



Section Hydrologie, Hydrogéologie

Cartographie de l'aléa inondation - Rivière : Ahonu -

Modélisation - Rapport d'étude

Version Finale 08

Référence

20230205-HY-F1

MAPA n°5029/MSF/DCA du 17 juillet 2023

Cartographie de l'aléa inondation - Lot. 1 - Rivière : Fautaua, Nahoata, Ahonu

Commanditaire

Direction de la Construction et de l'aménagement (DCA)

Ministre des Solidarités et du Logement, en charge de l'aménagement, de la famille et des personnes non autonomes

Vai-Natura SARL

BP. 1003 - 98713 Papeete - Tahiti

Polynésie française

N° RC 11 178 B

N° Tahiti 988550

Phone +689 87 29 16 68

Fax +689 40 66 19 32

www.vai-natura.com

contact@vai-natura.com

Vai-Natura SARL

Cartographie de l'aléa inondation - Rivière Ahonu -



Informations relatives au document

Informations générales

Version	v07
Référence	20230205-HY-AHO
Ile	Tahiti
Commune	Mahina
Rivière	Ahonu
But de la demande	Cartographie de l'aléa inondation pour la rivière de l'Ahonu

Historique des modifications

Version	Date	Rédaction / Vérification	Fonction
v01	juin-2024	Nicolas DUBOIS Matthieu Aureau	Technicien Hydrologue
v02	septembre-2024	Matthieu Aureau	Hydrologue
v03	septembre-2024	Matthieu Aureau	Hydrologue
v04	novembre-2024	Matthieu Aureau	Hydrologue
v05	novembre -2024	Matthieu Aureau	Hydrologue
v06	décembre -2024	Matthieu Aureau	Hydrologue
v07	janvier -2025	Matthieu Aureau	Hydrologue
v08	février -2025	Matthieu Aureau	Hydrologue

Demandeur

Organisme/Nom	Contact
DCA	Rauhere Gerst

Sommaire

1. Présentation	5
1.1. Contexte.....	5
1.2. Enjeux	7
1.3. Rappels généraux.....	7
2. Etat des lieux contextuels	10
2.1. Toponymie	10
2.2. Géographie et morphologie.....	10
2.3. Topographie.....	12
2.4. Occupation humaine.....	13
2.5. Hydromorphologie et aménagement	14
2.5.1. Analyse historique	14
2.5.2. Historique inondations et témoignages.....	16
2.5.3. Diagnostic du cours d'eau	17
3. Modélisation hydraulique	27
3.1. Stratégie de modélisation.....	27
3.2. Etendu et maillage du modèle.....	28
3.3. Rugosité du terrain	31
3.4. Hydrologie.....	33
3.4.1. Hydrométrie	33
3.4.2. Affluents	34
3.5. Modélisation des ponts et simulation d'embâcles.....	36
3.6. Scénarios des simulations.....	38
4. Résultats de la modélisation	39
4.1. Ecoulement et débordement	39
4.1.1. Section 1	40
4.1.2. Section 2	42
4.1.3. Section 3	43
4.2. Cartographie de l'aléa inondation	44
4.3. Interprétation des résultats.....	47

5. Proposition d'aménagement	49
5.1. Diagnostic global.....	49
5.2. Aménagements ciblés.....	52
5.3. Entretien des berges et des abords du cours d'eau	57
6. Conclusion	58
7. Bibliographie.....	59
8. Annexes.....	61
8.1. Modélisation hydraulique en rivière - Principes théoriques	61
8.1.1. Description	61
8.1.2. Modèle 1D ou 2D.....	63
8.1.3. Régimes transitoire et permanent.	64
8.1.4. Données d'entrée.....	65
8.1.5. Calage du modèle.....	65
8.2. Conditions des relevés topographiques	66
8.2.1. Profils en travers (Cross Section).....	66
8.2.2. Courbes, rétrécissement, élargissement.....	67
8.2.3. Ouvrages.....	67
8.3. Abaque des coefficients de rugosité de Manning (Chow, 1959).....	69
8.4. Photographie de la rivière de l'Ahonu en novembre 2023	72
8.4.1. Section 1	72
8.4.2. Section 2	75
8.4.3. Section 3	77
8.5. Evolution de l'emprise de la rivière de l'Ahonu depuis 1978	79

1. Présentation

1.1. Contexte

Tahiti est la plus grande île de la Polynésie française, c'est aussi la plus urbanisée. Sa topographie très accidentée, avec des bassins versants peu étendus et un climat tropical humide expliquent le caractère très torrentiel de l'écoulement de ses cours d'eau. Les débits d'étiage, ou même les débits de base, sont faibles la plus grande partie de l'année, mais lorsque des événements pluvieux très intenses surviennent, les débits augmentent très significativement. Lorsque la pente est forte, la vitesse de l'eau est importante et l'écoulement se contient dans le lit des cours d'eau. Mais en arrivant dans les zones de plaines, où l'inclinaison est plus faible, le courant diminue favorisant une augmentation de la hauteur d'eau et les risques de débordement. A proximité des embouchures, les pentes longitudinales des lits sont presque planes, et mécaniquement les risques de submersion sont accentués.

Les plaines sont également les espaces les plus occupés par les activités humaines. Ces zones sont fortement urbanisées notamment dans la ceinture Nord de l'île de la commune de Puna'auia sur la côte Ouest, à celle de Mahina sur le versant Est de l'île. Au cours du temps, les constructions et le développement de la voirie ont pris de la place sur les espaces d'écoulement et les zones de débordement « naturelles ». Les cours d'eau ont été redessinés, certains exutoires ont été déplacés, les lits ont été contraints entre des berges souvent artificialisées. Ces aménagements « hydrauliques » ont réduit l'espace dédié aux rivières, les débordements se sont accentués, mais surtout les enjeux se sont largement accrus. La forte présence humaine à proximité des berges a entraîné des situations parfois dramatiques pour les riverains et toutes les activités aux alentours.

La modélisation des cours d'eau avec des scénarios de crues rares, à très rares, permet de projeter les impacts de fortes inondations et de déployer une stratégie de mise en protection des biens et des personnes dans le cadre du Plan de Prévention des Risques (PPR). Ce travail doit prendre en compte les évolutions de l'urbanisation et les modifications environnementales pour garantir une gestion efficace des situations d'urgence et développer la meilleure prévention face au risque inondation.

Dans ce contexte, la Direction de la Construction et de l'Aménagement (DCA) à travers la Cellule Etudes et Conseils en Aménagement (CECA), encadre une mise à jour de la cartographie de l'aléa inondation sur 10 cours d'eau de Tahiti.

La rivière d'Ahonu, qui fait partie de ce programme, se trouve sur la commune de Mahina au Nord de l'île de Tahiti. Elle s'étend sur près de 13.1 km à travers un bassin versant de forme oblongue qui couvre une surface de 1 432 ha. La zone de basse vallée est urbanisée avec de nombreuses habitations et des infrastructures collectives. La topographie est plane à proximité de l'embouchure, la rivière peut déborder lors d'événements météorologiques particulièrement intenses. Le risque inondation est important.

Une étude s'appuyant sur des modélisations hydrauliques a été réalisées en 2012 (EGIS). La crue la plus importante qui a été enregistrée, entre le 19 et le 20 décembre 1998, constitue l'événement hydrologique majeur de la période 1972-2003.

Notre étude réalisée en 2024 doit permettre de mettre à jour les projections de l'aléa inondation en s'appuyant sur des données plus précises avec notamment les résultats d'une campagne LIDAR datant de 2020 et de nouveaux relevés topographiques réalisés en 2024.

Face au dérèglement climatique en cours, un scénario s'appuyant sur des données prévisionnelles est également testé avec une estimation d'une montée du niveau de la mer de 0.73 m, correspondant à la prévision médiane du GIEC¹ (SSP2-4.5, 2021).

--

Ce rapport débute par une revue du contexte général de la vallée d'Ahonu, ses caractéristiques physiques (géographie, topographie, géologie, ...), l'occupation anthropique de la basse vallée et de la zone de plaine. Un regard est également porté sur l'évolution de la rivière et de son tracé depuis les années 1950. Nous présentons aussi un inventaire hydromorphologique du lit de la rivière dans son état actuel sur 3.2 km à partir de son embouchure.

La seconde partie de ce document précise la stratégie de modélisation hydraulique mise en œuvre en discutant les choix techniques réalisés et les estimations des paramètres d'entrée.

Les résultats de la modélisation sont ensuite présentés et analysés en s'appuyant sur plusieurs scénarios de crue (Q_{10} , Q_{50} , Q_{100}), en simulant des embâcles sous les ouvrages traversants les plus à risque, et en intégrant enfin une montée du niveau de l'eau le long de la frange côtière. L'objectif est d'élaborer une nouvelle carte de projection du risque inondation qui pourra être utilisée dans le cadre du Plan de Prévention des Risques avec comme ligne conductrice la mise en sécurité des biens et des personnes.

La dernière partie de ce rapport récapitule les points de fragilité hydraulique dans le lit de la rivière qui mènent aux débordements avant de présenter des recommandations d'aménagements et d'occupation pour améliorer la résilience de la rivière, et des alentours, face au risque d'inondation.

¹ Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

1.2. Enjeux

Plusieurs études hydrologiques et hydrauliques ont déjà été réalisées sur la rivière Ahonu, généralement dans le cadre de la projection de l'aléa inondation (Danloux, 2003 ; EGIS, 2012). De nombreuses inondations sont référencées dans la littérature grise ou dans la presse (mars 1968, avril 1983 avec le cyclone *Veena*, décembre 1998, janvier 2017 et février 2024). Les dégâts engendrés par ces épisodes parfois dramatiques ont poussé les pouvoirs publics à réagir pour limiter les débordements et protéger les habitations et leurs occupants.

Les réponses ont été essentiellement hydrauliques en cherchant à améliorer l'espace d'écoulement du lit et en consolidant les berges. De nombreux travaux de génie civil ont ainsi été menés depuis plusieurs décennies sans pour autant réduire de manière significative le risque d'inondation. L'aménagement typique consiste alors à canaliser la rivière en consolidant les berges avec des enrochements.

L'approche mécaniste que soutient cette stratégie d'aménagement vise à évacuer l'eau le plus rapidement possible vers l'embouchure du cours d'eau, en éliminant tous les obstacles susceptibles de ralentir l'écoulement et en favorisant son accélération. Cependant, la vitesse de l'eau génère une énergie cinétique considérable qui peut potentiellement augmenter les risques en cas de débordement.

1.3. Rappels généraux

Pour ne pas engendrer de confusion par les termes choisis quelques éléments sur le vocabulaire utilisé en hydrologie sont ici rappelés :

- Un cours d'eau est toujours décrit de l'amont vers l'aval, dans le sens du courant. Les berges droite et gauche sont entendues en positionnant l'observateur face à l'aval regardant dans la direction de l'embouchure, dos à la montagne ;
- Le mécanisme hydromorphologique d'une rivière s'appuie sur quatre éléments descriptifs principaux : la largeur du lit à plein bord ; la profondeur moyenne à plein bord ; la pente moyenne du lit ; et la sinuosité. Les deux premières variables définissent le profil transversal d'une section du cours d'eau, les deux suivantes caractérisent un tronçon dans sa longueur.

La notion de « plein bord » correspond au profil en travers du cours d'eau qui s'étend jusqu'à la limite de débordement du lit mineur (Figure 1). Le lit de plein bord est la géométrie retenue en hydromorphologie.

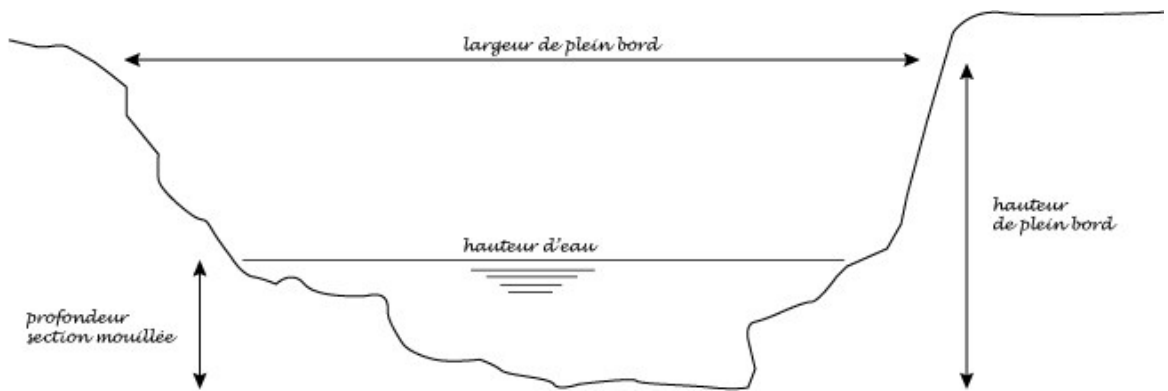


Figure 1 : Géométrie du profil en travers d'un cours d'eau.

- Dans un coude de rivière, la berge concave est la ligne extérieure. A l'opposé, la berge convexe se trouve à l'intérieur de la courbe (Figure 2). Le courant de surface (a) a une composante centrifuge, quand le courant de fond (b) a une composante centripète. Ce phénomène engendre l'érosion de la berge extérieure, concave, et comble de matériaux la berge opposée, convexe.

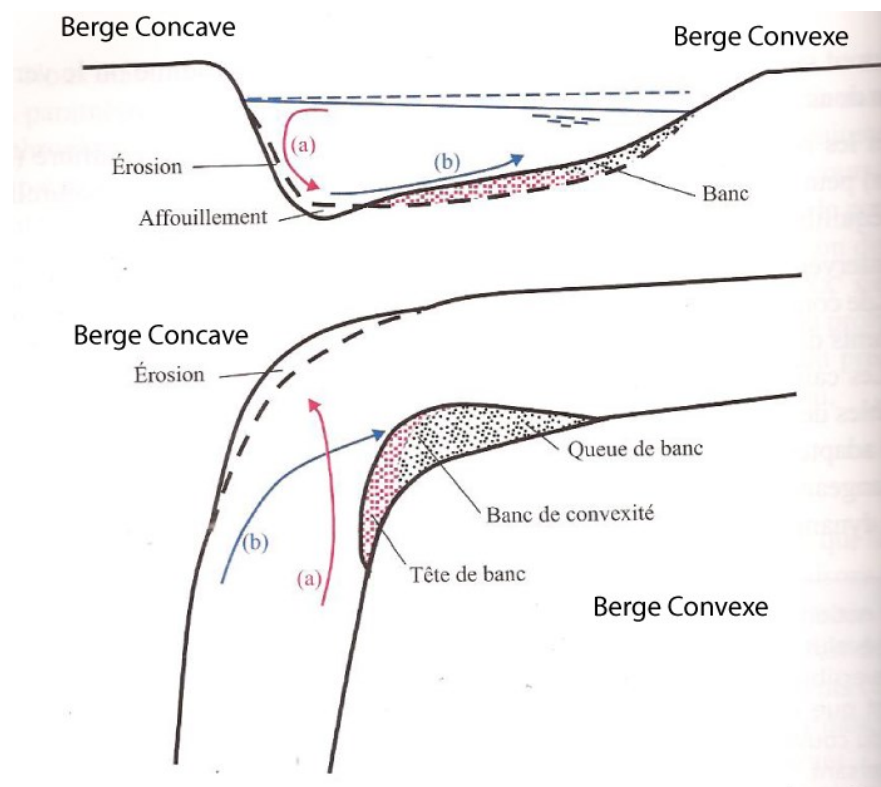


Figure 2 : Schémas de la courbe d'une rivière et évolution des profils.
(tiré et adapté de Degoutte, 2012).

- La berge est un talus incliné qui sépare le lit mineur du lit majeur. Elle doit être différenciée de la rive dont l'espace géographique est plus vague : la zone de séparation entre les milieux aquatique et terrestre. La berge est composée d'un socle, de la pente du talus et du « haut du talus » ou « haut de berge ».
- La modélisation des écoulements à surface libre a pour objectifs principaux de :
 - Simuler les débordements lors de crues remarquables ;
 - Déterminer les hauteurs de submersion, les vitesses d'écoulement, l'étendu des zones inondables en période de crue et d'en apprécier les risques ;
 - Évaluer l'impact des embâcles ;
 - Inventorier les points de fragilité du canal d'écoulement ;
 - Proposer des aménagements qui permettraient de réduire les risques.

Les résultats obtenus au terme de la modélisation numérique doivent être éclairés à travers la réalité du terrain.

Pour terminer, il n'est pas inutile de rappeler les limites d'une simulation. Un modèle numérique en général, dans les disciplines de l'hydrologie en particulier, est avant tout un outil de calcul qui fonctionne à partir du moment où les données d'entrées sont appropriées. Il est toutefois primordial de conserver à l'esprit l'importance du paramétrage du modèle, donc des stratégies d'acquisition et de traitement des informations à mettre en adéquation avec les objectifs de l'étude. Cette mise en garde initiale est parfaitement révélée dans la citation de Mary P. Anderson (1983) :

« All models require the talents of a skilled model user, a tailor, to design [...] valid boundary conditions and initial conditions and select meaningful values for model parameters. »

2. Etat des lieux contextuels

2.1. Toponymie

La rivière d'Ahonu s'écoule dans la vallée éponyme qui se trouve sur la commune de Mahina. Le toponyme inscrit une part significative de l'histoire, puisque cette commune fut jadis une terre d'accueil pour les navigateurs polynésiens. En 1767, les premiers Européens, sous la conduite de Samuel Wallis, accostèrent dans la baie de Matavai, adjacente à la pointe Vénus. Ces mêmes lieux, la baie de Matavai et la pointe Vénus, servirent également de sites d'atterrissage pour la première expédition de James Cook, qui avait pour objectif d'observer le transit de Vénus le 3 juin 1769. (source <https://contratdeville.pf/portrait-de-la-commune-de-mahina/>).

La vallée de l'Ahonu constitue un quartier spécifique, parmi les 11 que compte la commune de Mahina. La partie basse de cette vallée est très largement occupée par des habitations.

2.2. Géographie et morphologie

A Nord de l'île de Tahiti (Figure 3), la vallée de l'Ahonu s'allonge sur un axe Sud-Nord sur environ 10 km. De forme oblongue le bassin versant couvre une superficie de 13.1 km². Sa largeur maximum est de 2.3 km dans la haute vallée, elle descend à 500 m vers l'aval où la vallée est plus encaissée. La vallée s'ouvre ensuite sur l'embouchure sans traverser de grande plaine alluviale comme cela est souvent le cas sur les zones côtières au nord-Ouest et à l'Ouest de l'île.

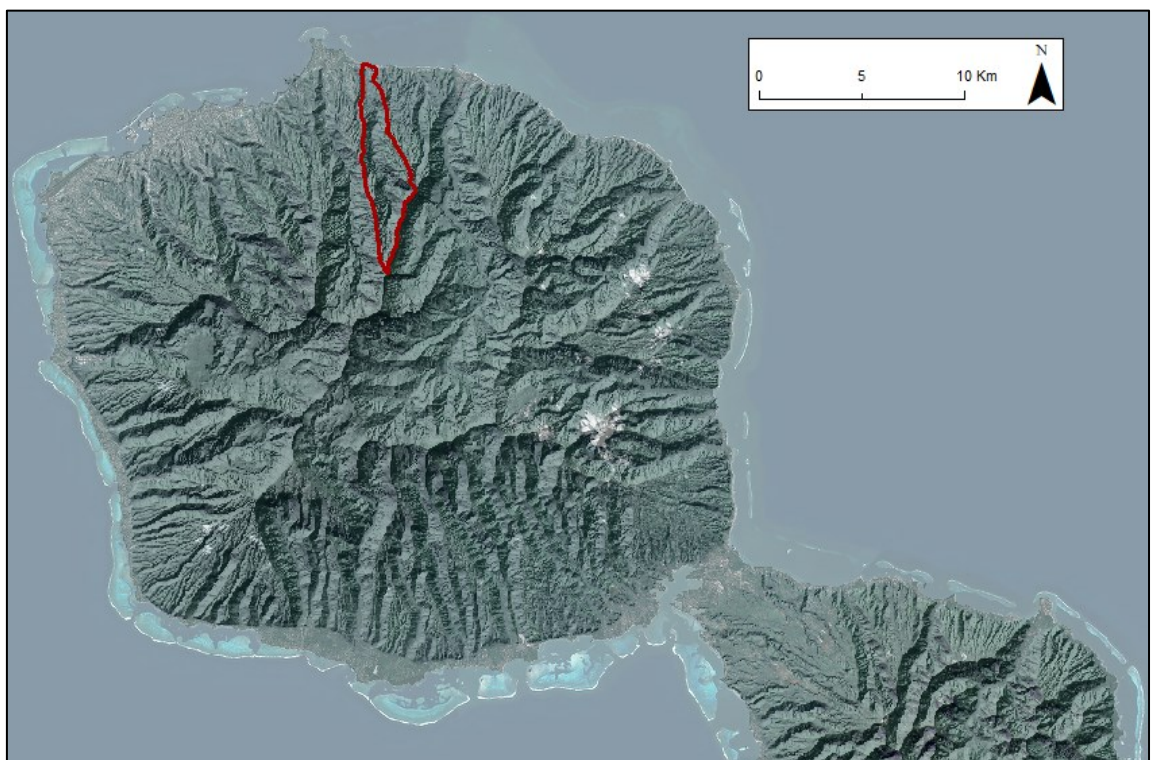


Figure 3 : La vallée d'Ahonu au Nord de l'île de Tahiti.

La vallée d'Ahonu prend naissance sur les contreforts du volcan principal. La forme de la vallée d'Ahonu s'intègre dans une planèze qui s'est creusée au cours du temps. Les planèzes sont des plateaux de forme triangulaire inclinés vers la mer. Leur topographie est héritée des anciennes coulées de lave recouvrant les pentes extérieures des volcans. La structure Nord de l'île est largement dessinée par la succession de ces formations. La vallée d'Ahonu est particulièrement profonde et incisée (Bonvalot, 1993).

La zone étudiée couvre une superficie de 250 ha, soit 19% de la vallée (1 300 ha). La zone hydrologiquement contributive est beaucoup plus élargie, elle couvre la totalité du bassin versant (Figure 4).

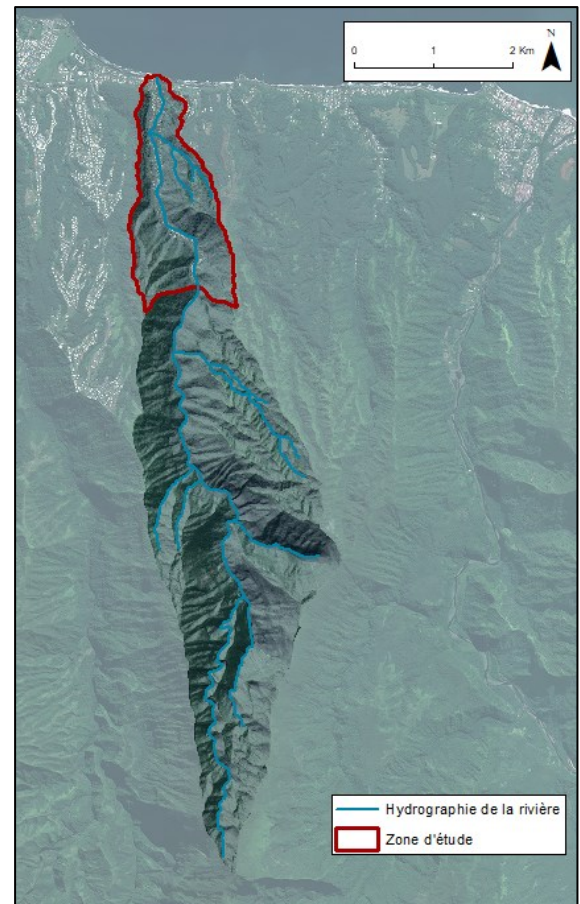


Figure 4 : La zone d'étude pour la modélisation représente 19% de la surface de la vallée.

2.3. Topographie

Le fonctionnement hydrologique de la vallée est en grande partie influencé par l'altitude et surtout les pentes. La capacité de ruissellement, ou de rétention, est ainsi induite par la topographie.

Sur l'ensemble de la vallée, l'altitude moyenne est de 551 m pour un écart type de 360 m, donc une variabilité importante. Le point culminant est le Pihaiateta à l'extrême Sud, il s'élève à 1 740 m. Autour de l'embouchure, la hauteur maximum du terrain ne dépasse pas 5 m.

La répartition des pentes est plus instructive (Figure 5). Le cours d'eau principal traverse un bassin versant encaissé, avec de fortes pentes sur les versants du fond de la vallée. Les surfaces inclinées au-delà de 45° représentent 42% de la superficie totale. Sur la basse vallée, et même à l'aval de la vallée, la rivière s'écoule dans un espace où la pente est beaucoup plus faible.

Sur l'ensemble de la vallée, la pente moyenne est de 42°.

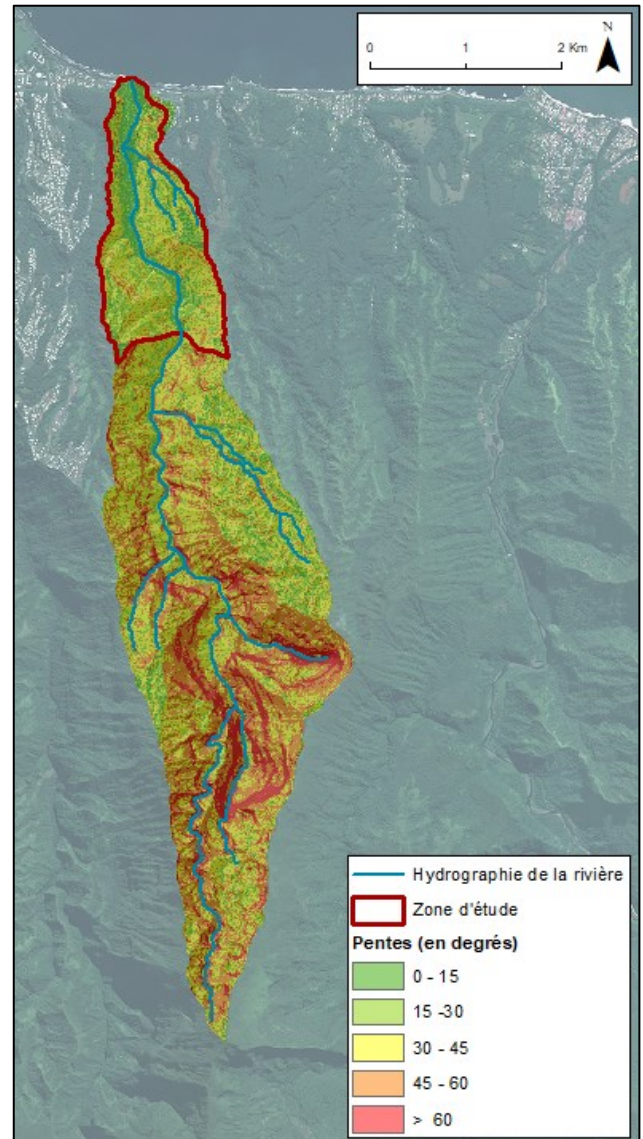


Figure 5 : Répartition des pentes dans la vallée d'Ahonu.

2.4. Occupation humaine

Le bas de la vallée de l'Ahonu qui représente la zone d'étude pour la modélisation hydraulique est assez largement occupé. Tous les espaces de faible pente sont construits et occupés par des habitations (Figure 6). Les enjeux liés à l'aléa inondation sont très importants parce que la configuration encaissée de la vallée offre très peu d'espace à la rivière

L'imperméabilisation des sols par les constructions et le réseau des voiries, ne peut qu'augmenter l'écoulement et les risques de dégâts en cas de débordement du lit.

