

Table des matières

I.	Introduction.....	6
1.1.	Présentation de la structure d'accueil	6
1.2.	Les projets	6
1.3.	Les différentes missions réalisées durant ce stage.....	7
II.	Présentation des études.....	7
2.1.	Suivi morphologique sur la rivière Leitzaran	7
2.1.1.	Le site d'étude.....	7
2.1.2.	Les objectifs	9
2.2.	Etat des lieux et diagnostics de cours d'eau.....	10
2.2.1.	Etat des lieux d'un affluent de l'Ebre (Ebro): la rivière Queiles	10
2.2.2.	Etat des lieux et diagnostics des affluents de l'Urola	11
III.	Matériels et Méthodes	12
3.1.	Suivi morphologique sur la rivière Leitzaran	12
3.1.1.	Suivi granulométrique	12
3.1.2.	Traçage GPS.....	16
3.1.3.	Etudes de sections transversales.....	17
3.2.	Etat des lieux et diagnostics de cours d'eau	19
3.2.1.	Etude cartographique et première approche du terrain sur la rivière Queiles	19
3.2.2.	Diagnostic géomorphologique de deux affluents de l'Urola	20
IV.	Résultats.....	21
4.1.	Suivi morphologique sur la rivière Leitzaran	21
4.1.1.	Résultats des analyses granulométriques de la campagne 2021 et comparaison avec les années précédentes.....	21
4.1.2.	Résultats de sections transversales réalisées	24
4.1.3.	Recherche de traceurs GPS	24
4.2.	Etat des lieux et diagnostics de cours d'eau	25
4.2.1.	Présentation des résultats de l'analyse cartographique sur la rivière Queiles	25
4.2.2.	Etat des lieux et diagnostic de l'Urola et de ses affluents	30
V.	Discussion.....	31
4.1.	Suivi morphologique sur la rivière Leitzaran	31
4.2.	Etat des lieux et diagnostics de cours d'eau	32
4.2.1.	Etat des lieux d'un affluent de l'Ebre: la rivière Queiles	32
4.2.2.	Etat des lieux et diagnostic de deux affluents de l'Urola	33
VI.	Conclusion.....	34
	Bibliographie	35
	Annexes.....	36

Table des figures

Figure 1: Localisation du lieu de réalisation du stage	6
Figure 2: Localisation de la rivière Leitzaran et de son bassin versant	8
Figure 3: Zones d'études de suivi géomorphologique	9
Figure 4: Localisation de la partie aval du Queiles dans le bassin hydrographique de l'Ebre	10
Figure 5: Localisation de la partie étudiée de la rivière Queiles	10
Figure 6: Tronçons étudiés de l'Urola et ses affluents	12
Figure 7: Echantillonnage granulométrique sur les barres OI3 et I8.....	13
Figure 8: Mesure d'un sédiment par la méthode de Wolman	13
Figure 9: Echantillonnage de Surface par cadre sur la barre contrôle Oolloki 0.....	14
Figure 10: Localisation des barres sédimentaires analysées sur le tronçon d'étude du barrage d'Oolloki	15
Figure 11: Localisation des barres sédimentaires analysées sur le tronçon d'étude du barrage d'Inturia	16
Figure 12: Site de prélèvements et de dépôts des traqueurs.....	17
Figure 13: Présentation des sections transversales de la zone du barrage d'Inturia.....	18
Figure 14: Présentation des sections transversales de la zone du barrage d'Oolloki	18
Figure 15: Evolution du D50 entre 2017 et 2021 obtenues avec l'échantillonnage granulométrique longitudinal pour les différentes barres sédimentaires	23
Figure 16: Echantillonnage granulométrique de surface par cadre pour les barres OI-0 à OI-4 de 2017 à 2021	24
Figure 17: Section transversale OI 07 en 2017, 2018, 2019 et 2020.....	24
Figure 18: Localisation des traceurs sur la section d'étude d'Oolloki entre 2017 et 2020	25
Figure 19: Lit mineur de la rivière Queiles et ses principales changements depuis le milieu du XX ^{ème} siècle.....	26
Figure 20: Pourcentage d'occupation du sol de la plaine d'inondation pour les catégories selectionnées entre 1945 et 2017	27
Figure 21: Cartes d'occupations du sol de la plaine d'inondation de la rivière Queiles en 1966, 2000 et 2012	28
Figure 22: Rivière Queiles entre Cascante et Tudela	29
Figure 23: Mise en évidence de l'erreur cartographique du tracé du Queiles	29
Figure 24: Rivière Narrondo. Arroa Bekoa, Gipuzkoa	30
Figure 26: Photographie d'un arbre de l'ancienne ripisylve et du niveau de la retenue d'eau sur la rivière Leitzaran à l'amont d'Inturia	31
Figure 27: Canaux d'irrigation passant au-dessus du canal de Lodosa à proximité de la rivière Queiles	33

Table des tableaux

Tableau 1: Classes de taille de l'échantillonages longitudinal de surface.....	13
Tableau 2: Classe de taille pour réaliser le tamisage granulométrique	14
Tableau 3: Impacts anthropiques à relever lors des diagnostiques de cours d'eau	21
Tableau 4: Valeurs du D50 (en mm) pour les barres sédimentaires entre 2017 et 2021 obtenues avec l'échantillonnage granulométrique longitudinal.....	22



Table des annexes

Annexe 1: Tableau recensant les missions secondaires réalisées.....	36
Annexe 2: Débit moyen mensuel mesuré sur la rivière Leitzaran entre 1995 et 2018 (m ³ /s). (Informe 2020 Irekibai ; source : conseil provincial du Gipuzkoa)	37
Annexe 3: Climats du bassin versant de l'Ebre (Vera, Plaza, et García 2017).....	37
Annexe 4: Tamiseuse granulométrique	38
Annexe 5: Traceurs GPS avec et sans protection	38
Annexe 6: Utilisation d'un théodolite pour réaliser une coupe transversale de la rivière Leitzaran....	39
Annexe 7: Surfaces occupées par les différentes catégories de sols sur la plaine d'inondation entre 1945 et 2017.....	39
Annexe 8: Evolution de l'occupation du sol entre 1927 et 2017 sur la moitié Nord de la zone d'étude	40
Annexe 9: Cartes d'occupations du sol de la plaine d'inondation de la rivière Queiles	41
Annexe 10: Carte du Queiles et de son état hydraulique depuis son entrée en Navarre jusqu'à Tudela. 1792 (Archives de Navarre).....	43

I. Introduction

1.1. Présentation de la structure d'accueil

Ce stage s'inscrit dans la formation Ingénierie des Milieux Aquatiques (IMA) du département Aménagement et Environnement de Polytech Tours. Il a été réalisé en 4^{ème} année du 19 avril au 30 juillet 2021 en Espagne au Pays-Basque (País Vasco).

Le département Géographie, Préhistoire et Archéologie fait partie de l'université du Pays Basque, il est situé sur le site de Vitoria-Gasteiz (Figure 1) dans la communauté autonome du País Vasco et plus précisément dans la province de l'Alava, une des trois provinces de la communauté. Il existe trois sites de l'université, un dans les trois villes principales: Bilbao, San Sébastien et Vitoria-Gasteiz.



Figure 1: Localisation du lieu de réalisation du stage (Google maps)

Le stage s'est déroulé au sein d'une petite équipe du département, spécialisée dans les études géomorphologiques des rivières.

Les projets de recherches sont commandités et financés par les communautés autonomes : Pays Basque, Navarre, Catalogne ou les provinces. L'équipe travaille principalement sur le bassin versant de l'Ebre (Ebro) et sur les cours d'eau basques.

1.2. Les projets

Plusieurs types de projets sont réalisés. Il peut s'agir d'états des lieux de rivières comme ceux réalisés sur des affluents de l'Ebre ou sur les principaux cours d'eau du Pays Basques. Ils permettent d'étudier les différentes modifications réalisées par l'Homme et permettent de mettre en évidence les pressions anthropiques et les processus géomorphologiques affectant la rivière. Le cours d'eau étudié peut ensuite être défini selon la classification de qualité hydromorphologique allant d'un «Très bon » état à un état « mauvais ». Cet apport de connaissance sur ces cours d'eau permettront aux acteurs de l'eau d'améliorer la gestion et la qualité de l'eau, et de réaliser des aménagements dans l'objectif de répondre aux exigences de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) mis en place par l'Union Européenne en 2000.

Des études sur les arasements de barrages sont également réalisées sur la rivière Leitzaran, ils sont le fruit d'une coopération avec les acteurs locaux et de nombreux chercheurs dans plusieurs domaines : continuité écologique, études d'espèces menacées (Vison européen, Desman des Pyrénées) et géomorphologie. C'est ce dernier qui est réalisé par l'équipe pour étudier l'évolution morphologique du cours d'eau après un arasement de barrage. Peu d'études à long terme ont été réalisées sur cette thématique et ce projet est l'occasion d'étudier en détail tous ces processus qui sont souvent peu visibles du fait de leur lenteur.

1.3. Les différentes missions réalisées durant ce stage

Lors de mon stage réalisé avec l'équipe du département Géographie, j'ai pu participer à plusieurs projets sur des rivières très différentes. D'une part par leurs localisations, dans des régions différentes soumises à des climats pouvant être océaniques, méditerranéens et même semi-désertiques. Et d'autre part par leur type, j'ai pu étudier des rivières de montagne, des cours d'eau à fort impact anthropique et des cours d'eau non permanents.

J'ai pu participer à des phases de cartographies sur SIG, essentielles au début de certains projets. J'ai également participé aux analyses de terrains, échantillonnages granulométriques, état des lieux de cours d'eau et expertise morphologique de rivières. Lors de ce stage, j'ai aussi été amené à réaliser des mesures granulométriques sur le terrain et des tamisages granulométriques en laboratoire.

La première partie de mon stage était essentiellement une phase de lectures d'articles scientifiques sur des projets qui avaient déjà commencés ou sur d'autres dont la méthodologie était similaire à celle que nous allions utiliser. Cette étape est importante quand on arrive pour travailler sur des projets qui ont déjà commencés depuis plusieurs années. Cela permet également d'assimiler les méthodes utilisées.

Une deuxième partie était surtout de l'analyse sur SIG pour comparer l'évolution d'un cours d'eau depuis le milieu du XX^{ème} siècle en utilisant des orthophotographies, pour définir la plaine d'inondation et pour voir l'évolution du cours d'eau et de l'occupation du sol du lit majeur.

Une troisième partie de ce stage était occupée par les analyses sur le terrain en granulométrie et diagnostic de cours d'eau et les mesures en laboratoire des échantillons récoltés sur le terrain.

D'autres missions ont été réalisées durant ce stage mais elles étaient ponctuelles et ne rentraient pas dans un projet global de stage. J'ai par exemple pu faire des sorties en Navarre pour observer l'Ebre et l'Aragón et l'ensemble des problématiques de leur bassin versant : Réduction du lit mineur, occupation de la plaine d'inondation, problématiques d'inondations (Horacio et al. 2019; Ollero et al. 2020). Ces missions sont répertoriées sous forme de tableau en Annexe 1.

II. Présentation des études

2.1. Suivi morphologique sur la rivière Leitzaran

2.1.1. Le site d'étude

La rivière Leitzaran est un cours d'eau de 77.29 km avec une pente moyenne de 12.4%. C'est un affluent de l'Oría par sa rive droite. Son bassin versant est de 881.99 km² et est situé au Nord-Est du Pays-Basque dans la province du Gipuskoa (Figure 2). Elle prend sa source à environ 1000 m d'altitude avant de se jeter dans l'Oría au niveau de la ville d'Andoain.

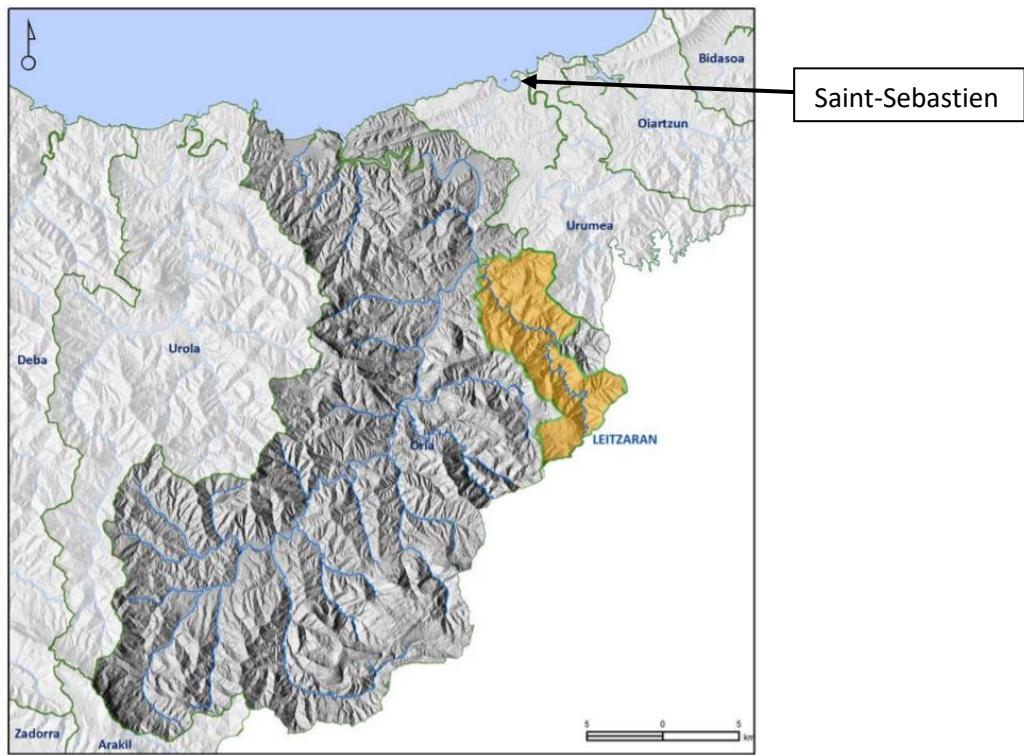


Figure 2: Localisation de la rivière Leitzaran et de son bassin versant (Informé 2020 Irekibai)

Le climat de cette zone est océanique-tempéré et la pluviométrie est supérieure à 2000 mm/an. Le débit moyen annuel de la rivière Leitzaran est de 4.8 m³/s à Andoain sur la période 1995 – 2018 avec un débit maximal de 8.7 m³/s en février (Annexe 2).

La rivière est encaissée avec de nombreux méandres, ce qui a permis à ce cours d'eau de ne pas être trop anthropisé. Cependant, plusieurs barrages sont présents dont Inturia et Oolloki qui ont été arrasés respectivement entre 2013 et 2016 et 2018/2019. Un suivi morphologique a été réalisé suite à ces travaux sur deux zones d'études (Figure 3), de 3 km pour le barrage d'Inturia et 2.4 kilomètres pour celui d'Oolloki.

Le barrage d'Inturia, un barrage de 12.5 mètres de haut a été arrasé par phase entre 2013 et 2016. Les 3 premiers mètres ont donc été détruits en août 2013, les 3 m suivants en août 2014 et les 6 derniers en 2016 (Ibisate et al. 2016).

Le barrage d'Oolloki, de 7 mètres de haut a également été arrasé par phase, une première partie a été enlevée en fin d'été 2018 et la partie restante durant l'été 2019.

