



Vai-Natura

Section Hydrologie, Hydrogéologie

Cartographie de l'aléa inondation au droit de cours d'eau
de la Polynésie française

- rivière Pohaiatera, Arue, Tahiti -

Modélisation - Rapport d'étude

Version complétée

Référence

R20160501-HY

Commanditaire

Service de l'Urbanisme (SAU)

Vai-Natura SARL

BP. 83 - 98735 Uturoa - Raiatea

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 au droit de cours d'eau
de la Polynésie française

-
rivière Pohaiaatera, Arue, Tahiti

Rapport n° R20160501-HY

Service de l'Urbanisme

Section Etudes et Plans

11, rue du commandant Destremau, Bat. A1

BP 866 - Papeete 98713

Demandeur

contact :

Dominique TARDY

Tel 40 46 81 50

Mail dominique.tardy@urbanisme.gov.pf

Cartographier l'aléa inondation à partir de modélisations hydraulique et hydrologique, et d'expertises hydromorphologiques sur le cours d'eau Pohaiaatera (commune de Arue, île de Tahiti) :

Etude et analyse

- Simuler les débordements lors de crues remarquables ;
- Définir la capacité d'évacuation maximum du lit ;
- Déterminer les hauteurs de submersion, les vitesses d'écoulement et l'extension des zones inondables en période de crue ;
- Envisager les phénomènes d'embâcles et leurs conséquences ;
- Diagnostiquer succinctement les ouvrages hydrauliques existants ;
- Proposer des aménagements pour réduire les aléas.

Commune

Arue

Ile

Tahiti

Date

22/07/2017



Sommaire

1. Présentation	7
1.1. Contexte général.....	7
1.2. Toponymie	7
1.3. Objectifs.....	8
1.4. Rappels initiaux.....	9
2. Etat des lieux contextuel	11
2.1. Géographie et morphologie.....	11
2.2. Géologie	13
2.3. Pédologie	13
2.4. Végétation	14
2.5. Occupation humaine.....	15
2.6. Hydromorphologie et aménagement	17
3. Situation hydraulique.....	24
3.1. Données géomorphologiques.....	24
3.2. Tronçon 1 (266 m - pente 2.5%)	24
3.2.1. Point 1 : Embouchure	24
3.2.2. Point 2 : Passerelle « artisanale ».....	25
3.2.3. Point 3 : Passerelle privée en ciment	26
3.2.4. Point 4 : Coude accentué.....	27
3.2.5. Point 5 : Pont de la route de ceinture	28
3.2.6. Point 6 : A l'amont du pont	29
3.3. Tronçon 2 (38 m - pente 0.04%)	30
3.3.1. Point 7 : Passerelle	30
3.3.2. Point 8 : Passerelle abandonnée	31
3.4. Tronçon 3 (121 m - 1.5%).....	32
3.3.1. Point 9 : Lit en mauvais état	32
3.5. Tronçon 4 (67 m - pente 0.19%)	33
3.5.1. Point 10 : une ligne droite	33
3.5.2. Point 11 : Passerelle	34



3.6. Tronçon 5 (287 m - pente 4.4%)	35
3.6.1. Point 12 : Passerelle privée	35
3.6.2. Point 13 : Incision de la rivière et déstabilisation d'un mur de soutènement	36
3.6.3. Point 14 : Passerelle privée	37
3.6.4. Point 15 : Incision de la rivière et affouillement de la berge	38
3.6.5. Point 16 : Affouillement de la berge	39
3.6.6. Point 17 : Passerelle d'accès.....	40
3.6.7. Point 18 : Caniveau drainant	41
3.6.8. Point 19 : Coude et zone de débordement	42
3.6.9. Point 20 : Passerelle d'accès.....	43
3.7. Tronçon 6 (401 m - pente 3.9%)	44
3.7.1. Point 21 : Tronçon endigué	44
3.7.2. Point 22 : Seuil et coude.....	45
3.7.3. Point 23 : Passerelle d'accès.....	46
3.8. Tronçon 7 (234 m - pente 5.6%)	47
3.8.1. Point 24 : Lit peu aménagé.....	47
3.8.2. Point 25 : Dernière passerelle	48
3.8.3. Point 26 : A l'amont de la confluence	49
4. Modélisation hydraulique en rivière	50
4.1. Principes théoriques	50
4.1.1. Description	50
4.1.2. Singularité hydraulique	52
4.1.3. Modèle 1D ou 2D.....	52
4.1.4. Régimes transitoire et permanent.	53
4.1.5. Données d'entrée.....	54
4.1.6. Calage du modèle	54



5. Analyse hydrologique	55
5.1. Approche initiale.....	55
5.1.1. Objectifs.....	55
5.1.2. La méthode rationnelle	56
5.1.3. Principe de la méthode GRADEX	57
5.1.4. Estimation des crues extrêmes	58
5.2. Données disponibles et hydrométrie	59
5.3. Calcul des débits de crue	61
6. Paramétrisation de la modélisation	66
6.1. Stratégie de modélisation.....	66
6.2. Construction géométrique et données utilisées.	67
6.3. Coefficient de rugosité de Manning	70
6.4. Calage du modèle	71
7. Résultats de la modélisation	72
7.1. Hydrodynamisme de la rivière lors des crues.....	72
7.1.1. Ecoulement et débordement	72
7.1.2. Vitesse de l'eau et impacts morphologiques	76
7.2. Zones inondables	79
7.2.1. Crue décennale.....	79
7.2.2. Crue centennale	79
7.3. Phénomènes d'embâcles et conséquences.....	83
7.4. Montée du niveau de la mer	85
7.5. Cartographie de l'aléa inondation	87
8. En amont de la confluence	89
9. Erosion des berges et risques	89
10. Aménagements envisageables	92
11. Conclusion	93



12. Bibliographie.....	95
13. Annexes	97
13.1. Quelques notions sur l'hydromorphologie d'une rivière	97
13.2. Points centraux des sections transversales (<i>Cross Section</i>).....	99
13.3. Abaque des coefficients de rugosité de Manning	100
13.4. Coefficients de rugosité appliqués pour chaque <i>Cross Section</i>	101
13.5. Parcelles désignées par l'aléa inondation dans la vallée de Tefa'aroa.....	102



1. Présentation

1.1. Contexte général

Dans le cadre de la mise à jour "des cartes de l'aléa inondation" issue des Plans de Prévention des Risques naturels (PPR), le Service de l'Urbanisme de la Polynésie française a initié plusieurs études pour cartographier les phénomènes de submersion en se basant sur des modélisations hydrologiques et des expertises hydromorphologiques. La société Vai-Natura fut ainsi mandatée pour réaliser l'étude de la rivière Pohaiatera sur la commune d'Arue, au Nord de l'île de Tahiti.

Comme la grande majorité des vallées dans les îles hautes océaniques, le bassin versant abritant la rivière Pohaiatera expose un profil accidenté où des fortes pentes favorisent l'écoulement de surface et l'érosion. Le bas de vallée est étroit, la surface foncière constructible est faible et de nombreuses habitations se trouvent à proximité du cours d'eau. Dans le même temps, le climat tropical engendre des épisodes pluvieux de fortes intensités sur de courtes périodes, il en résulte une lame d'eau qui produit des crues puissantes. La rivière doit canaliser ces débits élevés dans un espace d'écoulement contraint par une urbanisation enveloppante n'autorisant pas, ou peu, les débordements du lit. L'érosion, mais également les activités humaines, augmente les volumes de matériaux que le flux doit charrier et par extension la formation d'embâcles qui favorise directement la montée des eaux.

Toutes ces contraintes doivent être prises en compte dans la modélisation et l'expertise pour évaluer avec précision la surface soumise au risque d'inondation autour de la zone habitée, dans la basse vallée.

1.2. Toponymie

Au cours du travail préparatoire à cette étude, la toponymie de la rivière et de la vallée concernée s'est avérée irrégulière. L'intitulé initial du cahier des charges désigne le cours d'eau principal par le nom Tutaipa'apa'a. Ce titre existe bien sur les anciennes cartes IRD/ORSTOM (1993), mais il n'est affecté qu'à un bras de la rivière avant la confluence située à 1 500 m de l'embouchure. Les nominations plus récentes apposent le toponyme Pohaiatera au cours principal, mais également aux affluents à l'amont (source Tefenu@). Les noms de terres sur les parcelles cadastrales n'apportent pas d'information complémentaire pour statuer.

Le toponyme du bassin versant n'est pas plus aisé à bien définir. La voie d'accès principale de la vallée se nomme bien Tefa'aroa. Sur les différentes cartes, ce terme est repris. Toutefois, le nom Tefa'aroa ne couvre qu'une quinzaine d'hectares de terre à 2 km de l'embouchure. Il évoque simplement une vallée allongée, oblongue. Cette désignation est géographiquement juste, peut-être un peu trop générale.

Dans un souci de clarté, pour répondre à l'usage qui semble le plus commun et sans se prévaloir d'un savoir historique, la rivière sera nommée dans cette étude Pohaiatera et la vallée Tefa'aroa.



1.3. Objectifs

La construction des cartes de l'aléa inondation dans la vallée de Tefa'aroa doivent s'appuyer sur les résultats d'une modélisation hydraulique. Le premier pas de l'étude est de correctement choisir le modèle et son paramétrage. Cette étape se base sur la nécessaire connaissance des développements théoriques, mais également sur une analyse objective des données disponibles. Le type et la précision des résultats attendus participent également à l'élaboration de la stratégie de modélisation. L'expérience du terrain permettra enfin au modélisateur d'assurer le calage des paramètres les plus sensibles et d'apprécier les résultats obtenus avec un sens critique aiguisé.

Une fois le modèle de propagation des écoulements calés, plusieurs scénarios seront joués pour évaluer différents cas de figure :

- les niveaux de crues maximales avec différents temps de retour (5 ans, 10 ans, 100 ans) ;
- une variation des conditions aux limites à l'embouchure, c'est-à-dire une variation du niveau de la mer pour simuler de fortes houles ;
- la modélisation tentera également d'intégrer les risques maximums sur des tronçons que l'érosion des berges a rendus vulnérables.

Il s'agira également de reproduire le phénomène d'embâcle qui est souvent à l'origine d'un écoulement contrarié, d'une montée des eaux et d'un débordement. La difficulté pour la rivière Pohaiatera est la succession d'une douzaine de passerelles et de ponts sur les 1 500 m à l'amont de son embouchure. Chaque ouvrage traversant est un site à risque où les éléments charriés peuvent se concentrer. Il est délicat de reproduire les conséquences en cascade sur les passerelles aval qu'induiront le complément total ou partiel du lit.

Aux termes de l'étude, la cartographie de l'aléa inondation sera actualisée et pourra permettre une réévaluation du Plan de Prévention des risques dans la vallée de Tefa'aroa. Une analyse critique tentera également de proposer les solutions pérennes pour imiter les risques d'atteintes aux biens et aux personnes. Ces recommandations chercheront à intégrer la variabilité des phénomènes naturels et les évolutions de l'urbanisation et de l'occupation de l'espace.

1.4. Rappels initiaux

Pour ne pas engendrer de confusion par les termes choisis quelques rappels sur le vocabulaire usuel en hydrologie et son emploi, sont ici proposés :

- 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 usuellement retenue en hydromorphologie.

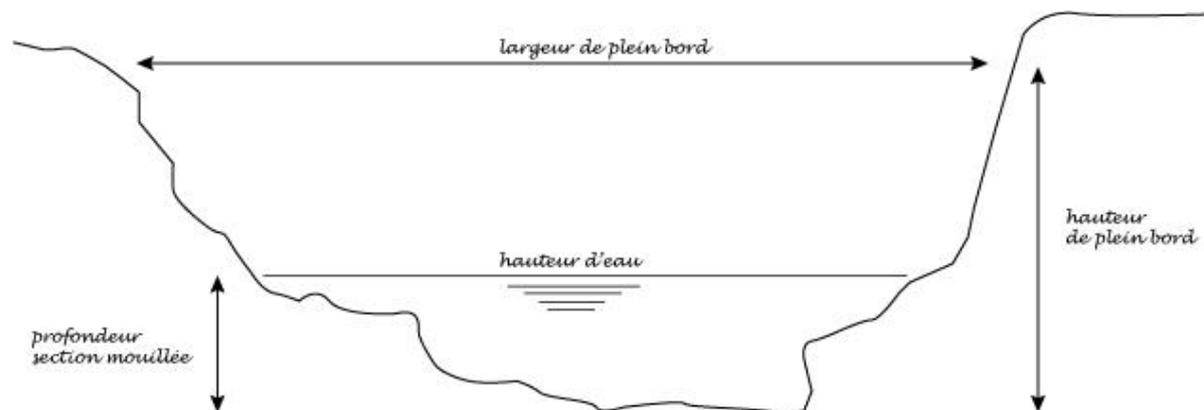


Figure 1 : Géométrie du profil en travers d'un cours d'eau.

- 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.

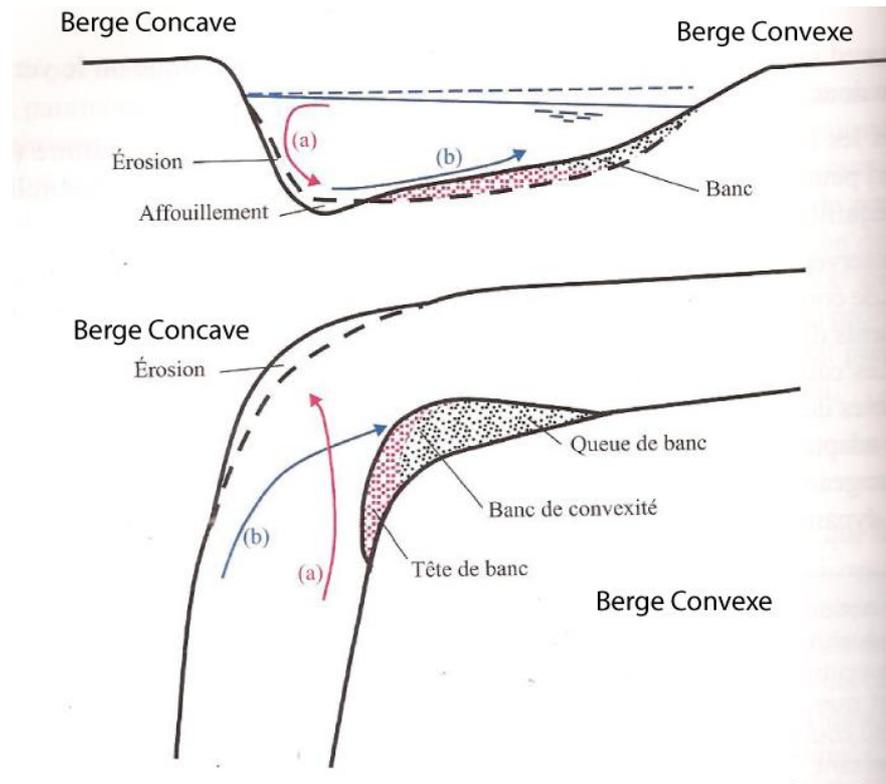


Figure 2 : Schémas de la courbe d'une rivière et évolution des profils.
(tiré et adapté de Degoutte, 2012)

Un modèle numérique en général, dans les disciplines de l'hydrologie en particulier, est avant tout un outil de calcul qui fonctionne nécessairement à partir du moment où les données d'entrées sont appropriées. Il est 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 contextuel

2.1. Géographie et morphologie

La vallée de Tefa'aroa est située sur la commune d'Arue au nord de l'île de Tahiti. Son exutoire est au point 17°31'24 S - 149°30'47 W. Elle s'allonge sur 6 110 m suivant un axe nord-sud, la largeur maximum est de 1 600 m (Figure 3). Le bassin versant couvre une surface de 7 km² et atteint une altitude maximum de 1 260 m. La crête sommitale se poursuit vers le Piton de Pirae (1 472 m) puis sur l'Aorai, le troisième sommet de l'île (2 066 m).