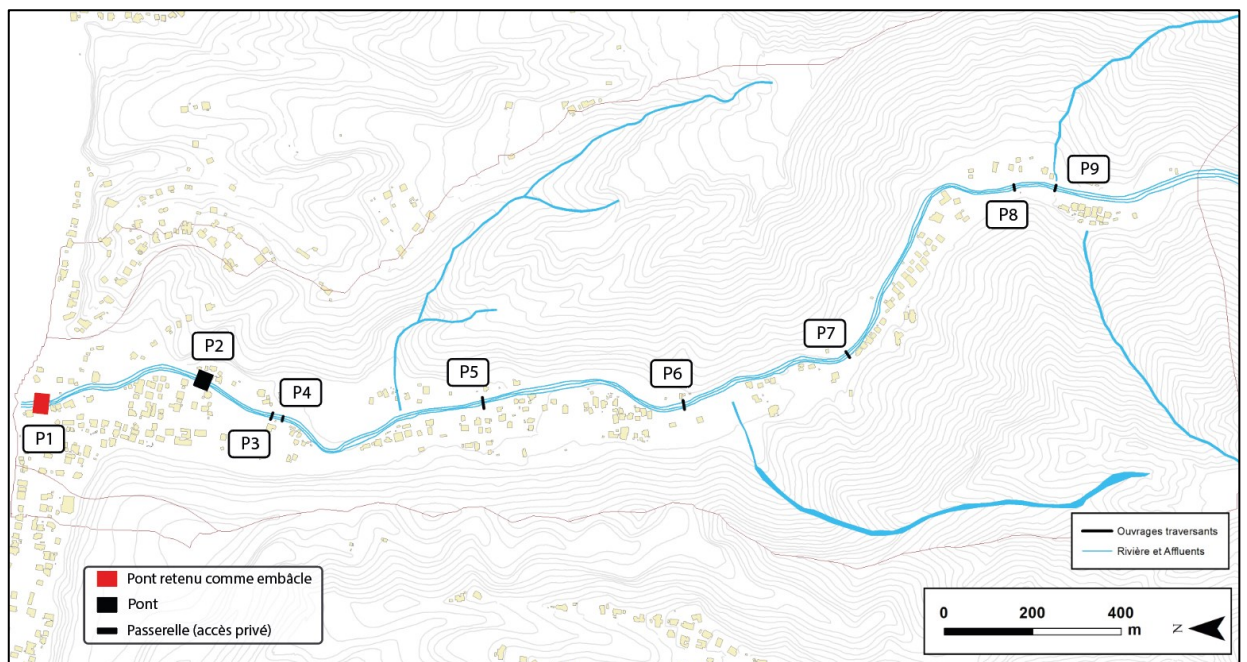


Figure 6 : Occupation et urbanisation dans la basse vallée de l'Ahonu.

2.5. Hydromorphologie et aménagement

2.5.1. Analyse historique

L'analyse des photos aériennes et satellites depuis 1978 est riche en enseignement sur l'histoire récente de la rivière d'Ahonu. Elle permet de suivre l'évolution du tracé des berges au cours du temps (Figure 7). Les détails de ces modifications sont à retrouver dans l'annexe 9.6, avec une projection des images aériennes récupérées auprès du service topographique de la DAF².

En 1978, le cours de la rivière présentait un tracé sinueux beaucoup plus prononcé et occupait une zone plus étendue par rapport aux rives actuelles. Deux méandres étaient particulièrement visibles sur la rive gauche, en amont de l'embouchure.

La première altération significative du cours d'eau a eu lieu entre 1978 et 1989 avec le rétrécissement du premier méandre en amont de l'embouchure. La canalisation du lit s'est ensuite accentuée avec un tracé toujours plus rectiligne jusqu'en 1989 où la rivière apparaît dans les limites qu'elle occupe aujourd'hui.

La rivière est un système dynamique dans le temps et dans l'espace. L'occupation humaine a engendré une canalisation du lit en réduisant drastiquement son espace d'évolution. Pourtant, l'aléa météorologique est le même. On peut même craindre qu'il s'intensifie avec le dérèglement climatique. L'imperméabilisation des sols engendre plus de ruissellement, les ondes de crues ne se sont pas atténuées, elles seront sans doute plus puissantes dans le futur. Les enjeux sont plus grands et mécaniquement les risques sont plus élevés.

Au cours des dernières décennies, l'espace dédié à la rivière a été réduit afin de libérer des terres pour le développement des activités humaines. Le cadastre a officialisé cette situation, un instrument juridique qui est en contradiction avec la dynamique spatiale propre au cours d'eau.

² Direction des Affaires Foncières

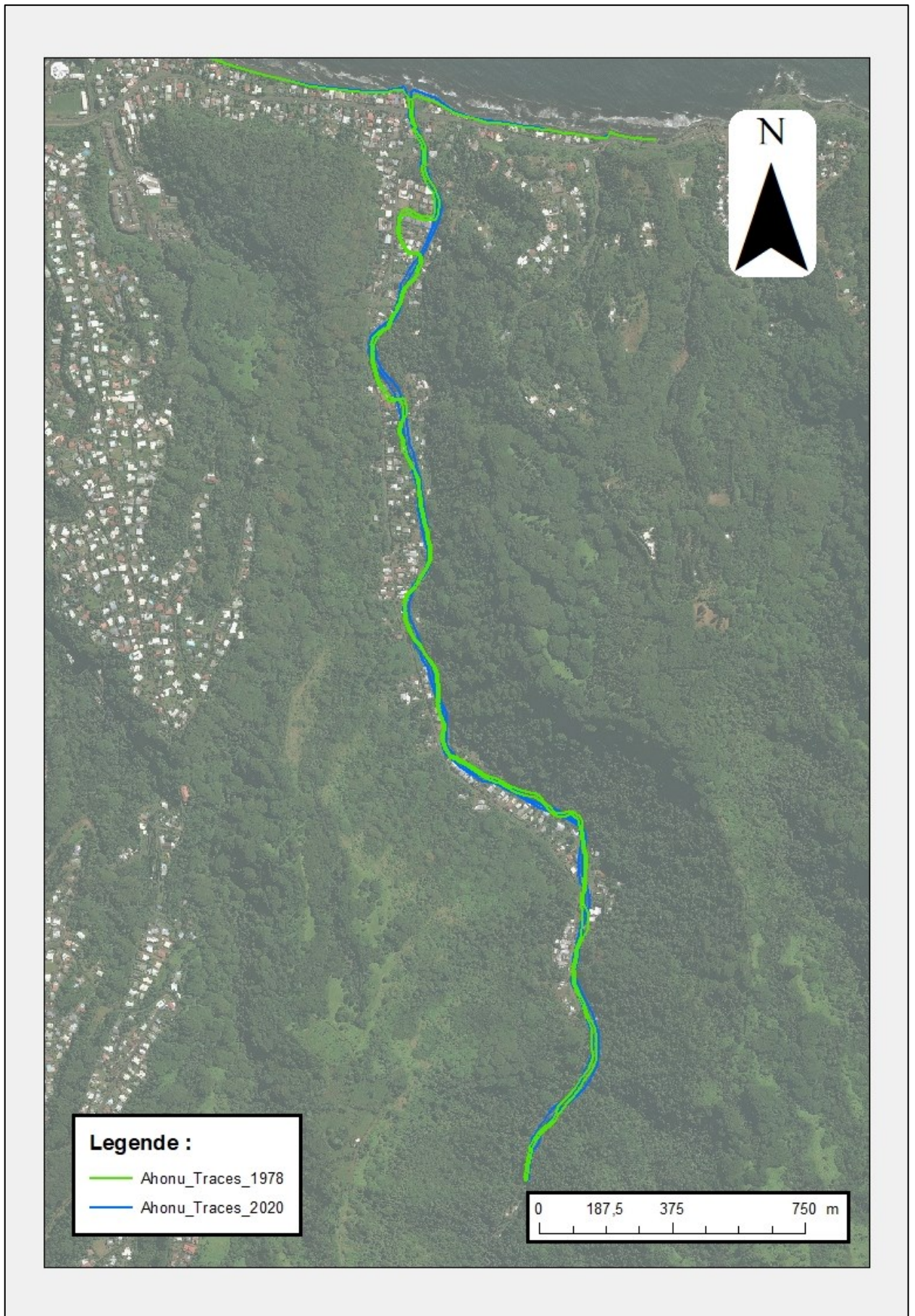


Figure 7 : Evolution historique des berges de la rivière de l'Ahonu à travers la plaine alluviale.

2.5.2. Historique inondations et témoignages

Les points indiqués sur la carte ci-dessous (Figure 8) proviennent des témoignages des riverains ainsi que des informations recueillies dans les archives de presse et les études antérieures. Le tableau associé présente les données collectées.

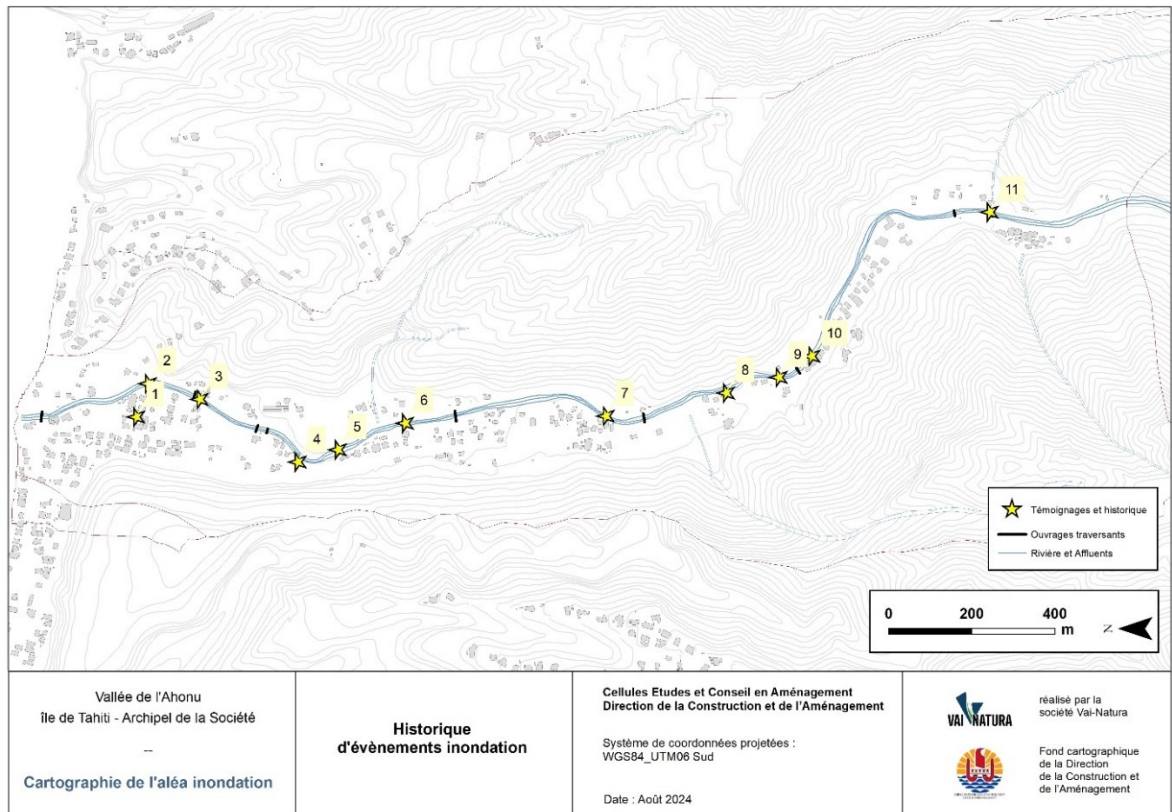


Figure 8 : Historique inondations.

Id	Observation	Source	Hauteur estimée
1	Débordement RG - 2017 Maisons inondées	DCA	130 cm
2	Débordement RG - Eboulement dans la rivière en 1998	Riverains	30 - 70 cm
3	Débordement RG en 1998	Riverains	50 cm
4	Enrochement détruit sur 50 m - 2017	DCA	50 - 100 cm
5	Affaissement de berge (RG)	Observations	
6	Débordement RD et RG – 1998 Une maison existante en rive droite a été détruite par les inondations.	Riverains + EGIS	
7	Débordement RG - 1998	Riverains	30 cm
8	Erosion RG sous une habitation - 2017	DCA	
9	Erosion RG sous une habitation - 2017	DCA	
10	Débordement RG et section de route détruite - 1998	Riverains + EGIS	30 cm
11	Débordement RD - 1998	Riverains	

2.5.3. Diagnostic du cours d'eau

Le diagnostic détaillé du lit de la rivière a été réalisé entre le 24 octobre et le 31 octobre 2023. Cette phase de terrain a permis d'apprécier visuellement le fonctionnement hydraulique de la rivière.

Le schéma d'exploration a été divisé en **3 Sections** équivalentes couvrant un linéaire de 1 100 m chacune (Figure 9). Le détail des investigations est reporté en annexe de ce rapport dans un inventaire remontant de l'aval vers l'amont.

Chaque section est découpée en **3 Tronçons** pour une meilleure lisibilité des cartes. Tous les ouvrages ont été référencés. Les ponts liés à la circulation sur les axes routiers ont été différenciés des passerelles dédiées aux accès privés. Les berges ont été caractérisées en fonction de leur état d'aménagement. Sur la presque totalité du linéaire exploré, les berges ont été remaniées par l'action humaine.

La rivière sert également d'exutoire d'eau pluviale à tous les quartiers qu'elle traverse. Les très nombreuses buses qui ont été inventoriées en témoignent. Nous avons intégré à la modélisation les plus importantes d'entre elles.

Le fond du lit a également été observé et les principales variations sont reportées sur les cartes.

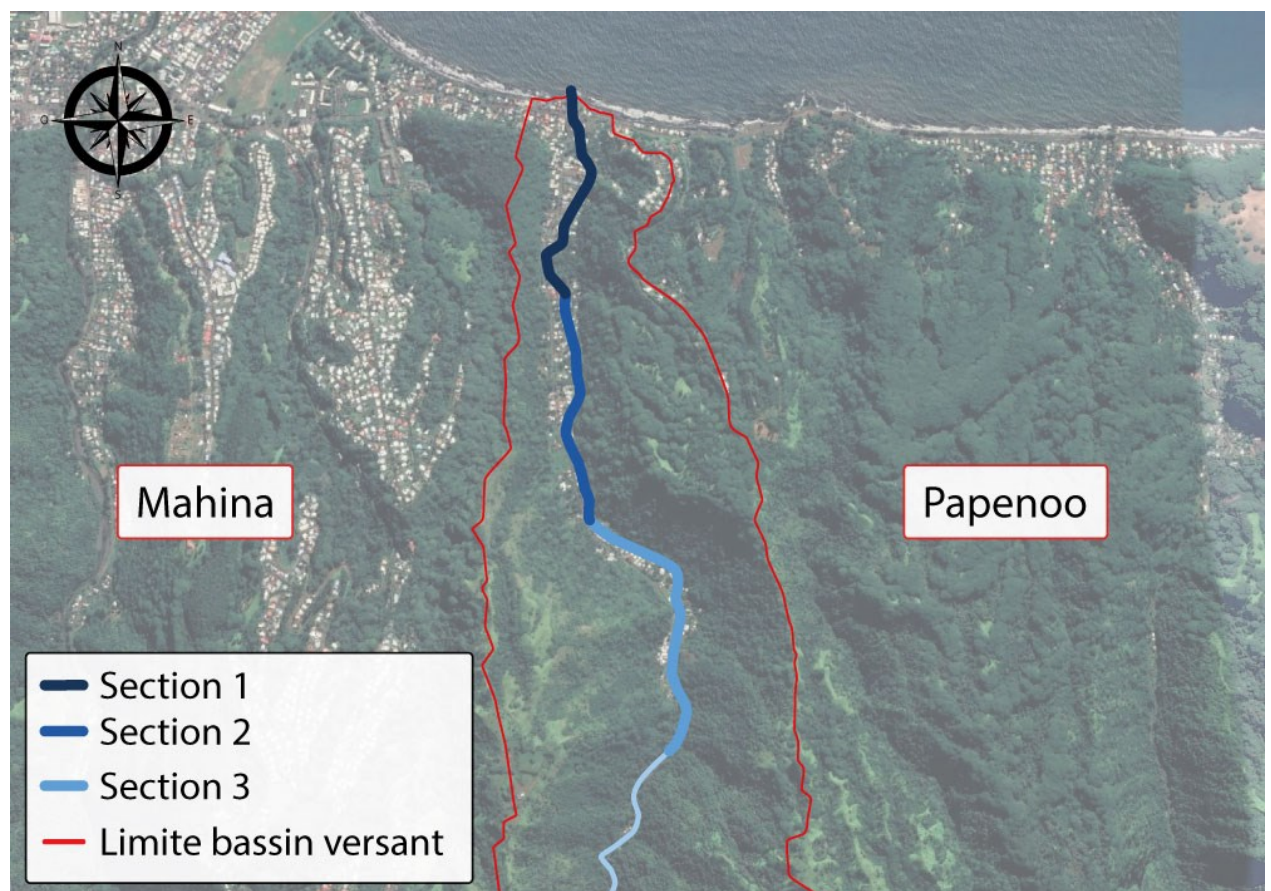


Figure 9 : Rivière de l'Ahonu divisée en 3 sections.

Section 1 (Figure 10)

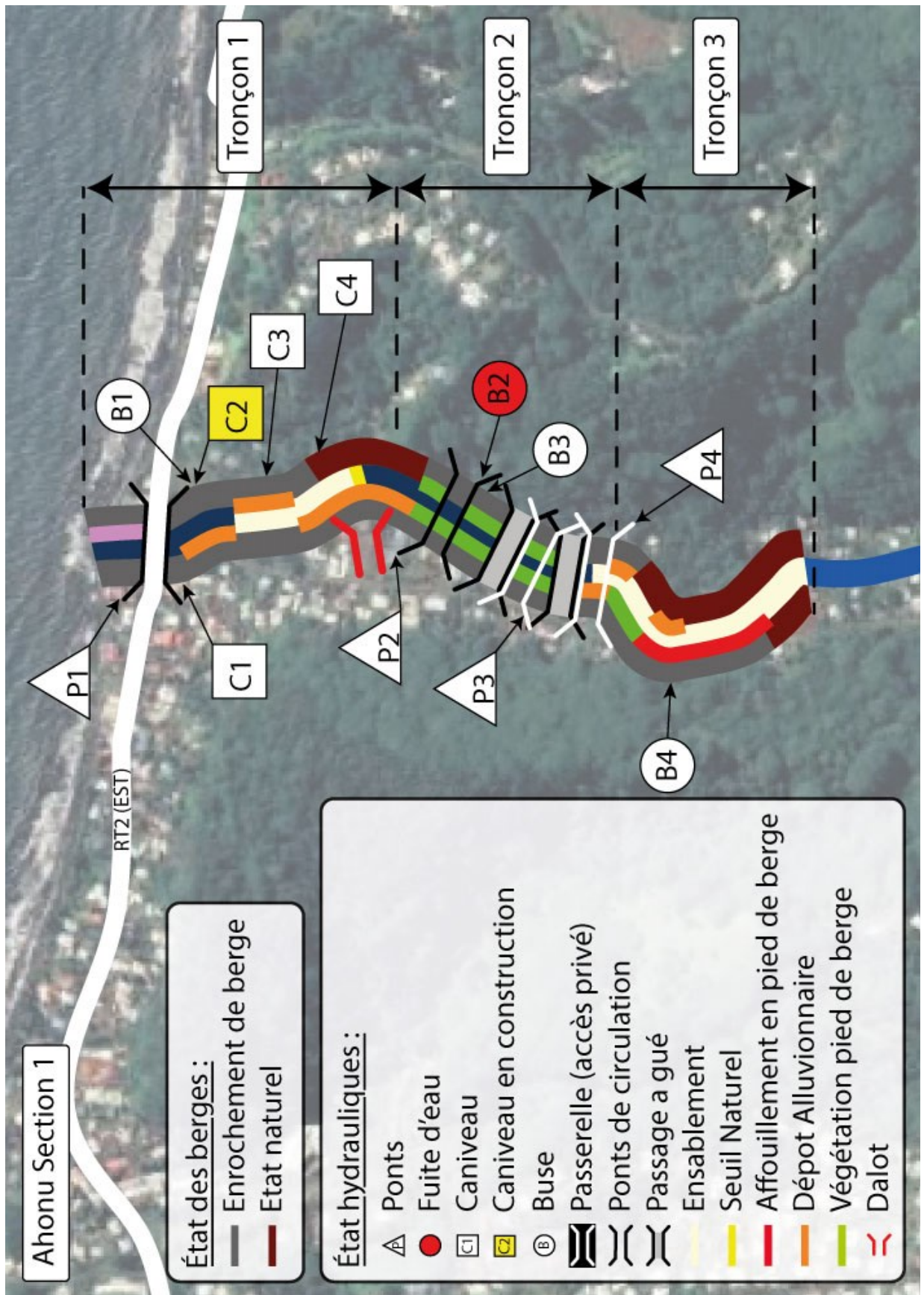


Figure 10 : Rivière d'Ahonu - Section 1 (Aval).

La section 1 débute à l'embouchure. On dénombre 4 ouvrages traversants, certains étant très proches, parfois éloignés de moins de 45 m. Le nombre de buses rejetant les eaux pluviales du quartier avoisinant est particulièrement important.

Section 1 - Tronçon 1

L'embouchure d'Ahonu est un estuaire bordé par des berges enrochées. Un ensablement³ est visible en rive droite, en aval du pont (P1). En amont, un caniveau (C2) est en cours de construction proche du niveau d'eau de la rivière.

Le tracé du lit de la rivière est plus sinueux dans cette partie du tronçon avec plusieurs dépôts alluvionnaires naturellement déposés sur les berges convexes de ses coudes. A la fin du tronçon, la rive droite présente un état plus végétalisé. En rive gauche, un dalot évacue les eaux de ruissellements d'une servitude. Plusieurs témoignages de riverains font état de débordements.

Le fond du lit près de l'embouchure est principalement constitué de sable et de limon. A partir du pont (P1), le pavage est assez mobile avec de galets décimétriques et des fragments de pierres.

Le pont P1 est un ouvrage en béton avec un espace d'écoulement de 14.65 m de largeur pour une hauteur moyen de 2.8 m. Le pont est situé juste après un léger coude de la rivière vers la gauche, ce qui rend la berge droite vulnérable à l'érosion.

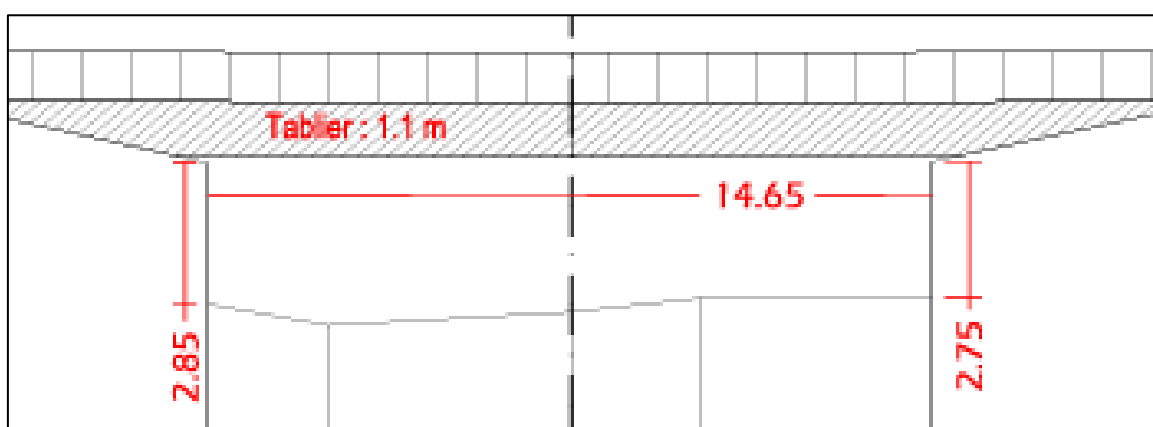


Figure 11 : Géométrie du pont P1.

³ *Ensablement* est un processus par lequel du sable, des sédiments ou d'autres particules fines s'accumulent progressivement sur le lit de la rivière. Ce phénomène se produit naturellement en raison de l'érosion des terres environnantes ou par l'influence des marées.

Section 1 - Tronçon 2

Le second tronçon est rectiligne. La berge gauche est enrochée sur toute la totalité du tronçon. La rive droite s'appuie sur le début du versant Est de la vallée, aucune habitation n'est construite sur cette partie du flanc de la montagne. Une dense végétation borde les berges sur toute la longueur du tronçon.

Le pont P2 est un ouvrage construit en acier IPE. Il est fortement altéré par la corrosion, sa stabilité doit être contrôlée. Les fondations sont bétonnées avec une structure en escalier. Son espace d'écoulement de 13.1 m de largeur pour une hauteur de 4.1 m (Figure 12).

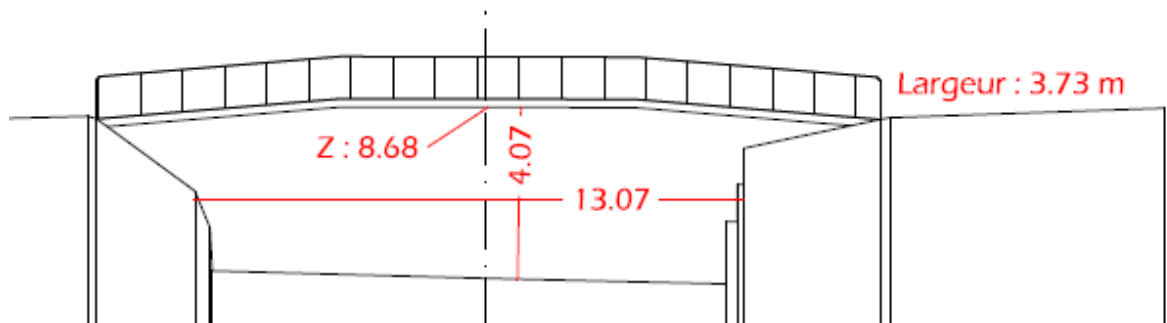


Figure 12 : Géométrie du pont P2.

En amont du pont P2, le lit de la rivière d'Ahonu est aménagée avec une série de deux passerelles piétonnes P3 et P4 (Figure 13 et Figure 14). Ces structures sont équipées d'une armature en poutre IPE pour permettre le passage des riverains. Chacune d'elles est accompagnée, en aval, d'un passage à gué pour permettre le passage des véhicules.

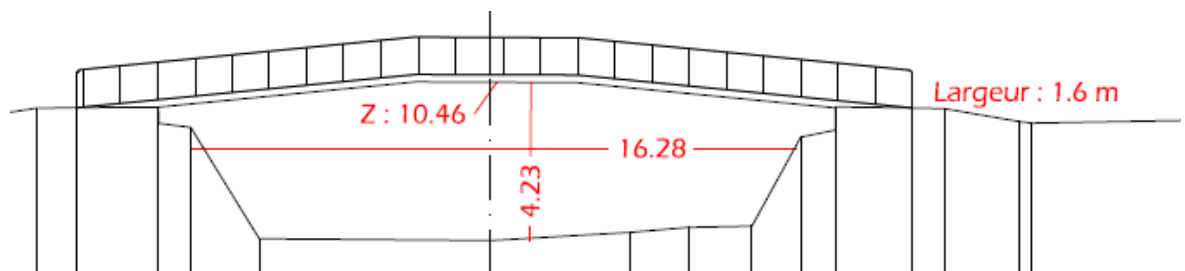


Figure 13 : Géométrie de la passerelle P3.

