Définition de l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau du bassin versant de l'Arc (Provence-Alpes-Côte d'Azur)

Coraline Basson

▶ **To cite this version:**

Coraline Basson. Définition de l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau du bassin versant de l'Arc (Provence-Alpes-Côte d'Azur). Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03600583

HAL Id: dumas-03600583

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03600583

Submitted on 7 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ENGEES
ÉCOLE NATIONALE DU GÉNIE DE L'EAU
ET DE L'ENVIRONNEMENT DE STRASBOURG

sce
Aménagement
& environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Définition de l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau du bassin versant de l'Arc (Provence-Alpes-Côte d'Azur)

BASSON Coraline

Promotion Liège (2018 – 2021)

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES

Spécialité de dernière année : Semestre Erasmus - Master 2 Hydro Science and Engineering à l'Université Technique de Dresde (Allemagne) (TUD)

Stage réalisé du 15 mars au 20 août 2021

Maître de stage chez SCE : LAMBERET Thomas

Référent de stage ENGEES : RIXHON Gilles

Résumé

Définition de l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau du bassin versant de l'Arc (Provence-Alpes-Côte d'Azur)

Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion (SDAGE) des Eaux Rhône-Méditerranée 2016-2021 prône la restauration et la préservation d'un espace de bon fonctionnement (EBF) autour des cours d'eau pour atteindre le bon état écologique, objectif de la Directive Cadre européenne sur l'Eau. L'espace de bon fonctionnement étant un concept récent pour lequel il n'existe que peu de retour d'expériences et malgré la publication d'un guide technique du SDAGE donnant des recommandations pour sa délimitation, une définition et une adaptation de la méthode sont nécessaires pour chaque étude sur la base des données disponibles et des caractéristiques propres à la zone d'étude.

Le Syndicat d'Aménagement du Bassin de l'Arc, en Provence, a mandaté une étude pour la délimitation d'un espace de bon fonctionnement pour les cours d'eau du bassin versant de l'Arc. La délimitation de l'EBF du bassin de l'Arc se base sur un diagnostic approfondi du milieu dans cinq domaines : hydraulique, biologique, biogéochimique, hydrogéologique mais aussi et surtout hydromorphologique. L'intégration de nombreuses données, issues d'investigations de terrain, d'une analyse de la mobilité historique du lit et de données bibliographiques comme des résultats d'études hydrauliques, compilées dans le diagnostic permet d'obtenir des périmètres morphologiques et hydrauliques. Leur combinaison avec des données du contexte environnemental (relevant de la biologie, la biogéochimie et l'hydrogéologie) aboutit à un EBF technique optimal et un EBF technique nécessaire sur un bassin-test représentatif de toute la zone d'étude, permettant ainsi de caler la méthodologie.

Mots-clés : Espace de bon fonctionnement, hydrogéomorphologie, espace de mobilité, style fluvial

Abstract

Definition of the good functioning space of the rivers of the Arc catchment area (Provence-Alpes-Côte d'Azur, France)

The 2016-2021 River basin management plan (RBMP) in the Rhône-Mediterranean basin advocates the restoration and preservation of a good functioning space around watercourses in order to obtain the good environmental status, the aim of the European Union Water Framework Directive. Good functioning space is a recent concept for which there is little feedback. Even though a technical guide linked with the Rhone-Mediterranean basin RBMP was published, establishing recommendations regarding its delimitation, a definition and an adaptation of the method are required for each individual study based on the available data and on the specific characteristics of the study area.

The Arc catchment area syndicate requested a study for the delimitation of a good functioning space for the watercourses of the Arc, in Provence, France. The delimitation of this good functioning space is based on an exhaustive diagnosis of the river system in five fields: hydraulic, biology, biogeochemistry, hydrogeology and especially hydrogeomorphology. The integration in this diagnosis of numerous data obtained from field investigations, analysis of the historical mobility of the riverbeds and literature data such as results from hydraulic studies, enables morphological and hydraulic perimeters to be defined. Their combination with data from the environmental context (regarding biology, biogeochemistry and hydrogeology) results in an optimal technical good functioning space and a necessary one on a test area representative of the whole study area to adjust the methodology.

Keywords: Good functioning space, hydrogeomorphology, mobility space, river types

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce stage dans des conditions optimales.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon maître de stage, **Thomas LAMBERET**, chef de projet, qui m'a tout appris sur les Espaces de Bon Fonctionnement. Sa disponibilité, ses idées et critiques bienveillantes m'ont constamment permis d'avancer.

Merci également à **Tiphaine HERSOY**, chargée d'études en hydraulique, pour son soutien et ses conseils pendant ces mois de stage et aussi particulièrement pour ces journées de terrain sous le soleil de Provence. Parcourir le bassin versant de l'Arc en long et en large fût un réel plaisir.

Plus largement, je tiens à remercier toute l'équipe de SCE de l'Agence de Marseille pour l'accueil chaleureux, la bonne humeur et les échanges au quotidien, toutes les explications apportées sur les métiers et missions de chacun et sur l'entreprise ainsi que leur regard critique sur ma production. Mes remerciements s'adressent ainsi à **Antoine DURAND**, chargé d'études en hydraulique et **Cheikh MANGARA**, élève ingénieur de Polytech Nice et stagiaire en hydraulique fluvial, pour leur présence et les échanges quotidiens. Merci également à **Magali COLLOMP**, responsable de l'agence, pour l'accueil et le souci du bon déroulement de mon stage, mais aussi merci à **Olivier VIGNOULLE**, expert en hydraulique, **Lucas HUMBERT**, **Jean-Marc TESSAURO** et **Khalid EL ADDOULI**, chefs de projet, **Céline RAYNAUD** et **Thomas Le GLASSE,** assistants d'agence et **Elisa SAUZEDDE,** étudiante doctorante.

Merci aussi aux autres membres de SCE qui, depuis Nantes, ont fait en sorte que mon stage se passe dans les meilleures conditions.

J'adresse également mes remerciements à mon référent ENGEES, **Gilles RIXHON** pour son suivi et ses conseils.

Je tiens aussi à remercier ma famille et mes amis qui, comme toujours, m'apportent un soutien infaillible.

* Les numéros en exposant entre crochets renvoient à la référence bibliographique de l'information présentée. La bibliographie complète se trouve page 63.

* Dans le rapport, toutes les figures et autres illustrations pour lesquelles la source n'est pas mentionnée, sont extraites de l'étude du bassin-versant de l'Arc présentée ci-dessous.

Table des matières

Résumé 3
Abstract 3
Remerciements 4
Liste des figures 7
Liste des tableaux 8
Symbologie 8
Sigles et Abréviations 9
Introduction 10
1. Définition de l'espace de bon fonctionnement 11
1.1. Naissance et évolution du terme 11
1.2. Les EBF aujourd'hui 12
1.2.1. Préserver les fonctions écologiques du cours d'eau… 12
1.2.2. … au regard du style fluvial… 13
1.2.3. … pour permettre un développement durable des territoires 16
1.3. La portée des EBF 16
1.3.1. Un outil pour atteindre le « bon état » des cours d'eau 16
1.3.2. Le SDAGE Rhône-Méditerranée et les SAGE 17
1.3.3. Prise en compte des EBF par les dispositifs existants 17
2. Contexte générale de l'étude 18
2.1. Présentation du site d'étude : le bassin versant de l'Arc 18
2.1.1. Présentation générale 18
2.1.2. Les enjeux et pressions du territoire 20
2.2. Contexte de l'étude 21
2.3. SCE et son rôle dans la mission 21
3. Méthodologie appliquée à l'étude 22
3.1. Sectorisation du périmètre d'étude 22
3.2. Réalisation de l'état des lieux et du diagnostic partagé 23
3.2.1. Investigations de terrain 23
3.2.2. Diagnostic hydromorphologique 24
3.2.3. Diagnostic hydraulique 26
3.2.4. Diagnostic du contexte environnemental (hydrogéologie, biogéochimie, biologie) 26
3.2.5. Diagnostic socio-économique 27
3.3. Détermination de l'EBF 27
3.3.1. Une zone d'étude « test » pour valider la méthode 27

3.3.2. Détermination des périmètres techniques optimaux et nécessaires 28
4. Résultats 29
4.1. Diagnostic de l'Arc et de ses affluents 29
4.1.1. Analyse granulométrique du fond du lit 29
4.1.2. Analyse de la géométrie du lit 31
4.1.3. Analyse du contexte sédimentaire 36
4.1.4. Analyse des grandeurs morphodynamiques 38
4.1.5. Analyse diachronique de l'Arc : étude du profil en long 43
4.1.6. Analyse diachronique : étude de la bande active de l'Arc et de ses affluents 44
4.1.7. Détermination des différents styles fluviaux 48
4.2. Détermination de l'EBF pour la zone d'étude « test » 49
4.2.1. Définition de la zone d'étude « test » 49
4.2.2. Périmètre morphologique 50
4.2.3. Périmètre hydraulique 51
4.2.4. Intégration du contexte environnemental 54
4.2.5. Bilan de la méthodologie appliquée 56
5. Discussion des résultats 58
Conclusion et perspectives 60
Glossaire 61
Bibliographie 63
Annexes 65
Annexe 1 : Détail des investigations de terrain sur secteur exhaustif (Source : SCE) 65
Annexe 2 : Résultats du protocole EVHA à l'échelle du périmètre d'étude 66
Annexe 3 : Résultats des analyses granulométriques par protocole Wolman 67
Annexe 4 : Profil en long de l'Arc (découpés en quatre parties) 68
Annexe 5 : Différents styles fluviaux du bassin de l'Arc 72
Annexe 6 : Explications détaillées et illustrées de la méthode ExZEco du Cerema 73
Annexe 7 : Comparaison des résultats d'ExZEco avec les périmètres hydrauliques obtenus sur la base d'autres données 75
Annexe 8 : Illustrations de la définition des EBF optimal et nécessaires sur certains secteurs de la zone d'étude « test » 77

Liste des figures

Figure 1 : Limite des grands bassins administratifs français (Source : Office International de l'Eau, 2017)..... 11
Figure 2 : Esquisse des relations entre les différentes fonctions au sein de l'EBF (source : SDAGE RM 2016-2021[13]) 13
Figure 3 : Types de styles fluviaux selon la sinuosité et le nombre de chenaux (BRAVARD et PETIT, 2000)[2]..... 14
Figure 4 : Localisation du bassin versant de l'Arc..... 18
Figure 5 : Communes du bassin versant de l'Arc (Source : PAGD du SAGE de l'Arc, 2014[7]) 19
Figure 6 : Occupation des sols sur le bassin versant de l'Arc (Source : PAGD du SAGE de l'Arc[7]) 20
Figure 7 : Logo du SABA (Source : SABA[27])..... 21
Figure 8 : Sectorisation du bassin versant de l'Arc dans le cadre de l'étude 22
Figure 9 : Extrait de la carte des relevés de terrain (l'Arc à la confluence avec le Mal Vallat) 23
Figure 10 : Lithologie d'une berge de l'Arc aux Milles (Arc_13)..... 24
Figure 11 : Extrait du profil en long de l'Arc produit par les Grandes Forces Hydrauliques en 1949 ... 25
Figure 12 : Evolution de la bande active de l'Arc à Berre-L'Etang (13) 26
Figure 13 : Caractérisation des classes granulométriques par protocole EVHA (MALAVOI et al., 2011[21]) 29
Figure 14 : Photos d'analyse granulométrique par protocole Wolman sur l'Arc..... 30
Figure 15 : Comparaison entre les D50 obtenus par protocole Wolman et les D50th (barres d'erreur de 30%)..... 31
Figure 16 : Comparaison entre les débits Q2 et Q10 et les débits maximaux pouvant transiter dans l'unité homogène (débit de plein bord), le second graphique correspond à un zoom du premier graphique pour des débits de 0 à 50 m3/s..... 32
Figure 17 : Evolution du rapport entre la largeur et la hauteur plein bord, ... 33
Figure 18 : Comparaison des largeurs observées et des largeurs théoriques, le second graphique correspond à un zoom pour les petits bassins versants 35
Figure 19 : Comparaison des largeur théoriques et historiques..... 36
Figure 20 : Erodabilité des berges (érodabilité « très forte » non observée)..... 37
Figure 21 : Apport solide potentiellement transportable dans les affluents secondaires (apport solide « très bon » non observé) 37
Figure 22 : Photos décrivant l'érodabilité des berges et les potentiels apports solides sur le bassin versant de l'Arc..... 38
Figure 23 : Définition de 4 classes de variables pour discriminer la réactivité géodynamique des cours d'eau (MALAVOI, 2010[20])..... 39
Figure 24 : Analyse des puissances spécifiques par unité fonctionnelle..... 39
Figure 25 : Puissance spécifique de l'Arc (pk 0 à l'embouchure) 40
Figure 26 : Puissance spécifique des différentes unités homogènes..... 40
Figure 27 : Analyse des diamètres mobilisables par les différentes crues..... 42
Figure 28 : Evolution du profil en long de l'Arc entre le seuil du Moulin du Pont et le seuil de la Marie Thérèse..... 43
Figure 29 : Seuil du Moulin du Pont (gauche) avec une crête abaissée, seuil de la Marie-Thérèse (droite)..... 44
Figure 30 : Variation de la bande active de l'Arc entre les Milles et Saint-Pons..... 44
Figure 31 : Erosion de 2,5 m en rive concave de l'Arc, secteur des Milles, pk 33..... 45
Figure 32 : Variation de la bande active de l'Arc dans la plaine de Berre..... 45

Figure 33 : Détection de possibles limites de méandres (pointillés rouges) par étude morphologique d'orthophotographies (photo 1953 et 2018, couche LIDAR) 46
Figure 34 : Variation de la bande active de l'Aigue-Vive 46
Figure 35 : Digue de 2 m de haut en rive droite du Vallat du Grand Ruisseau, pk 1,150 47
Figure 36 : Variation de la bande active du Vallat Grand Ruisseau et de la Jouïne (partie avale) 47
Figure 37 : Styles fluviaux actuels des UH selon la pente moyenne et le débit morphogène (associé au débit biennal) à l'exutoire, en gris l'approche théorique de Church (2002) (CHAPUIS, 2012[6]) 48
Figure 38 : Amont du Ruisseau de Baume-Baragne à l'aval de la zone industrielle de Plan de Campagne à Cabriès (13) 49
Figure 39 : Délimitation des tronçons du bassin test (représentation du style fluvial objectif) 50
Figure 40 : Périmètres morphologiques sur l'Arc aval à Berre-l'Etang (fond : relief ombragé) 51
Figure 41 : Périmètres hydrauliques sur l'Arc aval à Berre-l'Etang 52
Figure 42 : Périmètres hydrauliques basés sur les données ExZEco (Source : Cerema, 2019[3]) sur l'Aigue-Vive (périmètre optimal en haut, périmètre nécessaire en bas) 53
Figure 43 : Périmètres morphologiques et hydrauliques sur l'Arc aval à Berre-l'Etang 54
Figure 44 : Relation entre la largeur tampon et le gain biogéochimique pour un usage agricole des terrains à côté du lit mineur (Source : Guide du SDAGE RM 2016-2021, 2016[11]) 55
Figure 45 : Intégration du contexte environnemental et EBF sur l'Arc aval à Berre-l'Etang 55
Figure 46 : Intégration du contexte environnemental et EBF sur l'Arc amont à Rousset 56

Liste des tableaux

Tableau 1 : Description des différentes typologies de styles fluviaux 16
Tableau 2 : Synthèse des principes de délimitation des espaces de fonctionnement optimal et nécessaire (Source : Guide technique du SDAGE RM 2016-2021, 2016[11]) 28
Tableau 3 : Définition des espaces de mobilité théorique pour les périmètres morphologiques 50
Tableau 4 : Bilan de la méthode de délimitation de l'EBF de l'Arc (en gras italique sont représentés les éléments de méthode propres au bassin versant de l'Arc) 57

Symbologie

- D_{50} : Diamètre médian (m)
- Dmax : Diamètre maximal mobilisable (m)
- Dmoy : Diamètre moyen (m)
- D_{xx} : xx% des grains de l'échantillon ont un diamètre mesuré inférieur à D_{xx}
- h : hauteur d'eau (m)
- Hpb : Hauteur de plein bord (m)
- Lpb : Largeur de plein bord (m)
- Q : Débit (m^3/s)
- Q2 : Débit de crue avec une période de retour de 2 ans (m^3/s)
- Q10 : Débit de crue avec une période de retour de 10 ans (m^3/s)
- Q100 : Débit de crue avec une période de retour de 100 ans (m^3/s)
- Qpb : Débit de plein bord (m^3/s)
- τ^* : Nombre de Shields critique (/)
- ω : puissance spécifique (W/m^2)

Sigles et Abréviations

- **AZI** : Atlas des Zones Inondables
- **BD Topo** : Base de Données Topographiques
- **CEN** : Conservatoire des Espaces Naturels
- **CLE** : Commission Locale de l'Eau
- **CN** : Cadastre Napoléonien
- **CRIGE PACA** : Centre de Ressources en Information Géographique en Provence-Alpes-Côte d'Azur
- **DCE** : Directive Cadre sur l'Eau
- **DDTM** : Direction Départementale des Territoires et de la Mer
- **EBF** : Espace de Bon Fonctionnement
- **ENGEES** : Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg
- **EPCI** : Etablissement Public de Coopération Intercommunale
- **ExZEco** : Expansion des Zones d'Ecoulement
- **GFH** : Grandes Forces Hydrauliques
- **IGN** : Institut National de l'Information Géographique et Forestière
- **MAEC** : Mesures Agro-Environnementales et Climatiques
- **MAPI** : Milieux Aquatiques et Protection contre les Inondations
- **MNT** : Modèle Numérique de Terrain
- **OFB** : Office Français de la Biodiversité
- **OiEau** : Office International de l'Eau
- **PACA** : Provence-Alpes-Côte d'Azur
- **PAGD** : Plan d'Aménagement et de Gestion Durable
- **PAPI** : Programme d'Action de Prévention des Inondations
- **Pk** : Point kilométrique
- **PLU** : Plan Local d'Urbanisme
- **PPRI** : Plan de Prévention du Risque Inondation
- **RM** : Rhône-Méditerranée
- **RMC** : Rhône-Méditerranée et Corse
- **ROE** : Référentiel national des Obstacles à l'Ecoulement
- **RPG** : Registre Parcellaire Graphique
- **SABA** : Syndicat d'Aménagement du Bassin de l'Arc
- **SAGE** : Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau
- **SDAGE** : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau
- **SIG** : Système d'Information Géographique
- **STEP** : STation d'EPuration des eaux usées
- **UF** : Unité Fonctionnelle
- **UH** : Unité Homogène
- **ZEC** : Zone d'Expansion de Crue
- **ZH** : Zone Humide

Introduction

Au cours des siècles derniers, les pressions sur les milieux aquatiques liées à l'urbanisation et à l'agriculture se sont accentuées. Les espaces en proximité de cours d'eau étant des espaces convoités (voies de transport et de communication, source d'énergie…), l'anthropisation a eu un impact significatif sur ces secteurs amenant à contraindre les écoulements des rivières. Cette perte de mobilité accompagnée d'une perte des espaces disponibles pour les débordements occasionnels mais récurrents en période de crue a entrainé une dégradation dans la qualité des milieux impactant le fonctionnement de l'hydrosystème dans sa totalité.

Les politiques récentes sur le plan national et européen visent à restaurer la fonctionnalité des cours d'eau et des milieux rivulaires. Ainsi, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) adoptée par l'Union Européenne en 2000 (2000/60/CE)[28] oblige les états-membres à recouvrer le bon état écologique des masses d'eau. Les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) sont l'outil privilégié, à l'échelle de grands bassins versants, pour l'atteinte de cet objectif. Dans ce contexte, le SDAGE Rhône-Méditerranée (RM) 2016-2021 vise à la protection et à la restauration d'espaces de bon fonctionnement pour atteindre le bon état écologique.

Le bassin versant de l'Arc, fleuve provençal au sud du bassin Rhône-Méditerranée, s'étend sur les départements du Var (83) et des Bouches-du-Rhône (13) en Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA). Avec ses principaux affluents, ils couvrent un linéaire de près de 300 km de l'Etang de Berre à la Montagne de la Sainte-Victoire en passant par la ville d'Aix-en-Provence. Les pressions sont nombreuses et variées sur le bassin versant et elles ont un impact non négligeable sur le fonctionnement de l'hydrosystème. C'est le constat qu'a réalisé le Syndicat d'Aménagement du Bassin de l'Arc (SABA), syndicat de rivière en charge de la gestion du fleuve et des rivières affluentes. Alors que le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) du bassin de l'Arc, déclinaison locale du SDAGE, s'apprête à être renouvelé, le SABA a mandaté le bureau d'études SCE pour définir l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau du bassin versant et ainsi le réglementer afin de permettre sa préservation et sa restauration.

Un guide technique a été produit en parallèle du SDAGE RM apportant des éléments de méthode pour la délimitation de tels espaces. Néanmoins, la méthodologie effectivement appliquée à l'étude, doit prendre en compte, en complément des éléments de ce guide, le contexte local, les données disponibles ainsi que l'objectif de l'étude (KLEIN, 2008[19] et CHABRAND, 2013[5]).

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, après une compréhension de la notion d'espace de bon fonctionnement et du contexte de l'étude, la production d'un diagnostic compilant les informations nécessaires à la compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème a permis de définir une méthode cohérente basée sur les styles fluviaux des cours d'eau pour la définition de l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau du bassin versant de l'Arc. Cette méthode a été testée sur un bassin-test représentant une partie de la zone d'étude.

1. Définition de l'espace de bon fonctionnement

1.1. Naissance et évolution du terme

L'**espace de bon fonctionnement (EBF)** est un concept qui est apparu au début des années 80 sous le terme **espace de liberté** à la suite d'un mouvement, initié dès les années 70, de prise de conscience des impacts négatifs dans le domaine de l'environnement des périodes de croissances précédentes. En effet, la transformation des rivières est un phénomène qui débute dès l'époque gallo-romaine et se développe au Moyen-Age. Tous les aménagements successifs réalisés dès lors (recalibrage, endiguement, aménagement de seuils et de barrages…) ont eu un impact majeur sur le fonctionnement du réseau hydrologique en France (MALAVOI, et al., 2010)[20].

La première mention du terme espace de liberté date de 1981 et revient au naturaliste C. Guinard lors du colloque « Ecologie et aménagement de la Loire ». Au cours de la décennie suivante, l'intérêt de l'hydromorphologie pour la protection des rivières et des services qu'elles rendent devient plus reconnu. Au cours des années 90, cette notion est même intégrée aux politiques publiques pour la gestion de l'eau[20].

La loi sur l'eau de 1992 entraine la mise en place des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SDAGE) qui correspondent à des outils de planification de la gestion de l'eau à l'échelle de grands bassins versants (Figure 1) pour une période de 6 ans. C'est dans le premier SDAGE du bassin Rhône-Méditerranée et Corse (RMC)[10], formant désormais deux bassins distincts, approuvé en 1996, que fût initialement définit le terme d'**espace de liberté** comme l' **« espace du lit majeur à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales pour permettre la mobilisation des sédiments ainsi que le fonctionnement optimal des écosystèmes aquatiques ».**

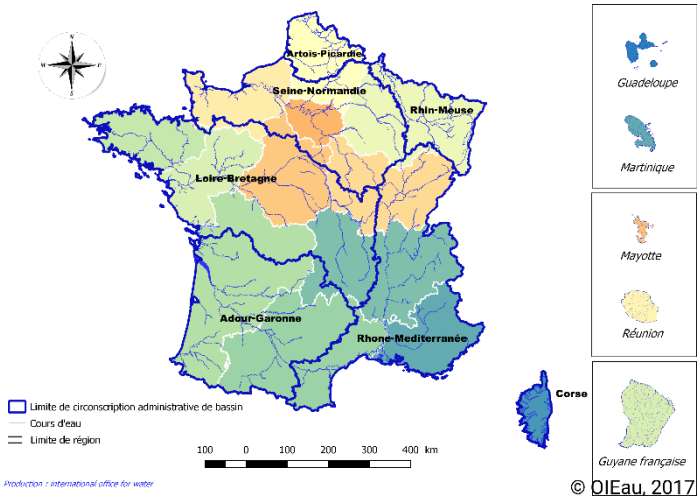


Figure 1 : Limite des grands bassins administratifs français (Source : Office International de l'Eau, 2017)

L'espace de mobilité a été défini juridiquement pour la première fois dans l'arrêté ministériel du 24 janvier 2001 portant modification de l'arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières[15]. L'article 2 décrit ainsi l'espace de mobilité : « L'espace de mobilité du cours d'eau est défini comme l'espace du lit majeur à l'intérieur duquel le lit mineur peut se déplacer. »

L'**espace de liberté**, aussi appelé **espace de mobilité** ; comporte quelques limites dans sa définition. En effet, elle n'inclut pas les cours d'eau ayant une faible dynamique latérale. Aussi, au début des années 2000 a émergé un nouveau terme englobant à la fois cette notion de mobilité mais incluant aussi d'autres fonctions naturelles de l'environnement (hydraulique, hydrogéologique, biogéochimique et biologique) : l'**espace de bon fonctionnement**. Celui-ci est défini dans le Guide technique du SDAGE RM 2016-2021 - ***Délimiter l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau***[11].

Ce terme est notamment défini dans les SDAGE Rhône-Méditerranée 2010-2015[12] et 2016-2021[13]. Les EBF sont ainsi résumés comme **« un espace dans lequel pourront se dérouler sans contraintes les**

phénomènes résultant des principales fonctions de l'hydrosystème. Il s'agit des fonctions liées à la morphologie, l'hydraulique, la biologie, l'hydrogéologie et la biogéochimie »[11].

Il faut cependant noter que le terme d'espace de bon fonctionnement n'est pour l'instant pas partagé totalement à l'échelle nationale. Ainsi, il est fait mention de zone de mobilité et de fuseau de mobilité dans le SDAGE Rhin-Meuse 2016-2021[9] et le SDAGE Loire-Bretagne 2016-2021[8] conserve le terme espace de mobilité. Néanmoins, dans les orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques adoptés par décret (Décret n° 2019-1400 du 17 décembre 2019 adaptant les orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques[16]) et donnant une méthodologie pour la délimitation des périmètres de la trame verte et bleue, il est évoqué à la fois les espaces de mobilité et les espaces de bon fonctionnement.

1.2. Les EBF aujourd'hui

1.2.1. Préserver les fonctions écologiques du cours d'eau…

Les espaces de bon fonctionnement sont longuement explicités dans le Guide technique du SDAGE – *Délimiter l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau*[11]. L'objectif principal de ces espaces est de préserver, voire de retrouver des services jusqu'alors perdus ou amoindris. Cette notion de bon fonctionnement est liée aux **fonctions écologiques remplies par l'hydrosystème**. Ces fonctions se traduisent à travers **cinq principaux domaines** :

- La morphologie
- L'hydraulique
- La biogéochimie
- L'hydrogéologie
- La biologie

Les fonctions liées à la **morphologie** sont celles soutenant les services en lien avec le fonctionnement sédimentaire (continuité sédimentaire, équilibre du profil en long) et les formes alluviales (habitats aquatiques, humides et terrestres). Il s'agit des fonctions considérées dans la notion d'espace de mobilité.

L'**hydraulique** comprend les fonctions soutenant les services liés au bon écoulement des eaux en crue et la connectivité des milieux annexes.

Les fonctions relevant de la morphologie et de l'hydraulique sont à la base de la détermination des EBF comme prépondérantes dans le fonctionnement global d'un cours d'eau.

La **biogéochimie** intègre les fonctions soutenant les services liés à la qualité physico-chimique.

Les fonctions soutenant des services en lien avec la connexion des cours d'eau aux nappes phréatiques sont incluses dans le domaine de l'**hydrogéologie**.

Enfin, les fonctions liées à la **biologie** soutiennent les services liés aux interactions entre la faune et la flore.

Préserver ces grandes fonctions écologiques, c'est préserver et développer les **services rendus** par l'environnement à l'homme. Ces fonctions, ainsi que leurs domaines, sont interdépendantes. En effet, la satisfaction de l'une ou l'autre permet de s'approcher du bon fonctionnement dans un autre domaine. La Figure 2 ci-dessous retrace certaines relations entre les fonctions de l'espace de bon fonctionnement.

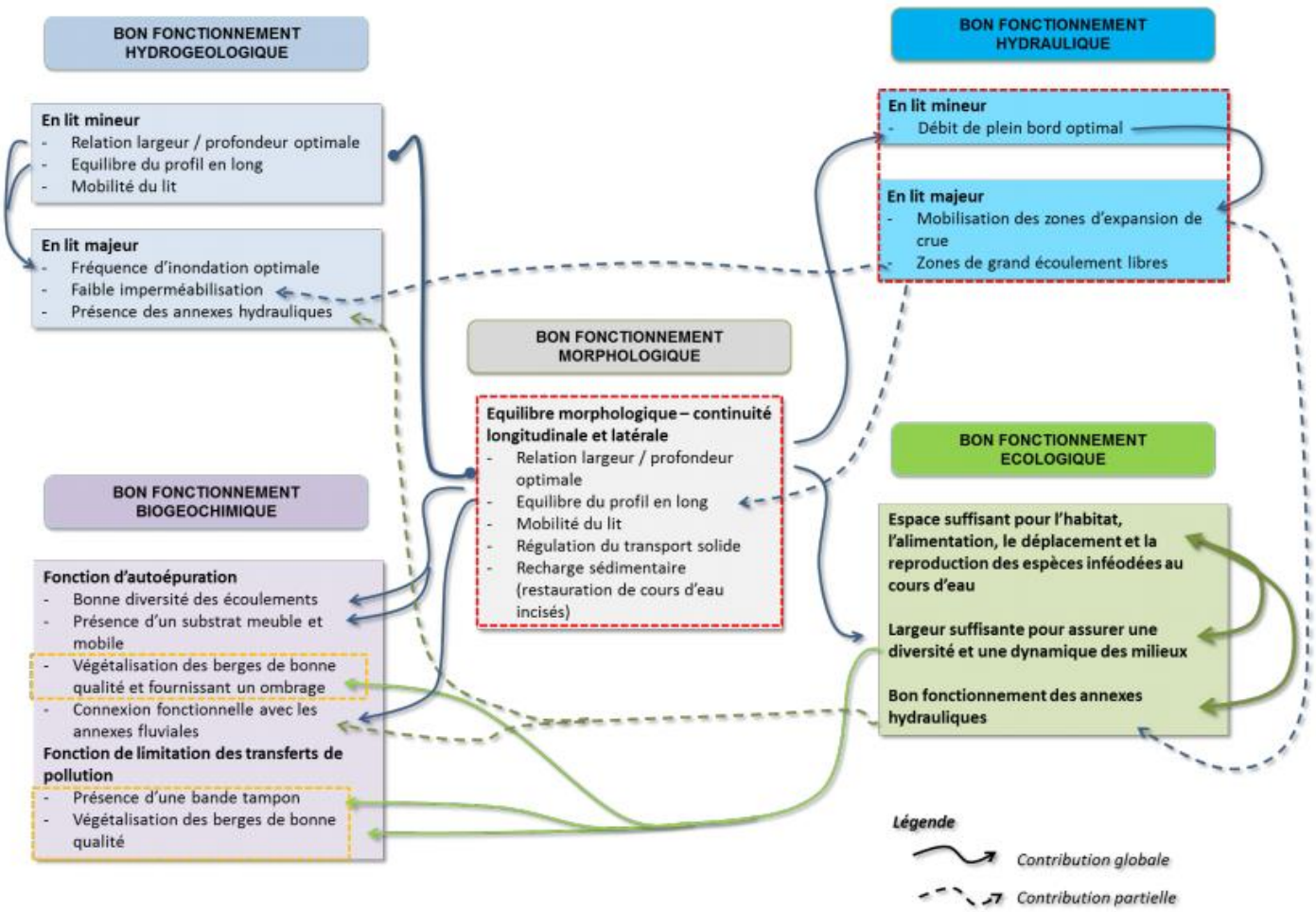


Figure 2 : Esquisse des relations entre les différentes fonctions au sein de l'EBF (source : SDAGE RM 2016-2021[13])

La notion de bon fonctionnement apparaît lorsque toutes les fonctions ont l'espace pour se réaliser et que le système oscille autour d'un état d'**équilibre dynamique**, c'est-à-dire lorsqu'il a atteint une morphologie caractéristique et que la charge est ajustée (dépôt, érosion…) (GAUTIER J-N, 2009)[17].

L'**espace de bon fonctionnement optimal** est défini comme l'espace où le fonctionnement se rapproche le plus possible d'un fonctionnement sans contraintes (naturelles ou anthropiques). Une extension de cet espace ne permettrait pas aux fonctions écologiques de se réaliser significativement mieux[11].

L'**espace de bon fonctionnement nécessaire** correspond à l'espace minimal au sein duquel les fonctions écologiques peuvent s'exprimer durablement et soutenir les services rendus par l'environnement. Selon le niveau de satisfaction de ces fonctions, il sera possible ou non d'atteindre le bon état écologique[11].

1.2.2. … au regard du style fluvial…

Les fonctions écologiques s'exprimant dans un cours d'eau ou une portion d'un cours d'eau, ainsi que l'espace de fonctionnement associé, évoluent en fonction du style fluvial de celui-ci.

Le **style fluvial** correspond à une typologie basée sur les caractéristiques géomorphologiques du lit du cours d'eau. Les fonctions hydrauliques et écologiques vont dépendre de celles-ci.

Différents styles fluviaux peuvent être définis pour un même linéaire étudié :

- Le **style fluvial actuel**
- Le **style fluvial naturel**
- Le **style fluvial de référence**

Le **style fluvial naturel** ou **style fluvial historique** est celui qu'aurait le cours d'eau sans aucune contrainte anthropique. La connaissance du style fluvial naturel permet de connaître l'ampleur des modifications apportées par l'homme. Le **style fluvial actuel** est grandement influencé par les aménagements réalisés (endiguement, recalibrage, curage…). Le **style fluvial de référence** correspond au style que prendrait le cours d'eau si les contraintes anthropiques s'exerçant étaient supprimées et que les processus géomorphologiques pouvaient se réaliser normalement. Ce style fluvial est dit « résilient » [11].

Le Guide technique du SDAGE Rhône Méditerranée - *Délimiter l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau*[11], énumère cinq styles fluviaux différents :

- **Rectiligne à forte pente**
- **Rectiligne à bancs alternés**
- **A méandres**
- **En tresses**
- **Anastomosé**

Seuls les trois premiers types de styles fluviaux ont été rencontrés dans le cadre de l'étude décrite ci-après.

La limite entre chacun de ces styles n'est pas clairement définie. La classification de Rust décrite par Bravard et Petit (2000)[2] permet par exemple de classer ces styles fluviaux selon des critères de sinuosité et de nombre de chenaux (voir Figure 3 ci-dessous).

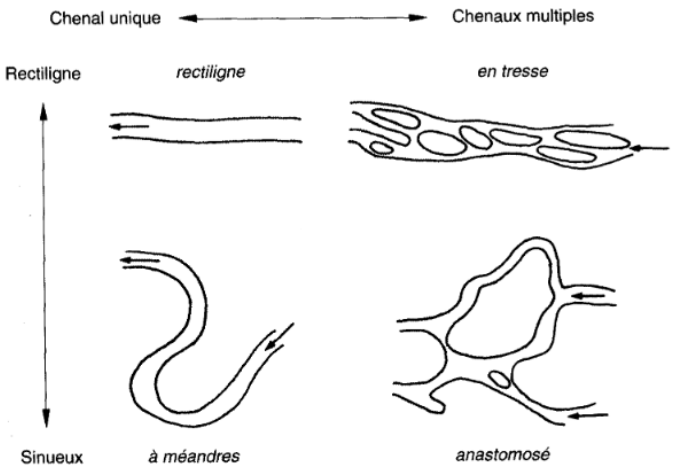
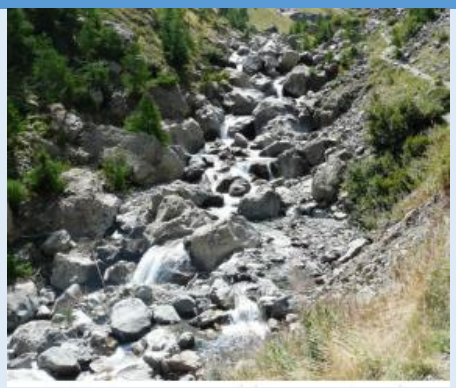


Figure 3 : Types de styles fluviaux selon la sinuosité et le nombre de chenaux (BRAVARD et PETIT, 2000)[2]

Les différentes typologies de cours d'eau sont décrites dans le Tableau 1 page suivante.