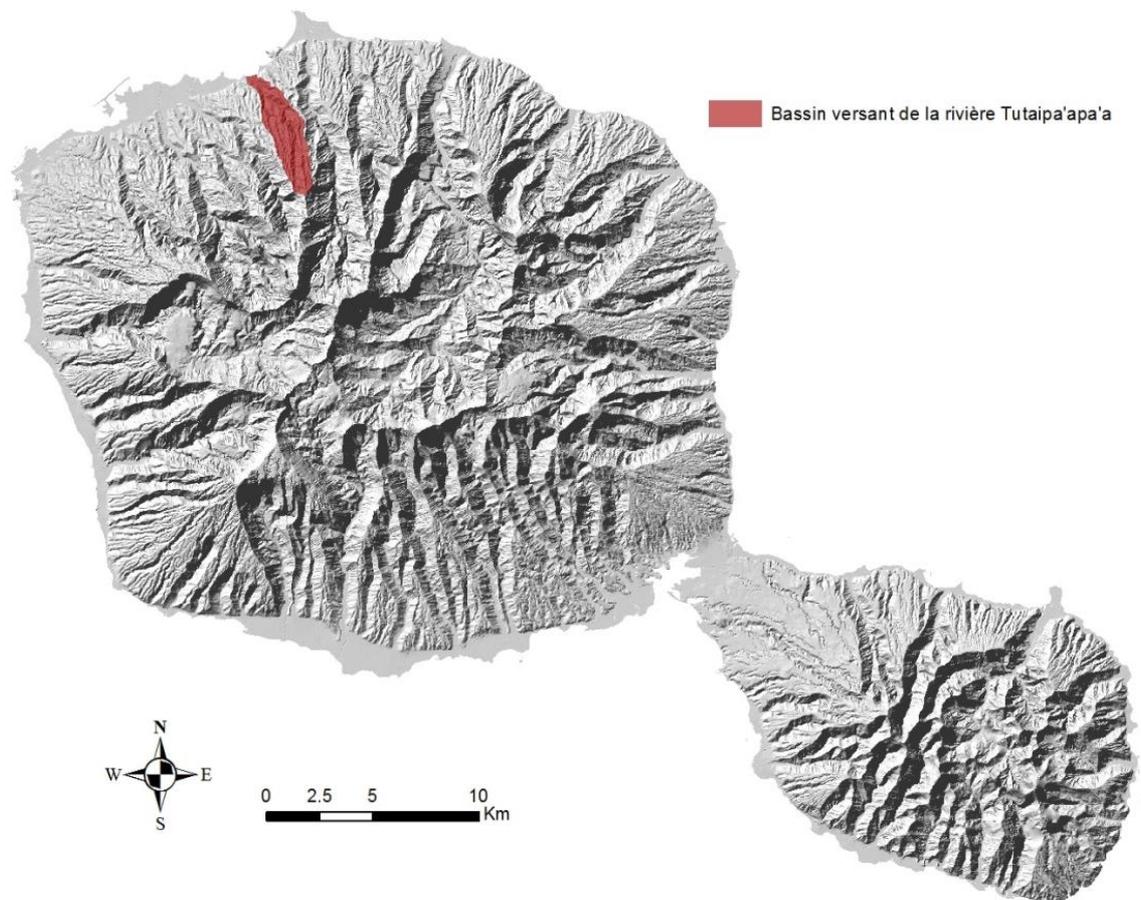


Figure 3 : Plan de situation du bassin versant Tefa'aroa.

La morphologie du bassin versant n'est pas exactement identique aux classiques vallées tahitiennes où le cours principal de la rivière s'écoule entre les murailles abruptes qui délimitent le bassin versant. La forme de la vallée de Tefa'aroa 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 planètes. Elles sont disjointes par l'incision de petites vallées assez profondes et ciselées par un réseau dense de ruisseaux et de ravines à l'écoulement plus ou moins permanent (Bonvalot, 1993). C'est pourquoi le cours principal de la rivière Pohaiatera n'apparaît distinctement qu'à 1 290 m de son exutoire (Figure 4). A l'amont, plusieurs ruisseaux conséquents drainent des vallons parallèles. La zone d'étude couvre ici une superficie de 44 ha, soit 6% de la vallée. Lors des épisodes pluvieux les plus intenses s'écoulent dans basse vallée voie des eaux de ruissellements récoltés sur une surface beaucoup élargie que son espace de concentration. Les ramifications du réseau hydrographique sont bien illustrées sur la carte (Figure 4).

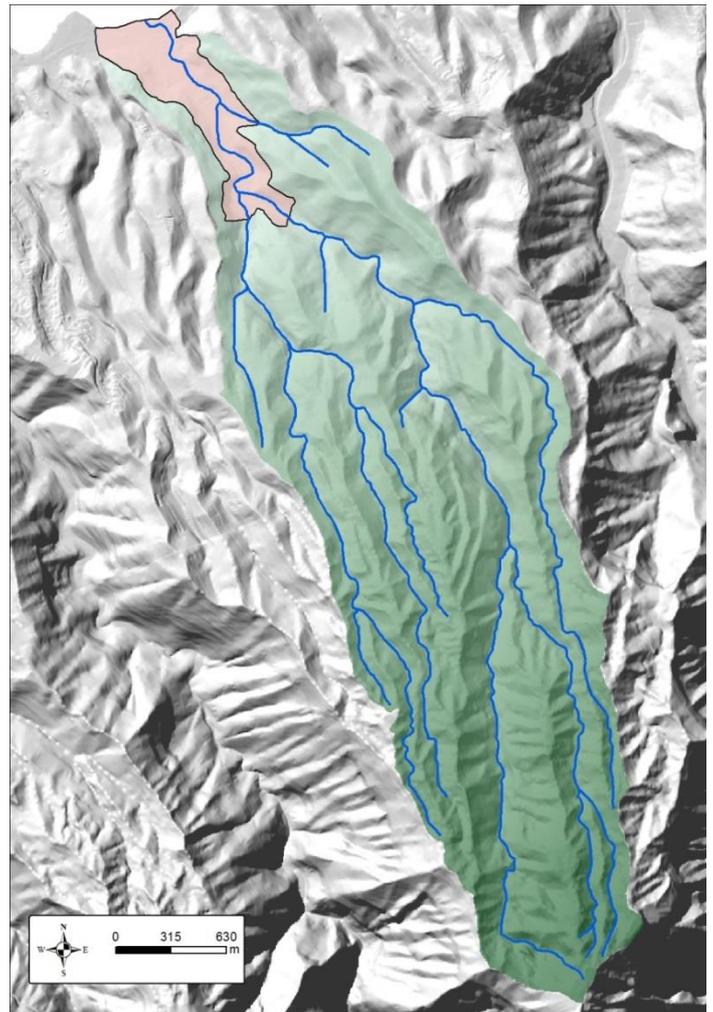


Figure 4 : Bassin versant Tefa'aroa sur la commune d'Arue.
La zone d'étude est représentée par la surface rouge.

En période sèche le bassin versant n'est pas suffisamment étendu pour constituer une réserve et alimenter les cours d'eau en continu. Cette variation importante dans la dynamique hydrologique saisonnière est caractéristique des écoulements torrentiels (Degoutte, 2012).

Enfin, l'énergie des cours d'eau générée par le relief traversé favorise le transport des éléments érosifs vers l'aval. Ce débit solide important a une influence prépondérante sur la morphologie des lits et confère aux cours d'eau une sensibilité importante aux modifications anthropiques.

2.2. Géologie

L'île de Tahiti est située au cœur de l'océan Pacifique, au Sud-Est de l'archipel de la Société. C'est une île volcanique issue de deux systèmes éruptifs distincts (Léotot, 1988) qui se sont élevés sur une période de 2 millions d'années formant l'île principale, Tahiti Nui ou « Grand Tahiti » et Tahiti Iti ou « Petite Tahiti » qui forme aujourd'hui la presqu'île située au Sud-Est. Tahiti est l'île la plus étendue (1064 km²) et la plus haute (2241 m) de l'ensemble de la Polynésie française. Elle représente, à elle seule, le quart des terres émergées.

L'histoire géologique de Tahiti Nui fut redéfinie au début des années 2000 (Hildenbrand et *al.*, 2004). Un premier cône éruptif aurait émergé il y a près d'un million d'années. Les roches magmatiques y sont plutôt homogènes, essentiellement composées de basaltes alcalins faiblement sous-saturés en silice. La pression des magmas injectés le long de la rift-zone a induit une importante dilatation de l'édifice, conduisant à la déstabilisation de ses flancs Nord et Sud par de grands glissements de terrain (Hildenbrand, 2006). Un second volcan serait apparu, il y a 850 000 ans, dont les coulées auraient rempli les dépressions Nord et Sud ouvertes lors de la première phase volcanique. Les laves de la seconde période ont des compositions beaucoup plus variées, avec néanmoins une prédominance de basaltes alcalins cette fois fortement sous-saturés en silice.

Sous l'effet du climat tropical et des pluies très abondantes, l'île de Tahiti a été soumise à une érosion importante qui a sculpté, durant le dernier million d'années, un relief très escarpé et de profondes vallées qui constituent le paysage géologique actuel. Dans la partie Nord de l'île, les vallées sont entrecoupées par des plateaux triangulaires inclinés. Ces planèzes sont les vestiges des pentes externes du volcan primitif. Leur structure géologique peut-être issue de différentes coulées, soit de coulées massives porphyriques caractérisées par des basaltes faiblement scoriacés enrichis en grands cristaux de pyroxènes ou d'olivines, soit de laves plus fluides parfois très vacuolaires souvent des basaltes ou des hawaïtes. En l'absence de travaux spécifiques, la description géologique de la vallée de Tefa'aroa se limitera à la connaissance générale des planèzes.

2.3. Pédologie

En considérant l'ensemble du bassin versant, les sols présentent la pédologie classique des planèzes Nord de l'île de Tahiti avec des pentes moyennes à faibles. Ces sols sont ferrallitiques faiblement ou moyennement désaturés, humifères et pénévulés d'érosion.

Sur les pentes les plus fortes la structure des sols est dégradée, à fortement dégradée, de couleur ocre à rouge avec une faible, à très faible, proportion de fragments de roches. Cette matrice est une « altérite argileuse », communément nommée *mamu* en Polynésie française. En fonction de l'état d'altération, les *mamu* sont répertoriés en 4 classes distinctes (Nédellec et Mathon, 2006). Lorsque le stade 4 est atteint, le sol est presque totalement altéré. La texture très fine des matériaux confère une forte perméabilité et un régime hydrique déficitaire marqué par un rapide assèchement (Jamet, 1990). Les zones hydrologiquement contributives ont alors très peu d'effet de rétention d'eau, elle favorise le ruissellement de surface.

Dans la partie basse à proximité de l'embouchure, les couches de sols sont composées d'alluvions, plutôt de colluvions. Ce dernier terme désigne les matériaux issus de roches érosives, fracturées, modelées et transportées par les eaux de ruissellement vers les zones les plus planes. Ces fractions de roches d'origine terrestre se différencient des alluvions marines plus présentes dans les embouchures. La texture de ces sols présente une granulométrie moyenne avec une grande proportion de pierres et de roches fracturées. Il en ressort généralement une porosité importante favorisant l'infiltration et l'apparition de nappes phréatiques dite alluvionnaire souvent connectées aux cours d'eau à proximité. Ces phénomènes naturels peuvent par contre être contrariés, voir neutralisés, par une anthropisation trop importante induisant des sols revêtus d'asphalte presque totalement imperméable et générant un ruissellement excessif des eaux de surface.

Comme pour la plupart des espaces littoraux et des basses vallées du Nord de l'île de Tahiti, la zone d'étude autour de la rivière Pohaiatera se caractérise par une urbanisation importante et l'implantation de nombreuses habitations qui contrarient les équilibres hydriques avec des conséquences forts dommageables lors des plus forts épisodes pluvieux.

2.4. Végétation

Les formations primaires ont pratiquement disparu du bassin versant à l'exception peut-être des crêtes sommitales où une flore originale peut subsister. La végétation observée sur place et sur la zone amont est essentiellement constituée d'espèces d'introduction récente, souvent considérées comme envahissantes et menaçant la biodiversité (arrêté n° 1301 CM du 15 novembre 2006) : *Cecropia peltata* (*I'ita popa'a*), *Falcataria* (*Falcata*) ou encore *Syzygium cumini* (*Pissetache*). Cette végétation invasive favorise l'érosion et déstabilise les sols. L'effet est accentué lorsque les pentes sont plus importantes. Le système racinaire ne s'implante pas profondément et leur large emprise hors sol rend ses plantes vulnérables à de forts coups de vent.

Dans la basse vallée, sur la courte plaine alluviale, la végétation est très largement impactée par la présence humaine comme l'indique les plantations de cocotiers ou d'arbres fruitiers : arbres à pain (*uru*), *manguiers* (*vi popa'a*), des bananiers sucrés et des *fe'i*, parent du bananier avec des fruits généralement consommés comme des légumes. Les espèces envahissantes sont toujours présentes notamment sur les rives du cours d'eau où leur vulnérabilité à l'érosion peut entraîner des déracinements qui participeront aux embâcles vers l'aval.

Si la végétation ne fait pas partie des hypothèses morphologiques d'une étude hydraulique, elle est un sujet d'importance qui aggrave ou limite l'impact des débordements et des inondations. L'équilibre hydrodynamique passe par le contrôle et l'entretien de l'environnement végétalisé.

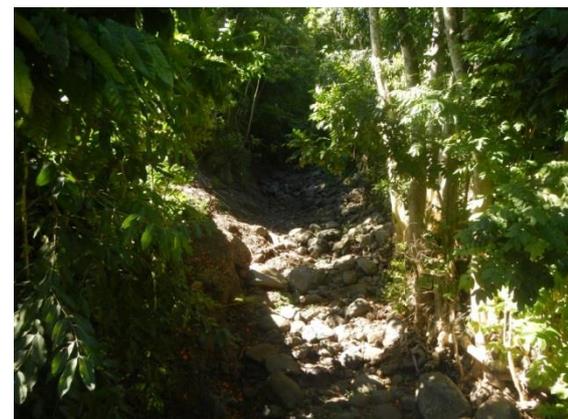


Figure 5 : Végétation essentiellement constituée d'espèces invasives aux abords de la rivière.

2.5. Occupation humaine

La Figure 6 permet de se rendre compte de l'importance de l'urbanisation dans la basse vallée de Tefa'aroa. L'espace représenté correspond à la zone modélisée pour l'étude. Il apparaît nettement que le dessin du cours d'eau est fortement contraint par les aménagements de voirie, mais surtout les habitations qui peuvent être posées au sommet des berges. Certains coudes de la rivière, trop francs, laissent supposer un tracé artificiel qui contraint les écoulements en ne tenant pas compte de l'énergie des flots. La succession de virages juste avant l'embouchure illustre précisément cette problématique.