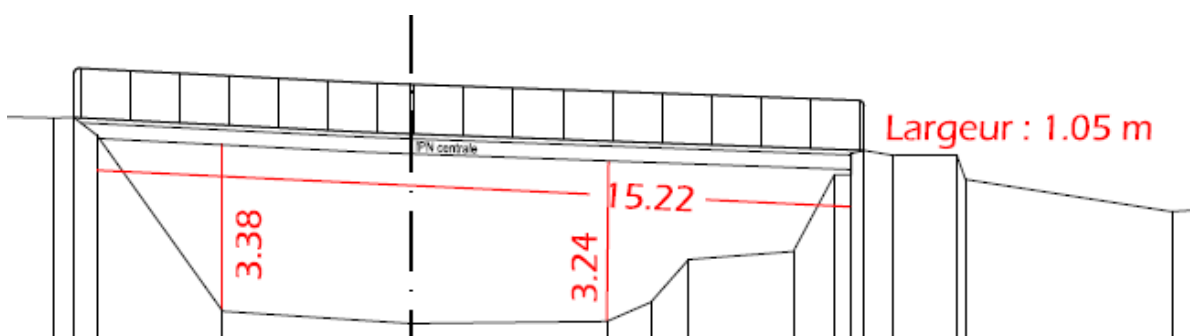


Figure 14 : Géométrie de la passerelle P4.

Section 1 - Tronçon 3

Le troisième tronçon commence en amont du pont (P4), le lit est plus contraint avec une largeur de 13 m pour une profondeur maximum de 3.5 m. Le tracé de la rivière est également plus sinueux, conduisant le cours d'eau dans un virage prononcé vers la gauche, puis vers la droite lorsqu'on l'observe de l'amont vers l'aval.

La berge de gauche est enrochée et reprend un état naturel à la fin du tronçon. D'importants affouillements sont présents au pied de la berge, entraînant une déstabilisation à moyen ou long terme des berges enrochées et une érosion progressive du lit.

Sur la rive droite, la berge est enrochée sur une hauteur d'1 m. Les effets de l'altération du sol, provoqués par une érosion localisée sont apparents en pied de berge.

Section 2 (Figure 15)

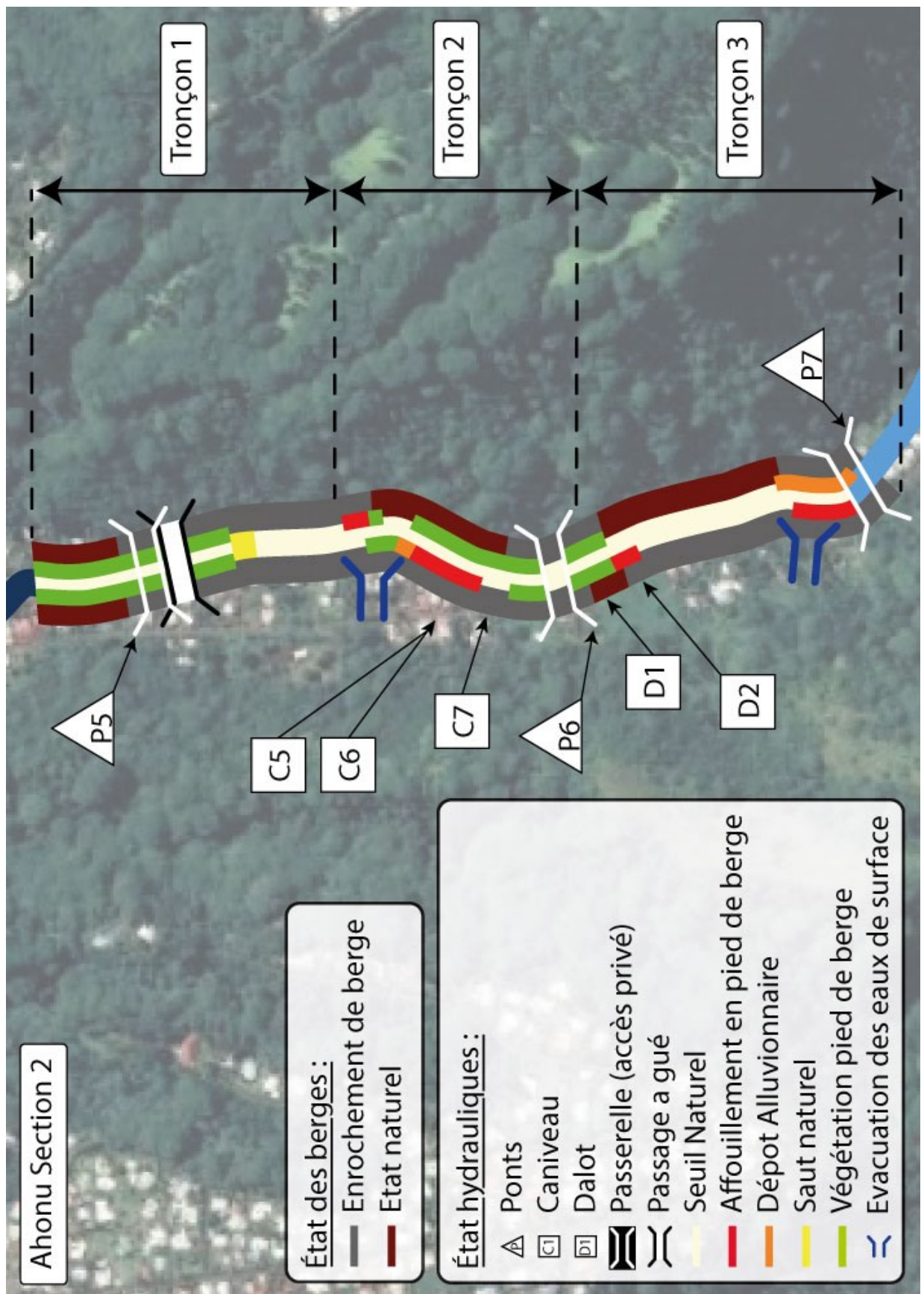


Figure 15 : Rivière de l'Ahonu - Section 2 (Entre aval et amont).

La section 2 traverse une zone moins densément construite en rive droite, tandis que la rive gauche abrite quelques habitations.

Cette section de 1 200 m compte 3 ouvrages de franchissement. En rive gauche, de nombreux caniveaux visibles le long des berges servent d'exutoires pour l'eau pluviale provenant des terrains environnants.

Section 2 - Tronçon 1

Les berges sont dans un état naturel sur une longueur de 60 m, puis sont revêtues d'enrochements libres. Une passerelle piétonne posée sur des poutres IPE relie les deux rives (Figure 16), avec un passage à gué en amont. En amont de cet ouvrage la végétation couvre assez largement les berges réduisant l'espace d'écoulement du cours d'eau.

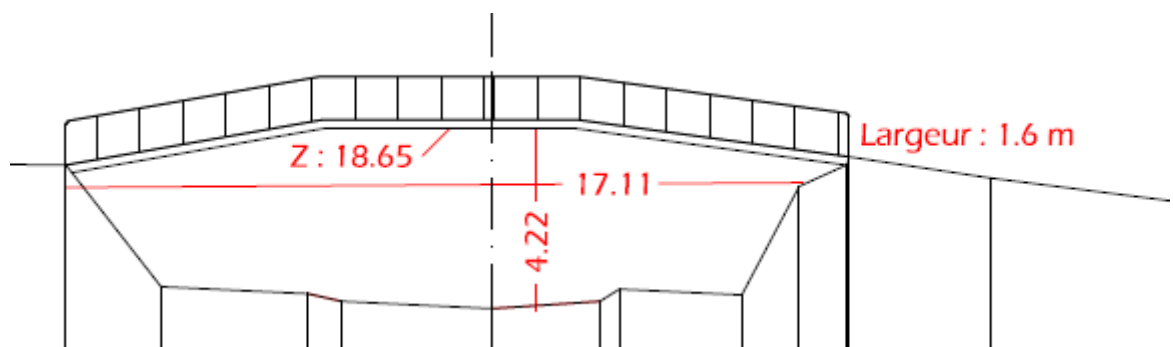


Figure 16 : Géométrie de la passerelle P5.

Section 2 - Tronçon 2

L'érosion est visible sur la berge de droite, qui n'est pas protégée par un ouvrage de génie civil. En amont, la berge de gauche est sécurisée par un enrochement libre. Cependant, on observe de nombreux affouillements en pied de berge.

Un ouvrage en acier IPE (P6) traverse le lit de la rivière en fin de tronçon (Figure 17). En amont de la passerelle (P6), la berge redevient enrochée.

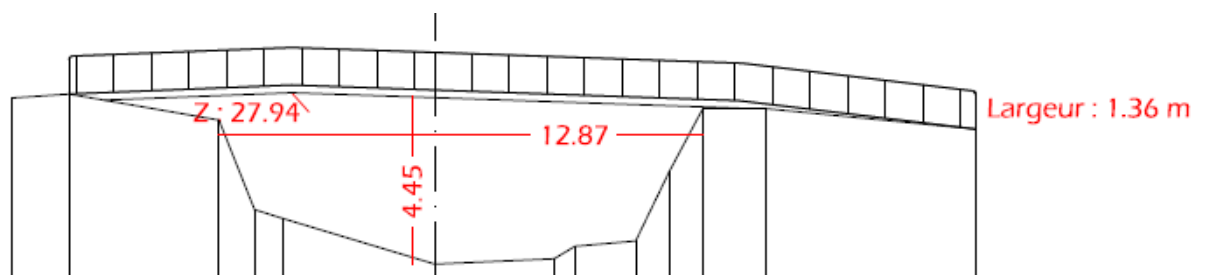


Figure 17 : Géométrie de la passerelle P6.

Section 2 - Tronçon 3

Le troisième tronçon débute en amont de la passerelle (P6) et suit un tracé plus linéaire. Sur une distance de 50 m, la berge droite est naturelle tandis que la berge gauche est enrochée.

En rive gauche, deux dalots⁴ (D1 et D2) ont été construits pour le drainage des eaux de pluies du lotissement se construisant sur la rive gauche.

Le tronçon se termine par un coude se dirigeant vers la droite (observation d'amont vers l'aval). En aval du coude, de nombreux signes d'affouillement en pied de berge, rendant la berge de gauche particulièrement vulnérable à l'érosion et comble la berge de droite de dépôts d'alluvions. Le tronçon se termine par un ouvrage en acier IPE (P7) traverse le lit de la rivière (Figure 18).

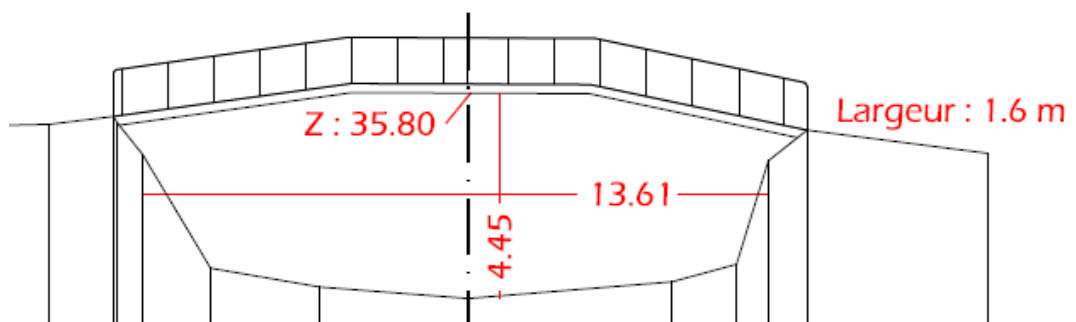


Figure 18 : Géométrie de la passerelle P7.

⁴ Un dalot est une structure souterraine ouverte permettant le passage des eaux de surface, telles que les eaux pluviales, sous une route, une voie ferrée ou une autre infrastructure. Il est souvent constitué d'un conduit en béton, conçu pour permettre un écoulement continu des eaux de ruissellement.

Section 3 (Figure 19)

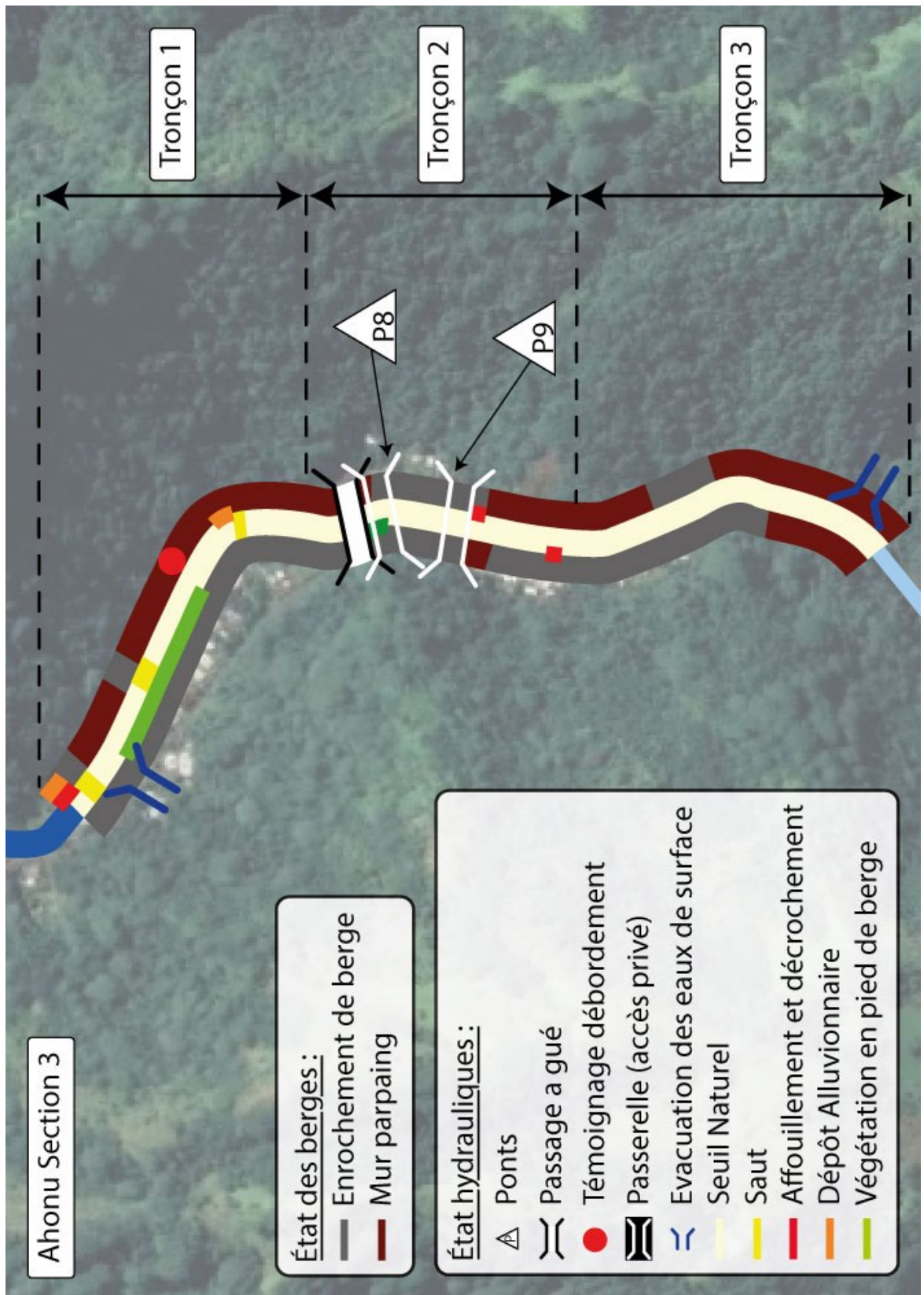


Figure 19 : Rivière de l'Ahonu - Section 3 (Amont).

La section 3 de la rivière traverse une zone moins densément occupée.

Section 3 - Tronçon 1

La berge gauche est revêtue d'enrochements tandis que la rive droite conserve son aspect naturel.

Un témoignage fait l'état de débordements fréquents malgré de nombreuses tentatives de consolidation des berges par des enrochements, le tronçon se termine par un coude très prononcé vers la gauche (observation d'amont vers l'aval).

Section 3 - Tronçon 2

La rive de droite alterne entre état naturel et enrochement. Les transitions n'ont pas été correctement réalisées. Le flux d'eau qui accélère dans les sections en enrochement rencontre des zones non altérées où le sol est plus meuble et donc plus vulnérable à l'érosion. Cette différence dans la résistance des matériaux entraîne des déséquilibres dans le débit de la rivière, augmentant le risque d'érosion des berges et de détérioration des sections en état naturel.

Au début du tronçon, un ouvrage en acier IPE (P8) traverse le lit de la rivière (Figure 20). En aval de la passerelle (P8), le lit de la rivière a été aménagé avec un passage à gué. Et à 95 m à l'amont se trouve une dernière passerelle qui est une simple dalle de béton posée entre les deux berges (P9 - Figure 21). Il ne s'agit pas d'un réel obstacle à l'écoulement puisque sa structure et sa faible hauteur sont facilement submergées. On peut simplement s'interroger sur la multiplication de petites infrastructures permettant de traverser le lit.

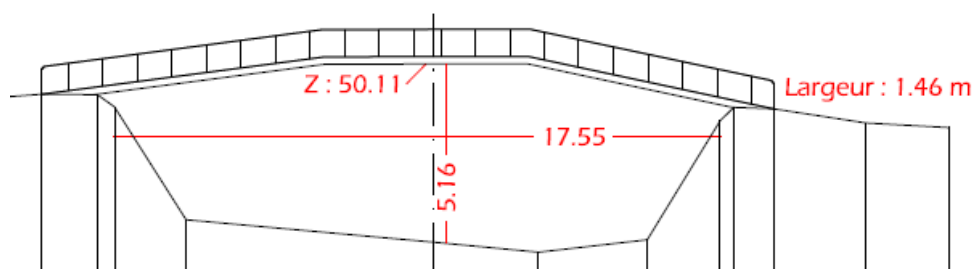


Figure 20 : Géométrie de la passerelle P8.

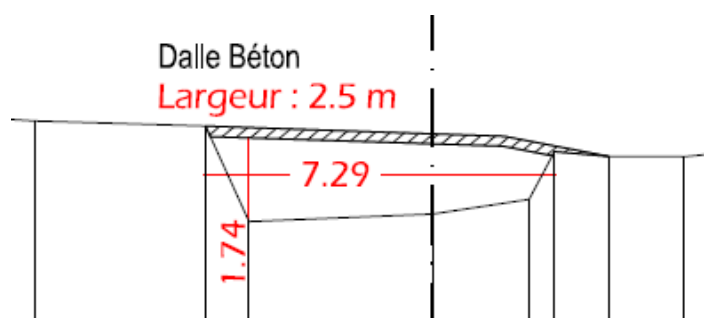


Figure 21 : Géométrie de la passerelle P9.

Section 3 - Tronçon 3

Ce tronçon est dépourvu de toute construction le long des rives, seulement la berge de gauche reste enrochée jusqu'à la dernière habitation sur la rive. Les berges conservent leur aspect naturel sans protection artificielle.

3. Modélisation hydraulique

3.1. Stratégie de modélisation

Sur la dernière partie de son tracé, 3.2 km, la rivière d'Ahonu traverse la partie de la vallée qui est construite. Les évènements passés et les précédentes modélisations montrent des débordements réguliers avec une emprise de la lame d'eau d'inondation occupant une large partie des rives jusqu'en pied de versant. L'écoulement doit alors être considéré comme bidirectionnel pour s'approcher correctement de la situation réelle. Nous disposons pour la partie aval d'un MNT précis basé sur des relevés LIDAR dans cette zone. Il est alors raisonnable de choisir un modèle en 2 dimensions. Nous nous appuyons sur le logiciel HEC-RAS⁵ pour réaliser cette modélisation hydraulique.

A partir des données disponibles, de la configuration de la zone d'étude, des résultats recherchés et des contraintes du logiciel, la stratégie de modélisation est élaborée en cherchant à conserver le sens physique des paramètres et une correcte représentation de la réalité :

- La surface d'étude est discrétisée en cellules polygonales. La précision est augmentée sur le chenal d'écoulement et autour de l'exutoire des affluents. Le profil du lit de plein bord relevé par un cabinet de géomètre permet de largement améliorer la projection numérique du terrain ;
- Les singularités naturelles du lit (rétrécissement, élargissement, coude) ou artificielles (pont, gué ...) sont intégrées dans la représentation du modèle ;
- Les données hydrologiques permettent de reconstruire un hydrogramme de crue pour modéliser le régime d'écoulement non-permanent (*Unsteady flow*) ;
- A défaut de mesures directes dans le lit de la rivière (débit, hauteur d'eau), la calibration du modèle est réalisée à partir des témoignages des riverains évaluant les hauteurs d'eau atteintes lors des crues les plus importantes. Le souvenir humain et quelques photos sont ici les seules données utilisables.

⁵ Hydrologic Engineering Centers River Analysis System

3.2. Etendu et maillage du modèle

La représentation de la zone d'étude s'appuie sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT). La vallée de l'Ahonu a été reconstituée à partir de deux jeux de données géographiques, fournies par la Cellule Etudes et Conseil en Aménagement (CECA), qui furent combinées pour obtenir une représentation topographique continue (Figure 22) :

- l'opération « LIDAR Polynésie française 2015 » a permis de générer des données topographiques très précises relevées par un laser aéroporté (SHOM⁶, 2015). C'est essentiellement la bande côtière de l'île de Tahiti qui est couverte. Pour la vallée de l'Ahonu, ces données couvrent une distance de 1.2 km vers l'amont en partant de la ligne côtière avec une précision inférieure à 1 m, soit 40 % de la zone d'étude ;
- au-delà le terrain est dessiné par un MNT un peu moins précis (> 5m) datant de 2013 ;
- La représentation géométrique du chenal d'écoulement dans le modèle a été consolidée à partir des relevés topographiques précis. Cette mission a été confiée au bureau de géomètre WILD. Les relevés couvrent la totalité du lit de plein bord. Des profils en travers ont été réalisés tous les 30 m sur un profil en long de 3.2 km de la rivière, ce qui représente 95 profils. Les consignes relatives à ces relevés topographiques sont consultables en annexe de ce mémoire (cf. Annexe 8.3).

Les singularités du lit (rétrécissements, élargissements, coudes) sont contrôlées dans la représentation géométrique du profil en long. Enfin, les ouvrages traversants (ponts, passerelles) sont intégrés dans la modélisation.

La représentation géographique en deux dimensions de la zone d'étude a nécessité une discrétisation de l'espace par un maillage de cellules polygonales (Figure 23). Un maillage resserré encadre le lit de plein bord de la rivière, ce qui améliore significativement la précision du modèle. Finalement, le maillage est formé par 43 042 cellules couvrant des surfaces de 4 m² (2 x 2 m) pour les plus précises, à 400 m² (20 x 20 m) pour les plus grandes. La superficie moyenne d'une cellule est de 808 m². La plus petite couvre une aire de 4 m².

⁶ Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

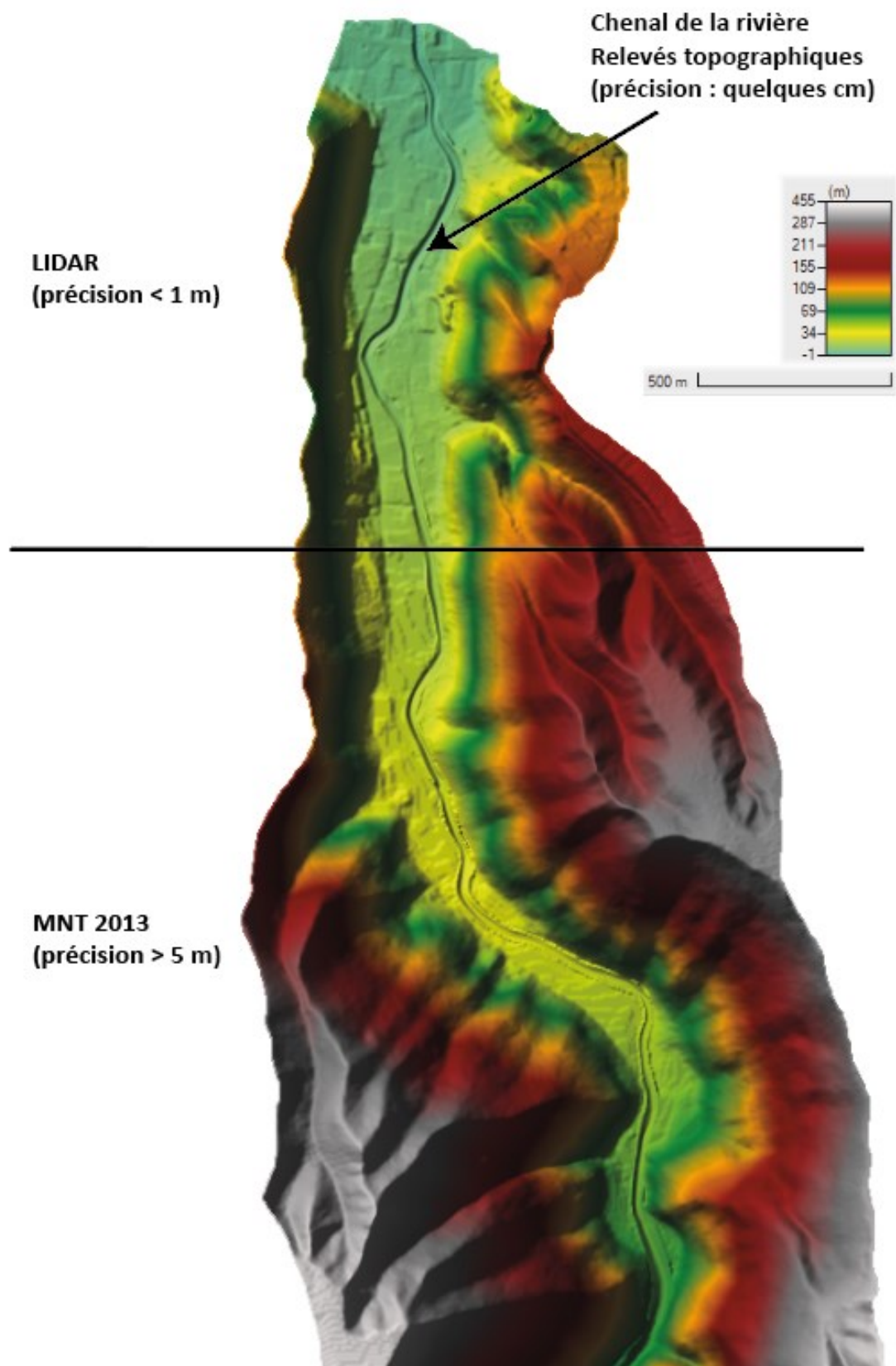


Figure 22 : Terrain reconstitué à partir du MNT, du rendu LIDAR et des relevés topographiques dans le lit de la rivière.