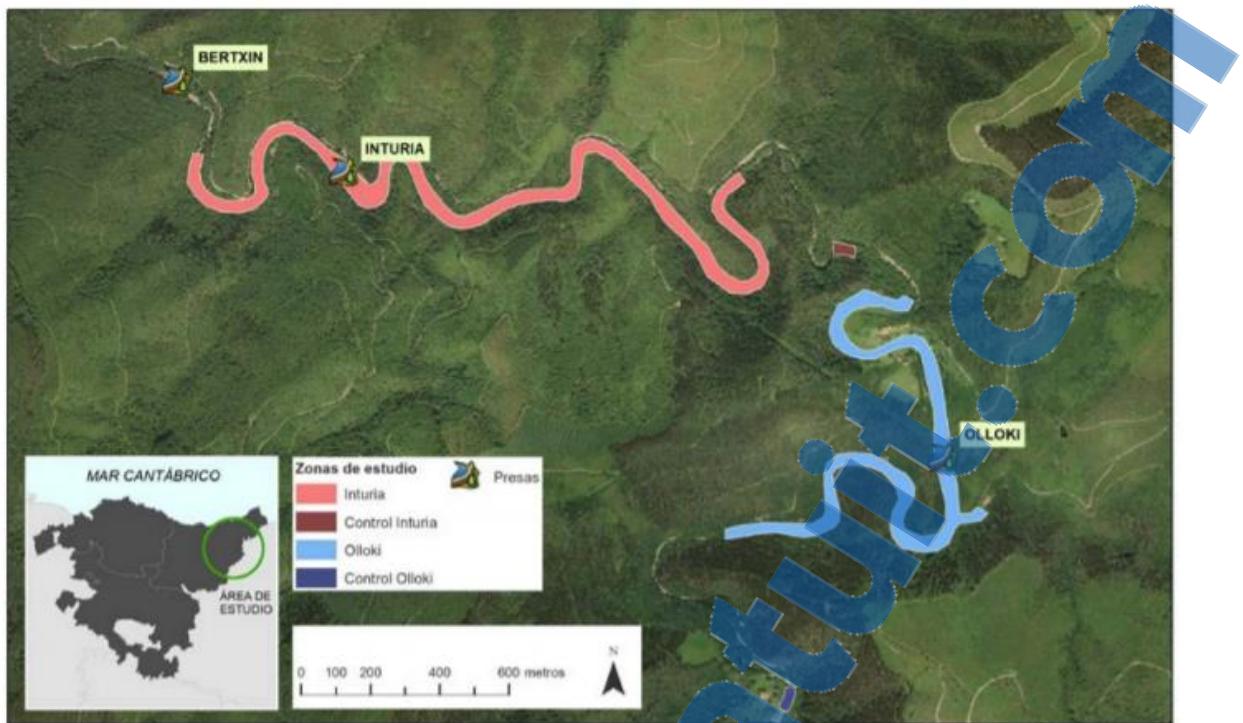


Figure 3: Zones d'études de suivi géomorphologique (Informé 2020 Irekibai)

2.1.2. Les objectifs

Ce suivi morphologique de la rivière Leitzaran a pour objectif de comprendre comment le cours d'eau peut retrouver sa dynamique naturelle après l'arasement de barrages en étudiant les processus et la dynamique sédimentaire.

Ce projet peut être découpé en deux principales parties. La première, était la phase d'étude en amont de la démolition des barrages, il s'agissait de dresser un état des lieux de la morphologie et de la répartition granulométrique de la rivière, puis de proposer des hypothèses sur la phase de retour à une dynamique naturelle.

La deuxième partie consiste à étudier l'évolution de la morphologie du cours d'eau après l'arasement des barrages à travers un suivi annuel sur plusieurs barres sédimentaires à l'amont et à l'aval des barrages arrasés et de suivre l'évolution de la morphologie avec des sections transversales. C'est une partie clé du projet car elle permet de comprendre comment le cours d'eau peut retrouver sa morphologie naturelle, quels sont les processus intermédiaires rentrant en jeu et quelle temporalité peut prendre le cours d'eau pour regagner un équilibre naturel.

Pour cela cette phase d'étude a été réalisée avec trois méthodologies pour répondre au mieux aux objectifs. Tout d'abord un suivi granulométrique annuel a été réalisé sur des points de contrôles définis, c'est un indicateur de la dynamique de la rivière et il permet d'étudier l'évolution du transport sédimentaire. De plus, pour compléter et comprendre la répartition de certains sédiments suite à l'arasement des barrages, des traceurs ont été utilisés. Il s'agit de petit GPS introduits dans certains sédiments de taille connue pour permettre de suivre le transport sédimentaire. Pour permettre un suivi complet de l'évolution de la morphologie après l'arasement des barrages, des sections transversales ont été réalisées tous les ans depuis 2013. Elles permettent de suivre au mieux l'évolution morphologique de la rivière avec les processus d'incision et de sédimentation résultant de l'arasement des barrages.

2.2. Etat des lieux et diagnostics de cours d'eau

2.2.1. Etat des lieux d'un affluent de l'Ebre (Ebro): la rivière Queiles

2.2.1.1. Le site d'étude

Le cours d'eau étudié est la rivière Queiles sur sa partie aval de son entrée dans la communauté autonome de Navarre jusqu'à sa confluence avec l'Ebre qu'il rejoint par sa rive droite à Tudela (Figure 4 et 5).

Il fait partie des petits affluents de l'Ebre, il est situé en aval de la confluence Ebre-Aragon où l'Ebre double son débit.

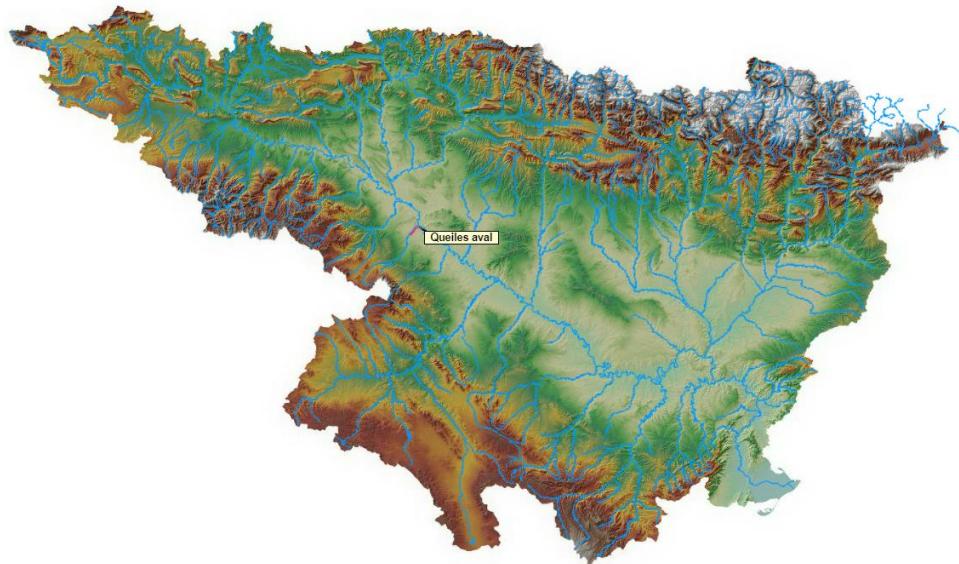


Figure 4: Localisation de la partie aval du Queiles dans le bassin hydrographique de l'Ebre (réalisé à partir de Geoportal Sitebro)

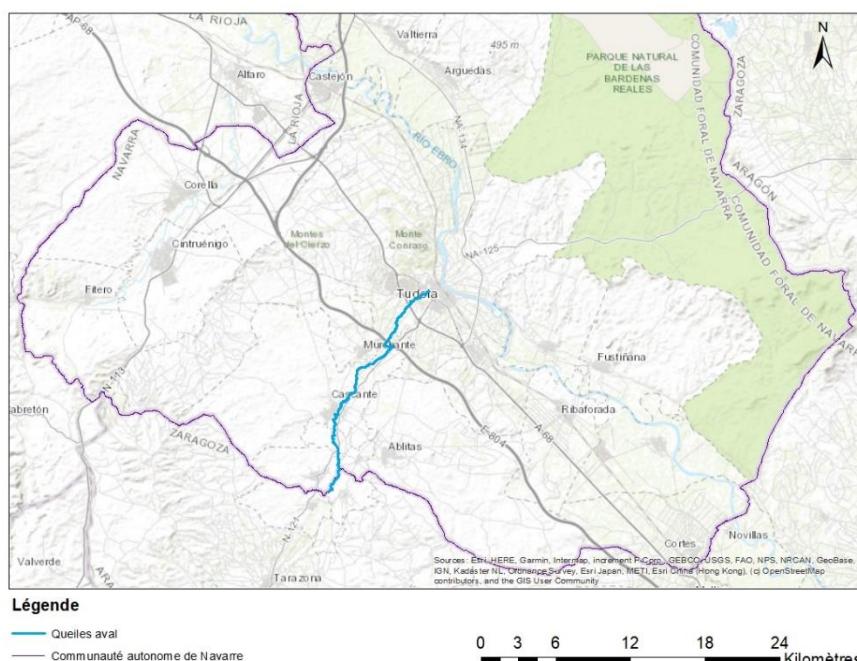


Figure 5: Localisation de la partie étudiée de la rivière Queiles

La partie de la rivière Queiles étudiée est située dans une zone aride soumise à un climat Méditerranéen continental sec (Annexe 3). Beaucoup de parcelles agricoles sont cependant présentes avec un réseau d'irrigation et de canaux très développé. C'est une zone qui a fortement été modifiée par l'Homme et la rivière Queiles n'en fait pas exception. Quatre villes sont présentes sur la partie étudiée, Tulebras, Cascante, Murchante et Tudela pour un total d'environ 45 000 habitants.

A noter la présence sur le site d'étude du canal de Lodosa, un canal de 132 kilomètres de long, passant perpendiculairement au-dessus de la rivière Queiles. (Voir 4.2.1. Figure 23)

2.2.1.2. *Les objectifs*

Ce diagnostic a pour objectif d'étudier les masses d'eau et de les évaluer afin de proposer des phases de restauration dans le but d'atteindre le bon état écologique fixé par la DCE de 2000. C'est un projet qui a été commandité par la communauté autonome de Navarre et qui fait suite à d'autres diagnostics de ce type sur d'autres affluents de l'Ebre. Cette étude intervient donc dans un travail global de diagnostics de cours d'eau du bassin versant de l'Ebre.

Sur ce projet, c'est la partie cartographique qui a été réalisée durant ce stage. C'est la première étape du travail de diagnostic qui consistait à définir la plaine d'inondation du cours d'eau, observer l'évolution de celui-ci depuis le milieu du XX^{ème} siècle et étudier l'évolution de l'occupation du sol sur la plaine d'inondation depuis ces mêmes années.

2.2.2. *Etat des lieux et diagnostics des affluents de l'Urola*

2.2.2.1. *Les objectifs*

Ce second diagnostic de cours d'eau répond aux mêmes objectifs que ceux présentés pour la rivière Queiles. Il s'agit de proposer un état des lieux et un diagnostic complet du cours d'eau pour définir son état hydrogéomorphologique.

Ce projet, commencé en 2013 et commandité par le conseil provincial du Gipuzkoa, est plus avancé que celui sur le Queiles et c'est donc la dernière phase de terrain qui a été réalisée durant ce stage en juin et juillet 2021. Lors de cette campagne de terrain 2021, il s'agissait d'étudier deux affluents de l'Urola : l'Otaola et le Narrondo.

Plusieurs objectifs ont été définis. Il s'agit premièrement d'identifier sur le terrain, les processus géomorphologiques du cours d'eau étudié pour définir son fonctionnement et définir des segments homogènes appelés tronçons. De plus, les pressions et les impacts des activités humaines sur les masses d'eau sont étudiées ce qui permet de caractériser et d'évaluer l'état du cours d'eau dans sa globalité. Pour chaque tronçon défini, un état hydrogéomorphologique sera ensuite attribué et des propositions de restauration seront proposées par tronçons ou par cours d'eau pour permettre d'atteindre le Bon état fixé par la DCE.

2.2.2.2. *Le site d'étude*

L'Urola est une rivière de 59 km située dans la province du Gipuzkoa (País Vasco). Elle prend sa source dans la chaîne de montagne Aizkorri-Aratz et se jette dans la mer Cantabrique dans la ville de Zumaia. La province du Gipuzkoa étant une zone montagneuse, la vallée de l'Urola est assez urbanisée et constitue une des principales routes. Ces affluents sont moins anthropisés. Dans le cadre de ce stage, deux affluents ont été étudiés, l'Otaola et le Narrondo (Figure 6)

L'Otaola est un affluent de l'Urola par sa rive droite. C'est un cours d'eau de montagne qui est peu urbanisé jusqu'à sa confluence avec l'Urola dans le village de Lasao (Gipuzkoa).

Le Narrondo est le dernier affluent de l'Urola avant l'embouchure. C'est un cours d'eau qui prend également sa source en montagne, sa partie aval est plutôt urbanisée.

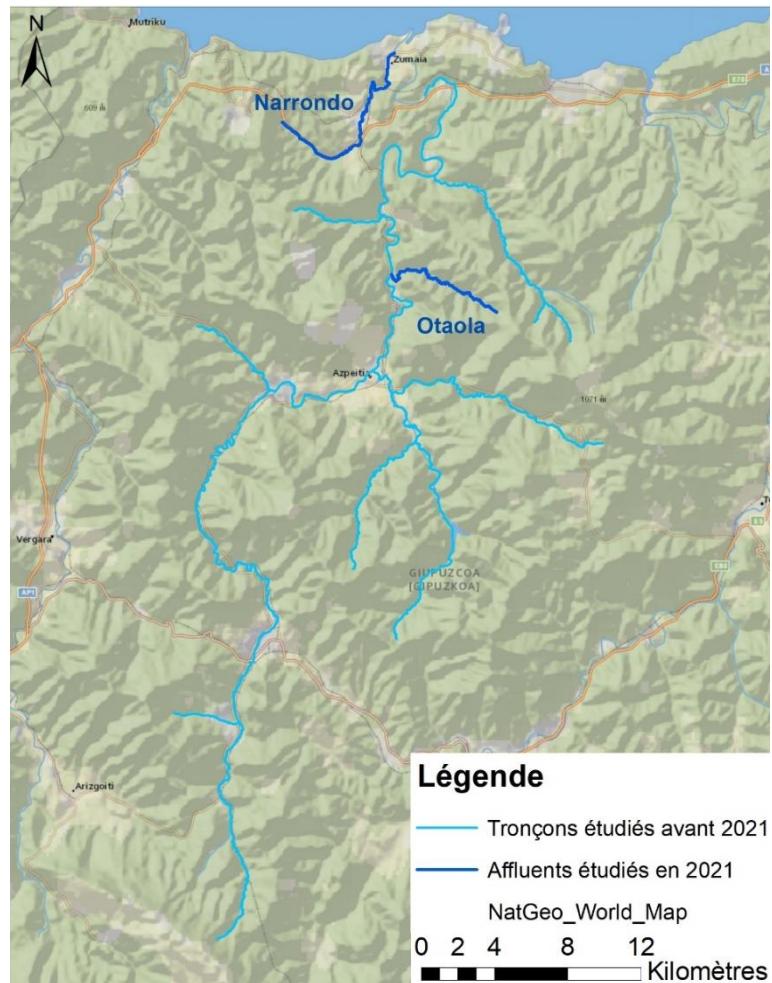


Figure 6: Tronçons étudiés de l'Urola et ses affluents

III. Matériels et Méthodes

3.1. Suivi morphologique sur la rivière Leitzaran

3.1.1. Suivi granulométrique

Pour estimer et suivre la dynamique du cours d'eau, des barres sédimentaires ont été analysées selon différentes méthodes d'échantillonnages.