TYPOLOGIE DU COURS D'EAU	CARACTERISTIQUES	ILLUSTRATION
Rectiligne à forte pente / Torrentiel	Pente forte, torrent, granulométrie grossière, tracé rectiligne	 *Torrent de la Selle à Vallouise (05)* *(source Guide du SDAGE RM 2016-2021[11])*
Rectiligne à bancs alternés	Tracé rectiligne, chenal d'étiage unique et sinueux, charriage important de matériaux avec une granulométrie assez grossière	 *l'Onde à Vallouise (05)* *(source Guide du SDAGE RM 2016-2021[11])*
A méandres migrants	Tracé sinueux, déplacement longitudinal des méandres	 *L'Aigue-Vive à Rousset (13) en 1953* *(données CRIGE PACA)*
A méandres développés	Tracé sinueux, extension latérale des méandres	 *L'Arc à Berre-L'Etang (13)* *(Source : Geoportail)*

En tresses*	*Fort apport sédimentaire impossible à évacuer par le débit liquide, chenaux d'étiage multiples*	 *L'Asse à Brunet (04) (source Geoportail)*
Anastomosé*	*Multiple chenaux stabilisés, style rare en France aujourd'hui*	 *le Rhône à Brégnier-Cordon (01), actuellement seuls quelques chenaux sont encore irrigués (source Geoportail)*

** Styles fluviaux non rencontrés dans l'étude du bassin versant de l'Arc*

Tableau 1 : Description des différentes typologies de styles fluviaux

1.2.3. … pour permettre un développement durable des territoires

D'après le SDAGE Rhône-Méditerranée 2016-2021[13], « La restauration d'un bon fonctionnement hydrologique et morphologique doit être génératrice de bénéfices durables, tant pour les milieux, quelle que soit la dimension des masses d'eau et leur localisation, que pour les activités humaines au travers des services rendus par les écosystèmes». Ainsi, restaurer des EBF ne sert pas seulement à permettre le retour des fonctionnalités naturelles de l'hydrosystème mais doit également être compatible avec la valorisation des usages et les activités socio-économiques.

1.3. La portée des EBF

1.3.1. Un outil pour atteindre le « bon état » des cours d'eau

L'importance de la prise en compte de la notion des EBF (ou espace de mobilité selon les cas) s'est accentuée avec la signature de la Directive Cadre sur l'Eau en 2000 (Directive 2000/60/CE)[28] par les états membres de l'Union Européenne (UE). Celle-ci a imposé aux états d'obtenir le bon état des masses d'eau pour une première échéance fixée à 2015. Les masses d'eau pour lesquelles cet objectif n'a pu être atteint ont pu obtenir une dérogation pour 2021. Une seconde dérogation peut être obtenue pour finalement atteindre le bon état en 2027. L'outil des SDAGE en France est alors apparu comme le plus adapté pour transposer cette politique européenne à un échelon plus locale[11].

Il est aujourd'hui admis que le bon état écologique ne peut être atteint si le cours d'eau ne dispose pas d'un espace lui permettant d'avoir une dynamique naturelle et de réaliser les fonctions liées à

l'hydrosystème. Aussi, même si la DCE n'évoque pas directement les espaces de mobilité ou les espaces de bon fonctionnement, il semble inévitable de considérer l'hydromorphologie et ces espaces pour s'assurer de la qualité des fleuves et rivières.

1.3.2. Le SDAGE Rhône-Méditerranée et les SAGE

Le SDAGE Rhône-Méditerranée est moteur dans la prise en compte des espaces de mobilités, désormais espaces de bon fonctionnement. Ainsi, ceux-ci étaient déjà mentionnés dans le SDAGE 2010-2015[12] et sont un élément important du SDAGE actuel. En effet, les deux premières dispositions de la 6ème orientation fondamentale du SDAGE Rhône-Méditerranée 2016-2020[13] concernent les EBF :

« Orientation fondamentale 6A : Agir sur la morphologie et le décloisonnement pour préserver et restaurer les milieux aquatiques

➔ **A. Prendre en compte l'espace de bon fonctionnement**

- **Disposition 6A-01 :** Définir les espaces de bon fonctionnement des milieux aquatiques, humides, littoraux et eaux souterraines
- **Disposition 6A-02 :** Préserver et restaurer les espaces de bon fonctionnement des milieux aquatiques »

Le SDAGE sert de cadre général pour élaborer des Schémas d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SAGE) dans le bassin. Les SAGE sont réalisés à une échelle plus locale, généralement un cours d'eau et ses affluents, et comportent un aspect réglementaire porté par le Plan d'Aménagement et de Gestion Durable (PAGD).

1.3.3. Prise en compte des EBF par les dispositifs existants

La définition des espaces de bon fonctionnement et leur considération ne sont en soit pas une obligation. Il est néanmoins conseillé de prendre en considération les espaces délimités pour l'élaboration d'autres outils ayant eu une visée réglementaire (Plan de prévention du risque inondation (PPRI), périmètres de protection des captages d'eau potable, site Natura 2000…), mais aussi de documents de zonage d'urbanisme comme les plans locaux d'urbanisme (PLU) [11].

2. Contexte générale de l'étude

2.1. Présentation du site d'étude : le bassin versant de l'Arc

2.1.1. Présentation générale

L'Arc est un fleuve méditerranéen qui prend sa source à Pourcieux dans le département du Var (83) et se jette dans l'Étang de Berre (lagune à proximité de la mer Méditerranée) à Berre-l'Etang dans le département des Bouches-du-Rhône (13), en Provence-Alpes-Côte d'Azur (voir Figure 4). Avec ses 20 affluents principaux, ils constituent le réseau hydrographique principal des masses d'eau du bassin versant. L'Arc couvre, d'après le PAGD du SAGE du bassin versant de l'Arc[7] un bassin versant de 715 km², soit près de quatre fois la commune d'Aix-en-Provence (13) qu'il traverse. Avec ses principaux affluents, ils couvrent un linéaire de plus de 300 km (dont 85 km uniquement pour l'Arc).

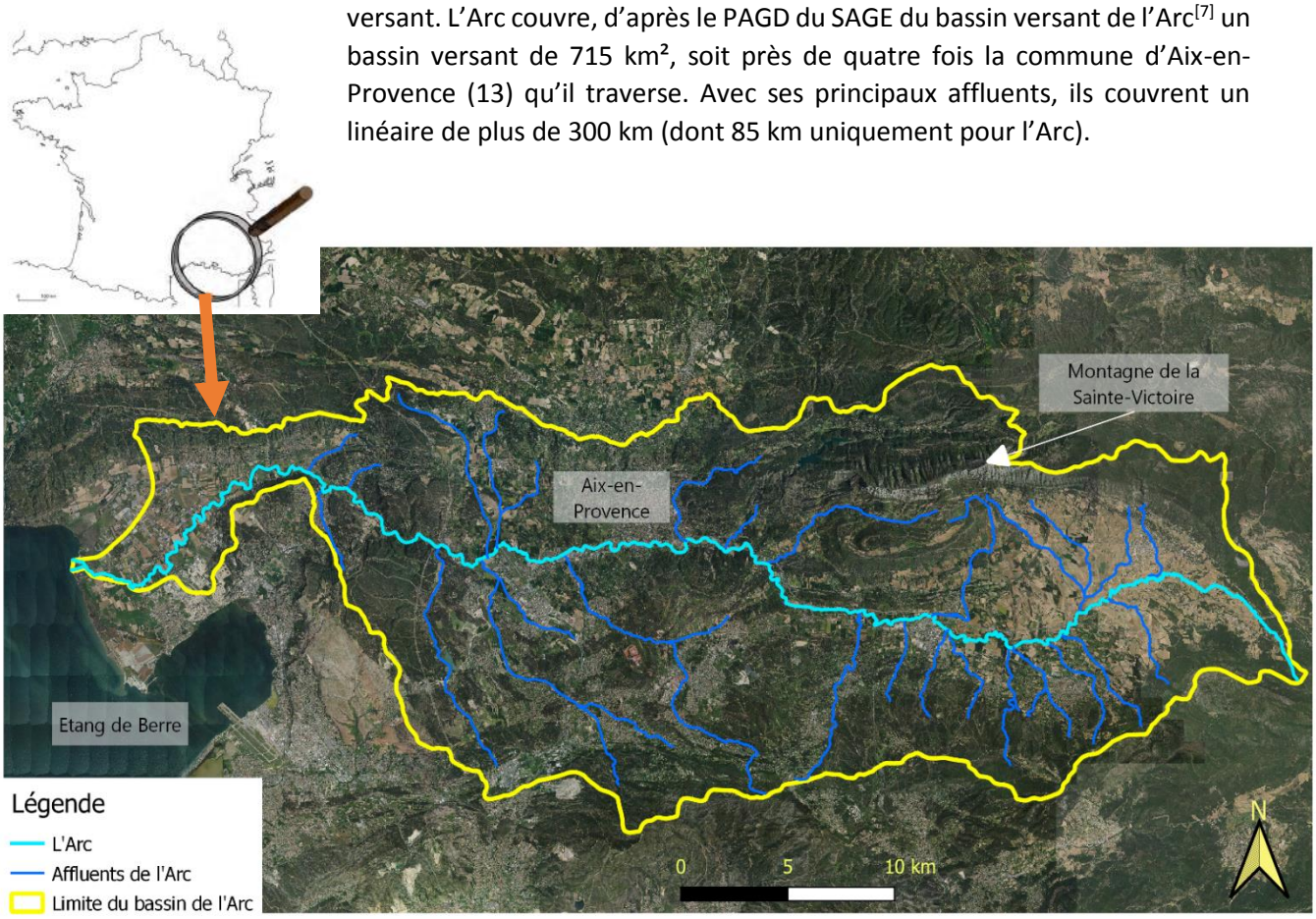


Figure 4 : Localisation du bassin versant de l'Arc

Le bassin versant s'étend sur 30 communes dont 15 riveraines de l'Arc (Figure 5 page suivante).

A l'échelle de son bassin, la pente de l'Arc évolue entre 0,19% et 7,65% avec une moyenne inférieure à 1% et la largeur de son lit majeur oscille entre 130 m et 1 400 m, notamment par l'alternance de passage en plaine alluviale et dans des secteurs plus ou moins encaissés, comme le secteur au sud-est d'Aix-en-Provence à Roquefavour.

Dans ce contexte, le style fluvial de l'Arc peut naturellement osciller entre de nombreux stades à savoir torrent à forte pente, rectiligne à bancs, à méandres migrants et/ou localement développés.

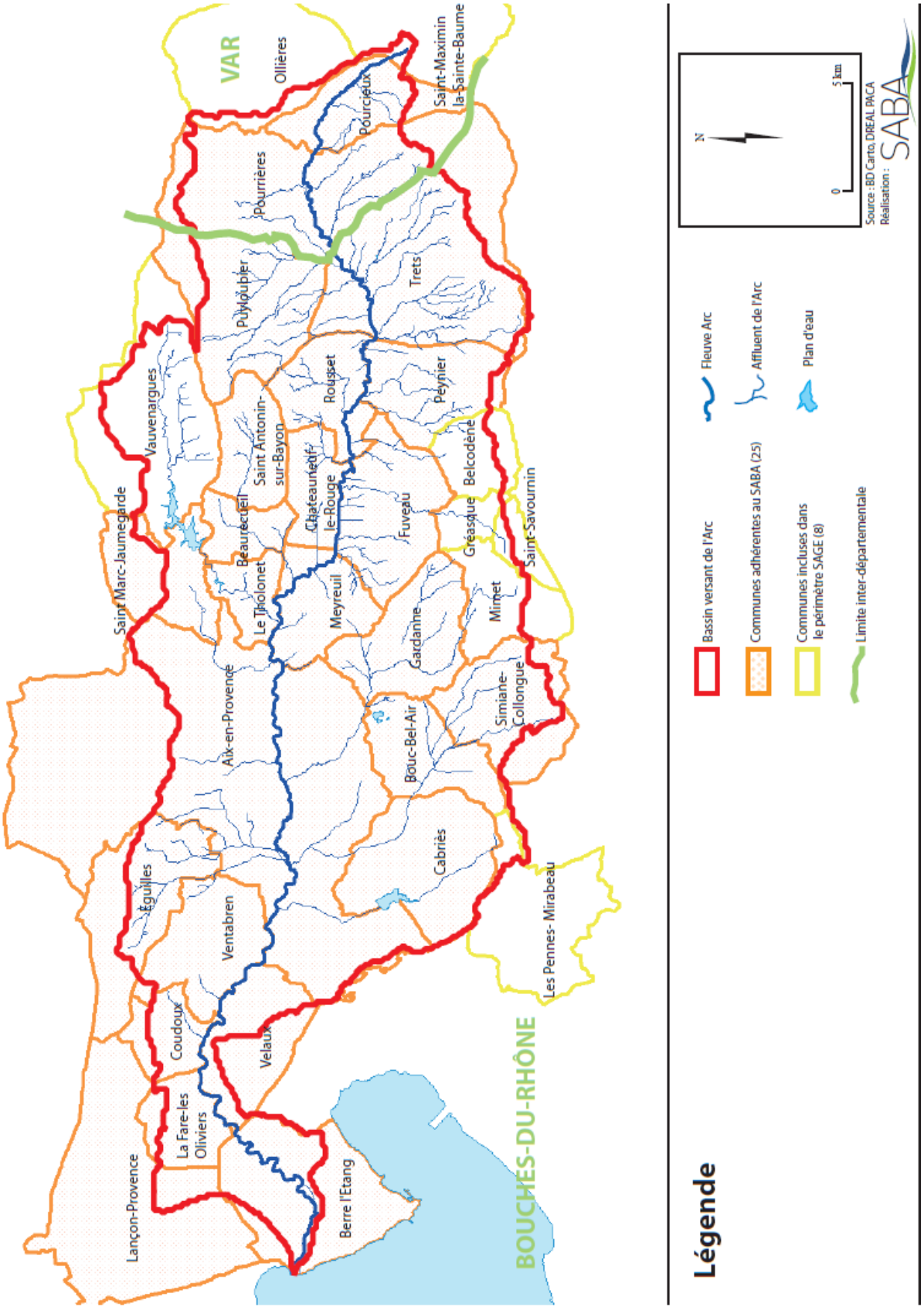


Figure 5 : Communes du bassin versant de l'Arc (Source : PAGD du SAGE de l'Arc, 2014[7])

2.1.2. Les enjeux et pressions du territoire

Plus de **la moitié du territoire du bassin versant correspond à des espaces naturels**. Il s'agit notamment d'espaces forestiers situés en majorité dans les reliefs en limite de bassin, au nord, à l'est et au sud du territoire[7].

Un quart du territoire est recouvert de surfaces agricoles. Les parcelles agricoles sont notamment cultivées pour de la **viticulture** et des cultures céréalières dans la haute vallée de l'Arc. Au niveau du bassin d'Aix, se retrouve du **maraîchage** et de la **céréaliculture**. Enfin, on retrouve de l'**oléiculture**, de la viticulture ainsi que des cultures sous serre dans la basse vallée de l'Arc[7].

La dernière partie du bassin versant correspond à des **espaces urbanisés**. Ceux-ci sont principalement répartis autour de l'Arc et de ses affluents. La commune d'Aix-en-Provence, située au cœur du bassin versant comprend près de 50 % de la population du territoire (plus de 140 000 habitants pour un bassin qui en compte 290 000). A noter que la densité de population de près de **400 hab/km² est quatre fois plus importante que la densité moyenne française**. Ces espaces urbanisés se sont étendus au fil des années, notamment dans la périphérie d'Aix-en-Provence[7].

La Figure 6 ci-dessous montre l'occupation des sols sur le territoire.

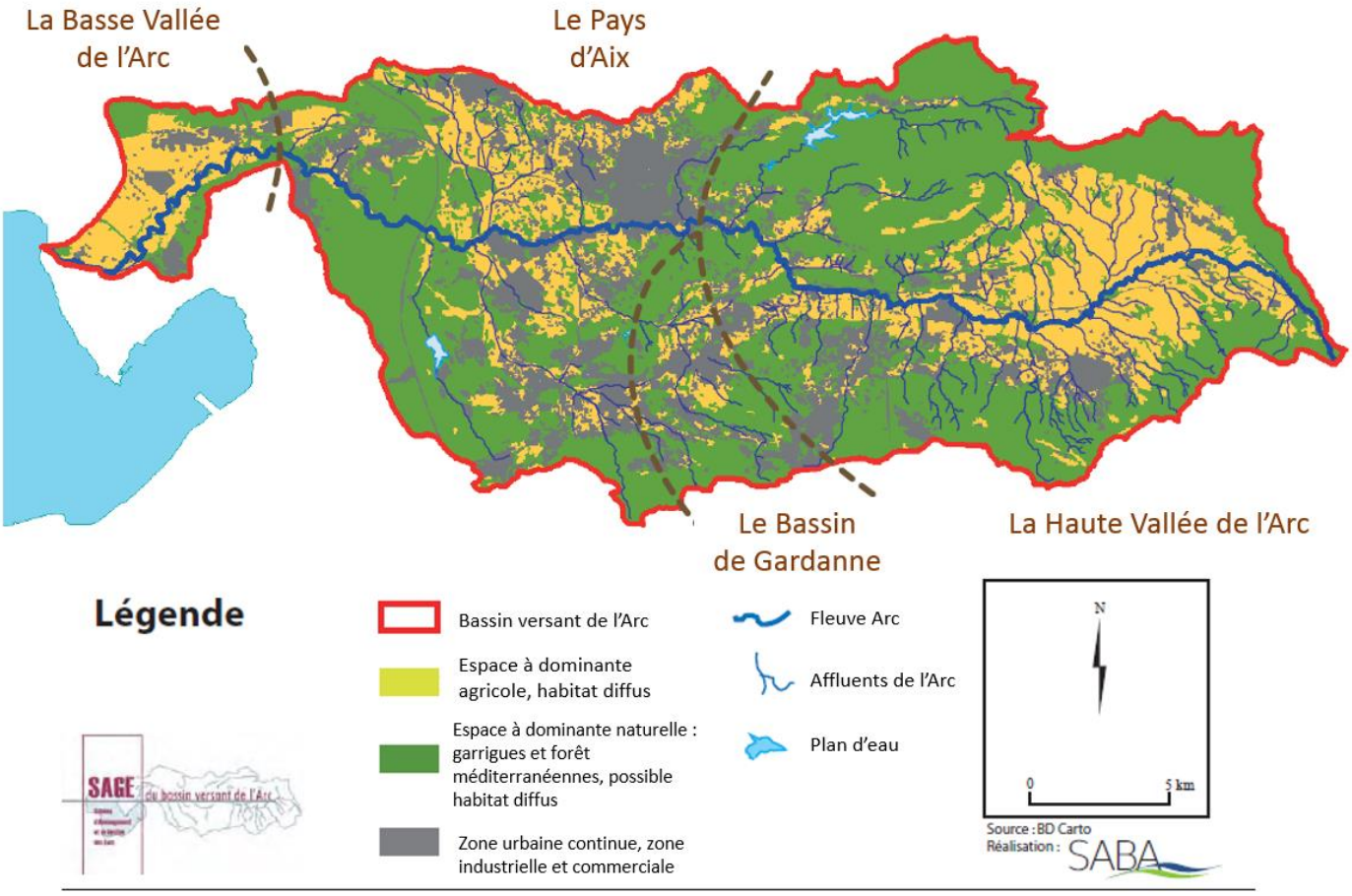


Figure 6 : Occupation des sols sur le bassin versant de l'Arc (Source : PAGD du SAGE de l'Arc[7])

2.2. Contexte de l'étude

La mission abordée dans ce mémoire fait partie d'une **étude commandée par le Syndicat d'Aménagement du Bassin de l'Arc (SABA)** (logo Figure 7). Le SABA[27] est un syndicat de rivière de type syndicat mixte regroupant vingt-cinq communes membres ainsi que deux établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) à fiscalité propre (la métropole Aix-Marseille-Provence (13) et la Communauté d'Agglomération Provence Verte (83)).

Figure 7 : Logo du SABA (Source : SABA[27])

Le SABA a mis en place un SAGE dès 2001 et celui-ci a été renouvelé en 2014. C'est en lien avec ce SAGE actuel et la révision prochaine de celui-ci qu'a été commandée l'étude pour la ***Définition de la stratégie de réduction de l'aléa inondation et de l'Espace de Bon Fonctionnement des cours d'eau du bassin versant de l'Arc***. Cette étude comprend deux missions.

La **définition de la stratégie globale de réduction de l'aléa inondation** est en lien avec des crues d'intensité et de fréquence variables sur le bassin versant (44 crues recensées dans les archives pour le 20ème siècle) ainsi qu'avec l'augmentation des enjeux sur le territoire et s'inscrit dans la continuité du Programme d'Action de Prévention des Inondations (PAPI) d'Intention de l'Arc.

La **définition de l'EBF** est une action de la feuille de route du SAGE qui se substitue à un contrat de rivière sur le bassin de l'Arc. Elle fait suite au constat de l'augmentation des pressions sur les espaces riverains du cours d'eau (augmentation de l'urbanisation et de l'imperméabilisation des sols) et sur les cours d'eau eux-mêmes (mauvaise pratique de protection de berge, atteinte à la continuité écologique).

L'ensemble des missions visent à un **diagnostic** sur le territoire et à une **élaboration de programmes d'actions** qui viendront alimenter la révision prochaine du SAGE sur la base de la définition de l4EBF mais aussi de zones d'expansion de crues (ZEC). Il est ainsi envisagé, concernant les espaces de bon fonctionnement, incluant entre autres les espaces d'étalement des crues (périmètre hydraulique), de réglementer ces espaces pour les préserver et les restaurer. Les périmètres techniques produits par l'étude ainsi que le programme d'actions seront donc présentés aux membres, essentiellement des élus locaux, de la Commission Locale de l'Eau (CLE), assemblée délibérante pour l'élaboration du SAGE. Après concertation, ce sont eux qui définiront les espaces de bon fonctionnement définitifs (dits concertés) et associeront une réglementation sur ces espaces.

Pour rappel, le mémoire ici présent fait uniquement référence à la mission concernant la définition des EBF sur le bassin versant de l'Arc. Néanmoins, les résultats de l'une et l'autre des missions demeurent liés puisqu'une zone d'expansion de crues (ZEC) va généralement être incluse dans l'espace de bon fonctionnement comme correspondant à un espace où les fonctions de l'hydrosystème liée à l'hydraulique peuvent s'exprimer. Le présent rapport se concentre sur la phase de diagnostic et la définition d'une méthodologie, appliquée à une zone-test du bassin versant, pour délimiter les espaces de bon fonctionnement optimal et nécessaire.

2.3. SCE et son rôle dans la mission

Par suite de l'appel d'offres en mars 2020, le bureau d'études SCE a obtenu le marché de l'étude décrite dans le paragraphe précédent. SCE est la société principale du groupe Keran[26]. Son siège est situé à Nantes et elle comprend 11 agences en France dont l'agence de Marseille. SCE réalise notamment des études dans les domaines de l'eau, l'énergie, l'aménagement urbain et possède donc une compétence et un domaine propre Milieux Aquatiques et Protection contre les Inondations (MAPI), compétence à laquelle se rattache la gestion de cette étude.

3. Méthodologie appliquée à l'étude

La partie suivante vise à détailler la méthodologie suivie pour déterminer l'espace de bon fonctionnement. Elle correspond donc à une adaptation et à une appropriation de la méthode développée par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse pour le SDAGE Rhône-Méditerranée 2016-2021 et exposée dans le Guide technique du SDAGE - *Délimiter l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau*[11].

3.1. Sectorisation du périmètre d'étude

Pour permettre un diagnostic pertinent et ainsi obtenir un espace de bon fonctionnement cohérent à l'échelle du bassin versant, le secteur d'étude est segmenté. Cette sectorisation est basée notamment sur les critères suivants :

- Géologie,
- Pente,
- Hydrologie (réseau hydrographique, confluences),
- Géomorphologie des lits majeurs et mineurs,
- Occupation du sol (zone urbanisée, zone boisée…).

La sectorisation est de deux types (voir Figure 8) :

➔ Les « **unités fonctionnelles** » (UF) définissent ici un secteur géographique (sous-bassin versant) dans lequel les fonctionnements géomorphologiques sont globalement homogènes et indépendants des interventions anthropiques.

➔ Les « **unités homogènes** » (UH) définissent un tronçon (linéaire de cours d'eau) où les réponses morphodynamiques des cours d'eau sont globalement homogènes, c'est-à-dire où une pression similaire aura un impact sur l'équilibre dynamique et produira une altération sur les milieux aquatiques de même ampleur.

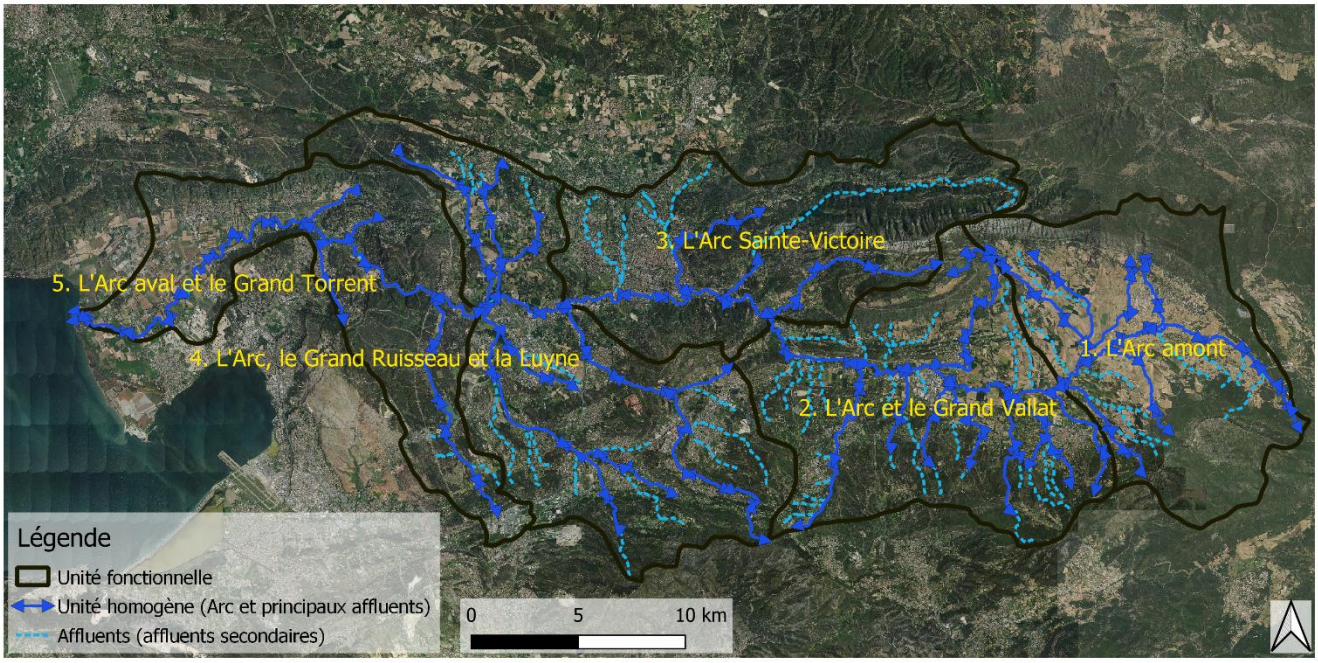


Figure 8 : Sectorisation du bassin versant de l'Arc dans le cadre de l'étude

3.2. Réalisation de l'état des lieux et du diagnostic partagé

L'objectif de la **phase de diagnostic** est de permettre la délimitation de l'EBF sur la base des résultats de différents diagnostics (hydrologique, hydraulique, hydromorphologique, écologique, biogéochimique, hydrogéologique et socio-économique).

Ces diagnostics sont produits sur la base de données de différentes origines (synthèses de données existantes, investigations de terrain…).

3.2.1. Investigations de terrain

L'objectif des **investigations de terrain** est de **déterminer de façon exhaustive l'état général des cours d'eau** et les pressions qui s'exercent dessus. Au vu du contexte de l'étude et des données déjà connues sur le terrain, il n'a pas semblé pertinent de faire un suivi de l'ensemble du linéaire du cours d'eau. L'étude de terrain consiste donc en une étude ponctuelle de chaque UH (étude par points de contact) avec, pour chacun, plusieurs points d'études.

Selon la nature des cours d'eau et leurs caractéristiques, le protocole d'étude varie entre trois catégories : **l'Arc et ses affluents principaux** sont expertisés en intégralité ; **certains des tronçons** de ces cours d'eau sont étudiés de façon plus approfondis ; les **affluents secondaires** sont étudiés moins exhaustivement.

L'annexe 1 synthétise les éléments de terrains étudiés et relevés comme le fonctionnement hydrologique du site, les éléments morphologiques (érosion, incision…). Toutes les données recueillies sur le terrain ont été directement enregistrées sur site, par le biais d'une tablette, au format SIG (Système d'Information Géographique) afin d'en faciliter l'exploitation, la Figure 9 donne un exemple des éléments relevés sur le terrain.

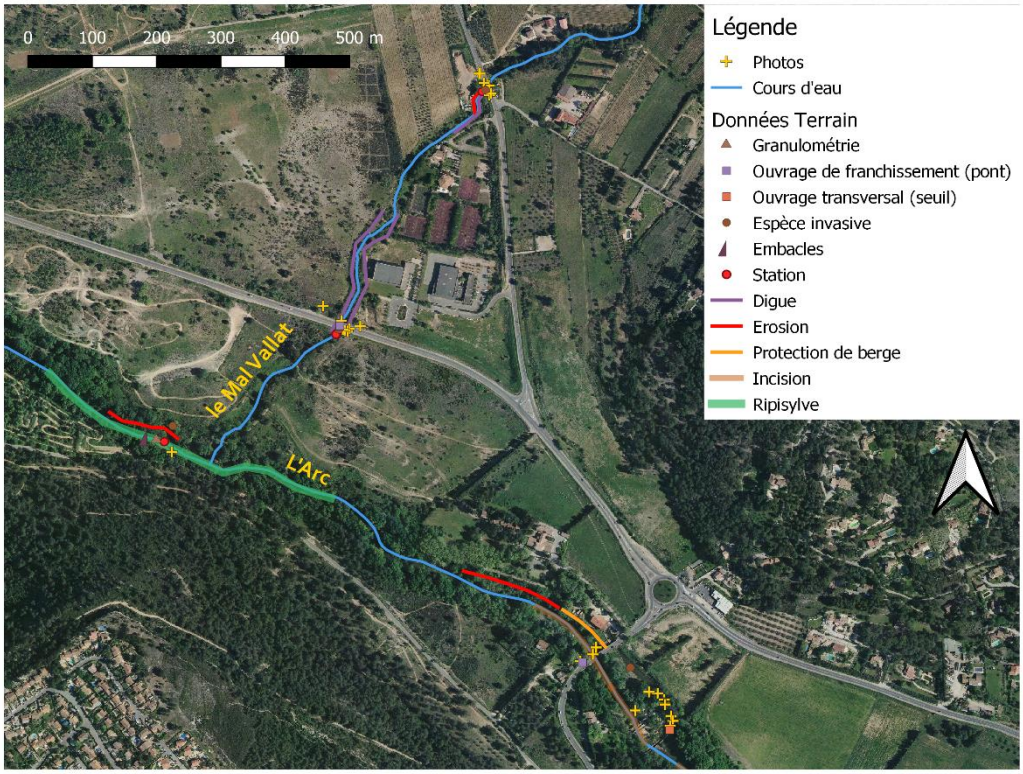


Figure 9 : Extrait de la carte des relevés de terrain (l'Arc à la confluence avec le Mal Vallat)

En complément de ces analyses faites pour chaque station (point d'étude ponctuel) sur l'Arc et ses affluents, des **granulométries de type Wolman** ainsi que des **lithologies** sur la base d'érosion significatives (voir exemple Figure 10) ont été réalisées pour certains sites afin de **caractériser le contexte sédimentaire**.

UF4
Tronçon : ARC_13
Date : 04/05/2021

Épaisseur totale : 2,5 m

Figure 10 : Lithologie d'une berge de l'Arc aux Milles (Arc_13)

Une granulométrie de type Wolman consiste en une étude de la distribution de la taille des grains selon le protocole développé par Wolman en 1954[29] consistant en l'analyse du diamètre dans la largeur (selon l'axe b) de 100 échantillons prélevés dans la fraction mobilisable d'un cours d'eau.

Dans le cadre de l'étude, 18 jours de terrain ont été nécessaires pour étudier tout le linéaire des cours d'eau (**plus de 300 points d'échantillonnage** [« stations »] sur le linéaire).

3.2.2. Diagnostic hydromorphologique

Le **diagnostic hydromorphologique** traduit le fonctionnement morphologique et sédimentaire du cours d'eau.

Il se base, pour le fonctionnement actuel, sur les investigations de terrain réalisées et décrites dans la partie précédente et permet d'obtenir une analyse des grandeurs morphodynamiques sur le bassin versant. Ce diagnostic comprend entre autres les éléments suivants :

- Exploitation des données granulométriques ;
- Analyse de la géométrie du lit ;
- Etude des grandeurs morphodynamiques (débit de plein bord, puissance spécifique…) ;
- Analyse du contexte sédimentaire ;

En complément de **l'étude du fonctionnement actuel**, permettant de déterminer le **style fluvial actuel**, une **analyse des évolutions historiques** de l'Arc et de certains affluents est réalisée dans la plaine alluviale, où se concentrent les enjeux prioritaires de mobilité latérale et d'aménagement du lit majeur. Elle se base principalement sur l'étude de tracés en plan pour déterminer la **bande active des**

cours d'eau au fil des décennies, ainsi que sur le **profil en long de l'Arc** en exploitant notamment le profil fait par les Grandes Forces Hydrauliques (GFH) en 1949 (Figure 11).

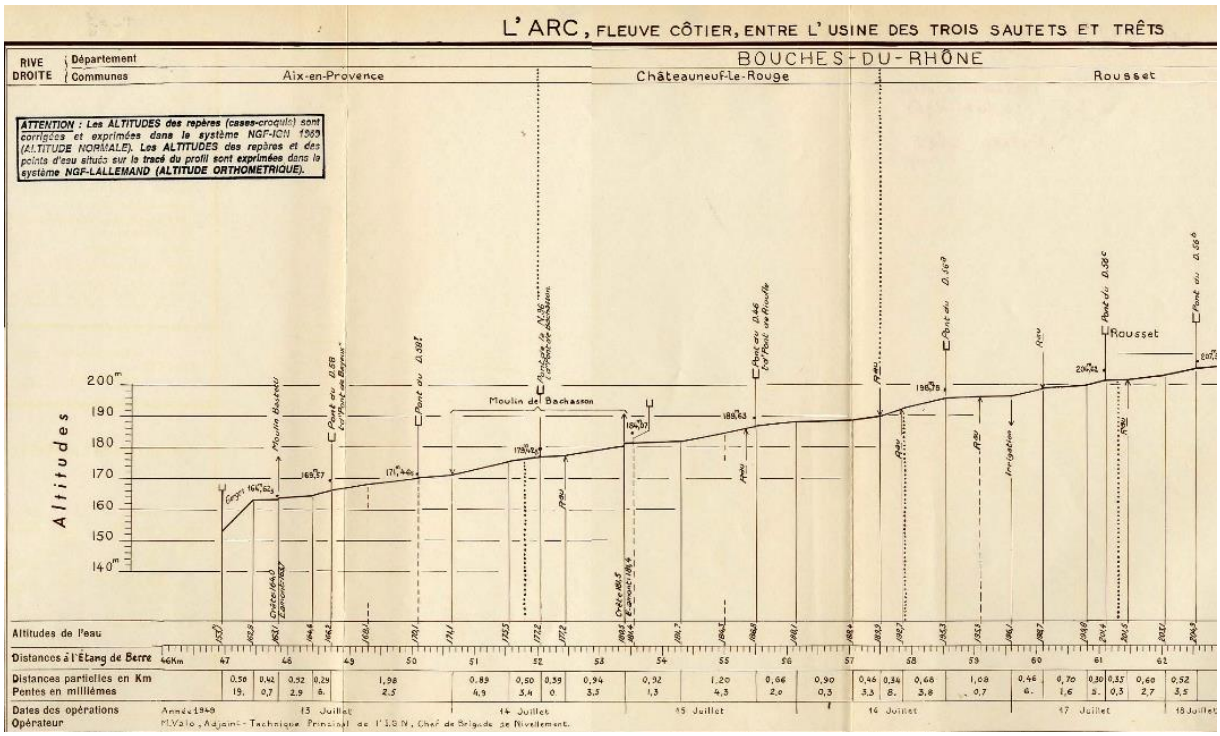


Figure 11 : Extrait du profil en long de l'Arc produit par les Grandes Forces Hydrauliques en 1949

Concernant **l'analyse diachronique de l'évolution de la bande active**, les données cartographiques suivantes ont été comparées, après avoir été numérisées, depuis des orthophotographies ou bien des cartes issues des archives départementales (voir Figure 12 page suivante) :

- **Cadastre napoléonien entre 1810 et 1832** :
  Celui-ci présente une incertitude par la production des cartes. Il est ainsi constaté, que bien que précis dans l'ensemble certaines parties du tracé ne semblent pas totalement exactes. Ainsi, lorsque le cours d'eau correspond à la limite entre deux cartes, en général en limite de communes, les tracés sur chacune des deux cartes ne sont pas toujours totalement équivalents. Dans la situation présente, ces incohérences se retrouvent sur 18,8% du linéaire étudiés où les communes sont délimitées par le cours d'eau. Cette erreur constitue une incertitude sur le tracé exact des cours d'eau mais semble relativement faible et les données du cadastre napoléonien sont bien pertinentes pour délimiter les espaces de divagation historique ;
- **Photo aériennes et satellitaires de 1953, 1998 et 2018** (IGN - Institut National de l'Information Géographique et Forestière)

Cette analyse historique de certains cours d'eau du bassin versant de l'Arc permet de mieux comprendre le fonctionnement du bassin et les pressions qui se sont exercées sur les rivières et l'Arc. Cette connaissance permet d'établir le **style fluvial de référence** des cours d'eau, c'est-à-dire le style fluvial qui s'établirait si toutes les pressions étaient retirées.

Figure 12 : Evolution de la bande active de l'Arc à Berre-L'Etang (13)

Les éléments du diagnostic morphologique permettent dans un premier temps de **définir les périmètres morphologiques (nécessaire et optimal) à la base de l'EBF**.