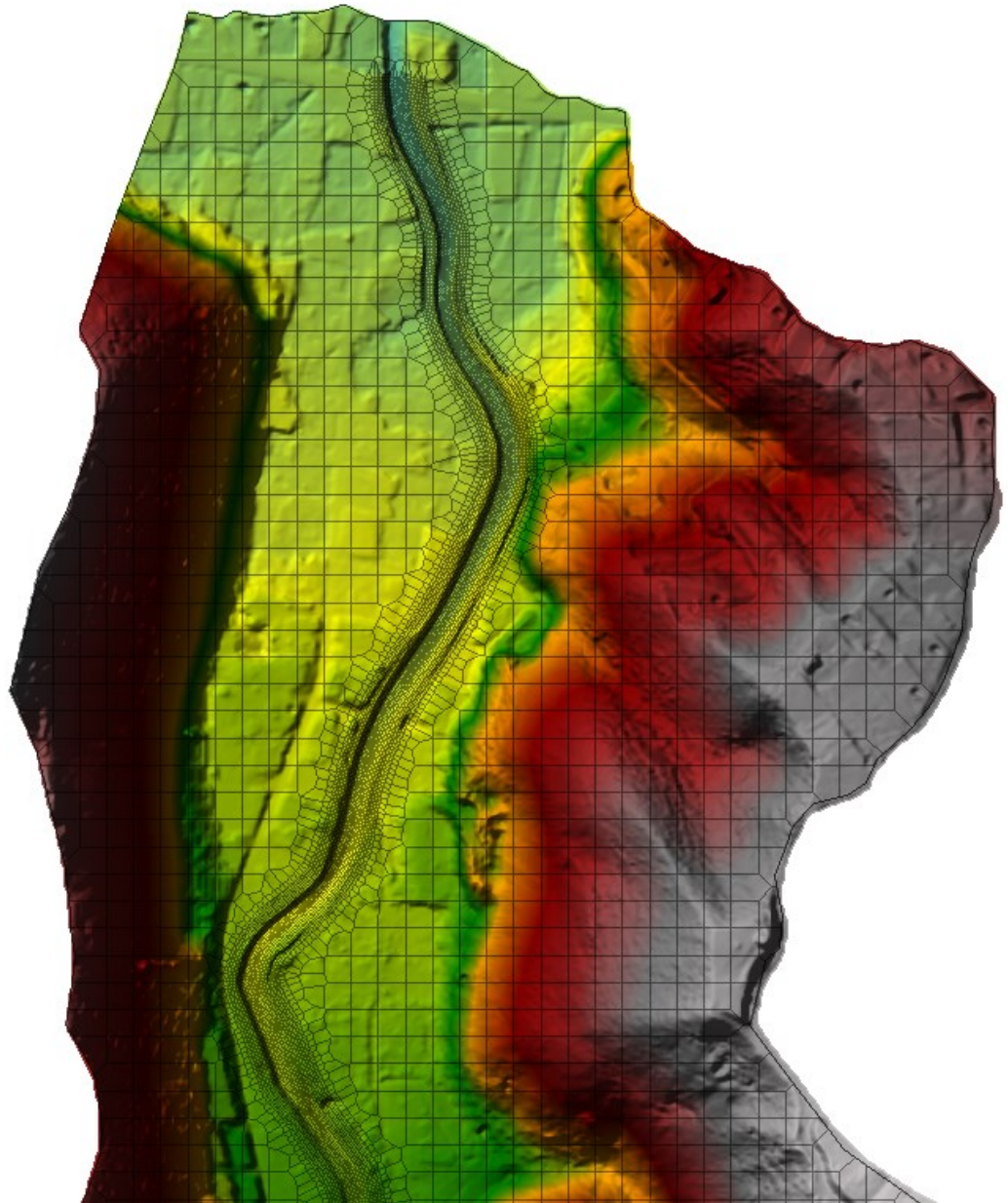


Figure 23 : Discrétisation de l'espace pour la modélisation 2D, avec un précision accrue dans le lit de la rivière, autour des berges et au niveau des ouvrages traversants (cellulle 2 x 2 m).

3.3. Rugosité du terrain

L'une des données importante et délicate à renseigner est la capacité du terrain, et du lit, à favoriser ou à freiner l'écoulement. Ces forces de frottement sont intégrées dans le coefficient de Manning qui peut représenter plus globalement l'ensemble des éléments contraignant le flux de l'eau. L'usage consacre le terme de rugosité pour exprimer cette caractéristique.

Dans le paramétrage initial, c'est la nature des surfaces qui guident la valeur choisie pour le coefficient de Manning. Pour chaque cellule du maillage, ce coefficient doit être renseigné. Il est généralement exprimé en $[s.m^{-1/3}]$.

En fonction des caractéristiques de rugosités des surfaces, plusieurs zones ont été différenciées et un coefficient de Manning distinct a été appliqué. Pour les espaces les plus urbanisés, le sol est soit revêtu, soit soumis à un tassement favorisant le ruissellement. La conséquence est une rugosité réduite. Le coefficient de Manning est estimé entre 0.013 (surface revêtue : ciment, bitume) et 0.08 (terreplein en terre), essentiellement en fonction de la couverture du sol. Les valeurs ont été initialement définies à partir des tables, consultables en annexe de ce document (cf. Annexe 8.4), qui ont fait l'objet de nombreuses validations et de plusieurs publications (e.g., Brunner, 2016).

La répartition géographique sur la zone d'étude, des valeurs du coefficient de rugosité, est présentée sur la carte suivante (Figure 24).

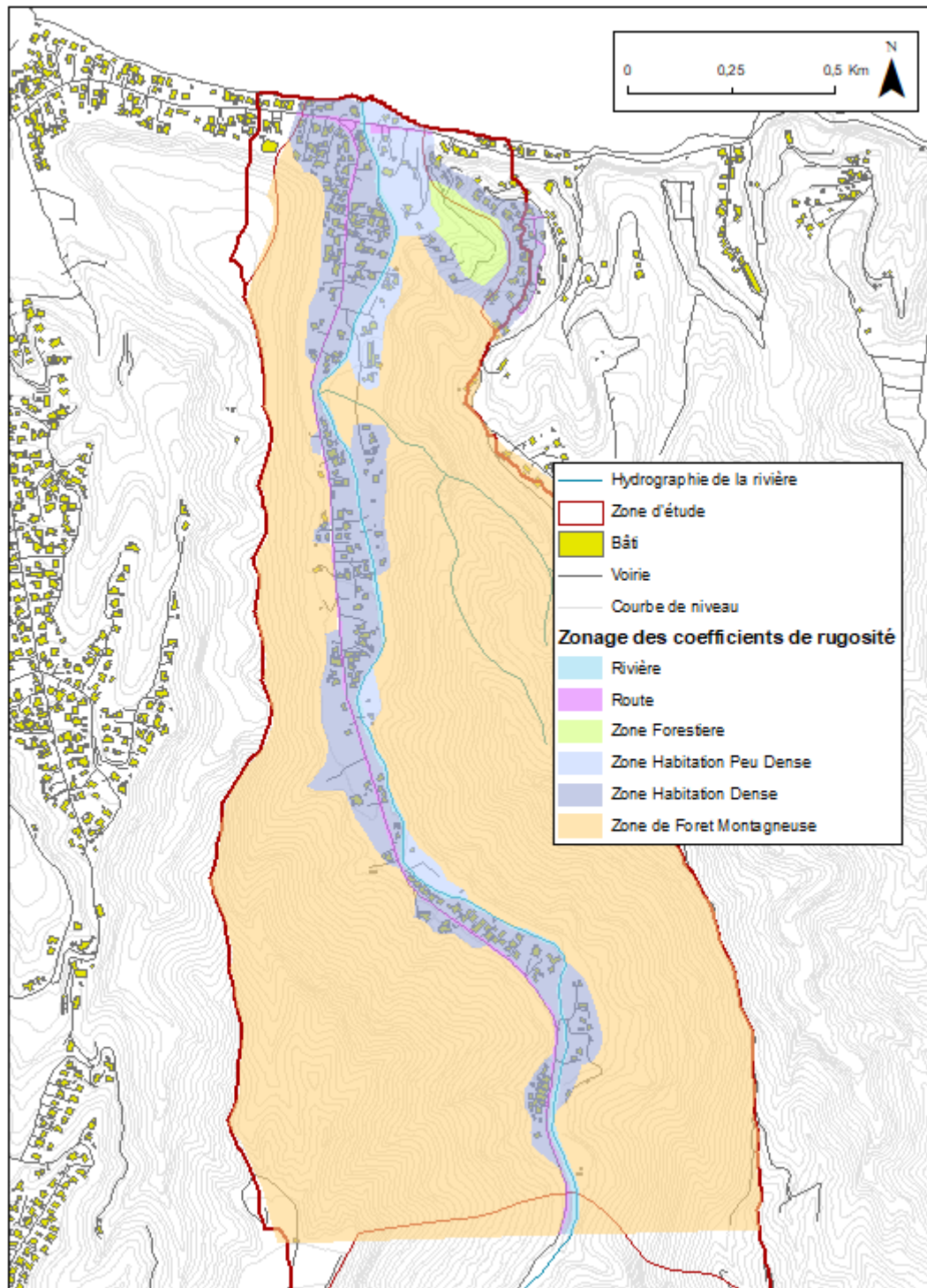


Figure 24 : Projection géographique des rugosités établies pour la modélisation de la rivière de l'Ahonu.

3.4. Hydrologie

3.4.1. Hydrométrie

La rivière Ahonu n'est pas instrumentée, son débit n'est donc pas suivi régulièrement. L'estimation des débits de crue ne peut donc être que le résultat d'une interpolation de données voisines. Plusieurs travaux se sont déjà penchés sur les estimations des débits de crue sur cette rivière. Une analyse croisée des différentes estimations des événements rares a été réalisée lors de la précédente modélisation de la rivière, en 2012 par le bureau d'étude EGIS Eau. Comme aucune étude complémentaire n'a été menée dans cette rivière depuis 2012, il convient de reprendre les estimations très documentées de ce précédent travail.

Etude	Méthode	<i>Q_{max} observé</i> [m ³ /s] Déc 1998	<i>Q₁₀</i> [m ³ /s]	<i>Q₅₀</i> [m ³ /s]	<i>Q₁₀₀</i> [m ³ /s]
BCEOM - 1999	Formule empirique + Gradex	-	111	251	311
Danloux - 2003 (pour le GEGDP)	Craeger	240	181	293	348
Stollsteiner 2003 (pour le BRGM)	Rationnelle + Gradex	-	169	-	299

Les travaux de J. Danloux se basent sur des chroniques de données traités préalablement par G. Woltling dans le cadre d'une large étude sur l'ensemble des cours d'eau de l'île de Tahiti.

Des débits de pointes ont été estimés à partir de mesures réalisées entre 1982 et 1985 à la côte 120. Cette période a été marquée par le passage des cyclones Reva et Veena. Les débits maximums ont été évalués respectivement à 34 m³/s puis 116 m³/s. Plus tard, lors de la grande crue de 1998 (19-20 décembre) le débit de pointe a été estimé à 240 m³/s.

3.4.2. Affluents

Sur la distance du cours d'eau modélisé, plusieurs affluents vont alimenter l'écoulement principal (Tableau 1 et Figure 25). Nous avons référencé les plus importants et estimé les débits supplémentaires qui contribuent à augmenter le flux global. Ces débits ont été calculés en se basant sur la méthode rationnelle en intégrant les données géographiques et topographiques de chaque sous-bassin versant.

Les précisions documentées sur les exutoires de ces affluents sont présentées sur la page suivante.

Tableau 1 : Evaluation des débits des affluents principaux de la rivière Ahonu.

Zone contributive	Superficie [ha]	Allongement [m]	Gradient d'élévation [m]	Pente moy. [%]	Qmax [m ³ /s]	Q ₁₀₀ [m ³ /s]	Q ₅₀ [m ³ /s]	Q ₁₀ [m ³ /s]
Zone amont	1 012	7 700	1 680	22%	239.01	347	292	180
Affluent 1 <i>Figure 26</i>	6.8	855	370	43%	0.9	1.4	1.2	0.7
Affluent 2	13	660	340	52%	1.8	2.7	2.2	1.4
Affluent 3 <i>Figure 27</i>	15.2	980	320	33%	2.1	3.1	2.6	1.6
Affluent 4 <i>Figure 28</i>	34.6	1 170	280	24%	4.9	7.1	6	3.7

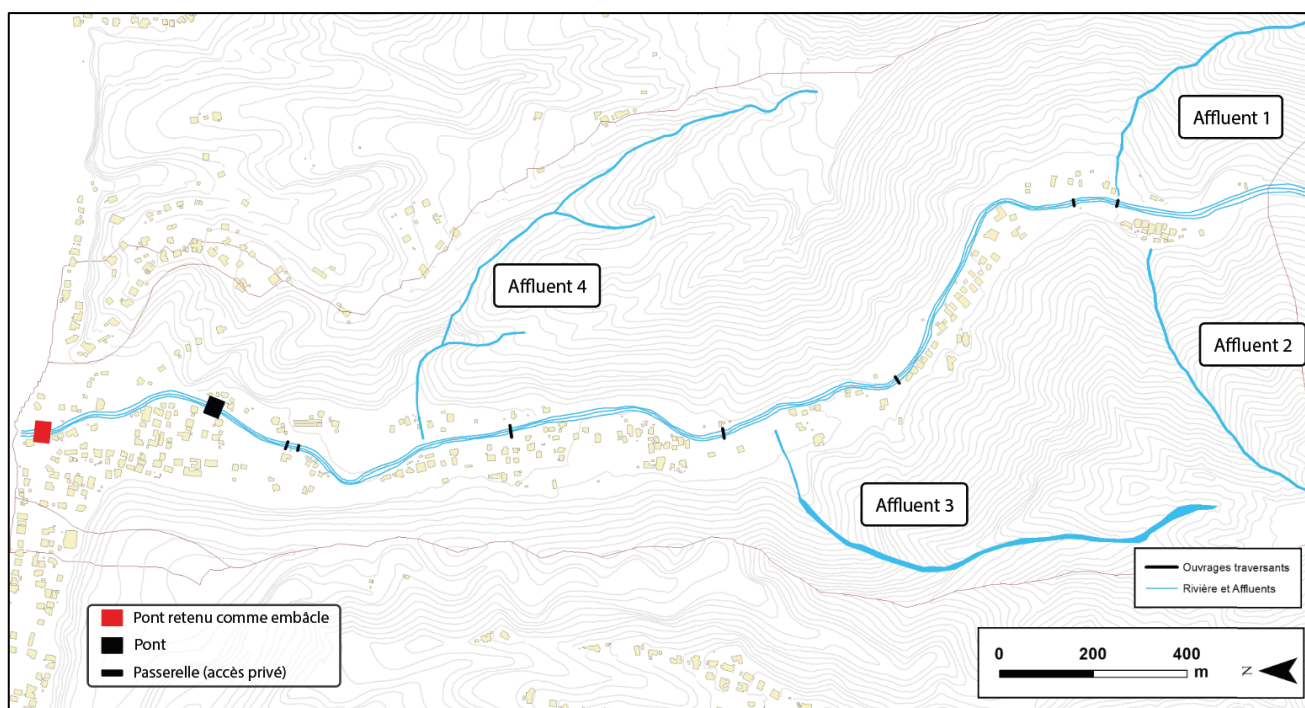


Figure 25 : Situation du seul affluent de la rivière Ahonu.

L'**affluent 1** trouve son exutoire vers la rivière en suivant sur 20 m une petite servitude bétonnée.



Figure 26 : L'affluent 1 finit sa course par-dessus une petite servitude bétonnée.

L'eau s'écoulant par l'**affluent 2** se diffuse en bas de talus avant d'atteindre les habitations en contrebas. Nous n'avons observé aucun canal d'évacuation vers la rivière et nous n'avons trouvé aucun exutoire. Pour cette raison, cet affluent n'a été considéré dans la modélisation.

A son aval, l'**affluent 3** a été canalisé au cœur d'un aménagement d'une résidence OPH dont la construction s'est déroulée au cours de l'année 2024. L'ouvrage aujourd'hui terminé (janvier 2025) paraît suffisamment dimensionné pour ne pas déborder. Le chenal canalisé se poursuit par un dalot qui traverse sous la route de déserte de la vallée avant de se déverser dans la rivière.



Figure 27 : Canal d'évacuation et exutoire de l'affluent 3.

L'affluent 4 termine son cours à travers une zone d'habitation peu dense. L'un des riverains a modifié l'exutoire naturel (sans autorisation) qui se trouvait 200 m à l'aval. Les travaux réalisés se résument en un mur de parpaings sur une vingtaine de mètres puis par des tôles posées à même le sol. La conséquence est un débordement de l'affluent sur ce tronçon sur les voisins en rive gauche. Un contrôle devrait être mené pour un retour à l'état d'origine.

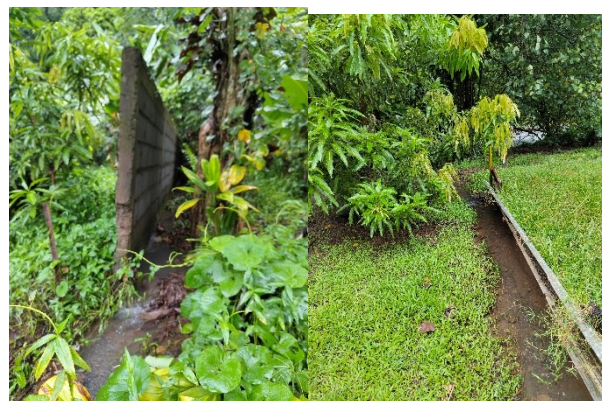


Figure 28 : Canalisation, rustique et non autorisée, de l'exutoire de l'affluent 4.

3.5. Modélisation des ponts et simulation d'embâcles

Sur les 3.2 km de linéaire d'étude sur la rivière de l'Ahonu, nous avons comptabilisé 9 ouvrages traversants (Figure 29) :

- 2 ponts qui font partie des voiries territoriales ou communales ;
- 7 passerelles qui permettent d'accéder à des propriétés privées. Certains de ces ouvrages sont proches, notamment dans la basse vallée.

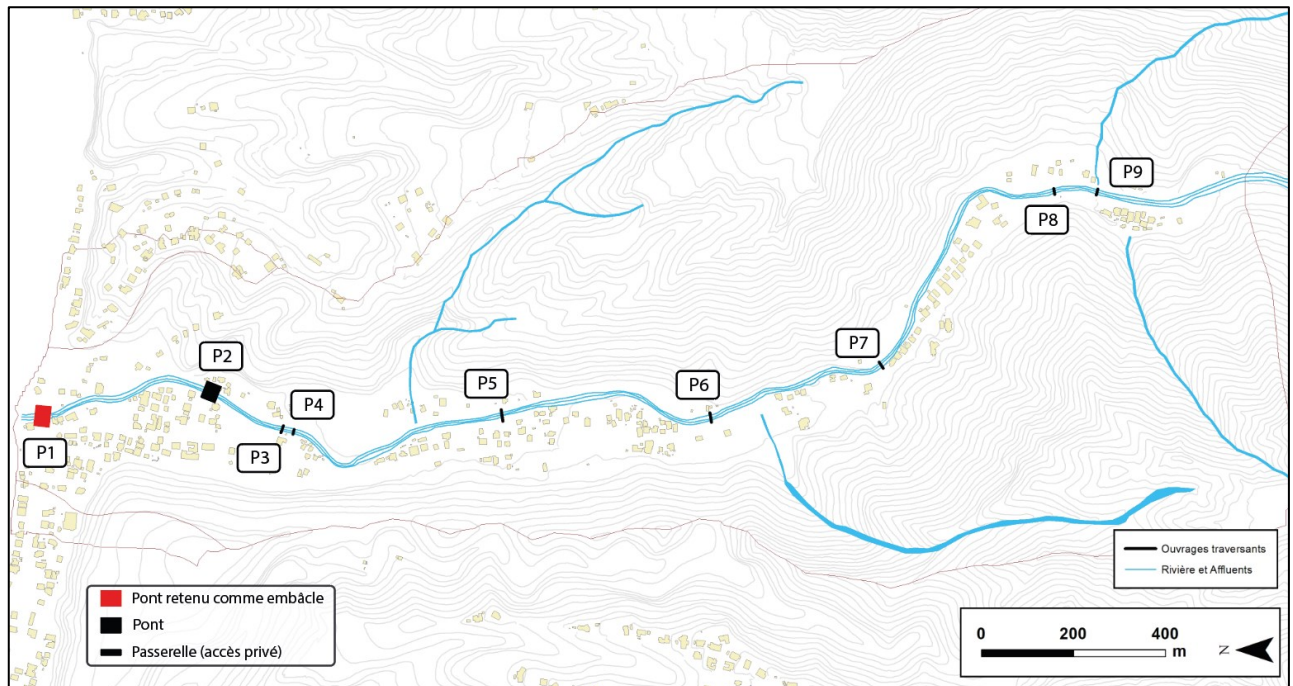


Figure 29 : Inventaires des ouvrages traversants sur la rivière de l'Ahonu.

Par rapport à la problématique des embâcles, nous considérons que seul le pont 1, celui de la route du littoral présente un risque lié à la constitution d'embâcle. Son tirant d'eau moyen est de 2.85 m (Figure 30 à Figure 32), alors que tous les autres ouvrages ont un tablier supérieur à 4 m ou plus par rapport au niveau du lit.

Le risque d'embâcle est ainsi modélisé sur le pont (P1) avec une obturation de 50 %.

Pont P1 :

Distance à l'exutoire : 63 m

Altitude au centre du lit : - 0.43 m

Simulation d'embâcles : 50 %

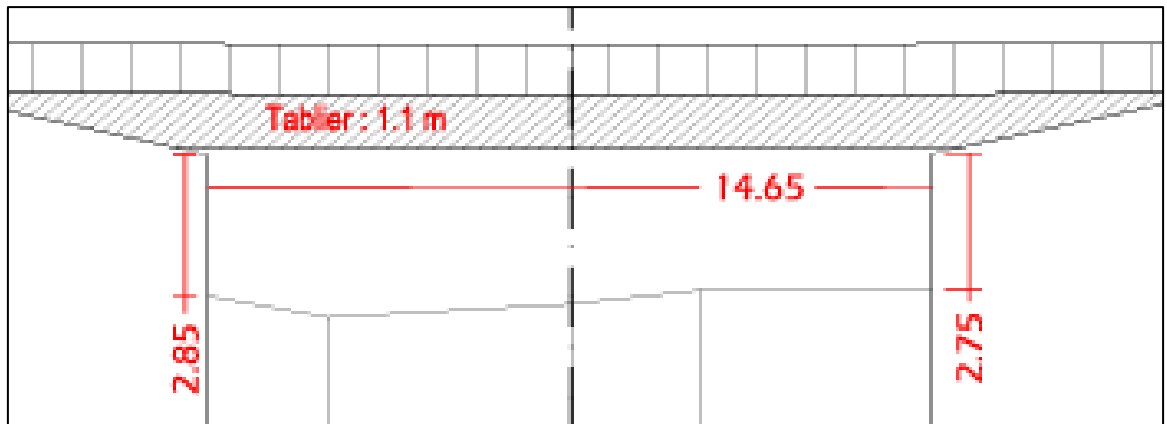


Figure 30 : Géométrie du pont P1 sur la route littorale à l'embouchure de la rivière Ahonu.



Figure 31 : Vu du pont 1 depuis l'amont.



Figure 32 : Observation sous le tablier du pont P1.

3.6. Scénarios des simulations

Une fois la modélisation construite et calée sur un débit de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, nous avons lancé plusieurs scénarios de crues pour identifier les points de débordement en fonction des évènements projetés et pour observer l'étendu des inondations potentielles :

- Q_{max} : crue maximale observée sur le cours d'eau ;
- Q_{10} : crue décennale avec un niveau aval normal (niveau de la mer à 0 m) ;
- Q_{50} : crue cinquantennale ;
- Q_{100} : crue centennale ;
- $Q_{100} + 1 \text{ m}$: crue centennale avec un niveau aval haut (surcote du niveau de la mer à + 1 m) ;
- $Q_{100} + 1.73 \text{ m}$: crue centennale avec un niveau aval haut + élévation du niveau marin à l'horizon 2120 (*surcote du niveau de la mer à +1 m et surélévation liée au changement climatique de +0,73 m*) ;
- $Q_{100} + 1 \text{ m}$ avec embâcle (partiel et/ou complet) : crue centennale avec un niveau aval haut (*surcote du niveau de la mer à + 1 m et prise en compte des embâcles partiels et/ou complets sous les ouvrages traversants*) ;
- $Q_{100} + 1.73 \text{ m}$ avec embâcle (partiel et/ou complet) : crue centennale avec un niveau aval haut + élévation du niveau marin à l'horizon 2120 (*surcote du niveau de la mer à + 1 m et surélévation liée au changement climatique de +0,73 m et prise en compte des embâcles partiels et/ou complets sous les ouvrages traversants*).

4. Résultats de la modélisation

4.1. Ecoulement et débordement

La capacité d'écoulement du lit de plein bord s'analyse à partir des profils en long du lit et du niveau de la hauteur d'eau dans chaque section. La Figure 33 permet de visualiser les résultats de la modélisation en suivant le profil longitudinal de la rivière. La topographie du lit est représentée par la ligne noire, la berge droite est en verte, la gauche en rouge. Pour une lecture plus précise, nous avons repris la division en 3 sections pour présenter le profil de la rivière et des crues simulés (cf. Section 2.5.2).

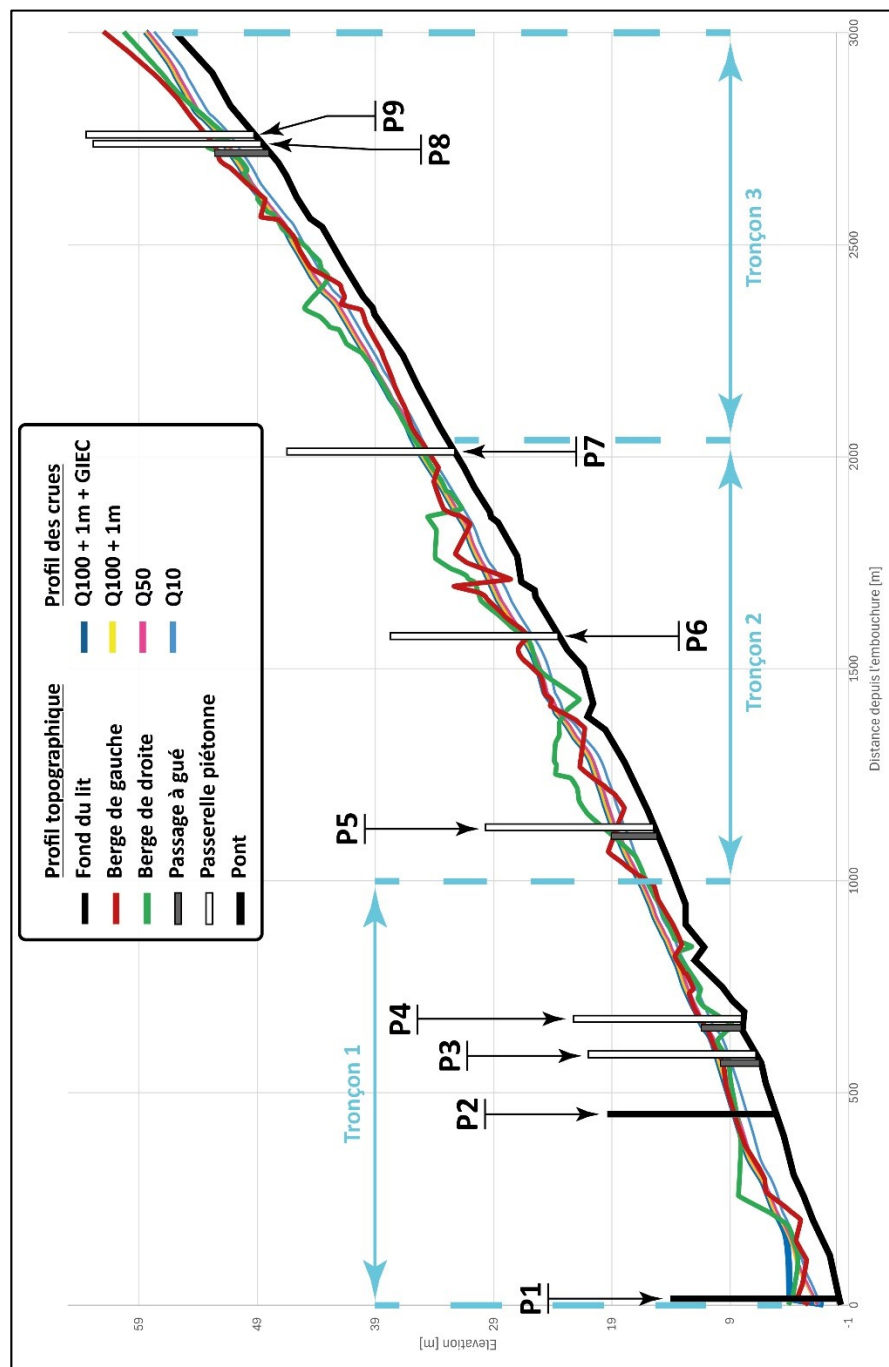


Figure 33 : Profil en long de la rivière de l'Ahonu sur 3 km à partir de l'embouchure.