3.1.1.1. Echantillonnage longitudinal de surface

Pour chaque barre sédimentaire étudiée, un échantillonnage longitudinal de surface a été effectué (Figure 7). Il s'agit sur une ligne de 100 mètres, mesurée avec un décamètre, de relever la taille de chaque sédiment se trouvant à 1 mètre de distance. Cette opération est répétée trois fois, sur la partie basse de la barre, la partie intermédiaire et la partie haute. Au total, 300 sédiments sont relevés et permettent d'échantillonner l'ensemble de la barre sédimentaire étudiée.

C'est la méthode d'échantillonnage la plus représentative pour comparer des barres entre elles.



Figure 7: Echantillonage granulométrique sur les barres OI3 et I8

Les sédiments sont mesurés en utilisant la méthodologie de Wolman, le plus petit côté, longueur b, est mesuré (Figure 8). Ils sont ensuite notés suivant leurs tailles dans les différentes classes (Tableau 1).

Figure 8: Mesure d'un sédiment par la méthode de Wolman (Navratil, s. d.)

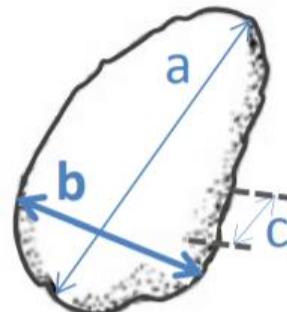


Tableau 1: Classes de taille de l'échantillonage longitudinal de surface

Classes de taille (mm)
> 126
90.5 – 126
64 – 90.5
45.3 - 64
32 – 45.3
22.6 - 32
16 – 22.6
11.3 – 16
8 – 11.3
5.66 - 8
4 – 5.66
2.83 – 4
2 – 2.83
< 2

Avec ces données le D16, le D50 et le D84 peuvent être calculés pour chaque barre sédimentaire. Le D50, correspondant à la médiane, est la valeur utilisée pour les comparer entre elles et les comparer avec les anciennes mesures. Le D16 et le D84 permettent de voir la distribution de la taille des sédiments s'ils sont bien répartis ou si la médiane entre des valeurs extrêmes.

3.1.1.2. Echantillonnage de surface par cadre

Sur les mêmes barres sédimentaires étudiées, un autre protocole d'échantillonnage granulométrique est réalisé. Il s'agit d'un échantillonnage par cadre, où un carré d'un mètre carré est dessiné sur le sol à l'aide de marques en bois et l'ensemble de ce cadre est coloré (Figure 9).

L'emplacement du cadre a été choisi pour représenter au mieux l'ensemble de la barre sédimentaire. Cette technique d'échantillonnage permet surtout de comparer les résultats avec l'échantillonnage de subsurface présenté dans la partie suivante.



Figure 9: Echantillonnage de Surface par cadre sur la barre contrôle Ollioki 0

Chaque sédiment coloré est ensuite mesuré et pesé sur place. Les calculs du D16, D50 et D84 sont ensuite réalisés dans un second temps. Les résultats donnés par l'échantillonnage par cadre sont surtout utilisés pour comparer avec l'échantillonnage subsuperficiel.

3.1.1.3. Echantillonnage de la granulométrie subsuperficielle

Après avoir mesuré et pesé toutes les particules présentes dans le cadre, entre 5 et 10 kg de sédiments situés en dessous les sédiments de surface sont récupérés pour être analysés en laboratoire.

L'échantillon récupéré est ensuite classé suivant leur taille à l'aide d'une règle pour les plus grosses particules et d'une tamiseuse granulométrique (Annexe 4). Les différentes classes de tailles utilisées sont présentées Tableau 2.

Tableau 2: Classe de taille pour réaliser le tamisage granulométrique

Classes de taille (mm)
>64
20 – 64
10 – 20
2 – 10
0.063 - 2
< 0.063

Chaque classe de taille est ensuite pesée pour calculer le pourcentage représenté par rapport à l'ensemble de l'échantillon.

De plus, les particules supérieures à 20 mm sont également pesées et mesurées individuellement pour améliorer la précision de mesures et des données calculées.

Le D16, D50 et le D84 peuvent ensuite être calculés en utilisant la fréquence cumulée de la masse de chaque classes de taille

3.1.1.4. Barres sédimentaires analysées

Les principales barres sédimentaires ont été sélectionnées pour le suivi granulométrique. Quatre barres sont étudiées sur le tronçon du barrage d'Olloki (Figure 10), deux sont situées à l'amont de celui-ci, juste avant l'ancienne zone de retenue d'eau. Deux autres barres sédimentaires sont situées à l'aval dans des méandres. Elles sont numérotées de 1 à 4 respectivement de l'amont à l'aval. De plus une barre sédimentaire contrôle a été choisie. Elle est située au-delà de la zone d'influence du barrage et permet d'être comparée aux autres barres pour montrer l'effet de l'arasement du barrage. Cette barre contrôle est notée barre 0.

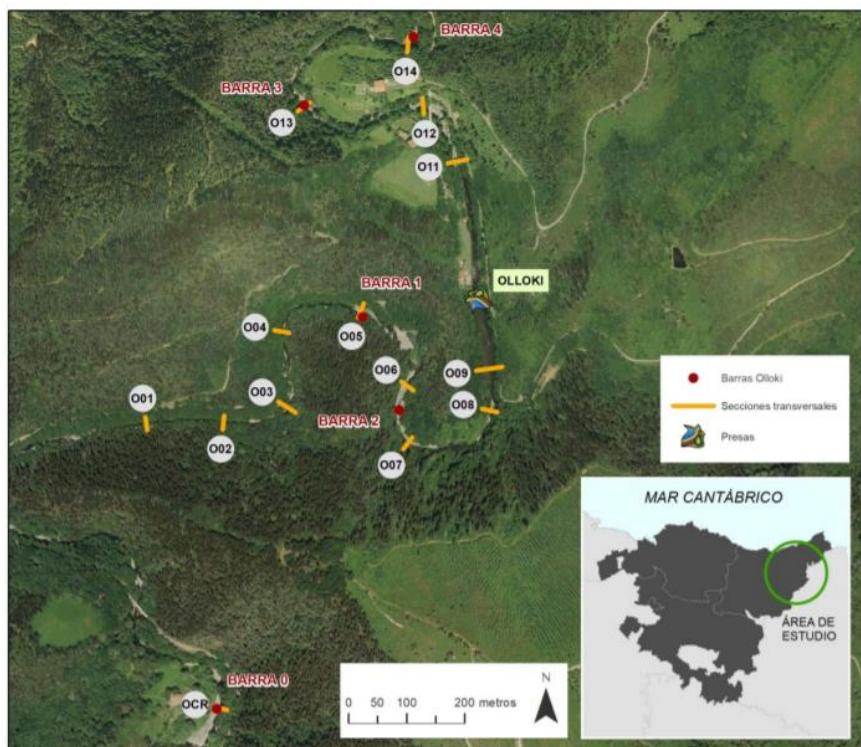


Figure 10: Localisation des barres sédimentaires analysées sur le tronçon d'étude du barrage d'Olloki (Informe 2020 Irekibai)

Neuf barres sédimentaires sont analysées sur le tronçon du barrage d'Inturia (Figure 11). Six sont situées à l'amont de l'ancien barrage et trois à l'aval. Elles sont principalement situées dans les méandres. Elles sont numérotées de 1 à 8 respectivement d'amont à aval et la barre 9 a été ajoutée après avoir été observée pour la première fois en juillet 2017. Une barre contrôle a aussi été sélectionnée au-delà de la zone d'influence du barrage. A noter que la barre 8 n'a été utilisée que sur la première campagne de terrain et n'est plus analysée aujourd'hui car elle est située dans la zone d'influence du seuil de Bertxin.



Figure 11: Localisation des barres sédimentaires analysées sur le tronçon d'étude du barrage d'Inturia (Informe 2020 Irekibai)

Une fois les données relevées, les valeurs du D50 et du D16, D84 sont calculés. Ils permettent de connaître la répartition granulométrique de la barre. Ces résultats peuvent ensuite être comparés pour une même barre pour des années différentes mais ils peuvent aussi être comparés suivant l'emplacement des barres par rapport à l'emplacement de l'ancien barrage. Toutes ces analyses permettent de comprendre l'ensemble de la dynamique morphologique du cours d'eau.

3.1.2. Traçage GPS

3.1.2.1. Choix des zones d'études et sélection granulométrique

La première étape pour réaliser ce travail a été de définir trois tronçons (Figure 12). Le premier est situé hors de la zone d'influence du barrage et sert de contrôle. Les deux autres tronçons sont situés à l'amont et à l'aval du barrage et sont de longueurs respectives de 1457 m et 992 m.

Ces trois tronçons ont été définis avant la première campagne de terrain en 2016. Depuis, une campagne de terrain a été réalisée chaque année sur les mêmes zones.

Ensuite la granulométrie des tronçons étudiés a été mesurée. Pour cela une barre sédimentaire sur chaque tronçon a été échantillonnée avec le protocole d'échantillonnage longitudinal de surface présenté en 3.1.1.2.

Une fois la barre sédimentaire échantillonnée la classe du D50 est calculée. 90 galets de la classe du D50 et 90 autres de la classe supérieur au D50 ($D50_{+1}$) sont sélectionnés et ramassés. La sélection se fait selon plusieurs critères, il ne faut pas que le galet soit trop dur car le traceur ne pourra pas être introduit et il ne doit pas non plus être trop cassable lors du perçage pour insérer le traceur.

Pour chaque lot de 90, 75 particules sont nécessaires, les 15 autres servant de rechanges si certaines cassent ou sont trop dures.

A noter que le protocole initial prévoyait d'utiliser les galets de la classe inférieure au D50 ($D50_{-1}$) mais cette classe ne permettait pas l'introduction des traceurs GPS.

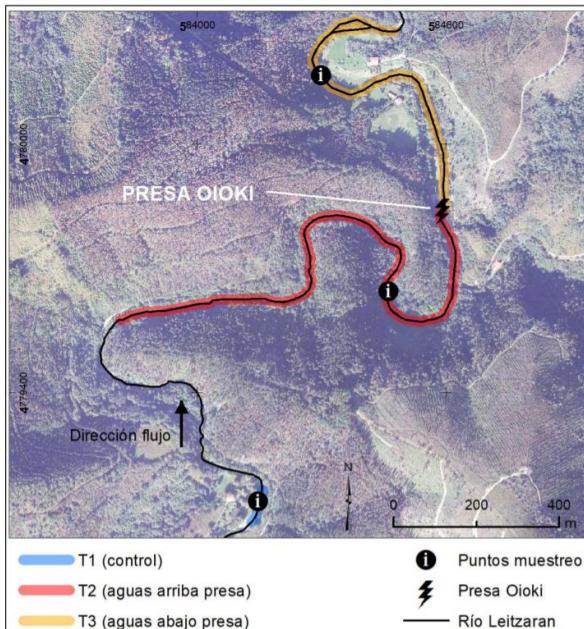


Figure 12: Site de prélèvements et de dépôts des traceurs (Informe 2020 Irekibai)

3.1.2.3. Insertion des traceurs GPS

Les traceurs sont de petits GPS détectables et étanches (Annexe 5). Une protection en silicone est ajoutée pour éviter les chocs et qu'ils se cassent. Un traceur GPS est introduit dans chacun des 75 galets pour chaque lot. Il y a deux lots par tronçons (D50 et D50₊₁), c'est donc 450 traceurs qui sont introduits dans les galets après les avoir percés avec une perceuse à colonne.

Une fois ce travail réalisé les différents lots sont remis sur leurs barres sédimentaires d'origine et leurs positions sont enregistrées.

3.1.2.4. Recherche et enregistrement des traceurs

L'année suivante, la recherche des traceurs peut être réalisée. Elle est faite avec un détecteur, semblable à un détecteur de métaux. Chaque fois que l'opérateur passe avec le détecteur sur un traceur, ce dernier est enregistré avec son code et ses nouvelles coordonnées GPS.

Tout le cours d'eau est scanné de la zone contrôle au seuil de Bertxin plusieurs kilomètres à l'aval. Le détecteur détecte également les anciens traceurs ce qui permet également d'étudier leurs déplacements et le transport sédimentaire plus à l'aval et sur le long terme.

L'ensemble de ces données est ensuite récupéré sous la forme d'un tableau excel.

3.1.3. Etudes de sections transversales

Pour étudier l'évolution de la morphologie de la rivière Leitzaran et compléter ce travail sur la granulométrie, des sections transversales sont réalisées.

Elles sont très importantes pour suivre l'évolution de la morphologie de la rivière. Pour cela elles sont faites chaque année aux mêmes endroits.

25 sections transversales sont réalisées sur la zone du barrage d'Inturia (Figure 13). Une se situe à l'amont (I 00) de la zone d'influence du barrage et est utilisée comme contrôle. 19 sections se situent à l'amont d'Inturia (I 01 à I 19) et 5 autres ont été placées à l'aval avant la zone d'influence du seuil de Bertxin (I 20 à I 24).

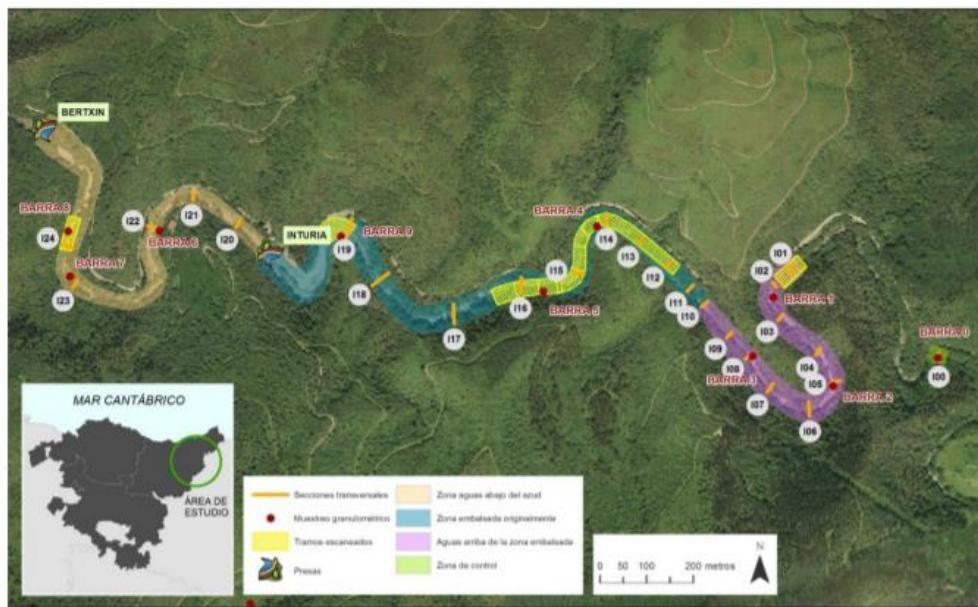


Figure 13: Présentation des sections transversales de la zone du barrage d'Inturia (Informe 2020 Irekibai)

Sur la zone du barrage d'Olloki, plus à l'amont, 14 sections transversales sont réalisées (Figure 14). La première sert de zone de contrôle (O 00), 9 sont situées à l'amont (O 01 à O 09) et 4 sont situées à l'aval du barrage (O 11 à O 14).

