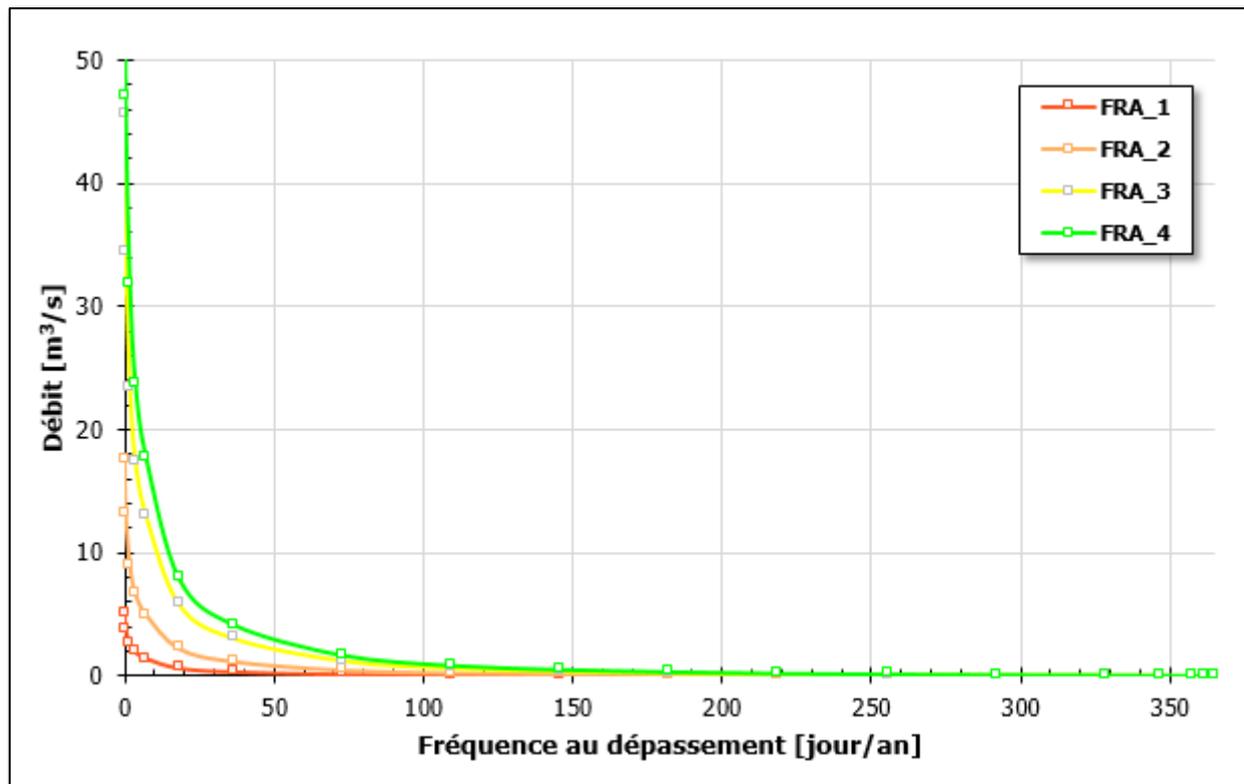


Figure 50 : Courbe des débits classés à l'exutoire des tronçons du Frayol

## F Résultats : capacité de charriage annuelle théorique

L'analyse des résultats obtenus par l'application de la formule de Recking (2013) montre que la partie amont du bassin versant (FRA\_1) présente une capacité annuelle de charriage relativement faible de l'ordre de 70 m<sup>3</sup>/an, du fait de la petite taille du bassin (2,1 km<sup>2</sup>) qui génère une hydrologie peu marquée malgré la forte pente.

La capacité de transport des tronçons FRA\_2, FRA\_3 et FRA\_4 est plus importante, avec un volume de matériaux potentiellement transportés de l'ordre de 15 000 à 22 000 m<sup>3</sup>/an. La capacité de charriage du tronçon FRA\_4 est la plus élevée, du fait d'une granulométrie moins grossière que celle présentes sur les autres tronçons. Cette granulométrie « fine » est donc plus facilement et rapidement mise en mouvement.

VOLUME DE MATÉRIAUX POTENTIELLEMENT CHARRIÉS PAR AN (RECKING, 2013)						
Tronçon	d <sub>50</sub> [mm]	d <sub>84</sub> [mm]	Pente [%]	Largeur moyenne [m]	Densité des matériaux [-]	Volume [m <sup>3</sup> /an]
FRA_1	70,91	96,16	5,0%	1,0	2,4	70
FRA_2	65,90	85,54	8,3%	3,0	2,2	21 570
FRA_3	61,03	81,35	2,5%	6,0	2,4	15 850
FRA_4	42,58	58,11	1,6%	10,0	2,4	22 850

Figure 51 : Capacité théorique annuelle de charriage par tronçon

Il convient toutefois d'interpréter les valeurs théoriques obtenues avec circonspection, en faisant notamment le lien avec les investigations de terrain et l'approche hydromorphologique.

En effet, comme vu précédemment, la trajectoire géomorphologique du Frayol est sous influence directe des modifications climatiques (sortie du Petit Âge Glaciaire) et des forçages anthropiques (extractions de matériaux...), conduisant à une baisse de la fourniture sédimentaire. Dans le contexte de déficit de fourniture sédimentaire que l'on connaît donc actuellement, la formule tend à **surestimer le transport solide**, et ce d'autant plus que le Frayol présente un profil en long compartimenté par des perturbateurs géomorphologiques majeurs (cascades plurimétriques et seuils anthropiques) plus ou moins atterris, bloquant partiellement, voire totalement, la charge grossière.

De plus, quelle que soit la pertinence de la formule utilisée, la qualité des résultats reste liée à la **qualité des données d'entrée**, en particulier :

- **L'hydrologie** : les calculs s'appuient sur les courbes de débits liquides classés extrapolées à partir de celle de la Cèze à Bessègue. Il est bien évident que des débits mesurés sur le Frayol à une station de jaugeage serait moins sujet à erreurs ;
- **La largeur d'écoulement** : les calculs reposent sur la largeur moyenne du fond du lit, et ce quel que soit le débit. Or, cette largeur d'écoulement peut être différente de la largeur active, c'est-à-dire la portion du lit qui participe réellement au transport solide, même si l'on considère que les deux largeurs sont similaires en crue.

Ainsi, pour préciser et affermir la connaissance sur la capacité de charriage du Frayol, il est essentiel de coupler les approches calculatoire et hydromorphologique avec des mesures de terrain (approche métrologique). C'est l'objectif du **suivi dynamique** qui sera proposé dans le cadre du plan de gestion.

### 6.3 Bilan sédimentaire semi-quantitatif du Frayol

À partir de l'ensemble des éléments analysés et exposés ci-avant, il est possible d'établir le bilan sédimentaire semi quantitatif du Frayol, qui détaille les principaux éléments permettant de comprendre le fonctionnement dynamique du cours d'eau (cf. Figure 52).