4.1.1.1. Section 1

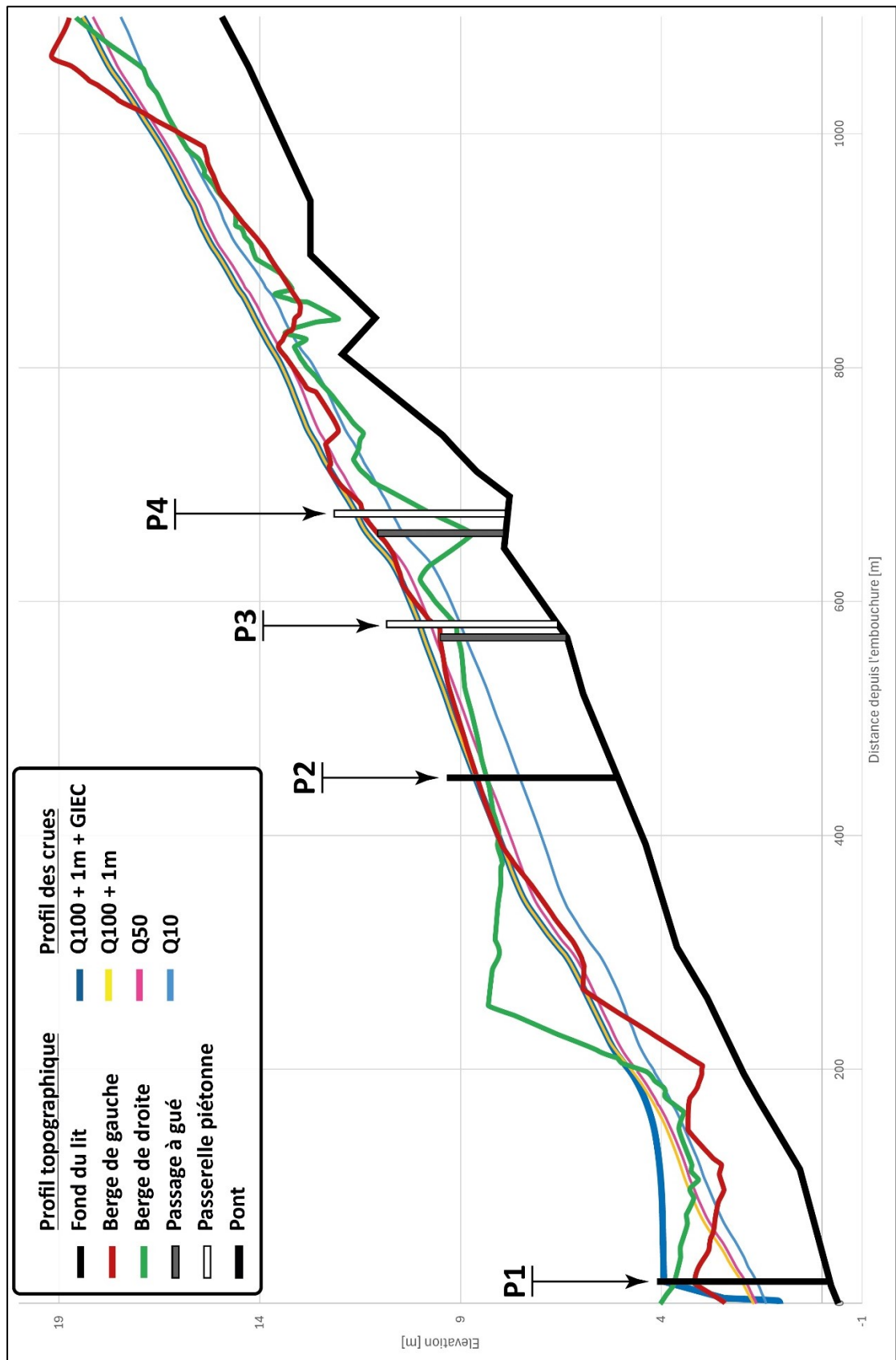


Figure 34 : Profil en long de la rivière de l'Ahonu - Section 1 (0 - 1 000 m).

Sur la première section, à partir de la ligne côtière, les débordements débutent à 1 km à l'amont, dès la crue décennale. Les berges présentent des profils très irréguliers qui descendent souvent sous la ligne d'eau modélisée. On note également des points de débordements au niveau des gués qui sont situés à proximité des passerelles P3 et P4.

L'amont du pont P1 est également une zone à risque avec, encore une fois, des berges trop basses par rapport au niveau d'eau attendu.

La projection d'une situation d'embâcle (50%) au niveau du pont P1 engendre une surélévation du niveau d'eau accentuant les débordements prévus pour les événements les plus critiques sous une crue décennale.

Les lignes d'eau des simulations intégrant l'élévation du niveau de la mer à + 0.73 m liée à la projection moyenne du GIEC renvoient le même résultat que les simulations n'intégrant pas cette surélévation. Cette situation est due à la hauteur de la ligne côtière au-dessus de la plage. Nous revenons sur ce point dans la partie « Interprétation des résultats ».

4.1.2. Section 2

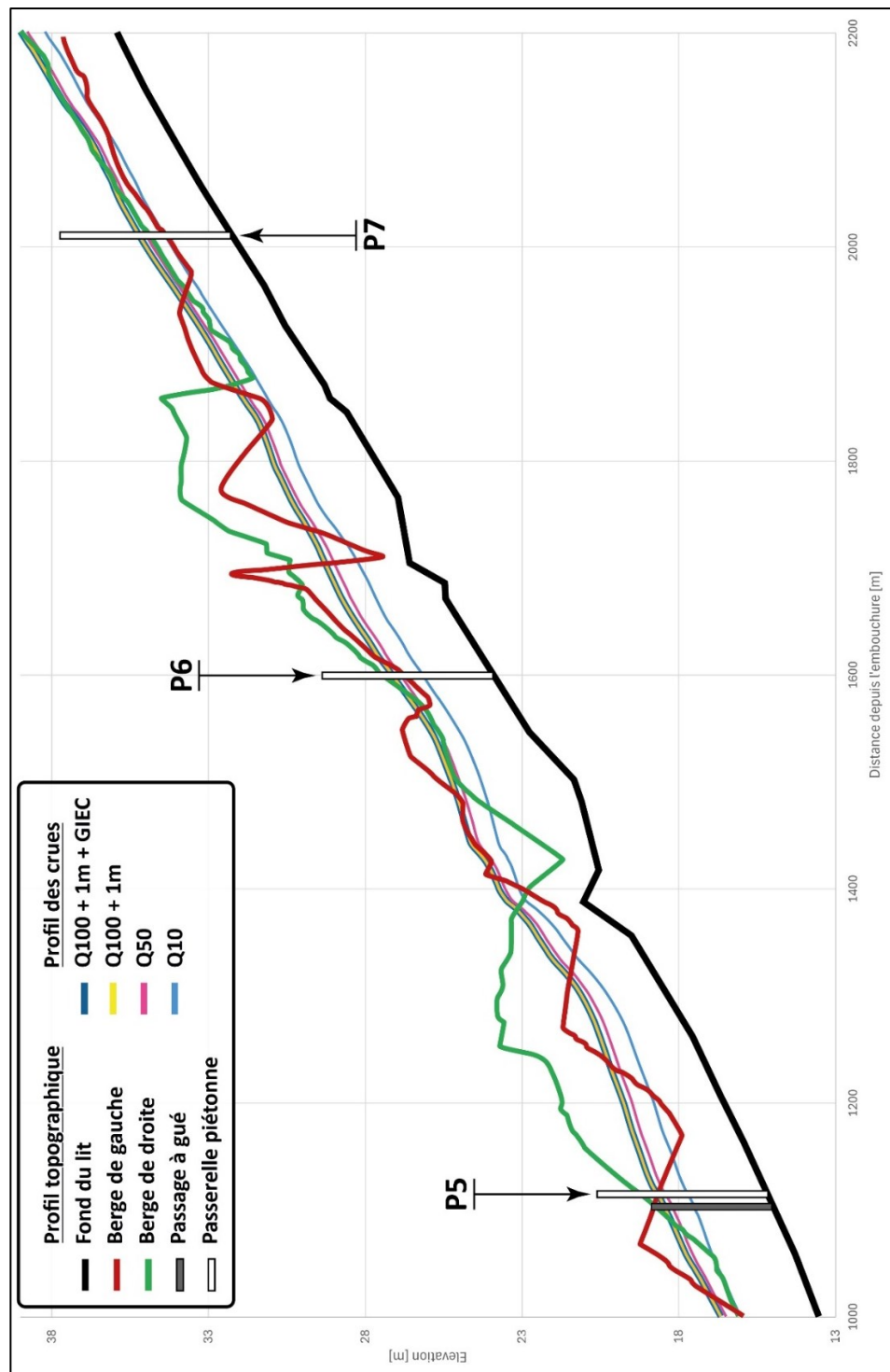


Figure 35 : Profil en long de la rivière de l'Ahonu - Section 2 (1 000 - 2 200 m).

Pour la seconde section, de 1 km à 2 km de l'embouchure, l'impression est assez similaire. Les profils des berges sont très irréguliers et les débordements interviennent dès que le haut de la berge est trop bas. Les passerelles P5, P6 et P7, n'aggravent pas particulièrement la situation.

A quelques points près, la crue décennale est, en revanche, relativement bien contenue. Les débordements sont beaucoup plus significatifs à partir d'un événement cinquantennal.

4.1.3. Section 3

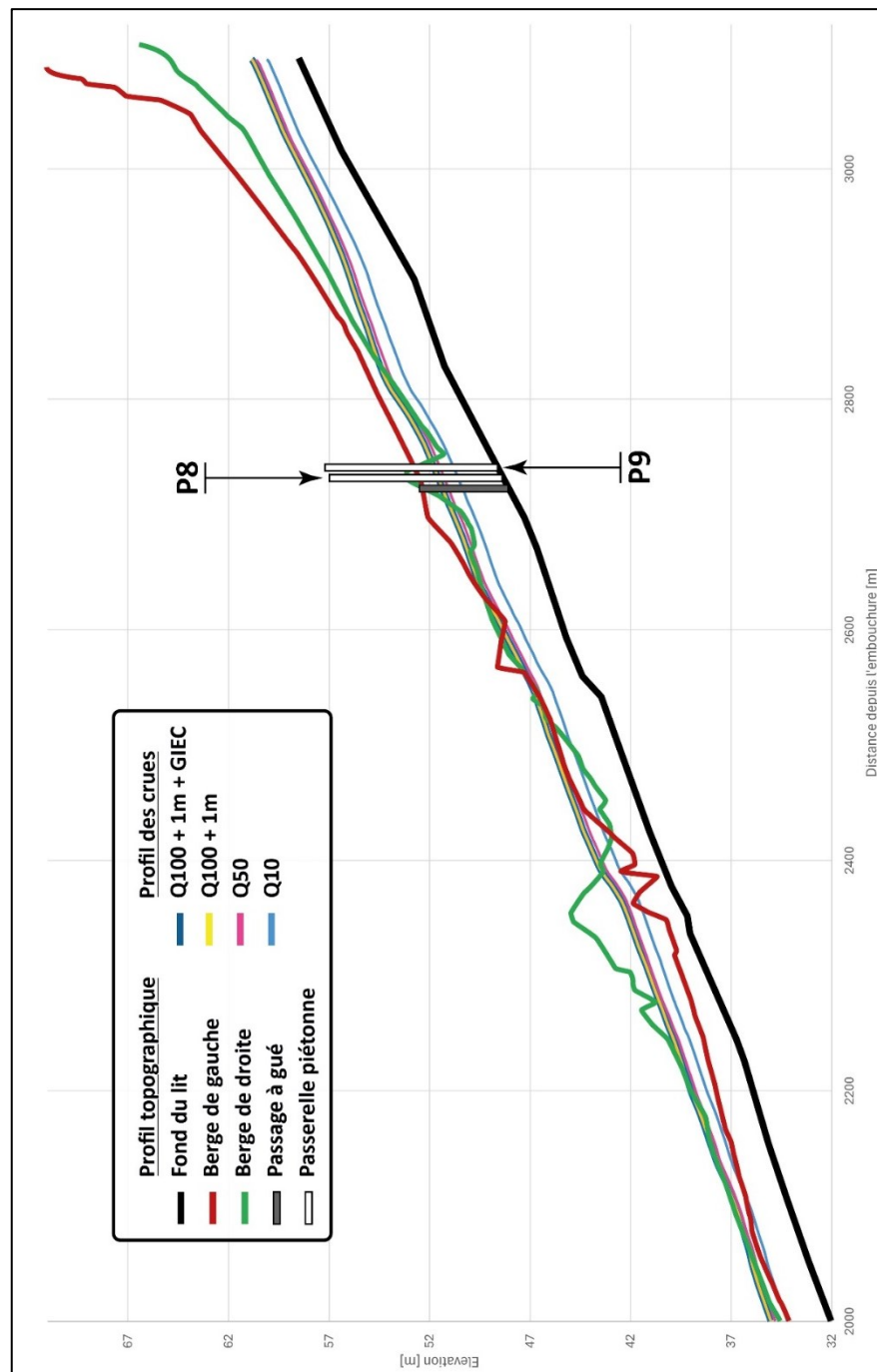


Figure 36 : Profil en long de la rivière de l'Ahonu - Section 3 (2 000 – 3 200 m).

La troisième section du lit, la plus à l'amont, est mieux calibrée. Les débordements se produisent sur la berge droite autour des passerelles P8 et P9, sur un tronçon de 150 m à partir de 2.5 km de l'embouchure en berge droite, puis sur 300 m en berge gauche.

Le profil des berges est plus régulier même si elle pourrait être réhaussée pour améliorer la situation et limiter les débordements.

4.2. Cartographie de l'aléa inondation

L'aléa inondation est mesuré sur une échelle de quatre niveaux : Faible, Moyen, Fort et Très Fort. Le rang s'évalue en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement obtenues pour la modélisation. Les règles de calcul sont rappelées dans le Tableau 2 :

Tableau 2 : Qualification de l'aléa inondation en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse de l'eau.

		Vitesse	
		Faible à moyenne $V \leq 0,5 \text{ m/s}$	Moyenne à forte $V > 0,5 \text{ m/s}$
Hauteur	$H < 0,5 \text{ m}$	Faible	Moyen
	$0,5 \leq H \leq 1 \text{ m}$	Moyen	Fort
	$H > 1 \text{ m}$	Fort	Très fort

Les cartes tirées des simulations numériques sont disponibles pour tous les scénarios dans l'atlas qui accompagne ce mémoire.

La qualification d'aléa des affluents est traitée à partir du linéaire dessiné par photo interprétation, en élargissant de 5 m de chaque côté. L'enveloppe générée est classée en risque très fort.

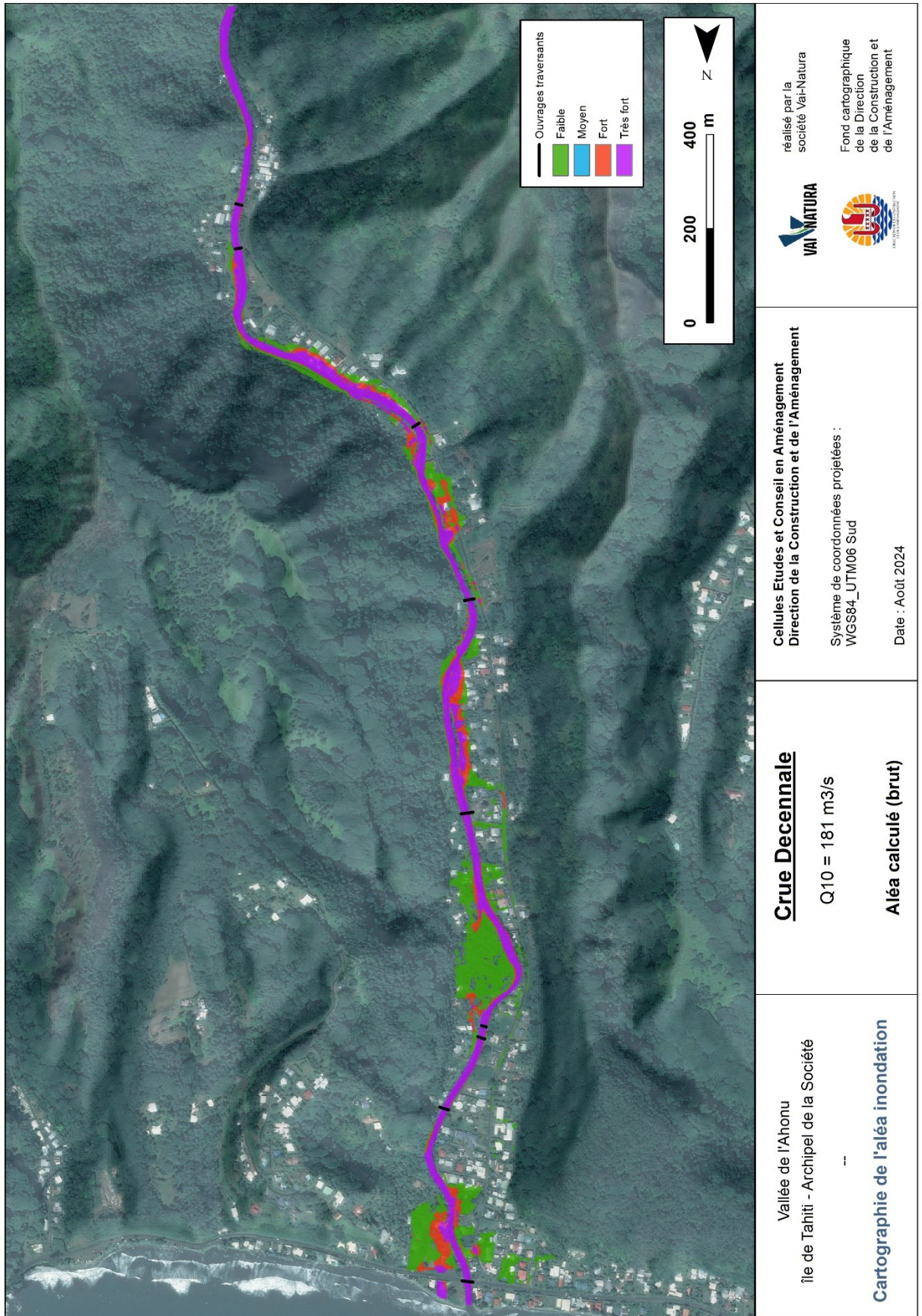


Figure 37 : Carte de l'aléa inondation pour la crue décennale (Q_{10}).

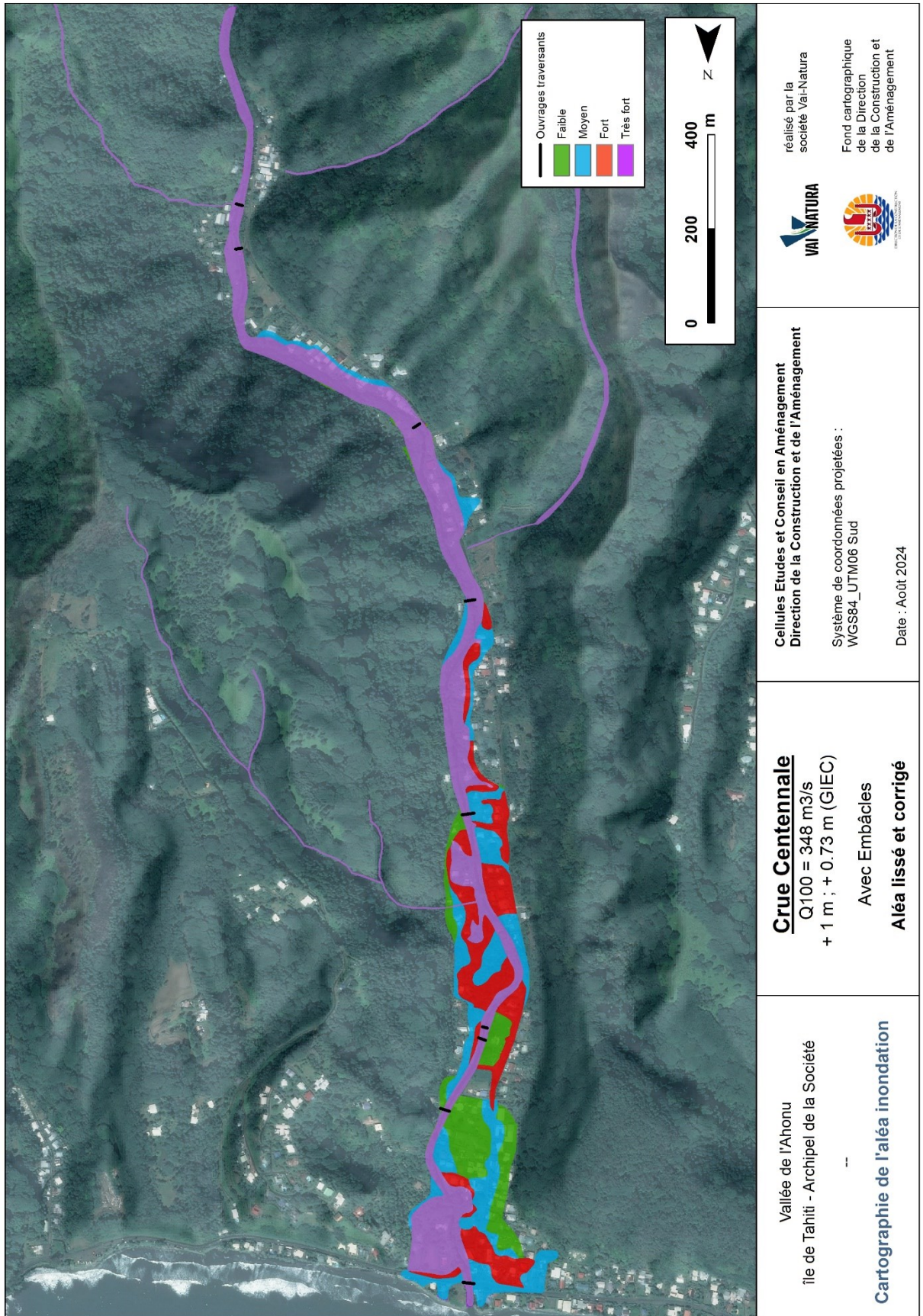


Figure 38 : Carte de l'aléa inondation pour la crue centennale (Q_{100})
+ Embâcles + Submersion (+1m) + Scénario GIEC (+0.73m)
Scénario le plus contraignant, avec résultats lissés.

4.3. Interprétation des résultats

L'analyse cartographique de la modélisation de l'Ahonu apporte des informations assez essentielles pour la gestion des risques dans la moyenne et surtout la basse vallée :

- La crue décennale est relativement bien contenue par le lit de la rivière. Même si plusieurs débordements sont observés. L'étendue des lames d'eau sur les rives est assez modérée avec des hauteurs faibles engendrant surtout un aléa faible. On note tout de même une situation plus critique en berge gauche, entre les passerelles P5 et P6. La vitesse est plus significative sur une bande de 30 m depuis le haut de berge classant une petite zone habitée en aléa fort. 4 habitations sont concernées (parcelles X64 et X67) ;
- En considérant le scénario le plus pénalisant, Q_{100} , la situation est plus problématique. Les débordements s'opèrent sur la presque totalité du linéaire à l'exception des 700 m les plus à l'amont. La vallée étant ensuite encaissée, la lame d'eau couvrent la presque totalité du lit majeur entre les 2 versants. Les terrains sont épargnés sur la rive gauche entre les passerelles P5 et P6. En revanche, à partir de l'ouvrage P5 et jusqu'à l'embouchure des inondations importantes sont à craindre avec tout de même des variations du risque qui dépendent de la proximité du lit et de la situation topographique des parcelles. Le niveau d'aléa est également moins impactant sur la rive gauche autour de l'embouchure à l'aval du pont P2 ;
- Il est important de noter que les simulations des scénarios intégrant une montée des eaux liée au dérèglement climatique (projection moyenne du GIEC : + 0.73 m) ne modifient pas les projections sans cette hypothèse. Le talus supportant la route de ceinture s'élève à plus de 2 mètres au-dessus de la plage, formant ainsi une protection contre cet aléa. La Figure 39 permet d'apprécier l'imperceptible variation entre les réponses du modèle pour ces différentes simulations.

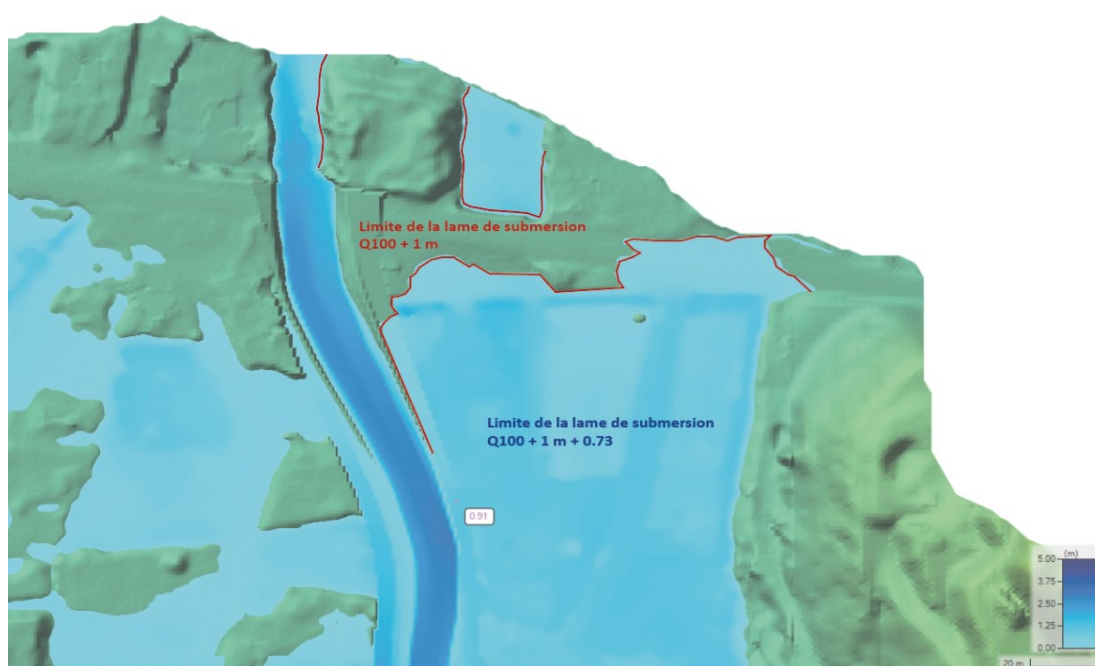


Figure 39 : Variations extrêmement légères entre les simulations d'une crue centennale intégrant, ou non, la montée des eaux liés au dérèglement climatique (élévation +0.73 - données GIEC).