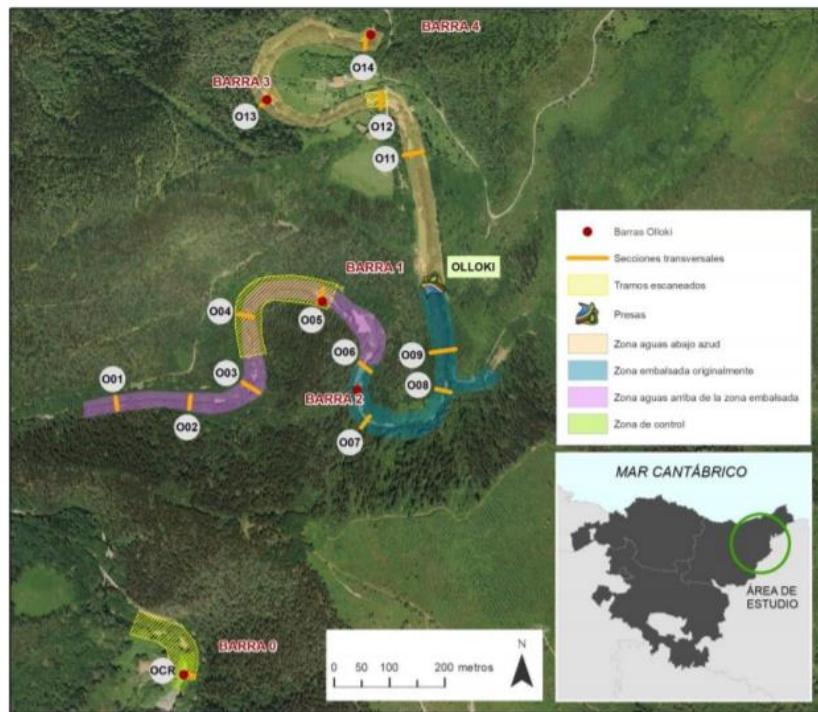


Figure 14: Présentation des sections transversales de la zone du barrage d'Olloki (Informe 2020 Irekibai)

Les sections transversales sont réalisées avec un théodolite (Annexe 6) ou un niveau de chantier. Des repères ont été placés sur des arbres pour pouvoir refaire la même section transversale les années suivantes.

3.2. Etat des lieux et diagnostics de cours d'eau

3.2.1. Etude cartographique et première approche du terrain sur la rivière Queiles

3.2.1.1. Analyse cartographique

Le travail cartographique réalisé est la première étape de l'étude de la rivière Queiles. Il s'agit d'une étude diachronique sur plusieurs années : 1927, 1945, 1956, 1966, 2000, 2012 et 2017. Ces années ont été choisies pour illustrer au mieux les changements importants du territoire qui ont modifiés le cours d'eau. Le tracé de la rivière Queiles et les usages du sols ont été digitalisés sur l'ensemble de ces années.

Ce travail a été réalisé en plusieurs étapes. Premièrement il a fallu définir les contours de la plaine d'inondation. Pour cela un fond LIDAR topographique a été utilisé, il permet de voir les variations topographiques. Il avait été efficace pour dessiner la plaine d'inondation de l'Alhama, un autre affluent de l'Ebre. Cependant la plaine d'inondation de la rivière Queiles avait peu de relief ce qui rendait impossible l'utilisation de ce fond topographique. La carte des zones inondables de retour $T=100$ ans et $T=500$ a donc été utilisée. Elle est rendue disponible pour l'utilisation SIG par le ministère de la transition écologique du gouvernement espagnol. Elle a permis de bien délimiter la plaine d'inondation de ce cours d'eau. « GeoPortal », l'équivalent espagnol de Géoportail a été utilisé pour vérifier si les zones inondables correspondaient bien à la plaine d'inondation en utilisant l'altitude z donnée.

Le lit du Queiles a ensuite été tracé à l'aide des données de la communauté autonome de Navarre et de la ripisylve observable sur les orthophotos. Une entité linéaire a donc été tracée pour chaque année pour permettre de voir l'évolution du lit de la rivière.

Les usages du sol de la plaine d'inondation ont été digitalisés à partir des orthophotos des différentes années étudiées. Des polygones ont été dessinés pour représenter la végétation, les cultures, les zones anthropiques et les barres sédimentaires. L'évolution de ces différentes catégories a ensuite été observée entre 1945 et 2017 sur l'ensemble de la zone d'étude. L'orthophoto de 1927 étant disponible seulement sur la moitié Nord, ce travail de comparaison a ensuite été de nouveau réalisé sur la partie Nord disponible pour pouvoir comparer cette année avec les autres.

Les orthophotos utilisées sont rendues disponibles sous forme de serveur SIG WMS (Web Map Service) par la plateforme de données de la communauté autonome de Navarre IDENA (Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra).

3.2.1.2. Observations sur le terrain

Une journée terrain a été planifiée à la fin de ce travail de cartographie. Il a permis de valider les premières observations réalisées sur cartographie et de préparer une future campagne de terrain. De plus, après avoir pris des points de contrôle sur l'application SIG SW maps, le tracé du cours d'eau a été modifié pour gagner en précision notamment sur certaines zones où le couvert végétal ne permettait pas de déterminer le tracé exact avec les vues aériennes.

Un des objectifs de cette journée terrain était de voir « l'intersection » entre la rivière Queiles et le canal de Lodosa et de constater l'erreur sur le tracé cartographique du Queiles dans le secteur du canal.

3.2.2. Diagnostic géomorphologique de deux affluents de l'Urola

3.2.2.1. Méthodologie d'analyse sur le terrain

La méthode initiale utilisée pour réaliser les diagnostics de cours d'eau prévoit de parcourir le cours d'eau d'amont en aval pour permettre de répertorier et voir les processus dans leur globalité. Cela a été réalisé pour l'Urola les années avant ce stage. Pour les affluents étudiés, il a été choisi de partir de la confluence avec l'Urola en aval et de remonter en amont. Ce choix s'est fait car le point de départ de ces affluents n'est pas toujours connu ou n'est pas accessible directement.

Plusieurs éléments sont relevés sur le terrain. Tout d'abord les processus géomorphologiques détaillés partie 3.2.2.2, ils permettent de voir la dynamique du cours d'eau et de faire le lien avec les impacts anthropiques. Ces derniers sont également relevés pour réaliser ce diagnostic morphologique de rivière, ils sont très importants car ce sont eux qui dégradent le cours d'eau, et peuvent entraîner une modification des processus géomorphologiques naturels.

Chaque élément relevé est noté sur papier d'aval à l'amont, en tenant compte de son type : ponctuel ou linéaire et de sa localisation. Un GPS d'une précision de 1 mètre est utilisé et la rive est renseignée. Des photos sont prises pour chaque impact anthropique rencontré et pour chaque indice montrant un processus géomorphologique. Les photos sont prises avec le plus de recul possible pour voir le cours d'eau et/ou la berge dans son ensemble. Leur numéro est noté à côté de l'élément montré et de ses coordonnées GPS.

Des tronçons sont également définis lorsqu'il y a une discontinuité dans l'homogénéité du cours d'eau. Chaque changement de tronçons est annoté avec ses coordonnées GPS et des photos sont prises à l'amont et à l'aval.

3.2.2.2. Processus géomorphologique

Les processus géomorphologiques sont notés ponctuellement car ce sont les indices montrant les processus qui sont relevés. Cela permet de voir quels sont les tronçons concernés.

Plusieurs éléments traitant des processus géomorphologiques sont relevés :

- L'érosion latérale : Elle est observable grâce à la forme de la berge et aux racines dénudées.
- Le resserrement du lit
- La sédimentation
- L'incision : Elle est identifiable lorsque la berge indique le niveau antérieur de la lame d'eau et elle est souvent observable lorsque des obstacles retiennent des sédiments à l'amont.
- Les effondrements de berges
- La présence d'affluents
- Les barrages naturels : Ils sont souvent composés de troncs ou de branches et font obstacles à l'écoulement.

Ces processus peuvent être complémentaires, on peut ainsi retrouver de la sédimentation sur une berge rive gauche si la berge rive droite subit une érosion latérale.

L'ensemble de ces processus géomorphologiques permettent de dresser un premier diagnostic de la dynamique du cours d'eau mais ils doivent prendre en compte les impacts anthropiques venant perturber la dynamique naturelle et favoriser certains processus.

3.2.2.3. Impact anthropique

Tous les impacts anthropiques sont relevés, ils sont localisés et pris en photo. Ils sont notés en deux types : les impacts ponctuels et les impacts linéaires (Tableau 3).

Tableau 3: Impacts anthropiques à relever lors des diagnostiques de cours d'eau

Impacts ponctuels	Impacts linéaires
Accès au cours d'eau	Artificialisation du lit
Obstacles (barrages, seuils)	Canal
Restes de constructions dans le lit	Murs de défense (Blocs permettant de limiter l'érosion de certaines berges)
Déviation du cours d'eau	Occupation du lit
Captation d'eau	Buse ou partie souterraine dans lequel passe le cours d'eau
Déviation du cours d'eau	Chemins parallèles au cours d'eau
Construction	
Décombres	
Occupation des berges	
Rejets d'eau	
Tuyaux ou buses arrivant sur le cours d'eau	
Berges artificiels gagné sur le lit naturel	
Ponts	
Berges dégradés	
Gués	
Zones de restauration	

3.2.2.4. Classification des tronçons

Tous les tronçons établis sur le terrain sont ensuite mis sur la cartographie sous ArcGIS. Grâce aux points de localisation GPS, les photos et les annotations y sont ajoutés.

Une fois la cartographie réalisée, chaque tronçon se verra attribué un des cinq états hydrogéomorphologiques établis par la DCE allant de « Très bon état » à « Mauvais état ».

IV. Résultats

4.1. Suivi morphologique sur la rivière Leitzaran

4.1.1. Résultats des analyses granulométriques de la campagne 2021 et comparaison avec les années précédentes

La campagne 2021 permettait de continuer à suivre l'influence de l'arasement du barrage d'Olloki qui s'est achevé en 2019. Pour cela les résultats de l'échantillonnage granulométrique de surface longitudinal des années 2017 à 2021 sont présentés Tableau 4.

Au niveau de la barre OI-1, on observe Tableau 4 et Figure 15 que le D50 augmente entre 2018 et 2020 après avoir diminué de 2017 à 2018. Le barrage d'Olloki ayant été arrasé avant la campagne de terrain de 2018 et 2019 on peut attribuer cette diminution à l'évacuation des sédiments les plus fins retenus par le barrage.

Sur la barre OI-2 on observe une diminution très forte du D50 entre 2017 et 2018 passant de 80.75 mm à 44.5 mm. Cette diminution peut être la réponse immédiate du cours d'eau à la première phase de la démolition d'Olloki. Les sédiments de plus petite taille remobilisés de OI-1 se sont déposés sur la barre OI-2 situés dans le premier méandre. Entre 2018 et 2020 cette diminution se poursuit plus légèrement jusqu'à atteindre 34.5 mm en 2020.

Entre 2020 et 2021, le D50 de OI-1 diminue et celui de OI-2 augmente, venant interrompre la tendance des années précédentes.

Pour la barre OI-3, on observe une diminution entre 2017 et 2020 avec un changement radical du D50 entre 2018 et 2019 passant de 112 mm à 57.5 mm. Cette diminution fait écho à la fin de l'arasement du barrage d'Olloki avant la campagne de terrain de 2019. Les sédiments plus fins présents dans la retenue se sont accumulés sur la première barre sédimentaire. Comme pour OI-2, on observe une augmentation du D50 entre 2020 et 2021.

On observe une augmentation continue du D50 pour la barre OI-4.

Pour les barres sédimentaires de la zone d'Inturia, ce sont les résultats de 2020 et 2021 qui permettent de voir l'influence de la démolition du barrage d'Olloki. On observe ainsi que le D50 de la barre I-0 a fortement augmenté entre 2019 et 2021. En 2019 la barre n'était plus présente mais en 2020 elle a pu être observée avec un D50 de 35.5 mm et en 2021 avec un D50 de 63 mm. De même, les barres I-2, I-3, I-4 et I-5 ont vu leur D50 augmenter ou la barre sédimentaire a été reconstituée. Ces augmentations de la taille des sédiments sur les barres sédimentaires sont dues à l'augmentation de la capacité de transport du cours d'eau grâce à la démolition du barrage d'Olloki. Les sédiments peuvent venir du fond du lit d'où la présence de mouilles de profondeur parfois importantes et de nombreux secteurs où l'on observe la roche mère.

Tableau 4: Valeurs du D50 (en mm) pour les barres sédimentaires entre 2017 et 2021 obtenues avec l'échantillonnage granulométrique longitudinal

	2021	2020	2019	2018	2017
Amont					
OI-0	52	59.3	71	82.5	92.64
OI-1	63	79.5	50	40	53.5
OI-2	48	34.5	42.5	44.5	80.75
Barrage d'Olloki					
OI-3	72	43.4	57.5	112	117.29
OI-4	62	51.5	26	33.5	22.5
I-0	63	35.5		96.5	
I-1	37	37.5	46	53	42
I-2	65	34.5	23.5	32.5	40.5
I-3	64				
I-4	54	37	46.5	40	67
I-5	67				70
I-9	28	74	67	53.5	56
Barrage d'Inturia					
I-6	35	43	47.5	45.5	52.5
I-7	29	43	49	27.5	55
Aval					

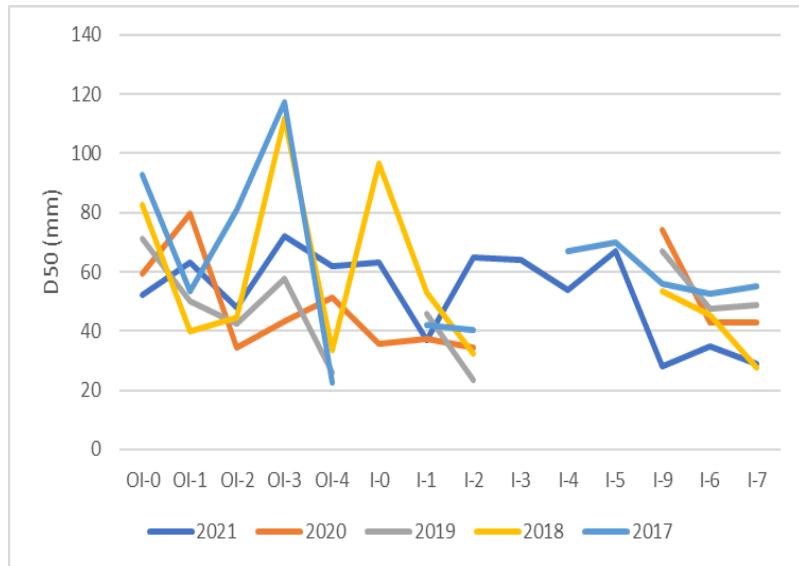
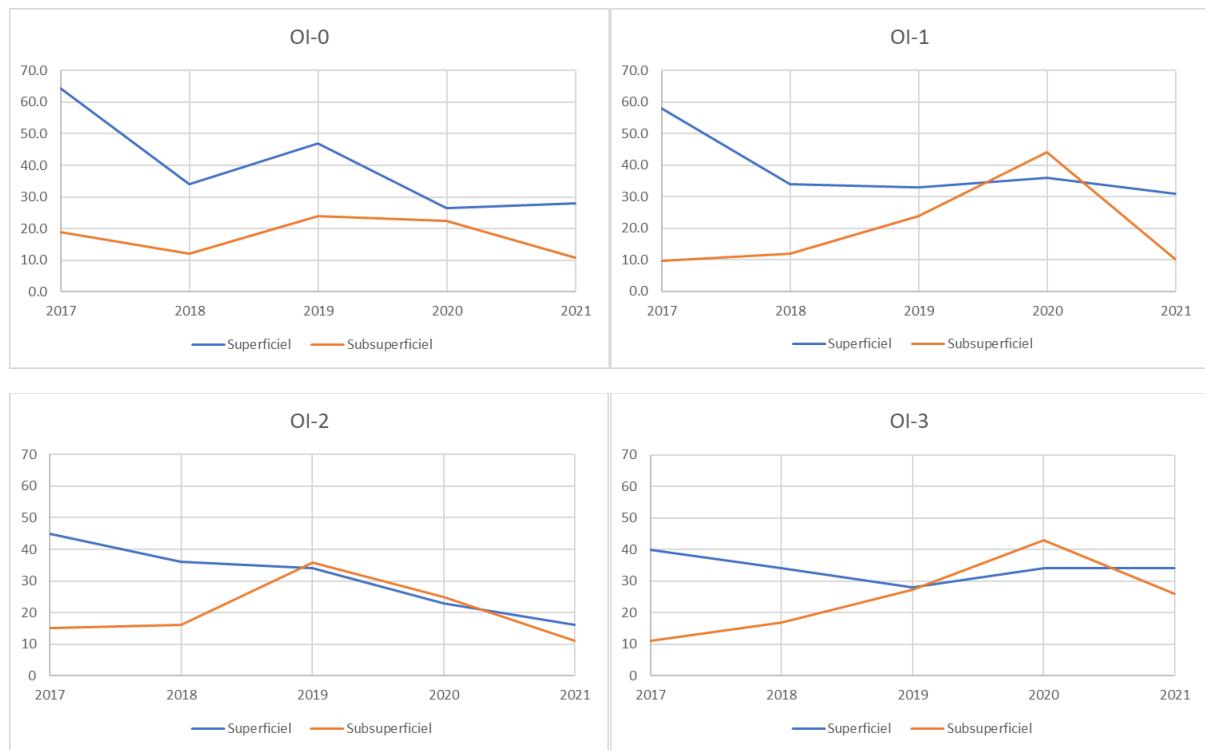