Chaque zone plane, dans la vallée parfois étroite, est aujourd'hui occupée et bâtie. Avant d'estimer les points de débordement, la configuration de la rivière et l'urbanisation excessive aux alentours laissent entrevoir des risques pour les biens et les personnes.

En amont de l'embouchure, une douzaine de ponts se succèdent sur 1 400 m. Chacun de ces ouvrages est une difficulté potentielle pour le système hydraulique de la rivière. Ils sont souvent l'origine d'un rétrécissement du profil transversal et favorisent la formation d'embâcles, minéral ou végétal. Certains de ces ouvrages traversent la rivière dans la continuité de la route d'accès permettant de rejoindre les dernières habitations. Quelques passerelles furent installées par les riverains pour accéder à l'autre rive, aménager une parcelle agricole (*fa'apu*) ou construire une habitation qui abrite une partie de la famille. Ces structures « artisanales » furent généralement mises en place sans autorisation ni consultation. Leur stabilité est précaire et leur impact sur l'écoulement des eaux souvent problématique.

En atteignant le front de mer, la rivière croise la route territoriale RT2. Cette route fait partie de l'axe principal de circulation qui ceinture l'île. Ainsi, le pont qui traverse le cours d'eau est un ouvrage stratégique qui ne peut souffrir de fragilité ou de déstabilisation.

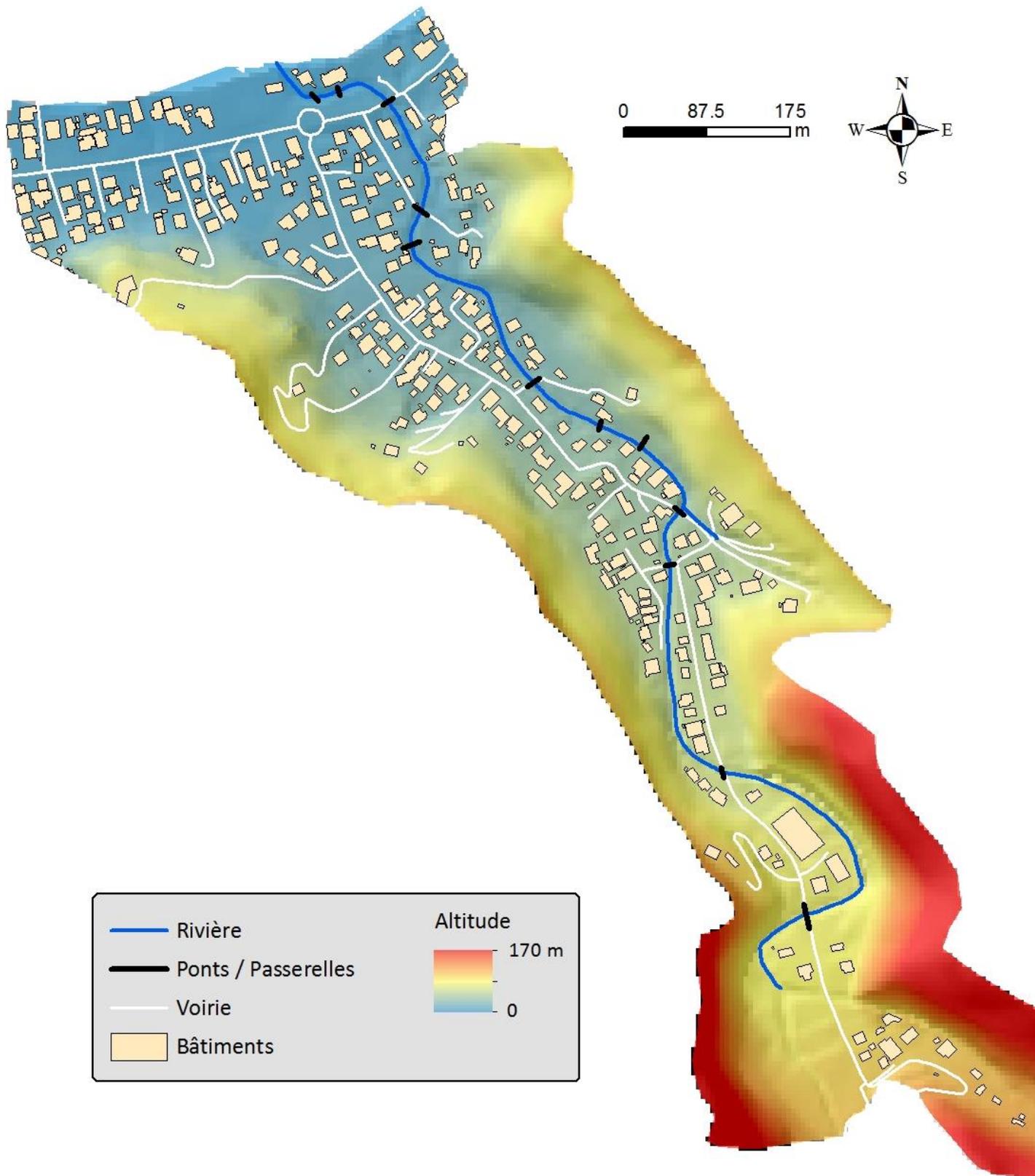


Figure 6 : Urbanisation de la basse vallée de Tefa'aroa autour de la rivière Pohaiatera.

2.6. Hydromorphologie et aménagement

Dans la partie haute du bassin versant, plusieurs ravines collectent les eaux de ruissellement d'étroites zones contributives oblongues (Figure 4). Ces espaces parallèles convergent en perdant de l'altitude, les cours d'eau s'agrègent pour finalement se réunir en un seul écoulement au point de la dernière confluence (Figure 6). Ces cours d'eau ont l'aspect naturel des ruisseaux de montagne avec un profil longitudinal pouvant présenter des pentes importantes, un lit relativement étroit, mais cerné de berges abruptes s'appuyant sur les contreforts des crêtes en surplomb. Des pierres et des cailloux parsèment le fond du lit, ils sont issus de l'érosion naturelle. Les blocs les plus imposants sont mobilisés par les crues les plus fortes (Figure 7).



Figure 7 : Rivière Pohaiatera à l'amont du dernier point de confluence.
Le lit présente la géomorphologie naturelle des cours d'eau à l'écoulement torrentiel.

La basse vallée est urbanisée à partir de la confluence à 1 100 m, « à vol d'oiseau », de l'embouchure. C'est cette portion de la rivière qui est concernée par l'étude de l'aléa inondation. Le lit serpente sur 1 500 m. L'environnement alentour est largement modifié par les activités humaines et l'implantation de nombreuses habitations. Le cheminement de la rivière y est fortement contraint. Le tracé naturel a certainement été redessiné, les berges sont massivement enrochées avec plus ou moins de succès. Des murs de bétons ont également été érigés pour tenter de protéger quelques maisons.



La pente du profil en long diminue en s'approchant de la plaine et de l'embouchure. Cette dernière caractéristique est directement reliée à la vitesse d'écoulement de l'eau et par extension à l'énergie développée par la rivière. Les variations du débit solide s'expliquent en grande partie par l'inclinaison du lit. La pente longitudinale de la rivière dans l'espace urbanisé est représentée sur la Figure 8. Sept tronçons différents y sont distingués. Ils sont numérotés à partir de l'embouchure. Les données sont précises, issues des relevés topographiques réalisés en avril 2016.

La pente est toujours favorable à l'écoulement des eaux. Le flux rapide offre alors une énergie suffisante permettant d'emmener un débit solide important. Dans un fonctionnement hydrodynamique naturel, les éléments solides amenés de l'amont sont entraînés continuellement par l'écoulement. La rivière est régulièrement rechargée, généralement à la faveur d'une crue. Les cailloux et roches préalablement accumulés continuent progressivement vers l'aval. La rivière conserve, par ce mécanisme d'apport et d'évacuation un profil régulier. Enfin, l'énergie de l'eau se dissipe par la mise en mouvement de ces matières minérales.

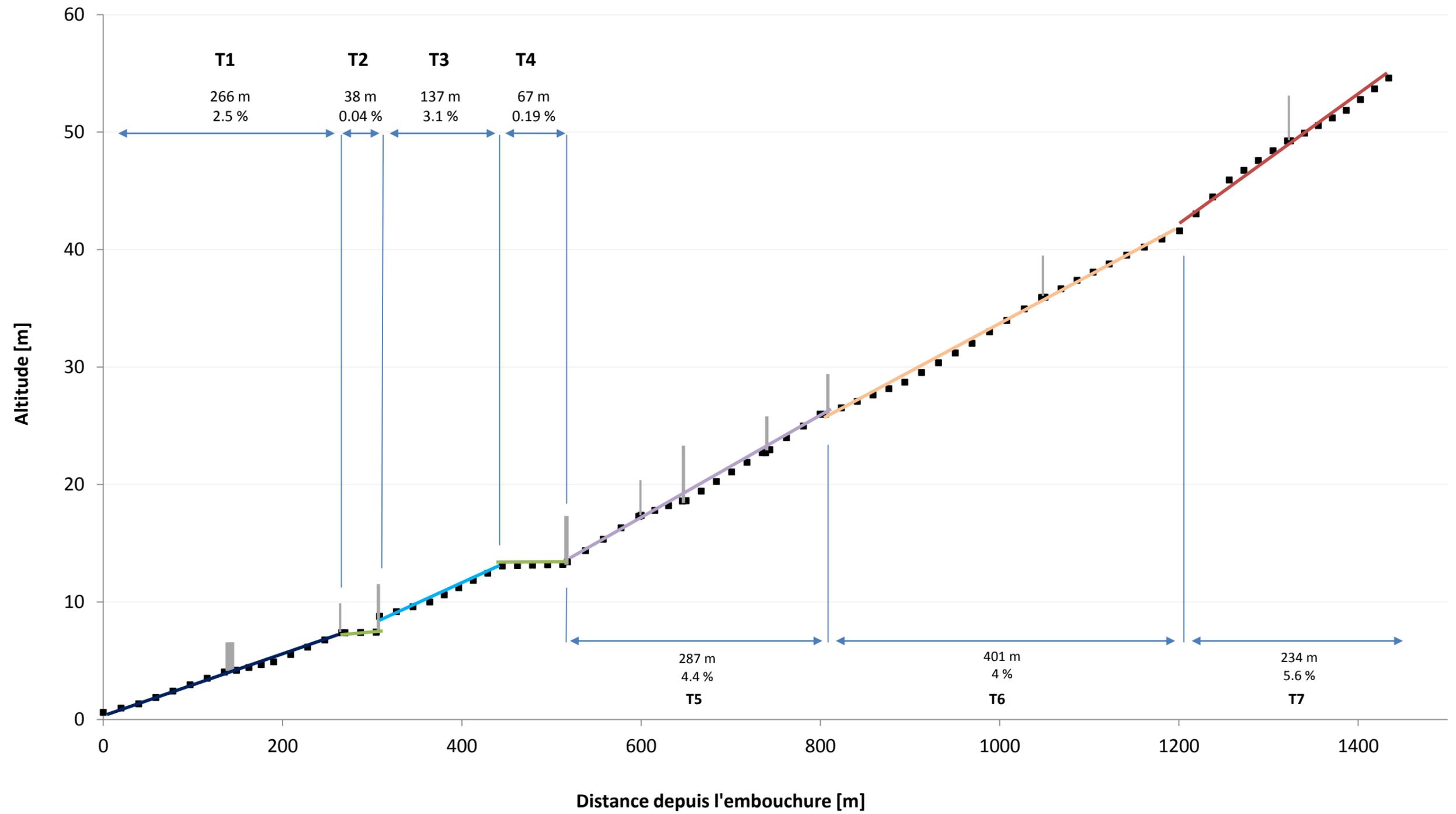


Figure 8 : Profil en long de la partie aval de la rivière Pohaiatera.
(relevé topographique réalisé par le cabinet de géomètre Topo Pacifique)



La description débute à l'amont, à 1 434 m de l'embouchure, là où les premières constructions apparaissent. En descendant sur 922 m, 3 tronçons se succèdent avec une pente longitudinale supérieure à 4%. Quelques aplatissements très localisés peuvent apparaître, notamment autour des passerelles.

La **section T7** est formée d'un lit étroit et relativement profond, les berges offrent un surplomb de plus de 2 m. Sa structure est essentiellement constituée de roches et de sédiments alluvionnaires. Une végétation opportuniste d'herbacés et de lianes rampantes recouvre les talus les moins abrupts.

Le **tronçon T6** est semblable avec toutefois quelques zones d'accumulation de roches et de pierres de bonnes tailles notamment sur la partie aval où la pente est sensiblement moins importante. Un rehaussement du fond du lit s'observe à l'amont de la passerelle correspondant à la limite aval de la section.

Le **tronçon T5** a une pente conséquente qui se traduit par une incision importante du lit, qui est semblable ici à un canal profond. La berge droite se confond, sur presque toute la longueur, avec le flanc de la crête qui surplombe le bassin versant. Pour protéger les terrains à gauche, de solides murs de roches furent édifiés. Toutefois l'enfoncement du lit entraîne une déstabilisation de la base de certaines de ces structures avec des risques d'écroulement à court ou moyen terme. La partie amont est particulièrement sensible, le tracé du lit y fut modifié et présente actuellement une succession de 2 virages serrés qui contrarient l'écoulement naturel des eaux et créent un espace de vulnérabilité face au risque de submersion.

Dans la partie la plus basse de la rivière, deux sections particulièrement sensibles sont identifiées : les **tronçons T2 et T4**, avec une pente très faible pour T2, inférieur à 0.5%. Les deux tronçons s'étendent respectivement sur 38 et 67 mètres. L'implantation d'ouvrages traversants mal conçus explique ces déséquilibres morphologiques. Les ponts ralentissent le flux, les éléments solides se déposent à l'aval de ces obstacles. Le lit se rehausse, le risque d'embâcle est très important, les débordements fréquents. Ces zones sont malheureusement le lieu d'établissement de nombreuses habitations. La situation est ici préoccupante, la sécurité des biens et des personnes est en jeu.

La berge gauche le long de la section T2 est surmontée d'habitats précaires à peine soutenus par quelques « assemblages » instables. La berge droite est basse, s'élevant sur quelques centaines de cm. La rive droite est essentiellement en friche à l'exception d'une habitation très sommaire. Par contre, le lit est large entre 6 et 8 m, tout en présentant un pavage très irrégulier. Ce désordre est largement induit par l'accumulation de roches transportées de l'amont. La pente trop faible réduit la capacité de transport de la rivière (Figure 9). Les blocs lourds sont difficilement mobilisables, ils encombrant et rehaussent le lit. Ils sont souvent le résultat de l'affaissement d'anciens enrochements, leur présence n'a rien de naturel, ils déstabilisent l'équilibre de la rivière.



Figure 9 : Tronçon T2 du cours d'eau présentant une très faible pente. Les éléments solides s'accumulent rehaussant le lit et menaçant des berges sommairement enrochées.

La **section T3** présente une pente suffisante. Sur cette partie, l'équilibre hydromorphologique est satisfaisant même si le cours d'eau reste canalisé en raison de la présence des habitations à proximité.