3.2.3. Diagnostic hydraulique

Le **diagnostic hydraulique** doit notamment permettre de délimiter des espaces potentiels pour l'écoulement et l'expansion des crues. Pour cela, les données produites dans le second volet de l'étude concernant l'aléa inondation et sa réduction, ainsi que les données existantes, produites par d'autres bureaux d'études notamment, en termes de crues historiques, de zones inondables et de cartes d'aléas sont exploitées. Ces données vont permettre de **définir des périmètres hydrauliques** et d'**étendre les périmètres morphologiques pour prendre en compte les mobilités latérales fréquentes des cours d'eau**.

3.2.4. Diagnostic du contexte environnemental (hydrogéologie, biogéochimie, biologie)

En complément du diagnostic hydromorphologique et du diagnostic hydraulique, le **contexte environnemental** du bassin versant a aussi été étudié. Le contexte environnemental comprend les éléments relatifs au contexte biologique, biogéochimique et hydrogéologique. Le bon fonctionnement d'un cours d'eau étant également lié à la qualité des habitats aquatiques, à la capacité d'autoépuration des milieux, aux échanges entre la nappe et la rivière… Ces éléments garantissent la viabilité de l'hydrosystème.

Les données à l'origine de ce diagnostic sont généralement extraites d'inventaires d'études précédentes ou de documents réglementaires (zones Natura 2000). Concernant l'aspect **biologique**,

les données principalement étudiées sont les zones humides, zones Natura 2000… Le contexte **hydrogéologique** se base sur les données des couches géologiques affleurantes, et notamment sur la localisation de roches calcaires ou de sédiments récents (couches Fz, Fy, Fx), ainsi que les données relatives à l'occupation et l'imperméabilisation des sols. Enfin, le contexte **biogéochimique** concerne la localisation de stations d'épuration des eaux usées (STEP) ou encore la qualité des eaux en lien avec la pression de l'occupation des sols.

Certains éléments biologiques, biogéochimiques et hydrogéologiques relevés permettent de **compléter la définition de l'EBF**, les périmètres pouvant être agrandis sur certaines parties du territoire pour **inclure des zones spécifiques** nécessaires pour l'accomplissement de ces fonctions de l'hydrosystème.

3.2.5. Diagnostic socio-économique

La connaissance des **usages et enjeux socio-économiques**, sur la base des observations réalisées sur le terrain ainsi que sur l'analyse de différentes données permet d'apprécier le fonctionnement des cours d'eau du bassin de l'Arc au regard des **pressions exercées par l'homme**. Par exemple, les données de Corine Land Cover, de la BD Topo (Base de Données Topographiques) de l'IGN (Institut National de l'Information Géographique et Forestière) ou du registre parcellaire graphique (RPG) permettent d'obtenir une caractérisation de l'occupation du sol (zones urbaines, zones commerciales, infrastructures…) mais aussi des types d'agriculture pratiqués dans le bassin d'étude. L'étude des ouvrages sur les rivières ainsi que les données du ROE (Référentiel national des Obstacles à l'Ecoulement) apportent des informations sur des points ponctuels, liés aux activités humaines (transport, industrie…), influençant la dynamique des cours d'eau.
Le style fluvial de référence diffère parfois du style fluvial actuel du fait de fortes pressions anthropiques. Dans l'optique de la définition de l'EBF, l'intérêt de considérer le style fluvial de référence comme un objectif à atteindre semble à première vue cohérent puisque cela sous-entendrait que les pressions exercées sur le milieu seront amenées à diminuer pour atteindre le bon état. Néanmoins, il ne semble pas toujours envisageable de supprimer l'intégralité de ces pressions liées à certains enjeux socio-économiques qui ne seront jamais remis en cause. Le but de l'étude sur le bassin de l'Arc étant de délimiter des périmètres techniques qui seront présentées aux membres élus de la CLE, il semble ainsi cohérent de considérer certains enjeux socio-économiques comme étant immuables sur les prochaines décennies (zones fortement urbanisées…). L'intégration de ces enjeux, bien que modeste comme le but premier est de définir des espaces techniques cohérents au regard du fonctionnement de l'hydrosystème et non des activités humaines, permet néanmoins **d'augmenter l'acceptabilité de ces périmètres.**
L'intégration de ces connaissances socio-économiques permet de définir, au regard des styles fluviaux actuels et de référence, le **style fluvial objectif**. Il correspond au style fluvial jugé potentiellement atteignable en protégeant l'espace de bon fonctionnement. La définition de l'EBF se base donc sur le style fluvial objectif.

3.3. Détermination de l'EBF

3.3.1. Une zone d'étude « test » pour valider la méthode

Dans le cadre de l'étude, pour permettre un calage de la méthode, un sous-bassin test a été choisi. L'objectif est de procéder à plusieurs analyses pour fixer un protocole général pour la définition de l'EBF sur l'ensemble du bassin versant de l'Arc, ce protocole devant être validé par le maître d'ouvrage pour poursuivre son application.

Le bassin test a été choisi sur des critères de représentativité du territoire, l'objectif étant d'étudier un secteur suffisamment exhaustif. Les critères appliqués pour sa détermination ont été les suivants :

- Représentativité de tronçons à l'amont et à l'aval de bassins versants ;

- Représentativité de tous les styles fluviaux observés sur le bassin versant ;
- Nature des pressions exercés sur le secteur de différents types (zones urbaines, agricoles…) ;
- Représentativité de l'Arc.

3.3.2. Détermination des périmètres techniques optimaux et nécessaires

La détermination des périmètres de l'EBF, comme préconisée par le guide du SDAGE RM[11], se base sur deux domaines principaux, la morphologie et l'hydraulique. Les trois autres domaines (la biologie, la biogéochimie et l'hydrogéologie) sont majoritairement soutenus par les deux premiers. Ainsi, des périmètres vont être déterminés pour la morphologie et l'hydraulique. Ceux-ci vont être agrégés avant que n'y soient ajoutés les éléments du contexte environnemental. Selon le style fluvial objectif, remplaçant le style de référence préconisé pour les raisons citées précédemment (3.2.5), et le

Style fluvial de référence	Périmètre	Optimal	Nécessaire
RECTILIGNE A FORTE PENTE (type 1)	**morphologique**	Espace permettant la respiration naturelle du torrent, et les connexions latérales avec les versants et zone d'alimentation, ainsi que la régulation sur le cône de déjection, pour un événement exceptionnel (>100 ans)	Adaptation du périmètre optimal pour prise en compte sur le cône de déjection d'un événement majeur (50 à 100 ans)
	hydraulique	*Sans objet, compris de fait dans le périmètre morphologique*	*Sans objet, compris de fait dans le périmètre morphologique*
BANCS ALTERNES – TRESSES (type 2, 4)	**morphologique**	Espace permettant l'équilibre longitudinal et la continuité latérale au niveau sédimentaire, et intégrant une mobilité et la régulation du transport solide à long terme	Espace permettant la continuité longitudinale et latérale au niveau sédimentaire
	hydraulique	Espace permettant l'écoulement et l'expansion des crues : zones inondables par les plus fortes crues, hors influence des aménagements	Espace des zones de grand écoulement. Intégration des zones d'expansion des crues si efficaces
MEANDRES (MIGRANTS OU DEVELOPPES)	**morphologique**	Espace permettant la mobilité globale à long terme d'un tronçon dans son ensemble (longitudinale et latérale)	Espace permettant la continuité longitudinale et latérale au niveau sédimentaire
	hydraulique	Espace permettant l'écoulement et l'expansion des crues : zones inondables par les plus fortes crues, hors influence des aménagements	Espace des zones de grand écoulement. Intégration des zones d'expansion des crues si efficaces
TOUS STYLES	**contexte biologique**	*Sans objet*	Intégrer à l'espace nécessaire les annexes fluviales
	contexte hydrogéologique	*Sans objet*	Caractériser les échanges nappe – rivière, si possible spatialement
	contexte biogéochimique	*Sans objet*	Adapter la fonction de limitation des transferts de pollution aux usages du lit majeur

périmètre concerné (optimal ou nécessaire), les critères permettant la délimitation de ces espaces diffèrent. Un résumé de ces critères est donné dans le Tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2 : Synthèse des principes de délimitation des espaces de fonctionnement optimal et nécessaire (Source : Guide technique du SDAGE RM 2016-2021, 2016[11])

4. Résultats

4.1. Diagnostic de l'Arc et de ses affluents

Dans la partie suivante ne sont repris que certains résultats de la phase de diagnostic de l'étude avec un intérêt significatif pour la détermination des styles fluviaux de référence et objectifs et la délimitation des espaces de bon fonctionnement.

Les éléments explicités dans le diagnostic morphologique servent à traduire la mobilité latérale et longitudinale du cours d'eau ainsi que ses capacités de transport solide.

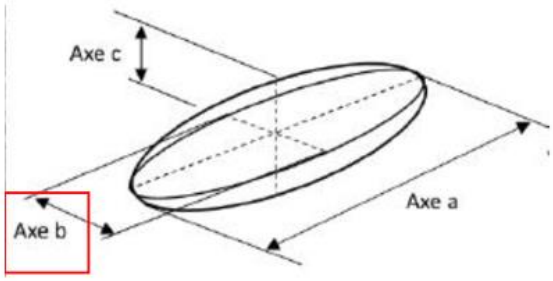
4.1.1. Analyse granulométrique du fond du lit

Dans l'objectif d'analyser la charge solide mobilisée régulièrement par charriage ou suspension au cours de différents évènements hydrologiques, une analyse de la charge de fond a été effectuée pour chaque unité homogène, le but étant de déterminer le diamètre médian D_{50} de cette charge de fond mobilisable.

Pour ce faire, deux types d'échantillonnage ont été réalisés sur le terrain.

Le **protocole EVHA** permet, en analysant les différents substrats sur une surface limitée représentative du secteur étudié, de qualifier le substrat dominant et le substrat secondaire ainsi que le substrat le plus grossier parmi les classes granulométriques de Wentworth. Cette classification se base sur la mesure de l'axe « b » (voir Figure 13 ci-dessous).

Nom de la classe granulométrique	Classes de taille (diamètre en mm perpendiculaire au plus grand axe)	Code utilisé
Rochers	> 1024	R
Blocs	256-1024	B
Pierres Grossières	128-256	PG
Pierres Fines	64-128	PF
Cailloux Grossiers	32-64	CG
Cailloux Fins	16-32	CF
Graviers Grossiers	8-16	GG
Graviers Fins	2-8	GF
Sables	0,0625- 2	S
Limons	0,0039-0,0625	L
Argiles	< 0,0039	A



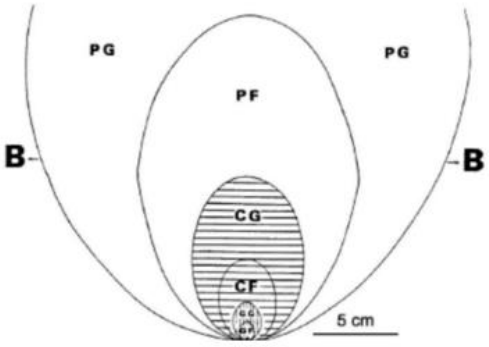


Figure 13 : Caractérisation des classes granulométriques par protocole EVHA (MALAVOI et al., 2011[21])

Dans l'étude, ces investigations ont été menées pour chacune des 305 stations, ce qui a permis de déterminer ces éléments pour les 124 unités homogènes.

Les résultats complets, illustrés en annexe 2, indiquent que le substrat dominant correspond généralement à des matériaux fins. Pour plus de 50 % des stations, il s'agit d'argile, de sable ou de limon. L'argile est cependant peu présente sur le territoire, à l'exception de l'UF2 sur l'Aigue Vive. Pour l'UF3, comprenant les cours d'eau au sud de la montagne Sainte-Victoire, la part d'éléments fins en

dominant n'atteint pas 50 % mais cela peut être mis en parallèle avec l'affleurement de la roche mère constaté de façon récurrente sur ces cours d'eau. Les substrats secondaires concernent généralement des éléments plus grossiers allant des graviers fins aux cailloux grossiers.

En complément de ces données sur le substrat, des granulométries plus abouties ont été réalisées sur 20 stations réparties sur le territoire (Figure 14). Celles-ci ont été obtenues par application du **protocole Wolman**[29] visant à mesurer l'axe « b » de 100 granulats mobilisables lors de crues et situés sur un atterrissement. Les résultats obtenus sur le terrain sont détaillés dans l'annexe 3.

L'Arc à Pourrières (pk [point kilométrique] 73,25)

L'Arc à Rousset (pk 58,5)

Figure 14 : Photos d'analyse granulométrique par protocole Wolman sur l'Arc

La réalisation du protocole Wolman permet d'obtenir une base d'informations quantitatives plus conséquentes sur certaines parties du territoire. En mettant en parallèle les résultats issus du protocole Wolman avec ceux issus du protocole EVHA, une formule donnant un D_{50} (diamètre médian) pour chaque tronçon sur la base des résultats issus du protocole EVHA a été extrapolée. Un diamètre représentatif de chaque classe a été calé pour les substrats grossiers ($D_{grossier}$), dominants ($D_{dominant}$) et secondaires ($D_{secondaire}$), permettant ainsi de déterminer une valeur théorique du diamètre médian (D_{50th}). La formule ci-dessous a été calée afin de réduire au maximum les incertitudes entre les résultats théoriques et les résultats mesurés sur chaque station avec le protocole Wolman. Les résultats sont représentés dans la Figure 15 ci-dessous.

$$D_{50th} = 0{,}6 \times D_{dominant} + 0{,}35 \times D_{secondaire} + 0{,}05 \times D_{grossier}$$

La formule obtenue fournie une valeur de D_{50th} avec une marge d'erreur moyenne de 20% (médiane à 19 %), pour des écarts compris entre 58% et 1% selon les stations test. Au vu des objectifs de l'étude ces résultats semblent satisfaisants. En effet, déterminer le D50 théorique va permettre, pour chacun des tronçons, de **définir si ce diamètre va être potentiellement mobilisable par des crues** avec des périodes de retour spécifiques, mais aussi de **calculer la largeur théorique de plein bord** des cours d'eau.

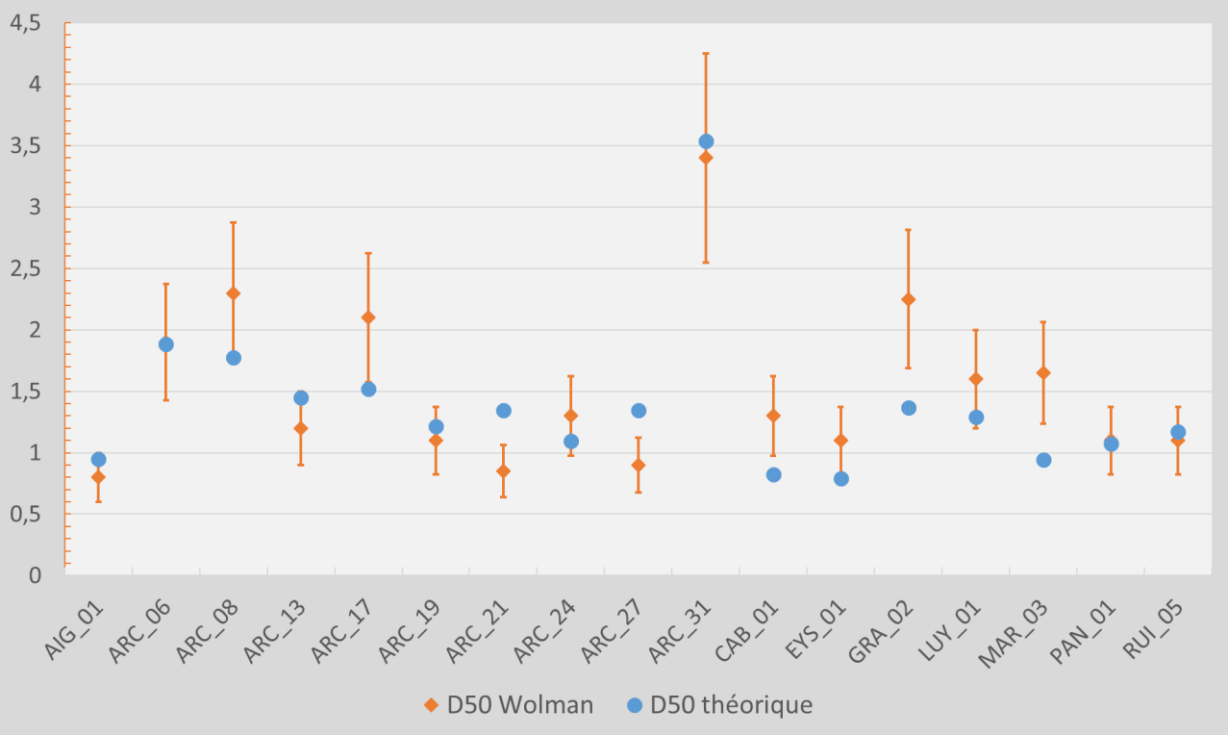


Figure 15 : Comparaison entre les D50 obtenus par protocole Wolman et les D50th (barres d'erreur de 30%)

4.1.2. Analyse de la géométrie du lit

Dans des conditions naturelles relativement constantes, les rivières tendent à établir une morphologie « dynamiquement stable » sur la base de deux types de variables :

- des variables de « contrôle », comme le débit liquide ou la charge solide, qui influencent la morphologie des cours d'eau à l'échelle du bassin versant ;

- des variables de « réponse », qui traduisent l'ajustement morphologique à l'échelle de tronçons par rapport aux évolutions des variables de contrôle. Ces variations peuvent se produire à différentes échelles de temps, que ce soit du très long terme (changement climatique, fin de l'ère glaciaire, etc.), du long terme (modification de la couverture végétale, urbanisation, etc.) ou à terme régulier ou fréquent (crues, glissements de terrain, etc.). Il s'agit par exemple de la pente locale ou la largeur de plein bord.

Dans ce paragraphe, **l'analyse de divers indices hydromorphologiques** basés sur les variables de contrôle et de réponse permettront ensuite de statuer sur les styles fluviaux actuels puis de référence par tronçon.

Le débit de période de retour 2 ans (Q2) est assimilé ici au **débit morphogène « naturel », celui qui est à l'origine de remaniements morphologiques des cours d'eau**. Il est constaté que ce débit, qui d'après la littérature (ROLAN-MEYNARD, 2019[25]) devrait se rapprocher **du débit de plein bord**, est parfois très inférieur à celui-ci. Ainsi, pour 40 % des UH, le débit de plein bord est même supérieur au débit de période de retour 100 ans (Q100) et dans 63 % des cas, il est supérieur à celui de la crue décennale. On constate ainsi un probable surcalibrage de la plupart des tronçons du bassin versant. Néanmoins, cet aspect n'est pas toujours d'origine anthropique. En effet, il peut se retrouver naturellement dans un secteur engorgé, à l'amont des bassins versants ou par exemple, sur l'Arc. Ce constat est confirmé par l'analyse de la Figure 16 page suivante. En effet, il est observable que **la plupart des débits morphogènes Q2 sont inférieurs aux débits de plein bord** symbolisés par la droite.

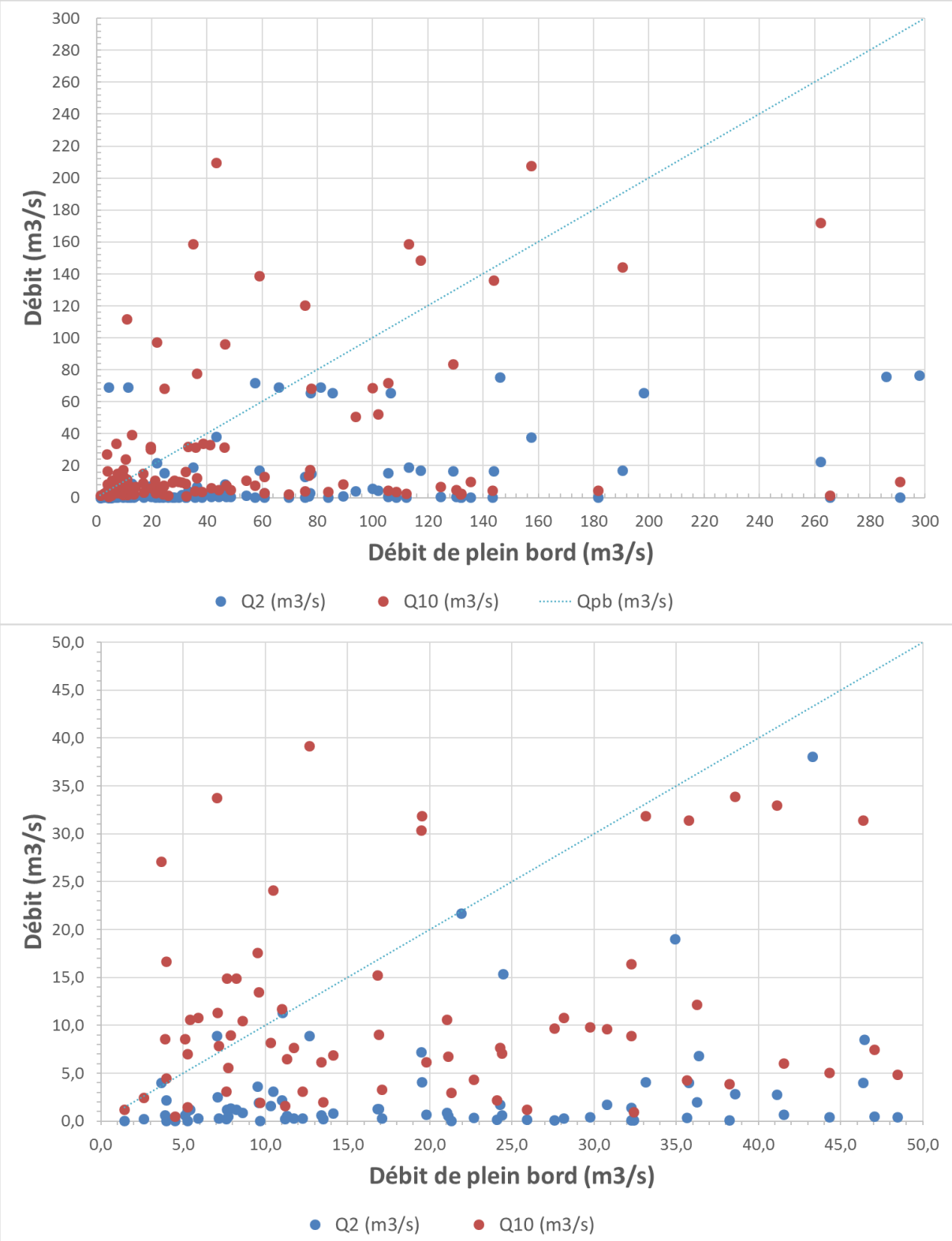


Figure 16 : Comparaison entre les débits Q2 et Q10 et les débits maximaux pouvant transiter dans l'unité homogène (débit de plein bord), le second graphique correspond à un zoom du premier graphique pour des débits de 0 à 50 m3/s

Le **rapport largeur plein bord (Lpb) sur la hauteur plein bord (Hpb)** est un indice morphométrique du style du cours d'eau. Un faible rapport décrit un cours d'eau plutôt encaissé tandis qu'un rapport important traduit une activité latérale plus dynamique. D'après la Figure 17 page 33, ce rapport est de

plus en plus important pour l'Arc à mesure que la surface du bassin drainé augmente, ce qui est cohérent avec l'évolution observée du style fluvial actuel de l'Arc de l'amont vers l'aval évoluant de torrentiel à un style à méandres en passant par un style plus rectiligne. Les affluents possèdent généralement un rapport largeur de plein bord sur hauteur de plein bord du même ordre de grandeur que celui de l'Arc pour un bassin versant équivalent. Néanmoins, aucune évolution amont aval n'est observée pour ces cours d'eau. Certains affluents ayant par exemple un rapport Lpb/Hpb important à l'amont, où aucune pression ne s'exerce, qui se réduit sur certaines parties de son territoire en lien avec la proximité d'activités anthropiques.

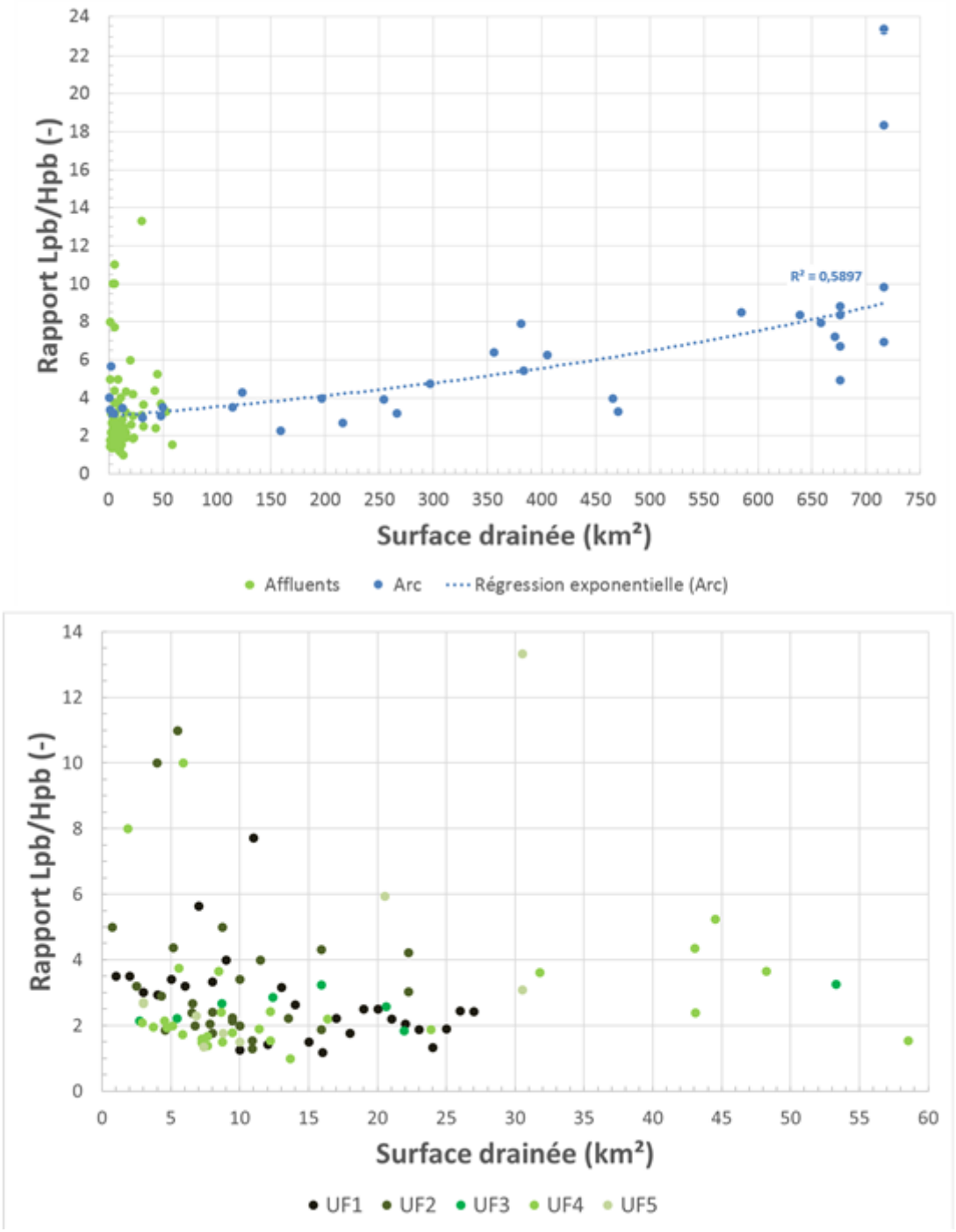


Figure 17 : Evolution du rapport entre la largeur et la hauteur plein bord,

Par ailleurs **l'estimation des largeurs théoriques des cours d'eau** et leur mise en parallèle avec les largeurs actuelles permet également d'étudier la géométrie du lit. Les **formules de Hey et Thorne et de Yalin et Da Silva** sont utilisées pour obtenir ces valeurs.

La formule de Yalin et da Silva (2001) traduit, pour un nombre de Shields critique, τ*, associé à un débit morphogène proche du débit de plein bord, la largeur théorique W de cours d'eau ainsi (DA SILVA et YALIN, 2017[14] et METIVIER et BARRIER, 2012[22]) :

$$W = 1{,}42 \times \sqrt{\frac{Q_2}{0{,}853 \times \sqrt{D_{50}}}}$$

La formule de Hey (HEY et THORNE, 1986[18]) se base notamment sur le pourcentage de végétation de la berge puisqu'il a été relevé dans cette étude qu'une berge sans arbre ni arbuste est deux fois plus large qu'une berge boisée. Elle est définie comme suit :

Pourcentage de végétation sur les berges (arbres ou arbustes)	Largeur à plein bord (m)
0 %	$4{,}33\ Q_2^{0,5}$
1 – 5 %	$3{,}33\ Q_2^{0,5}$
5 – 50 %	$2{,}73\ Q_2^{0,5}$
50 – 100 %	$2{,}34\ Q_2^{0,5}$

Ces formules font appel aux données suivantes :

- le débit morphogène (m^3/s), ici assimilé à Q_2 le débit d'occurrence biennal[25] ;

- le diamètre médian des grains du lit (m) D_{50}, ici basé sur les analyses granulométriques in situ et défini dans la partie suivante ;

- la densité de végétation des berges, évaluée ici sur la base des relevés de terrain ;

Les résultats sont présentés dans la Figure 18 ci-dessous. Leur analyse montre que les écarts entre les valeurs observées et théoriques sont importants avec un rapport moyen de 4,0 [0,4 ; 23,4] pour la formule de Hey et Thorne et de 2,3 [0,2 ; 11,9] pour la formule de Yalin et Da Silva.

Il apparaît que les largeurs observées sont plus proches des largeurs théoriques obtenues avec la formule de Yalin et da Silva avec néanmoins des largeurs observées supérieures pour les petits bassins versants et inférieures pour les grands bassins à celles de Yalin et da Silva. Comme ces largeurs théoriques sont destinées à traduire les largeurs dans le cadre d'un équilibre naturel du cours d'eau, les largeurs historiques sont représentées sur la Figure 19 page 36. Les données de l'année 1953 sont également représentées en plus des données du cadastre napoléonien (CN) comme la largeur de la bande active du CN comporte une part d'incertitude plus importante due à sa représentation cartographique.

Les largeurs historiques sont généralement plus importantes que les largeurs actuelles, en lien avec une réduction de la bande active autour des cours d'eau, et sont proches de la formule de Yalin et da Silva. Au regard de cela et des écarts entre les valeurs observées et calculées, il est proposé de prendre comme **largeur de référence**, dans la suite de la démarche, les **largeurs de Yalin et da Silva**. Néanmoins, **pour les petits bassins versants**, comme les largeurs données par la formule semblent trop faibles, la **largeur actuelle** est préférée comme largeur de référence.

Figure 18 : Comparaison des largeurs observées et des largeurs théoriques, le second graphique correspond à un zoom pour les petits bassins versants

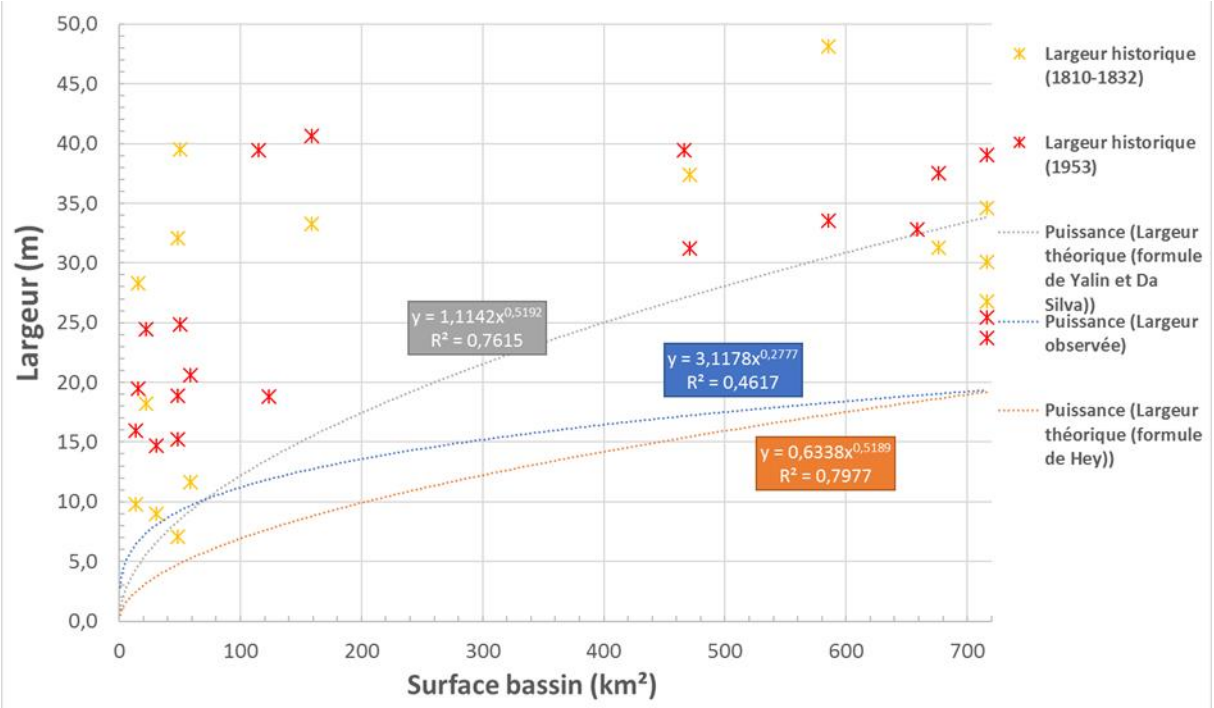


Figure 19 : Comparaison des largeur théoriques et historiques

4.1.3. Analyse du contexte sédimentaire

Pour analyser pleinement la charge solide transportée par les cours d'eau, il faut aussi tenir compte des apports en matériaux ponctuels (éboulement, érosion localisée…) ou linéaires (érosion généralisée…). Ces apports solides jouent un rôle important pour le style fluvial d'un cours d'eau. Par exemple, une rivière transportant une forte charge, dans le contexte adéquat, aura davantage tendance à former des atterrissements et ainsi à méandrer.

Dans le contexte de l'étude, les principaux éléments analysés ont été les suivants :

- **Erodabilité des berges** : Capacité des berges à fournir des matériaux lors des crues, évaluée selon la lithologie des berges et leur niveau de cohésion (Figure 20).
- **Apports solides du lit** : Charge de fond disponible dans les atterrissements et bancs présents dans le lit du cours d'eau, évalués selon les apports solides mobilisables par les crues et forts événements pluviométriques dans les lits des affluents secondaires du bassin versant de l'Arc (Figure 21).