Figure 15: Evolution du D50 entre 2017 et 2021 obtenues avec l'échantillonnage granulométrique longitudinal pour les différentes barres sédimentaires

Les résultats des échantillonnages granulométriques de surface par cadre et subsuperficiels sont présentés Figure 16. Seul les résultats des barres OI-0 à OI-4 sont présents car les résultats 2021 des barres sédimentaires plus à l'aval n'ont pas encore été analysés.

On observe que les barres sédimentaires sont bien organisées en 2017, 2018 avec des sédiments superficiels de tailles supérieures aux sédiments situés en-dessous. En 2019, 2020, les sédiments superficiels sont de tailles inférieures à ceux situés en-dessous sauf pour la barre contrôle OI-0. Cela peut être expliqué par la libération des sédiments fins et des sédiments de petites tailles après la démolition du barrage d'Olloki. On observe ensuite en 2021 un retour du granuloclassement pour la plupart des barres sédimentaires.



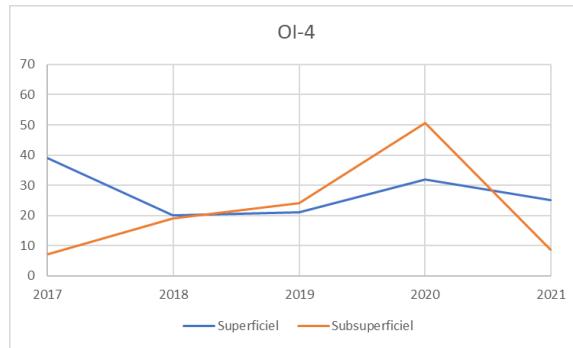


Figure 16: Echantillonnage granulométrique de surface par cadre pour les barres OI-0 à OI-4 de 2017 à 2021

4.1.2. Résultats de sections transversales réalisées

Les résultats de la section transversale OI 07 réalisée en 2021 n'étant pas encore disponibles, les résultats de 2017 à 2020 sont présentés Figure 17. On observe, une nette différence entre les années 2017, 2018 et 2019 et l'année 2020. Le fond du lit a baissé de 100 cm environ sur l'ensemble du lit. Cette baisse fait suite à l'arasement du barrage d'Olloki entre 2018 et 2019.

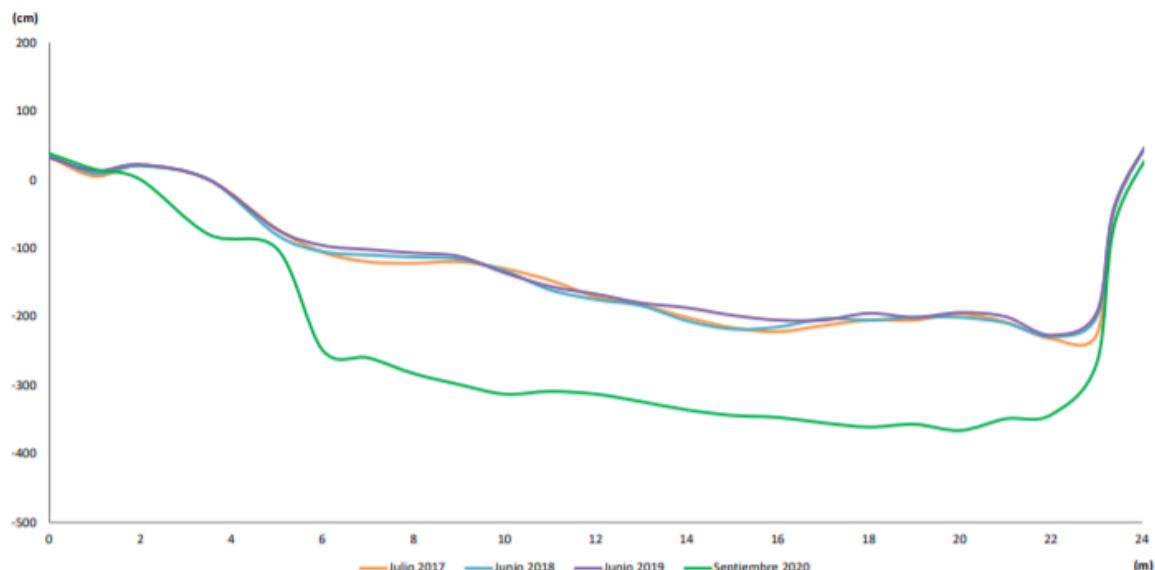


Figure 17: Section transversale OI 07 en 2017, 2018, 2019 et 2020

On peut également noter que la section réalisée en 2021 avait environ la même topographie qu'en 2020 avec peut-être une légère baisse du lit en rive gauche (à droite sur la courbe) et une hausse du lit de quelques centimètres entre 6 et 9 m de la rive droite (à gauche de la courbe). Cette légère hausse est due à l'accroissement de la barre à l'intrados du méandre, en rive droite. En rive gauche, à l'extrados du méandre on peut observer de l'érosion jusqu'à la roche mère.

4.1.3. Recherche de traceurs GPS

La recherche de traceurs dans le cours d'eau se poursuivait jusqu'à septembre les résultats 2021 ne sont pas encore connus.

Cependant après avoir sondé l'ensemble du cours d'eau et des barres sédimentaires de OI-0 à I-1. On peut déjà dire que 60% des traceurs trouvés à ce jour se situait dans la première partie proche des lieux de dépôts des traceurs. On note cependant que de plus en plus de traceurs sont rencontrés à

l'aval de l'ancien barrage d'Oolloki (Figure 18) depuis son arasement confirmant les premiers résultats obtenus en 2017 et 2018 (Ibáñez et García, 2019).

Dans l'ensemble, ils se trouvent dans les barres sédimentaires, dans les intrados de méandre et dans les tronçons larges où la vitesse de l'eau diminue favorisant le dépôt. Au contraire peu de traceurs ont été trouvés dans les extrados de méandres où le substrat principal est souvent la roche mère. Les mouilles où la profondeur ne permet pas l'accès n'ont pas pu être sondées mais il y a souvent peu de sédiments déposés donc peu de chances de trouver de traceurs. Peu de sédiments ont été trouvés sur le tronçon où était présent le barrage d'Oolloki car cette partie est très rectiligne avec une vitesse de courant élevé. La granulométrie des sédiments sur ce tronçon est souvent bien supérieure à celle dans laquelle les traceurs GPS ont été installés.

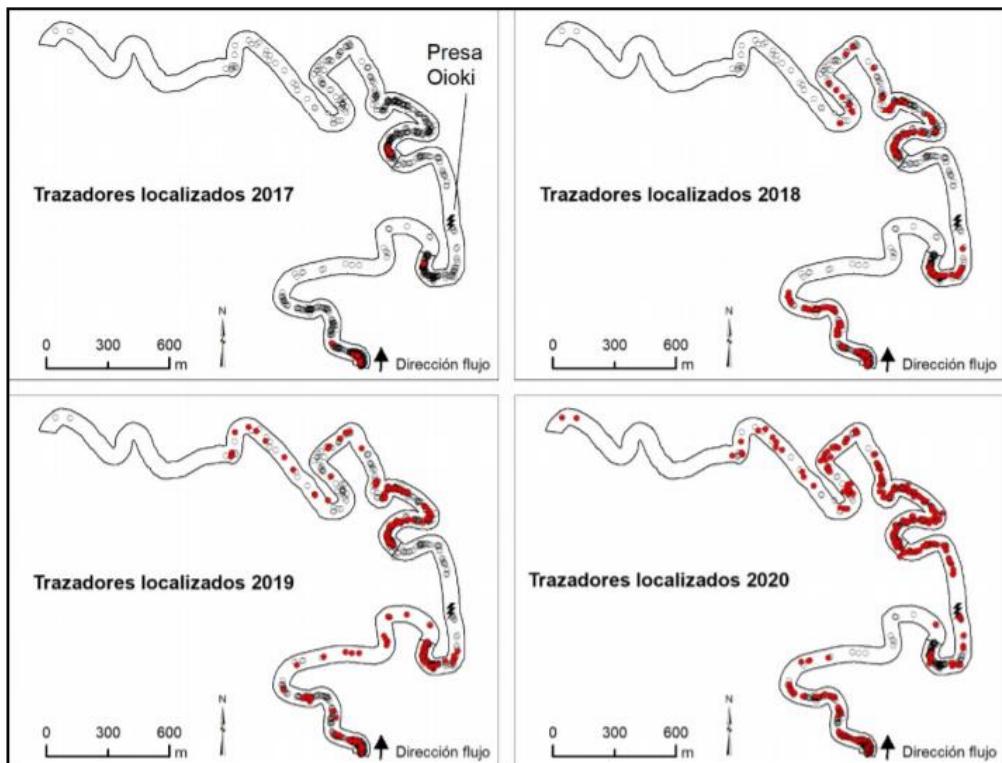


Figure 18: Localisation des traceurs sur la section d'étude d'Oolloki entre 2017 et 2020 (Universidad del País Vasco. Informe divulgativo trabajos de seguimiento de los cambios geomorfológicos en la cuenca de río Leitzaran tras las demoliciones de las presas de Inturia y Oolloki)

4.2. Etat des lieux et diagnostics de cours d'eau

4.2.1. Présentation des résultats de l'analyse cartographique sur la rivière Queiles

Peu de segments ont été modifiés sur la rivière Queiles depuis le milieu du XX^{ème} siècle. On note cependant 4 zones de méandres qui ont été coupées en zones agricoles et une modification importante du cours d'eau au niveau de la ville de Tudela avant la confluence avec l'Ebre (Figure 19). Il s'agit d'un enfouissement du Queiles pour que la rivière passe sous la ville.

Des recherches complémentaires ont été effectuées confirmant les observations. En 1969, la promenade de Pamplona a été construite au-dessus de la rivière (en rouge Figure 19). C'est pourquoi le cours d'eau était observable sur la vue aérienne de 1969 et ne l'était plus sur celle de 2000.

Vers 1989 la promenade du Queiles et la Plaza de los Fueros ont également été construites entraînant l'enfouissement du Queiles sur quasiment l'ensemble de la ville de Tudela.



Figure 19: Lit mineur de la rivière Queiles et ses principales changements depuis le milieu du XX^{ème} siècle

Au niveau de l'occupation du sol de la plaine d'inondation, on observe Figure 20 et Annexe 7, une répartition constante du pourcentage de sols occupés par les cultures 89%, les zones artificielles 5% et la végétation 6% entre 1945 et 1966. En 2000, les zones artificielles occupent 10% de la plaine d'inondation soit 5 points de plus qu'en 1966. La surface occupée par les cultures diminue passant à 83%.

En 2012, la tendance se poursuit avec des zones artificielles qui ont atteint 14% de la surface et des zones cultivées qui occupent 78% de la plaine d'inondation. On peut aussi noter que la végétation augmente légèrement entre 1966 et 2012 passant de 6% à 8%. En 2017 la répartition de l'occupation du sol de la plaine d'inondation est restée comme celle de 2012 .

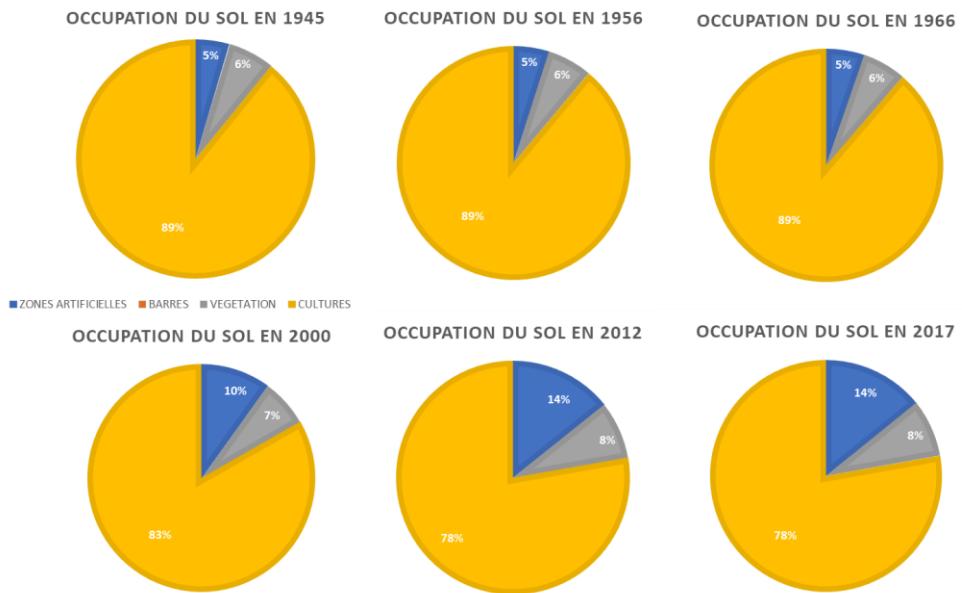


Figure 20: Pourcentage d'occupation du sol de la plaine d'inondation pour les catégories sélectionnées entre 1945 et 2017

Ce même travail a été réalisé sur la moitié Nord (Annexe 8) pour pouvoir comparer avec l'occupation du sol de 1927. Les résultats sont globalement similaires, on note cependant une diminution de l'occupation de la végétation entre 1927 et 1945 passant de 8% à 5%. De plus l'augmentation de la surface occupée par la végétation entre 1945 et 2017 est moins marquée sur la moitié Nord que sur l'ensemble de la zone étudiée avec des augmentations respectives de un point et deux points.