Enfin, le **tronçon 1** s'allonge sur 266 m jusqu'à l'embouchure. Le lit présente une pente moyenne de 2.5%, suffisante pour favoriser l'écoulement des eaux. Toutefois, son tracé apparaît très artificiel, une ligne droite de presque 100 m se termine par une succession de 2 virages serrés. L'objectif de cette chicane est le contournement des habitations et du rond-point situé sur la route de ceinture. Cette sinuosité engendre nécessairement un déséquilibre énergétique dont les conséquences sont variables en fonction des points de singularité et de faiblesses sur les berges. Des affouillements sur les berges concaves précèdent des rehaussements du lit. A cela s'ajoute la présence du pont de la route de ceinture et de 2 passerelles successives aménagées par les riverains. L'occupation des rives interdit tout élargissement du lit. Ainsi lorsque les crues surviennent, les éléments solides s'accumulent sous les ouvrages traversants et la hauteur d'eau s'élève jusqu'au débordement. Les témoignages des habitants sont, à ce sujet, probants.

Dans cette zone qui forme un petit delta alluvionnaire, un autre phénomène peut gêner l'écoulement des eaux vers l'océan. Lors des fortes houles, le niveau de la mer peut en effet s'élever de plus d'un mètre et contrer le flux de la rivière. En général, les grands événements tempétueux engendrent à la fois une forte pluviométrie et une mer agitée.

Les modifications structurelles du lit ont des influences importantes sur l'hydrodynamisme de la rivière et son évolution morphologique. L'accélération du flux générée par une réduction de l'espace d'écoulement ou par une variation du profil en long engendre une réponse sédimentaire érosive pour les berges. La déstabilisation des ouvrages de protection, enrochements ou murs, participe à l'accumulation des éléments solides. Les conséquences sont délétères lorsque la pente se réduit ou si l'espace d'écoulement diminue. Dans un mécanisme inverse, les affouillements sont observés aux points de fragilité du lit, généralement lorsque les coudes du lit présentent une courbe trop accentuée. Parfois la rivière s'incise sur toute sa largeur. Si ce phénomène réduit le risque d'inondation par débordement, il fragilise le socle de ces ouvrages et menace leur intégrité (Figure 10).



Figure 10 : Incision du lit de la rivière menaçant la stabilité d'un mur protégeant une habitation.

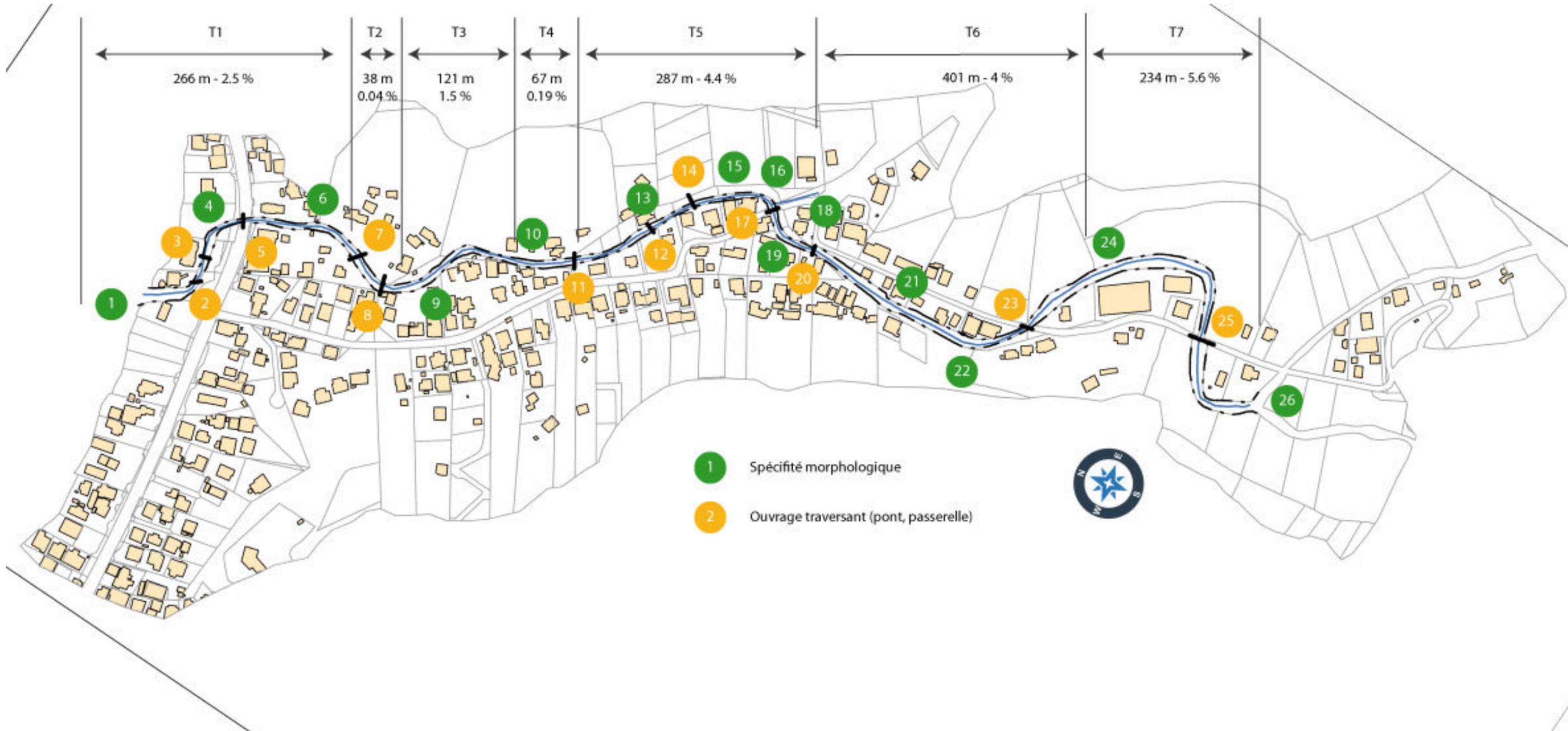


Figure 11 : Spécificités morphologiques dans le lit de la rivière Pohaiatera.

3. Situation hydraulique

3.1. Données géomorphologiques

Pour apprécier avec précision l'état hydraulique et géomorphologique de la partie du cours d'eau, il est important d'inventorier toutes les caractéristiques du lit. Une attention particulière est portée aux ouvrages équipant les talus : enrochements, murs de soutènement, habitations construites sur les berges, ouvrages de franchissement. La rivière Pohaiatera est par exemple traversée par douze passerelles.

La géométrie et l'état des berges sont détaillés dans cette partie, les points de vulnérabilité y sont également référencés. En dehors de l'intérêt pour l'expertise, ces informations sont essentielles pour transcrire les discontinuités morphologiques dans le modèle hydraulique. La qualité de la modélisation dépend en grande partie du réalisme de la structure géométrique du lit de la rivière.

Des relevés topographiques furent réalisés pour l'étude, la géométrie des profils transversaux est consultable en annexe de ce rapport. Les paragraphes suivants ont pour objet la description de l'état hydromorphologique de la rivière Pohaiatera sur 1 500 m à partir de l'embouchure. Toutes les spécificités et les particularités du lit ont été relevées, portées et numérotées sur la Figure 11. Une différenciation est apportée entre les points relevant de l'aspect morphologique (berges, lit) et les points décrivant un ouvrage traversant (pont, passerelle), les pastilles sont respectivement de couleur verte et orange. Pour une meilleure facilité de lecture, les repères numérotés sont regroupés dans les 7 tronçons définis dans la Section 2.6. Il est important de préciser que la rivière était totalement asséchée lors de la visite sur le terrain.

3.2. Tronçon 1 (266 m - pente 2.5%)

3.2.1. Point 1 : Embouchure

La rivière Pohaiatera rejoint l'océan en traversant une plage de sable noir (Figure 12). L'espace est large et plat. Lors des crues, les matériaux charriés se déversent en ce lieu régulièrement arpenté par les riverains ou les touristes. La situation paraît relativement saine lorsque le regard se pose sur l'océan. Par contre en se retournant de nombreux débris végétaux et plastiques baignent dans grande flaque d'eau stagnante et saumâtre (Figure 13).



Figure 12 : Embouchure de la Pohaiatera.

La berge droite est consolidée par un enrochement revêtu sur une hauteur de 150 cm. Une habitation de construction sommaire est située à la limite du sommet de cette berge. Un affaissement de l'ouvrage ferait peser un grand risque aux occupants.

La berge gauche est la rive concave du dernier coude de la rivière (Figure 14) 90 m à l'amont de l'embouchure. L'impact des flots lors des fortes crues est important. L'énergie générée déstabilise les rochers qui soutiennent la berge. Actuellement le talus est remodelé, mais aucune protection n'est réellement en place. Une prochaine crue conséquente emportera la terre et les pierres déstabilisant le terrain contigu (parcelle cadastrale M200). Les riverains font état de débordements réguliers et de l'affaissement de la berge gauche qui est régulièrement reconstruite. A priori sans grand succès.



Figure 13 : Embouchure rive droite, vue vers l'amont.



Figure 14 : Embouchure rive gauche, vue vers l'amont.

3.2.2. Point 2 : Passerelle « artisanale »

A quelques dizaines de mètres à l'amont du dernier coude du lit se trouve une passerelle sommaire formée de deux poutres en acier reliées par quelques planches de bois (Figure 15). La position instable et l'état de l'ouvrage font craindre une rupture. Les blocs s'accumulent et le lit se rehausse en ce point, la hauteur sous le tablier n'excède pas 2 m. L'espace d'écoulement est réduit, le risque d'embâcle est fort à très fort. L'usage de la passerelle semble limité à un franchissement pédestre pour quelques habitants. La passerelle n'a sans doute pas fait l'objet d'une autorisation.

Sur ce tronçon, le lit est large de près de 8 m, la berge gauche monte à 4.2 m, celle de droite par contre ne s'élève qu'à 2 m. Le pavage est irrégulier essentiellement recouvert des galets et des blocs charriés depuis l'amont. Un curage important fut réalisé depuis les fortes crues du mois de janvier.



Figure 15 : Passerelle instable traversant le lit de la rivière.

3.2.3. Point 3 : Passerelle privée en ciment

Seulement 25 m plus loin, une seconde passerelle traverse le lit. Elle est beaucoup plus solide que la précédente. Elle est posée sur des poutres métalliques solidement ancrées dans les berges. Le tablier est en ciment. L'ouvrage est stable et résisterait à des fortes crues. Par contre, sa construction, certainement réalisée sans autorisation, pose un problème important pour l'écoulement de l'eau. La hauteur sous tablier est limitée à 170 cm. De lourds blocs se sont accumulés, ils rehaussent le fond du lit et limite l'espace disponible pour l'écoulement des eaux et de tous les éléments minéraux et végétaux. Le risque d'embâcle très élevé, la submersion des berges régulière. La présence des blocs de roche est à la fois le résultat du charriage naturel de la rivière, mais également la conséquence de l'affaissement des enrochements mal stabilisés aux alentours.

Pour protéger les habitations, un mur de soutènement couvre la berge droite. La berge gauche est renforcée par un enrochement stable, mais moins élevé qui offre une voie de débordement lors de la montée des eaux. Les témoignages de riverains confirment cette analyse et décrivent une submersion sur cette rive gauche. La proximité de la route de ceinture rend la voirie vulnérabilité à l'aléa inondation.



Figure 16: Passerelle construite en ciment pour un accès privé. Vue vers l'amont.

3.2.4. Point 4 : Coude accentué

Le parcours du lit rencontre ensuite un virage serré (Figure 17). Le profil en travers est large, supérieur à 6 m. La berge droite est renforcée par un mur de soutien, haut de 180 cm. La berge droite est moins structurée, des vestiges d'enrochement sont recouverts d'une végétation opportuniste.

Le lit est constitué d'un pavage de galets plutôt régulier. Il semble toutefois qu'un curage des éléments les plus imposants fut réalisé par la Direction de l'Équipement quelques mois auparavant pour purger les embâcles créés lors des dernières fortes crues à la fin du mois de janvier 2017.



Figure 17 : Coude vers la gauche à l'aval du pont de la route de ceinture.

3.2.5. Point 5 : Pont de la route de ceinture

La route territoriale RT2 traverse la rivière Pohaiatera sur le point 5 par un pont qui est l'ouvrage traversant le plus important de la vallée (Figure 18). C'est également celui qui porte le plus d'enjeux. Même si la structure et l'emprise semblent solides, la première évaluation visuelle laisse à penser que son état hydraulique est moyen voir dégradé.

Dans le cadre de cette étude, il est nécessaire de faire abstraction des câbles électriques qui se laissent pendre en dehors de toute sécurité. L'aspect le plus inquiétant est ensuite le niveau du lit de la rivière. La hauteur sous l'ouvrage est faible à cause de l'accumulation de galets et de pierres, elle atteint péniblement 2 m. Le pont est large de 6 m pour une longueur de 13.7 m. Finalement son ouverture est plus proche d'un ponceau rectangulaire, d'un dalot, que d'un pont au-dessus d'un cours d'eau au régime torrentiel.

Le risque d'embâcle est très important, surtout qu'un curage pourrait s'avérer très délicat, voire impossible, si l'amalgame se coince sous le pont. Le risque de submersion est fort à très fort. Ce site est un point de fragilité pour l'équilibre hydraulique du cours d'eau.



Figure 18 : Pont sous la route territoriale RT2. Vue vers l'amont.

3.2.6. Point 6 : A l'amont du pont

Le tronçon à l'amont du pont s'allonge en ligne droite sur 76 m, son état est correct (Figure 19). Le pavage est plus régulier et les berges sont dans un bon état. Celle de droite monte sur 3 m, 2 m pour la berge gauche. Des habitations sont à proximité, elles paraissent correctement protégées.



Figure 19 : Tronçon à l'amont du pont de la route territoriale.

3.3. Tronçon 2 (38 m - pente 0.04%)

3.3.1. Point 7 : Passerelle

Dans un coude de la rivière, est positionnée une passerelle en charpente métallique (Figure 20). La culée destinée à soutenir le tablier est une structure en béton posée contre les berges. L'action érosive de l'eau creuse le lit sous le pilier gauche, l'affouillement est bien visible sur la Figure 21. La stabilité de l'ouvrage est évidemment menacée.



Figure 20 : Passerelle traversant la rivière.



Figure 21 : Affouillement sous la culée gauche.

A tous les ouvrages de franchissement, le lit subit une contraction sur sa largeur. L'espace d'écoulement se réduit. Le phénomène s'aggrave parce que les hauteurs sous les tabliers sont réduites. Moins de 2 m pour cette passerelle. Le risque d'embâcle est fort avec une montée du niveau de l'eau pouvant entraîner une submersion aux alentours.

L'eau paraît s'écouler de préférence le long de la berge droite où le lit est plus incisé. Les dépôts de matériaux sont, en miroir, plus importants près de la rive opposée. Cet écoulement préférentiel s'explique par la légère courbure vers la gauche que suit la rivière.

3.3.2. Point 8 : Passerelle abandonnée

A 35 m de la précédente passerelle se rencontrent les vestiges d'un autre ouvrage traversant (Figure 22). Seule la structure métallique est visible. Le tablier, certainement en bois, a disparu. La construction est peut-être encore utilisée pour des franchissements pédestres. Sa présence reste un obstacle au bon écoulement des eaux et un point de vulnérabilité pour la rivière. L'abandon de ce passage semble indiquer l'impact des crues sur la passerelle. Un autre indice est le rehaussement important du lit de la rivière sur les 50 m amont, à tel point que la pente en long se réduit à 1.5 % sur le tronçon (Section 2.6). En conséquence, la vitesse d'écoulement réduite entraîne un dépôt solide toujours plus important et une fréquence de submersion qui augmente.