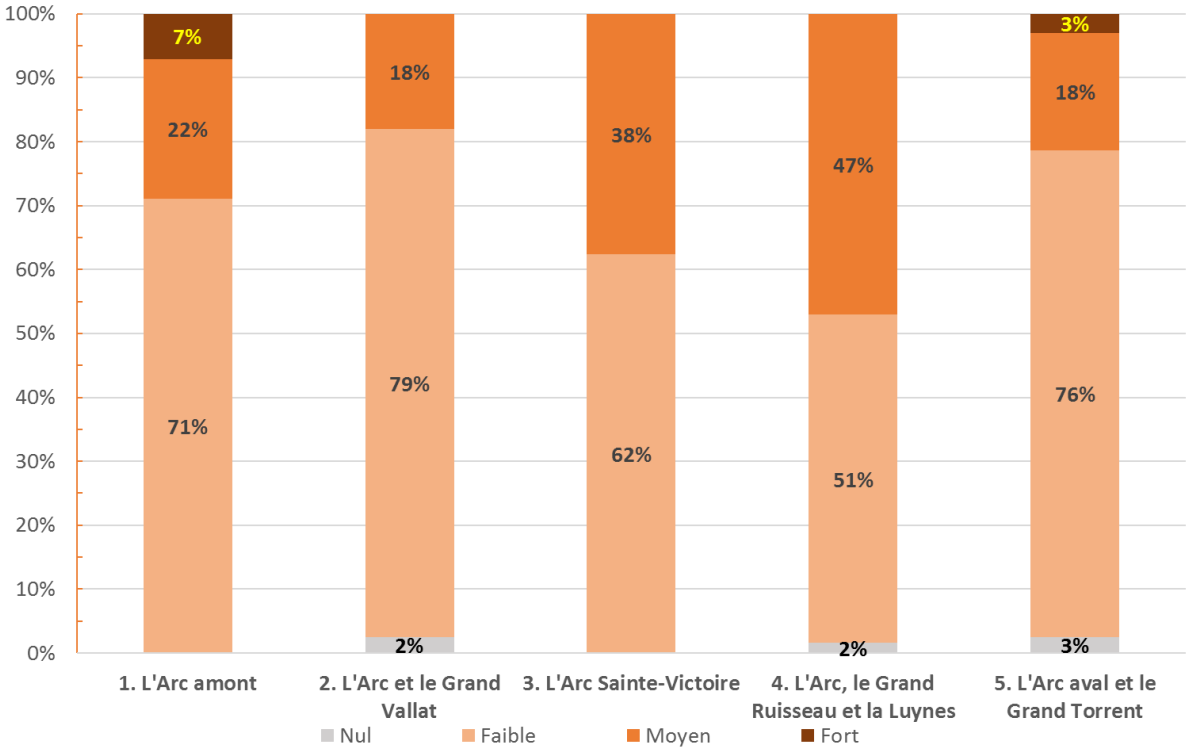


Figure 20 : Erodabilité des berges (érodabilité « très forte » non observée)

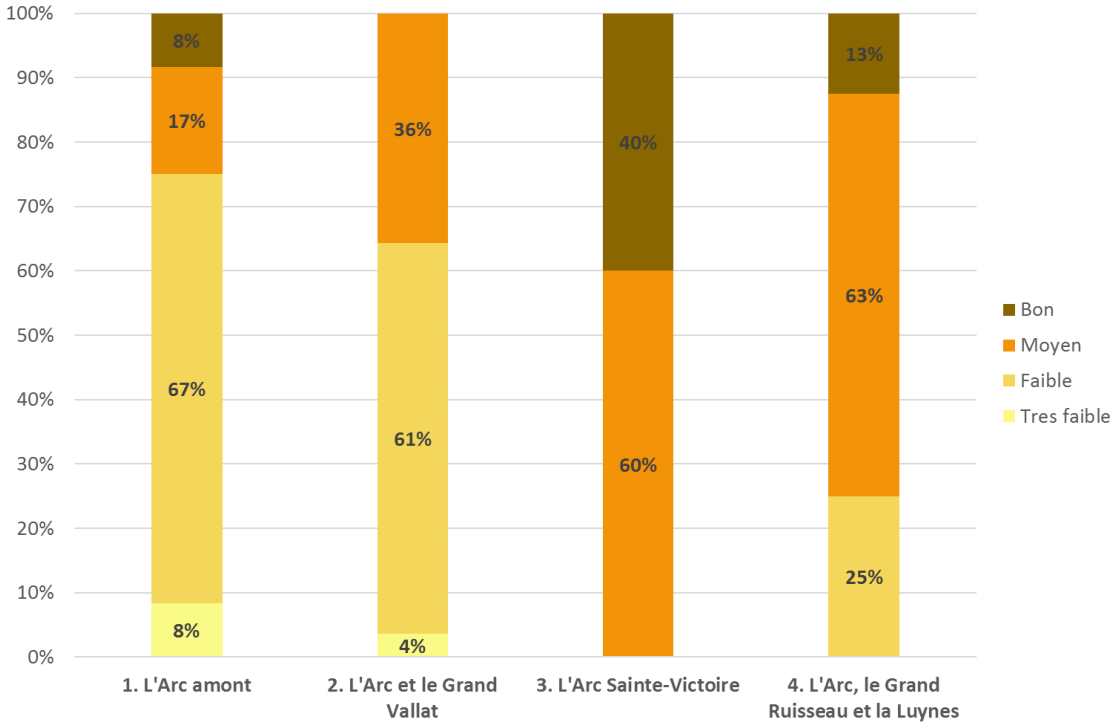
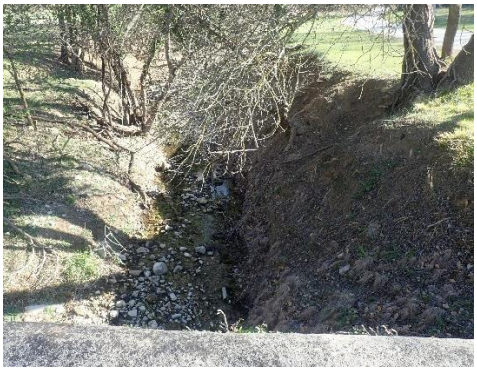


Figure 21 : Apport solide potentiellement transportable dans les affluents secondaires (apport solide « très bon » non observé)

Forte érosion malgré des berges moyennement érodable (sable, limon), l'Arc UF1 (ARC_26)



Bon apport solide, secteur amont de la Cause (l'Infernet), à l'amont du barrage de Bimont (UF3)

Forte érodabilité des berges, ruisseau de Saint-Pancrace (UF1)

Faible apport solide, affluent du ruisseau de Saint-Pancrace (UF1)

Figure 22 : Photos décrivant l'érodabilité des berges et les potentiels apports solides sur le bassin versant de l'Arc

Pour la majorité du territoire, les berges ne sont que faiblement érodables, et aucune érodabilité des berges « très forte » n'a été constatée sur le terrain.
A l'amont (UF1 et UF2), l'apport solide des affluents secondaires est réduit (plus des deux-tiers des affluents fournissent un apport solide faible à très faible). L'apport solide « très faible » correspond à l'apport lorsque le lit est bétonné (canalisation…) ou enherbé. L'apport solide apparaît plus important pour l'UF3, cependant ce fort potentiel a été constaté sur l'Infernet (partie amont de la Cause) à l'amont du barrage de Bimont qui constitue une barrière totale empêchant la continuité sédimentaire (Figure 22).

4.1.4. Analyse des grandeurs morphodynamiques

- ***Puissance spécifique***

En complément des analyses sédimentaires propres aux apports solides et à l'érodabilité des berges, il est intéressant d'évaluer la puissance spécifique des cours d'eau. En effet, l'analyse cumulée de ces trois facteurs permet d'**estimer la capacité du cours d'eau à se régénérer avec le passage des crues morphogènes** et donne ainsi une **notion de résilience aux pressions et altérations hydromorphologiques.**

La **puissance spécifique (ω)** décrit l'énergie développée par le cours d'eau, elle est donnée par l'équation suivante :

$$\omega = \gamma.Q.i.w^{-1}$$

Avec :

ω : puissance spécifique (W/m²)

γ : poids volumique de l'eau (γ =ρ.g= 9 810 kg.m^{-2}.s^{-2})

Q : débit (m^3/s)

i : pente moyenne de la ligne d'eau considérée équivalente à la pente du fond du lit (m/m)

w : largeur du lit à plein bord (m)

Le débit utilisé est normalement le débit de plein bord qui correspond à l'écoulement d'auto-ajustement morphométrique du chenal. Comme indiqué dans la partie précédente, dans le contexte de l'étude, le débit de plein bord peut être localement très élevé et peut correspondre à des périodes de retour parfois importantes du fait d'une modification artificielle et d'un surcalibrage de la section d'écoulement. Ainsi, comme précédemment, le débit morphogène a ici été assimilé au débit de pointe d'une crue de fréquence biennale (Q2).

Malavoi et Bravard, en 2010[20], évoquent différentes classes de puissances spécifiques pour décrire la réactivité géodynamique d'un cours d'eau. Ces classes sont limitées par les seuils de 10, 30 et 100 W/m².

Ces seuils restent néanmoins purement théoriques et à relativiser en fonction des caractéristiques sédimentologiques des berges du cours d'eau donc de l'érodabilité des berges et de la qualité des apports solides. La Figure 23 suivante (MALAVOI, 2010[20]) témoigne de l'impact de ces deux derniers facteurs.

	1	2	3	4
Puissance spécifique - ω	< 10 W/m²	10 - 30 W/m²	30 - 100 W/m²	> 100 W/m²
Erodabilité des berges - B	Nulle	Faible	Moyenne	Forte
Apports solides - A	Nuls	Faibles	Moyens	Forts

Figure 23 : Définition de 4 classes de variables pour discriminer la réactivité géodynamique des cours d'eau (MALAVOI, 2010[20])

Unité fonctionnelle	ω Q2 min (W/m²)	ω Q2 moyenne (W/m²)	ω Q2 max (W/m²)
1. L'Arc amont	14,4	**51**	148
2. L'Arc et le Grand Vallat	4,3	**57**	233
3. L'Arc Sainte-Victoire	4,0	**59**	189
4. L'Arc. le Grand Ruisseau et la Luynes	13,9	**120**	392
5. L'Arc aval et le Grand Torrent	0,3	**90**	315

Figure 24 : Analyse des puissances spécifiques par unité fonctionnelle

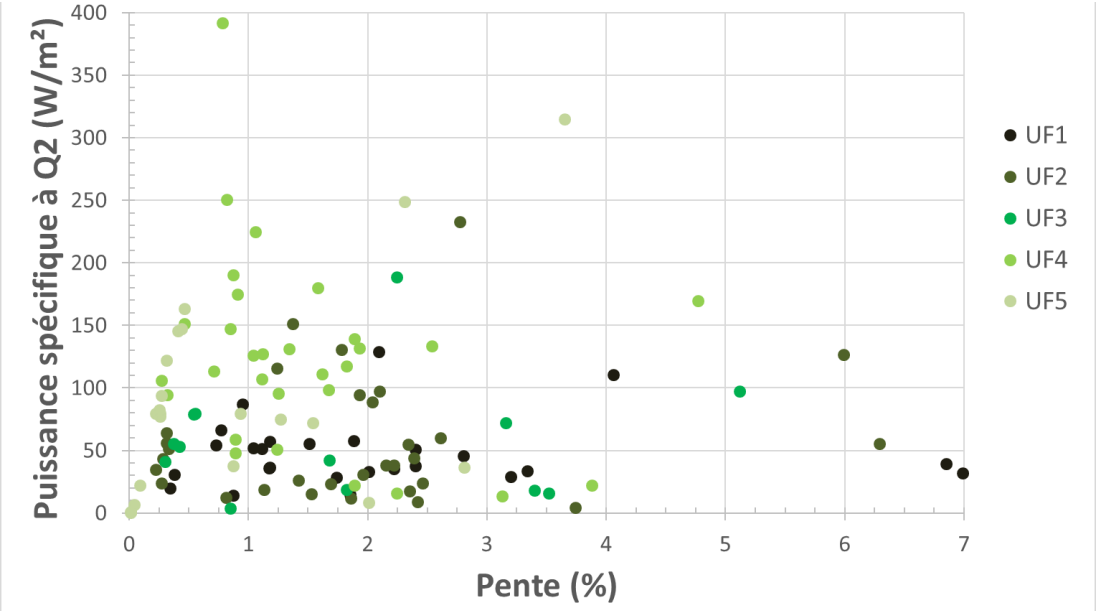


Figure 26 : Puissance spécifique des différentes unités homogènes

Il apparait (Figure 24 et Figure 26) que les cours d'eau du bassin de l'Arc sont globalement plus puissants à l'aval du bassin versant, notamment sur le tronçon de l'UF4 avec une moyenne à 120 W/m². Par ailleurs, les cours d'eau avec une forte pente correspondent aussi à des cours d'eau avec une forte puissance spécifique. Les cours d'eau sont donc généralement puissants sur le territoire, néanmoins, les investigations de terrain témoignent d'une faible activité. Ces résultats sont ainsi à mettre en parallèle avec la faible érodabilité des berges décrites précédemment ainsi qu'avec l'apport solide globalement limité. Généralement les cours d'eau seront du type ω3/A2/B2 traduisant globalement une faible réactivité géodynamique. Pour compenser les apports solides réduits et la faible érodabilité des berges, il faudra une puissance spécifique généralement supérieure à 100 W/m².

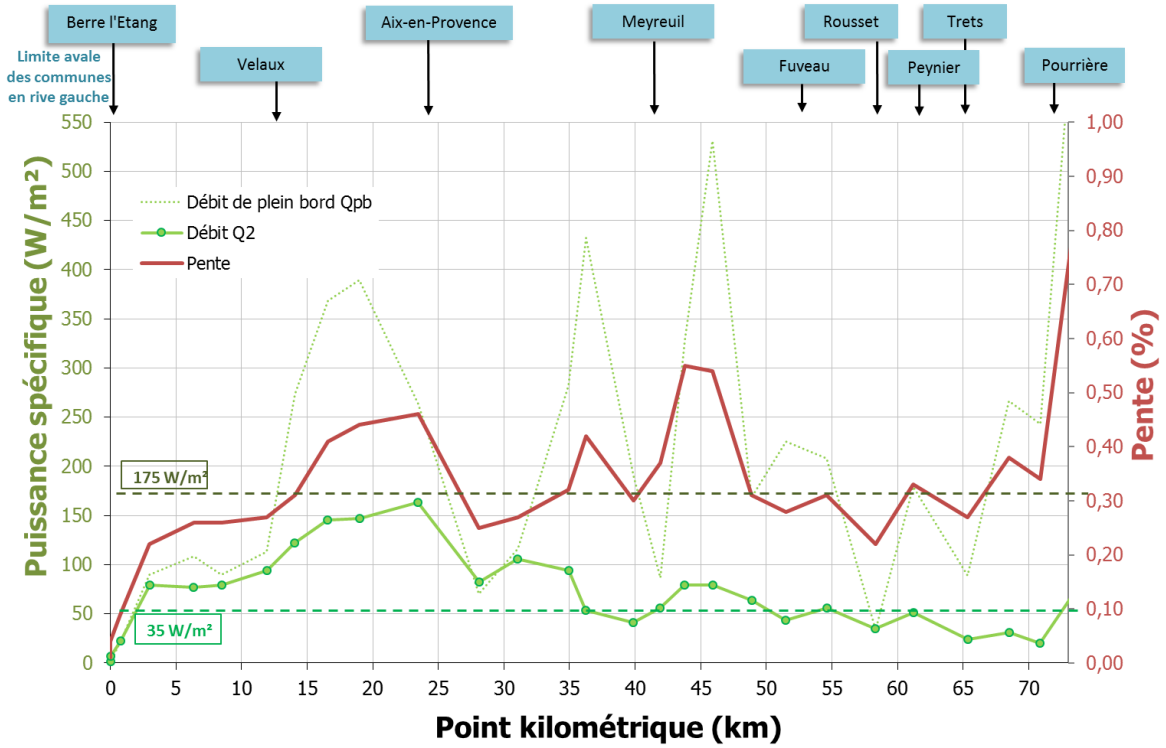


Figure 25 : Puissance spécifique de l'Arc (pk 0 à l'embouchure)

Pour l'Arc (Figure 25), les puissances spécifiques à Q2, débit morphogène théorique, sont globalement inférieures à celles observées sur les affluents (autour de 35 à 100 W/m²). Comme observé sur la Figure 26, la puissance spécifique est globalement plus forte à l'aval du bassin versant (UF4). Ainsi, la pente n'a que peu d'impact sur la puissance spécifique, le facteur significatif étant le débit. Néanmoins, à l'extrémité aval de l'Arc, du fait d'une pente quasi nulle, malgré des débits importants, la puissance spécifique est très faible. Les puissances spécifiques atteintes au débit de plein bord sur l'Arc sont beaucoup plus importantes qu'à Q2 du fait du surcalibrage expliqué précédemment. Pour ces débits, atteints donc théoriquement plus rarement (période de retour plus importante), la réactivité géodynamique attendue du cours d'eau est importante.

- ***Formule de Shields et diamètre maximal mobilisable***

Le transport sédimentaire a été analysé sur la base de la formule de Shields (1936) qui permet de déterminer la contrainte adimensionnelle de Shields, $\tau*$, limite théorique de mise en mouvement des particules avec un diamètre maximal Dmax (MALAVOI et al., 2011)[21] :

$$\tau* = \frac{\tau}{g \times (\rho_s - \rho)D}$$

- avec τ la force tractrice telle que $\tau = \rho g h J$

- h, la hauteur d'eau (m)

- masse volumique de l'eau : ρ = 1000 kg/m^3

- masse volumique des substrats associée à la masse volumique moyenne des sables : ρ_s = 1600 kg/m^3

- J, la pente de la ligne d'énergie (m/m)

Ainsi, il est possible de déterminer le diamètre maximal Dmax mobilisable par un écoulement.

$$D_{max}\,[m] = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}[-] \times \frac{h[m] \times J[m/m]}{\tau*\,[-]}$$

Cette formule a été simplifiée sur la base des hypothèses suivantes :

- écoulement turbulent en rivières : Re > 1000 donc simplification du nombre de Shields $\tau^* \simeq \tau^*_{critique}$ = 0,06 (RECKING, 2020[24])

- écoulement uniforme : la pente d'énergie J équivaut à la pente du fond I (m/m)

On obtient ainsi la formule simplifiée suivante :

$$D_{max}\,[m] = 10 \times h[m] \times I\,[m/m]$$

Cette équation permet ainsi de déterminer les fractions granulométriques mobilisables jusqu'au débit de crue morphogène (Q2) ou au débit d'occurrence décennale (Q10) en comparant les diamètres Dmax avec le diamètre médian théorique de chaque unité homogène (D50th) (Figure 27).

Figure 27 : Analyse des diamètres mobilisables par les différentes crues

Pour 84% des tronçons, la crue morphogène Q2 peut mobiliser du substrat disponible avec un diamètre allant au moins jusqu'au D50 théorique. Cela monte même à 95% dans le cas de la crue

décennale. Les **capacités de charriage des différentes crues sont donc assez importantes** sur les cours d'eau avec des diamètres maximaux transportés de 6,1 cm [0,2 ; 21,3] en moyenne sur le bassin de l'Arc pour la Q2 et de 18,6 cm [0,2 ;49,6] pour la Q10. Ces résultats sont nettement supérieurs aux diamètres médians des matériaux observés dans le lit des cours d'eau (D50th), avec une moyenne de 2,8 cm [0,6 ; 25,7].

Par ailleurs, pour les quelques points où des protocoles Wolman ont été réalisés, on observe que le **D90 est généralement proche ou inférieur au diamètre maximal mobilisable par la crue biennale**.

4.1.5. Analyse diachronique de l'Arc : étude du profil en long

Sur les bases des données des GFH de 1949 ainsi que des données LIDAR actuels, les profils en long historique mais aussi actuel du fond du lit de l'Arc sont déterminés. Pour permettre une lecture simplifiée des données LIDAR, celles-ci ont été lissées pour dissimuler l'effet d'oscillation des relevés. Compte tenu de la longueur de l'Arc, celui-ci a été divisé en quatre profils pour mieux cerner son évolution. L'intégralité de ces profils est présenté en annexe 4.

L'exploitation de ces profils en long permet notamment de mettre en avant des tendances d'évolution de l'Arc sur certains secteurs. Un exemple est donné dans la Figure 28 ci-dessous.

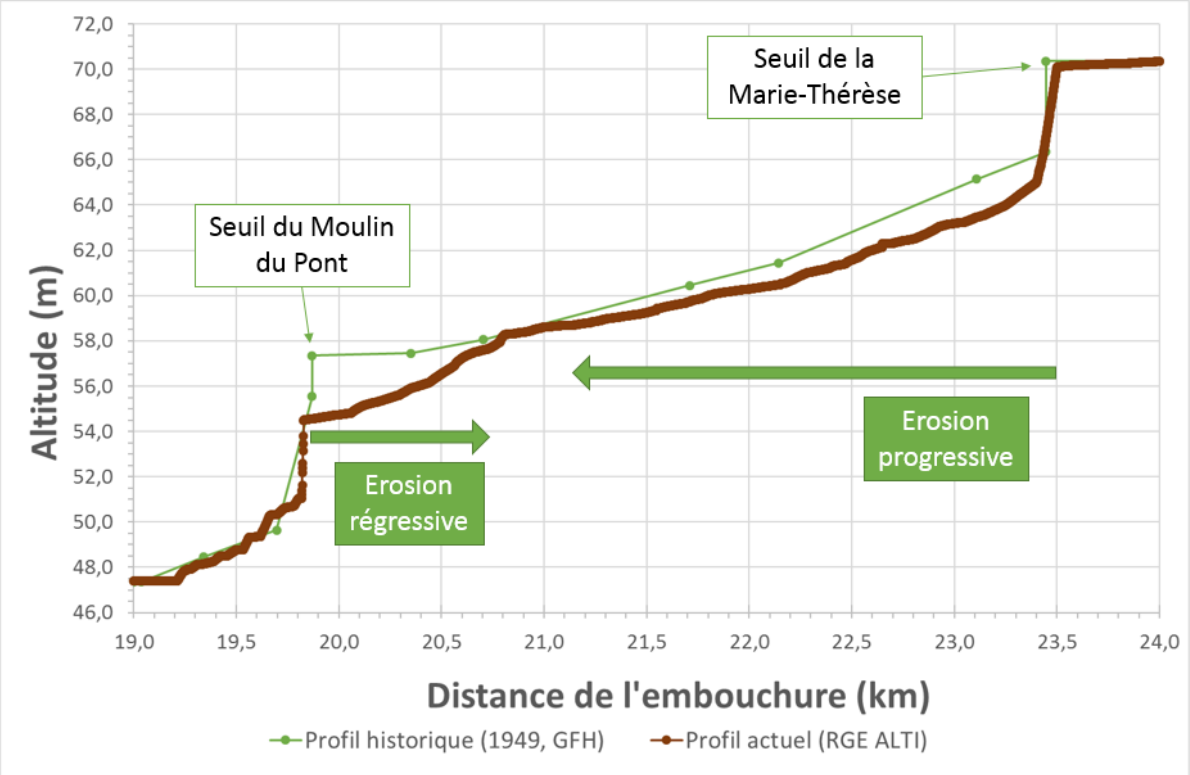


Figure 28 : Evolution du profil en long de l'Arc entre le seuil du Moulin du Pont et le seuil de la Marie Thérèse

Les deux seuils présents sur la figure ci-dessus ont un usage de production d'énergie. Ils constituent tous deux un point fixe sur le profil de l'Arc et une barrière vis-à-vis du transport solide. La charge solide transportée par un cours d'eau se dépose généralement en amont d'un seuil. Aussi, à l'aval de celui-ci, le débit solide est faible, le courant aura donc tendance à remobiliser des éléments ce qui peut entraîner une érosion progressive. Ce fonctionnement théorique correspond à ce qui est observable à l'amont et l'aval du seuil de la Marie-Thérèse. Néanmoins, le seuil du Moulin du Pont (visible sur la photo Figure 29 ci-dessous) a été refait récemment avec notamment un abaissement de la crête du seuil. Cela a eu pour conséquence une remobilisation des sédiments bloqués jusque-là en amont,

entrainant une érosion régressive du fond du lit. Ces deux phénomènes combinés (érosion progressive et régressive) entre ces deux seuils ont conduit à un réajustement de la pente et à la recherche un nouveau profil en long d'équilibre pour ce tronçon de l'Arc.

Figure 29 : Seuil du Moulin du Pont (gauche) avec une crête abaissée, seuil de la Marie-Thérèse (droite)

4.1.6. Analyse diachronique : étude de la bande active de l'Arc et de ses affluents

Les variations locales de la bande active qui apparaissent les plus pertinentes sont décrites dans la partie ci-dessous.

L'Arc entre les Milles et Saint-Pons (Aix-en-Provence) – point kilométrique (pk) 31,5 à 36

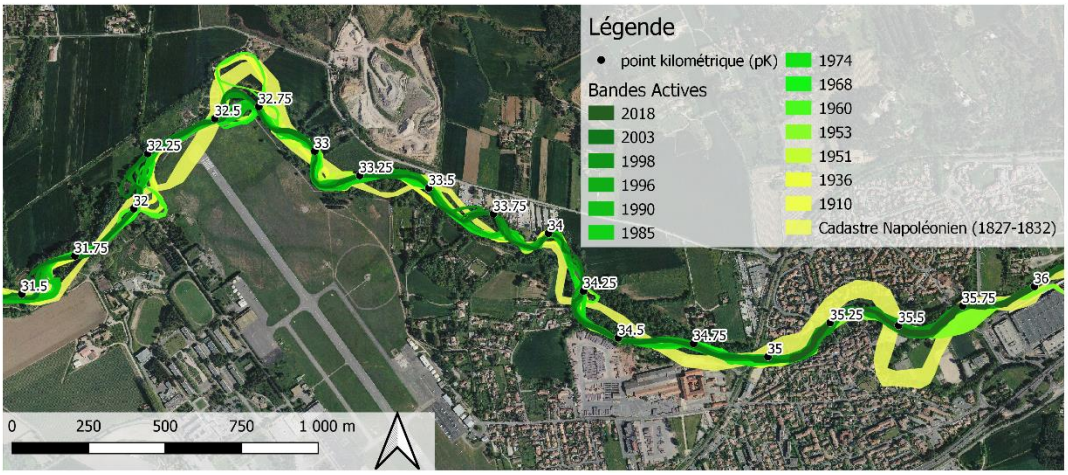


Figure 30 : Variation de la bande active de l'Arc entre les Milles et Saint-Pons

La carte (Figure 30) ci-dessus traduit l'évolution de la bande active de l'Arc entre 1830 (Cadastre Napoléonien) et aujourd'hui. Le secteur à l'aval des Milles correspond aux éléments fournis par l'étude IPSEAU de 2009, tandis que les différentes bandes actives du secteur traversant les Milles sont le résultat de l'analyse de SCE.

Ce tronçon présente une forte activité latérale marquée au cours des deux derniers siècles. On peut ainsi nettement observer une coupure de méandre au pk 32,5 dans les années 1960 et l'apparition d'un nouveau méandre à ce niveau actuellement.

Figure 31 : Erosion de 2,5 m en rive concave de l'Arc, secteur des Milles, pk 33

L'Arc est encore aujourd'hui très dynamique sur ce secteur comme en témoigne l'érosion en rive concave sur le méandre entre les points kilométriques 33 et 33,25 à l'est de l'aérodrome (Figure 31).

L'Arc, dans les Milles, à l'amont de la ligne SNCF (pk 35) était autrefois dynamique mais cette mobilité a été limitée par l'urbanisation des surfaces au bord du fleuve, limitant de fait son évolution (réduction de 60 % de sa bande active en 200 ans).

L'Arc aval à Berre-l'Etang – pk 4,25 à 12

Le dynamisme de l'Arc est aussi très marqué dans la plaine de Berre. Le tracé des bandes actives, illustré dans la Figure 32 ci-dessous, mais aussi des indices morphologiques décelables dans le paysage (Figure 33) traduisent cette mobilité de l'Arc dans sa partie aval. En effet, sur les orthophotographies actuelles comme passées, on peut observer de possibles traces de limites d'anciens méandres, limites qui correspondent en général aujourd'hui à des bordures de parcelles.

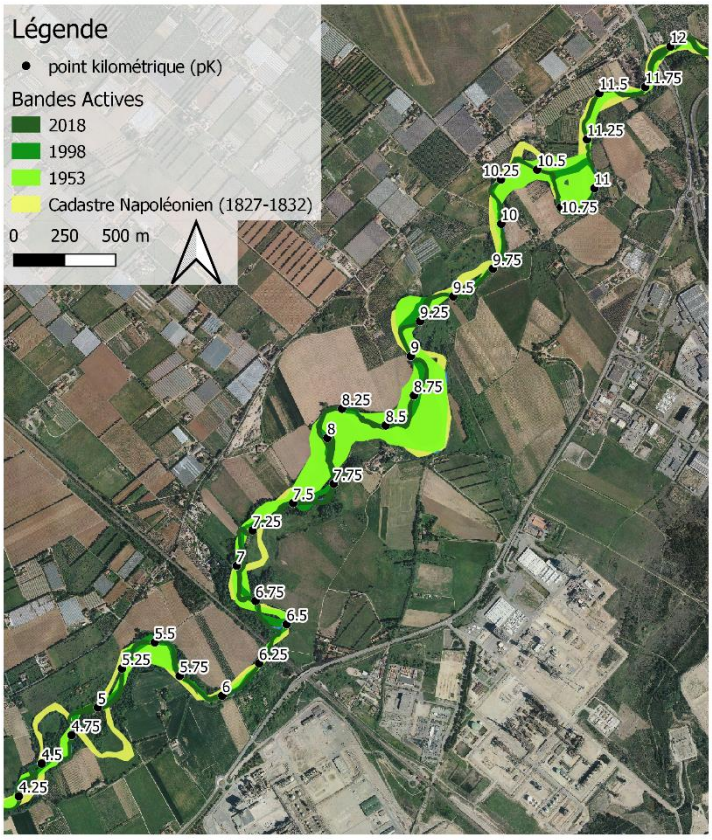


Figure 32 : Variation de la bande active de l'Arc dans la plaine de Berre

Néanmoins, la mobilité de l'Arc est de plus en plus restreinte avec une diminution de la bande active de près de 37 % sur ce secteur entre 1831 et aujourd'hui.

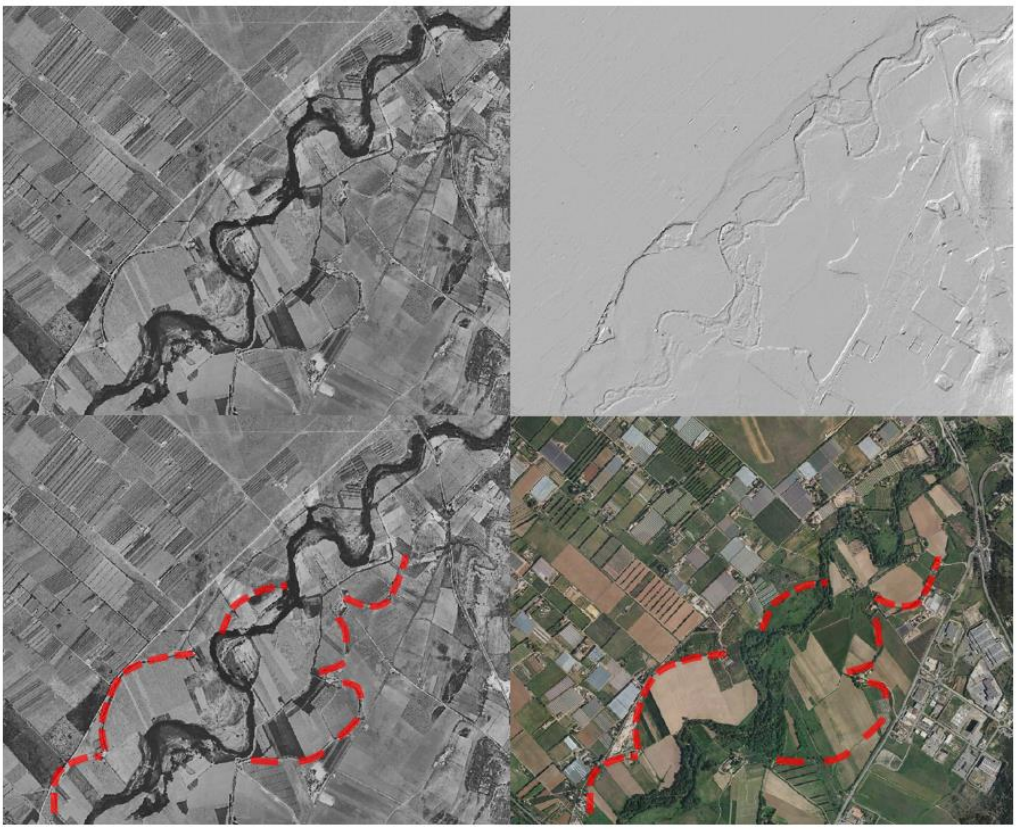


Figure 33 : Détection de possibles limites de méandres (pointillés rouges) par étude morphologique d'orthophotographies (photo 1953 et 2018, couche LIDAR)

L'Aigue Vive – pk 0 à 3

Certains affluents de l'Arc ont également été étudiés comme l'Aigue Vive au sud de la commune de Rousset (Figure 34).

Figure 34 : Variation de la bande active de l'Aigue-Vive

Au niveau de la partie aval du cours d'eau, des méandres migrants sont observables jusqu'en 1953. Néanmoins, ceux-ci sont impactés par la création de l'autoroute A8 « La provençale » dans le début des années 70. Le cours d'eau est alors rectifié, recalibré et endigué, sa mobilité est supprimée.

Le Vallat Grand Ruisseau (et la Petite Jouïne) – pk 0 à 2,5 (pk 0 à 1)

Figure 35 : Digue de 2 m de haut en rive droite du Vallat du Grand Ruisseau, pk 1,150

Sur d'autres affluents, on retrouve également une mobilité limitée par une recalibration des cours d'eau. C'est notamment le cas de la Jouïne sur sa partie aval ainsi que sur le Vallat du Grand Ruisseau du pK 1 à 2,5 (Figure 36). Cette recalibration, visible par l'aspect rectiligne du cours d'eau est assez ancienne puisque déjà présente à l'époque du cadastre napoléonien d'Aix en 1830. Encore aujourd'hui, les digues de part et d'autre du Vallat du Grand Ruisseau et de la Jouïne limitent leur mobilité (Figure 35). Ainsi, la bande active de la Jouïne n'a que très peu évoluée en 200 ans (seulement -1%). Ce constat d'une mobilité inexistante de la Jouïne et du Vallat du Grand Ruisseau du fait d'une rectification va à l'encontre de ce qu'on pourrait attendre sur ces cours d'eau ayant une puissance spécifique très importante (supérieure à 150 W/m² pour la Jouïne, il est même de près de 400 W/m² pour cette partie du Grand Ruisseau, soit la valeur la plus importante constatée sur l'ensemble du bassin versant de l'Arc).

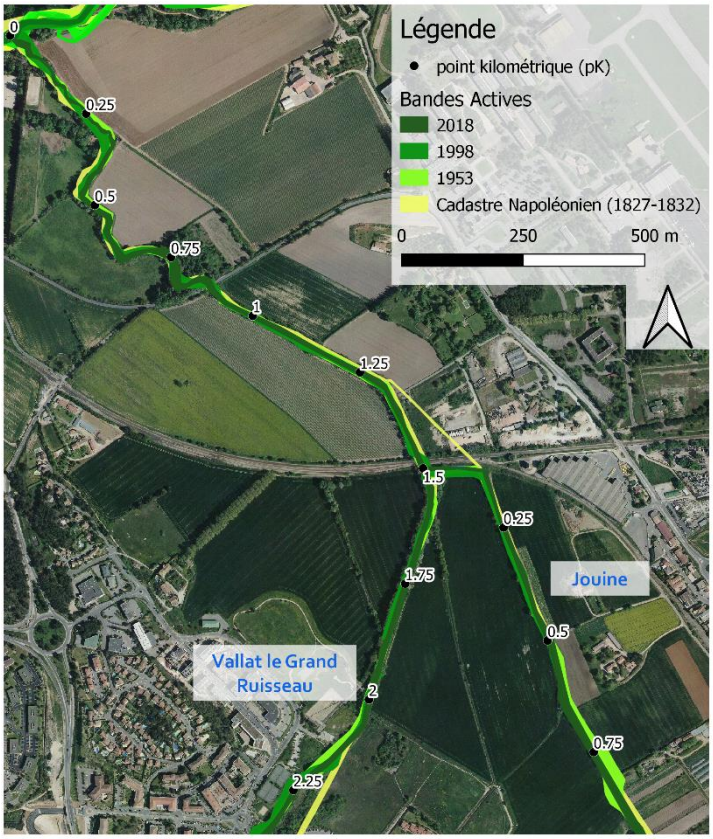


Figure 36 : Variation de la bande active du Vallat Grand Ruisseau et de la Jouïne (partie avale)

4.1.7. Détermination des différents styles fluviaux

Sur la base des résultats de la phase de diagnostic, les différents styles fluviaux (actuel, de référence et objectif) ont été déterminés.

Les styles fluviaux actuels des différents UH sont basés sur les investigations de terrain.

Une forme d'abaque (Figure 37) a pu être obtenue sur la base de ces investigations. Elle prend appui sur les résultats de recherche de Church (2002) repris par Chapuis (2012)[6]. Les styles fluviaux actuels du bassin versant de l'Arc ne semblent pas aller totalement dans le même sens que les résultats des deux chercheurs, néanmoins le contexte d'étude est différent, leur étude ayant été réalisée en contexte alpin. Cependant, même dans le contexte du bassin de l'Arc, une discrétisation selon les critères de pente et de débit semble possible.

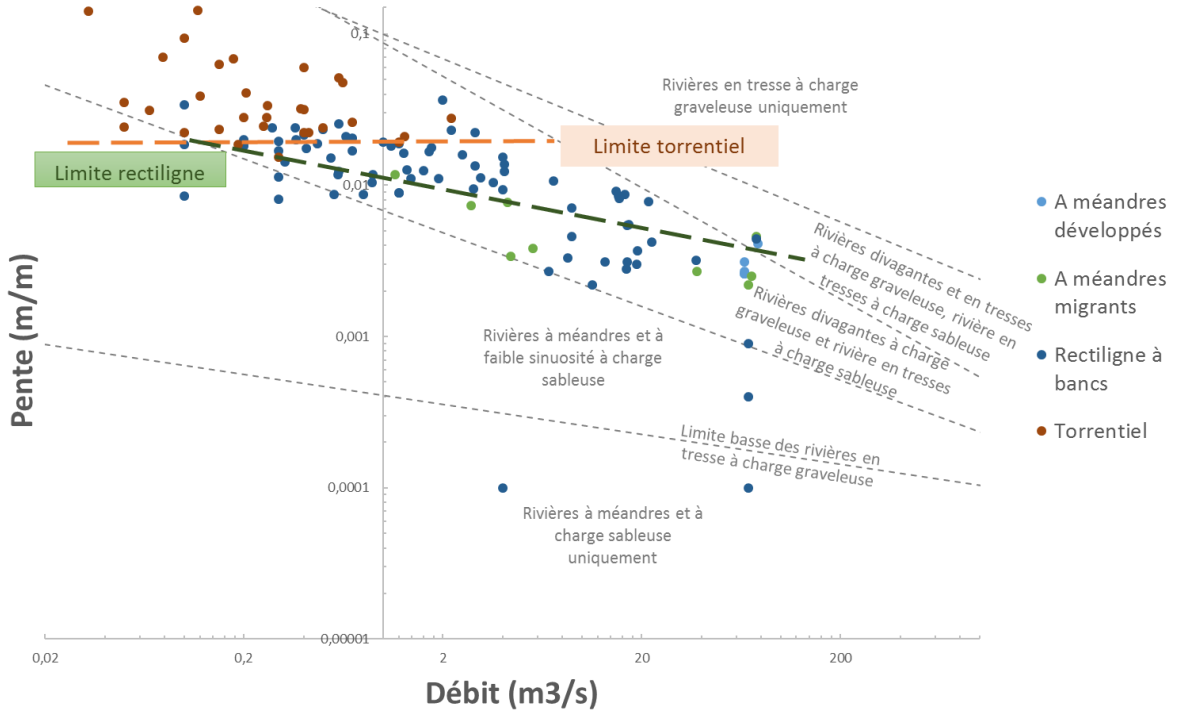


Figure 37 : Styles fluviaux actuels des UH selon la pente moyenne et le débit morphogène (associé au débit biennal) à l'exutoire, en gris l'approche théorique de Church (2002) (CHAPUIS, 2012[6])

Les **styles fluviaux de référence** ont ensuite été **déterminés en se basant sur le style fluvial actuel** (postulat que le style fluvial actuel correspond ou se rapproche du style fluvial de référence), mais **à la lumière des résultats de la phase de diagnostic et de l'abaque déterminé ci-dessus**, certains cours d'eau ont été reclassifiés. Néanmoins, comme expliqué précédemment, tous les styles fluviaux de référence ne peuvent correspondre à des styles objectifs au vu des enjeux socio-économiques actuels.