Les trois années, 1966, 2000 et 2012, montrant les principaux changements de l'occupation du sol sont présentés Figure 21, l'ensemble de la cartographie réalisé entre 1927 et 2017 est présenté Annexe 9. L'augmentation de la surface occupée par les zones artificielles dans la plaine d'inondation est surtout observable au niveau des villes et villages déjà existants. La ville de Tudela, située la plus au Nord, déjà d'une taille importante, double sa surface. C'est le cas également de Murchante et Cascante, respectivement du Nord au Sud, qui doublent aussi leur surface avec un étalement urbain important.

Les axes routiers sont également de tailles plus importantes en 2000 et 2017 par rapport à 1966. Une autoroute a même été construite entre 1966 et 2000 coupant perpendiculairement la rivière Queiles et la plaine d'inondation. Elle longe le canal de Lodosa sur ce secteur.

La végétation est également présente en rive du cours d'eau¹ constituant une ripisylve importante avec une continuité le long du Queiles sur l'ensemble de la zone d'étude. La surface de cette ripisylve est en augmentation entre 1966 et 2000 surtout dans le sud de la zone d'étude. (Figure 21).

¹ Figure 21, le cours d'eau n'a pas été représenté sur les cartes pour permettre de voir la ripisylve.

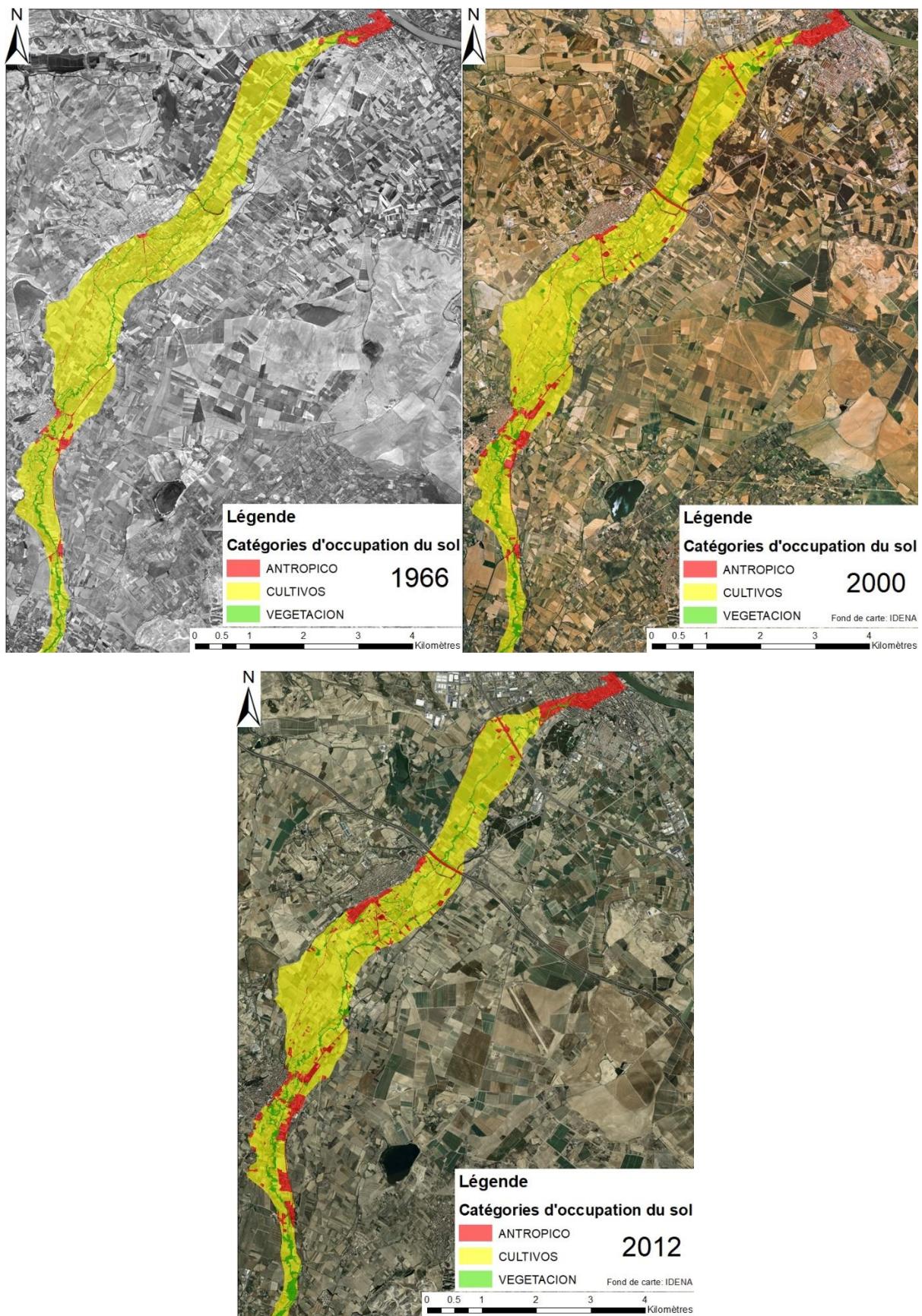


Figure 21: Cartes d'occupations du sol de la plaine d'inondation de la rivière Queiles en 1966, 2000 et 2012

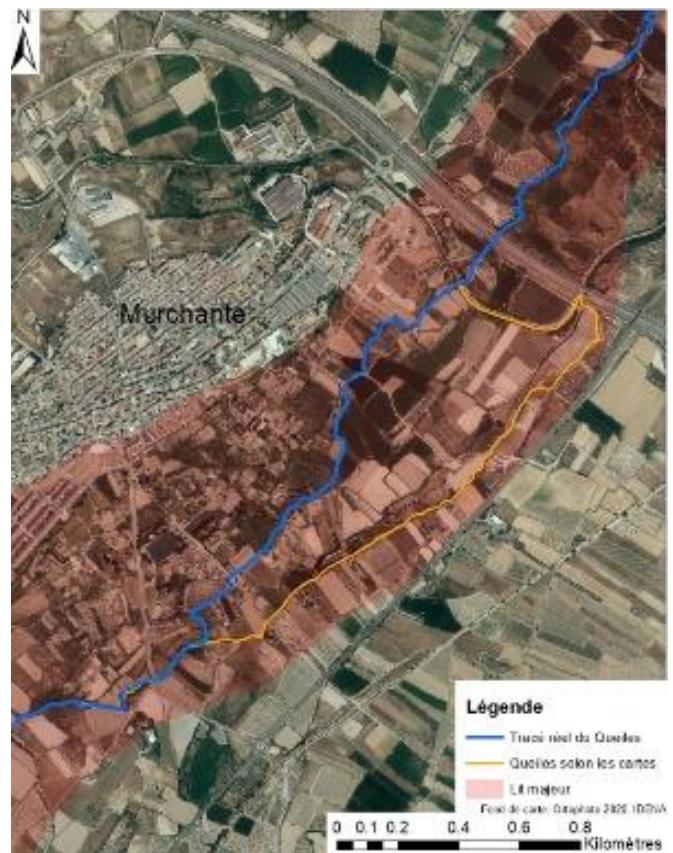
Pour compléter ces résultats, la journée terrain a été très importante. Elle nous a permis de voir un réseau de canaux d'irrigations agricoles non observable par vue aérienne sur une grande partie de la zone étudiée. La ripisylve a également été fortement modifiée avec des secteurs où les espèces invasives sont prédominantes, on a recensé principalement du bambou et des cannes. L'encaissement du cours d'eau sur certains tronçons a pu être constaté entraînant une déconnexion complète avec la plaine d'inondation majoritairement agricole (Figure 22).



Figure 22: Rivière Queiles entre Cascante et Tudela

De plus, cette journée a permis de mettre en évidence une erreur sur la quasi-totalité des cartes présentant la rivière Queiles. En effet, elles présentent le Queiles à la place d'un canal d'irrigation en dehors de la plaine d'irrigation et la faisant passer dans le canal de Lodosa sur un petit segment avant de rejoindre le lit naturel (Figure 23). En réalité, le Queiles passe bien au centre de la vallée (en bleu sur la carte Figure 23) et croise le canal en passant en-dessous.

Figure 23: Mise en évidence de l'erreur cartographique du tracé du Queiles



4.2.2. Etat des lieux et diagnostic de l'Urola et de ses affluents

4.2.2.1. L'Otaola

D'amont en aval, l'Otaola ne présentait pas les mêmes caractéristiques. A l'amont, de sa source à la fin des pentes raides les tronçons étaient globalement similaires avec de l'érosion latérale sur beaucoup de segments accompagnée de sédimentation sur la berge opposée. Le lit majeur était occupé essentiellement par des pins et des platanes. Un barrage était également présent, entraînant de la sédimentation à l'amont et de l'incision à l'aval de celui-ci. Deux tronçons étaient situés à proximité d'habitations avec des berges artificialisées et des parties du lit bétonnées. Globalement la partie amont de l'Otaola était peu altérée.

A l'aval de la fin des pentes raides à la confluence avec l'Urola, la rivière était très anthropisée avec la présence d'un village. Les berges étaient artificialisées et le lit était restreint par les murs de bâtiments. Des espèces invasives étaient présentes comme la Renouée du Japon *Fallopia japonica*. De nombreux rejets venant directement des habitations ont été recensés. Au niveau des processus géomorphologiques, de l'incision a été observé du fait de la présence de berges artificielles. Cette partie aval de l'Otaola était très altérée.

4.2.2.2. Le Narrondo

Le Narrondo, se situe lui aussi dans une zone urbaine pour sa moitié aval. L'état des lieux a commencé plus à l'amont que prévu pour ne pas prendre en compte la partie soumise aux marées. Des indices permettaient de voir jusqu'où cette influence des marées était présente. A l'aval, l'état des lieux s'arrêtait au niveau d'une montagne boisée où le cours d'eau commençait sous forme de cascade.

A l'aval deux fermes étaient présentes, de nombreux rejets d'eaux usées ont été constatés et de nombreuses berges étaient nues au niveau de parcelles agricoles.

Plus à l'aval, plusieurs tronçons avaient des aspects morphologiques intéressants avec de la sédimentation et de l'érosion mais la ripisylve était occupée par des espèces invasives, notamment *Crocosmia x crocosmiiflora* (Figure 24) et *Tradescantia fluminensis*.

La qualité de l'eau était plutôt mauvaise avec les nombreux rejets. De plus l'essentiel du cours d'eau longe l'autoroute AP-8. Le Narrondo la traverse ensuite par un tunnel de plus de 50 mètres de long. Ce tunnel avait peu de pente et entraînait une rupture par rapport aux tronçons amont et aval et un arrêt de la continuité sédimentaire.

Plus à l'aval la végétation rivulaire, composée essentiellement de frênes : *Fraxinus excelsior*, *Fraxinus angustifolia*, de cornouiller sanguin : *Cornus sanguinea*, a laissé sa place à de plus en plus de platanes fragilisant les berges.



Figure 24: Rivière Narrondo. Arroa Bekoa, Gipuzkoa

En arrivant dans la partie urbaine, l'ensemble du cours d'eau était très altéré, avec des tronçons sous-terrains, des parties du lits et des berges bétonnées et des rejets d'eaux usées.

V. Discussion

4.1. Suivi morphologique sur la rivière Leitzaran

Le suivi morphologique de la rivière Leitzaran a permis de bien voir l'évolution du cours d'eau pour regagner quasiment son tracé naturel. L'arasement du barrage d'Olloki en 2019 a entraîné de fortes modifications. Une évolution rapide a été observée sur l'ensemble du cours d'eau et certains tronçons ont totalement changé. Les mesures et observations réalisées en 2021 montrent encore de forts changements par rapport à 2020. La rivière Leitzaran est encore en transition pour regagner totalement ses caractéristiques naturelles. Il faudra sûrement encore deux ou trois ans avec des crues importantes pour permettre de regagner l'état initial du cours d'eau sur la plupart des tronçons.

Cependant, le seuil de Bertxin toujours présent à l'aval ne permettra pas de regagner totalement la continuité sédimentaire. Ce seuil marque une rupture importante de la continuité de la rivière et peu de traceurs GPS ont pour l'instant franchi ce seuil. Le cours d'eau ne pourra donc pas regagner l'ensemble de son tracé naturel.

Les sections transversales réalisées depuis le début du projet en 2013 permettent de bien observer l'évolution de la morphologie de la rivière Leitzaran après les différents arasements de barrages réalisés. On a ainsi pu observer une incision importante des tronçons situés à l'amont des barrages, dans la zone de retenue, où les dépôts fins ont été érodés jusqu'à un retour au lit naturel de la rivière. Le suivi granulométrique permet également de suivre la morphologie du cours d'eau en étudiant les barres sédimentaires et leurs évolutions par rapport à leurs localisations. Des barres ont ainsi été créées dans les zones de méandres à l'aval du barrage d'Olloki après sa démolition complète et des sédiments ont également été remobilisés à l'amont.

L'étude des traceurs GPS permet de préciser ces éléments en proposant une analyse du transport sédimentaire entre l'amont du barrage d'Olloki et l'aval du seuil de Bertxin qui est toujours en place. Cette étude permet de voir où les sédiments se déposent et d'étudier leurs déplacements annuels.

Plusieurs indices intéressants permettent également de montrer l'efficacité des arasements des deux barrages. En effet, à l'amont du barrage d'Inturia l'érosion des sédiments fins déposés dans l'ancienne retenue d'eau ont mis à jour des restes d'anciens arbres de la ripisylve (Figure 26). Sur ce tronçon, on peut donc dire que le cours d'eau a repris son tracé naturel.



Figure 25: Photographie d'un arbre de l'ancienne ripisylve et du niveau de la retenue d'eau sur la rivière Leitzaran à l'amont d'Inturia

De plus, en 2021, une forte colonisation des barres par les végétaux a pu être observée. Cette colonisation n'était pas autant présente lors des années précédentes ce qui peut traduire d'une certaine stabilisation du système. Cependant de nombreuses espèces invasives ont été observées. Plusieurs questions peuvent alors se poser : Ces espèces invasives ne sont-elles qu'une étape partielle dans le cycle de la colonisation ou vont-elles s'installer de façon permanente ? D'où viennent ces espèces invasives ? Vont-elles perturber le cycle de colonisation ? Répondre à ces questions pourraient être intéressant dans les années à venir pour permettre un suivi global de l'après arasement.

Cette étude a également permis de montrer que l'arasement par phase, en détruisant par partie sur plusieurs années, pouvait être intéressant (Ibisate et al. 2016) pour regagner plus rapidement l'état initial du cours d'eau. En effet, la première phase de destruction permet de libérer les sédiments fins et quelques sédiments de la charge de fond de petite taille. La seconde phase de destruction permet ensuite de libérer les sédiments grossiers. Cette libération progressive des sédiments permet de garder une logique de dépôt naturel en évacuant les sédiments fins en premier.

Pour compléter ce travail, des comparaisons de terrain sont effectuées directement en prenant des photos et ainsi voir l'évolution directement. Les mesures réalisées (sections transversales, analyses granulométriques et traceurs GPS) ne rendent pas toujours compte des modifications qui sont observables directement sur l'ensemble d'un tronçon par exemple. Ces photos permettent ainsi de mettre en valeur l'efficacité du retour à l'état naturel du cours d'eau en s'appuyant également sur les différentes mesures réalisées. De grosses modifications ont ainsi été observées lors de la campagne 2021 faisant suite à l'arasement du barrage d'Olloki en 2019.

Certaines limites existent cependant. Au niveau des traceurs GPS tous ne sont pas retrouvés. Certaines zones du cours d'eau sont trop profondes ou d'autres sont inaccessibles avec des obstacles. De plus les recherches se font manuellement et l'opérateur peut passer à côté. Les erreurs peuvent être faites dans les rapides notamment.