Figure 22 : Passerelle métallique abandonnée. Vue vers l'amont

3.4. Tronçon 3 (121 m - 1.5%)

3.3.1. Point 9 : Lit en mauvais état

Ce tronçon est peut-être le plus inquiétant pour la protection des biens et des personnes. La pente longitudinale est faible. Le lit est empli de pierres et de galets. La présence de nombreux débris plastiques est l'indice d'un écoulement trop lent pour mobiliser les débris (Figure 23). D'autre part la force de frottement est importante, plus importante que sur d'autres tronçons de la rivière.



Figure 23 : Le lit de la rivière au fortement rehaussé.
Vue vers l'amont



Figure 24 : L'habitation est sous la menace imminente
d'un affaissement de la berge.

Le lit se comble et la hauteur relative des berges s'abaisse. Sur la rive droite, elle atteint péniblement 150 cm. Sur la rive gauche le problème est plus délicat, même urgent. Une maison est posée sur une partie d'enrochement qui est totalement déstabilisé (Figure 24). Les habitants ont cherché à combler l'espace éboulé par quelques pierres et le soutien de poteaux de bois. Le résultat est préoccupant, la prochaine crue pourrait emporter les cailloux et entraîner un effondrement partiel du bâtiment.

Les débordements sont fréquents, voire très fréquents dans cette partie de la rivière. **Un reprofilage du lit et des travaux de protection des berges sont ici indispensables pour éviter une catastrophe prochaine.**

3.5. Tronçon 4 (67 m - pente 0.19%)

3.5.1. Point 10 : une ligne droite

En remontant de quelques dizaines de mètres, le lit de la rivière est mieux délimité. Son parcours est rectiligne, mais la pente très faible (Figure 25). L'eau ralentit nécessairement sur cette portion et les éléments charriés se déposent. La maison endommagée décrite à la section précédente est discernable sur la photo au bout de la ligne droite. La situation illustre toute la complexité de la mise en protection des bâtiments lorsque les constructions sont très proches des berges : la consolidation de berges à l'amont et le reprofilage du lit peuvent engendrer des dégâts aux points de vulnérabilité à l'aval.



Figure 25 : Tronçon rectiligne présentant une très faible pente. Vue vers l'aval.

La partie amont de cette portion de rivière est la sortie d'un virage (Figure 26). Le lit y est moins structuré. De nombreuses roches couvrent le fond. Leur présence est en partie le résultat de l'éboulement d'anciens enrochements. L'état de cours d'eau n'est pas réellement satisfaisant, mais il n'existe pas de risque immédiat sur cette zone.



Figure 26 : Partie amont du point 10. Vue vers l'amont.

3.5.2. Point 11 : Passerelle

Une passerelle délimite les tronçons 4 et 5. Elle traverse un lit en un lieu où la géométrie est plus étroite, mais plus profonde. Les berges plus hautes limitent le risque de submersion. Le danger à l'amont de ce point est une incision du lit. Inversement, l'aval est plutôt soumis à un rehaussement excessif.

La passerelle s'élève à 4.5 m du sol, sa largeur est de 6 m. Elle permet d'accéder à une demi-douzaine d'habitations sur la rive droite.



Figure 27 : Vue vers l'amont à partir de la passerelle 11.

3.6. Tronçon 5 (287 m - pente 4.4%)

3.6.1. Point 12 : Passerelle privée

Sur le tronçon 5, la pente longitudinale est plus forte. La vitesse de l'écoulement mobilise plus aisément les débris solides.

Le point 12 situe une passerelle privée qui fut installée par les propriétaires pour relier deux terrains leur appartenant (Figure 28).

La hauteur par rapport au lit est légèrement inférieure à 3 m. Les berges sont verticales. Celle de gauche est consolidée par un enrochement solide, à droite c'est un mur de soutènement qui protège le terrain. La structure géométrique générale dessine un chenal d'écoulement qui favorise une vitesse élevée et donc une énergie conséquente pouvant emporter un volume solide important. Le corolaire est un risque d'incision du lit.



Figure 28 : Passerelle privée pour connecter deux terrains d'une même famille.

3.6.2. Point 13 : Incision de la rivière et déstabilisation d'un mur de soutènement

L'incision induite par la géométrie décrite dans la section précédente est visible à l'amont immédiat de la passerelle. L'abaissement du lit est illustré sur la Figure 29. La base du mur de soutènement est apparente, les fondations disparaissent.

Le phénomène est inquiétant, la stabilité de l'ouvrage est menacée. A terme, un effondrement du mur est très probable. En dehors des risques évidents encourus par la maison qui se trouve derrière, le volume de matériaux qui se retrouverait dans le lit pourrait induire des conséquences délétères à l'aval en favorisant les embâcles sous une passerelle et en alimentant puissance destructrice des flots.

Plus généralement, tous les éléments solides qui ne sont pas issus de l'érosion naturelle, mais qui se retrouvent dans le lit à la suite de l'affaissement d'un enrochement, sont une surcharge pour l'équilibre morphologique de la rivière.



Figure 29 : Incision très nette du lit entraînant un risque d'effondrement d'un mur de protection.

3.6.3. Point 14 : Passerelle privée

A 49 m à l'amont de la précédente passerelle, un autre ouvrage traversant également installé par un riverain. La Figure 30 est une photo prise de ce pont.

Le lit est large de 4 m, la hauteur des berges comme l'espace sous le pont est également proche de 4 m. Le risque d'embâcle est assez réduit sur cette section du cours d'eau.

A 30 m vers l'amont, une poutrelle métallique est positionnée en travers de l'écoulement. Elle est notifiée par le rectangle blanc sur la Figure 30. Elle est utilisée, à priori, pour faire traverser un câble électrique ou une petite canalisation, l'installation est très « artisanale ». Si cet élément se retrouve emporté par les flots, le danger pour les aménagements à l'aval est évident.



Figure 30 : Vue vers l'amont depuis une passerelle privée.
Un élément de charpente métallique traverse le lit à une trentaine de mètres.

3.6.4. Point 15 : Incision de la rivière et affouillement de la berge

Les points 15 et 16 sont l'entrée et la sortie d'un coude presque droit de la rivière. L'angle prononcé favorise une dynamique des eaux particulièrement turbulente.

La berge droite se confond avec le versant de la crête la surplombant, versant bien abrupt. La berge gauche est structurée par une succession de deux hauts murs protégeant des habitations. En cas de crue, l'eau ne peut s'épandre, son énergie se dissipe alors en creusant les zones les plus fragiles.

Contrairement aux sections à l'aval, le pavage est beaucoup plus irrégulier signe d'un ralentissement des eaux, le dépôt de roches et de pierres est important, la pente au centre du lit se réduit. En miroir, un affouillement significatif s'observe en sortie de virage, au pied de la berge gauche (Figure 31). Il menace la stabilité du mur de béton. Le risque d'effondrement est loin d'être négligeable.



Figure 31 : En sortie de virage, un affouillement au pied de la berge gauche menace la stabilité d'un mur de protection.

3.6.5. Point 16 : Affouillement de la berge

Le point 16 est donc la zone à l'amont du coude de la rivière décrit dans la section précédente. En premier lieu, on observe une accumulation importante d'éléments minéraux dans le lit. Il est également important d'examiner l'érosion prématurée de la berge droite (Figure 32). La structure du sol est dégradée, à fortement dégradée, d'une couleur ocre à rouge avec une faible, à très faible, proportion de fragments de roches. Sa cohésion est fragile et s'effrite sous l'action des crues. Des habitations sont en surplomb à une vingtaine de mètres au-dessus. Si le danger n'est pas immédiat, à moyen terme, il ne peut être exclu qu'un affaissement plus important menace l'emprise des constructions.

La problématique hydromorphologique est ici due au tracé du lit qui propose une courbe accentuée face à une berge fragilisée. Les éléments d'urbanismes peuvent difficilement être déplacés pour rendre de l'espace à la rivière. Des travaux de sécurisation, tel qu'un enrochement pourrait en partie limiter le problème, mais il faudrait l'intégrer dans une réhabilitation de tout le tronçon jusqu'à 100 m à l'amont et à l'aval.



Figure 32 : Berge droite usée par la force des eaux frappant la rive concave. Vue vers l'aval.

3.6.6. Point 17 : Passerelle d'accès

A l'entrée du virage décrit au point 16 est positionnée une passerelle métallique portant la route d'accès au fond de la vallée. La Figure 33 propose une vision claire de la situation. La pente n'est pas très importante sous l'ouvrage traversant et le lit est encombré par un grand volume de cailloux et de roches. Ainsi la hauteur maximum y est inférieure à 2 m pour une largeur de 5 m. L'espace est réduit pour des débits pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres cubes. Le rehaussement du lit a l'avantage de ne pas mettre en danger les piliers de la passerelle.



Figure 33 : Passerelle portant la route d'accès au fond de vallée. Vue vers l'amont.

3.6.7. Point 18 : Caniveau drainant

Le point 18 est l'exutoire d'un caniveau qui draine une surface contributive de 35 ha (Figure 34). Cette surface n'est pas négligeable et l'écoulement qu'elle génère est directement relié au cours principal de la rivière Pohaiatera entre les points 16 et 17. Le fossé principal est en bon état, sans doute entretenu régulièrement par les riverains.

Les débits générés par cet affluent sont pris en compte dans le modèle hydraulique de l'étude. La pluviométrie est convertie en débit en rapportant le taux de ruissellement à l'étendue du sous-bassin versant.



Figure 34 : Caniveau drainant un sous bassin versant de la vallée de Tefa'aroa et alimentant la rivière Pohaiatera.

3.6.8. Point 19 : Coude et zone de débordement

Le point 19 correspond au chenal immédiatement à l'amont de la passerelle du point 17. Le tracé est canalisé entre des murs de protection sur 20 m, à l'aval d'un coude très serré. La berge gauche sur la rive concave subit de face les assauts de la rivière lors des crues. Le point de fragilité est mis en lumière par le cadre rouge sur la photo (Figure 35). La berge est basse et son enrochement largement déstabilisé. Le terrain situé derrière cette trop fragile protection est régulièrement le siège d'inondations. La fréquence du phénomène est, d'après les témoignages, annuelle donc pas réellement rare.

L'observateur attentif aura remarqué que les pierres et roches emmenées depuis l'amont se déposent dans le virage générant un rehaussement du lit qui facilite la montée des eaux et la submersion.



Figure 35 : Ligne droite canalisée entre deux virages serrés. Le rectangle rouge attire l'attention sur un point de vulnérabilité de la berge concave, les débordements y sont fréquents.

Les problèmes hydromorphologiques et les dangers qu'ils engendrent seront difficiles à corriger sur cette portion de la rivière. Ils sont les conséquences d'un dessin assez peu naturel et d'un endiguement de circonstance lié à l'implantation des premières constructions. Tous les espaces non protégés, ou mal protégés, sont des points de vulnérabilités où la rivière dissipe son énergie accumulée. Les travaux de protection du point 19 par un enrochement d'importance auraient un impact sur des éléments plus fragiles à l'aval, la passerelle par exemple. Pourtant, il est nécessaire de sécuriser le terrain et l'habitation en contre bas. La seule réponse pérenne serait de repenser le tracé du lit et la succession des deux virages.

3.6.9. Point 20 : Passerelle d'accès

Immédiatement à l'amont du point 19 se trouve une autre passerelle en béton qui s'appuie sur une structure métallique (Figure 36). Elle situe le point de départ de la chicane entraînant les désordres hydromorphologiques discutés dans les sections précédentes.

Sous la passerelle, le lit est large de 4.2 m avec une hauteur sous le tablier de 2.3 m. Cet ouvrage n'est pas élevé et doit engendrer la création d'embâcles. L'indice le plus probant est un rehaussement du lit immédiatement à l'amont de l'ouvrage.

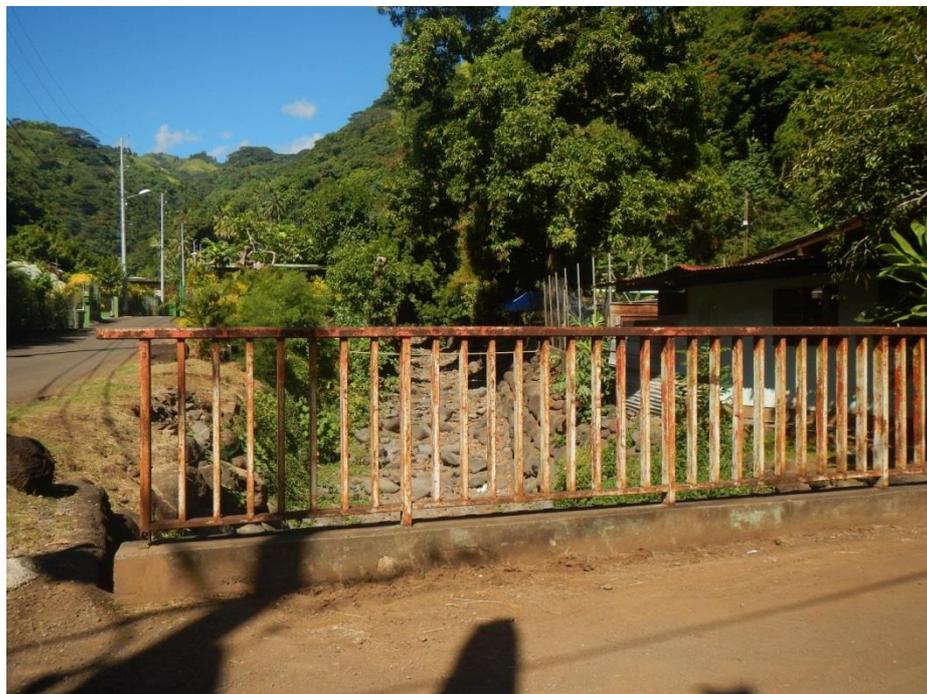


Figure 36 : Passerelle bétonnée à 800 m de l'embouchure, à l'amont d'une succession de deux virages serrés.

3.7. Tronçon 6 (401 m - pente 3.9%)

3.7.1. Point 21 : Tronçon endigué

Sur 160 m vers l'amont, le lit suit une ligne droite presque parallèle à la route d'accès (Figure 37). Cette portion est relativement uniforme. Des habitats sommaires et fragiles sont « posés » sur les rives. Quelques enrochements consolident les berges. Sans discontinuité dans le lit, et avec une pente longitudinale suffisante (4%), l'écoulement se propage régulièrement vers l'aval.

Le pavage est régulier formé par des galets de taille moyenne. Le transport solide semble équilibré, toutefois un curage récent est peut-être intervenu suite aux inondations du mois de janvier 2017. Aucun indice ou témoignage n'a permis d'étayer cette hypothèse.



Figure 37 : Portion de rivière 21 qui suit une trace en ligne droite.

3.7.2. Point 22 : Seuil et coude

Le point 22 désigne un coude de la rivière entre la passerelle 23 à l'amont et la portion rectiligne 21. Le virage ne pose pas de problème particulier, la berge concave se confondant avec la pente qui descend de la crête en surplomb. Pas d'affouillement inquiétant n'a été observé.