Les cartes des différents styles fluviaux sont présentées en annexe 5. Quelques exemples de ces évolutions sont donnés ci-dessous.

Dans le cas de la Petite Jouïne, évoquée et illustrée dans la partie 4.1.6 sur l'évolution de la bande active, par suite de l'endiguement historique du cours d'eau, le style actuel est rectiligne. Cependant, au vu du contexte de plaine alluviale et de la tendance à méandrer du cours d'eau à proximité, le Vallat du Grand Ruisseau, ainsi que de la pente et du débit morphogène (0,46 % pour 9 m^3/s), il semble cohérent d'envisager un style de référence à méandres migrants.

L'amont du ruisseau de Baume-Baragne, un des affluents les plus à l'aval de l'Arc, se trouve à l'aval d'une zone industrielle. Suite à l'imperméabilisation du site, le cours d'eau a été complètement recalibré et bétonné (voir photo Figure 38 ci-dessous) pour contenir les eaux ruisselées, le style actuel est donc rectiligne. Cependant, au vu du contexte amont du ruisseau, dans un secteur globalement engorgé et à forte pente. Le style fluvial de référence est associé à un style torrentiel.

Figure 38 : Amont du Ruisseau de Baume-Baragne à l'aval de la zone industrielle de Plan de Campagne à Cabriès (13)

L'Arc aval, à Berre-l'Etang, visible sur la Figure 32 et la Figure 33, est sur pratiquement l'intégralité du linéaire avant l'embouchure en style fluvial actuel, de référence et objectif à méandres développés.

Sur l'ensemble des tronçons de l'Arc, seul 15% d'entre eux ont un style de référence qui diffère du style actuel (cela ne signifie néanmoins pas que seul 15% des UH subissent un impact anthropique), soit 18 UH. Pour 50 % d'entre eux, le style fluvial objectif va correspondre au style fluvial actuel pour les raisons suivantes : présence d'une autoroute, présence d'une zone industrielle, secteur engorgé et fortement urbanisé.

4.2. Détermination de l'EBF pour la zone d'étude « test »

La partie ci-dessous présente la méthodologie réellement appliquée pour la définition de l'EBF de la zone d'étude « test » du bassin versant de l'Arc, ainsi que les résultats de cette méthodologie. Elle se base sur la méthodologie présentée dans le guide du SDAGE RM pour la délimitation des EBF[11] et les résultats du diagnostic.

Au cours du stage décrit dans le présent rapport, il n'a pas été possible, en lien avec le calendrier de l'étude et la durée du stage de moins de 6 mois, d'aller au-delà de la définition de l'EBF pour le bassin test. Ainsi, la méthode décrite ci-après ne correspondra peut-être pas totalement à celle validée par le maître d'ouvrage de l'étude, le SABA, et les résultats présentés dans cette partie, ne concerneront que l'EBF du bassin test.

4.2.1. Définition de la zone d'étude « test »

Au vu des différents critères définis dans la partie 3.3.1 mais aussi pour tenir compte des secteurs où une analyse diachronique a été effectuée, le bassin test retenu comprend l'intégralité des tronçons de l'UF4 (l'Arc, le Grand Ruisseau et la Luynes), ainsi que des tronçons de l'UF5 ayant un style à méandres développés et où une analyse diachronique a été effectuée, ainsi que la partie aval de l'Aigue Vive et du Grand Vallat mais aussi quelques tronçons de l'Arc sur sa partie amont (UF1 et UF2) pour lesquels des résultats de l'analyse diachronique sont également exploitables. Le bassin test est illustré dans la Figure 39 ci-après.

39 UH composent ce bassin test soit 31 % des UH du bassin versant.

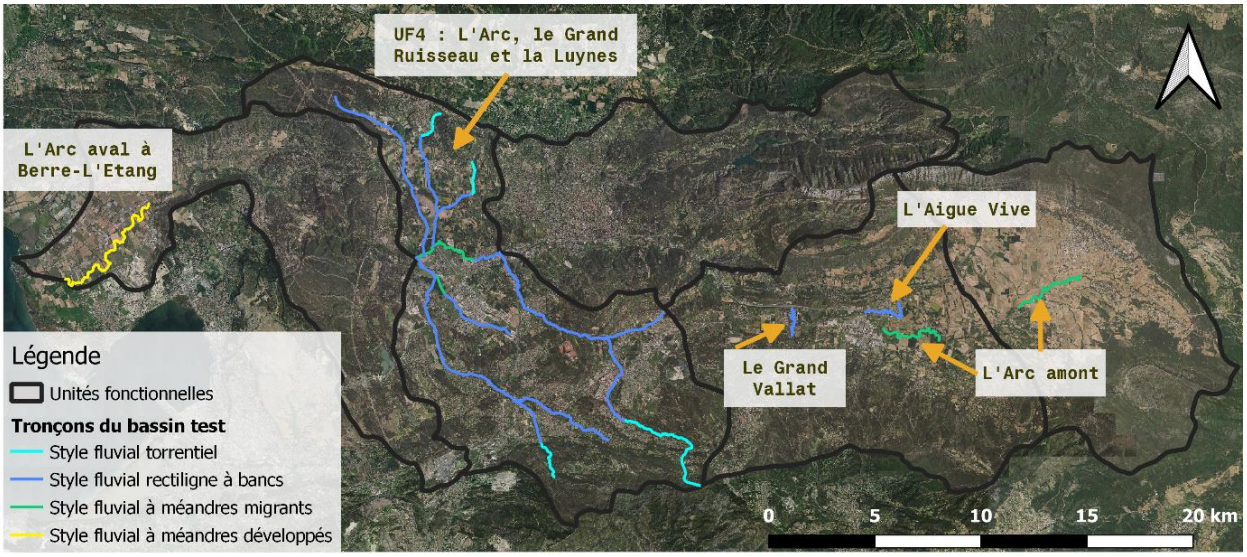


Figure 39 : Délimitation des tronçons du bassin test (représentation du style fluvial objectif)

4.2.2. Périmètre morphologique

Le périmètre morphologique correspond donc à l'espace nécessaire et à l'espace optimal pour le cours d'eau pour exprimer sa mobilité latérale et sa continuité longitudinale. Pour délimiter le périmètre morphologique, les données suivantes ont été utilisées :

- Topographie du site (sur la base d'un modèle numérique de terrain [MNT])
- Données historiques (photos aériennes et satellitaires de 1953, 1998 et 2018, ainsi que les résultats de l'analyse diachronique sur les secteurs étudiés en détail)
- Résultats des investigations de terrain (analyse des secteurs endigués, avec des protections de berge ou de fortes érosions ainsi que des coupes lithologiques pouvant témoigner d'un cours d'eau limité dans sa mobilité latérale.
- Carte géologique des alluvions modernes (Fz alluvions récentes, Fy et Fx alluvions anciennes) pour déterminer les espaces où le cours d'eau a pu avoir historiquement une mobilité et où cette mobilité est encore possible aujourd'hui (les alluvions correspondant à des fractions solides facilement mobilisables).

La délimitation du périmètre morphologique optimal et du périmètre morphologique nécessaire a été réalisée en deux temps. Tout d'abord, une bande de mobilité théorique a été délimitée sur la base de tests de différents coefficients. Celle-ci se base sur les largeurs théoriques des cours d'eau déterminées dans la phase de diagnostic. Selon le style fluvial objectif, la largeur de cette bande théorique correspond à un certain nombre de fois cette largeur de référence.

Styles fluvial objectif	Torrentiel	Rectiligne à bancs	A méandres migrants	A méandres développés
Largeur de référence	Largeur observée sur le terrain	Largeur de Yalin et Da Silva	Largeur de Yalin et Da Silva	Largeur de Yalin et Da Silva
Coefficient pour l'espace de mobilité théorique nécessaire	6	6	7	8
Coefficient pour l'espace de mobilité théorique optimal	10	10	12	15

Tableau 3 : Définition des espaces de mobilité théorique pour les périmètres morphologiques

Suite à la définition de ces largeurs de référence, différents coefficients sont testés pour les différents styles fluviaux afin de définir les bandes tampons, les coefficients choisis sont précisés dans le Tableau 3 ci-dessus.

Suite à l'établissement de cette bande tampon, une correction manuelle a été effectuée pour notamment inclure des zones de mobilité historiques et potentielles du cours d'eau (fond de vallée, zone d'alluvions récentes…) et exclure des espaces où la mobilité est impossible, notamment sur la base des données topographiques (versants abrupts, absence de mobilité historique et espace loin du cours d'eau…) (voir Figure 40 ci-dessous).

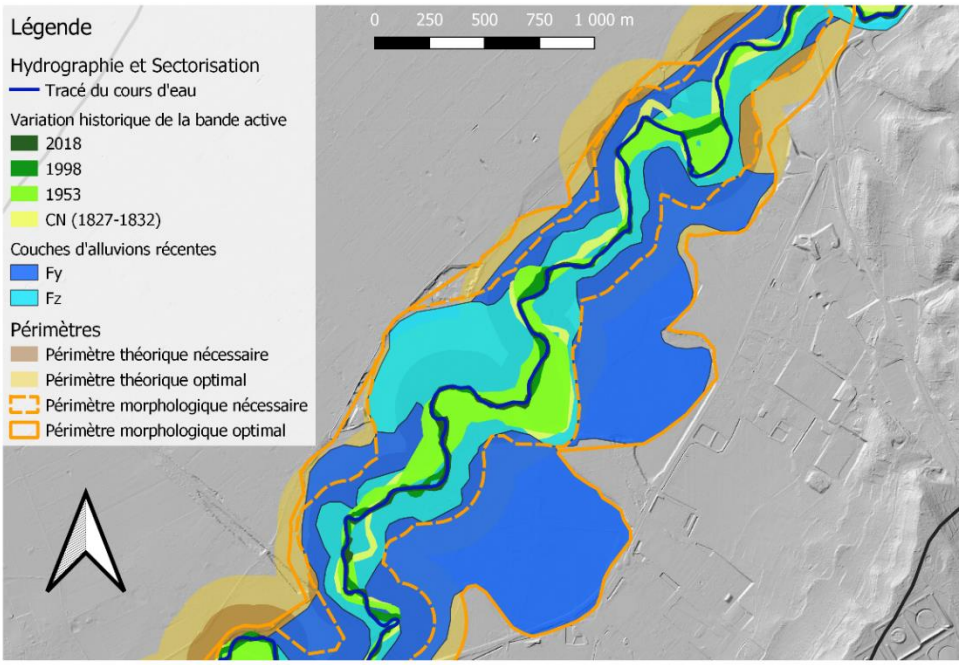


Figure 40 : Périmètres morphologiques sur l'Arc aval à Berre-l'Etang (fond : relief ombragé)

4.2.3. Périmètre hydraulique

Un périmètre nécessaire et un périmètre optimal ont également été définis afin de déterminer des zones de grands écoulements. Ceux-ci se basent, pour le périmètre nécessaire, inondable par les crues fréquentes, et pour le périmètre optimal, inondable par des crues rares, sur la base des données suivantes (le classement est représentatif de l'ordre de prise en considération de ces données) :

- Résultats d'études hydrauliques (carte des aléas, zone d'inondation de crues centennales (1978, 1993, modélisation de crues d'occurrence biennale à décennale)
- Zones d'expansion des crues (ZEC) définies dans la deuxième phase de l'étude
- Atlas des zones inondables (AZI) : représentation des lits mineurs, moyens et majeurs des cours d'eau
- Espace de ruissellement préférentiel (données ExZEco [Extraction des Zones d'Ecoulement] (Cerema, 2020)[4], voir explication ci-après et en annexe 6)

Pour les UH avec un style fluvial objectif torrentiel, le périmètre hydraulique est associé au périmètre morphologique comme recommandé dans le guide. La comparaison de ce périmètre sur ces secteurs avec les données présentes confirme que la définition d'un périmètre purement hydraulique dans ces espaces généralement engorgés et où le fond de vallée et les bassins versants abrupts, associés à des secteurs producteurs d'éléments solides, n'a pas d'intérêt. En effet, le périmètre morphologique, sur ces espaces inclut systématiquement les espaces de forts écoulements. Pour le périmètre nécessaire, les espaces avec des aléas forts ou les zones inondables par des crues de faibles occurrences ont été

retenus, ainsi que les lits moyens définis dans l'AZI. Pour le périmètre optimal, les espaces avec des aléas faibles à forts et les zones inondables par les crues centennales ont été retenus.

Sur certains secteurs, aucune cartographie du risque inondation et aucune identification du lit majeur n'avaient été réalisées. Ainsi, aucune donnée dont l'utilisation était recommandée par le guide technique[11] n'était disponible. Néanmoins, aujourd'hui, pour l'arc méditerranéen, un nouveau type de données a été développé (diffusion depuis 2019) dans le cadre d'une étude interrégionale relative à la gestion des risques de ruissellement, les données ExZEco. La méthode ExZEco a été élaborée par le Cerema et permet, pour de petits bassins versants, de déterminer une emprise de zones potentiellement inondables par ruissellement. Sur la base d'un MNT, des talwegs, chemins préférentiels d'écoulement, sont calculés. Des modifications légères de la topographie (« bruitage ») permettent de calculer des talwegs différents. La superposition de ces talwegs donne une emprise potentiellement inondable par ruissellement. Les données de ces surfaces sont classées par surface drainée (de 0,01 à 50 km²) pour une intensité de bruitage définie (ExZEco020 [bruitage de 20 cm], 040 [correction de 20 cm du MNT sur la base des résultats de ExZEco020 puis bruitage de 20 cm], 060 [correction de 40 cm du MNT sur la base des résultats de ExZEco020 et ExZEco040 puis bruitage de 20 cm], 080 et 100)[4 - 23]. Une description plus précise des données ExZEco et illustrée est faite en annexe 8.

Les UH de la zone test sans données sont généralement à l'amont de bassin versant et donc correspondent à de petits bassins versants ce qui justifie l'utilisation des données ExZEco. Comme celles-ci ont été développées récemment (publication de données sur de grands bassins comme l'arc Méditerranéen depuis 2019), une analyse de ces données a été faite pour déterminer, sur le bassin du fleuve l'Arc, quelles données fournies par ExZEco correspondent le mieux au différents périmètres hydrauliques sur les zones où ils ont pu être définis (voir annexe 7). Il en ressort que les données de ExZEco040 sont cohérentes pour le périmètre hydraulique nécessaire et celles de ExZEco100 sont cohérentes pour déterminer le périmètre hydraulique optimal. La classe de surface drainée à utiliser varie selon la taille de bassin versant (plus l'amont du tronçon sera étudié, plus la classe de surface drainée à utiliser sera réduite.

Pour tous les périmètres, les ZEC, définies dans une logique parcellaire lors du second volet de l'étude, ont été prises en compte.

Sur la base de ces données, les périmètres hydrauliques sont déterminés (voir Figure 41).

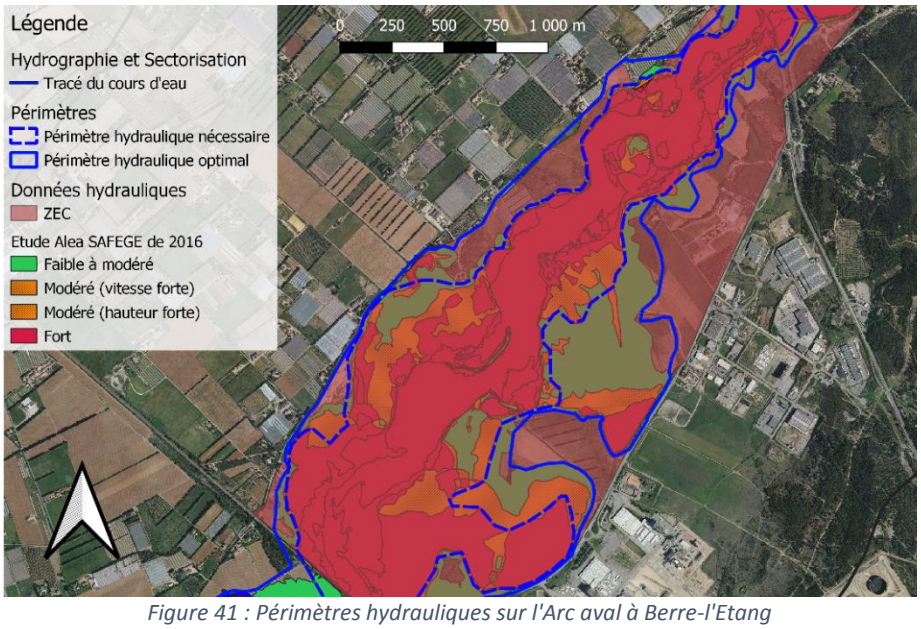


Figure 41 : Périmètres hydrauliques sur l'Arc aval à Berre-l'Etang

La Figure 42 présente le cas particulier d'un secteur amont (style fluvial rectiligne à bancs) pour lequel, en l'absence de données plus précises, les données ExZEco ont été utilisées. Sur certaines portions du cours d'eau, le périmètre hydraulique ne correspond pas totalement aux limites d'ExZEco. Cela s'explique par une observation de la topographie locale (par le MNT) indiquant une altitude trop importante par rapport au niveau du fond du lit pour supposer que de forts débordements et donc de forts écoulements puissent être observés.

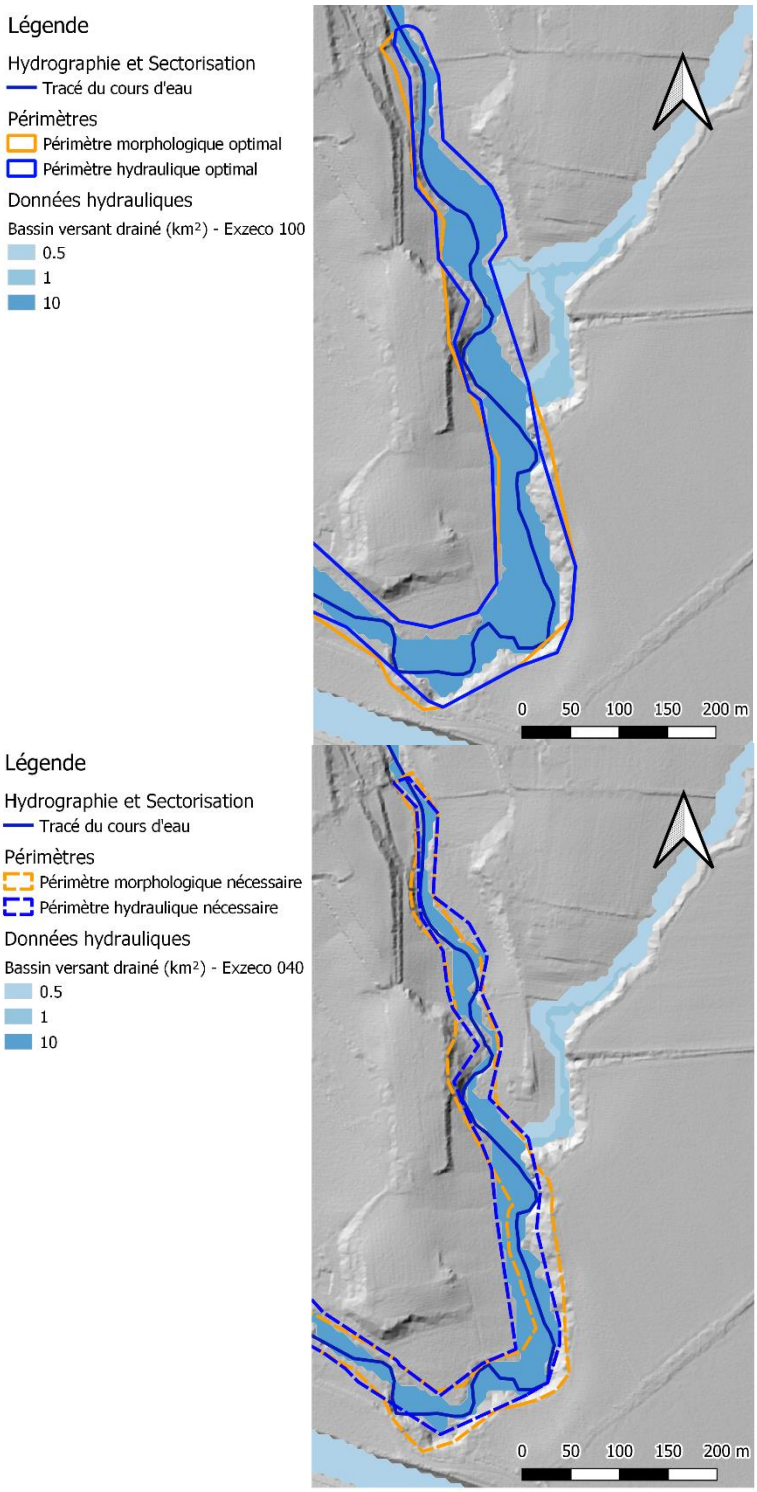


Figure 42 : Périmètres hydrauliques basés sur les données ExZEco (Source : Cerema, 2019[3]) sur l'Aigue-Vive (périmètre optimal en haut, périmètre nécessaire en bas)

Les **périmètres hydrauliques sont ensuite additionnés aux périmètres morphologiques** (voir Figure 43 ci-dessous).

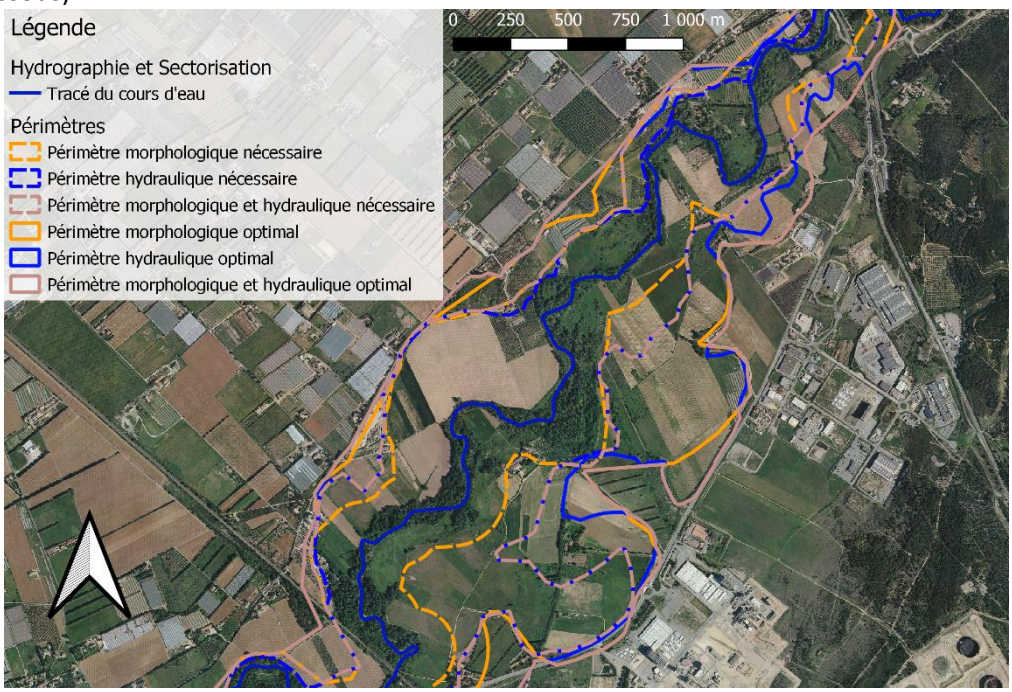


Figure 43 : Périmètres morphologiques et hydrauliques sur l'Arc aval à Berre-l'Etang

4.2.4. Intégration du contexte environnemental

Pour intégrer les éléments relevant du **contexte biologique**, une cartographie des zones humides est utilisée (cartographies du Conservatoire des Espaces Naturels (CEN) et de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer (DDTM) des Bouches-du-Rhône. **Toutes les zones humides (ZH) en proximité immédiate des cours d'eau vont être intégrées à l'EBF**. Les ZH attenantes au périmètre morphologique et hydraulique nécessaire vont être intégrées au périmètre nécessaire et celles attenantes au périmètre optimal, vont y être intégrées.

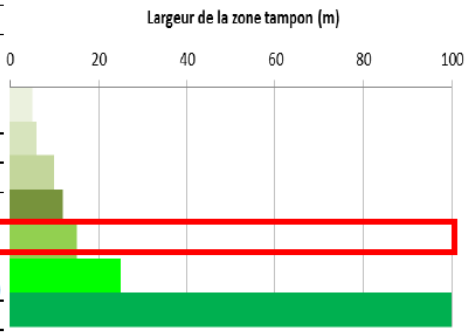
Concernant le **contexte biogéochimique**, il est considéré que la fonction d'autoépuration du milieu se déroule essentiellement dans le lit mineur du cours d'eau et est donc déjà incluse dans le périmètre morphologique et hydraulique. Cependant, **pour réduire la capacité de transferts de polluants, des bandes tampons vont être définies** de part et d'autre des cours d'eau. La largeur de ces bandes tampons, depuis le sommet de la berge, est déterminée comme suit :

- Pour les secteurs avec des écoulements torrentiels, la pente forte mais aussi les faibles pressions dans ces espaces en amont de bassin versant (secteurs généralement naturels), ont entrainé la décision de **ne pas établir de bande tampon** spécifique à la biogéochimie, la limitation du transfert des polluants étant déjà permise par les secteurs inclus dans les périmètres morphologiques, hydrauliques et biologiques.
- Lorsque l'occupation des surfaces en proximité immédiate des cours d'eau est densément agricole, notamment en termes de cultures (céréales, viticultures, etc.) comme recommandée dans le guide du SDAGE RM, sur la base des données de la Figure 44 ci-dessous, une bande tampon de **15 m** est appliquée.
- Lorsque l'occupation des surfaces en proximité immédiate des cours d'eau n'est pas agricole (milieu urbain ou industriel), une largeur tampon plus réduite de **5 m** est utilisée. Il est considéré que la pollution en milieu urbain possède une origine plus ponctuelle au niveau des points de rejet. Néanmoins, lorsque l'étude de la qualité de l'eau montre localement un milieu

pollué (état moyen à mauvais) ou lorsque l'on se trouve à proximité d'une station d'épuration, la largeur tampon est fixée à **10 m**, afin de favoriser une végétation minimale des bordures de cours d'eau participant à la valorisation des capacités d'autoépuration du cours d'eau.

Il est observé que l'intégration du périmètre biogéochimique ne modifie que très peu les limites du périmètre nécessaire dans lequel il est inclut.

Largeur (m)	Estimation des gains
5	• Limitation du transfert de 50% du phosphore particulaire • Limitation du transfert de 50% de l'azote • Limitation au cours d'ea de 90 des produits en cours de pulvérisation • Influence sur la régulation des températures de l'eau
6	• Limitation du transfert de 60% des produits phytosanitaires
10	• Infiltration de 10% du ruissellement
12	• Limitation du transfert de 80% des produits phytosanitaires
15	• Limitation du transfert de 100% du phosphore particulaire et dissous
25	• Limitation du transfert de 75% de l'azote • Epuration de 80% des polluants diffus (phosphorse, nitrate, pesticides)
100	• Limitation du transfert de 90% de l'azote



Les largeurs proposées correspondent ici à des largeur de corridor rivulaire avec une végétation comprenant les différentes strates arbustives présentes naturellement

Sources

Coll et al. , 2008, L'arbre, la rivière et l'homme, CSPNB
Thèse de Thierry Thormos, Analyse à l'échelle régionale de l'impact de l'occupation du sol dans les corridors rivulaires sur l'état écologique des cours d'eau, 2010, IRSTEA AGROPARITECH
Carluer et al. , 2011, Guides de dimensionnement des zones tampons, IRSTEA, MEDDE
Gril, Henaff, 2010, Guide de diagnostic de l'efficacité des zones tampons rivulaires vis-à-vis du transfert hydrique des pesticides, ONEMA, IRSTEA
Groupe Zone Tampon, 2007, les fonctions environnementales des zones tampons, CORPEN
Paugam, Gril, 2008, Zones tampons et préservation des milieux aquatiques, CORPEN

Figure 44 : Relation entre la largeur tampon et le gain biogéochimique pour un usage agricole des terrains à côté du lit mineur (Source : Guide du SDAGE RM 2016-2021, 2016[11])

Comme les données disponibles en termes de **contexte hydrogéologique** (couche des alluvions récentes) **ont déjà été intégrées aux périmètres morphologiques**, aucun élément supplémentaire ne sera intégré aux périmètres.

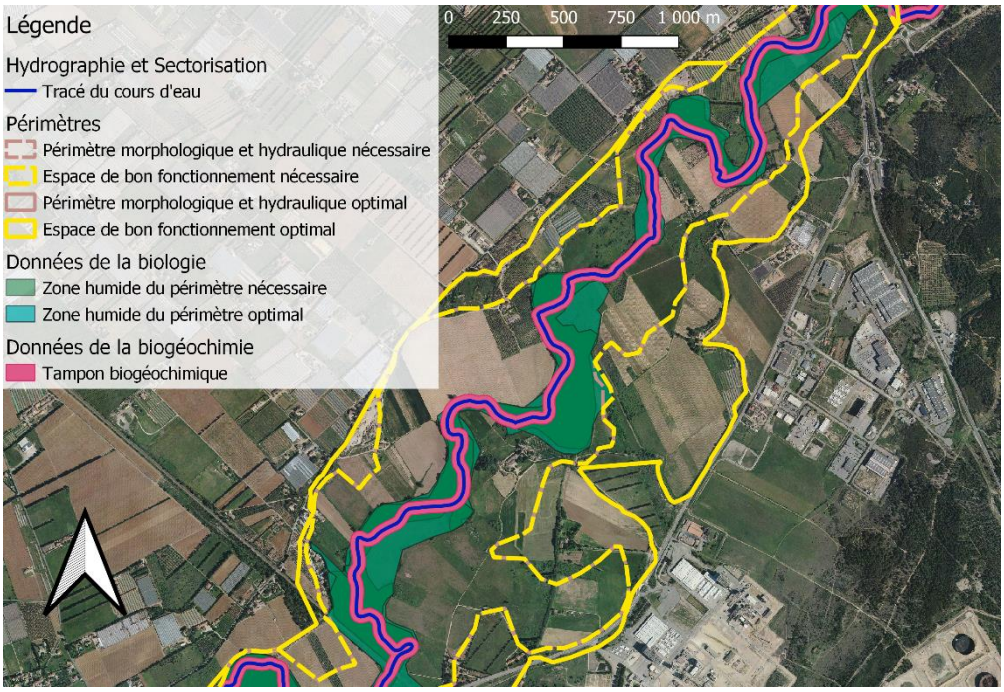


Figure 45 : Intégration du contexte environnemental et EBF sur l'Arc aval à Berre-l'Etang

L'intégration des données du contexte environnemental permet d'obtenir l'EBF nécessaire et l'EBF optimal (Figure 45 et Figure 46).

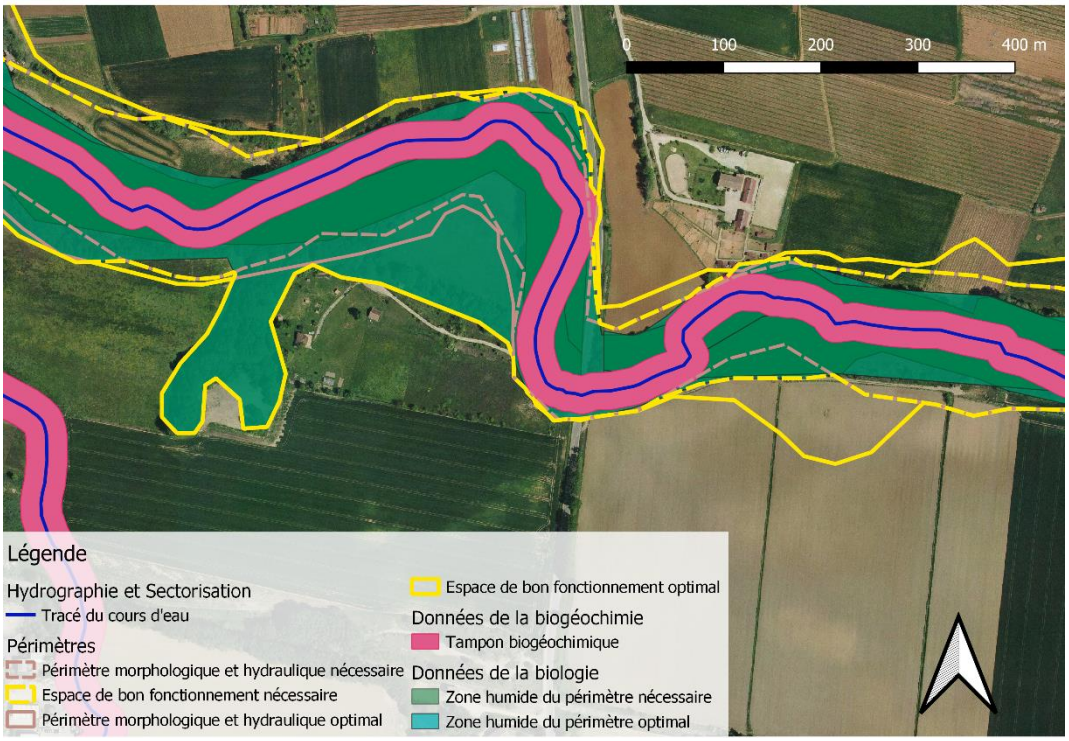


Figure 46 : Intégration du contexte environnemental et EBF sur l'Arc amont à Rousset

Les faibles ajustements réalisés pour l'intégration du contexte environnemental traduisent bien que la préservation d'un espace uniquement morphologique et hydraulique puisse permettre dans la plupart des cas de soutenir les fonctions relevant de la biogéochimie, de la biologie et de l'hydrogéologie.

4.2.5. Bilan de la méthodologie appliquée

La méthodologie appliquée est synthétisée dans le Tableau 4 page suivante.

<table>
<tr><th>Périmètres et données du contexte</th><th>Style fluvial objectif torrentiel</th><th>Style fluvial objectif rectiligne à bancs</th><th>Style fluvial objectif à méandres migrants</th><th>Style fluvial objectif à méandres développés</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Morphologique</td><td colspan="4">Délimitation de périmètres théoriques sur la base de largeur de plein bord de référence (L)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Largeur actuelle 6L – 10L</td><td colspan="3">Largeur théorique de Yalin et da Silva</td></tr>
<tr><td>6L – 10L</td><td>7L – 12L</td><td>8L – 15L</td></tr>
<tr><td colspan="4">Correction sur la base des données suivantes :
- MNT et LIDAR
- Evolution de la bande active du cours d'eau
(du cadastre napoléonien à aujourd'hui pour le périmètre optimal)
(de 1953 à aujourd'hui pour le périmètre nécessaire)
- Résultats de terrain
- Couches des alluvions récentes Fz et Fy</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Hydraulique</td><td rowspan="2">Périmètre morphologique</td><td colspan="3">Utilisation des résultats d'études hydrauliques :
- cartographie des aléas (PPRI…)
- ZEC
- AZI
- carte des crues centennales</td></tr>
<tr><td>En l'absence de données :
Données ExZEco
- ExZEco040
-ExZEco100</td><td colspan="2">------</td></tr>
<tr><td>Morphologique + Hydraulique</td><td>------</td><td colspan="3">Correction des périmètres morphologiques à l'aide des périmètres hydrauliques quand ceux-ci ne sont basés que sur les périmètres morphologiques techniques et qu'aucune donnée ne semble valider cette délimitation théorique

Assemblage des deux périmètres</td></tr>
<tr><td>Biologique</td><td colspan="4">Intégration des zones humides</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Biogéochimique</td><td colspan="4">Délimitation d'un espace tampon pour les UH</td></tr>
<tr><td>- 0 m en secteur torrentiel</td><td colspan="3">- 15 m lorsque l'occupation du sol à proximité est majoritairement agricole
- 10 m à proximité de STEP ou d'espaces pollués
- 5 m sinon</td></tr>
<tr><td>Hydrogéologique</td><td colspan="4">- Couches des alluvions récentes déjà intégrées dans le périmètre morphologique
- Autres données non disponibles</td></tr>
</table>

Tableau 4 : Bilan de la méthode de délimitation de l'EBF de l'Arc (en gras italique sont représentés les éléments de méthode propres au bassin versant de l'Arc)

5. Discussion des résultats

La délimitation des EBF présentée ci-dessus est néanmoins à mettre en perspective au regard de certaines difficultés rencontrées, de certaines limites qui se sont posées.

Tout d'abord, la diversité des données peut par moment venir questionner la cohérence des espaces construits. Par exemple, pour la délimitation des périmètres hydrauliques, la présence sur certains UH de plusieurs études hydrauliques oblige à faire un choix sur les données utilisées, même lorsque les deux études ont le même objectif. Deux études basées sur une crue centennale pour obtenir une carte d'aléas peuvent donner des limites de périmètres légèrement différentes par des hypothèses et outils de modélisation différents. Néanmoins, aucune des deux études n'est plus "vraisemblable" qu'une autre. A l'inverse, sur certains secteurs où aucune étude hydraulique n'a été réalisée, les données de l'AZI ou encore de ExZEco ont été utilisées. Bien que ces éléments renseignent aussi sur les écoulements en surface, les méthodes mais aussi objectifs de calcul de ces données diffèrent.