Pour les analyses granulométriques, le choix de l'emplacement du cadre peut être source de changement de résultats. En effet, certaines barres sédimentaires ne sont pas homogènes.

4.2. Etat des lieux et diagnostics de cours d'eau

4.2.1. Etat des lieux d'un affluent de l'Ebre: la rivière Queiles

Globalement, la rivière Queiles a subi peu de modifications de son tracé depuis 1945 et même depuis 1927 pour la moitié Nord étudiée par rapport à d'autres affluents comme l'Alhama (Diagnóstico del río Alhama). Ce dernier était un cours d'eau en tresse et son lit a fortement été réduit au profit de zones agricoles. Pour la rivière Queiles, il s'agit de modifications plus anciennes. Ce territoire est occupé depuis très longtemps et l'Homme a fortement modifié le réseau hydraulique au profit de l'irrigation de ses cultures comme peut le montrer des cartographies anciennes du XVIII^{ème} siècle recensant de nombreux barrages, seuils et canaux (Annexe 10).

De plus, cette anthropisation de la zone s'est accentuée depuis les années 60. La comparaison diachronique de l'occupation du sol permet de voir une augmentation des zones artificielles dans le lit majeur du Queiles entre 1966 et 2012. Il sera intéressant de voir lors de l'état des lieux si ces nouvelles zones urbaines impactent directement le cours d'eau. Entre 2012 et 2017 la tendance s'est stabilisée, il sera également intéressant de voir l'occupation du sol dans les prochaines années et de comparer à 2017 pour voir si cette stabilisation de la répartition du sol dans le lit majeur est durable.

Une augmentation légère de la surface occupée par la végétation a été constatée depuis 1966. C'est essentiellement la surface occupée par la ripisylve qui a augmenté dans le sud de la zone d'étude. C'est

un élément intéressant mais il est possible que cette augmentation soit due aux espèces envahissantes qui ont été observées lors de la journée terrain. L'état des lieux devra donc insister sur cet aspect pour vérifier la part d'occupation d'espèces végétales envahissantes dans la ripisylve.

Pour finir, le réseaux hydraulique complexe dû aux nombreux canaux d'irrigation (Figure 27) pourra être étudié pour comprendre son impact sur l'état hydromorphologique de la rivière Queiles.



Figure 26: Canaux d'irrigation passant au-dessus du canal de Lodoso à proximité de la rivière Queiles

4.2.2. Etat des lieux et diagnostic de deux affluents de l'Urola

A l'aval de ces deux affluents, des mêmes caractéristiques de zones urbaines denses avec beaucoup d'artificialisation et d'impacts anthropiques directs sur le cours d'eau ont pu être observé. Ces observations sont plutôt générales à toute la province du Gipuzkoa. En effet, la province possède de nombreux reliefs et ce sont donc les vallées principales qui abritent l'essentiel de la population. De plus, c'est une province avec une population et une activité importante, il y a donc une densité importante dans les vallées. L'aval des affluents est donc soumis à ces pressions importantes.

Plus à l'amont, les deux cours d'eau sont très différents du point de vue des pressions anthropiques et de la morphologie. La qualité hydromorphologique résultante sera donc différente.

L'Otaola, à l'amont, a une bonne dynamique morphologique avec des zones de dépôts et d'érosion de berges et il est globalement peu soumis aux impacts anthropiques. Cependant, la présence de nombreux platanes et pins non indigènes a remplacé la végétation rivulaire typique de ce genre de cours d'eau de moyenne montagne. De plus les pins sont utilisés en sylviculture et des dégradations importantes sont parfois constatées à cause des engins.

Le Narrondo, était globalement plus altéré dans son ensemble. L'amont était fortement modifié par la présence de fermes sur les rives et par l'autoroute en rive gauche sur la moitié de son tracé. A l'aval, une zone urbaine entraîne de nombreuses pressions sur la morphologie et la qualité de l'eau.

L'état hydromorphologique de ces deux affluents sera donc différent à l'aval et à l'amont suivant les tronçons avec des têtes de bassins de bonne qualité pour l'Otaola et de moyenne à mauvaise qualité pour le Narrondo. L'aval de ces deux cours d'eau sera lui de mauvais à très mauvais.

VI. Conclusion

Ce stage était très enrichissant, plusieurs projets ont été réalisés mais à différents stades ce qui m'a permis de faire de la cartographie comme avec le Queiles où de faire des diagnostics de cours d'eau comme sur les deux affluents de l'Urola : l'Otaola et le Narrondo. Le projet de Leitzaran avec le suivi morphologique des deux barrages arrasés était également très intéressant. Il était très complet et m'a permis de compléter ou d'approfondir des notions vues et appliquées en IMA comme l'utilisation de sections transversales ou des notions vues théoriquement en cours comme l'analyse granulométrique avec le tamisage.

Plus généralement dans l'ensemble de mon stage j'ai pu développer et appliquer les compétences et les connaissances vues en 4A, notamment tous les processus géomorphologiques, leurs relations avec l'hydraulique. Le Tech bio m'a également permis d'identifier les espèces présentes, ce qui est très important pour les diagnostics de cours d'eau. Parallèlement, le stage m'a permis de consolider les connaissances du Tech bio (acquises à distance essentiellement du fait du contexte sanitaire) en faisant des observations au plus près des rivières. De plus, avec le stage j'ai pu développer certaines compétences déjà utilisées lors du chantier école comme la cartographie avec l'utilisation d'ortophotos notamment, mais aussi les parties terrains et même l'autonomie.

Ce stage m'a également permis de découvrir une région, avec des rivières principalement de montagnes bien différentes des cours d'eau que j'ai pu étudier jusque-là dans le bassin hydrographique de la Loire. Des comparaisons se font également naturellement entre le bassin versant de la Loire et celui de l'Ebre que j'ai pu observer lors de plusieurs missions et sorties (Annexe I) à travers l'occupation du lit majeur et le lit mineur de plus en plus restreint.

Le stage a également été l'occasion de découvrir de nouvelles méthodologies, pour les analyses granulométriques de la rivière Leitzaran ou pour les diagnostics de cours d'eau des affluents de l'Urola.

De plus, faire son stage dans un pays étranger mais européen permet de voir et comparer l'organisation et le fonctionnement des institutions pour financer et réaliser des projets permettant d'atteindre les mêmes objectifs fixés par la DCE. J'ai pu observer par exemple l'importance en Espagne des communautés autonomes et même des provinces pour le País Vasco pour financer les projets d'études de cours d'eau. J'ai également pu voir la similarité entre les données proposées et rendues disponibles en France et en Espagne aux différentes échelles : nationale, régionale et départementale/provinciale. J'ai également constaté le rôle du bassin hydrographique en Espagne par celui de l'Ebre, le CHEbro (Confederación Hydrográfica del Ebro).

Ce stage de 4^{ème} année s'est vraiment inscrit dans ma formation d'Ingénierie des Milieux Aquatiques en me permettant d'approfondir et de compléter les notions de géomorphologie mais également l'ensemble des thématiques de l'eau comme la biodiversité aquatique ou l'hydraulique. De plus, l'étude d'arasement de barrages est un élément très intéressant pour mon parcours. En effet, je souhaiterais travailler dans la restauration de cours d'eau et milieux aquatiques et je pense que le fait d'avoir étudié l'impact d'un ouvrage transversal et les changements morphologiques résultant d'un arasement pour retrouver son cours naturel me permettra d'avoir des connaissances intéressantes.

De plus, la réalisation du stage en espagnol et le fait de vivre plus de trois mois en Espagne m'a permis d'améliorer mon niveau d'espagnol ce qui peut être intéressant en complément de l'anglais.

Bibliographie

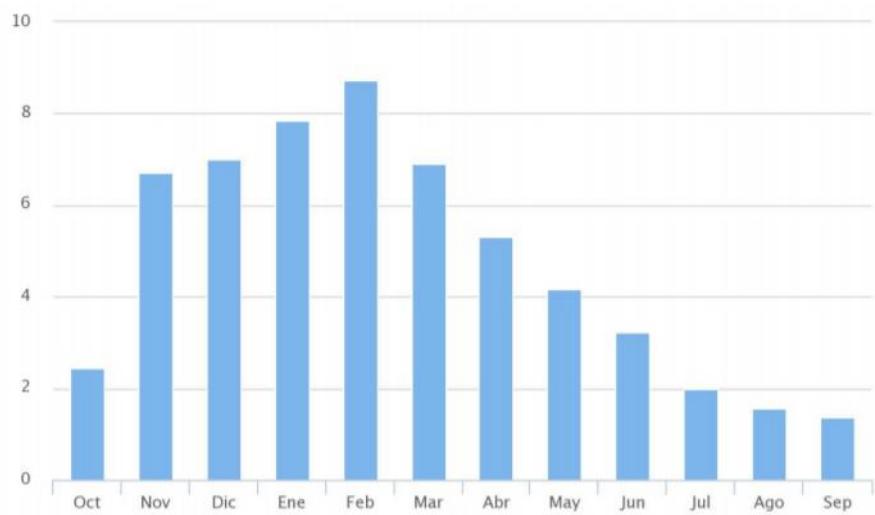
- Horacio, Jesús, Alfredo Ollero, Iván Noguera, et Víctor Fernández-Pasquier. 2019. « Flooding, Channel Dynamics and Transverse Infrastructure: A Challenge for Middle Ebro River Management ». *Journal of Maps* 15 (2): 310-19. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1592719>.
- Ibisate, Asko, Alfredo Ollero, Daniel Ballarín, Jesús Horacio, Daniel Mora, Amaia Mesanza, Carles Ferrer-Boix, Vanesa Acín, David Granado, et Juan Pedro Martín-Vide. 2016. « Geomorphic Monitoring and Response to Two Dam Removals: Rivers Urumea and Leitzaran (Basque Country, Spain): Geomorphic Monitoring and Response to Two Dam Removals ». *Earth Surface Processes and Landforms* 41 (15): 2239-55. <https://doi.org/10.1002/esp.4023>.
- Ibisate González de Matauco, et Horacio García. 2019. « Seguimiento del caudal sólido en el río Leitzaran (Gipuzkoa) e implicaciones para la restauración fluvial », 8.
- Ibisate González de Matauco. Asko, Sáenz de Olazagoitia Blanco. Ana, Ortiz Martínez de Lahidalga. Josu. "Diagnóstico del estado hidromorfológico de los tramos navarros del río Alhama"
- Ollero, A., J.H. García, A. Ibisate, et M. Sánchez-Fabre. 2020. « Updated Knowledge on Floods and Risk Management in the Middle Ebro River: The “Anthropocene” Context and River Resilience ». *Cuadernos de Investigación Geográfica*, novembre. <https://doi.org/10.18172/cig.4730>.
- Universidad del País Vasco. Informe divulgativo trabajos de seguimiento de los cambios geomorfológicos en la cuenca de río Leitzaran tras las demoliciones de las presas de Inturia y Olloki D1.LIFE14NAT/ES/000186 IREKIBAI
- Vera, Miguel Ángel García, Rogelio Galván Plaza, et José Ángel Losada García. 2017. « La gestion de l'eau dans le bassin de l'Èbre : évolution, planification et défis ». *Sud-Ouest européen. Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, n° 44 (décembre): 55-69. <https://doi.org/10.4000/soe.3281>.

Annexes

Annexe 1: Tableau recensant les missions secondaires réalisées

Type	Lieu	Objectifs	Principales observations
Sortie universitaire	Rivière Aragón, l'affluent principal de l'Ebre, entre Carcastillo et Funes (Navarre)	Observations du fonctionnement et des processus géomorphologiques du bassin versant de l'Ebre. Visite de sites de restauration	Lit mineur réduit dû à l'occupation du sol de la plaine d'inondation, utilisation de buses. Barrages, canal de déviation pour centrales hydroélectrique.
Relevés de données de plaques de pressions sur un cours d'eau non permanent	Entrée des Bardenas Reales, proche de Tudela (Navarre)	Voir le fonctionnement de plaques d'impacts sur un cours d'eau non permanent. Observations du lit du cours d'eau	Utilisations des plaques d'impacts intéressantes dans ce type de cours d'eau pour permettre de savoir quand il y a de l'eau et quel est le transport sédimentaire.
Observation d'un tronçon de l'Ebre	L'Ebre à Castejón (Navarre)	Observation des problématiques de l'Ebre et de son lit majeur	Lit mineur réduit. Zone semi-désertique où les plaines d'inondations sont exploitées par de nombreuses cultures utilisant l'eau de la nappe d'accompagnement. Problématique d'inondation dans la zone.
Tamisage granulométrique d'un carottage de 10 mètres	Carottage venant de Cariñena (Aragon)	Séparer les différents niveaux de sédimentation, analyser la granulométrie de chaque niveau et l'altération des sédiments	

Annexe 2: Débit moyen mensuel mesuré sur la rivière Leitzaran entre 1995 et 2018 (m³/s). (Informe 2020 Ireakibai ; source : conseil provincial du Gipuzkoa)



Annexe 3: Climats du bassin versant de l'Ebre (Vera, Plaza, et García 2017)



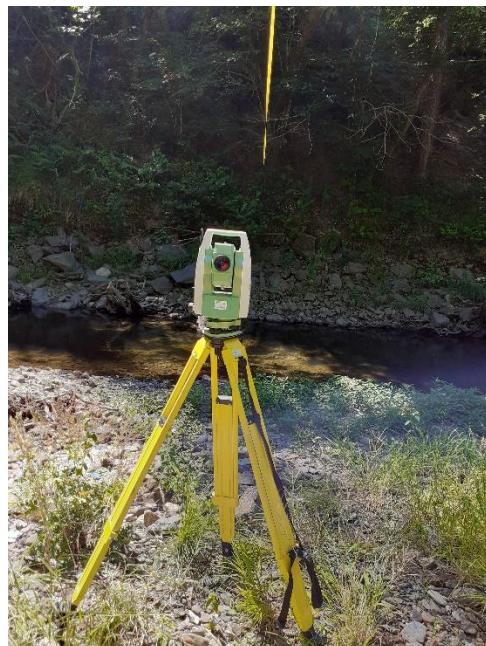
Annexe 4: Tamiseuse granulométrique



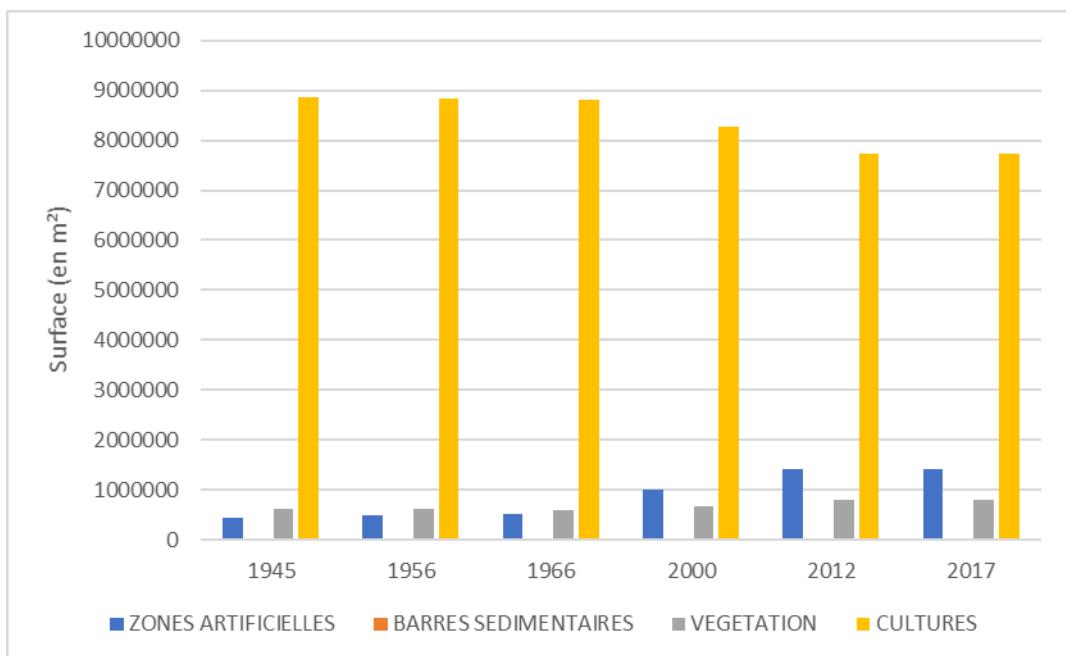
Annexe 5: Traceurs GPS avec et sans protection