Par contre, à l'aval immédiat de la passerelle se trouve un saut de près d'un mètre, une véritable rupture de pente. La dénivellation n'est pas forcément évidente sur la Figure 38, le trait rouge permet d'en situer plus précisément l'emplacement. Son origine est certainement due à l'intervention d'une tractopelle, peut-être pour consolider les piliers de l'ouvrage traversant, plus probablement pour relever les enrochements sur les deux berges. Quoiqu'il en soit, ce travail superficiel induit une modification morphologique notable du lit, et les enrochements sont peu stables.

Les conséquences lors d'une prochaine crue sont délicates à prévoir. Le lit peut s'inciser encore plus à l'aval du saut et déstabiliser les berges. Le transport solide peut être stoppé à l'amont ou sous la passerelle et participer à la création d'un embâcle. La rivière peut également combler assez naturellement l'espace vide et retrouver un profil plus régulier. Usuellement, il n'est pas conseillé de modifier à ce point le profil du lit.



Figure 38 : Seuil à l'aval d'une passerelle avec des berges mal stabilisées.

3.7.3. Point 23 : Passerelle d'accès

La passerelle 23 est une structure métallique sur lequel s'appuie un tablier en bois. L'espace sous l'ouvrage présente des dimensions réduites : 4.9m de largeur pour 2.6 m de hauteur.

La passerelle est posée sur des culées en béton, elles-mêmes bordées d'enrochement pour les immobiliser. Malheureusement, sur la berge gauche un mur de parpaings, érigé pour protéger un terrain limitrophe, montre des signes d'altération importants suite à des mouvements du sol. La berge est instable, les blocs utilisés pour l'enrochement finiront par s'ébouler dans le lit et s'ajouter aux éléments minéraux que l'écoulement devra mobiliser au risque d'induire la formation d'embâcle.

L'ouvrage traversant doit être régulièrement suivi pour évaluer un éventuel risque de déstabilisation.



Figure 39 : Le muret à la sortie de la passerelle à gauche, subit l'action d'un mouvement du sol.
La berge n'est donc pas stable.

3.8. Tronçon 7 (234 m - pente 5.6%)

3.8.1. Point 24 : Lit peu aménagé

La portion du cours d'eau à l'amont de la passerelle 23 est peu aménagée, et non canalisée (Figure 40). Le lit a une largeur de 12 m, laissant un certain espace pour que l'eau puisse s'éprendre. La végétation sur les berges joue son rôle en dissipant l'énergie du flux, physiquement la rugosité augmente.

La pente longitudinale est significative à plus de 5%. Le pavage du lit semble stable signe d'un fonctionnement équilibré du transport solide.

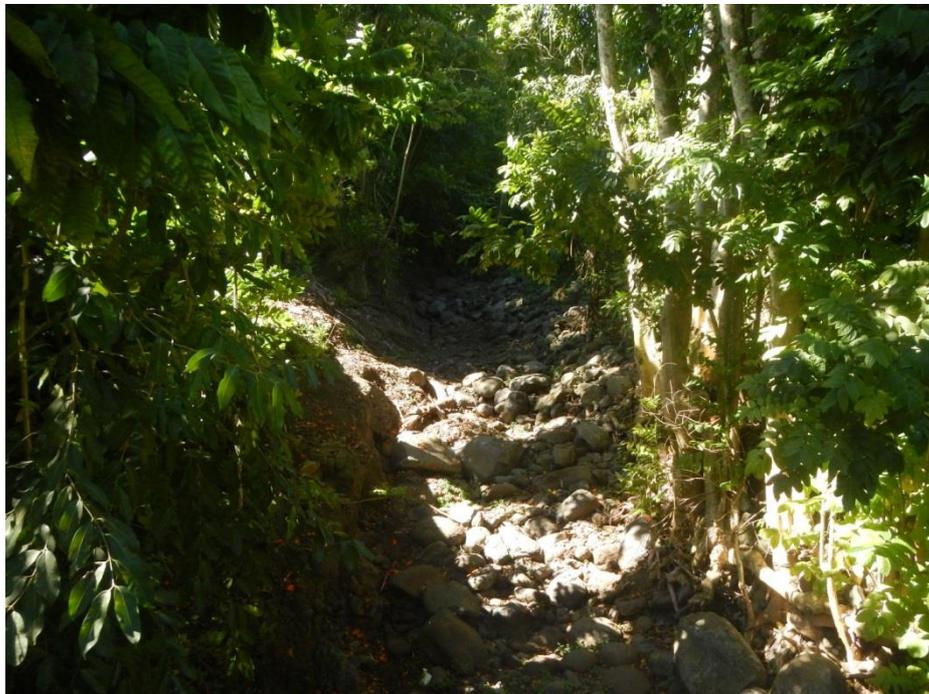


Figure 40 : Portion de rivière dans un état (presque) naturel, la rivière a de l'espace pour s'écouler.

3.8.2. Point 25 : Dernière passerelle

La passerelle du point 25 est le dernier ouvrage traversant sur la servitude d'accès au fond de la vallée de Tefa'aroa. La structure de l'ouvrage est identique au précédent, une charpente métallique sur laquelle repose un tablier de poutre en bois. L'ensemble est en bon état.

La présence de terre et de cailloux entre les planches peut être l'indice d'une submersion de la passerelle. Le lit n'est pas très profond sur cette portion de la rivière, une hauteur de 2.5m pour une largeur entre 4 et 5 m.

A l'amont le cours d'eau reste dans un état relativement naturel, les traces d'une modification anthropique (enrochement ou seuil) ne sont pas visibles.



Figure 41 : Présence de terre et de cailloux sur le tablier de la passerelle.



Figure 42 : Vue vers l'amont du lit au-delà de la dernière passerelle.

Après une courbe large sur 150 m, la rivière atteint un premier point de confluence à 1 500 m de son embouchure

3.8.3. Point 26 : A l'amont de la confluence

Au-delà du point de confluence, la rivière se sépare en deux bras. L'affluent Ouest draine un sous bassin versant de 216 ha, le second traverse un sous-bassin versant de 352 ha.

Une dizaine d'habitations se partage l'espace de 1.3 ha entre les deux cours d'eau. Les deux lits ne sont pas très larges même si celui venant d'Est est légèrement plus grand. Dans les deux cas, les berges sont consolidées par des enrochements qui ne présentent pas de signes de danger. La pente longitudinale est supérieure à 5.5 % engendrant une vitesse d'écoulement certainement importante et un charriage de matériaux du lit assez régulier.

Les témoignages des riverains n'indiquent pas de débordements récents ou d'inondation. Le risque principal serait induit par l'accumulation de gros débris végétaux et la formation d'embâcle.

A l'amont de la zone habitée, les bras retrouvent l'état naturel des rivières torrentielles en zone près montagneuse.



Figure 43 : Bras Est de la rivière à 70 m du point de confluence.

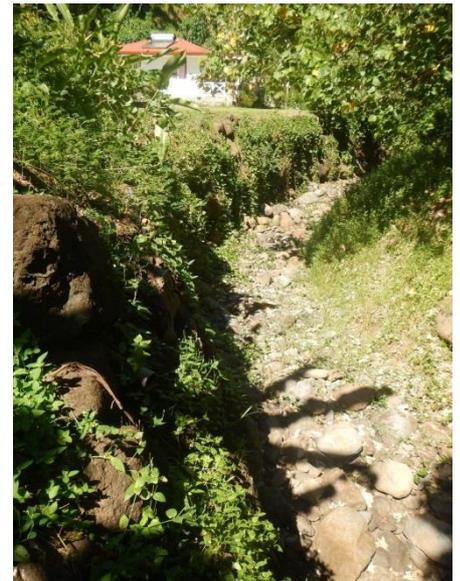


Figure 44 : Bras Ouest à 130 m du point de confluence.

4. Modélisation hydraulique en rivière

4.1. Principes théoriques

4.1.1. Description

La modélisation des écoulements dans un bassin versant s'appréhende sous deux approches. L'analyse hydrologique se concentre essentiellement 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 étudiée dans ce domaine d'investigation. 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.

L'approche hydraulique cherche à décrire les phénomènes en jeu lorsque l'eau est canalisée, naturellement dans un lit de rivière ou à travers des ouvrages artificiels. La modélisation permet, entre autres, le dimensionnement de structures (canaux, vannes, exutoires, barrages) ou de 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 thème qui est ici abordé.

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. Ces solutions nécessitent des volumes de données conséquents sur d'assez longues périodes. Ils sont aussi généralement liés à une zone d'étude spécifique. Un changement de lieu entraînant 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 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, peu sensibles au calage des paramètres.

Ces modèles mécanistes sont particulièrement bien adaptés à la représentation dynamique des écoulements superficiels où les processus physiques sont bien appréhendés. 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.

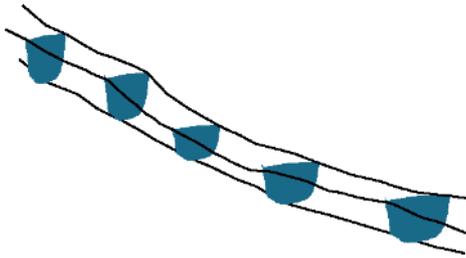


Figure 45 : Représentation schématisée d'un profil en long d'un cours d'eau à modéliser.

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 45 est une représentation schématisée d'un tronçon de rivière entrecoupé de profils transversaux.

Pour chaque section transversale (Figure 46), 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.

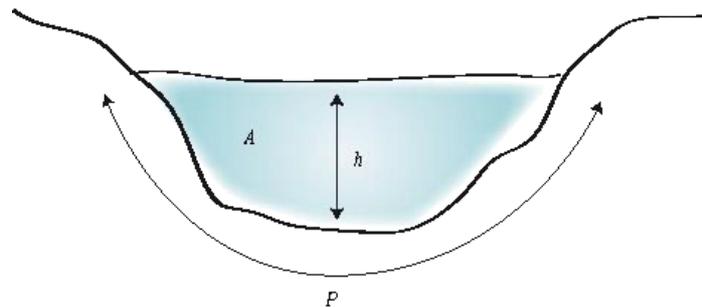


Figure 46 : Section transversale d'un cours d'eau.

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 est peu utile de rentrer ici dans les détails algébriques, mais comprendre le fonctionnement d'un modèle permet de mieux appréhender 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.

4.1.2. Singularité hydraulique

Dans les modèles mécaniques, les équations de Barré Saint-Venant ne prennent pas en compte les obstacles physiques qui modifient brutalement l'écoulement. Ce type de discontinuité s'observe au voisinage d'une singularité hydraulique dans le lit du cours d'eau. Ces singularités peuvent être naturelles (rétrécissement, élargissement, jonction de cours d'eau, chute d'eau), le plus souvent artificielles (pont, déversoir, captage d'eau, guet, canalisation ...).

Pour traiter ces singularités, deux stratégies sont possibles. La plus aisée consiste à prendre en compte les pertes de charge aux abords de ces obstacles dans le modèle initial. Cette hypothèse est une simplification de la représentation du système. Si les modifications de l'écoulement doivent être étudiées avec plus de précisions, notamment pour observer la résistance des ouvrages, un module spécifique est implémenté pour chaque élément singulier.

4.1.3. 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 sont variées et présentent avantages et inconvénients. La littérature est prolixe sur le sujet (e.g., Hingray et al., 2009 ; Brunner, 2016). Généralement, **la modélisation en 2 dimensions** est préférée en zone d'estuaire ou dans des baies avec une faible pente. Les écoulements sont alors croisés et largement influencés par la topographie de la zone. Le lit est large et la vitesse d'écoulement lente. Ce choix convient bien lorsque la rivière ou le fleuve est entrecoupé de larges méandres. Par contre la précision des données est importante autant que le volume d'information nécessaire. 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.



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. Par contre, elle impose de travailler avec un régime transitoire (Section 4.1.4). 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 notamment 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.

4.1.4. 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. Malheureusement, la rivière Pohaiatera n'a jamais fait l'objet d'une campagne de mesure hydrologique. Pour l'étude en cours, il n'était pas envisageable d'instrumenter les cours d'eau sur plusieurs mois, les coûts et les délais auraient été trop importants. Une méthode hydrologique développée par Vai-Natura, s'appuyant sur la littérature tout en



s'adaptant au contexte particulier des îles hautes en zone tropicale, a tout de même permis de reconstruire des données hydrométriques à partir de la pluviométrie (Section 5.2).

4.1.5. 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).

4.1.6. Calage du modèle

Le calage du modèle est une étape cruciale pour évaluer sa prédictibilité. 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 ou les hauteurs mesurées pendant un épisode de crue. La difficulté dans l'étude proposée est qu'aucune de ces données n'est disponible ou n'a fait l'objet d'un protocole d'acquisition fiable. Seuls les témoignages de riverains offrent quelques indications contextuelles. Ces informations sont évidemment assez spéculatives.

5. Analyse hydrologique

5.1. Approche initiale

5.1.1. Objectifs

Dans un bassin versant, les écoulements de surface se synthétisent assez simplement par le réseau hydrographique. Chaque branche de ce réseau constitue une ramification d'un ensemble hiérarchisé s'écoulant de l'amont vers l'aval. En s'éloignant des sources, les ruisseaux sont alimentés par un nombre d'affluents toujours croissant, les volumes d'eau drainés sont de plus en plus importants. La rivière principale est finalement le collecteur de tout le ruissellement. C'est pour cette raison qu'il est d'usage de considérer le débit à son exutoire comme la valeur résumant l'écoulement superficiel.

Le bon dimensionnement d'un aménagement hydraulique, sur un ouvrage ou dans le lit d'un cours d'eau, dépend des volumes d'eau à drainer, donc des débits maximums, ou débits de crues, pouvant être induits par le ruissellement de surface. L'étude des épisodes de crue, ou au minimum une évaluation quantitative, est donc indispensable. Une crue est un épisode de fort écoulement dans une courte période de temps. En fonction des contextes hydrogéographiques et des besoins techniques, différentes fréquences d'apparition des crues rares sont considérées. L'étude des données historiques permet de calculer la fréquence d'apparition de ces crues (2 ans, 5 ans, 10 ans). Lorsque les événements sont plus rares et que les données ne couvrent pas une période suffisante l'analyse fréquentielle permet d'obtenir un « diagramme fréquentiel » (e.g. diagramme de Gumel) utiliser pour estimer des crues exceptionnelles avec un temps de retour de 50 ou 100 ans.

L'hydrologue peut utiliser des données de débit lorsqu'elles sont connues. Le travail peut également s'appuyer sur un hydrogramme de crue qui est une fonction permettant de reproduire la dynamique du ruissellement de surface sur un pas de temps choisi (minute, heure, jour). Cette fonction se détermine classiquement en mesurant les débits dans une section transversale du cours d'eau. Cette opération est conditionnée par la présence d'une station hydrométrique.

Lorsque les données de débit n'existent pas ou sont trop parcellaires, l'hydrologue cherche à lier l'hétérogramme des pluies à l'hydrogramme des débits sous quelques hypothèses simplificatrices. La pluie est l'information hydrologique la plus aisément accessible et la plus représentative spatialement.