Chaque tronçon hydromorphologique issu de la sectorisation est présenté sous la forme d'un parallélépipède, c'est-à-dire un **compartiment sédimentaire** à fonctionnement propre (*i.e.* à bilan sédimentaire propre) caractérisé par :

- Son positionnement en termes de « grands domaines » du transit sédimentaire, basé sur la description de Sear & Newson (1993) : production, transfert ou accumulation ;
- Ses caractéristiques morphométriques : longueur (L), pente (I), sinuosité (S) ;
- Son style fluvial ;
- Son état hydrosédimentaire : incision, stabilité, exhaussement ;
- L'état de sa recharge sédimentaire : connexion versant-lit, contributeurs sédimentaires potentiels, érosion latérale, stock alluvial... (approche hydromorphologique) ;
- Sa capacité de charriage annuelle (approche calculatoire) ;
- Les freins à sa compétence au transport solide et à sa divagation latérale : perturbateurs hydromorphologiques compartimentant le lit, corsetage du lit limitant l'érosion latérale...

**FRA\_1**

L = 1,7 km  
 I = 5%  
 S = 1,07  
 Style : Gorges  
 Incision : Néant  
 Connexion versant-lit : Faible  
 Perturbateurs majeurs : 1  
 Corsetage anthropique : 0%  
 Corsetage naturel : 0%  
 Contribueurs séd. : Aucun  
 Érosion latérale : 0 m<sup>2</sup>/km  
 Stock alluvial : 306 m<sup>3</sup>  
 Volume potentiel charrié : 70 m<sup>3</sup>/an

**FRA\_2**

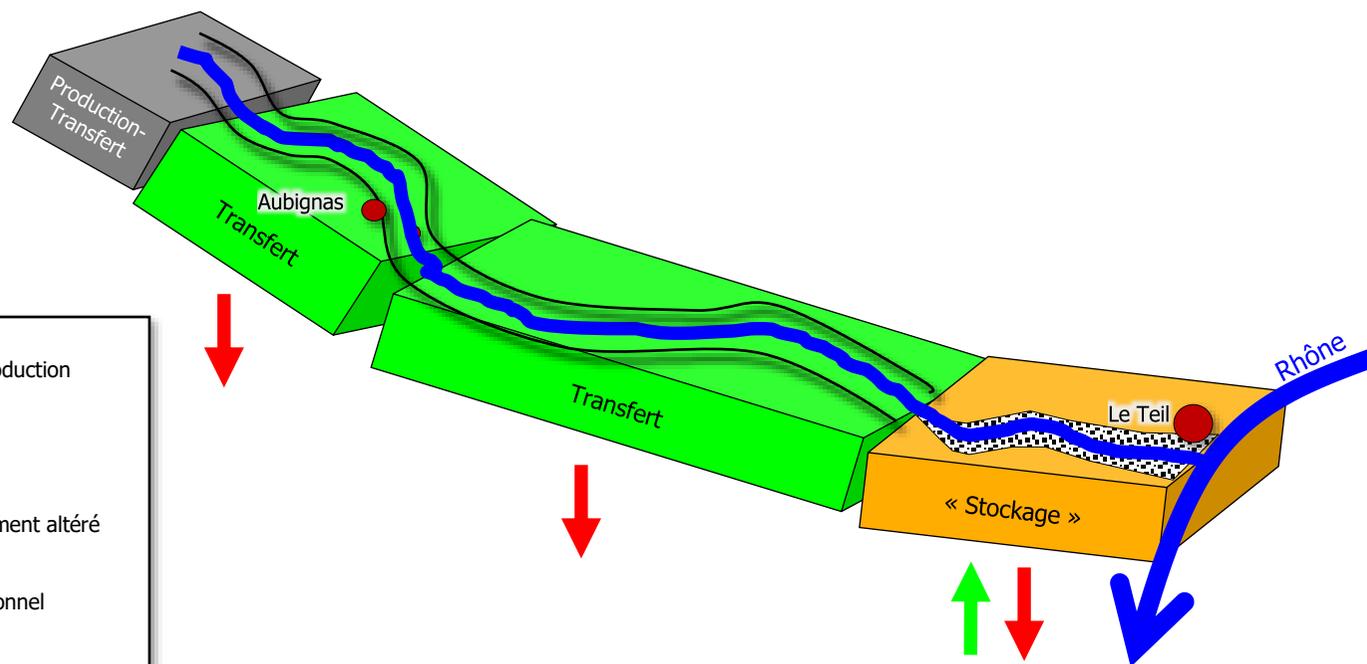
L = 3,3 km  
 I = 8%  
 S = 1,19  
 Style : Gorges  
 Incision : Néant  
 Connexion versant-lit : Faible  
 Perturbateurs majeurs : 5  
 Corsetage anthropique : 5%  
 Corsetage naturel : 70%  
 Contribueurs séd. : Aucun  
 Érosion latérale : 4 m<sup>2</sup>/km  
 Stock alluvial : 3 790 m<sup>3</sup>  
 Volume potentiel charrié : 21 570 m<sup>3</sup>/an

**FRA\_3**

L = 6,0 km  
 I = 2,5%  
 S = 1,16  
 Style : Gorges  
 Incision : Néant  
 Connexion versant-lit : Faible  
 Perturbateurs majeurs : 11  
 Corsetage anthropique : 10%  
 Corsetage naturel : 60%  
 Contribueurs séd. : Aucun  
 Érosion latérale : 61 m<sup>2</sup>/km  
 Stock alluvial : 11 780 m<sup>3</sup>  
 Volume potentiel charrié : 15 850 m<sup>3</sup>/an

**FRA\_4**

L = 3,3 km  
 I = 1,6%  
 S = 1,08  
 Style : Monochenalisé subrectiligne  
 Incision : de -50 cm à -1 m  
 Connexion versant-lit : Faible  
 Perturbateurs majeurs : 13  
 Corsetage anthropique : 30%  
 Corsetage naturel : 5%  
 Contribueurs séd. : Aucun  
 Érosion latérale : 652 m<sup>2</sup>/km  
 Stock alluvial : 5 570 m<sup>3</sup>  
 Volume potentiel charrié : 22 850 m<sup>3</sup>/an



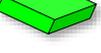
-  Compartiment de production
-  Compartiment altéré
-  Compartiment faiblement altéré
-  Compartiment fonctionnel
-  Exhaussement
-  Stabilité
-  Incision

Figure 52 : Bilan sédimentaire semi-quantitatif du Frayol

## 7 Évolution dynamique du Frayol

La compréhension de l'héritage géomorphologique et du fonctionnement dynamique du Frayol a mis en évidence certains éléments de diagnostic à partir desquels une tendance d'évolution peut être dégagée :

- **Le contexte sédimentaire du bassin versant du Frayol est péjoré** par les forçages climatiques qui nous positionnent actuellement (suite au réchauffement climatique) dans une crise morphogénique se caractérisant par un tarissement sédimentaire majeur.

La précédente crise morphogénique était une crise d'exacerbation de la fourniture sédimentaire qui s'est achevée à la fin du Petit Âge Glaciaire. On peut donc penser que depuis la sortie du Petit Âge Glaciaire, le Frayol tourne sur un stock alluvial hérité, lequel doit être faible compte tenu de son style en gorge généralisé.