Dans une synthèse globale, il apparaît que le lit de la rivière Ahonu ne peut contenir une crue avec une occurrence cinquantennale ou supérieure. Sur la quasi-totalité du tronçon étudié, l'espace d'écoulement s'avère insuffisant. Il semble que la raison principale soit l'hétérogénéité des hauteurs des berges par rapport au fond du lit. La présence des gués permettant aux véhicules de traverser la rivière à l'amont des 2 ponts ouvrent également des ouvertures dans les berges, où la crue peut s'échapper du lit et s'épandre sur les rives.

En revanche, il est important d'observer que la crue décennale est relativement bien contenue et que même dans les zones où des débordements sont prévisibles, le risque est modéré.

La précédente modélisation réalisée par EGIS - Eau en 2012 est assez similaire (Figure 40.) L'étendue de la zone inondable et les niveaux de risque associés sont assez similaires aux nouveaux résultats obtenus. Le lit ne contient pas suffisamment l'écoulement pour une crue rare, les débordements se produisent sur l'ensemble du linéaire. La configuration encaissée de la vallée engendre une couverture presque totale des rives habitées. Si certains tronçons de berges ont été traitées avec un enrochement, il apparaît qu'en cas de crue très importante ces ouvrages ne réduisent pas réellement le risque.

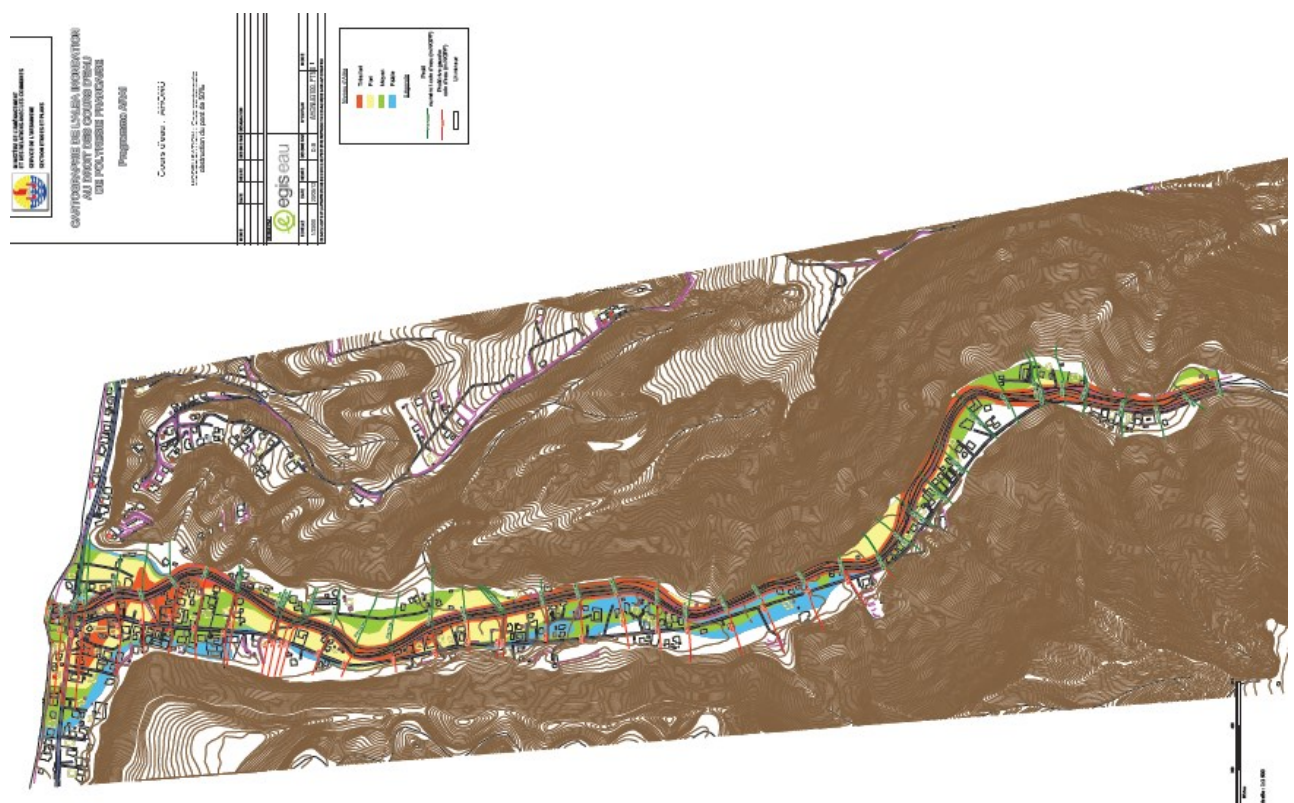


Figure 40 : Projection de l'aléa inondation (modélisation réalisée en 2012 - EGIS EAU).

5. Proposition d'aménagement

5.1. Diagnostic global

Les simulations réalisées sur la rivière Ahonu, en 2012 et 2024, montrent de manière cohérente que le lit moyen de la rivière ne suffit pas à contenir les crues exceptionnelles. Les débordements se produisent sur presque tout le linéaire, avec des niveaux d'aléa élevés. La configuration encaissée de la vallée, ainsi que l'étroitesse de la plaine entre les deux versants, expliquent en partie l'étendue de la lame d'eau qui envahit les rives habitées. En cas de crues importantes, peu d'espaces seront épargnés.

La mise en place de mesures de protection pour la rivière se heurte à plusieurs difficultés structurelles, difficiles à surmonter :

- De nombreuses habitations sont situées à proximité des hauts de berge, rendant l'élargissement du lit quasi impossible sans procéder à leur déplacement ;
- La majorité des berges est déjà renforcée par des enrochements, dont certains ont été posés il y a quelques années (Figure 41). Leur mise en œuvre semble répondre aux préconisations énoncées dans l'étude de 2012 (Figure 41). Malheureusement, nous constatons que la résilience face au risque d'inondation ne s'est pas significativement améliorée pour contenir les crues dont le temps de retour est supérieur à 50 ans. En revanche, les habitations dans la partie basse de la vallée, à proximité de l'embouchure, bénéficient d'une meilleure protection face à un évènement décennal.

Il paraît illusoire d'envisager une protection globale des zones habitées autour de cette rivière, compte tenu des contraintes précédemment évoquées. Les aménagements nécessaires seraient extrêmement coûteux pour un résultat probablement peu satisfaisant.

D'un point de vue hydraulique et en matière de gestion des risques, **la première recommandation** pour protéger les biens et les personnes serait de mettre en place une réflexion sur le long terme pour mieux protéger, et sans doute contraindre avec plus de limites, toute nouvelle construction dans les zones à très fort aléa. Les pouvoirs publics devraient même envisager la mise en œuvre d'arrêtés de péril ordinaire, imposant une mise en sécurité des bâtiments situés dans ces zones à très haut risque. **Une autre mesure qui pourrait être envisagée consiste à mettre en œuvre un programme d'urgence pour l'évacuation des populations vivant dans les zones à haut risque, lorsque des alertes météorologiques sont émises en cas d'événements extrêmes comme des tempêtes tropicales ou des cyclones.**

Il est évident que des contraintes majeures, telles que les oppositions sociales et la disponibilité foncière, rendent ce type de décision difficile à assumer.

Néanmoins, plusieurs dysfonctionnements hydrauliques et fragilités des berges ont été clairement identifiés. Des interventions ciblées peuvent être envisagées pour corriger certaines situations et améliorer localement la gestion du risque.



Figure 41 : Aménagement récent de la Berge Gauche, concave, dans le coude à 70 m à l'aval de la passerelle P6. Cet ouvrage répond aux recommandations de 2012, mais il ne permet toujours pas de contenir une crue cinquantennale.

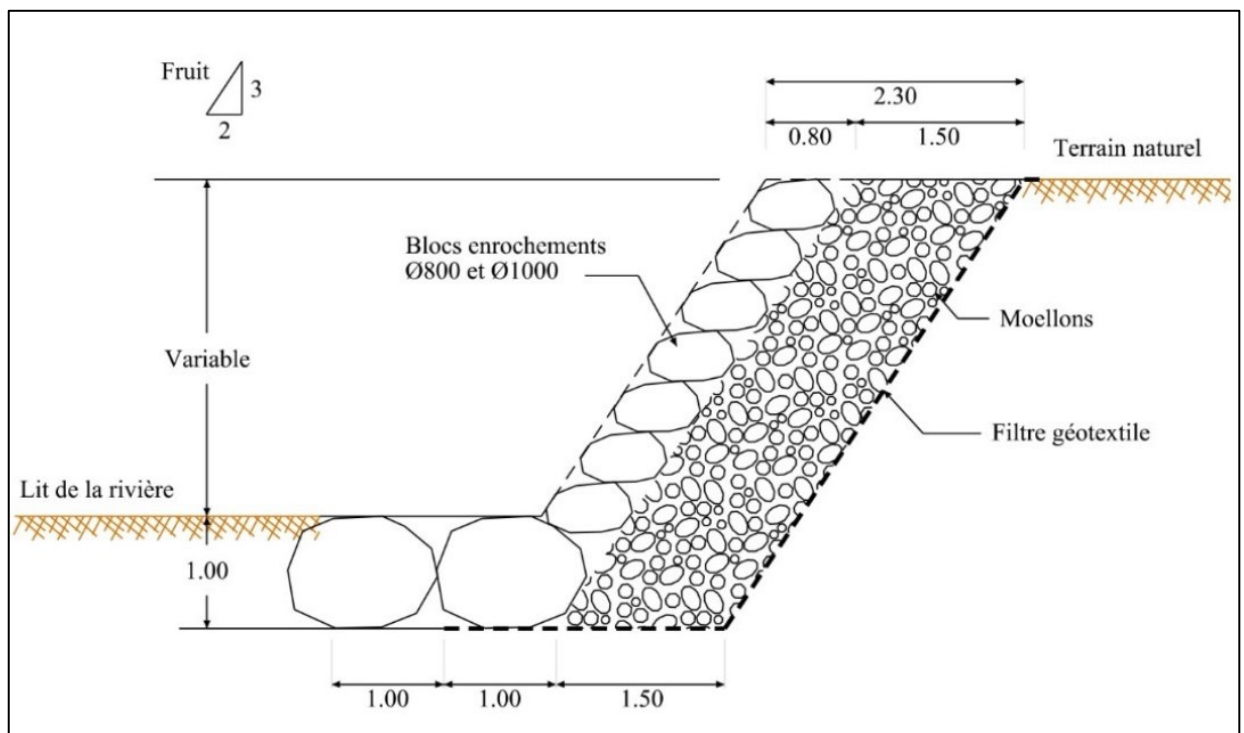


Figure 42 : Coupe type d'un enrochement de berge lorsque l'emprise est suffisante. Blocs non bétonnés.

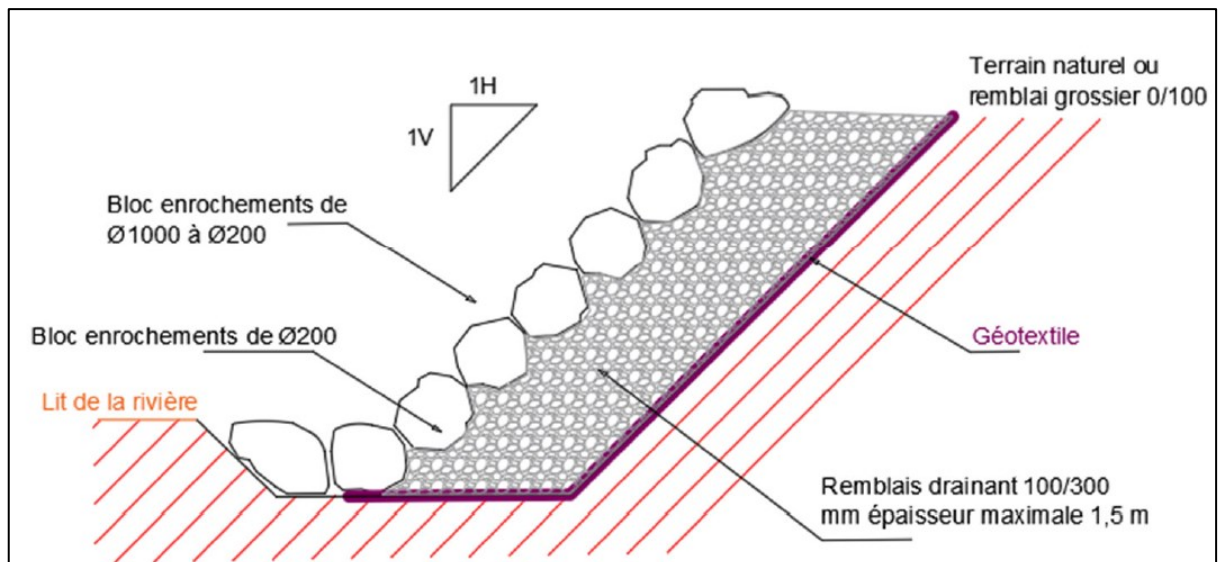


Figure 43 : Coupe type pour enrochement bétonné si l'emprise sur la rive est limitée.

5.2. Aménagements ciblés

Les aménagements localisés que nous proposons se résument en partie à la consolidation de certains tronçons de berges. Compte tenu des vitesses élevées d'écoulement et du fort transport solide dans la rivière, il est nécessaire de privilégier des solutions "dures", comme des enrochements ou des structures en béton. D'autres solutions plus souples sont difficilement envisageables en raison des enjeux limitant l'emprise disponible.

Sur certains tronçons, les fortes contraintes liées à l'occupation des sols, limitant la possibilité de taluter en déblai sur la berge, et la sensibilité aux inondations, restreignant le talutage en remblai dans le lit mineur, poussent à privilégier d'emblée des solutions à pente forte. Il convient cependant de ne pas négliger :

- Le coût plus élevé des ouvrages de soutènement ;
- La nécessité, dans tous les cas, de taluter en arrière des ouvrages pour réaliser des déblais provisoires, à moins de recourir à des blindages permanents ou définitifs. Ces travaux peuvent être particulièrement délicats si des bâtiments se trouvent immédiatement à proximité.

En fonction des situations (hauteur du talus, force de frottement, orientation de la berge, espace en haut de berges) la mise en protection des berges nécessitera l'application de techniques différentes. Soit des enrochements libres avec parafoilles pour renforcer la base de la berge si le fruit peut respecter un rapport de $2L/3H$, soit des techniques plus lourdes avec des enrochements bétonnés ou des murs poids, si le fruit de la berge est dans un rapport de $1L/1H$.

Plusieurs passerelles piétonnes ponctuent le lit de la rivière jusqu'à la fin de la zone habitée. Ces structures, installées par les riverains, présentent un risque en cas de forte crue, où elles pourraient être emportées. Bien que leur démantèlement puisse être envisagé, cela rendrait certaines habitations inaccessibles. De plus, la majorité de ces ouvrages n'ont probablement aucune existence légale, ce qui complique la détermination des responsabilités, qu'elles soient individuelles ou institutionnelles.

Par ailleurs, plusieurs gués permettent à certains véhicules de traverser le lit. Ces passages, par nature temporaires, sont susceptibles d'être emportés en cas de crue. Toutefois, il serait nécessaire d'intervenir sur les pentes d'accès, qui peuvent favoriser des débordements. Idéalement, les descentes devraient être orientées parallèlement au lit de la rivière, suivant un axe amont-aval. Cependant, le manque d'espace foncier rend souvent cette solution difficile à appliquer.

Les aménagements préconisés qui peuvent permettre d'améliorer la situation actuelle sont positionnés sur les cartes suivantes (Figure 37 et Figure 38) et détaillés en précisant un niveau de priorité de 1 à 3 et le coût estimatif. Le niveau de priorité est déterminé en fonction du risque inhérent, c'est-à-dire en tenant compte à la fois du degré de l'aléa et des enjeux, notamment le nombre d'habitations concernées.

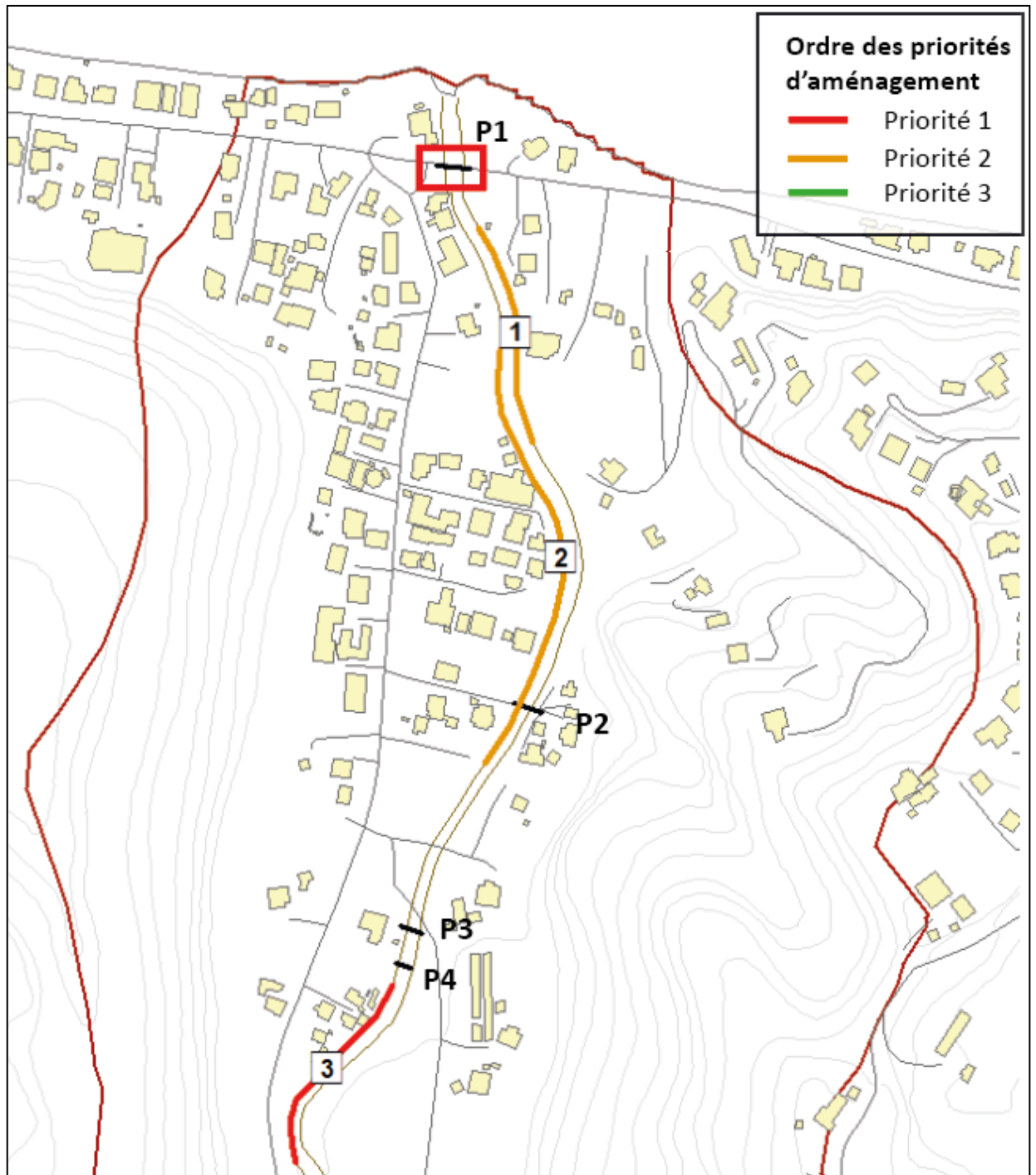


Figure 44 : Cartes des aménagements envisageables sur la section aval de la zone habitée - rivière Ahonu.

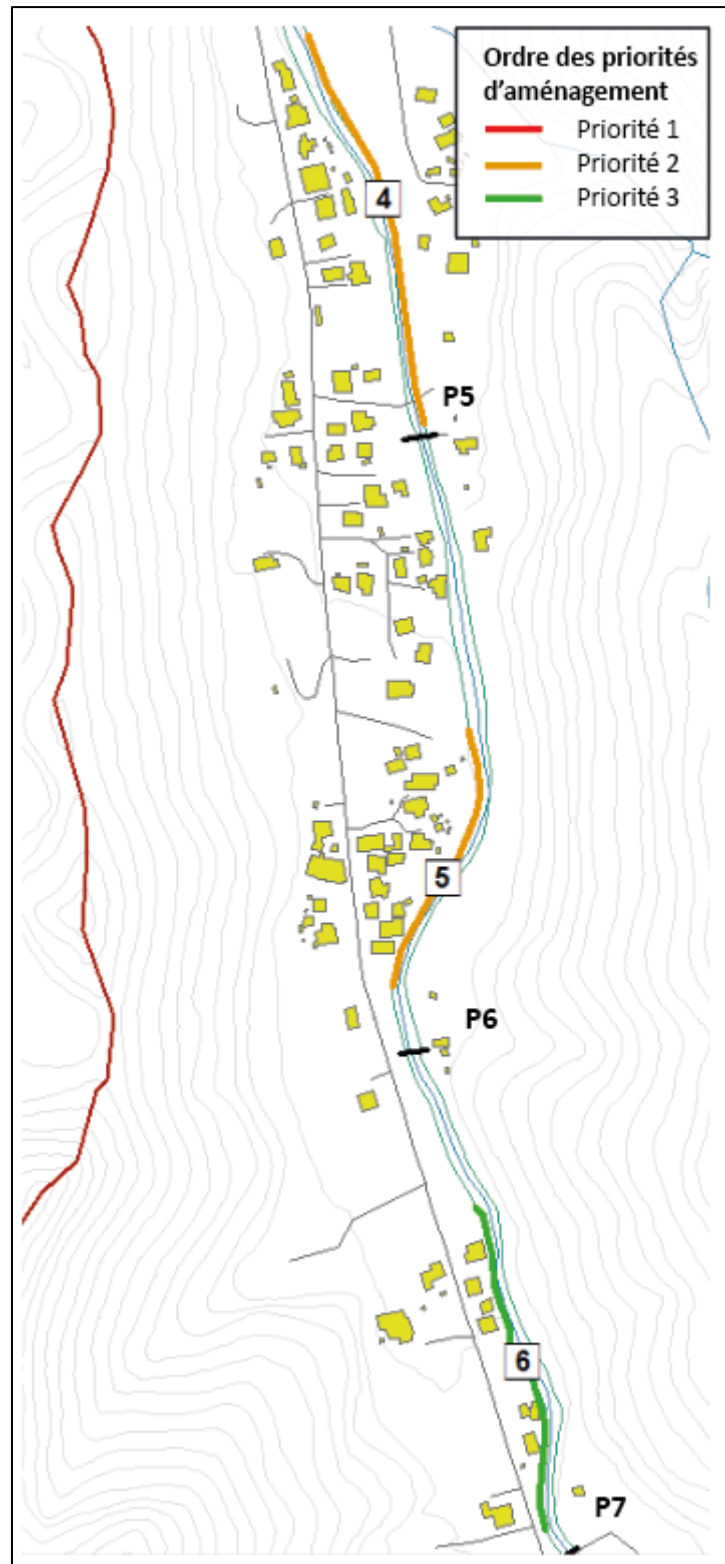


Figure 45 : Cartes des aménagements envisageables sur la section aval de la zone habitée - rivière Ahonu.

Ouvrage	Utilité	Description des travaux	Coût estimé
<p>RT1 Pont de la Route Territoriale <i>Priorité : niveau 1</i></p>	<p>Cet ouvrage d'importance pose un problème essentiellement en cas de constitution d'un embâcle. Aujourd'hui le tirant d'eau est trop faible et la base de son tablier se trouve sous les hauteurs de berge. Le risque d'embâcle est donc sérieux.</p> <p>Nous préconisons une rehausse de 1.25 m pour atteindre le niveau des hauts de berge en ajoutant 50 cm de tirant d'air.</p>	<p>- Dépose et reconstruction du pont</p> <p>Les travaux sont importants, ils imposeront notamment la construction d'un ouvrage temporaire pour dévier la circulation pendant la phase de travaux.</p>	100 M
<p>Tronçon 1 Reprise de la berge droite, tout près de l'embouchure <i>Priorité : niveau 2</i></p>	<p>L'ouvrage doit être repris en s'appuyant sur une structure de berge en enrochement bétonné avec un structure de renforcement de pied de berge. <i>Linéaire : 154 m</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dépose de la berge existante - Reprise de la pente - Pose d'un géotextile - Pose de blocs d'enrochement (> Ø200 en augmentant à Ø1000 pour la sécurisation du pied de berge) - Ancrage des blocs en pied de berge sur 50 cm pour le niveau du lit. - Cohésion des blocs par du béton 	30 à 35 M
<p>Tronçon 2 Reprise de la berge gauche pour protéger la zone la plus occupée de la basse vallée <i>Priorité : niveau 2</i></p>	<p>L'ouvrage doit être repris et uniformisé en s'appuyant sur une structure de berge en enrochement bétonné avec une structure de renforcement de pied de berge. <i>Linéaire : 300 m</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dépose de la berge existante - Reprise de la pente - Pose d'un géotextile - Pose de blocs d'enrochement (> Ø200 en augmentant à Ø1000 pour la sécurisation du pied de berge) - Ancrage des blocs en pied de berge sur 50 cm pour le niveau du lit. - Cohésion des blocs par du béton 	60 à 70 M
<p>Tronçon 3 Reprise de la berge gauche, tout près de l'embouchure <i>Priorité : niveau 1</i></p>	<p>La berge gauche est la berge concave d'un coude prononcé de la rivière. C'est un point de débordement problématique. A partir de là, le débordement s'étend sur une zone habitée. Toute la berge doit être reprise. <i>Linéaire : 150 m</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dépose de la berge existante - Reprise de la pente - Pose d'un géotextile - Pose de blocs d'enrochement (> Ø200 en augmentant à Ø1000 pour la sécurisation du pied de berge) - Ancrage des blocs en pied de berge sur 50 cm pour le niveau du lit. - Cohésion des blocs par du béton 	35 M

Ouvrage	Utilité	Description des travaux	Coût estimé
<p>Tronçon 4 Reprise de la berge droite, tout près de l'embouchure <i>Priorité : niveau 2</i></p>	<p>L'ouvrage doit être repris en s'appuyant sur une structure de berge en enrochement libre avec une structure de renforcement de pied de berge. <i>Linéaire : 300 m</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dépose de la berge existante - Reprise de la pente - Pose d'un géotextile - Pose de blocs d'enrochement (> Ø200 en augmentant à Ø1000 pour la sécurisation du pied de berge) - Ancrage des blocs en pied de berge sur 50 cm pour le niveau du lit. 	50 M
<p>Tronçon 5 Protection du pied de berge gauche <i>Priorité : niveau 2</i></p>	<p>Points de débordement sensible sur la berge concave d'un coude de la rivière. L'ouvrage de protection en enrochement bétonné est récent. Des signes d'affouillement sont visibles en pied de berge, il faut les renforcer. <i>Linéaire : 200 m</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Sécurisation du pied de berge en ancrant des blocs Ø1000 sur 50 cm sous le niveau du lit. 	20 M
<p>Tronçon 6 Reprise de la berge gauche, tout près de l'embouchure <i>Priorité : niveau 3</i></p>	<p>L'ouvrage doit être repris en s'appuyant sur une structure de berge en enrochement libre avec un structure de renforcement de pied de berge. <i>Linéaire : 250 m</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dépose de la berge existante - Reprise de la pente - Pose d'un géotextile - Pose de blocs d'enrochement (> Ø200 en augmentant à Ø1000 pour la sécurisation du pied de berge) - Ancrage des blocs en pied de berge sur 50 cm pour le niveau du lit. 	40 M

5.3. Entretien des berges et des abords du cours d'eau

L'entretien de la végétation et de tout type de déchets mobiles sur les berges et des abords du cours d'eau nous semble essentielle pour réduire très significativement le risque d'embâcle à l'aval.