Ce travail, cherchant une relation entre pluie et débit, peut s'appuyer sur différentes approches conceptuelles, physiques ou plus statistiques. Les méthodes les plus usitées sont empiriques, ou pseudo-empiriques (Hingray et *al.*, 2009). Les plus répandues sont la méthode rationnelle et la méthode de Caquot (également nommée « méthode superficielle »). Cette dernière s'applique exclusivement à un contexte urbain. Elle est peu appropriée à la Polynésie. La méthode rationnelle est plus adaptable.

5.1.2. La méthode rationnelle

Le principe de la méthode rationnelle se fonde sur les hypothèses de proportionnalité et de linéarité de la transformation pluie-débit exprimée dans sa forme générale par l'expression suivante :

$$Q = C_r I_m A \quad (1)$$

où Q est le débit de point [L^3/T] ; C_r représente le coefficient de ruissellement sur le bassin versant [-] ; I_m est l'intensité moyenne de la pluie [L/L] ; et A , la superficie du bassin versant [L^2].

Le paramètre A est obtenu à partir des informations géomorphologiques du bassin versant. La valeur de C_r est un peu plus délicate à évaluer. Elle dépend physiquement de la longueur du bassin versant, de la pente, mais également de la capacité d'infiltration du sol qui est conditionnée par la conductivité hydraulique et la proportion des cailloux dans le sol. Une estimation correcte de C_r demande alors toute l'expérience d'un hydrogéologue. Si les données historiques sont suffisantes, l'analyse stochastique est une approche différente, également efficace.

Le paramètre I_m représente l'intensité d'un épisode pluvieux d'une durée t_c , égale par ailleurs au temps de concentration du bassin versant, pour une période de retour T . Il peut être évalué à partir de données historiques ou approché par des formules dépendant de paramètres régionaux. La plus commune est la formule de Montana :

$$i(t_c T) = a \cdot t_c^{-b} \quad (2)$$

où t_c correspond au temps de concentration du bassin versant ; T est la période de retour ; $i(t_c T)$ représente alors l'intensité de la pluie de fréquence T pour un temps de concentration t_c , généralement i s'exprime en mm/h ; enfin, a et b sont les paramètres de Montana correspondant à une averse de fréquence T et d'une durée t_c .

Les paramètres a et b sont entièrement liés à la « région pluviométrique » et sont généralement élaborée à partir d'anciennes études statistiques. Leur estimation est fiable en des contrées largement explorées comme la France métropolitaine, elle est plus floue et délicate pour des sites éloignés tels que les îles du Pacifique Sud. En outre, l'origine de ces estimations n'est pas toujours bien renseignée et laisse planer un doute sur leur validité et leur représentation spatiale. Pour toutes ces raisons la formule de Montana ne nous apparaît pas la meilleure voie pour estimer l'intensité d'un épisode pluvieux en Polynésie.

5.1.3. Principe de la méthode GRADEX

Un principe bien plus robuste fut testé et validé, par un groupe de recherche de la société EDF¹ (Guillot et Duband, 1967 ; CFGB, 1994), lors de l'élaboration de la méthode GRADEX. Il est surtout efficace pour l'estimation des crues rares dont le temps de retour est supérieur à 10 ans. La méthode se base sur les hypothèses suivantes (Hingray et *al.*, 2009) :

- les débits de crue maximum sont provoqués par les pluies maximales uniformément réparties sur le bassin versant ;
- la capacité de rétention du sol atteint une valeur limite à partir d'un certain cumul pluviométrique. A partir de ce seuil, les pluies maximales et les débits extrêmes suivent la même loi de distribution statistique.

En d'autres termes, le comportement asymptotique de la loi de probabilité des ruissellements est « supposé » identique au comportement asymptotique de la loi de probabilité des pluies maximales. Dans la pratique, les distributions des précipitations extrêmes et des crues sont approchées, généralement, par la loi de Gumbel dont la variable réduite est :

$$u = -\ln(-\ln(F(T))) \quad (3)$$

La distribution des débits extrêmes est alors une droite parallèle à celle des pluies, le GRADient des valeurs Extrêmes (GRADEX) est le même pour les deux distributions. Concrètement cela signifie que les débits maximum peuvent être déduits directement de la distribution des pluies extrêmes. Le sens physique de cette approche est de considérer qu'au-delà d'un certain seuil, dans l'intensité d'une averse, l'infiltration se stabilise. Le corolaire est un coefficient de ruissellement C_r fixe qui s'approche de 1.

C'est ce principe de conversion directe entre les distributions des débits et des pluies rares qui est adopté dans notre analyse.

¹ Electricité de France

5.1.4. Estimation des crues extrêmes

Le mécanisme choisi pour estimer les débits de crues rares s'appuie sur les étapes suivantes :

- 1- la détermination du temps de concentration du bassin versant t_c qui doit permettre d'évaluer la durée de l'épisode pluvieux qui doit être considéré ;
- 2- l'analyse fréquentielle des pluies réalisée à partir de données historiques et ajustées par la loi de Gumbel, pour estimer les lames d'eau (en mm) d'évènements rares sur des temps de retour décennal voir centennal. Si les mesures ne sont pas disponibles sur une période égale à t_c , le principe sera une étude des données journalières avec une répartition de l'intensité pluviométrique identique au rapport qui pourra être extrait d'études sur une station pluviométrique voisine ;
- 3- l'estimation du coefficient de ruissellement C_r ;
- 4- enfin, le calcul des débits de pointe pour les évènements extrêmes.

Finalement, les débits de crues sont calculés sur la base de l'équation de la méthode rationnelle (Eq. 1), mais en se basant sur le principe de la méthode GRADEX et l'analyse fréquentielle des épisodes pluvieux rares (loi de Gumbel).

Le calcul du **temps de concentration** d'un bassin versant peut s'appuyer sur diverses formules prenant essentiellement en compte les caractéristiques morphologiques de la zone contributive (longueur maximum du cours d'eau ou talweg, pente moyenne, surface). Les modèles les plus répandus sont celui de Kirpich en zone urbaine (Eq. 4), ceux de Passini (Eq. 5) ou Ventura (Eq. 6) pour les bassins plus ruraux. Il existe encore le modèle de Giandotti (Eq. 7) ou celui du corps des ingénieurs de l'armée américaine (US Corps, Eq. 8). La meilleure démarche est une comparaison des temps de concentrations obtenus par les différentes formules.

$$\text{Kirpich} \quad t_c = 0.0195 \times \frac{L^{0.77}}{P^{0.385}} \quad (4)$$

$$\text{Passini} \quad t_c = \frac{0.14 (S \times L)^{0.33}}{\sqrt{P}} \quad (5)$$

$$\text{Ventura} \quad t_c = 0.763 \frac{S}{\sqrt{P}} \quad (6)$$

$$\text{Giandotti} \quad t_c = 60 \frac{4\sqrt{0.01 \times S} + 1.5 \times 0.001 \times L}{0.8\sqrt{P \times L}} \quad (7)$$

$$\text{US Corps} \quad t_c = 16.682 \left(\frac{L \times P^{0.25}}{1000} \right)^{0.77} \quad (8)$$

où t_c est le temps de concentration du bassin versant (en minutes) ; L est la longueur maximum de la zone contributive (en m) ; S est la surface (en ha) ; et P représente la pente (en m/m).

5.2. Données disponibles et hydrométrie

Sous l'influence prépondérante des alizés d'est/nord-est, les courants aériens des systèmes dépressionnaires se heurtent aux reliefs des îles hautes et cherchent à les contourner ou à les surmonter. La topographie joue ainsi un rôle important dans le déclenchement des épisodes pluvieux. Lorsque les masses d'air humide remontent les pentes du relief (phénomènes d'ascendance), elles rencontrent des températures plus basses en altitude, ce qui favorise la condensation et donc les précipitations (Cauchard et Bergès, 1990). La Figure 47 permet de visualiser le phénomène de muraille naturelle, les crêtes d'altitude, faisant obstruction aux systèmes nuageux. Les versants est, au vent, subissent des précipitations beaucoup plus abondantes qu'à l'ouest, sous le vent. Après avoir franchi les crêtes, les courants aériens redescendent le long des pentes, le vent et les nuages se dissipent alors. En altitude, le cumul annuel de pluie peut atteindre plus de 10 000 mm d'eau. Dans la partie ouest de l'île, la pluviométrie annuelle s'établit plutôt entre 3 500 à 4 000 mm (Lafforgue, 1993) (Figure 48). Les disparités pluviométriques sont également dues à l'altitude et à la saisonnalité.

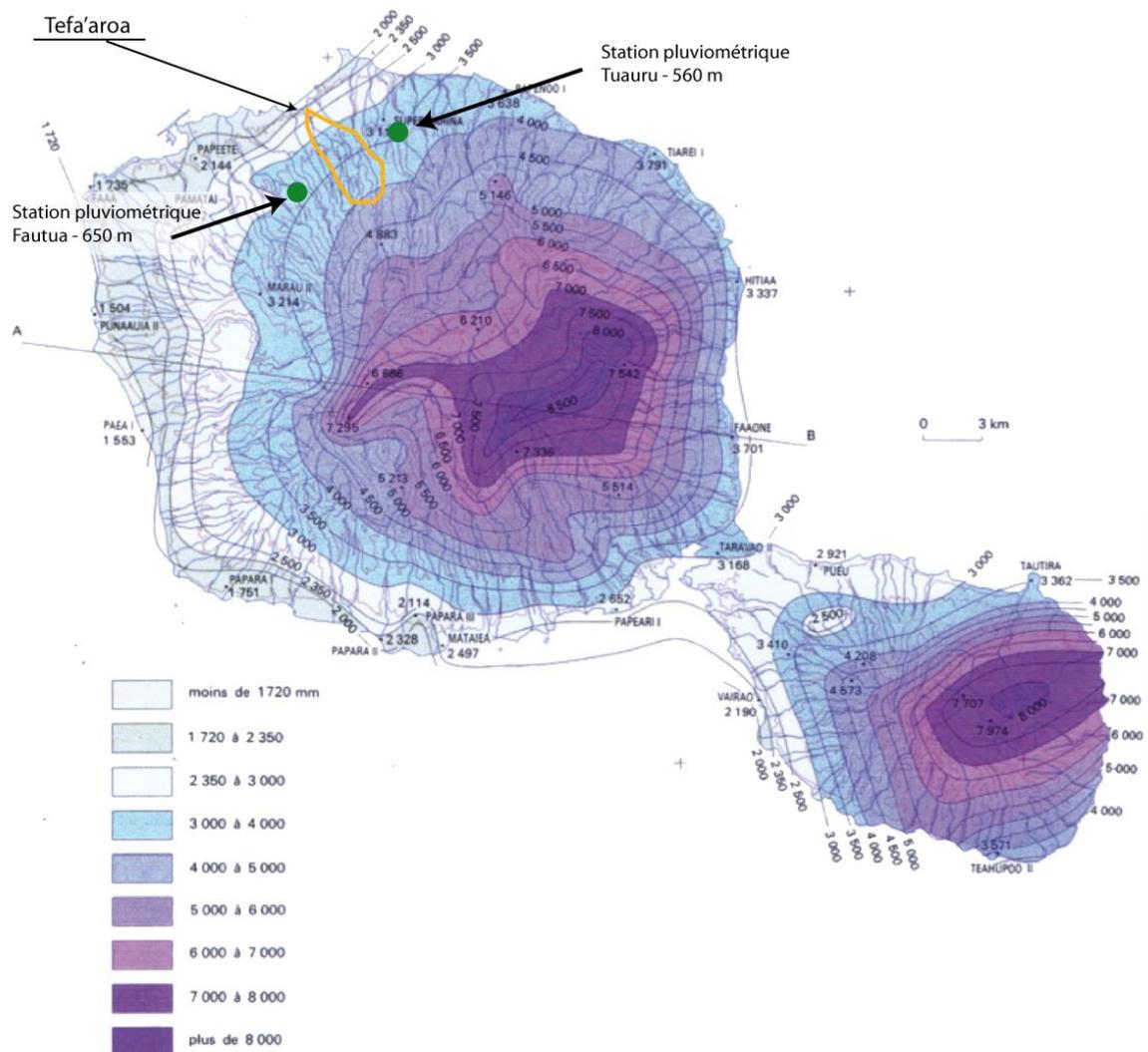


Figure 47 : Isohyètes des précipitations moyennes annuelles de l'île de Tahiti.
(tiré de Lafforgue, 1993)

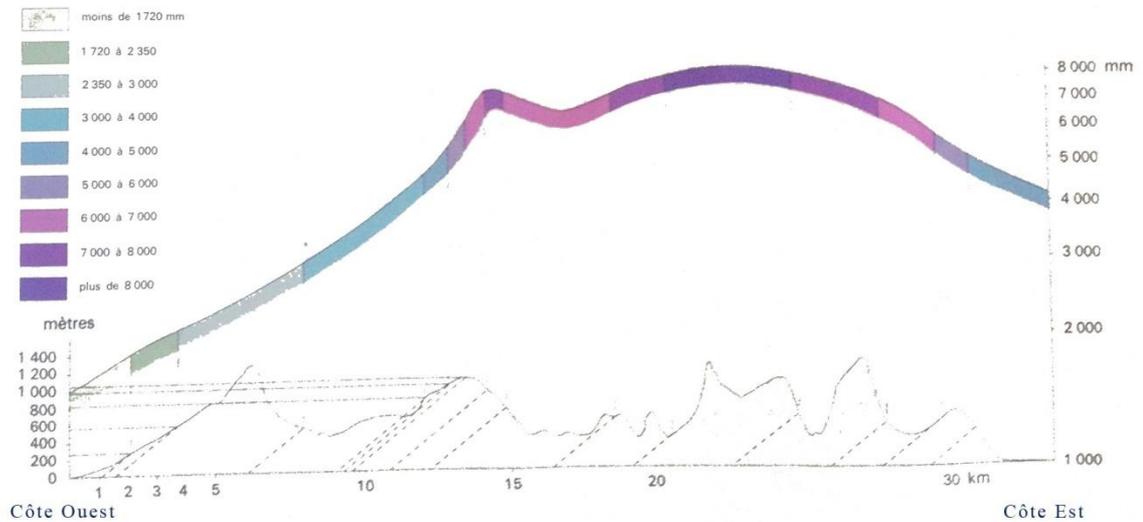


Figure 48 : Dissymétrie pluviométrique entre les versants Est et Ouest sur l'île de Tahiti. (Lafforgue, 1993).

Les données hydrologiques de la Polynésie française sont actuellement sous la gestion de la cellule hydrologie du GEGDP², sous la tutelle de la Direction de l'Équipement. Cette cellule maintient le réseau de mesure actuellement déployé sur l'île de Tahiti, mais hérité de la section hydrologie de l'ORSTOM³ qui installa les premiers appareils de mesure en 1972 (ORSTOM, 1975). Actuellement, 26 stations équipées d'un appareil automatique enregistrent en continu la dynamique de l'aléa pluviométrique. Les données informatisées les plus anciennes datent de 1987.

La vallée de Tefa'aroa s'est creusée à travers une planète du bouclier originel (Section 2.2). Elle est allongée, mais ne couvre par une très grande superficie, elle n'est pas très profonde. Sa capacité de réservoir est finalement faible. La conséquence directe est une rivière rapidement asséchée lorsque les apports atmosphériques se tarissent. En saison humide, où lors d'épisodes pluvieux particulièrement intenses le cours d'eau peut connaître des débits extrêmement élevés. Cette intermittence de l'écoulement permettrait de qualifier la rivière Pohaiatera de *ravine* (Lévêque, 2016).