Néanmoins, l'incertitude ne se trouve pas uniquement dans l'association des différentes données extérieures collectées, mais également dans les données produites dans le cadre de cette étude. Par exemple, les résultats des investigations, bien qu'exhaustifs ne sont sans doute pas complets. Toutes les érosions de berges où merlons et digues n'ont pu être recensés. Par ailleurs, pour permettre une certaine efficience dans l'exploitation des données, l'analyse diachronique de la bande active n'a été réalisée que sur certains secteurs préalablement choisis comme étant des secteurs avec une mobilité potentiellement marquée sur la base d'études antérieures. Il est possible que certaines portions des cours d'eau avec une évolution de la bande active remarquable n'aient pas été mis en évidence.

Il est ainsi ressorti qu'aucune automatisation systématique ne pouvait permettre la délimitation des EBF et qu'il faut en permanence prendre du recul sur la pertinence de telle ou telle donnée, de tel ou tel choix, et en permanence réaliser ce croisement entre les données disponibles et les interprétations et hypothèses réalisées au cours de l'étude d'après les observations de terrain. Pourtant, il reste cohérent d'essayer d'homogénéiser au maximum cette méthode pour permettre une étude facilitée des EBF pour un grand linéaire, comme les 300 km de cours d'eau de l'Arc et de ses affluents.

La méthode présentée ci-dessus permet d'approfondir les recommandations techniques du guide, mais aussi de prendre du recul sur celles-ci. Bien que la méthodologie présentée ne soit appliquée qu'à un secteur d'étude « test » sur le bassin versant de l'Arc et que celle-ci ne n'ait pas encore été validée par le maître d'ouvrage, la réflexion sur l'utilisation des données peut permettre de faciliter la mise en place d'une méthodologie adaptée pour la délimitation des EBF sur d'autres bassins versants. A l'heure où la volonté de délimiter ces espaces augmente fortement, de nombreux appels d'offres pour la délimitation d'EBF ayant été émis dernièrement, l'adaptation de la méthode du guide du SDAGE RM à un territoire d'étude, le bassin versant de l'Arc, et ses enjeux locaux peut servir d'exemple.

Au-delà de la réflexion sur la méthode technique mise en place, il semble intéressant de se pencher sur la possible utilisation qui en sera faite. Les EBF sont une notion très récente et bien que définis sur plusieurs bassins versants en Rhône-Méditerranée, la valorisation de ces espaces n'est pas encore systématique. Pourtant leur aspect inclusif peut apporter une réelle cohérence et éviter un morcelage de la réglementation. Pascale Biron, chercheuse canadienne, évoquait ainsi en 2014 l'intérêt d'intégrer les espaces de liberté pour développer une réglementation durable et cohérente et ainsi permettre une résilience des milieux vis-à-vis des changements climatiques et d'occupation des sols[1]. Dans le cadre du SAGE de l'Arc, la mise en place d'une réglementation pour protéger ces espaces peut vraiment amener à protéger l'hydrosystème mais aussi les activités autour du cours d'eau. Dans un contexte méditerranéen où la crainte d'un événement pluvieux comparable à celui de 2010 sur le

bassin versant de l'Argens dans le Var, à l'est du bassin versant de l'Arc, ou encore à celui de 2020 dans les Alpes-Maritimes, et où les activités industrielles et agricoles se développent au plus proche des cours d'eau, la protection de ces espaces pourraient permettre de réduire le risque inondation, d'améliorer la qualité de l'eau… Ainsi, la complexité de l'espace délimité fait que sa protection peut entraîner des réactions bénéfiques en chaine et bénéficier aux usagers et riverains. Il faut néanmoins que l'outil ne soit pas construit, ni même perçu, comme un nouvel échelon administratif venant s'ajouter à d'autres éléments (Plan de Prévention du Risque Inondation [PPRI], Plan Local d'Urbanisme [PLU], Mesures Agro-environnementales et climatiques [MAEC], mesures du SAGE…) mais bien comme un élément servant de base de réflexion dans le développement et la mise en œuvre de tels documents d'aménagement et de protection du territoire.

Conclusion et perspectives

Sur le bassin versant de l'Arc, les pressions se sont renforcées autour des cours d'eau en lien avec une urbanisation permanente et un développement agricole. En deux siècles, la bande active des cours d'eau a ainsi par endroit perdu plus de 50 % de sa surface, l'Arc ayant en moyenne subi une diminution du tiers de sa bande active en seulement une soixantaine d'années. Pourtant, ces rivières devraient avoir, malgré des berges globalement faiblement érodables (cas de plus de 50% des berges étudiées), une dynamique plus poussée au regard des caractéristiques des cours d'eau (puissance spécifique de certains secteurs dépassant 100 W/m², diamètre maximal potentiellement mobilisable par une crue biennale largement supérieur au D50 et généralement proche du D90). Les aménagements réalisés (digues, recalibrage) sur les rivières pour préserver les zones habitées construites en lit majeur ont également entrainé des disfonctionnements de l'hydrosystème (perturbation de l'équilibre sédimentaire [incisions, érosions de berges…] altérant l'hydrosystème sur le plan écologique [déconnexion des zones humides, réduction des habitats qu'elles constituent…]) sans pour autant permettre une maîtrise complète de l'aléa inondation.

La délimitation d'un espace de bon fonctionnement, au sein duquel les fonctions de l'hydrosystème associées à la morphologie, l'hydraulique, la biologie, la biogéochimie et l'hydrogéologie peuvent se dérouler correctement lorsqu'elles ne sont pas contraintes, a été demandée par le SABA pour améliorer la gestion et la préservation des cours d'eau et de leurs annexes.

Pour définir les espaces techniques de bon fonctionnement (nécessaire et optimal), il est nécessaire d'appliquer une méthodologie adaptée aux caractéristiques du bassin versant mais aussi aux données disponibles, notamment fournies par un diagnostic approfondi à l'échelle du bassin versant. Dans la présente étude, une méthodologie basée sur le guide technique prescrit par le SDAGE RM 2016-2021 a été mise en place sur une zone d'étude test du bassin versant. Cette méthodologie a dû être adaptée, certaines contraintes ne pouvant être que difficilement remises en cause. Au-delà d'une adaptation de la méthode à l'échelle du bassin, des ajustements locaux des périmètres ont été effectués en fonction là-encore du contexte et des données disponibles. L'incertitude associée à la définition exacte des limites des périmètres techniques réside dans l'accumulation de ces données et des choix et hypothèses qui sont en permanence réalisés dans le but d'obtenir un espace cohérent.

La méthodologie développée a vocation à être appliquée à l'ensemble du bassin versant pour terminer la délimitation des périmètres techniques. Ces périmètres techniques seront présentés en atelier de concertation avec les acteurs du territoire qui définiront un espace de bon fonctionnement concerté au regard des objectifs de préservation et de restauration des milieux qu'ils souhaitent pour leur territoire, avant que ces espaces ne soient présentés aux membres de la CLE. Par ailleurs, un effort de vulgarisation devra être réalisé pour permettre la transition entre ces espaces techniques et les espaces concertés, le but étant de réglementer ces espaces et d'y associer un programme d'actions pour atteindre ces objectifs par le biais du SAGE de l'Arc qui sera prochainement révisé et des actions du syndicat de rivière. Néanmoins, il est possible d'envisager une portée plus large de ces EBF qui pourront également être prise en compte dans la définition d'autres documents d'aménagements (PLU, PPRI…).

Plus largement, les espaces de bon fonctionnement étant un concept assez récent, la définition d'une méthodologie appliquée au bassin versant de l'Arc peut aussi servir d'exemple et de ressource pour la délimitation d'espace de bon fonctionnement sur d'autres territoires.

Glossaire

Alluvion* : Ensemble des matériaux (galet, gravillons, sables) apportés et déposés par les eaux courantes, spécialement lors de crues, dans les plaines d'inondation.

Bande active : Espace comprenant le lit moyen des cours d'eau comprenant des bancs alluviaux ou peu végétalisés remobilisés par des crues fréquentes (annuelles à biennales).

Bassin versant* : Le bassin versant se définit comme l'aire de collecte des eaux, considérée à partir d'un exutoire : elle est limitée par le contour à l'intérieur duquel toutes les eaux s'écoulent en surface et en souterrain vers cet exutoire.

Coupure de méandre* : Événement qui se produit lorsque deux coudes d'un méandre se rejoignent. Un bras mort se forme alors et le cours de la rivière s'en trouve modifié.

Cours d'eau* : Caractérisé par la permanence du lit, le caractère naturel du cours d'eau ou son affectation à l'écoulement normal des eaux et une alimentation suffisante, ne se limitant pas à des rejets ou à des eaux de pluies.

Cours d'eau rectifié* : Se dit d'un cours d'eau droit, linéaire, ayant subi des modifications profondes de sa morphologie de la main de l'homme. Il peut présenter de nombreuses anomalies de fonctionnement (érosion régressive, incision), une homogénéisation de ses faciès d'écoulement et donc une perte d'intérêt majeur pour la faune et la flore. En opposition au cours d'eau méandriforme.

Digue* : Ouvrage en béton, en terre ou en enrochement, ou simple levée de terre (compactée ou non) destinée à : canaliser un cours d'eau et protéger éventuellement ses abords (lit majeur) contre les inondations.

Erosion* : Phénomène naturel, généralement provoqué par le courant, participant au transport de la charge solide et à la recharge sédimentaire du cours d'eau. Les érosions de berges sont à l'origine des migrations de méandres, et garantissent le fonctionnement dynamique du cours d'eau. Il existe cependant des érosions de berge d'origine non naturelle (piétinement par le bétail, plantation en rive non adaptée…).

Espace de bon fonctionnement : « espace dans lequel pourront se dérouler sans contraintes les phénomènes résultant des principales fonctions de l'hydrosystème. Il s'agit des fonctions liées à la morphologie, l'hydraulique, la biologie, l'hydrogéologie et la biogéochimie. » (définition du SDAGE RM 2016-2021)

Espace de bon fonctionnement nécessaire : espace minimal au sein duquel les fonctions écologiques peuvent s'exprimer durablement et soutenir les services rendus par l'environnement. (définition du SDAGE RM 2016-2021)

Espace de bon fonctionnement optimal : espace où le fonctionnement se rapproche le plus possible d'un fonctionnement sans contraintes (naturelles ou anthropiques). Une extension de cet espace ne permettrait pas aux fonctions écologiques de se réaliser significativement mieux. (définition du SDAGE RM 2016-2021)

Espace de liberté : « espace du lit majeur à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales pour permettre la mobilisation des sédiments ainsi que le fonctionnement optimal des écosystèmes aquatiques » (définition du SDAGE 1996 – 2009 RMC), espace de mobilité.

Espace de mobilité* : voir espace de liberté, composante morphologique de l'espace de bon fonctionnement, espace du lit majeur à l'intérieur duquel le lit mineur peut se déplacer, conformément à l'arrêté du 24/01/2001 relatif à l'exploitation des carrières.

Granulométrie : Mesure de la dimension d'un échantillon de grains et analyse de la distribution de cette fraction.

Hydromorphologie* : Etude de la morphologie et de la dynamique des cours d'eau, notamment l'évolution des profils en long et en travers, et du tracé planimétrique : capture, méandres, anastomoses etc.

Hydrosystème* : Ecosystème spécifique des milieux aquatiques décrit généralement par : les êtres vivants qui en font partie, la nature du lit et des berges, les caractéristiques du bassin versant, le régime hydraulique, et les propriétés physico-chimiques de l'eau.

Incision* : Désigne un enfoncement généralisé du fond d'un cours d'eau, résultat d'une érosion régressive ou d'une érosion progressive.

Lit majeur* : Lit maximum qu'occupe un cours d'eau dans lequel l'écoulement ne s'effectue que temporairement lors du débordement des eaux hors du lit mineur en période de très hautes eaux (en particulier lors de la plus grande crue historique). Ses limites externes sont déterminées par la plus grande crue historique. Le lit majeur du cours d'eau permet le stockage des eaux de crues débordantes. Il constitue également une mosaïque d'habitats pour de nombreuses espèces. Cet ensemble d'habitats est aussi appelé « annexe hydraulique ».

Lit mineur* : Partie du lit comprise entre des berges franches ou bien marquées dans laquelle l'intégralité de l'écoulement s'effectue la quasi-totalité du temps en dehors des périodes de très hautes eaux et de crues débordantes. Le lit mineur englobe le lit d'étiage. Sa limite est le lit de plein bord.

Lit moyen : Lit maximum qu'occupe un lit lors de crues courantes.

Ripisylve* : Formation végétale qui se développe sur les bords des cours d'eau ou des plans d'eau situés dans la zone frontière entre l'eau et la terre (écotones). Elle est constituée de peuplements particuliers du fait de la présence d'eau pendant des périodes plus ou moins longues.

Style fluvial : Typologie basée sur les caractéristiques géomorphologiques du lit du cours d'eau. Les fonctions hydrauliques et écologiques vont dépendre de celles-ci.

Style fluvial actuel : Style fluvial présent actuellement sur un cours d'eau.

Style fluvial de référence : Style fluvial que prendrait le cours d'eau si les contraintes anthropiques s'exerçant étaient supprimées et que les processus géomorphologiques pouvaient se réaliser normalement. Ce style fluvial est dit « résilient ».

Style fluvial objectif : Dans le cadre de cette étude, style fluvial vers lequel tendrait le cours d'eau après restauration de l'espace de bon fonctionnement.

Talweg (ou thalweg) : Chemin préférentiel d'écoulement de l'eau, ligne de fond de vallée.

Zone humide (ZH)* : Milieu naturel marqué par la présence temporaire ou permanente d'eau, accueillant une flore et une faune spécifique. Il peut s'agir par exemple d'un marais, d'une tourbière, d'une mare, d'un étang, d'un estuaire, etc.

* Définition basée sur les informations apportées par le glossaire eau, milieux marins et biodiversité animé et géré par l'OiEau (Office International de l'Eau), avec l'appui de l'OFB (Office français de la biodiversité). http://www.glossaire-eau.fr/

Bibliographie

1. BIRON Pascale et al. **Freedom space for rivers: a sustainable management approach to enhance river resilience**. *Environmental Management*, Volume 54, p1056-1073, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00267-014-0366-z>
2. BRAVARD Jean-Paul et PETIT François. **Les cours d'eau : dynamique du style fluvial**. Paris, Armand Colin, 2000. 222p. (Collection U). ISBN : 978-2-2002517-7-2.
3. CEREMA. **Carte des zones susceptibles au ruissellement sur l'Arc Méditerranéen : Résultats Exzeco en Région Provence Alpes Côte d'Azur par départements** [en ligne]. Cerema. [consulté le 05/07/2021]. <https://carto.cdata.cerema.fr/1/EXZECO_PACA_DPTS.map>
4. CEREMA. **Notice – Ruissellement sur l'Arc Méditerranéen – Application de la méthode ExZEco**. Cerema, 2020. 4p.
5. CHABRAND Marie. **Définition et évaluation économique des alternatives de gestion des espaces de mobilité des cours d'eau du bassin versant de la Moder (Bas-Rhin). Mémoire de fin d'étude d'ingénieur**. ENGEES, 2013. 104p.
6. CHAPUIS Margot. **Mobilité des sédiments fluviaux grossiers dans les systèmes fortement anthropisés : éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance**. Thèse de Doctorat, Géographie, Aix-Marseille Université, 2012, 253p.
7. CLE DU SAGE DU BASSIN VERSANT DE L'ARC. **Plan d'Aménagement et de Gestion Durable du SAGE du bassin versant de l'Arc.** Autrement Dit Communication & Environnement. 2014. 302p.
8. COMITE DE BASSIN LOIRE-BRETAGNE. **Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux 2016-2021 - Bassin Loire-Bretagne**. Agence de l'eau Loire-Bretagne. 2015. 360p
9. COMITE DE BASSIN RHIN-MEUSE**. SDAGE 2016-2021 des districts « Rhin » et « Meuse » - Partie Française**. Agence de l'eau Rhin-Meuse. 2015.
10. COMITE DE BASSIN RHÔNE-MEDITERRANEE CORSE. **Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux du bassin Rhône-Méditerranée Corse**, Mode d'emploi, glossaire et index. Comité de bassin Rhône-Méditerranée. 1996. p27-28.
11. COMITE DE BASSIN RHÔNE-MEDITERRANEE. **Guide technique du SDAGE Rhône-Méditerranée 2016-2021 - Délimiter l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau**. Comité de bassin Rhône-Méditerranée. 2016. 182p.
12. COMITE DE BASSIN RHÔNE-MEDITERRANEE. **Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux 2010-2015 - Bassin Rhône-Méditerranée.** Comité de bassin Rhône-Méditerranée. 2009. 315p.
13. COMITE DE BASSIN RHÔNE-MEDITERRANEE. **Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux Rhône-Méditerranée 2016-2021.** Comité de bassin Rhône-Méditerranée. 2015. 512p.
14. DA SILVA Ana Maria Ferreira et YALIN Selim. **Fluvial Processes** 2nd Edition. IAHR Monograph, Queen's University, Kingston, Canada, 289p, 2017. ISBN : 978-1-315-20618-9.
15. FRANCE. MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT. **Arrêté du 24 janvier 2001 modifiant l'arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières et l'arrêté du 23 janvier 1997 relatif à la limitation des bruits émis dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement**. 2001. NOR : ATEP0100044A.

16. FRANCE. PREMIER MINISTRE. Décret n° 2019-1400 du 17 décembre 2019 adaptant les orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques. *Journal officiel* n°0295 du 20 décembre 2019. NOR : TREL1803795D.
17. GAUTIER Jean-Noël. **L'espace de liberté des cours d'eau, Les grands cours d'eau dynamique d'Europe et le concept d'espace de mobilité**. [*Présentation*]. 22-23 octobre 2009. [consulté en ligne le 14 juin 2021] <https://centrederessources-loirenature.com/sites/default/files/ged/Espace_de_liberte_JNG_22102009.pdf>.
18. HEY Richard et THORNE Colin. **Stable channels with mobile gravel beds**. *Journal of Hydraulic Engineering*, Volume 112, Issue 8, p671-689, 1986.
19. KLEIN Cécile. **Méthodologie de détermination des fuseaux de mobilité des rivières du Piémont des Vosges (Haut-Rhin), Intégration de données topographiques haute résolution et de la problématique des plantes invasives**. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur. ENGEES, 2008, 117p.
20. MALAVOI Jean-René et BRAVARD Jean-Paul. **Eléments d'hydromorphologie fluviale**. ONEMA, 2010, 224 p. (Comprendre pour agir). ISBN 978-2-9516393-2-4.
21. MALAVOI Jean-René, GARNIER Claire-Cécile, LANDON Norbert, RECKING Alain et BARAN Philippe. **Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière**. ONEMA, 216p, 2011. (Comprendre pour agir). ISBN : 978-2-9516393-5-5.
22. METIVIER François et BARRIER Laurie. **Alluvial landscape evolution: What do we know about metamorphosis of gravel-bed meandering and braided streams?**. *Gravel-Bed Rivers: Processes, Tools, Environments*, John Wiley & Sons, Ltd, p474-501, 2012. <https://doi.org/10.1002/9781119952497.ch34>.
23. PONS Frédéric, BADER Bruno, MOULIN Christophe, PANAFIEU Blandine, CHABAUD Laurent, VERRHIEST-LEBLANC Ghislaine. **Modélisation du ruissellement, application de la méthode Exzeco sur 8 départements de l'Arc méditerranéen**. Colloque SHF : « Ruissellement », Lyon, 30 novembre – 2 décembre 2020. 10p.
24. RECKING Alain. **Equations et concepts pour le calcul du transport solide en rivière**. INRAE et OFB, 2020. [consulté en ligne le 03/08/2021], <https://www.bedloadweb.com/Les%20%C3%A9quations.pdf>.
25. ROLAN-MEYNARD Marlène et al. **Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau**. Agence française pour la biodiversité, 2019. **Partie C : Fiches suivis, Fiche 9 : Hydrologie,** p141-165. (Collection Guides et protocoles). ISBN web : 978-2-37785-063-4
26. SCE. **Les métiers de SCE : L'eau, l'énergie et l'environnement** [en ligne]. SCE. 2021 [consulté le 15 juin 2021]. <https://sce.fr/domaines/5ef62340f8fec219c7de7138>.
27. SYNDICAT D'AMENAGEMENT DU BASSIN DE L'ARC. **Le SABA – Présentation** [en ligne]. SABA. [consulté le 15 juin 2021]. <http://www.saba-arc.fr/Presentation.html>.
28. UNION EUROPEENNE. **Directive 2000/60/CE du Parlement et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau**. *Journal officiel* du 22 décembre 2000. CELEX : 32000L0060.
29. WOLMAN Gordon. **A method of sampling coarse river-bed material**. *Transactions, American Geophysical Union*, 1954, Volume 35, Number 6, p951-956. <https://doi.org/10.1029/TR035i006p00951>.

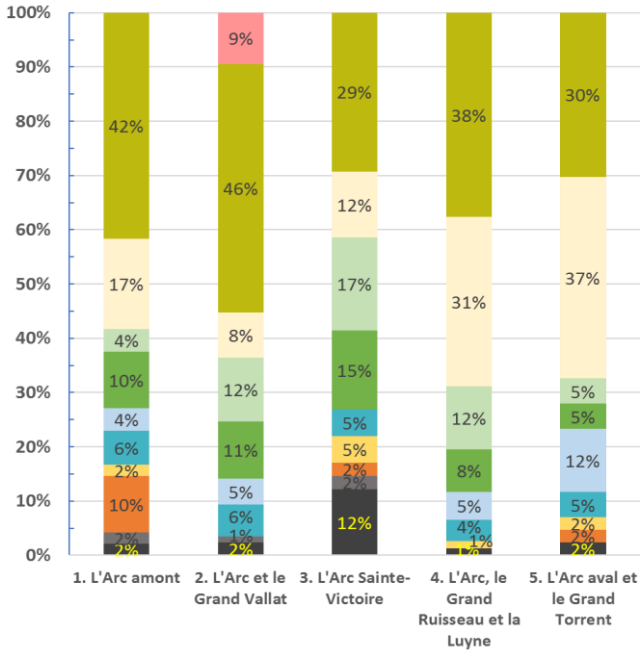
Annexes

Annexe 1 : Détail des investigations de terrain sur secteur exhaustif (Source : SCE)

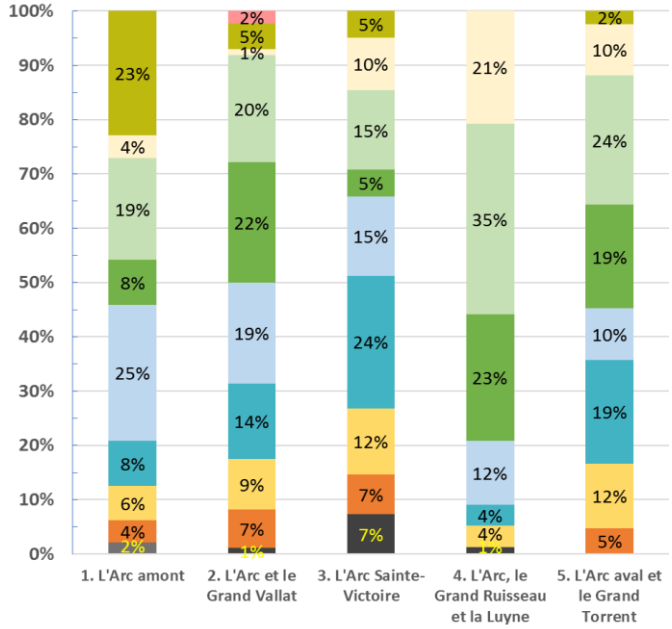
HYDROLOGIE	
Hydrologie	• structure des hydrosystèmes : biefs, retenues, gravières, étangs • fonctionnalité des confluences (incision, chutes, etc.) et zones d'assecs
HYDRAULIQUE	
Hydraulique	• zones inondables, points de débordements, zone de dissipation de crue • laisses de crues observées, rugosité du lit mineur / lit majeur • ouvrages de protection de berge, couverture de cours d'eau, digue, etc. • ouvrage en travers du lit : pont, seuil, barrage, etc. • occupation du sol, enjeux
Hydrogéologie	• apports, alimentation, pertes par infiltration, résurgences, colmatage
HYDROMORPHOLOGIE	
Géomorphologie	• lit majeur : champ d'inondation, annexes, terrasses alluviales, zones de production sédimentaire, stockages alluviaux de matériaux • berges : lithologie, érodabilité, état des ouvrages de protection, érosions, sapements, etc. • lit mineur : géométrie du lit, sinuosité, colmatage des radiers
Transport solide	• atterrissement, courbes granulométriques, incision, exhaussement
Aménagements	• recalibrages, endiguements • prise d'eau, dérivation, canal • protections de berge
Morphodynamique	• érosion, dépôt, colmatage, exhaussement, enfoncement,
HABITATS AQUATIQUES	
Hétérogénéité	• variabilité des faciès et des substrats
Attractivité	• sous berge, caches, abris, frayères
Connectivité	• fonctionnalité du lit moyen, affluents, eaux mortes, etc. • connectivité de la ripisylve en contact, connectivité du lit majeur, des annexes et des zones humides • franchissabilité des ouvrages
VEGETATION DU CORRIDOR RIVULAIRE	
Composition	• diversité des essences et des strates • épaisseur, continuité • stabilité des berges • présence d'invasives (renouée du Japon, canne de Provence, etc.) : localisation, taille du massif, terrain concerné, sensibilité à la propagation
Etat	• de la strate arbustive • présence et intérêt des bois mort (écologie, risque hydraulique)
USAGES	
Usages de l'eau	• seuil, prise d'eau, retenue… • débits dérivés • fréquentation des berges : pêche, promenade…
Usages du lit majeur	• occupation du sol, agriculture, cultures, clôtures, bandes enherbées, abreuvement • urbanisation
Contraintes locales	• remblais, décharge, rejets, etc.

Annexe 2 : Résultats du protocole EVHA à l'échelle du périmètre d'étude

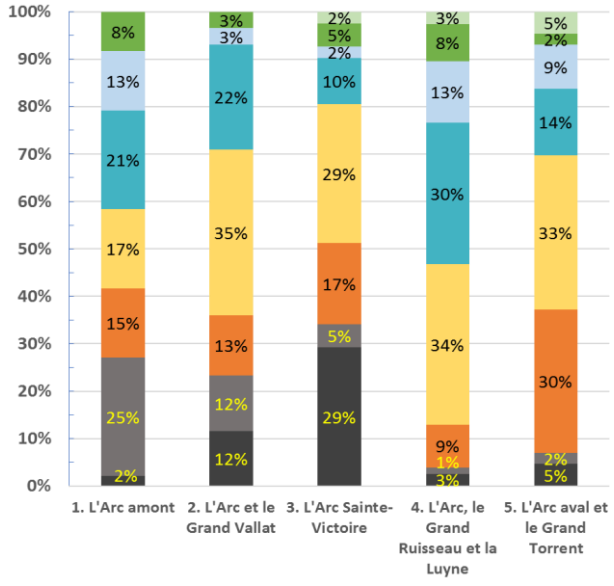
Substrat dominant



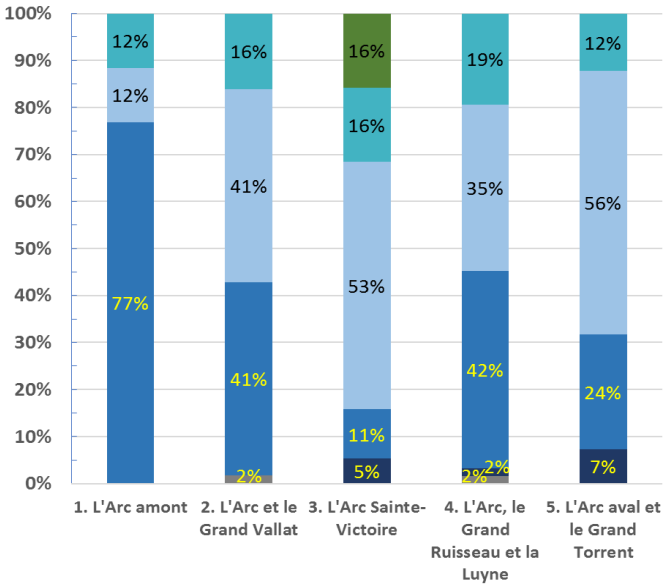
Substrat secondaire



Substrat grossier



Faciès d'écoulement



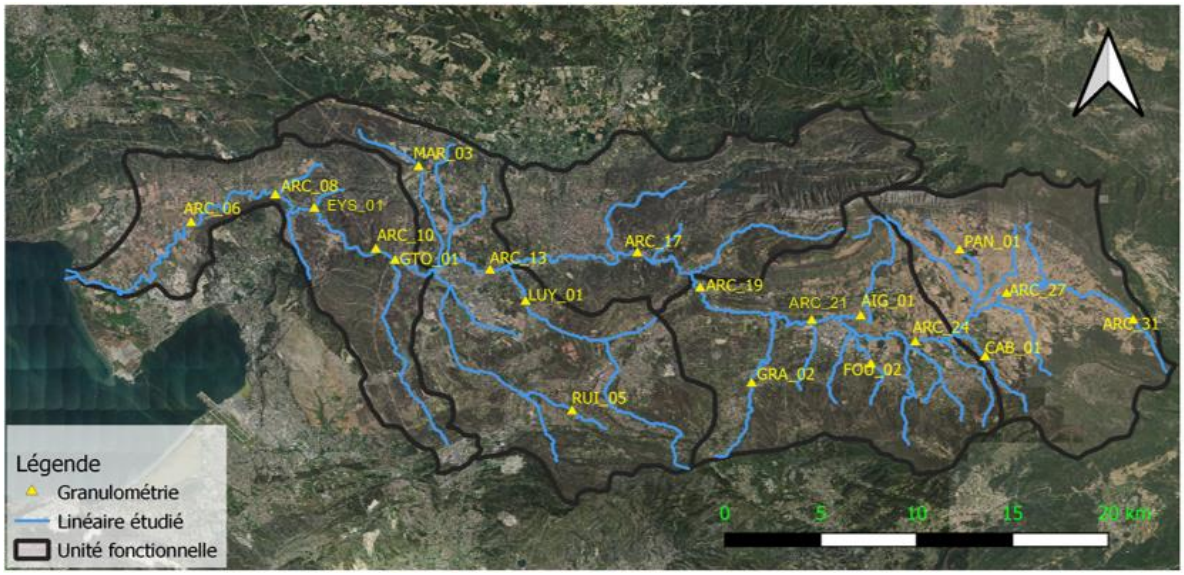
Substrat

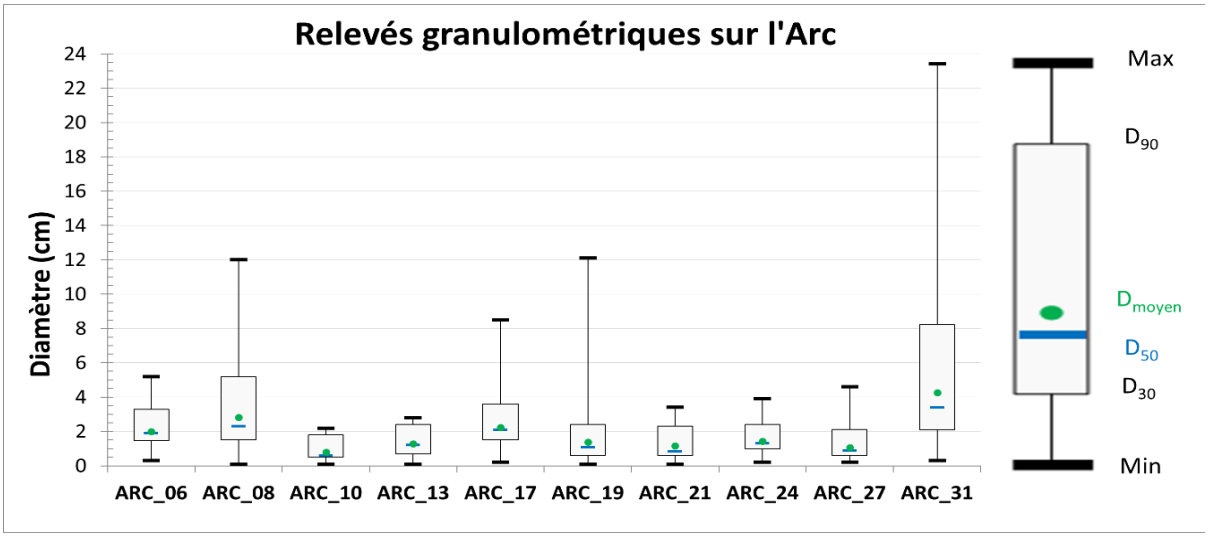
Roche mère | Blocs | Pierres grossieres | Pierres fines | Cailloux grossiers | Cailloux fins | Graviers grossiers | Graviers fins | Sable | Limon | Argile

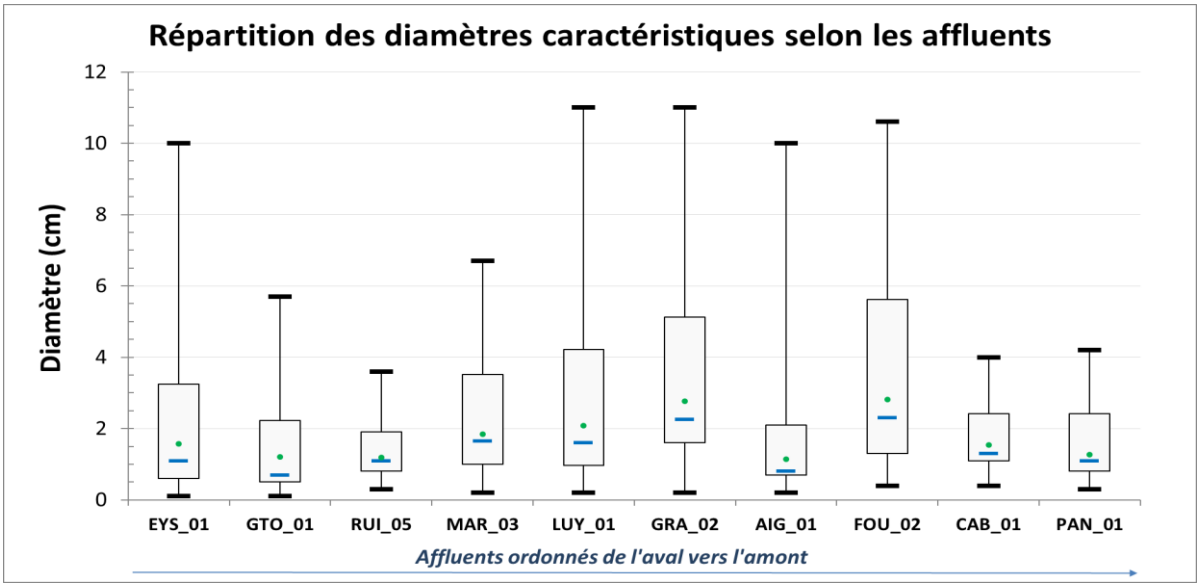
Faciès d'écoulement

Chenal lentique | Chenal lotique | Plat lentique | Plat lotique | Radier | Rapide