- Le **Frayol ainsi que ces principaux affluents présentent un couplage sédimentaire latéral** très faible. La faiblesse de ce couplage sédimentaire est sous influence directe de la péjoration de la fourniture sédimentaire liée au forçage climatique en cours. Seuls des forçages anthropiques dirigés pourraient pallier ce phénomène.
- Le Frayol s'écoule directement sur le substratum sur 77% de son linéaire, ce qui témoigne d'**une incision « consommée » avec déstockage du plancher alluvial**. Toutefois, cette incision se trouve bloquée (ou plus exactement fortement ralentie, l'ablation par érosion fluviale de roches, telles que les marnes, est de l'ordre de quelques dixièmes de mm/an) par la présence de la roche. On peut donc considérer que l'incision ne va pas s'accroître dans les secteurs incisés.
- **Les crues cévenoles gardent toutefois leur capacité de mobilisation du résiduel de la charge solide et d'érosion latérale**, notamment dans le tronçon FRA\_3, où la gorge est moins marquée et où le cours d'eau garde une certaine mobilité latérale donc une capacité de recharge latérale. Ce tronçon en gorge a par ailleurs une capacité de transport importante. On peut donc supposer que le tronçon FRA\_4 recevra dans le futur, lors de crues morphogènes, des matériaux qu'il sera nécessaire d'accompagner mécaniquement pour limiter leur impact sur les enjeux (risque de sur-inondation).

Le bassin versant du Frayol se trouve donc actuellement dans une situation particulière avec un stock alluvial faible et un renouvellement de sa charge alluviale limité (boisement d'une grande partie du bassin, faiblesse des contributeurs sédimentaires, connexion versant-lit limitée...).

Les **tronçons en gorge (FRA\_1 à FRA\_3)** dans lesquels le lit s'écoule largement sur le substratum devraient connaître une certaine **stabilité**, voire par endroit un décapage du reste du plancher alluvial, compte tenu du déficit sédimentaire actuel.

Le **tronçon FRA\_4**, sans action de recharge sédimentaire au sens de Landon *et al.* (1999), devrait connaître une **évolution marquée plutôt par l'incision** avec par endroit des exhaussements liés au blocage de la charge alluviale résiduelle (*e.g.* au niveau du pont à créneaux ou au niveau du pont ferroviaire).

## 8 Synthèse du diagnostic hydromorphologique

L'analyse de la trajectoire géomorphologique du Frayol met en évidence les éléments de diagnostic suivants :

- Le **profil en long du Frayol est fortement compartimenté** par des perturbateurs géomorphologiques, dont certains constituent de véritables cascades naturelles dont la hauteur de chute est supérieure à 6 mètres. Ce compartimentage du profil en long perturbe, voire bloque, le transit sédimentaire.
- Le **profil en long du Frayol est globalement incisé** sur les trois premiers tronçons (FRA\_1 à FRA\_3) où l'on observe des affleurements rocheux conséquents montrant que le plancher alluvial s'est déstocké suite aux forçages climatiques. Des secteurs en incision sont également présents sur 30% du linéaire du tronçon FRA\_4 avec des évolutions altimétriques de l'ordre du demi-mètre au mètre. L'enfoncement du lit est vraisemblablement lié à la convergence de trois facteurs : des forçages climatiques récents et en cours, de la faiblesse de la connexion versant-lit et de la faiblesse des apports des contributeurs sédimentaires.
- Le **potentiel de recharge sédimentaire** du Frayol est **limité** :
  - La **contribution sédimentaire des affluents** semble faible. En effet, les principaux affluents présentent généralement de petits bassins versants fortement végétalisés peu enclin à produire une charge alluviale conséquente. Certains s'écoulent sur les marnes (comme le ruisseau de Marsac) qui fournissent des matériaux peu intéressants (les marnes donnent des grains en lit de petite taille car elles se délitent et se fragmentent facilement notamment sous l'action du gel/dégel), d'autres (comme le ruisseau de Thieulat) ont érodé les coulées volcaniques des Coirons, dont les basaltes difficilement érodables fournissent des matériaux grossiers qui ne favorisent pas le transport solide.
  - Les **érosions latérales** sont faibles, compte tenu de la conformation du lit du Frayol, dont 77% du linéaire présente un style en gorges et 43% est contraint latéralement par les falaises.
  - C'est généralement la **connexion versant-lit** qui est le fournisseur le plus important en matériaux et non l'érosion latérale. Dans le cas du Frayol, cette connexion est très limitée et ne constitue par une source de recharge sédimentaire suffisante. Cette situation est notamment due au boisement des versants qui évite les éboulements, écroulements, mouvements rotationnels... qui sont d'excellents pourvoyeurs en matériaux lorsqu'ils sont couplés avec le lit. Le boisement ou les prairies de fauche limitent fortement également l'érosion par la pluie et donc la fourniture de matériaux.
  - Le **stock alluvial** est limité avec 21 448 m<sup>3</sup> de matériaux stockés en lit sous la forme de structures alluvionnaires. La forte pente et le style fluvial en gorges limitent les dépôts alluvionnaires et les zones de stockage-régulation. Toutefois, le degré de mobilité est relativement important, 72% du stock alluvial restent mobiles car quasiment non végétalisés. Mais certaines structures alluvionnaires commencent à se végétaliser et pourraient ainsi se fixer s'il ne survenait pas de crue morphogène dans les années à venir.
- La **respiration latérale** du lit du Frayol est très limitée, du fait du corsetage géologique (falaise) sur les trois premiers tronçons et du corsetage anthropique sur le tronçon FRA\_4.

En fait, le Frayol a déstocké son plancher alluvial par manque de renouvellement de matériaux (insuffisance généralisée de la fourniture sédimentaire malgré une forte capacité de transport, contrainte du style fluvial en gorges, insuffisance de crues Basse Fréquence Haute Magnitude). Le Frayol ne possède donc pas de stock sédimentaire « de réserve » (stock alluvial hérité ou bande active de stockage en aval comme l'Escoutay) et présente globalement une faible activité sédimentaire.

## 9 Espaces de bon fonctionnement

### 9.1 Définition et objectifs

La délimitation des espaces de bon fonctionnement s'inscrit directement dans la suite logique de l'analyse de la trajectoire géomorphologique du Frayol. En effet, cette analyse a permis d'appréhender finement le fonctionnement et l'évolution dynamiques du Frayol (historique des évolutions, zones d'incision et d'exhaussement, contributeurs sédimentaires potentiels...).

Ainsi, on peut définir un espace de bon fonctionnement adapté à la dynamique du Frayol, c'est-à-dire un **espace multifonctionnel** nécessaire au Frayol pour assurer ses fonctions morphologique, hydraulique, hydrogéologique, biogéochimique et biologique.

L'espace de bon fonctionnement est un zonage qui n'a pas de portée réglementaire (comme le PPRI), mais dont l'objectif est de :

- Sensibiliser les acteurs sur les exigences spécifiques au bon fonctionnement du cours d'eau ;
- Informer sur ce qu'il est souhaitable ou non au sein de cet espace en termes d'occupation du sol et de pratiques ;
- Orienter la gestion du cours d'eau : guider le développement de nouveaux projets d'aménagement pour qu'ils soient compatibles avec les objectifs de préservation et de restauration.

### 9.2 Méthodologie

La détermination de l'espace de bon fonctionnement se base sur la méthodologie du Guide technique du SDAGE de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse élaboré en décembre 2016.