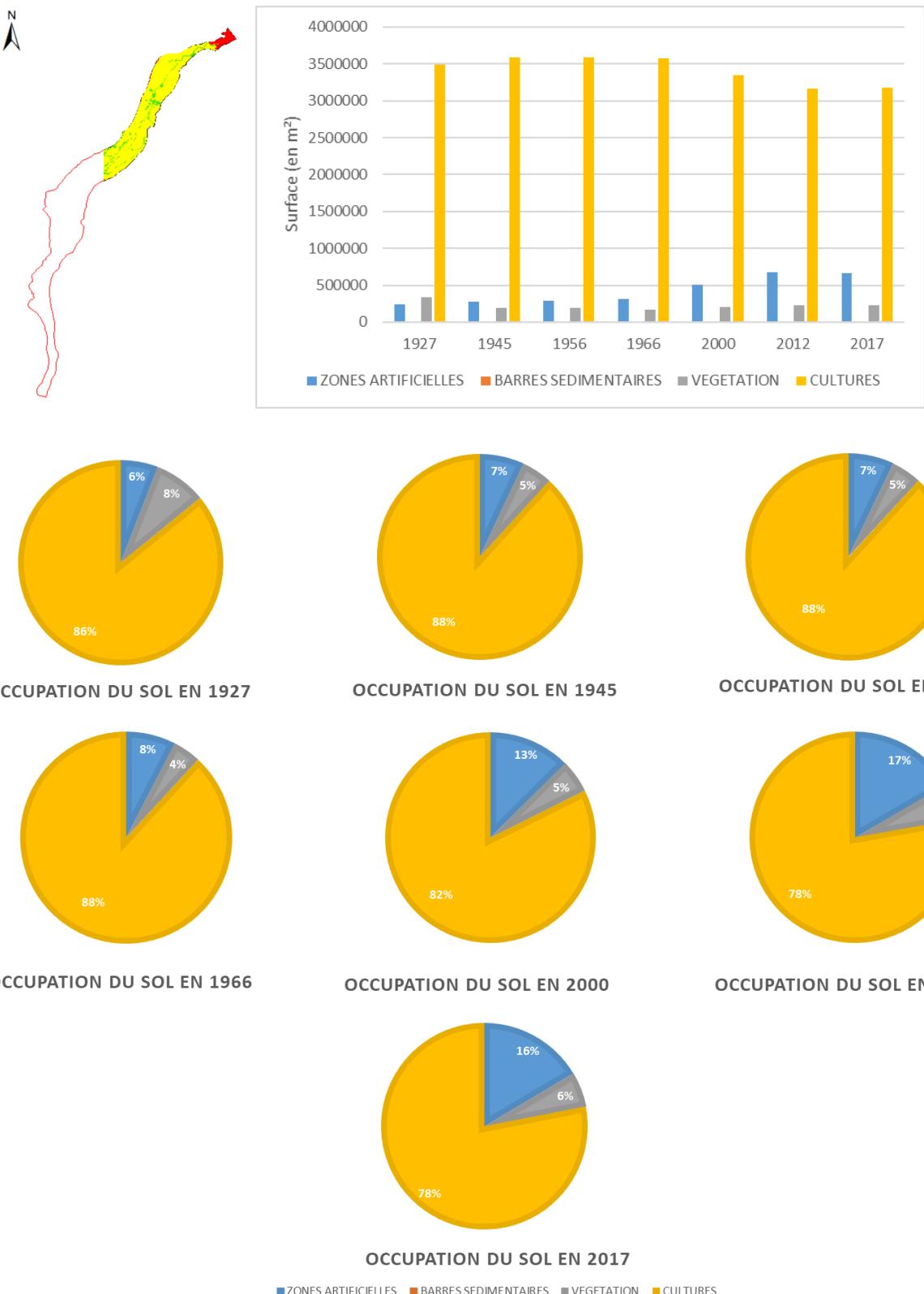
Annexe 6: Utilisation d'un théodolite pour réaliser une coupe transversale de la rivière Leitzaran



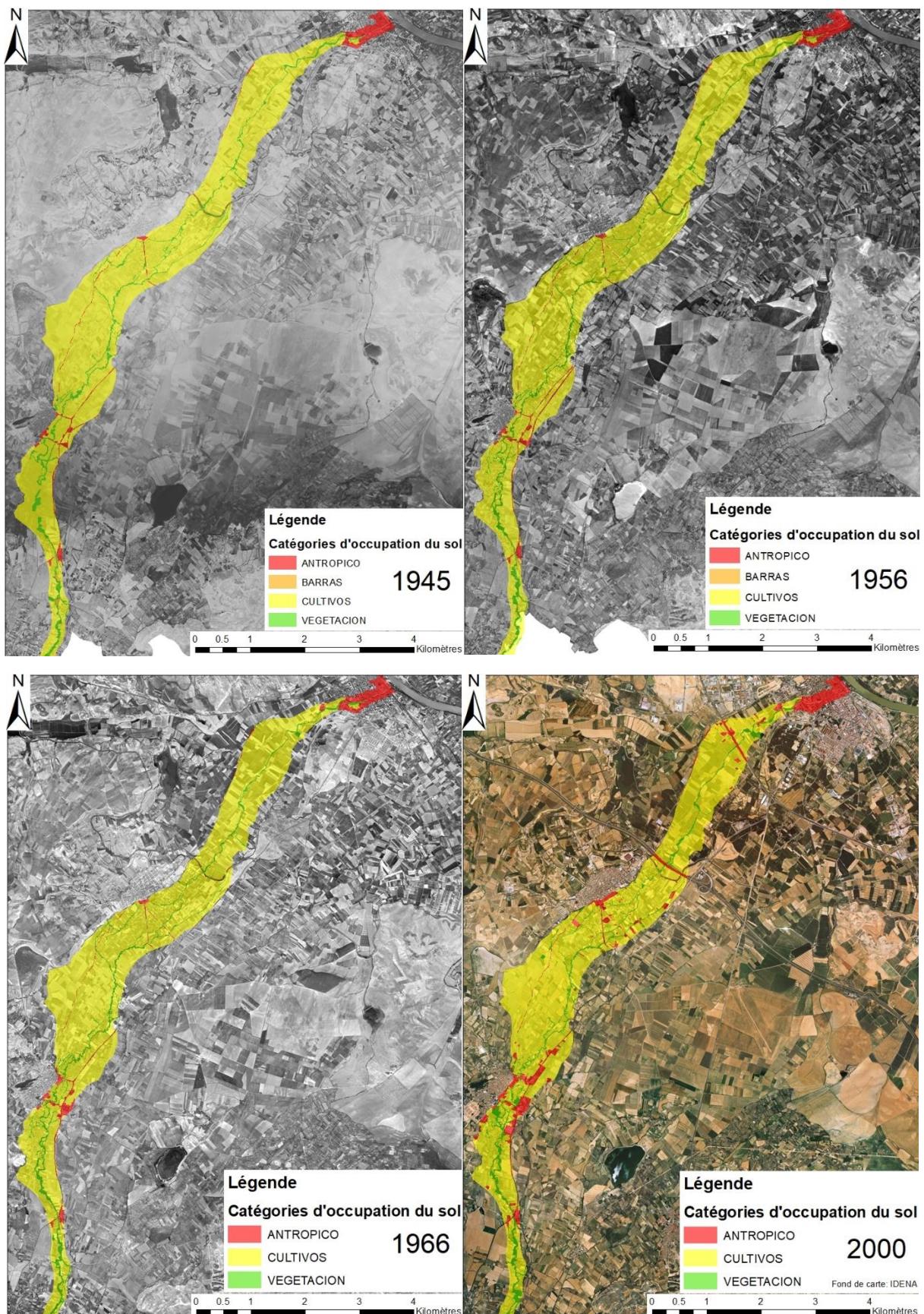
Annexe 7: Surfaces occupées par les différentes catégories de sols sur la plaine d'inondation entre 1945 et 2017

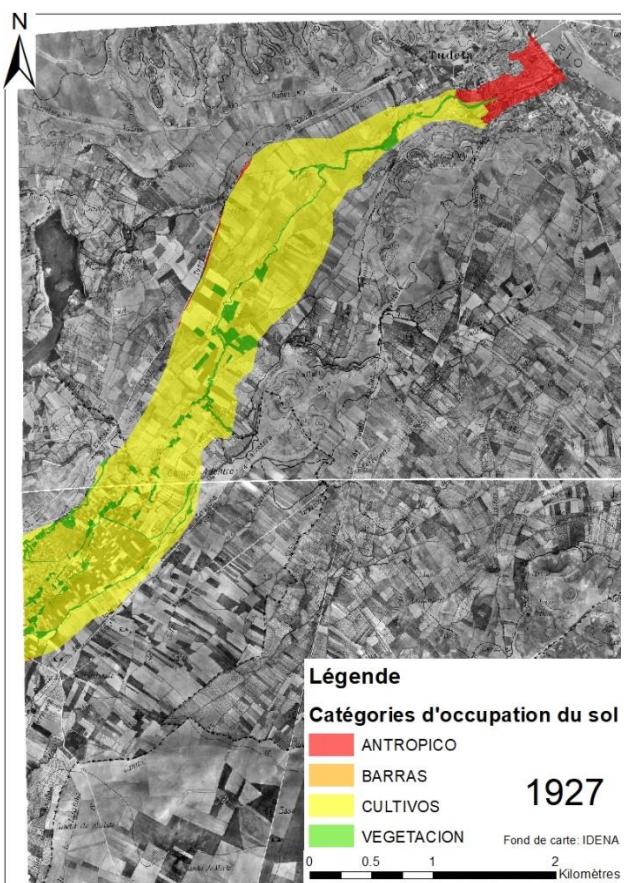
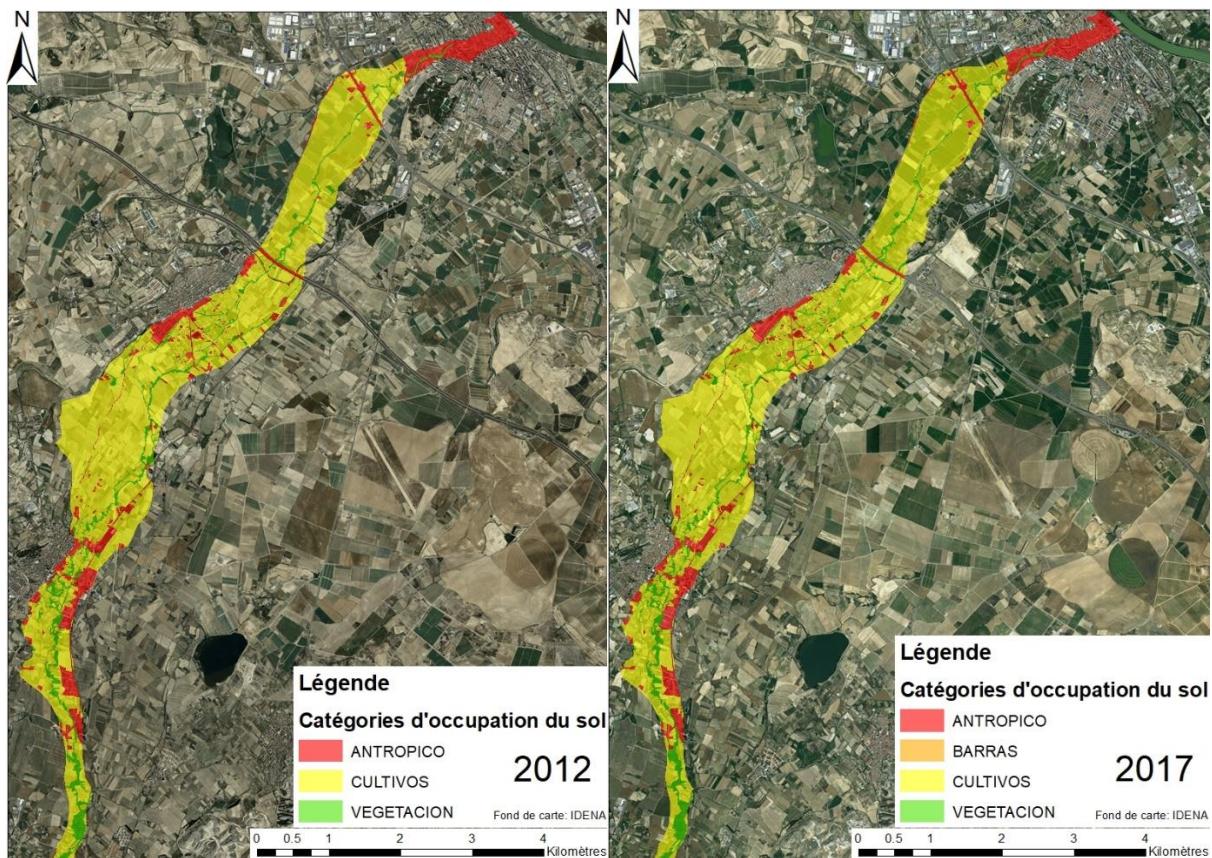


Annexe 8: Evolution de l'occupation du sol entre 1927 et 2017 sur la moitié Nord de la zone d'étude



Annexe 9: Cartes d'occupations du sol de la plaine d'inondation de la rivière Queiles





Annexe 10: Carte du Queiles et de son état hydraulique depuis son entrée en Navarre jusqu'à Tudela. 1792 (Archives de Navarre)



Mathieu Rambaud
2020-2021

Titre : Géomorphologie fluviale et restauration de rivières

Résumé : Deux barrages ont été arrasés sur la rivière Leitzaran, un suivi géomorphologique par échantillonnage de barre sédimentaire et par l'utilisation de traceurs GPS est réalisé pour pouvoir suivre le retour du cours d'eau à son état initial.

Un diagnostic hydrogéomorphologique est réalisé sur l'Urola et ses affluents. Deux ont été étudiés lors de ce stage : Le Narrondo et l'Otaola. Les processus géomorphologique et les impacts anthropiques sont étudiés pour permettre de définir l'état des tronçons de ces cours d'eau.

Une cartographie de la rivière Queiles entre son entrée en Navarre et sa confluence avec l'Ebre a été faite pour permettre de voir l'évolution du cours d'eau et de sa plaine d'inondation entre le milieu du XX^{ème} siècle et aujourd'hui.

Mots Clés : géomorphologie, restauration, arasement, barrage, granulométrie, traceurs, diagnostics hydromorphologiques

Universidad del País Vasco :
Tomás y Valiente 01006 Vitoria-Gasteiz ESPAGNE

Tuteur entreprise :
Askoa Ibisate
Enseignante chercheuse en géographie physique

Tuteur académique :
Stéphane Rodrigues