Pour un suivi régulier et un entretien efficace, il est recommandé qu'un spécialiste passe tous les deux mois sur le tronçon habité de la rivière, jusqu'à 500 m en amont, pour évaluer les risques et marquer les arbres nécessitant une coupe ou un élagage et les déchets mobiles pouvant s'être accumulés (carcasses de voiture, déchets de construction, électroménager, ...). Une équipe aura ensuite la charge des travaux. Tous les déchets collectés ou produits (végétation coupée) devront être évacués le même jour vers une déchèterie spécialisée.

En suivant régulièrement ces actions d'entretien, il est prévu que le travail deviendra progressivement plus facile et plus rapide, car les risques seront identifiés et traités plus tôt.

Les efforts humains et financiers n'apparaissent pas excessifs pour un impact sur le risque lié à l'aléa inondation très significatif.

Le budget annuel alloué à l'entretien de la rivière de l'Ahonu est estimé entre 15 à 20 M par an.

6. Conclusion

A Nord de l'île de Tahiti, la vallée de l'Ahonu s'allonge sur un axe Sud-Nord sur environ 10 km. De forme oblongue le bassin versant couvre une superficie de 13.1 km². Sa largeur maximum est de 2.3 km dans la haute vallée, elle descend à 500 m vers l'aval où la vallée est plus encaissée. La vallée s'ouvre ensuite sur l'embouchure sans traverser de grande plaine alluviale comme cela est souvent le cas sur les zones côtières au nord-ouest et à l'ouest de l'île.

Lors d'événements météorologiques particulièrement intenses, le lit de la rivière déborde, submergeant presque entièrement les rives. Malgré un renforcement significatif des berges, les débordements ne sont pas maîtrisés lorsque les débits dépassent une occurrence décennale.

Les risques sont importants autour du lit de cette rivière. En dépit des efforts d'ingénierie civile et des investissements conséquents, la situation ne s'améliore pas de manière significative. L'espace d'écoulement est insuffisant, et les constructions trop proches des berges empêchent toute alternative viable.

Il est certes possible d'intervenir ponctuellement pour stabiliser un tronçon de berge, mais les débordements restent récurrents.

Du point de vue de la gestion des risques et de la protection des biens et des personnes, il serait sans doute nécessaire de mettre en place une réflexion sur le long terme pour mieux protéger, et sans doute contraindre avec plus de limites, toute nouvelle construction dans les zones à très fort aléa. Il serait même nécessaire de prendre des arrêtés de péril ordinaire, imposant une mise en sécurité des bâtiments situés dans ces zones à très haut risque. Toutefois, une telle décision se heurterait sans doute à de fortes oppositions sociales et à la question de la disponibilité foncière.

Pour terminer rappelons les limites de la modélisation qu'il faut garder en mémoire lors de l'analyse des résultats :

- Une modélisation qui est une projection numérique de la réalité, elle est intrinsèquement approximative. Le traitement des données d'entrée impose des choix de simplification temporelles et spatiales ;
- La projection du dérèglement climatique n'a pas été prise en compte dans le calcul des débits qui ne sont basés que sur des statistiques historiques ;
- Les bâtiments ne sont pas intégrés dans le modèle. Les temps de retour des crues les plus rares ne sont pas en adéquation avec la temporalité des constructions ;
- En cas d'inondation, des flux d'écoulement de surface peuvent d'être impactés par les obstacles urbains ponctuels. Les observations seront sans doute légèrement différentes des projections numériques.

7. Bibliographie

Barbry Y., 2002. Application des techniques végétales pour la protection des berges des voies navigables. Voies Navigables de France. Direction de l'Infrastructure et de l'Environnement. Pp. 24.

CETMEF, CIRIA, CUR (2009). Guide enrochement. L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. Version française du *Rock Manual*. Editeur CETMEF Compiègne, pp. 1302.
<http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>

Danloux J., Ferry L., Villot R., 1983. Répertoire des crues maximales observées sur l'île de Tahiti. ORSTOM, Service Hydrologie. Fonds Documentaire IRD, cote BX22122, pp. 6.

Degoutte G., 2012. Diagnostic, aménagement et gestion des rivières. Hydraulique et morphologie fluviales appliquées. 2^e édition. Edition Lavoisier, Paris. Pp. 542.

EGIS, 2020. Etude hydraulique franchissement de la rivière Tiirahi dans le cadre des JO 2024 - commune de Teahupoo, ile de Tahiti. Direction de l'Equipement. Bureau d'Etudes Génie Civil.

EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne), 2008. Aménagements de cours d'eau. Laboratoire de constructions hydrauliques.
<https://documents.epfl.ch/groups/l/lc/lch-unit/www/pdf/support/ace/>

Evette André, Baz Frank, Cavaillé Paul, Frossard Pierre-André, Raymond Pierre, 2015. Quelles techniques pour végétaliser des enrochements de berges de cours d'eau ? Sciences Eaux & Territoires, revue hors-série n°19. IRSTEA, Pp. 7.

Lachat B., 1994. Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales - Ministère de l'Environnement, France. Pp. 143.

Lafforgue A., 1987. Annales hydrologiques de l'île de Tahiti de 1971 à 1986. Edition de l'ORSTOM. Service de l'Equipement de la Polynésie française. BP. 85 Papeete, Tahiti, Polynésie française. pp. 298.

Lafforgue A., 1990. Les rivières de Tahiti et la mesure de leurs débits. Encyclopédie de la Polynésie I, les îles océaniques. Christian Gleizal / Les Editions de l'Alizé, pp. 41-56.

Malavoi J.R., 2007. Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau. Direction de L'Eau, des Milieux Aquatiques et de l'Agriculture (DEMAA), Service eaux de surface. Agence de l'eau, Seine Normandie. Pp. 64.

Royer P., Degoutte G., Deymier C., Durand J.-M., Peyras L., 1992. Les ouvrages en gabions. CEMAGREF et Ministère de la Coopération et du Développement, pp. 160.

SPEED, 2000. Cartographie de l'aléa inondation dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Naturels de Polynésie française. Rapport d'étude. Service de l'Urbanisme.

Vernier G., 2009. Techniques végétales. Conception, application, recommandations. Direction des Cours d'Eau Non Navigable. Service Public de Wallonie, Belgique. Pp. 66.

Wötling G., 1998. Etude de l'Aléa Pluviométrique à Tahiti, ORSTOM Centre de Tahiti, pp.74.

Wötling G., 2000. Caractérisation et Modélisation de l'Aléa Hydrologique à Tahiti. Rapport de synthèse, IRD, pp. 309.

8. Annexes

8.1. Modélisation hydraulique en rivière - Principes théoriques

8.1.1. Description

La modélisation des écoulements dans un bassin versant s'appréhende sous deux approches. La première, l'analyse hydrologique, se concentre sur la question du cycle de l'eau, les apports (pluie, ressources souterraines) et la dynamique des flux de la ressource naturelle. L'influence des modifications climatiques et environnementales est prise en compte dans ces investigations. Les sujets traités sont variés allant de la description des événements extrêmes (crues, étiages) à la caractérisation complète des échanges hydriques à l'échelle d'une zone contributive, généralement le bassin versant.

La seconde, l'approche hydraulique, cherche à décrire les phénomènes en jeu lorsque l'eau est canalisée, naturellement dans le lit d'une rivière ou à travers un ouvrage artificiel. La modélisation numérique permet, dans cette spécialité, de dimensionner les ouvrages hydrauliques (canaux, vannes, exutoires, barrages), les réseaux d'adduction ou d'assainissement. Elle est aussi efficace pour simuler la propagation des crues et cartographier l'aléa inondation. C'est ce dernier sujet qui est ici exploitée.

Les modèles physiques en général, hydrologiques et hydrauliques en particulier sont de trois types. Les **modèles empiriques** ou stochastiques basés sur des mesures passées et des relations statistiques entre les données d'entrées et les données de sorties. Leur application nécessite des volumes de données conséquents sur de longues périodes. Ils sont aussi généralement liés à une zone d'étude spécifique. Un changement de lieu entraîne une modification des paramètres de causalité. Les **modèles conceptuels** s'appuient quant à eux sur une approche théorique des phénomènes physiques, ils cherchent à reproduire les concepts physiques en simplifiant la complexité des processus naturels. Ces modèles conservent un sens physique même si les paramètres n'ont pas toujours de signification physique. La phase de « calage » est alors une étape particulièrement sensible dans ce type de méthodes. Enfin les **modèles mécanistes** tentent de décrire fidèlement les mécanismes en jeu dans un processus physique. Ils s'appuient sur les lois universelles de conservations de masses, d'énergie ou de mouvement. Ils sont, à priori, moins sensibles au calage des paramètres.

Ces modèles mécanistes sont particulièrement bien adaptés à la dynamique des écoulements superficiels où les processus physiques sont bien représentés. Ils ont aussi la qualité de s'adapter aux modifications environnementales ou anthropiques de la zone d'étude. Ils permettent enfin d'évaluer les impacts d'un futur ouvrage sur les écoulements dans une simulation préalable à la mise en œuvre du projet.

Pour décrire les écoulements en rivière ou en canal, le modèle hydraulique cherche à reproduire la propagation des débits entre deux points amont et aval, c'est-à-dire sur un tronçon de rivière. Le principe général pour étudier une rivière est de la diviser en tronçons où les caractéristiques hydrauliques (débit, vitesse, direction) et hydromorphologiques (pente, profil, rugosité) sont considérées comme homogènes.

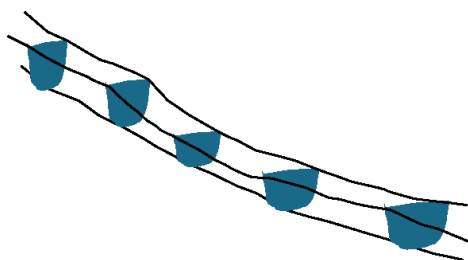


Figure 46 : Représentation schématisée d'un profil en long d'un cours d'eau à modéliser.

Dans la pratique les paramètres hydrauliques sont évalués dans les sections transversales (amont et aval) de chaque tronçon. L'opération est reproduite sur chaque tronçon pour couvrir la totalité du linéaire à étudier. La propagation des débits intègre aussi une discrétisation temporelle.

La Figure 46 est une représentation schématisée d'un tronçon de rivière entrecoupé de profils transversaux.

Pour chaque section transversale (Figure 47), cinq variables principales sont exprimées : la hauteur d'eau, h ; la vitesse moyenne de l'eau, V ; le périmètre mouillé, $P(h)$; la surface ou section mouillée, $A(h)$; et enfin, la perte de charge par frottement, h_f . La pente de frottement $S(h)$, est enfin un autre paramètre important influençant la vitesse d'écoulement entre deux sections.

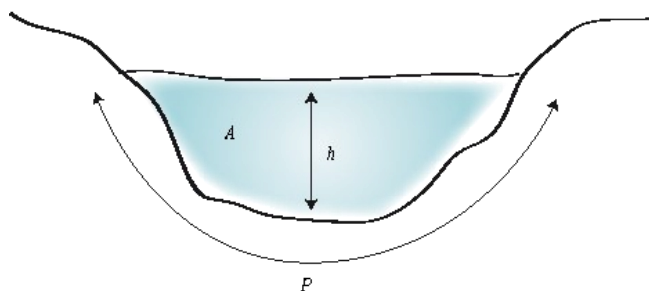


Figure 47 : Section transversale d'un cours d'eau.

Les modèles mécanistes utilisent les équations de conservation de matière et d'énergie, ou équations bilans. En hydrodynamique, elles sont connues sous le nom d'équations de Barré Saint-Venant (1871). Les méthodes numériques résolvent généralement ce système par différences finies.

Il n'est pas utile de rentrer ici dans les détails algébriques. Le modélisateur doit cependant comprendre le fonctionnement d'un modèle pour mieux évaluer les données d'entrées nécessaires et de conserver un regard critique sur les résultats. Toutefois quelle que soit la solution choisie, un modèle reste l'approximation d'un phénomène réel et l'ingénieur doit toujours se demander à quelle représentation du réel il a dû renoncer.

8.1.2. Modèle 1D ou 2D

La modélisation hydraulique peut prendre en compte un écoulement unidimensionnel dans un seul sens, avec une même vitesse, entre deux sections amont et aval, ou un écoulement multidirectionnel sur deux dimensions. Les conditions d'application de chaque approche dépendent du terrain, des données disponibles, des objectifs de la modélisation et enfin de la puissance de calcul disponible. La littérature est prolixe sur ce sujet (e.g., Hingray et al., 2009 ; Brunner, 2016).

La **modélisation en 2 dimensions** s'applique lorsque les écoulements peuvent se croiser et engendrer une dynamique plus complexe que le ruissellement simple de l'amont vers aval. Ce choix est favorisé en zone d'estuaire ou dans des baies avec une faible pente, lorsque le lit est large et la vitesse d'écoulement lente. Son application nécessite une grande précision dans les données d'entrée, l'information topographique influence particulièrement le sens des écoulements. La zone d'étude doit être discrétisée par un maillage plus ou moins resserré. Les temps de calcul sont en conséquence de durées variables, mais jamais négligeables.

La **modélisation unidimensionnelle** s'applique plus volontiers sur des cours d'eau moins larges, présentant une dénivellation importante et ne disposant que de petites zones de débordement sur son parcours. Il est également plus aisé de schématiser un système hydraulique complexe, avec plusieurs ouvrages (ponts, digues, jonctions, canal de franchissement) sur une dimension. La relative rareté des données disponibles peut également amener à choisir la modélisation 1D.

Il existe également des **modèles d'écoulement « quasi 2D »** ou modèles « à casiers ». L'écoulement est toujours unidimensionnel dans le lit de la rivière. Sur les berges des zones inondables identifiées, hors du lit majeur, sont des « aires de stockages » ou « casiers ». Les équations prennent alors en compte le stockage, puis le déstockage de ces espaces depuis et vers la rivière. Un temps de latence et le coefficient de rugosité permettent de simuler un écoulement différencié de l'écoulement unidimensionnel de la rivière. Moins gourmand en temps de calcul que les modèles 2D stricts, cette solution est préconisée pour les rivières serpentant dans des plaines relativement larges ou présentant au moins quelques îlots alluvionnaires. En revanche, ces modèles imposent une bonne connaissance des échanges entre le lit principal et les casiers au risque d'induire un résultat très artificiel.

La cartographie de l'aléa inondation est un outil de projection et d'aide à la décision très utile. Une dernière solution est utilisée pour obtenir ce résultat, une **modélisation 1D/2D**. Elle consiste à coupler une modélisation de l'écoulement en 1D pour l'écoulement dans le lit de la rivière qui permet d'obtenir des hauteurs d'eau et donc des seuils de débordement, avec une modélisation en 2D pour certaines zones où les risques d'inondation sont importants (e.g., exutoires, plaines alluviales, zones urbanisées). La topographie des lieux fait partie des données initiales indispensables pour obtenir une représentation spatiale des zones inondables en fonction de l'aléa. Cependant, elle impose de travailler avec un régime transitoire. En 2D, le flux s'écoule d'une cellule à une autre ce qui impose une évolution des volumes dans le temps, sinon un point bas enregistrerait un volume d'eau infini. Les données hydrologiques ne sont pas toujours disponibles restreignant l'usage de cette stratégie mixte.

Le logiciel choisi pour modéliser la rivière a été développé par le corps des ingénieurs de l'armée américaine au sein de la structure « Hydrologic Engineering Center » (HEC). HEC-RAS est largement utilisé par les Universités, les administrations publiques et les bureaux d'étude dans de très nombreuses situations à travers la planète depuis sa publication en 1995 (Brunner, 2016). Sa réputation s'est fondée sur la robustesse de ses méthodes de résolution numérique, lui permettant de fonctionner sur une large gamme de contexte hydrologique, et sur sa grande efficacité notamment dans des situations où la couverture des données hydrologiques est insuffisante. Situation souvent rencontrée dans l'univers polynésien.

Le modèle est un outil de calcul. La modélisation, elle, dépend d'un nombre de paramètres variés, liés aux conditions du terrain, la qualité et la représentativité des données existantes ou pouvant être acquises. La disponibilité des données hydrologiques et leur représentativité jouent en ce sens un rôle essentiel.

8.1.3. Régimes transitoire et permanent.

La différence entre l'analyse d'un profil de rivière en régime transitoire et en régime permanent réside dans la description des conditions limites. Pour un régime permanent, c'est un débit fixe qui est évalué, dans le cas d'un régime transitoire la modélisation s'appuie sur la fonction de l'hydrogramme de crue qui représente l'évolution des débits en fonction du temps. La cinétique de l'hydrogramme de crue est spécifique à chaque cours d'eau, elle représente la signature de la rivière et plus largement du bassin versant contributif. L'écoulement en régime transitoire permet de générer une réponse dynamique du phénomène d'inondation lors d'une crue.

Le régime transitoire nécessite des données hydrologiques précises et continues. Cette information fait souvent défaut notamment sur les cours d'eau de taille modeste. Sur l'île de Tahiti par exemple, seules 15 rivières sont actuellement instrumentées par des stations hydrométriques permettant de disposer de débits en continu. Il n'est pas impossible d'explorer la littérature pour extraire quelques chroniques de débits utilisables.

Dans une modélisation 2D, le régime transitoire est une option unique. La stratégie est alors de partir d'un hyétogramme (pluie) lors d'un épisode très soutenu et de convertir l'intensité des précipitations dans la dynamique d'un hydrogramme (cf. Section 5).

8.1.4. Données d'entrée

La première étape est la récolte des données d'entrée qui nourriront la modélisation. Quel que soit la stratégie, ou le logiciel choisi, les informations indispensables restent les mêmes :

- des caractéristiques géomorphologiques de la rivière et de la zone alentour. Pour l'ensemble de la zone d'étude, il est possible de se baser sur des Modèles Numériques de Terrain (MNTs), permettant d'obtenir les représentations spatiales de la zone, les pentes et les élévations. Pour une meilleure précision, les profils ou sections transversales de la rivière nécessitent des relevés topographiques par un géomètre ;
- la géométrie des singularités hydrauliques (rétrécissement, élargissement, seuil) et des ouvrages traversants doit être relevée précisément. Le concours d'un géomètre est encore une fois préconisé.
- les forces de frottements induites par le pavage du lit de la rivière, par la structure et la texture des berges, ou encore la végétation, se traduisent par les coefficients de rugosité. Ces coefficients permettent également de représenter la capacité de ruissellement des zones planes autour des cours d'eau. Une route revêtue n'induit pas le même écoulement de surface qu'une terre agricole. Les valeurs sont initialement estimées à partir d'abaques qui sont fonction des caractéristiques du milieu. Au cours de la modélisation, ces paramètres sont utilisés comme variable de calage. Ces coefficients sont généralement liés l'équation de Manning utilisée dans la plupart des logiciels, dans HEC-RAS en particulier.
- pour les conditions initiales, en l'absence d'appareils hydrologiques, les observations sur les berges et la végétation couplées à une rapide enquête avec les riverains sont le seul moyen d'assurer les hypothèses sur les hauteurs d'eau maximum atteintes au cours des épisodes de crues. Les conditions aux limites sont relatives aux débits à l'entrée du système, en régime transitoire il s'agit de l'hydrogramme de crue, et en régime permanent d'un débit maximum sur une période donnée (temps de retour).

8.1.5. Calage du modèle

Le calage devrait être l'étape cruciale pour évaluer la prédictibilité d'un modèle. Si les données sont précises, le calage est efficace, malheureusement lorsque l'information manque la marge d'erreur s'agrandit. Dans le cas d'une modélisation de l'aléa inondation, deux paramètres peuvent être utilisés, les débits maximums enregistrés en aval et les hauteurs mesurées pendant un épisode de crue.

En Polynésie française, il n'existe pas programme d'observation des crues. Aucune donnée objective n'est donc disponible pour s'assurer de la justesse des hauteurs d'eau prédites par le modèle. La seule information disponible est issue de photos ou de témoignages des riverains qui sont subjectifs, et parfois contradictoires.

8.2. Conditions des relevés topographiques

8.2.1. Profils en travers (Cross Section)

Les profils en travers du lit de la rivière s'étendent sur une largeur de 5 m en moyenne de part et d'autre du point médian au centre du lit (Figure 48), pouvant s'étendre jusqu'à 20 m en cas de singularité d'un tronçon de berge.

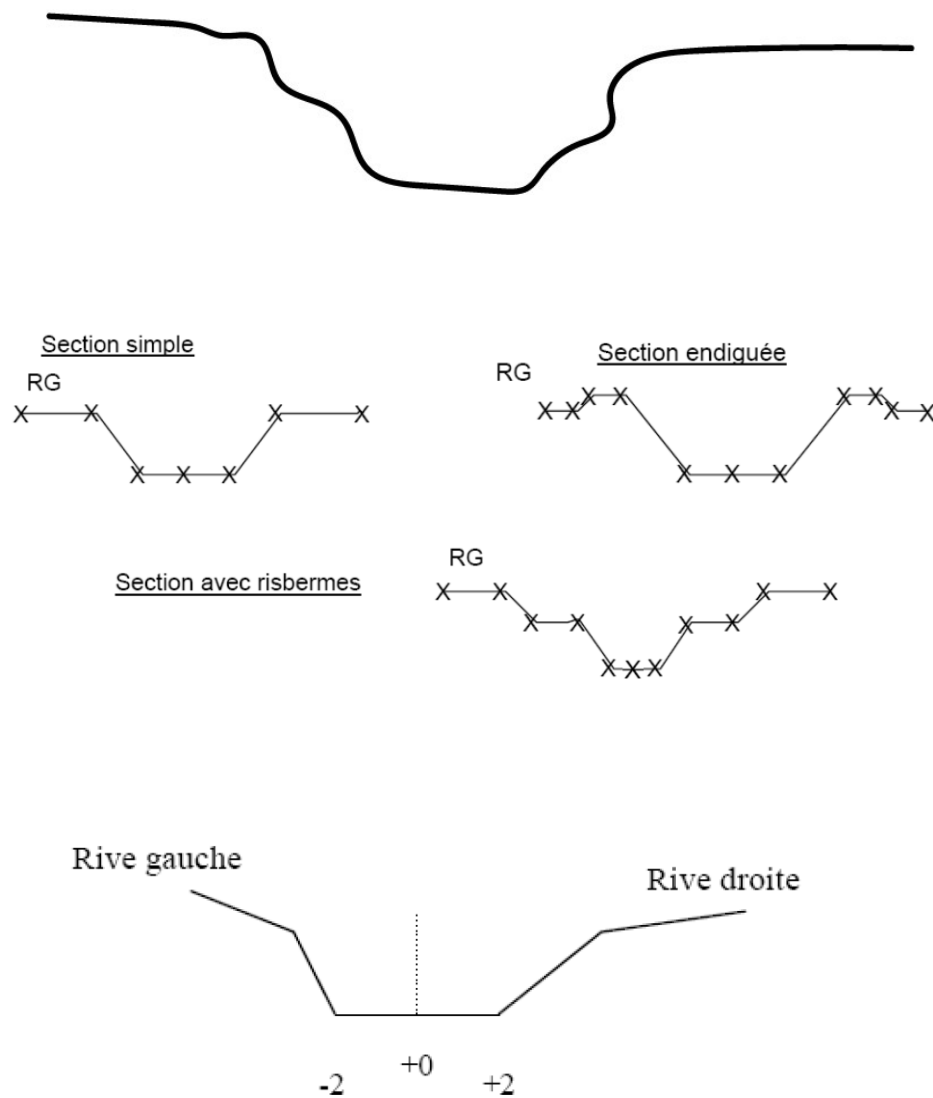


Figure 48 : Description d'une Cross Section.

Les profils transversaux ont été relevés en moyenne tous les 100 m sur les tronçons homogènes. Des tronçons complémentaires ont été réalisés aux points de singularité (ponts, courbes, rétrécissement, élargissement, confluence d'un axe secondaire).

8.2.2. Courbes, rétrécissement, élargissement

Autour des singularités du lit, des profils en travers devront être ajoutés. Les schémas de la (Figure 49) permettent de se représenter les relevés nécessaires pour différents cas de figure.

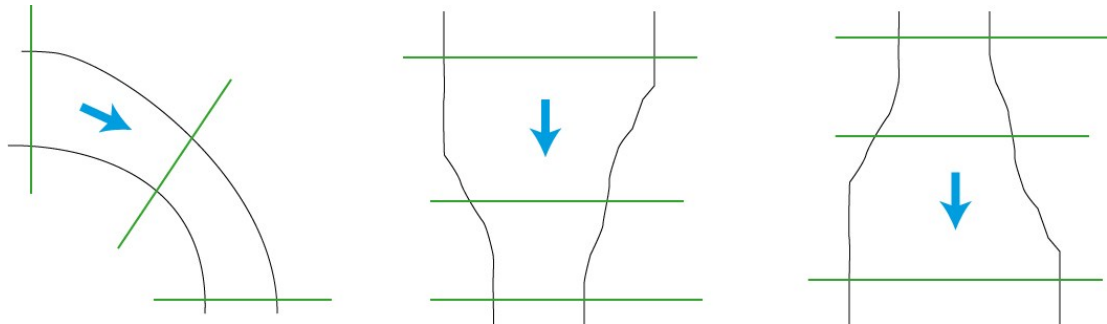


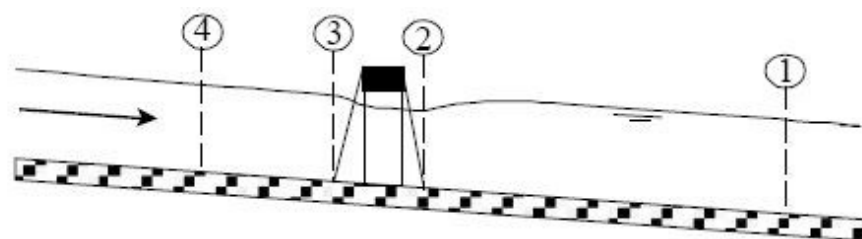
Figure 49 : Profils transversaux (en vert) à réaliser autour de singularités du lit de la rivière.
Courbe, Rétrécissement, Elargissement.

8.2.3. Ouvrages

Les ouvrages latéraux (protection en enrochements, épis, murs...) et les exutoires des ouvrages de (buse, dalots) dont les écoulements sont dirigés vers la rivière ainsi que ceux susceptibles d'être un obstacle à l'écoulement seront levés (dimensions, côtes x,y,z).

Les aménagements et ouvrages traversants (ponts, passerelles, gués ou seuils) seront relevés avec précision :

- Pour les gués et seuils : niveau radier, section.
- Pour les ponts, passerelles : (*longueur, largeur, tablier, piles, culées*). Leur description sera accompagnée de 4 profils transversaux (Figure 50 et Figure 51), leur position exacte dépend du tracé du cours d'eau, du type d'ouvrage et de son emprise, et le degré de rétrécissement du lit au passage de l'ouvrage.



A. Channel Profile and cross section locations

Figure 50 : Position des 4 profils transversaux autour d'un ouvrage traversant.