Compte tenu de la configuration du bassin versant du Frayol et des données disponibles, l'espace de bon fonctionnement est défini par la « *méthode rapide pour les cours d'eau peu mobiles et de petite taille* » (Guide SDAGE AERMC, 2016, pp. 88-92) et concerne le tronçon FRA\_4. En effet, l'hydrologie de crue du bassin versant du Frayol n'est disponible qu'en un seul point, à savoir son exutoire. Les débits de crue nécessaires à la définition de l'espace de bon fonctionnement (notamment  $Q_2$  et  $Q_{100}$ ) ne sont donc disponibles qu'au tronçon FRA\_4. Par ailleurs, il convient de rappeler que les tronçons FRA\_1 à FRA\_3 caractérisés par un style en gorges sont contraints géologiquement par les falaises, qui définissent d'une certaine manière naturellement l'espace nécessaire au cours d'eau.

La méthode dite « rapide » (Guide SDAGE AERMC, 2016, pp. 88-92) vise à délimiter et cartographier l'espace de bon fonctionnement nécessaire résultant de l'agrégation d'un périmètre morphologique et d'un périmètre hydraulique, afin d'obtenir un espace permettant un transfert équilibré des écoulements liquides et solides.

Cette méthode simplifiée semble adaptée au bassin versant du Frayol, en particulier au tronçon FRA\_4. En effet, le Frayol draine un bassin versant relativement de faible taille d'environ 26 km<sup>2</sup> et possède une pente moyenne de 1,6% et une largeur de pleins bords moyenne de 13 m sur le tronçon concerné d'après les levés topographiques réalisés dans le cadre de la présente étude. De plus, dans le cadre du diagnostic hydromorphologique, l'analyse diachronique (cf. § 5.3A) a montré que le lit du Frayol dans le tronçon FRA\_4 ne présentait pas de modifications particulières de son axe d'écoulement sur la période 1947-2013 complétée par la carte de Cassini, les tracés étant quasi-superposables donc plutôt stables. Ces différents éléments justifient donc l'application de la méthode « simplifiée ».

Les analyses conduisant à la délimitation des périmètres morphologique et hydraulique nécessaires à la définition de l'espace de bon fonctionnement nécessaire du tronçon FRA\_4 du Frayol font l'objet des paragraphes suivants. Il est à noter que des cartographies restituées à l'échelle 1/10 000<sup>e</sup> sont disponibles dans l'atlas cartographique qui complète le présent rapport.

### 9.3 Espace de bon fonctionnement nécessaire

#### A Périmètre morphologique nécessaire

Selon la méthode simplifiée, le périmètre morphologique nécessaire représente une bande dont la largeur est de deux fois la largeur de pleins bords de référence ( $L_{PB}$ ) avec une largeur minimale de cinq mètres de part et d'autre du lit mineur, c'est-à-dire : maximum  $[2 L_{PB} ; 10 + L_{PB}]$  (Guide SDAGE AERMC, 2016, pp. 88-89).

La largeur de pleins bords de référence ( $L_{PB}$ ) est déterminée à partir de la formule de Manning-Strickler pour une crue biennale ( $Q_2$ ). D'après l'analyse hydrologique réalisée par Sogreah (1984) et complétée par IATE (2007), le débit de pointe du Frayol au Teil pour une occurrence de crue de 2 ans est estimé à  $32 \text{ m}^3/\text{s}$ , valeur que l'on retiendra.

Le coefficient de rugosité de Strickler du lit mineur est pris égal à 19 en cohérence avec les valeurs retenues pour la modélisation hydraulique réalisée par IATE en 2007.

La pente moyenne utilisée correspond à celle du tronçon FRA\_4, c'est-à-dire 1,6% (déterminée d'après le profil en long 2016).

La formule de Manning-Strickler est ainsi appliquée à chaque profil en travers levé dans la traversée du Teil dans le cadre de la présente étude. Dans les conditions d'écoulement retenues, on obtient une largeur de pleins bords de référence moyenne ( $L_{PB}$ ) de l'ordre de 15 mètres pour le tronçon FRA\_4.

LARGEUR DE PLEINS BORDS PAR PROFIL EN TRAVERS	
Identifiant	$L_{PB}$ [m]
PT45	20,6
PT46	10,6
PT47	14,2
PT48	19,6
PT49	15,6
PT50	15,8
PT51	10,4
PT53	12,9
PT54	13,2
PT55	12,7
PT57	11,7
PT58	12,9
PT59	13,7
PT64	14,5
PT65	12,9
<b>Moyenne</b>	<b>14 m</b>

Tableau 22 : Largeur de pleins bords de référence obtenue pour quelques profils en travers

D'après la définition du périmètre morphologique nécessaire, sa largeur est la valeur la plus grande entre  $2 L_{PB}$  (30 m) et  $L_{PB} + 10$  (25 m). **On retient donc un périmètre morphologique nécessaire de 30 mètres de large centré sur l'axe actuel du cours d'eau.**

## B Périmètre hydraulique nécessaire

Le périmètre hydraulique nécessaire représente la zone de grand écoulement dont la largeur correspond à un débit unitaire supérieur à  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  pour une crue centennale.

Dans le cadre de la méthode simplifiée, la largeur de la zone de grand écoulement est approchée en considérant que l'écoulement est réparti uniformément avec un débit unitaire de  $1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (Guide SDAGE AERMC, 2016, pp. 89-91). Avec cette hypothèse, la largeur du périmètre hydraulique nécessaire est simplement égale au débit de pointe centennial ( $Q_{100}$ ).

D'après l'analyse hydrologique réalisée par Sogreah (1984) et complétée par IATE (2007), le débit de pointe du Frayol au Teil pour une occurrence de crue de 100 ans est estimé à  $124 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**La largeur du périmètre hydraulique nécessaire est donc égale à 124 mètres**, le périmètre morphologique nécessaire étant ainsi bien inclus dans le périmètre hydraulique.

Il convient de noter qu'il n'existe pas d'Atlas de Zone Inondable sur le bassin versant du Frayol, et que le PPRI du Frayol dans la traversée du Teil est en cours d'approbation. Ces deux éléments auraient permis une comparaison avec l'emprise du périmètre hydraulique nécessaire obtenue.

## C Prise en compte des contextes biologique, hydrogéologique et biogéochimique

Les périmètres morphologique et hydraulique nécessaires constituent la base de la construction de l'espace de bon fonctionnement nécessaire qui résulte de l'agrégation de ces deux périmètres. Le périmètre hydraulique couvrant la totalité du périmètre morphologique, l'espace de bon fonctionnement nécessaire coïncide avec le périmètre hydraulique.

Toutefois, comme préconisé dans le guide méthodologique de l'Agence de l'Eau (Guide SDAGE AERMC, 2016, pp. 91-92), il convient de vérifier, sur la base des données disponibles, si l'espace obtenu intègre les fonctions biologique (annexes fluviales), hydrogéologique (échanges nappe-rivière) et biogéochimique (qualité écologique) que doit également assurer le Frayol, et le cas échéant le compléter et l'ajuster.