Annexe 3 : Résultats des analyses granulométriques par protocole Wolman



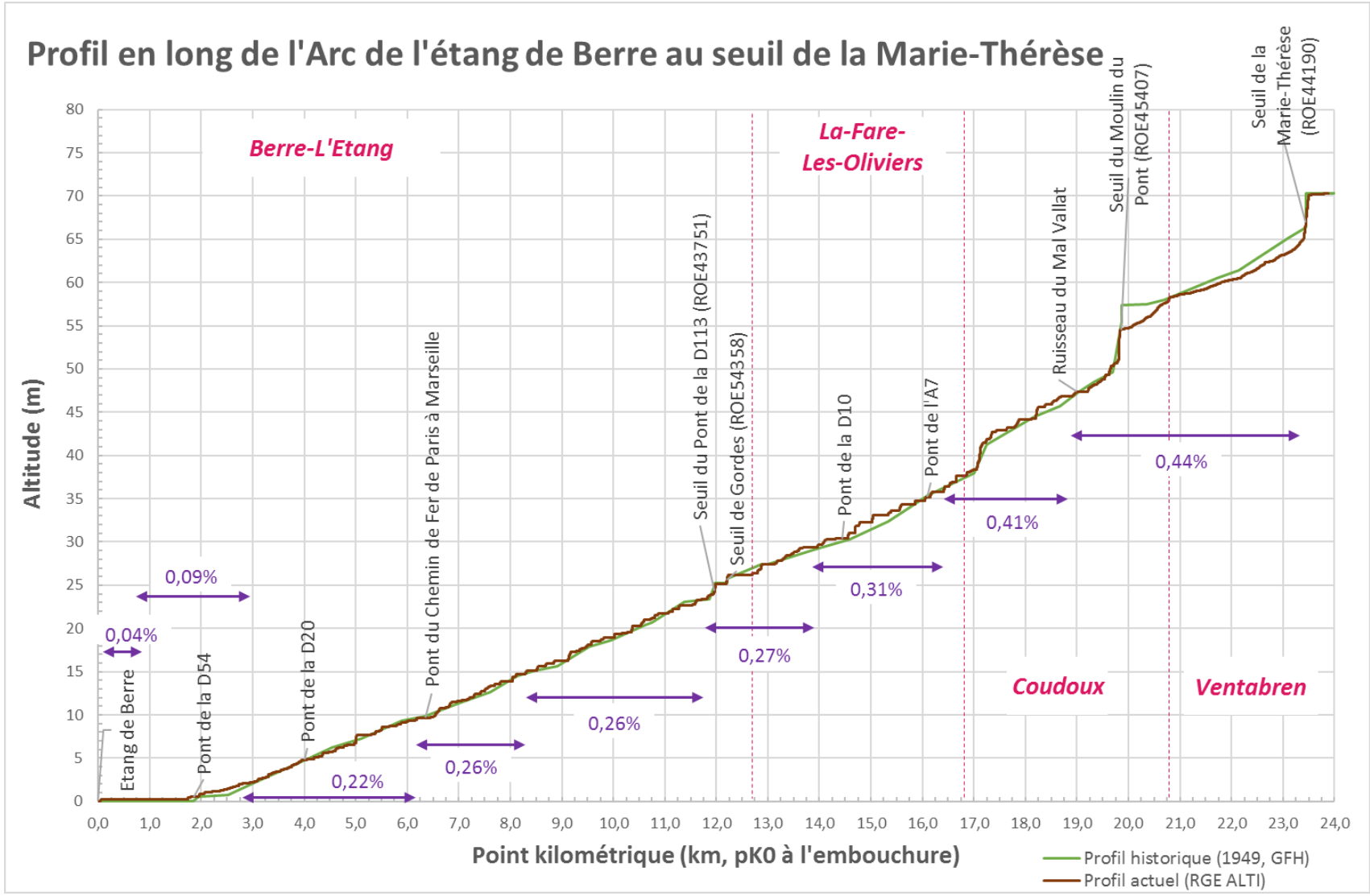


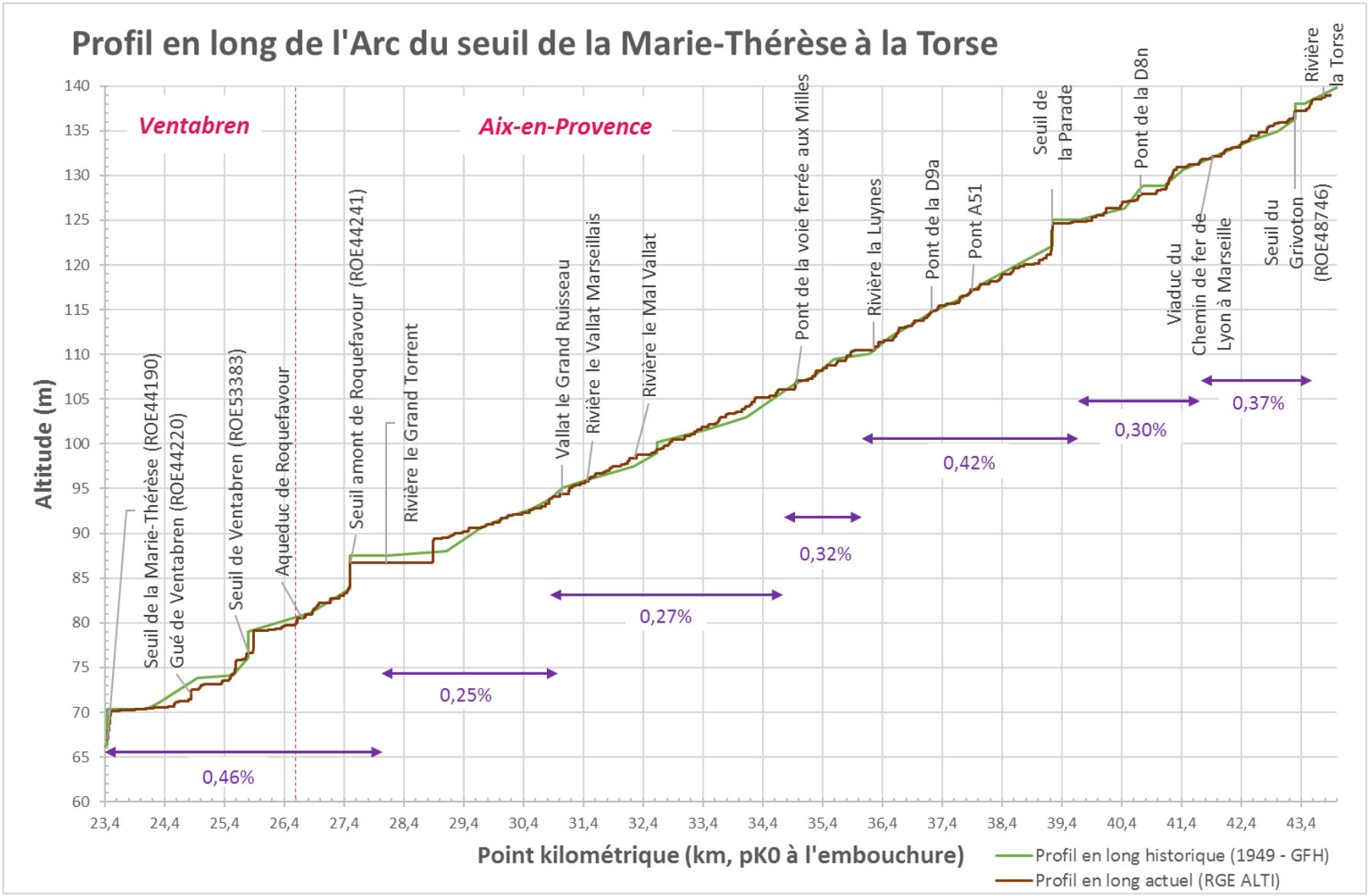


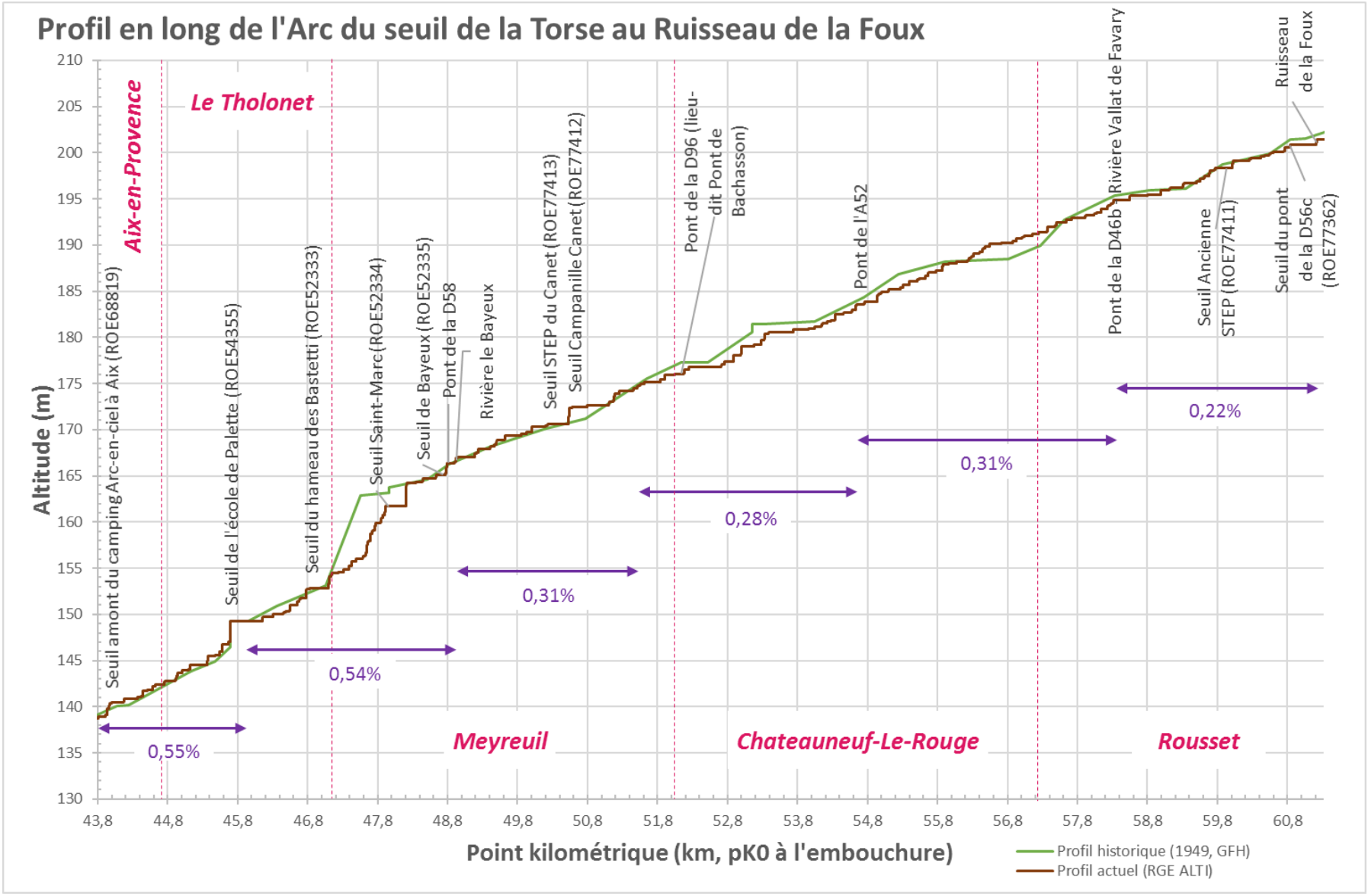
Dmoyen : moyenne des diamètres des grains de l'échantillon,

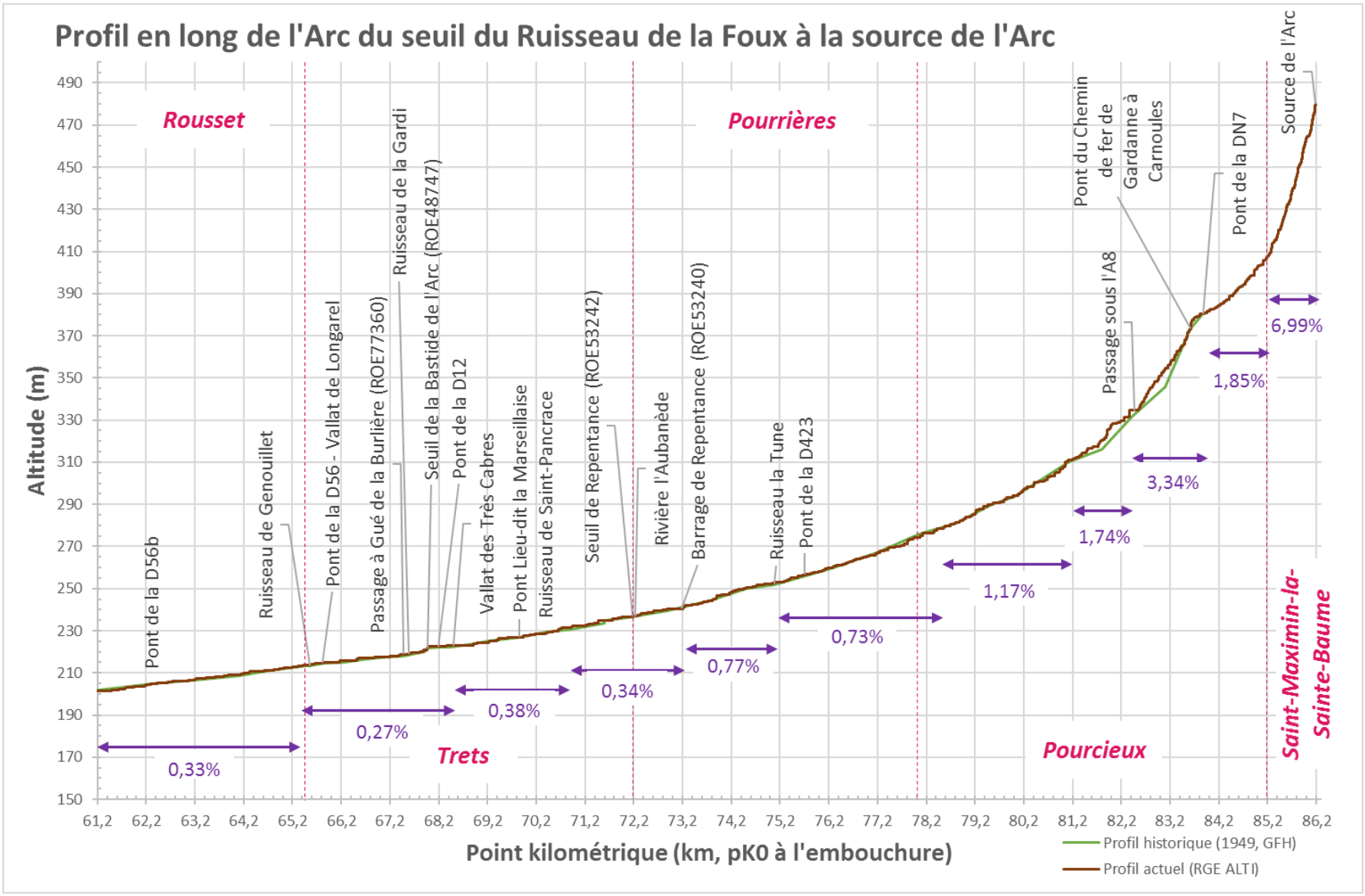
D_{xx} : xx% des grains de l'échantillon ont un diamètre mesuré inférieur à D_{xx}

Annexe 4 : Profil en long de l'Arc (découpés en quatre parties)

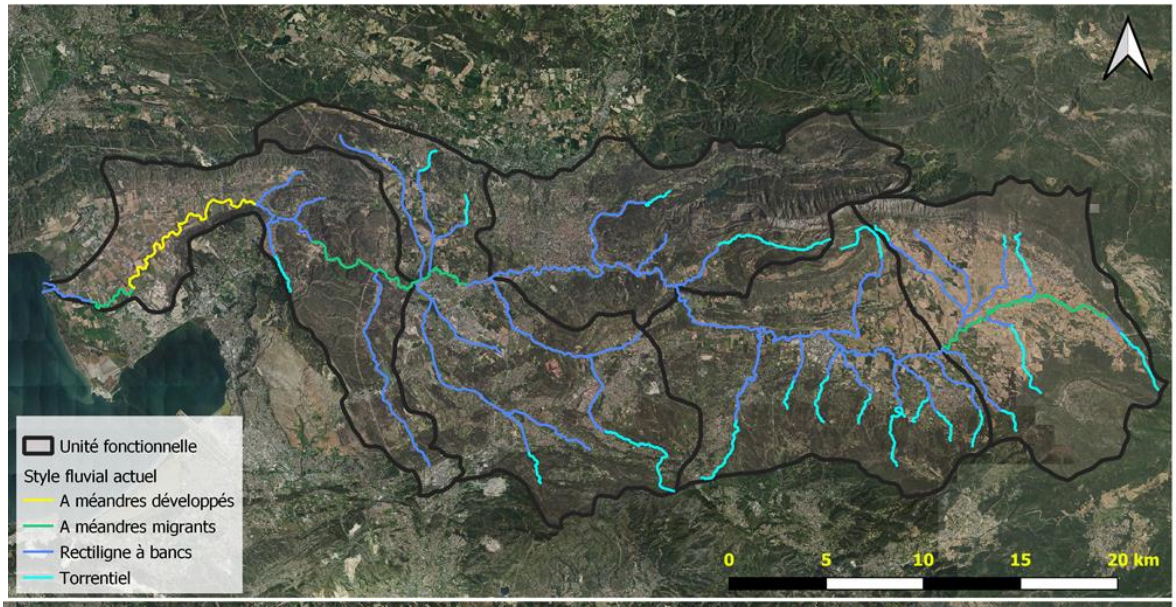


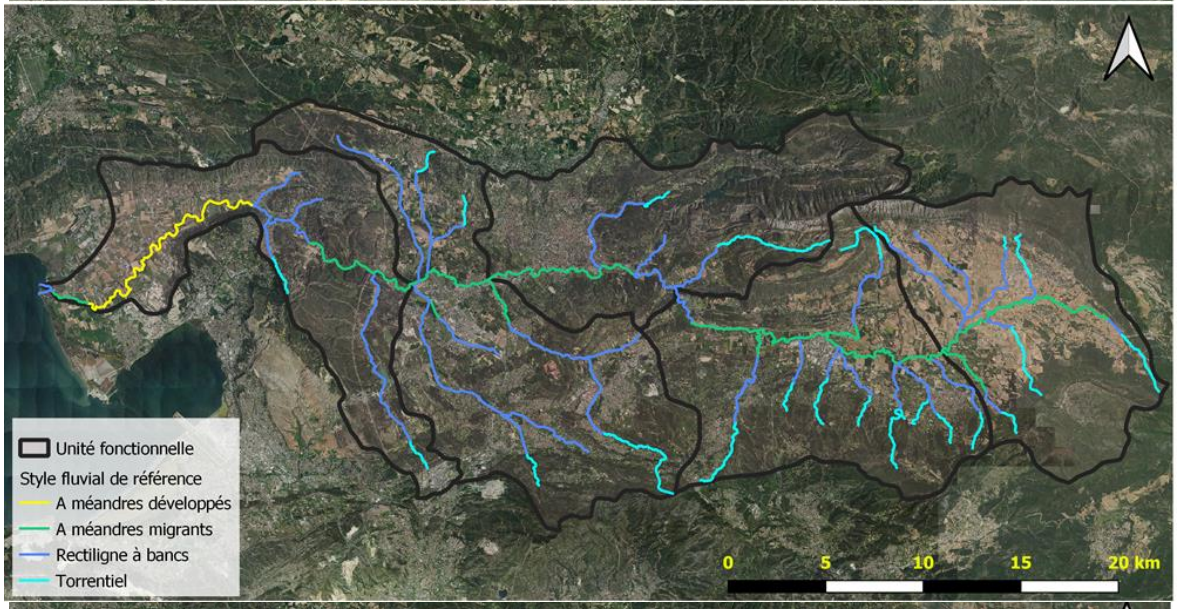

Profil en long de l'Arc du seuil de la Marie-Thérèse à la Torse
Ventabren
Aix-en-Provence
Altitude (m)
Point kilométrique (km, pK0 à l'embouchure)
Seuil de la Marie-Thérèse (ROE44190)
Gué de Ventabren (ROE44220)
Seuil de Ventabren (ROE53383)
Aqueduc de Roquefavour
Seuil amont de Roquefavour (ROE44241)
Rivière le Grand Torrent
Vallat le Grand Ruisseau
Rivière le Vallat Marseillais
Rivière le Mal Vallat
Pont de la voie ferrée aux Milles
Rivière la Luynes
Pont de la D9a
Pont A51
Seuil de la Parade
Pont de la D8n
Viaduc du Chemin de fer de Lyon à Marseille
Seuil du Grivoton (ROE48746)
Rivière la Torse
0,46%
0,25%
0,27%
0,32%
0,42%
0,30%
0,37%
Profil en long historique (1949 - GFH)
Profil en long actuel (RGE ALTI)

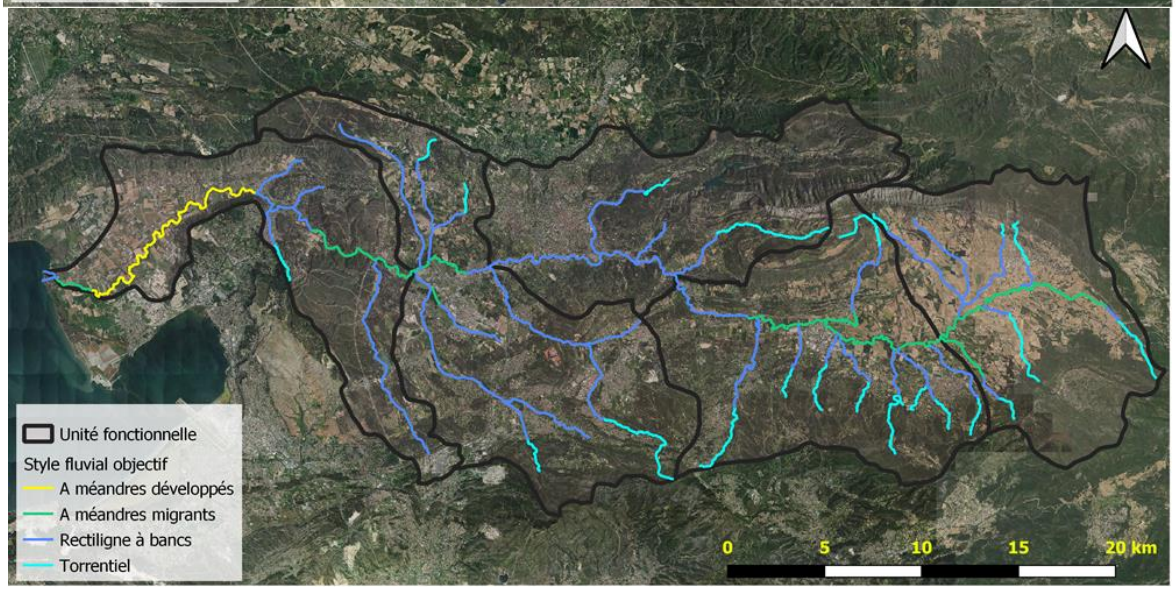

Profil en long de l'Arc du seuil de la Torse au Ruisseau de la Foux
Altitude (m)
Point kilométrique (km, pK0 à l'embouchure)
Aix-en-Provence
Le Tholonet
Meyreuil
Chateauneuf-Le-Rouge
Rousset
Seuil amont du camping Arc-en-ciel à Aix (ROE68819)
Seuil de l'école de Palette (ROE54355)
Seuil du hameau des Bastetti (ROE52333)
Seuil Saint-Marc (ROE52334)
Seuil de Bayeux (ROE52335)
Pont de la D58
Rivière le Bayeux
Seuil STEP du Canet (ROE77413)
Seuil Campanille Canet (ROE77412)
Pont de la D96 (lieu-dit Pont de Bachasson)
Pont de l'A52
Pont de la D46b
Rivière Vallat de Favary
Seuil Ancienne STEP (ROE77411)
Seuil du pont de la D56c (ROE77362)
Ruisseau de la Foux
0,55%
0,54%
0,31%
0,28%
0,31%
0,22%
Profil historique (1949, GFH)
Profil actuel (RGE ALTI)


Profil en long de l'Arc du seuil du Ruisseau de la Foux à la source de l'Arc
Altitude (m)
Point kilométrique (km, pK0 à l'embouchure)
Rousset
Trets
Pourrières
Pourcieux
Saint-Maximin-la-Sainte-Baume
Pont de la D56b
Ruisseau de Genouillet
Pont de la D56 - Vallat de Longarel
Passage à Gué de la Burlière (ROE7360)
Ruisseau de la Gardi
Seuil de la Bastide de l'Arc (ROE48747)
Pont de la D12
Vallat des Très Cabres
Pont Lieu-dit la Marseillaise
Ruisseau de Saint-Pancrace
Seuil de Repentance (ROE53242)
Rivière l'Aubanède
Barrage de Repentance (ROE53240)
Ruisseau la Tune
Pont de la D423
Passage sous l'A8
Pont du Chemin de fer de Gardanne à Carnoules
Pont de la DN7
Source de l'Arc
0,33%
0,27%
0,38%
0,34%
0,77%
0,73%
1,17%
1,74%
3,34%
1,85%
6,99%
Profil historique (1949, GFH)
Profil actuel (RGE ALTI)

Annexe 5 : Différents styles fluviaux du bassin de l'Arc







Annexe 6 : Explications détaillées et illustrées de la méthode ExZEco du Cerema

Les explications présentées se basent sur les sources suivantes :

A. CEREMA. **Notice – Ruissellement sur l'Arc Méditerranéen – Application de la méthode ExZEco**. Cerema, 2020. 4p.

B. PONS Frédéric, BADER Bruno, MOULIN Christophe, PANAFIEU Blandine, CHABAUD Laurent, VERRHIEST-LEBLANC Ghislaine. **Modélisation du ruissellement, application de la méthode Exzeco sur 8 départements de l'Arc méditerranéen**. Colloque SHF : « Ruissellement », Lyon, 30 novembre – 2 décembre 2020. 10p.

La méthode ExZEco (Extraction des Zones d'Ecoulement) permet, pour les petits bassins versants, de délimiter des espaces potentiellement inondables par ruissellement ou débordement (« crues soudaines » ou « crues éclairs »).

La méthode SIG est développée à partir d'un MNT pour calculer les talwegs, ligne de fond de vallée (Illustration 1).

Illustration 1 : résultat d'un calcul de talweg (Source : Cerema, 2020[A])

5000 talwegs sont obtenus à partir du MNT. Pour cela, certains pixels du MNT (carrés de 5 m par 5 m pour un MNT 5 mètres), déterminés aléatoirement, voient leur altitude augmentée de 20 cm (« bruitage »). Pour chaque processus de modification aléatoire du MNT, soit chaque « bruitage », un nouveau talweg est obtenu (Illustration 3).

Illustration 3 : MNT bruité, nouveau calcul de talweg (Source : Cerema, 2020[A])

L'accumulation des 5000 résultats de talweg donne une surface (Illustration 2). Chaque pixel de la surface obtenue est représenté selon la surface de bassin versant drainée (supérieure à 0,01, 0,05, 0,1, 0,5, 1, 5, 10, ou 50 km²). Ainsi, le produit ExZEco020 est obtenu.

Illustration 2 : Surface obtenue par association des talwegs obtenus par bruitage du MNT (Source : Cerema, 2020[A])

Comme un bruitage de seulement 20 cm limite parfois l'emprise des zones potentiellement inondables produites. D'autres produits ExZEco ont été produits. Ils se basent sur le principe qu'avec la pluie, les hauteurs d'eau vont augmenter de l'amont vers l'aval. Ainsi, tous les pixels pour lesquels la surface de bassin versant drainée est supérieure à 0,1 km², l'altitude du pixel est augmenté de 20 cm. Ensuite, les 5000 bruitages de 20 cm du MNT modifié pour obtenir les talwegs sont réalisés. ExZEco040 est obtenu. De la même façon, ExZEco060 sera obtenu en modifiant de nouveau le MNT sur la base des résultats de ExZEco040. ExZEco080 et ExZEco 100 sont également obtenus.

Les résultats d'ExZEco100 pour le bassin versant de l'Arc sont visualisables sur l'Illustration 4 page suivante.

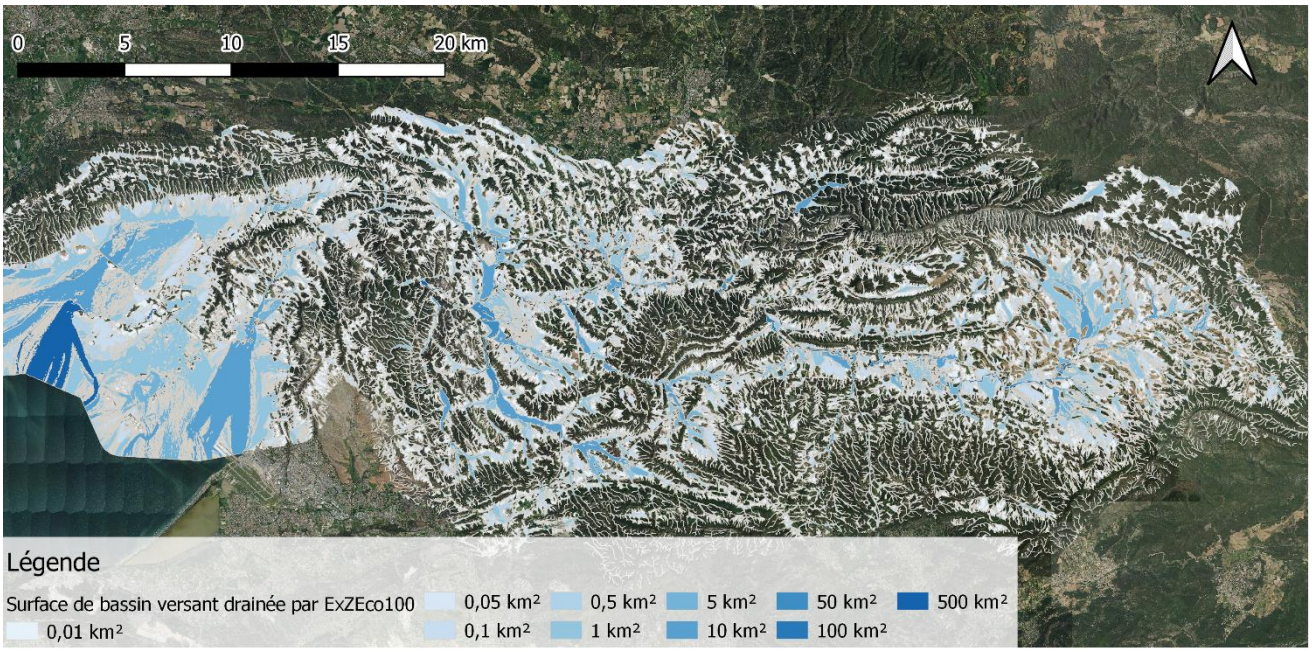


Illustration 4 : Résultats d'ExZEco100 pour le bassin versant de l'Arc

Annexe 7 : Comparaison des résultats d'ExZEco avec les périmètres hydrauliques obtenus sur la base d'autres données

Les illustrations suivantes montrent des extraits des périmètres hydrauliques, optimal et/ou nécessaire, obtenus par le biais des études de zones inondables ou par l'AZI ainsi que des résultats d'ExZEco. La comparaison entre les différentes surfaces permet de choisir un niveau d'ExZEco cohérent pour délimiter les périmètres hydrauliques où seules des données ExZEco sont disponibles.

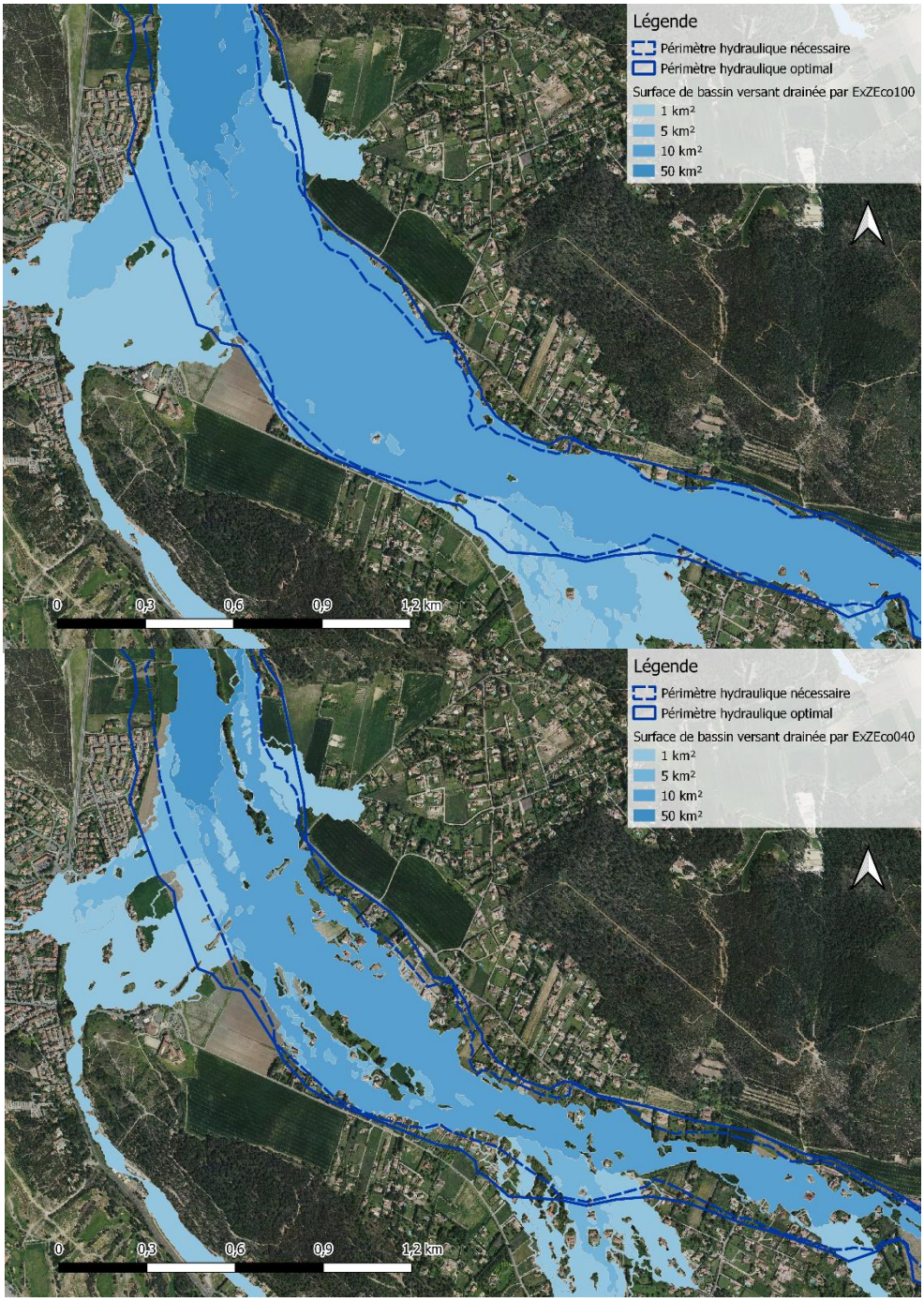


Illustration 5 : Comparaison des limites des périmètres hydrauliques et des surfaces ExZEco (ExZEco100 en haut et ExZEco040 en bas) pour le Vallat du Grand Ruisseau

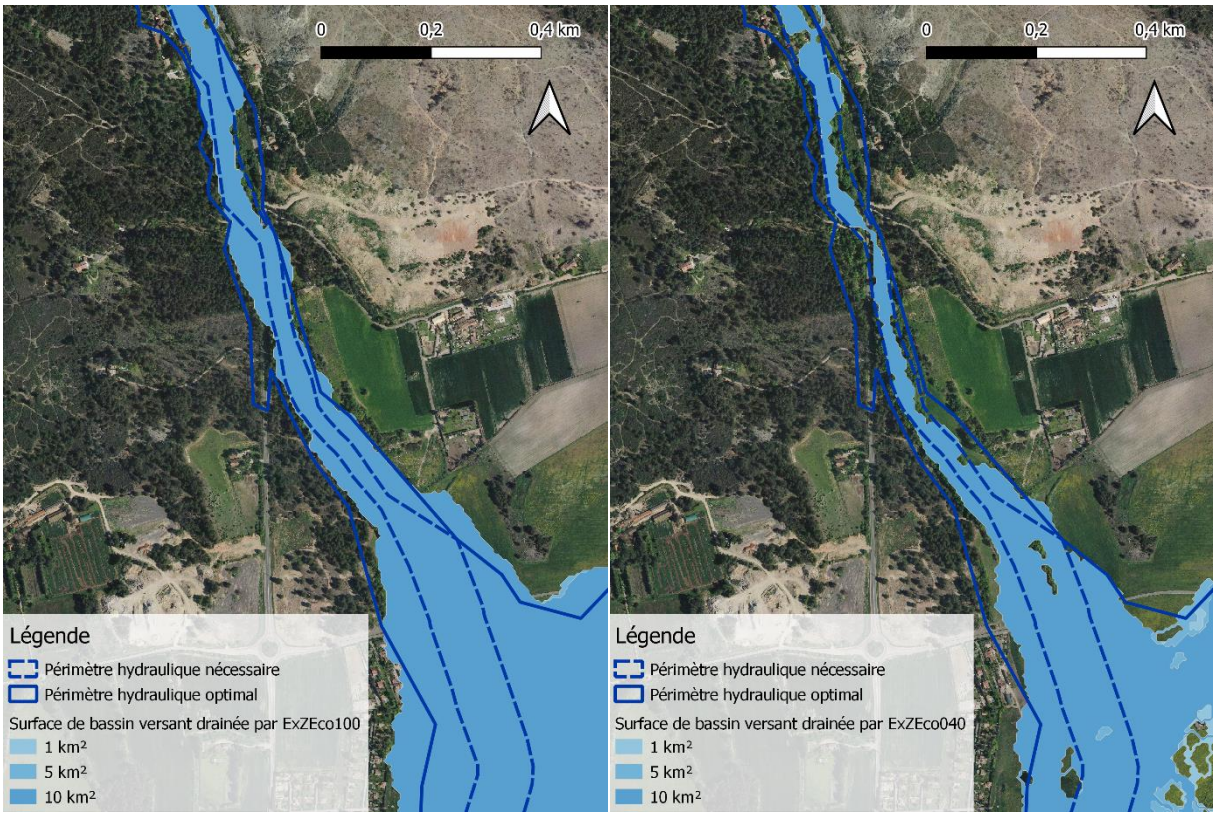


Illustration 6 : Comparaison des limites des périmètres hydrauliques et des surfaces ExZEco (ExZEco100 à gauche et ExZEco040 à droite) pour le Vallat des Marseillais

Tout d'abord, aucune correspondance exacte n'est visible entre les couches ExZEco (040, 100 mais aussi 020, 060, 080) et les périmètres hydrauliques. Néanmoins, les résultats semblent proches.