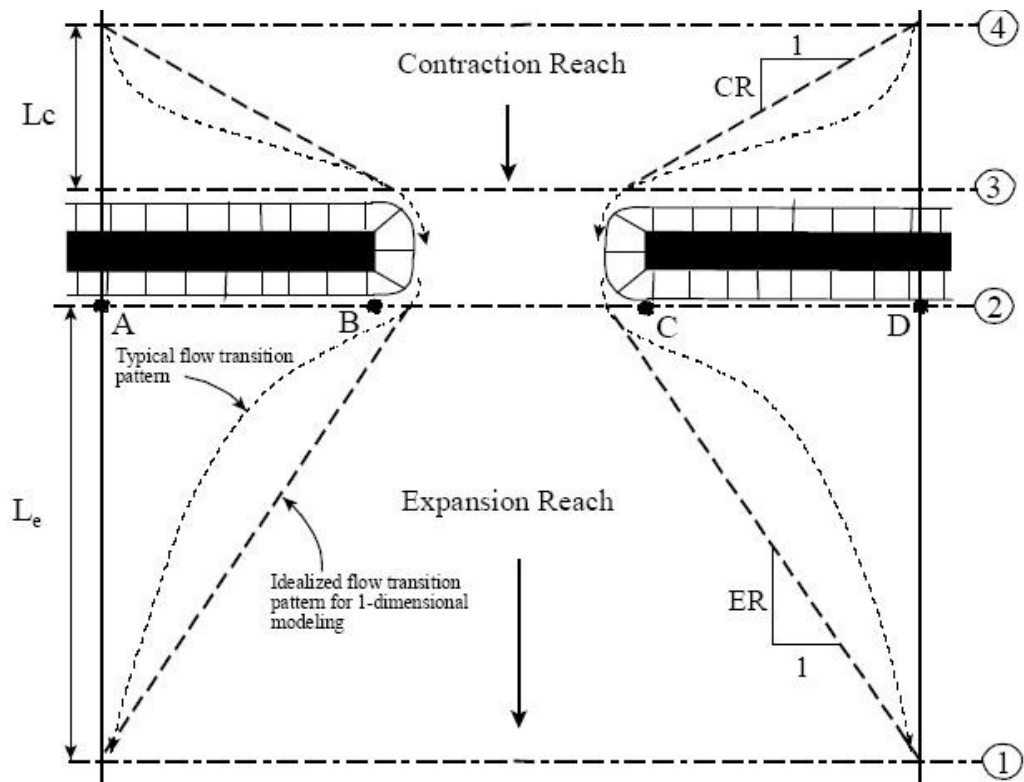
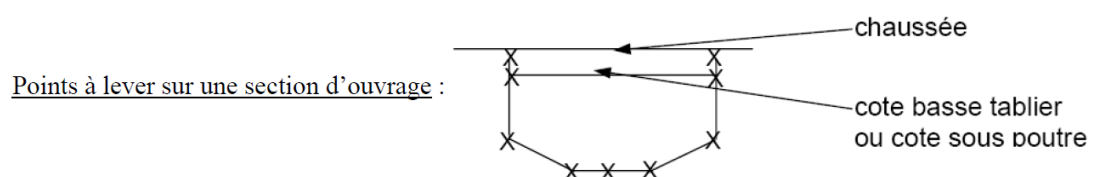


Figure 51 : Vue de dessus du positionnement des profils transversaux d'un ouvrage traversant.

- Le profil 4 à l'amont de l'ouvrage est situé en dehors de la zone d'influence du rétrécissement.
- Le profil 3 toujours à l'amont de l'ouvrage est positionné 3 à 4 m de distance pour éviter l'influence des turbulences engendrées par les culées ou les piles.
- Le profil 2 à l'aval de l'ouvrage est positionné à 3 ou 4 m de distance
- Le profil 1 se trouve à une distance de 1.5 à 2 fois la largeur de l'emprise des soutènements de l'ouvrage (moyenne des distances AB et CD)



8.3. Abaque des coefficients de rugosité de Manning (Chow, 1959)

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
B. Lined or Built-Up Channels			
1. Concrete			
a. Trowel finish	0.011	0.013	0.015
b. Float Finish	0.013	0.015	0.016
c. Finished, with gravel bottom	0.015	0.017	0.020
d. Unfinished	0.014	0.017	0.020
e. Gunité, good section	0.016	0.019	0.023
f. Gunité, wavy section	0.018	0.022	0.025
g. On good excavated rock	0.017	0.020	
h. On irregular excavated rock	0.022	0.027	
2. Concrete bottom float finished with sides of:			
a. Dressed stone in mortar	0.015	0.017	0.020
b. Random stone in mortar	0.017	0.020	0.024
c. Cement rubble masonry, plastered	0.016	0.020	0.024
d. Cement rubble masonry	0.020	0.025	0.030
e. Dry rubble on riprap	0.020	0.030	0.035
3. Gravel bottom with sides of:			
a. Formed concrete	0.017	0.020	0.025
b. Random stone in mortar	0.020	0.023	0.026
c. Dry rubble or riprap	0.023	0.033	0.036
4. Brick			
a. Glazed	0.011	0.013	0.015
b. In cement mortar	0.012	0.015	0.018
5. Metal			
a. Smooth steel surfaces	0.011	0.012	0.014
b. Corrugated metal	0.021	0.025	0.030
6. Asphalt			
a. Smooth	0.013	0.013	
b. Rough	0.016	0.016	
7. Vegetal lining			
	0.030		0.500





Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
A. Natural Streams			
1. Main Channels			
a. Clean, straight, full, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. Same as "d" but more stones	0.045	0.050	0.060
g. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.070	0.100	0.150
2. Flood Plains			
a. Pasture no brush	0.025	0.030	0.035
1. Short grass	0.030	0.035	0.050
2. High grass			
b. Cultivated areas	0.020	0.030	0.040
1. No crop	0.025	0.035	0.045
2. Mature row crops	0.030	0.040	0.050
3. Mature field crops			
c. Brush	0.035	0.050	0.070
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.060
2. Light brush and trees, in winter	0.040	0.060	0.080
3. Light brush and trees, in summer	0.045	0.070	0.110
4. Medium to dense brush, in winter	0.070	0.100	0.160
5. Medium to dense brush, in summer			
d. Trees	0.030	0.040	0.050
1. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.050	0.060	0.080
2. Same as above, but heavy sprouts	0.080	0.100	0.120
3. Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0.100	0.120	0.160
4. Same as above, but with flow into branches			
5. Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
3. Mountain Streams, no vegetation in channel, banks usually steep, with trees and brush on banks submerged			
a. Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
<i>C. Excavated or Dredged Channels</i>			
1. Earth, straight and uniform			
a. Clean, recently completed	0.016	0.018	0.020
b. Clean, after weathering	0.018	0.022	0.025
c. Gravel, uniform section, clean	0.022	0.025	0.030
d. With short grass, few weeds	0.022	0.027	0.033
2. Earth, winding and sluggish			
a. No vegetation	0.023	0.025	0.030
b. Grass, some weeds	0.025	0.030	0.033
c. Dense weeds or aquatic plants in deep channels	0.030	0.035	0.040
d. Earth bottom and rubble side	0.028	0.030	0.035
e. Stony bottom and weedy banks	0.025	0.035	0.040
f. Cobble bottom and clean sides	0.030	0.040	0.050
3. Dragline-excavated or dredged			
a. No vegetation	0.025	0.028	0.033
b. Light brush on banks	0.035	0.050	0.060
4. Rock cuts			
a. Smooth and uniform	0.025	0.035	0.040
b. Jagged and irregular	0.035	0.040	0.050
5. Channels not maintained, weeds and brush			
a. Clean bottom, brush on sides	0.040	0.050	0.080
b. Same as above, highest stage of flow	0.045	0.070	0.110
c. Dense weeds, high as flow depth	0.050	0.080	0.120
d. Dense brush, high stage	0.080	0.100	0.140




8.4. Photographie de la rivière de l'Ahonu en novembre 2023

8.4.1. Section 1

Section 1 - Tronçon 1

	<p>Embouchure</p>
	<p>Caniveau en construction C2</p> <p>Un caniveau apparent rejetant les eaux pluviales de la route de ceinture.</p>
	<p>Amont du pont P1</p> <p>En rive gauche un dépôt alluvionnaire se forme avec de la végétation. Certaines habitations en rive gauche empiètent sur le haut de berge.</p>
	<p>Seuil artificiel</p> <p>Pavage sur 5 m de longueur.</p> <p>Repère : En amont de C4</p>

Section 1 - Tronçon 2

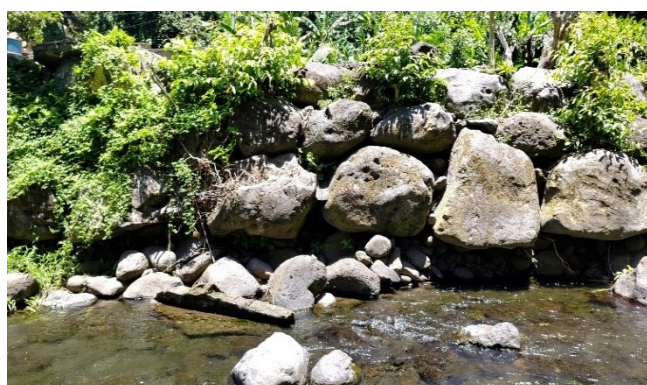
	<p>Aval pont P2</p> <p>Le tronçon est linéaire avec enrochement bétonné sur les 2 berges.</p>
	<p>Passerelle P3 et passage à gué</p> <p>Passerelle piétonne avec un passage à gué immédiatement à l'aval pour le passage de véhicules. Zone de débordement possible en cas de crue.</p>
	<p>Passerelle P4 et passage à gué</p> <p>La passerelle P4 se trouve à 50 m en amont de la passerelle P3. On peut s'interroger sur l'utilité de 2 ouvrages, d'autant qu'un second passage à gué accompagne la passerelle piétonne.</p>

Section 1 - Tronçon 3



En amont du pont P4

En rive gauche, enrochement de mauvaise qualité et peu élevé, zone de fragilité.




Affouillement en pied de berge

Rive gauche, signe de déstabilisations de l'enrochement. Hauteur 3 m.
Tronçon à risque.

Repère : Berge de gauche à niveau de B4

8.4.2. Section 2






Section 2 - Tronçon 1

	<p>Passerelle P5</p> <p>Largeur de la rivière importante, avec berges enrochées. Aucun signe de déstabilisation des ouvrages.</p>
---	--

Section 2 - Tronçon 2


	<p>Aval tronçon 2</p> <p>Aspect naturel sur la berge droite. Berge gauche enrochée.</p>
	<p>Caniveau C7</p> <p>Arrivée d'eau importante. Le caniveau C7 draine les eaux de ruissellement venant de la rive gauche. Enrochement solide avec liaison en béton.</p>
	<p>Affouillement en pied de berge.</p> <p>Signes de déstabilisation du pied de berge dans la continuité amont de l'enrochement en berge gauche</p> <p>Repère : En amont du caniveau C7</p>
	<p>Passerelle piétonne P6</p> <p>A la fin du tronçon 2, Les berges sont en enrochement libre. Passerelle piétonne portée par des IPE.</p>

Section 2 - Tronçon 3




	<p>Dalot D1</p> <p>Caniveau de rejet des eaux de ruissellement sur la rive gauche. L'état de la berge est instable, risque de glissement.</p>
	<p>État naturel sur la berge de droite</p> <p>Sur la rive droite, aucune habitation n'est présente.</p> <p>Repère : En face du dalot D1</p>
	<p>Dalot en béton D2</p> <p>Un caniveau bétonné en rive gauche. Exutoire des eaux de ruissellement. Enrochement, avec liaison en béton, relativement récent.</p>
	<p>Affouillement en pied de berge</p> <p>Affouillement en pied de berge gauche sous un enrochement bétonné. Risque de déstabilisation de l'ouvrage de protection à moyen ou long terme.</p>
	<p>Passerelle piétonne P7</p> <p>En fin de tronçon, les deux rives sont revêtues d'enrochements solides. Passerelle piétonne, portée par des poutres métalliques. Tirant d'eau large.</p>

8.4.3. Section 3

Section 3 - Tronçon 1

	<p>Seuil artificiel</p> <p>Seuil artificiel constitué de gros blocs. Rupture de pente. Berge gauche en enrochement libre.</p>
---	--

Section 3 - Tronçon 2

	<p>Passerelle piétonne P8</p> <p>Passerelle piétonne métallique avec un gué en béton à l'aval. Erosion à la base du gué. Risque de déstabilisation de l'ouvrage.</p>
	<p>Seuil naturel</p> <p>Repère : Entre la passerelle P8 et P9</p>
	<p>Passerelle bétonnée P8</p> <p>Observé depuis l'aval, une passerelle basse et en béton relie les deux rives. La berge droite est enrochement libre avec une habitation qui s'appuie sur le haut de berge. Situation à risque.</p>

Section 3 - Tronçon 3



Partie naturelle de la rivière

Dans cette section du cours d'eau, il n'y a plus de constructions le long des rives. Les berges conservent leur aspect naturel sans protection artificielle.

8.5. Evolution de l'emprise de la rivière de l'Ahonu depuis 1978

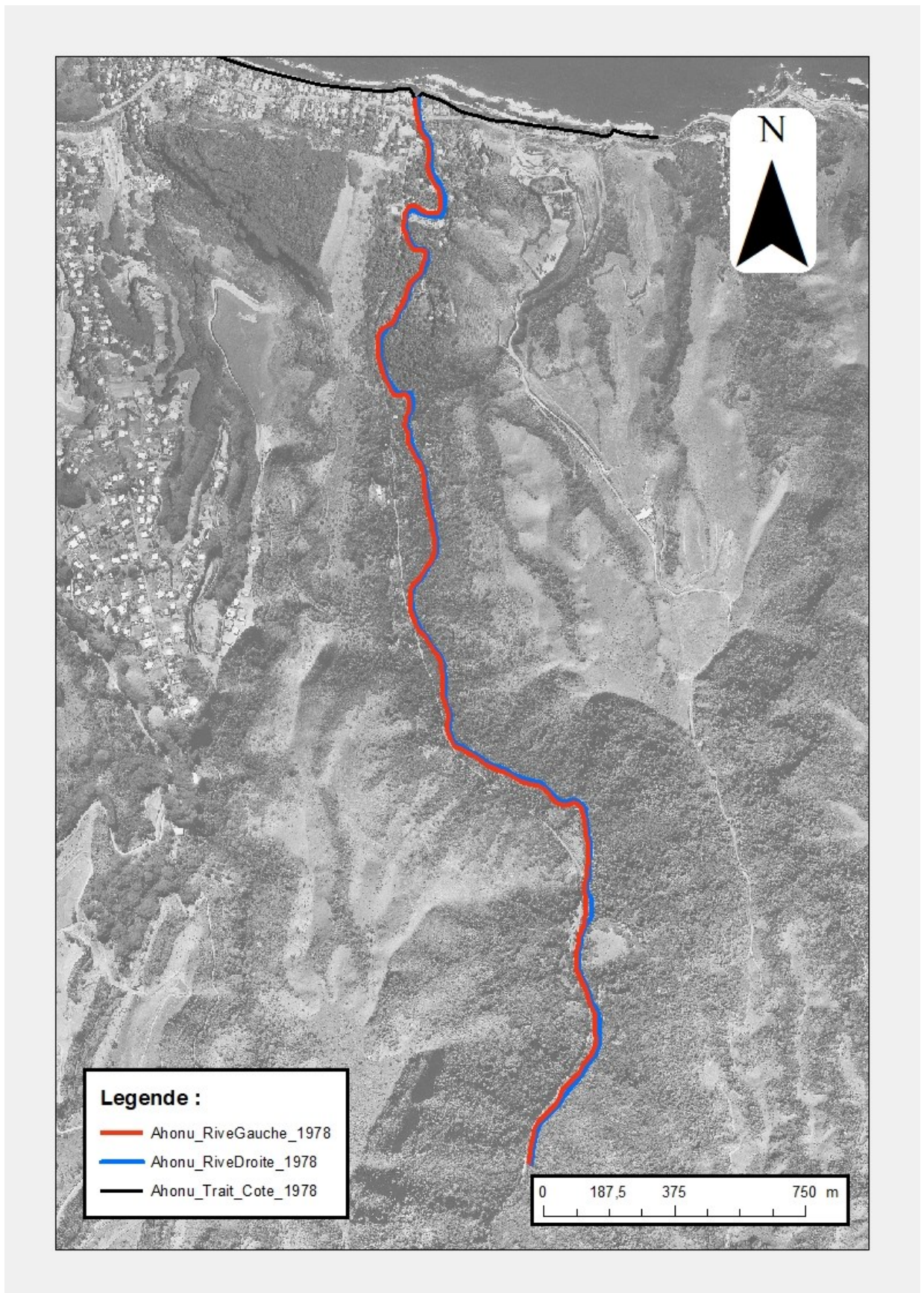


Figure 52 : Situation de la rivière et de ses rives en 1978.

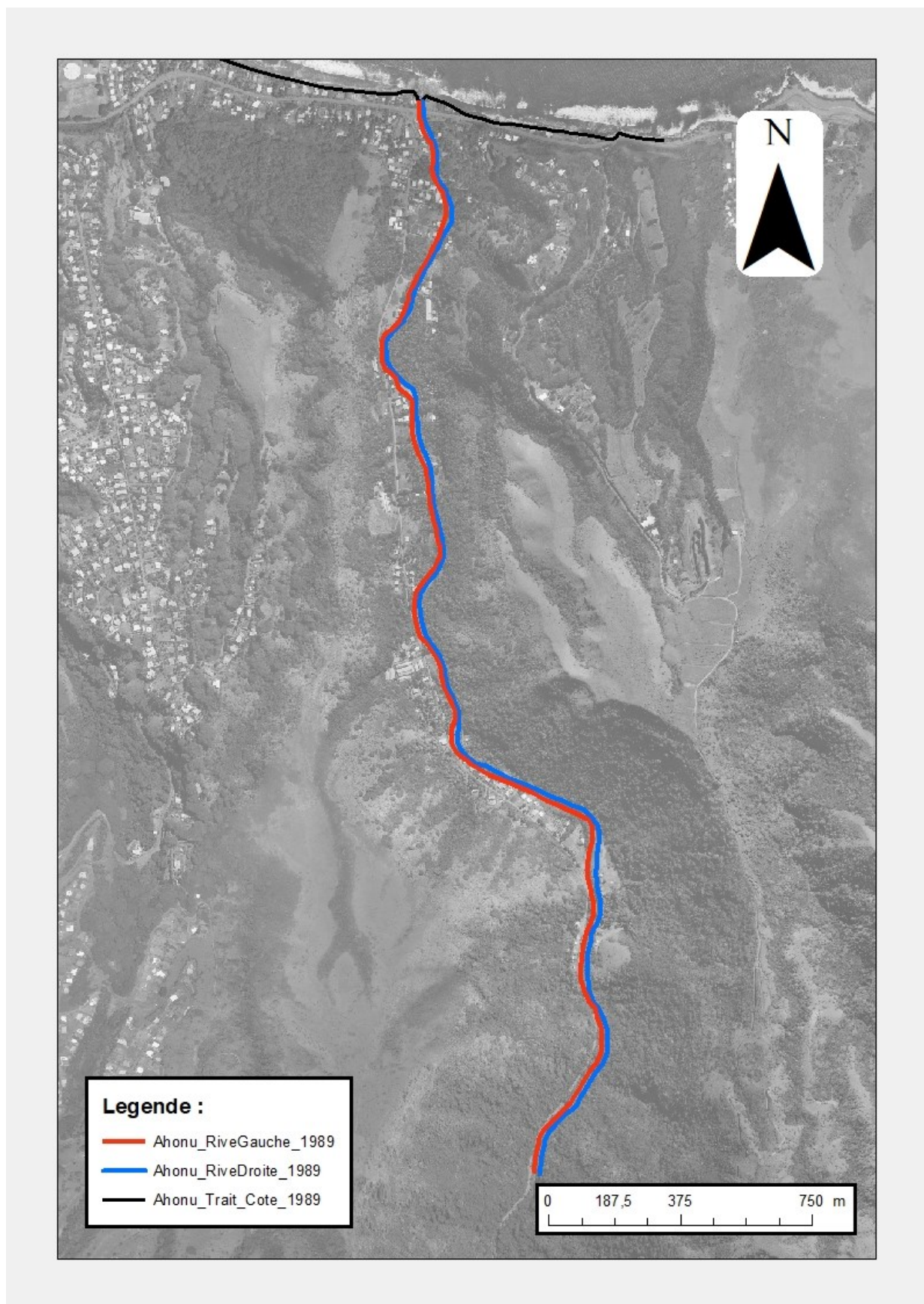


Figure 53 : Situation de la rivière et de ses rives en 1989.

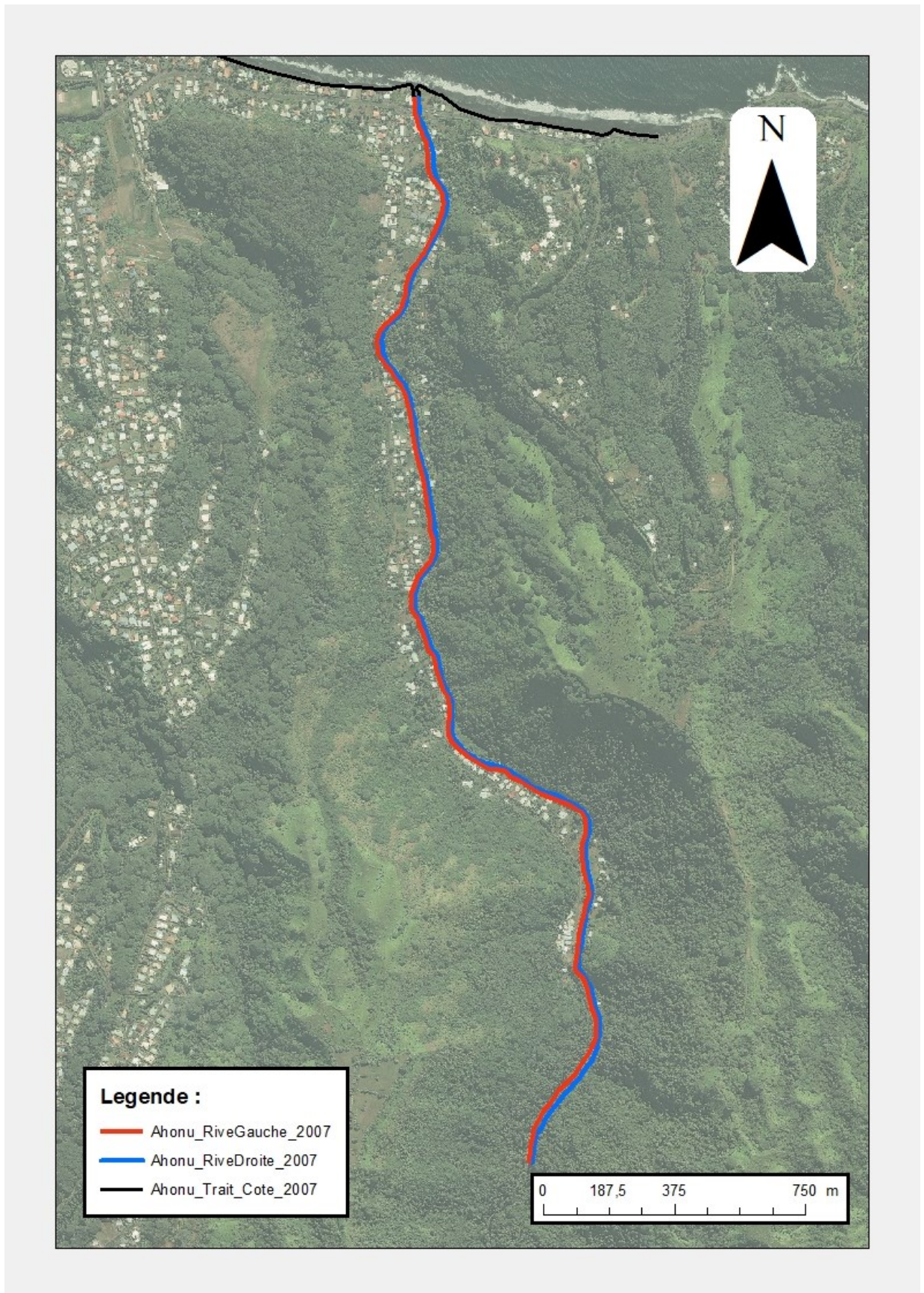


Figure 54 : Situation de la rivière et de ses rives en 2007.

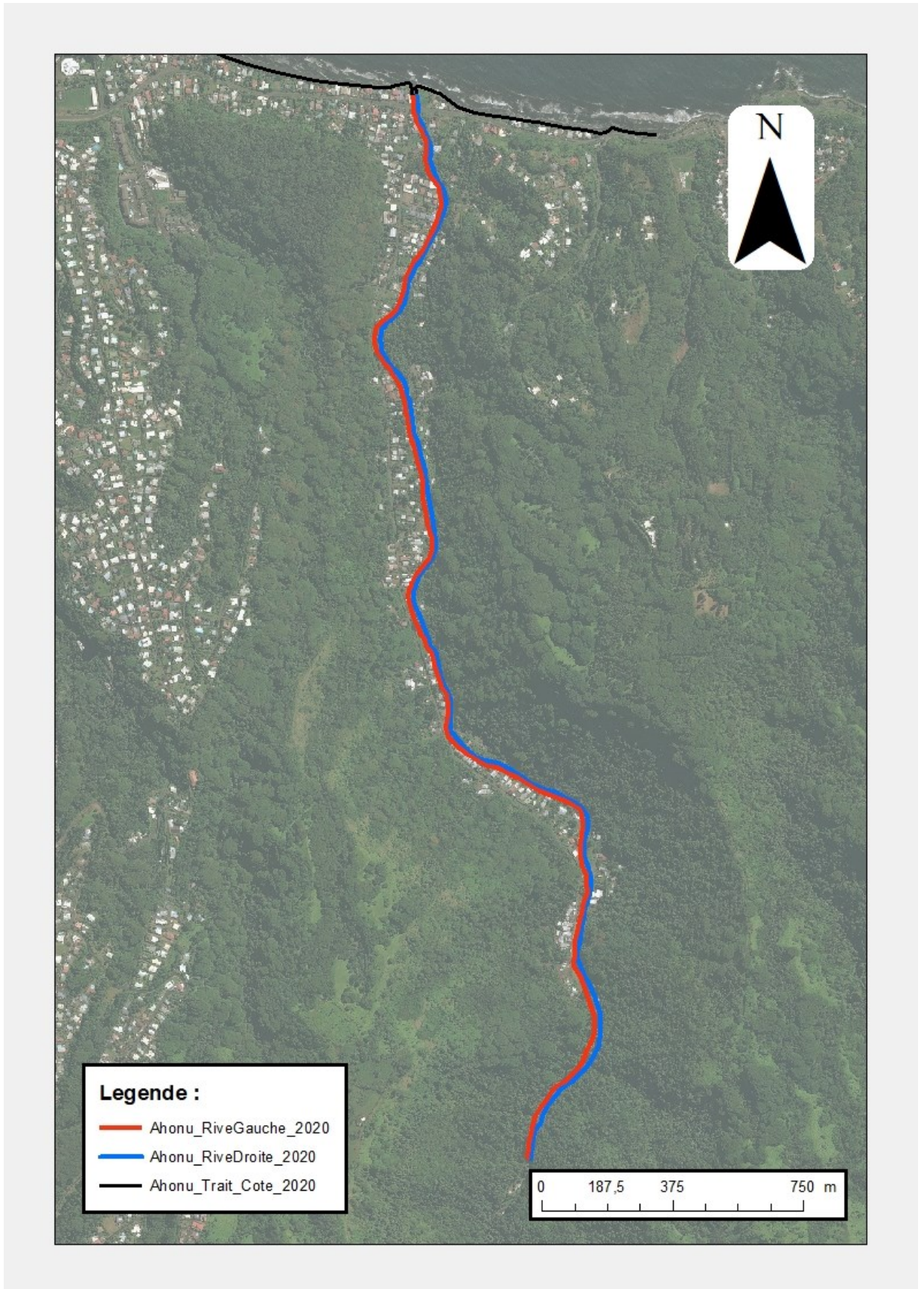


Figure 55: Situation de la rivière et de ses rives en 2020.