Dans le cas du bassin versant du Frayol, il n'existe pas d'inventaire de zones humides. La synthèse bibliographique n'a également pas révélé de données sur la nappe d'accompagnement du Frayol ou sur les prélèvements en eau du bassin versant. Faute de données disponibles, la prise en compte des contextes biologique et hydrogéologique ne peut donc être vérifiée.

Le bon fonctionnement biogéochimique concerne la qualité chimique des eaux du Frayol à travers notamment sa capacité d'autoépuration et de limitation des transferts de pollution. Dans le cas de la méthode simplifiée, l'espace lié à cette fonction correspond à une bande de 30 mètres de large (15 mètres de part et d'autre de l'axe du cours d'eau) faisant office de zone tampon pour limiter la diffusion des flux polluants au Frayol (SDAGE AERMC, 2016, p. 92). Compte tenu de la largeur du périmètre morphologique nécessaire, la bande tampon de 30 mètres de large est totalement intégrée à celui-ci.

La Figure 53 présente les différents périmètres obtenus dans la traversée du Teil et constituant l'espace de bon fonctionnement nécessaire.

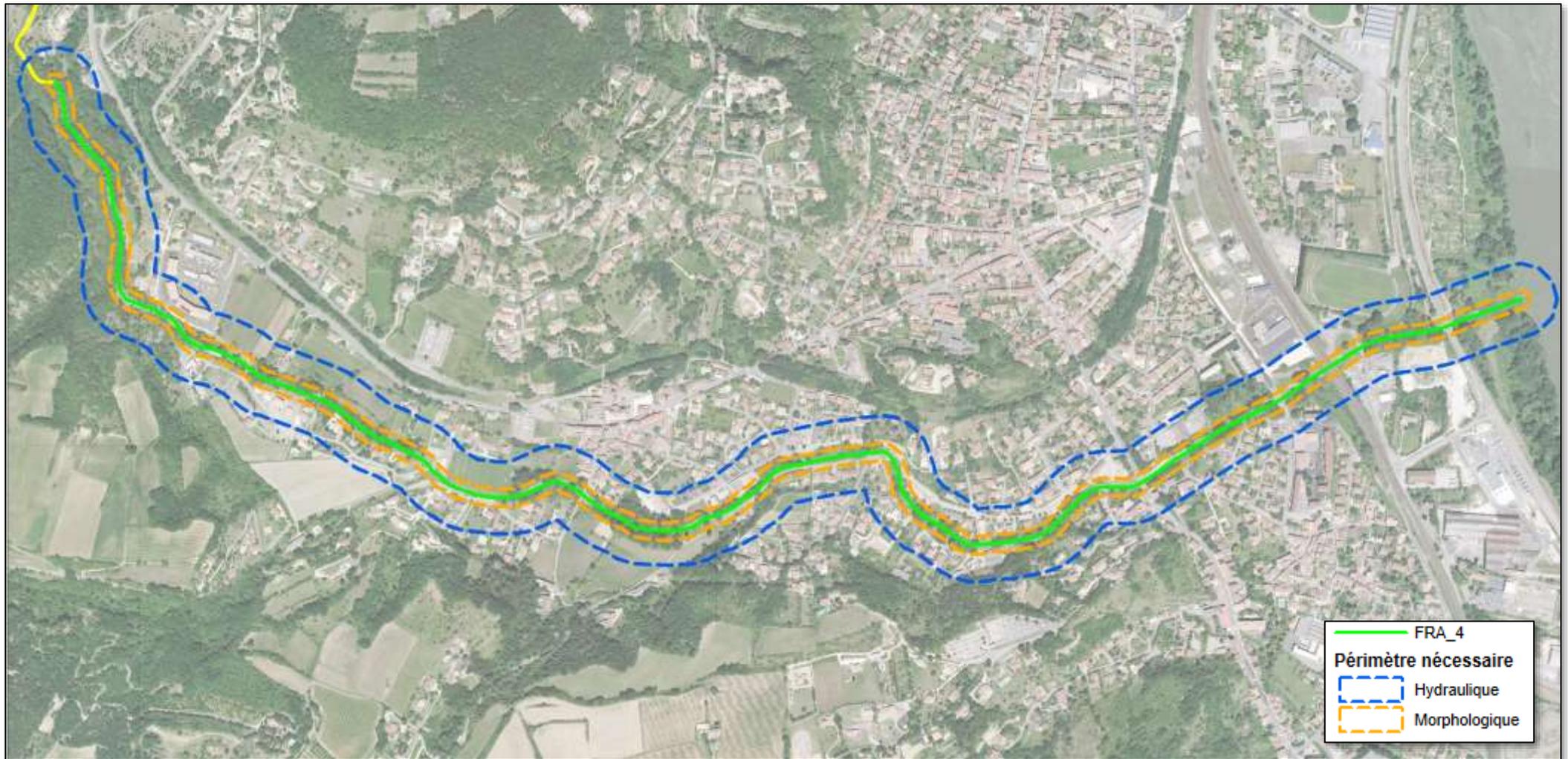


Figure 53 : Cartographie des périmètres nécessaires obtenus par la méthode simplifiée sur le Frayol dans la traversée du Teill

## 10 Glossaire

### **A**CCRETION

L'accrétion pour un banc de galets (structure alluvionnaire) est l'action de croître par juxtaposition de matériaux alluvionnaires à la structure préexistante. Ce terme est synonyme plus généralement de dépôt en lit.

### **A**FFOUILLEMENT

Creusement produit lors des crues morphogènes, dans le lit d'un cours d'eau, par opposition à l'érosion qui concerne les berges.

### **A**LLUVIONS

Dépôts meubles d'un cours d'eau (tant en lit mineur que majeur) formés de matériaux ayant été transportés par le transit sédimentaire.

### **A**PPORTS EXTERNES

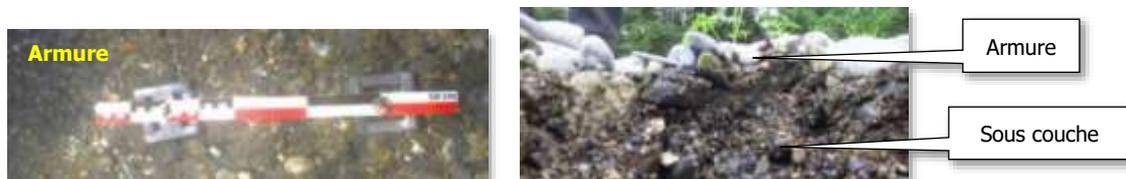
Matériaux provenant du bassin versant mais qui ne viennent pas directement du cours d'eau. Ce sont donc les matériaux issus essentiellement des versants (talus, cônes ou tabliers d'éboulis) ou d'autres cours d'eau (affluents)

### **A**PPORTS INTERNES

Matériaux produits directement par le cours d'eau. Ce sont des matériaux stockés en lit tels que les structures alluvionnaires. Les apports internes concernent également les matériaux stockés dans le lit majeur éventuellement sous la forme de terrasses anciennes, la remobilisation de ces matériaux se produisant alors par érosion latérale.

### **A**RMURE

Matériaux alluvionnaires déposés en lit constituant la partie supérieure d'un lit fluvial (rivières à graviers à lit mobile), dont l'épaisseur est celle des plus grosses particules la constituant (Simon, 1986). L'armure masque la sous-couche constituée de matériaux plus fins.