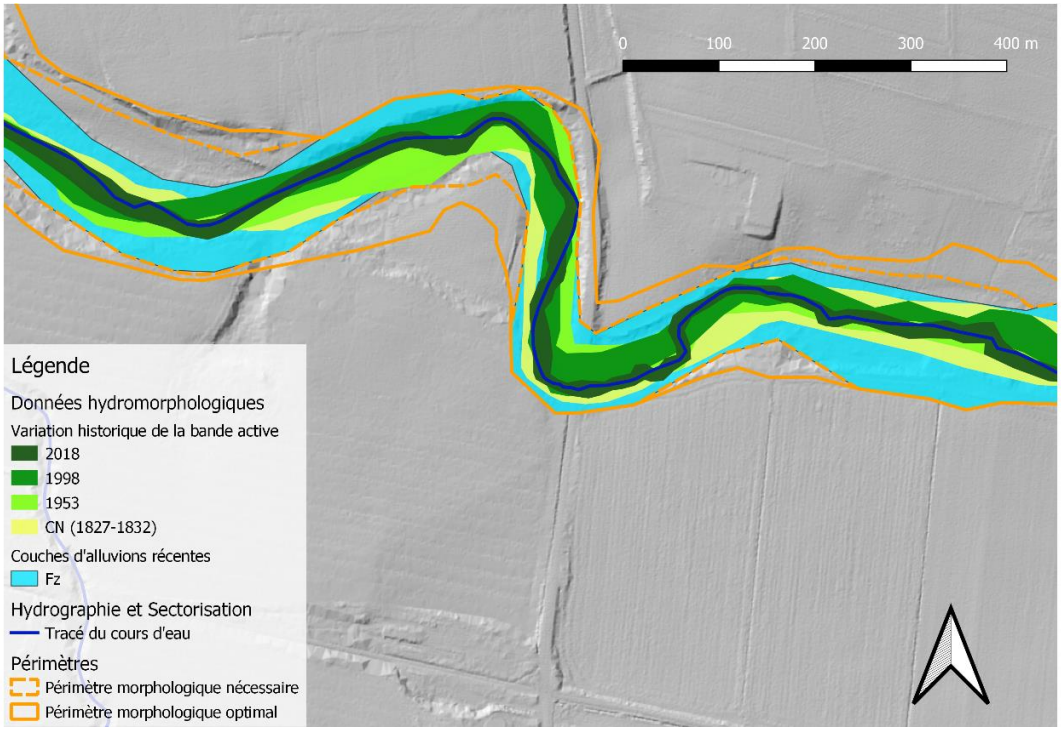
Pour le Vallat du Grand Ruisseau, l'emprise ExZEco est cohérente avec les périmètres hydrauliques mais globalement a une emprise moins large que ceux-ci. Pour le Vallat du Marseillais, là encore l'emprise couverte par ExZEco est cohérente, mais elle est légèrement inférieure à celles des périmètres hydrauliques. En zone de plaine, comme à l'aval du Vallat des Marseillais, ExZEco donne une emprise éloignée de celles des périmètres hydrauliques basés sur des zones inondables. Cela confirme qu'ExZEco n'est bien applicable que pour des petits bassins versants avec des variations d'altitude suffisantes. De plus, les périmètres hydrauliques ne correspondent pas totalement aux surfaces ExZEco, il y a donc une part d'incertitude dans l'utilisation de ces données. Comme généralement ExZEco est moins large que les périmètres hydrauliques, les EBF déterminés à partir de ces données seront généralement moins ambitieux.

Il ressort de ces illustrations mais aussi des observations sur le reste de la zone d'étude test, que ExZEco040 peut permettre la délimitation du périmètre hydraulique nécessaire et que ExZEco100 peut permettre la délimitation du périmètre hydraulique optimal. D'ailleurs, ExZEco100 est, d'après les premiers retours d'expérience, la couche qui couvre le mieux l'ensemble des zones inondables. Il semble donc cohérent qu'elle corresponde au périmètre hydraulique optimal. Le choix de la surface drainée a utilisée dépend de la taille du bassin versant concerné.

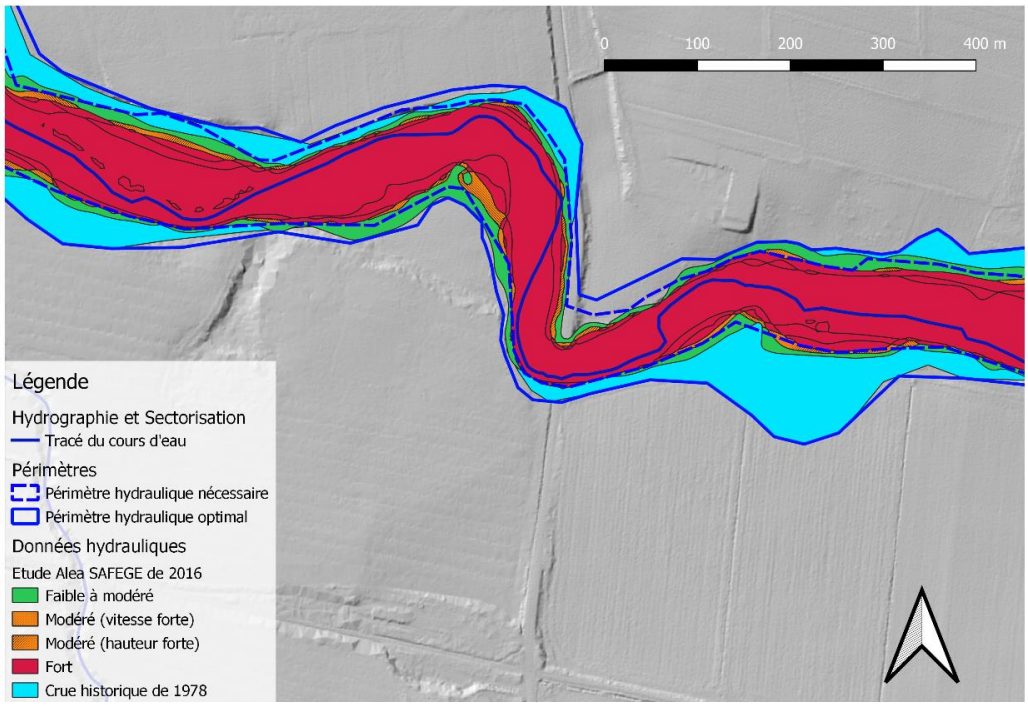
Annexe 8 : Illustrations de la définition des EBF optimal et nécessaires sur certains secteurs de la zone d'étude « test »

L'Arc amont à Rousset (UF2) – style fluvial actuel rectiligne à bancs, style fluvial de référence et objectif à méandres migrants

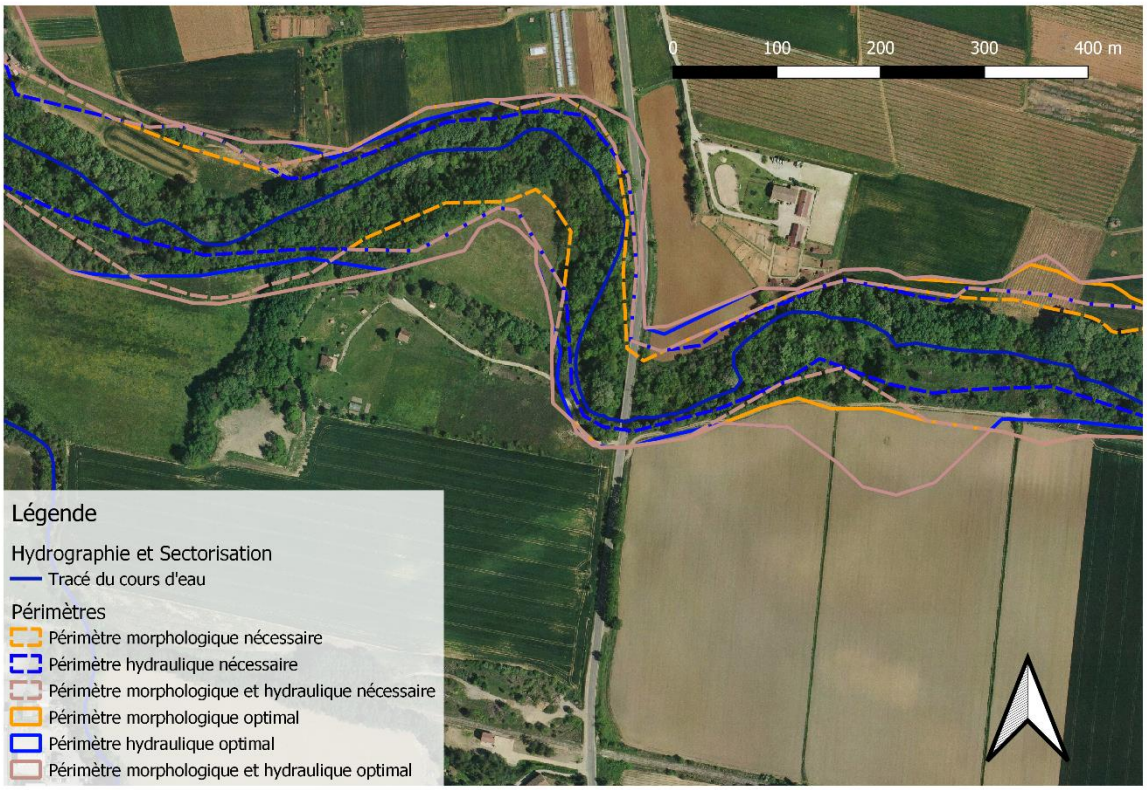
Sur ce secteur d'étude, les périmètres morphologiques sont aussi importants que les périmètres hydrauliques, ce qui n'est généralement pas le cas.



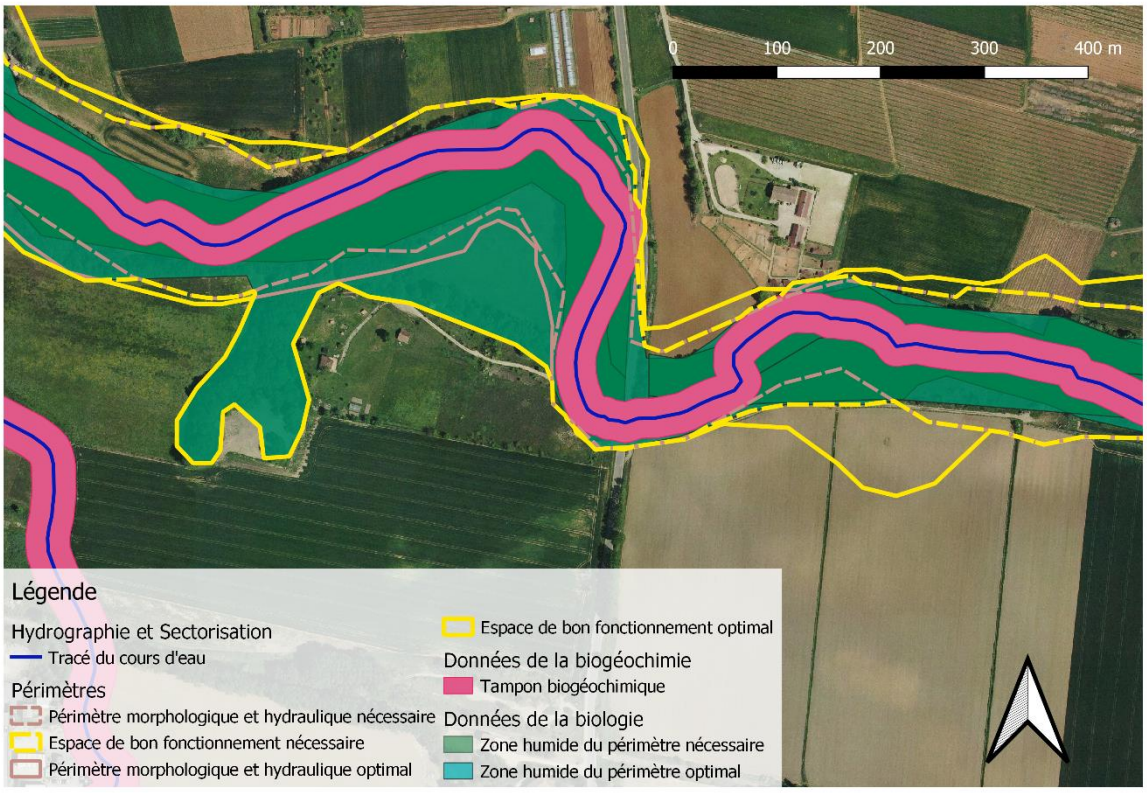
Carte 2 : Délimitation du périmètre morphologique (fond de carte : relief du MNT)



Carte 1 : Délimitation du périmètre hydraulique (fond de carte : relief du MNT)

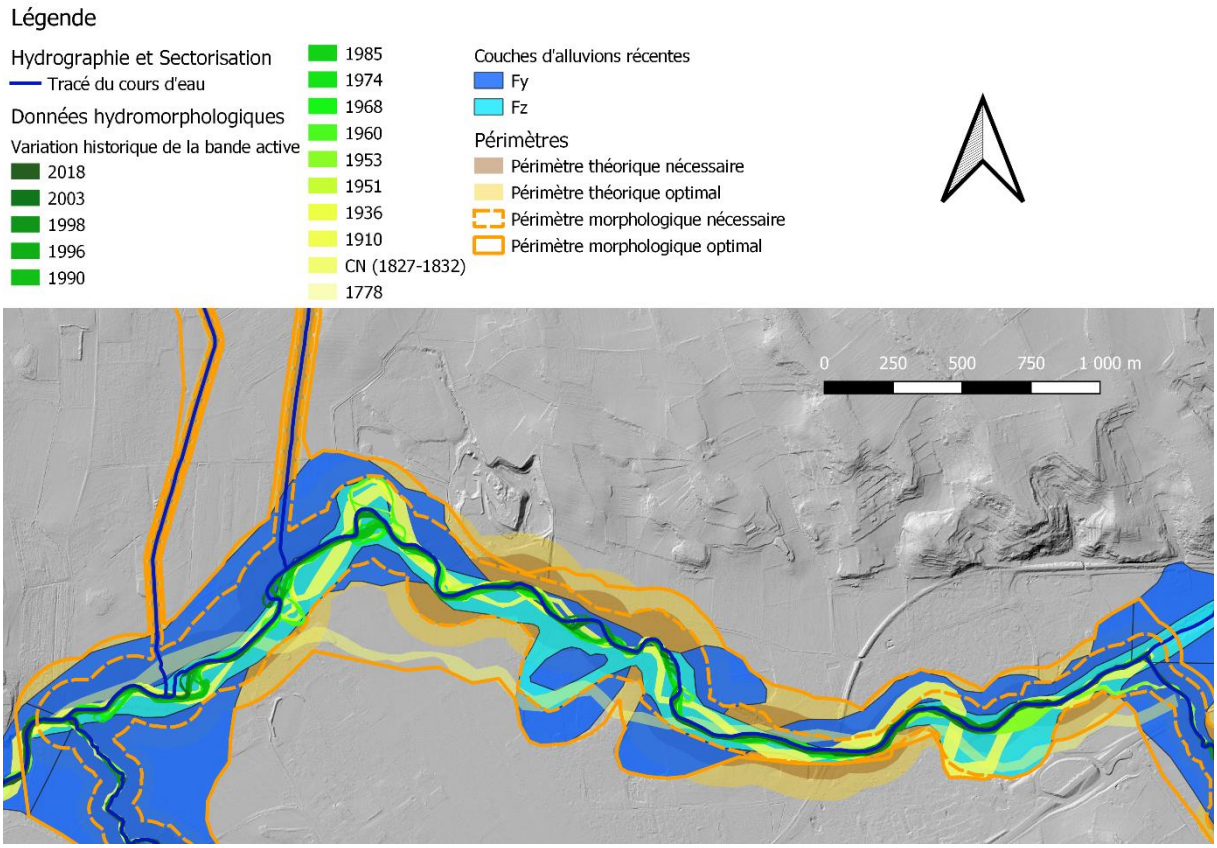


Carte 4 : Association des périmètres morphologiques et hydrauliques

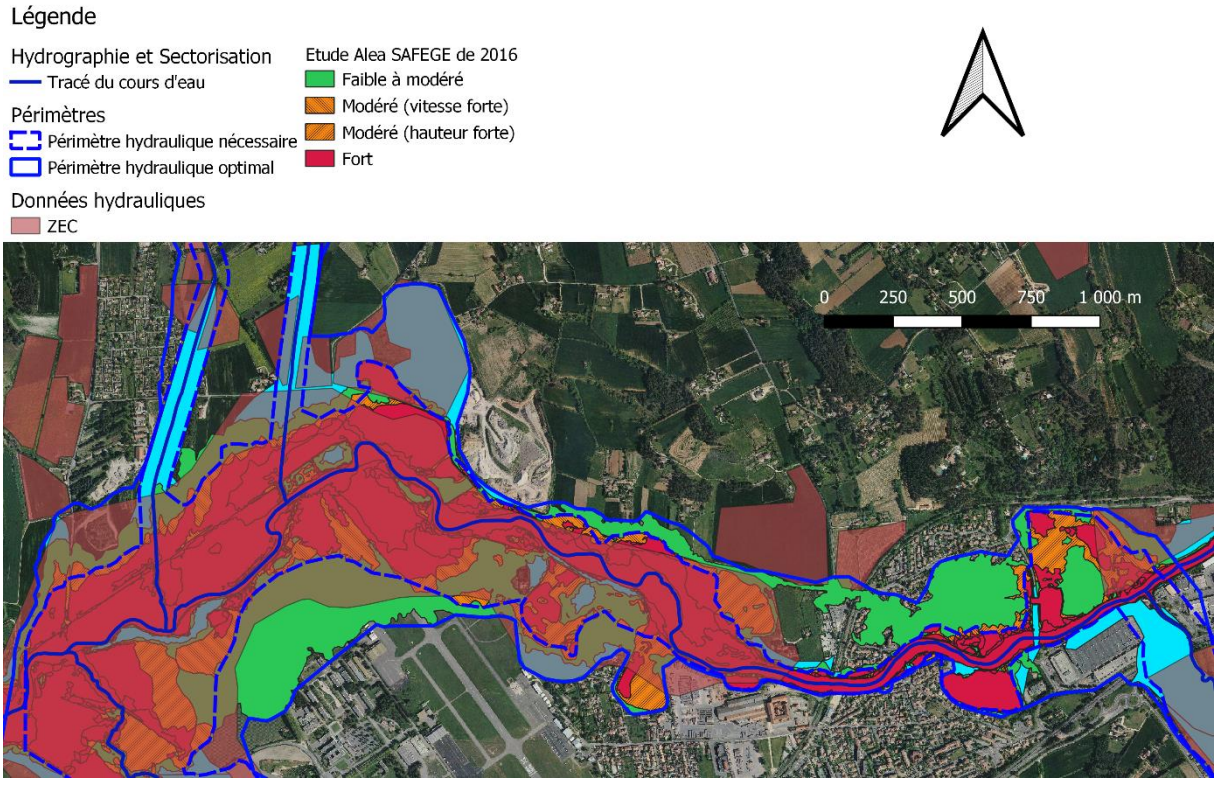


Carte 3 : Délimitation des EBF

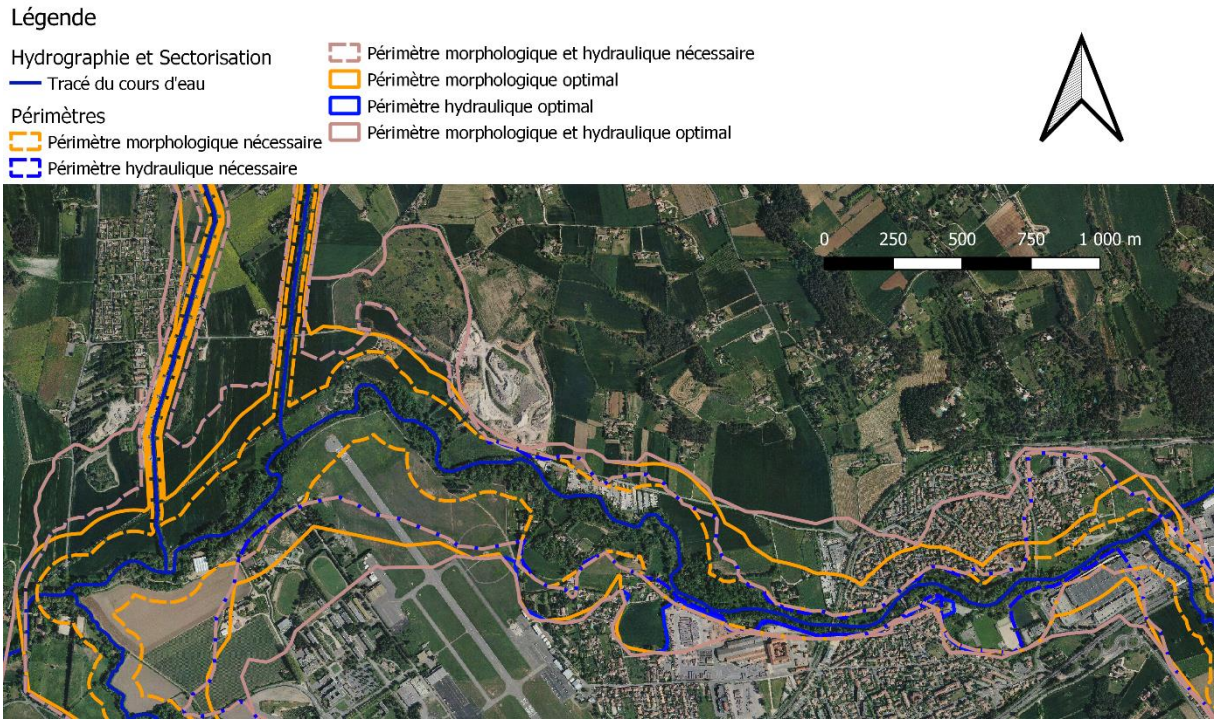
L'Arc des Milles à Saint-Pons (UF4) – style fluvial actuel, de référence et objectif à méandres migrants



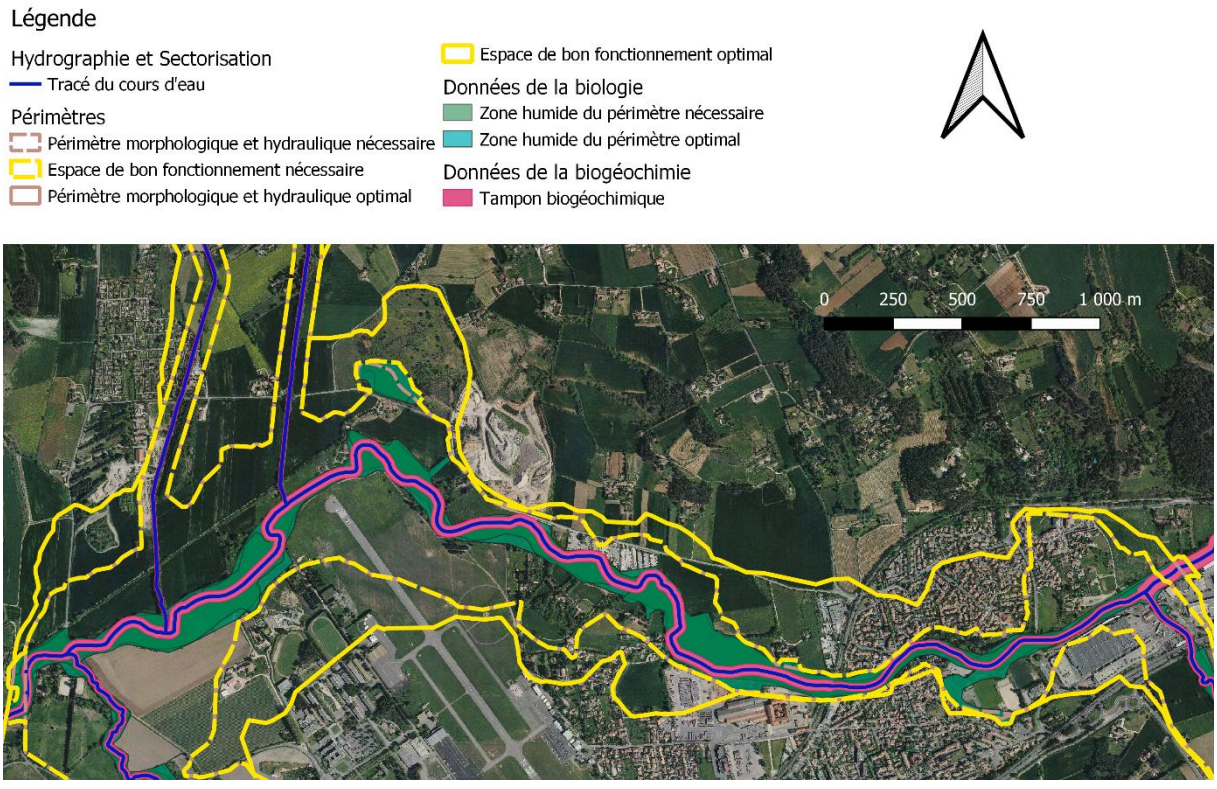
Carte 5 : Délimitation du périmètre morphologique (fond de carte : relief du MNT)



Carte 6 : Délimitation du périmètre hydraulique

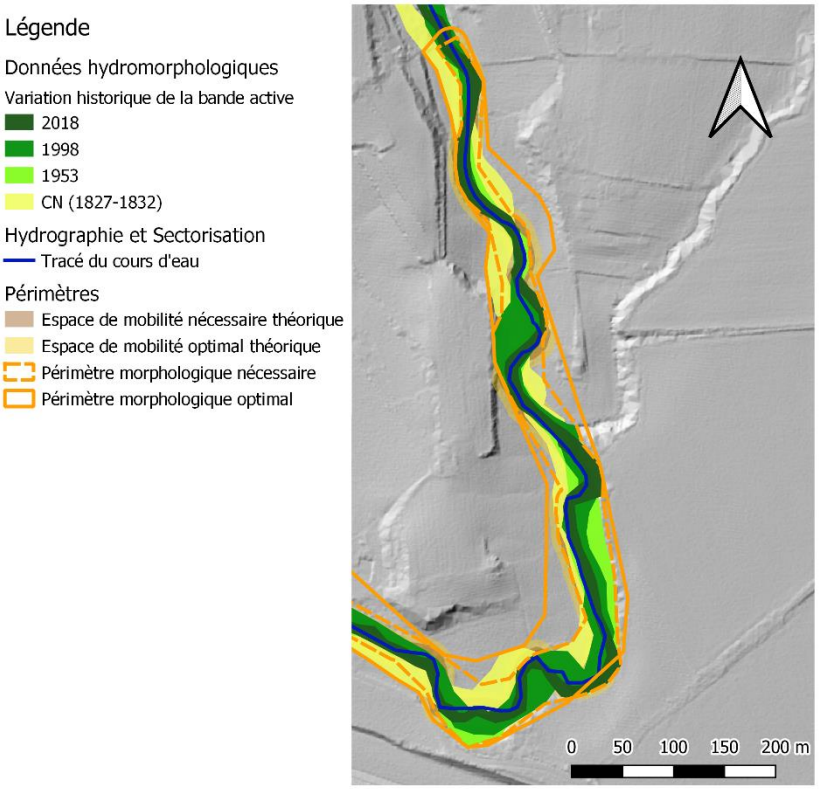


Carte 7 : Association des périmètres hydrauliques et morphologiques

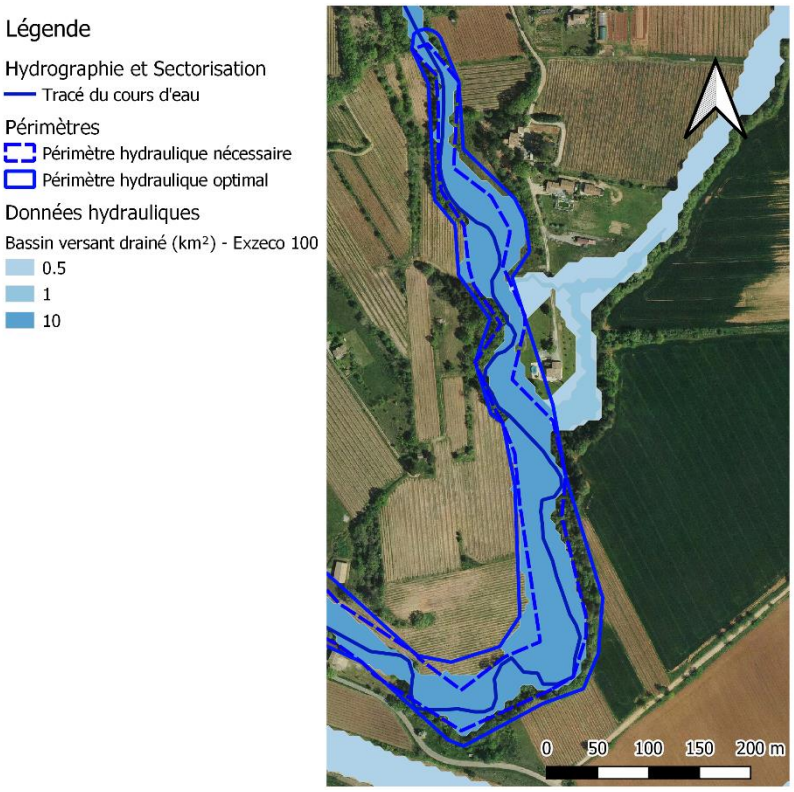


Carte 8 : Délimitation des EBF

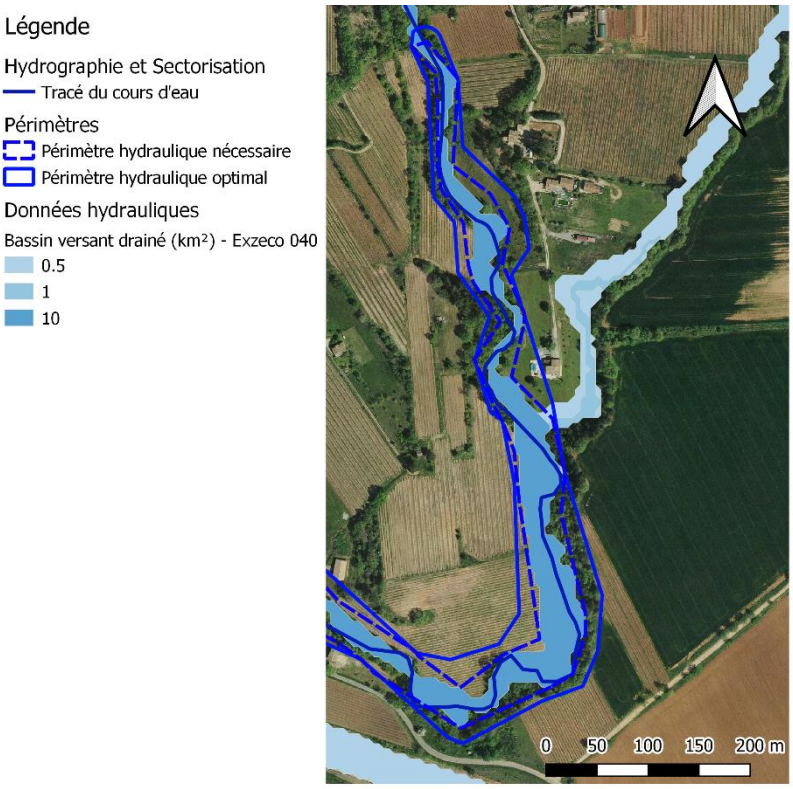
L'Aigue-Vive à l'est de Rousset (UF2) – style fluvial actuel rectiligne à bancs, style fluvial de référence et objectif à méandres migrants



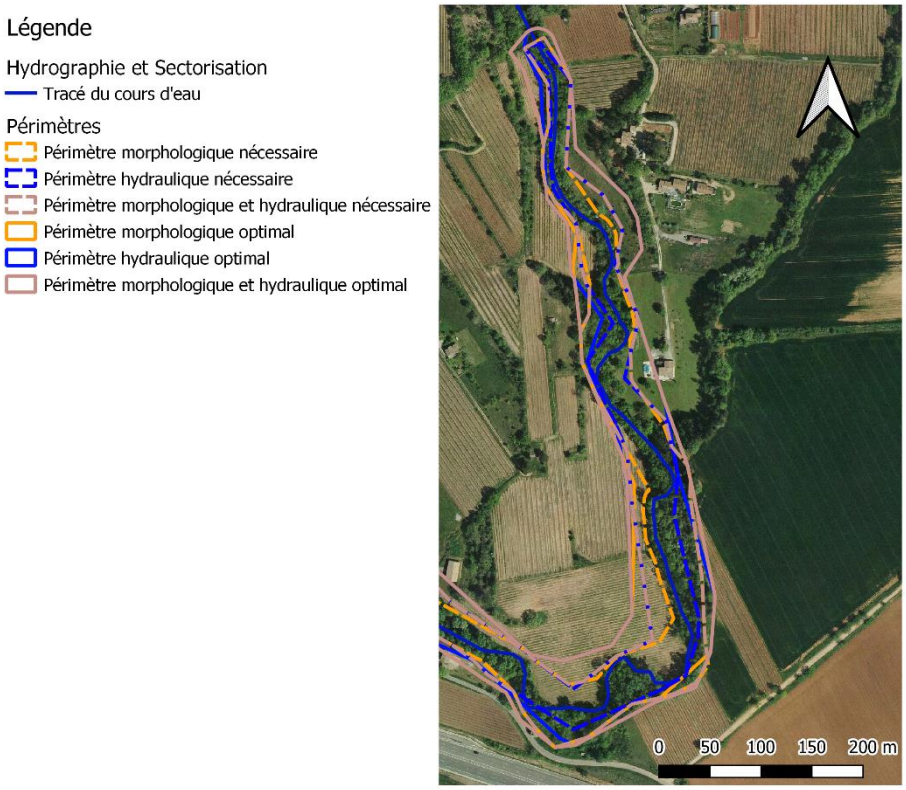
Carte 9 : Délimitation du périmètre morphologique (fond de carte : relief du MNT)



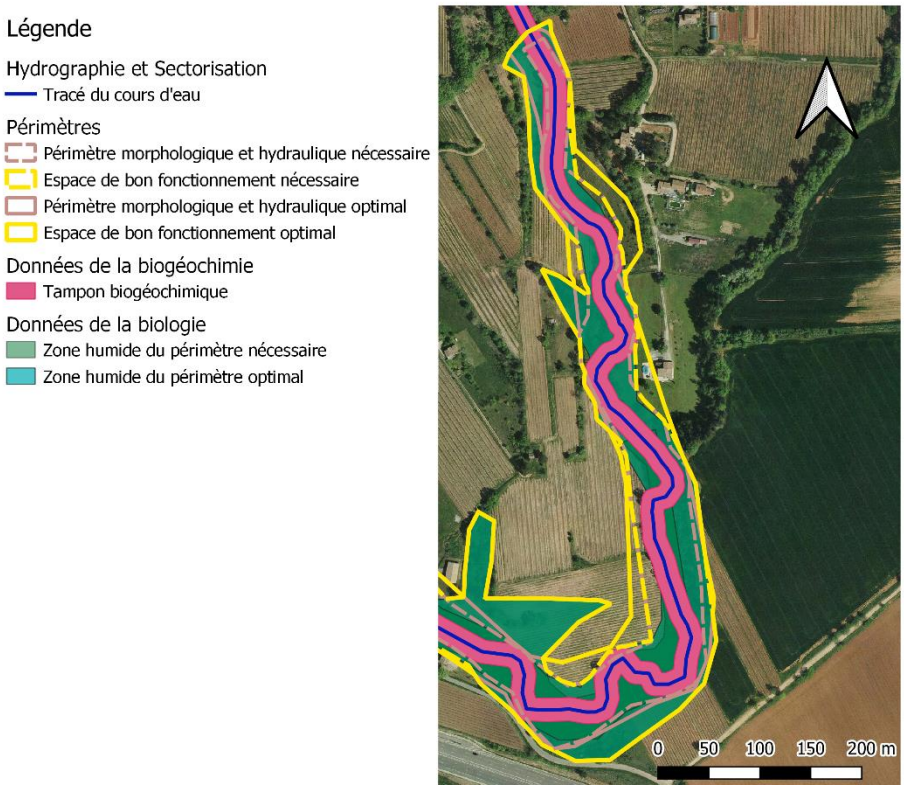
Carte 10 : Délimitation du périmètre hydraulique (ExZEco100)



Carte 11 : Délimitation des périmètres hydrauliques (ExZEco040)



Carte 12 : Association des périmètres morphologiques et hydrauliques



Carte 13 : Délimitation des EBF

ENGEES
ÉCOLE NATIONALE DU GÉNIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT DE STRASBOURG

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Diplôme(s) visé(s) : Diplôme d'ingénieur de l'ENGEES
Spécialité : Master 2 Hydro Science and Engineering à l'Université Technique de Dresde (Allemagne) (TUD)

Auteur : BASSON Coraline

Année : 2021

Titre
Définition de l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau du bassin versant de l'Arc (Provence-Alpes-Côte d'Azur)

Nombre de pages texte : 63 annexes : 19

Nombre de références bibliographiques : 29

Structure d'accueil

SCE – Agence de Marseille à Aubagne (13)

Maître de stage : LAMBERET Thomas

Résumé

Suite à une adaptation de la méthode prescrite dans le SDAGE Rhône-Méditerranée 2016-2021 sur la base d'un diagnostic approfondi du bassin versant de l'Arc, Provence-Alpes-Côte d'Azur, pour comprendre le contexte et les enjeux de l'étude, les espaces de bon fonctionnement optimal et nécessaire ont pu être définis sur une zone d'étude « test » du bassin versant. Ces espaces se basent sur des données et périmètres relevant de la morphologie (mobilité latérale historique, contexte sédimentaire, topographie…), l'hydraulique (zones de grands écoulements, zones d'expansion des crues), la biologie (zones humides), la biogéochimie et l'hydrogéologie.

Mots-clés
Hydromorphologie, Espace de bon fonctionnement, Espace de mobilité, Style fluvial