### **A**VULSION

Changement brutal et radical du tracé d'un lit sur plusieurs centaines de mètres, voire kilomètres, lors d'une crue morphogène. Cette situation peut être due à un embâclage généralisé du lit par des bois flottés, une charge alluviale obstruant le lit et favorisant son basculement dans un ancien chenal ou une gouttière topographique. C'est généralement un phénomène relativement courant dans les styles en tresses où les secteurs s'exhaussent (cône torrentiel, delta...).

## **B**ANDE ACTIVE

Espace dans lequel s'écoule un cours d'eau et où se concentre l'activité morphogène, notamment les chenaux et dépôts sédimentaires. C'est pour les systèmes en tresses qu'on parle préférentiellement de bande active. En effet, la bande active des cours d'eau en tresses se caractérise par des chenaux et des structures alluvionnaires\* non végétalisées qui sont très mobiles. Elle est donc très facilement identifiable.

### **BASSE FREQUENCE HAUTE MAGNITUDE**

Crues globalement supérieures ou égales à la décennale, fortement morphogènes. Il s'agit donc de crues plutôt rares présentant une forte morphogénie.

## **C**ASCADE SEDIMENTAIRE

Ensemble d'éléments interconnectés (sources sédimentaires, connecteurs, réservoirs sédimentaires, exutoires) qui produisent et exportent des sédiments. Ces sont de véritables machines à produire, transporter et exporter des sédiments. Spécifique au domaine torrentiel.

### **CHUTE ALLUVIALE**

Chenal de décharge naturel situé entre une structure alluvionnaire latérale et la berge contre laquelle la structure s'est développée. Généralement, cette chute n'est fonctionnelle qu'en crue.

### **CONTEXTE DYNAMIQUE**

Le contexte dynamique se caractérise par deux éléments : le fonctionnement dynamique\* et son évolution dynamique\*. Ces deux éléments sont intrinsèquement liés et évoluent essentiellement au gré des aléas climatiques et hydrologiques. On pourrait également parler de système dynamique.

### **CONTRIBUTEUR SEDIMENTAIRE**

Affluent du cours d'eau principal contribuant par des apports d'alluvions à son bilan sédimentaire

### **CORRIDOR ALLUVIAL**

Zone de transition entre le milieu aquatique *stricto sensu* (bande active du cours d'eau) et le milieu terrestre *stricto sensu*

### **CORSETAGE DU LIT**

Actions répétitives sur une portion significative de cours d'eau consistant à tenter de se protéger contre l'érosion et/ou les inondations par des travaux lourds (enrochements, épis, endiguements...). L'attendu de ce corsetage est de fixer le tracé en plan du lit. Les aménagements ainsi réalisés constituent alors un véritable corset.

L'effet induit de ce corset est d'enlever au cours d'eau toute possibilité d'évolution latérale (multichenalisation, méandrage...) et donc d'impacter fortement et durablement sa dynamique en limitant sa bande active\* et son espace de mobilité\*. Cette solution génère souvent lors des crues morphogènes\* des risques importants de changement de lit.

## **D**EFLUVIATION

Changement de lit temporaire lors d'une crue, le cours d'eau revenant après la crue dans son lit.

## **E**RODABILITE

Capacité d'une roche à être érodée

### **ESPECE LITHOPHILE**

Espèce se reproduisant sur un substrat grossier en construisant des frayères (comme la truite commune ou le saumon atlantique) ou en collant ses eaux directement sur les matériaux constituant le substrat du lit (comme le chabot). Également appelée « pondeur sous graviers ».

### **ÉVAPORITIQUE**

Roche formée dans un plan d'eau lors de son évaporation

### **ÉVOLUTION DYNAMIQUE**

Évolution du fonctionnement dynamique\* liée à des modifications anthropiques et/ou des crues morphogènes\*. Cette évolution crée de nouvelles conditions de fonctionnement dynamique\*.

### **EXTRADOS**

Berge de rive concave d'un méandre au contact de la cellule de courant la plus érosive marquée par l'érosion

## **F**ONCTIONNEMENT DYNAMIQUE

Dynamique fluviale actuelle d'un cours d'eau. Ce fonctionnement évolue forcément (impact des activités humaines, succession de crues morphogènes\* qui le modifie substantiellement). La dynamique d'un cours d'eau est évolutive et est constituée d'une succession de fonctionnements dynamiques différents.

## **G**ELIFRACTION

Processus d'altération des roches par fragmentation liée à l'action du gel/dégel

### **GESTION DYNAMIQUE**

Méthode consistant à gérer un cours d'eau en connaissant son fonctionnement dynamique\* et en intervenant par des techniques de génie dynamique pour favoriser des réponses dynamiques\* acceptables tendant à impacter l'évolution dynamique\*.

## **I**NCISION

Enfoncement vertical du lit, généralement lié à un déficit sédimentaire (modifications hydroclimatiques et anthropiques) ou à une érosion régressive

## INTRADOS

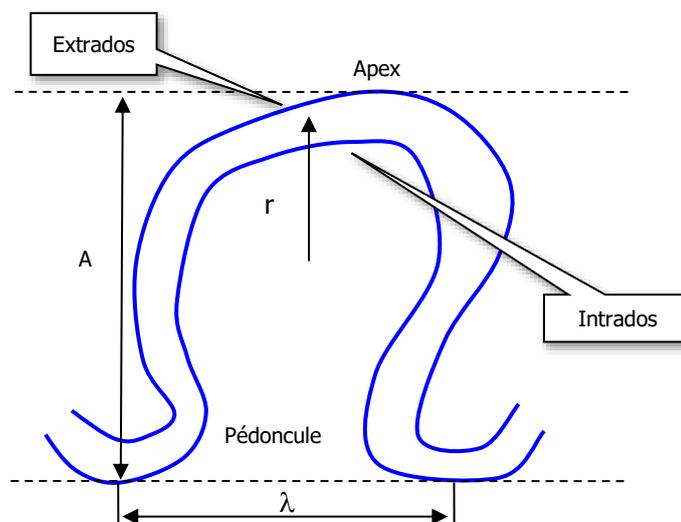
Berge de rive convexe dans un méandre au contact de la cellule de courant la moins active caractérisée par des dépôts alluvionnaires

## MÉANDRE

Sinuosité du lit d'un cours d'eau. C'est une forme morphologique qui permet au cours d'eau de dissiper son énergie en allongeant son thalweg par divagation tout en diminuant sa pente pour atteindre une pente d'équilibre. Cet équilibre peut être rompu, lorsque lors d'une crue, le méandre se *recoupe\**, mais souvent un autre méandre se recrée.

Un méandre est défini par plusieurs caractéristiques morphométriques :

- Lobe plus ou moins resserré à la base, dont la partie sommitale constitue l'*apex\** et la partie basale le *pédoncule\** ;
- Longueur d'onde ( $\lambda$ ) : distance entre deux *apex\** consécutifs de même phase ;
- Amplitude (A) : distance entre deux *apex\** consécutifs de phase opposée ;
- Rayon de courbure (r) : rayon du cercle passant par les deux points d'inflexion d'une sinuosité complète.



## METAMORPHOSE FLUVIALE

Évolution dynamique\* marquée par une rupture définitive (sans possibilité de restauration à l'identique) dans le fonctionnement dynamique\* qui a été initiée par l'anthropisation du cours d'eau.

Les usages ont dans un premier temps pesé sur le fonctionnement dynamique\* (extraction de matériaux alluvionnaires, destruction de la végétation – ripisylve et végétation alluvionnaire\*, seuils et barrages pour exploiter l'énergie hydraulique...).

Puis, au fil des réajustements géométriques\* du lit et à l'effet amplifié de certains phénomènes (débordements, érosion...), les cours d'eau ont été corsetés avec des techniques contraignantes et déconnectées de son fonctionnement (enrochements, seuils, digues...). La métamorphose conduit inéluctablement à une évolution dynamique\* irréversible.

**MORPHOGENE**

Action ou agent susceptible de modifier les formes fluviales. Une crue morphogène engendre des modifications des formes du cours d'eau (lit, berges...).

**OSSATURE**

Partie du lit formée par les éléments de rugosité, éléments les plus grossiers et les moins mobiles qui peuvent prendre plusieurs formes.

Ces éléments de rugosité peuvent se déposer sur le tapis ou être ancrés en lit (c'est-à-dire imbriqués dans le tapis), c'est en ce sens qu'ils forment l'ossature du lit, leur ancrage et leur masse les rendant peu mobiles.

**PENEPLANATION**

Érosion généralisée conduisant à une surface tabulaire portant le nom de pénéplaine

**PERTURBATEUR HYDROMORPHOLOGIQUE**

Ouvrage transversal présent en lit mineur ayant un impact sur le fonctionnement dynamique\* d'un cours d'eau. Il peut ainsi altérer la continuité sédimentaire et/ou écologique.

Cette altération peut conduire à une modification du style fluvial en aval (*e.g.* barrage, seuil altérant fortement la continuité sédimentaire...) : on parle alors de perturbateur majeur. Dans le cas où l'impact n'est que local, on parle de perturbateur secondaire (*e.g.* radier, gué...).

Les perturbateurs peuvent avoir une origine naturelle (seuil naturel), ce sont les perturbateurs géomorphologiques, ou une origine anthropique (barrage, seuil, pont, radier, gué...), il s'agit alors de perturbateurs anthropiques.

**PROCESSUS ALLOGENIQUES**

Processus externe d'évolution et de régénération. Dans notre domaine, il s'agit des crues débordantes qui viennent régénérer les boisements alluviaux. Ces crues purgent les arbres vieillissants et créent ainsi des taches (au sens biologique du terme) qui sont rapidement exploitées par des espèces pionnières, et ce d'autant plus que la crue aura amené des diaspores\*. Cette régénération permet aux boisements alluviaux d'évoluer en présentant des successions végétales adaptées.

**REAJUSTEMENTS GEOMETRIQUES**

Ensemble des réponses physiques (érosion, incision\*, sédimentation...) ayant des effets sur la géométrie (latérale et longitudinale) du lit d'un cours d'eau. Ces réponses peuvent être initiées par des à-coups hydrauliques (liés aux crues, inondations, étiages...), mais aussi par des modifications anthropiques.

**RECHARGE SEDIMENTAIRE**

Technique de génie dynamique consistant à intégrer des matériaux exogènes de forme et de granulométrie compatibles avec le cours d'eau, dans des tronçons à apports insuffisants. L'objectif de cette technique étant de compenser un apport naturel déficitaire.

**REMOUS REGRESSIF SOLIDE**

Dépôt de matériaux dans la retenue d'un ouvrage transversal (seuil, barrage). Ce remous se dépose d'abord au niveau de l'ouvrage, puis la retenue se remplit en remontant vers l'amont petit à petit au gré des crues.

Les matériaux manquant (piégés dans la retenue) vont générer à l'aval de l'ouvrage une incision\* du lit par déficit sédimentaire.

**RESPIRATION**

Variations altitudinales du niveau du lit autour d'un niveau moyen. Ces variations sont liées aux crues et au transit sédimentaire. La respiration d'un lit est ainsi caractérisée par le charriage des matériaux le constituant pendant les crues et leur remplacement en fin de crue par d'autres, de telle sorte que le niveau du lit reste quasiment constant.

On parle de respiration latérale pour caractériser l'évolution en plan de la bande active\* d'un cours d'eau.

**RETROGRADATION**

Phénomène d'aggradation (dépôt en lit) d'alluvions formant généralement une structure alluvionnaire se développant de l'aval vers l'amont par appui sur un élément (pile de pont, embâcle...).

**RIFT OU RIFTING**

Amincissement de la croûte terrestre formant une dorsale sous-marine

**SINUOSITE**

Rapport entre la longueur développée du cours d'eau entre deux points en suivant l'axe du lit mineur et la longueur entre les deux mêmes points en suivant l'axe de la vallée.

**STOCK ALLUVIAL**

Ensemble des matériaux alluvionnaires (alluvions) disponibles en lits mineur et majeur (fond du lit, berges, terrasses alluviales...) et participant actuellement ou de manière différée (lors des épisodes de crues) à la dynamique alluviale d'un cours d'eau.

**STRUCTURES ALLUVIONNAIRES**

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

**STYLE FLUVIAL**

Morphologie du lit représentative d'un tronçon de cours d'eau. Cette morphologie dépend de divers paramètres (pente, fourniture sédimentaire...) et est variable en fonction de la position du tronçon dans le profil en long du cours d'eau

**SUBSIDENCE**

Diminution de la hauteur des fonds marins

**SUBSTRAT**

Éléments grossiers tapissant le fond d'un lit fluvial. Ce tapis\* exclut les éléments de rugosité\* et les patches de colmatage\* (matériaux fins – argiles, limons et sables – masquant généralement le substrat).

Ainsi, l'armure\* et le pavage\* (au sens de Bray & Church, 1980) sont des types de substrat liés notamment à la fourniture sédimentaire (plutôt abondante pour l'armure et déficitaire pour le pavage qui est un substrat associé à l'incision du lit).

**SUSPENSION**

Mode de transport solide concernant les matériaux fins (diamètre > 2 mm) s'effectuant dans la colonne d'eau

**T  
APIS**

Partie pavée tapissant le fond du lit qui se développe le plus souvent sur des surfaces importantes et qui constitue la partie la plus mobile du lit. Le tapis se développe en surface et son épaisseur est généralement faible (centimétrique à décimétrique). C'est donc le pavage\* stricto sensu.

**TRANSFERT-REINJECTION DE MATERIAUX**

Technique de gestion du stock alluvial\* qui consiste à accompagner la dynamique fluviale en transférant des matériaux bloqués (soustrait au stock alluvial\*) ou impactant trop fortement le fonctionnement dynamique\* et/ou certains usages, et à les transférer mécaniquement dans des zones repérées préalablement où ils pourront être réinjectés dans le stock alluvial\* (zone déficitaire) soit par injection-retard\* ou directe\*, suivant l'effet recherché.

## 11 Références bibliographiques

- ARNAUD-FASSETTA, G., FORT, M., 2004. La part respective des facteurs hydroclimatiques et anthropiques dans l'évolution récente (1956 - 2000) de la bande active du haut Guil, Queyras. Méditerranée, Géosystèmes montagnards et méditerranéens - mélange offert à Maurice Jorda, 102, pp. 143-156.
- BALON, E.K., 1975. Reproductive guilds of fishes: a proposal and definition. J. Res. Bd. Can., 32, pp. 827-864.
- BORLAND, W.M., 1960. Stream channel stability. United States Bureau of Reclamation. Denver.
- BRAVARD, J.P., 1989. La métamorphose des rivières des Alpes françaises à la fin du Moyen-Âge et à l'époque moderne. Bulletin de la Société Géographique de Liège. 25, pp. 145-157.
- BRAVARD, J.P., 1994. L'incision des lits fluviaux : du phénomène morphodynamique naturel et réversible aux impacts irréversibles. Revue de Géographie de Lyon, 69(1), pp. 5-10.
- BRAVARD, J.P., PETIT F., 1997. Les cours d'eau, dynamique du système fluvial, Paris, Armand Colin, Collection U, 222 p.
- BRAY, D.I., CHURCH, M., 1980. Armored versus paved gravel beds. Jour. Hydraul. Div., 106, pp. 1937-1940.
- BROOKES, A., 1988. Channelized rivers: perspectives for environmental management. John Wiley & Sons, Chichester.
- CHURCH, M., JONES, D., 1982. Gravel-bed rivers. Sediment Cascades : an Integrated Approach, pp. 241-269.
- CHURCH, M., ZIMMERMAN, A., 2007. Form and stability of step-pool channels. Research Progress. Water Resources Research, 43W03415, pp. 1-21.
- COUVERT, B., LEFORT, P., PEIRY, J.L., BELLEUDY, P., 1999. La gestion des rivières. Transport solide et atterrissements. Etude des agences de l'eau n°65, 94 p.
- GILBERT, C.K., 1914. The transportation of debris by running water. US Geological Survey Professional Paper 86, p. 221.
- GILVEAR, D., BRAVARD, J., 1993. Dynamique fluviale. Amoros C. & Petts G.E., Hydrosystèmes fluviaux, Masson, pp. 61-82.
- IATE, 2007. Étude hydraulique de la rivière : le Frayol. Rapport d'étude pour le compte de la commune Le Teil.
- LANE, E., 1955. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. Proceedings of the America Society of Civil Engineers. Journal of the Hydraulics Division, 81, pp. 745-761.
- MACKIN, J.F., 1948. Concept of the graded river. Geological Society of America Bulletin, 59, pp. 463-512.
- MALAVOI, J.R., SOUCHON, Y., 2002. Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques. Bull. Fr. Pêche Piscic., 365/366, pp. 357-372.
- MALAVOI, J.R., BRAVARD, J.P., 2010. Éléments d'hydromorphologie fluviale. ONEMA, Comprendre pour agir, 223 p.
- MIDDLETON, G.V., 1976. Hydraulic interpretation of sand size distributions. Jour. Geology, 84, pp. 405-426.
- MONTGOMERY, D.R., BUFFINGTON, J.M., 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. Geological Society of America Bulletin, 1095, pp. 596-611.

- MOSS, A.J., 1972. Bed-load sediments. *Sedimentology*, 18, pp. 159-219.
- PACCAUD, G., ROULIER, C., 2010. Espace nécessaire aux cours d'eau à méandres. Rapport final pour l'Office Fédéral de l'Environnement (Suisse), Division Préventions des Dangers., p. 101.
- SAFEGE, 2016. Étude hydraulique complémentaire au PPRI, suite à la crue du Frayol du 14 et 15 novembre 2014. Rapport d'étude pour le compte de la DDT Ardèche.
- SAFEGE, 2017. Schéma global de gestion du risqué inondation du bassin versant du Frayol. Rapport d'étude pour le compte de la Mairie Le Teil.
- SCHUMM, S.A., 1977. *The fluvial system*. John Wiley & Sons, Chichester, 338 p.
- SEAR, D., NEWSON, M., 1993. Sediment and gravel transportation in rivers, including the use of gravel traps. Final report n° C5/384/2 - National River Authority.
- SIMON, L., 1986. Transports solides de sédiments de granulométrie non uniforme. Mémoire de DEA - Laboratoire National d'Hydraulique - EDF - Chatou.
- SOGREAH, 1984. Étude hydraulique de la rivière le Frayol. Rapport d'étude pour le compte de la mairie Le Teil.
- SURREL, A., 1841. *Etude sur les torrents des Hautes-Alpes*. Tome 1, Dunod, Paris, 23 p.
- TRICART, J., 1977. Types de lits fluviaux en Amazonie brésilienne. *Annales de Géographie*, 473, pp. 1-54.
- VANNOTE, R., MINSHALL, G., CUMMINS, K., SEDELL, J., CUSHING, C., 1980. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 371, pp. 130-137.
- WENTWORTH, C., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, pp. 311-327.
- WIEDERKEHR, E., DUFOUR, S., PIÉGAY, H., 2008. Suivi physique et biologique des rivières en tresses. *Zone Atelier Bassin du Rhône*, 41 p.



# HYDRETUDES

Ingénierie de l'eau - Maîtrise d'œuvre

## Conseil - Etudes - Maîtrise d'œuvre - Assistance technique - Formation

### Eau et infrastructures hydrauliques

- Eau potable/Traitement
- Irrigation
- Eau usée/Épuration
- Eau pluviale
  
- Risques naturels
- Aménagements fluviaux et portuaires
- Dignes, ouvrages de protection

### Environnement aquatique

- Gestion des ressources
- Préservation, restauration, valorisation
- Développement durable
- Règlementation



#### Siège social Centre technique principal

851 Route de Champ Fuzon  
74 370 ARGONAY

Tél : 04 50 27 37 26  
Fax : 04 50 27 25 64  
contact@hydretudes.com

#### Agence Dauphiné-Provence

3, rue Proust  
26 100 ROMANS SUR ISERE

Tél : 04 78 45 30 07  
Fax : 04 78 31 04 37  
contact-romans@hydretudes.com

#### SARL Océan Indien

« Les Kréolis »  
8-10, rue Axel Dorville  
97 410 SAINT PIERRE

Tél : 02 62 96 82 45  
Fax : 02 62 92 89 05  
Contact.reunion@hydretudes.com

#### SARL Alpes du Sud

Bât 2 - 106 Forest d'Entrails  
29, rue du Forest d'Entrails  
04 000 GAP

Tél : 04 92 21 92 26  
Fax : 04 92 22 87 83  
contact-gap@hydretudes.com

#### SARL Grand Sud-Pyrénées

15 bis, chemin du Chapitre  
31 100 TOULOUSE

Tél : 05 62 24 05 43  
Fax : 05 62 24 06 39  
contact-toulouse@hydretudes.com

#### Agence Sud-Ouest

41, Rue des Fontaines  
64 100 LÈZE

Tél : 05 64 27 02 36  
contact-southwest@hydretudes.com

#### SARL Alpes du Nord

Alpicoor  
50, Voie Albert Einstein  
73 800 FRANCIN

Tél : 04 79 96 46 57  
Fax : 04 79 33 02 59  
contact-savoie@hydretudes.com