² Groupe d'Étude et de Gestion du Domaine Public

³ Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, organisme aujourd'hui remplacé par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD)

5.3. Calcul des débits de crue

Pour la vallée Tefa'aroa, deux pluviomètres peuvent être utilisés pour spatialiser la pluie. Le premier est positionné sur la crête Est de la vallée de la Tuauru à l'altitude de 560 m (149°28'23"W - 17°32'14"S). L'appareil se trouve à moins de 2 km de la crête délimitant le bassin versant étudié de celui de la Tuauru. Le second pluviomètre est à 3 km, dans la vallée de la Fautaua à 650 m d'altitude (149°31'17"W - 17°34'03"S). Il est situé dans un bassin versant accès Nord-Ouest alors que le premier est orienté plein Nord captant un peu plus la pluviométrie issue des systèmes convectifs glissant d'Est en Ouest. En s'appuyant sur la carte des isohyètes (Figure 47), la position des 2 stations est assez comparable, l'appareil de mesure dans la Tuauru recueillant peut-être une pluie légèrement plus abondante.

Pour les deux stations, les données sont disponibles sur des périodes supérieures à 20 ans. Pour des raisons de qualité des données et de concomitances des enregistrements, les données utilisées couvrent un intervalle de 19 ans entre janvier 1997 et novembre 2016, soit 227 mois.

L'analyse comparée des cumuls mensuels moyens sur la période de 19 ans (Figure 49) conforte l'hypothèse initiale de l'homogénéité des précipitations entre les 2 stations sélectionnées. Le cumul des précipitations annuelles s'élève en moyenne à 3 173 mm d'eau pour la station située dans la vallée de la Tuauru, et à 2 626 mm pour la station positionnée dans la vallée de la Fautaua. Ces cumuls sont légèrement inférieurs que ceux présentés par l'ORSTOM en 1993 (Lafforgue, 1993).

La saisonnalité tropicale apparaît clairement pour les deux stations de mesure, avec une différenciation forte entre la période humide de décembre à mars et la période sèche entre juin et septembre. La dynamique est très semblable avec tout de même des cumuls sensiblement plus importants aux mois de décembre et mars pour la station de la Tuauru. La corrélation linéaire entre les pluviométries mensuelles moyennes est mise en évidence par le graphique reporté sur la Figure 50. La relation est forte signifiant statistiquement la proximité hydrologique des deux sites.

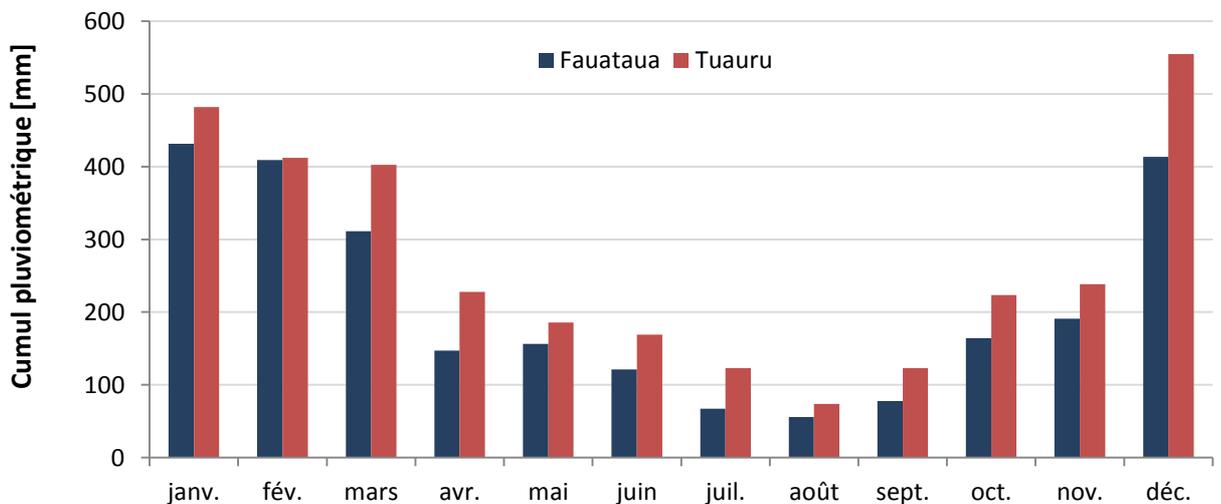


Figure 49 : Cumul pluviométrique mensuel moyen entre 1997 et 2016 pour les stations de Fautaua et Tuauru

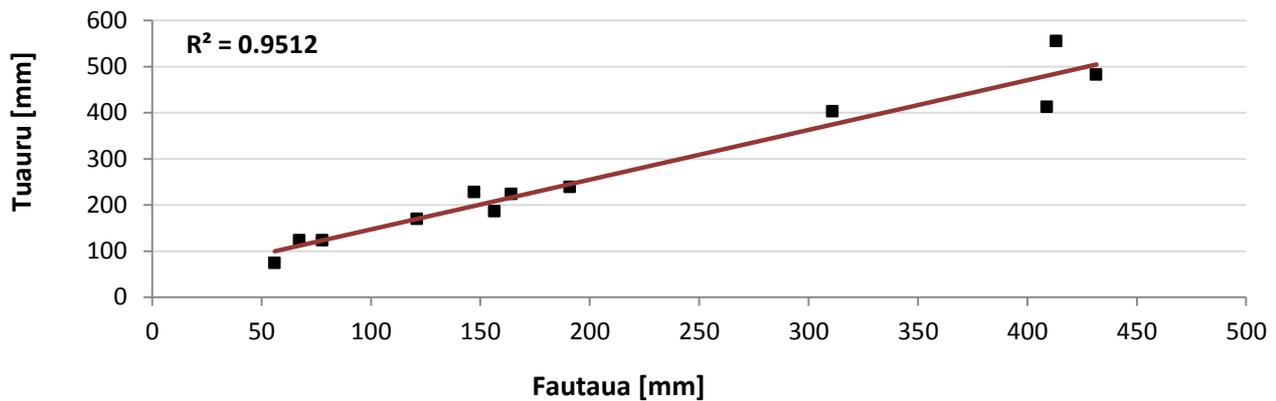


Figure 50 : Corrélation linéaire entre les cumuls mensuels moyens des précipitations pour les stations Tuauru et Fautaua

Ainsi la proximité géographique et hydrologique des deux stations pluviométriques justifie l'utilisation de ces données pour d'estimer les volumes d'eau qui sont précipités dans la vallée Tefa'aroa.

Le bassin versant étudié couvre 700 ha, sa longueur est de 6 300 m pour une altitude maximum de 1 260 m. La pente moyenne est de 20%. Ces données permettent de calculer le temps de concentration. Différentes équations sont testées (Tableau 1).

Tableau 1 : Estimation du temps de concentration du bassin versant de Tefa'aroa, au-delà du point de confluence, à 1 200 m de l'embouchure.
(surface = 600 ha ; longueur = 6 300 m ; pente moyenne du point le plus élevé à l'exutoire = 20%)

Méthode Kirpich <i>BV urbain</i>	Méthode Passini <i>Bv rural</i>	Méthode Ventura <i>Bv rural</i>	Méthode Giandotti <i>Bv rural</i>	Méthode Ventura <i>Bv rural</i>
30.52	51.31	45.14	42.33	50.49

Les temps de concentration calculés ne sont pas très longs. Les méthodes s'appliquant plus aisément aux bassins versants ruraux sont préférées. Au regard des résultats et du retour d'expérience d'autres vallées similaires, le temps de concentration choisi est de 50 min.

Les cumuls des précipitations sur 50 min pour les deux stations pluviométriques sont alors extraits des données. Le Tableau 2 présente le pic de pluviométrie annuel sur une durée de 50 min. Les volumes d'eau sont importants. La station de la Tuauru a enregistré sa pluie maximum, depuis 20 ans, le 12 décembre 2015 entre 11h30 et 12h20. Pendant c'est 50 minutes, se sont 89.5 mm (ou l/m²) d'eau qui sont tombées. Le record pour la station de la Fautaua s'élève à 81 mm (ou l/m²) le 20 février 2005 entre 21h10 et 22h.

Quelle que soit la station, l'amplitude est grande entre les années. Les épisodes les plus forts sur 50 minutes engendrent une pluie près de 3 fois plus intense d'une année sur l'autre.

Tableau 2 : Cumul pluviométrique maximum par année sur une période de 50 min

Année	Tuauru	Fautaua	Année	Tuauru	Fautaua
2015	89.5	50	2005	42.5	81
2014	39.5	33.5	2004	43.5	47
2013	52.5	51	2003	79.5	35.5
2012	45.5	47.5	2002	27	25
2011	79.5	43.5	2001	34.5	28.5
2010	37.5	61	2000	27	45
2009	39	50	1999	45.5	31
2008	47	39.5	1998	49	46.5
2007	53.5	52.5	1997	35.5	35.5
2006	72	44.5			

Même si le recul historique n'est pas totalement suffisant, l'analyse fréquentielle des pluies par la loi de Gumbel a permis d'estimer les événements rares avec de longues périodes de retour pour les deux stations de mesure analysées (Tableau 3).

La vallée de Tefa'aroa est donc située entre les deux bassins versants de la Fautaua et de la Tuauru. Elle est orientée sur un axe parallèle à ses deux voisines, donc soumise aux mêmes aléas climatiques. Sans données complémentaires, l'estimation de la pluviométrie lors des épisodes exceptionnels dans la vallée de Tefa'aroa se base sur la moyenne des résultats obtenus sur les stations de mesure de la Fautaua et de la Tuauru.

Tableau 3 : Hauteur d'eau précitée en mm (ou l/m²) en 50 min lors d'évènements météorologiques rares, à très rares.

Période de retour	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Tuauru	62	73	83	96	106
Fautaua	54	61	68	78	85
Tefa'aroa (estimation)	58	67	76	87	95

Dans la formule de la méthode rationnelle, l'intensité de la pluie est rapportée à la hauteur d'eau précipitée en une heure [mm/h]. En outre, l'une des hypothèses sous-jacentes est de considérer qu'au cours d'un pas de temps défini la pluie est uniforme dans l'espace. Cette approximation ne représente pas la réalité d'un épisode météorologique, notamment lorsque le relief est escarpé sous un climat tropical où l'intensité d'un orage peut être très localisée. L'altitude joue par exemple un rôle très important dans la spatialisation de la pluie (Aureau, 2024). Pour pallier à ce biais qui engendre une surestimation des volumes d'eau précipités, les résultats obtenus sont corrigés d'un facteur 0.7 (Tableau 4). Ce coefficient est issu de l'expérience obtenue à travers les nombreuses études hydrologiques réalisées en Polynésie française par la société Vai-Natura. La situation idéale serait de disposer d'un réseau de stations pluviométriques plus dense pour spatialiser

Tableau 4 : Précipitations maximum estimées pour la vallée de Tefa'aroa et exprimées en mm/h.

Période de retour	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Tefa'aroa (estimation)	49	80	91	104	114

En appliquant la formule de la méthode rationnelle (eq. 1), l'intensité de la pluie sur une heure est rapportée à la taille du bassin versant contributif ajusté d'un coefficient de ruissellement. Ce coefficient est un paramètre difficile à estimer puisqu'il est très lié aux conditions morphologiques (pentes), du sol (infiltration) et du couvert forestier (évapotranspiration) spécifique à chaque bassin versant. Seules des mesures sur le long terme permettent d'évaluer exactement sa valeur, ou plus justement ses valeurs qui sont également conditionnées par l'intensité d'une averse et des conditions initiales (sol saturé ou non).

Les travaux de Lafforgue et Robin (1989) pour l'ORSTOM sur le sujet du coefficient de ruissellement. Au cours de leur étude, ils ont pu estimer des coefficients de ruissellement pour différents épisodes rares observés. Les valeurs obtenues sont élevées, entre 0.7 et 0.9. En complément, la méthode GRADEX soutient des coefficients de ruissellement qui tendent vers 1 lors des averses les plus intenses avec un temps de retour supérieur à 10 ans. Afin de tenir compte des spécificités physiques et environnementales du bassin versant et des études passées validées pour les efficacités, la valeur de C_r est choisie évolutive : 0.8 pour des temps de retour inférieur à 10 ans ; 0.9 pour un évènement décennal ; puis 1 pour les épisodes les plus rares.

Les estimations de débit obtenues sont élevées (Tableau 5), mais cohérentes avec les valeurs observées pour des bassins versants comparables (Lafforgue, 1987 et 1990). La zone contributive étudiée dans la vallée de Tefa'aroa n'est pas très étendue en surface et présente des pentes importantes, il en ressort un temps de concentration inférieure à l'heure qui génère des débits élevés.



Tableau 5 : Débits de pointe estimés pour les crues rares à très rares (périodes de retour > 10 ans).

Période de retour	100 ans	50 ans	10 ans	5 ans
Débit de pointe [m³/s]	133	122	85	44

Il est utile de rappeler les estimations calculées sont des débits de pointe, c'est-à-dire très ponctuel, elles représentent le pic des ondes de crue. Ces valeurs ne doivent pas être confondues avec un débit moyen journalier. Dans le cadre de la cartographie d'un aléa inondation et de l'étude de l'écoulement des eaux de surfaces, ce sont bien les débits de pointe qui doivent être considérés.

Les débits présentés dans le tableau 5 sont les données d'entrée hydrologique à la modélisation hydraulique en considérant un régime d'écoulement permanent.

6. Paramétrisation de la modélisation

6.1. Stratégie de modélisation

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

1- La modélisation hydraulique se base sur un régime permanent (*Steady flow*). Les données hydrologiques sont trop parcellaires pour disposer d'un hydrogramme de crue réaliste. Les débits de pointes sont estimés à partir de la pluviométrie enregistrée dans deux vallées voisines (Section 5). Lorsque les mesures sont indirectes et les données reconstruites à partir d'hypothèses d'équivalence d'échelle et d'espace, il est périlleux d'espérer produire une information précise et d'ignorer l'accumulation des marges d'erreurs inhérentes à chaque estimation. Ce choix impose également de travailler sur une dimension de l'écoulement (1D) (Section 4.1.3) ;

2- La cartographie de l'aléa inondation s'appuie donc sur une modélisation en 1D qui calcul les hauteurs d'eau et les seuils de débordement pour chaque transect. La cartographie de l'inondation s'obtient en considérant que la zone à risque fait partir du lit majeur de la rivière, assertion qui est une réalité géographique dans la grande majorité des petites et moyennes vallées des îles hautes volcaniques. La taille des sections transversales qui permettent de numériser le lit doit alors dépasser la largeur de plein bord ;

3- Le profil géométrique de la rivière nécessite des relevés précis pour représenter correctement la réalité morphologique du lit. Cette étape est très importante, un mauvais schéma géométrique a un fort impact sur la qualité des résultats. Pour cette étude, des relevés topographiques récents ont permis de s'assurer de bonne représentation de la réalité. Le dimensionnement des ouvrages de génie civil (pont, passerelle, seuil) bénéficie également de la campagne des géomètres ;

4- Le prolongement des profils transversaux s'appuie sur données extraites des MNTs fournis par le service de l'urbanisme. Les discontinuités (habitations, ponts ou murs de protection) sont intégrées comme des objets d'obstruction à l'écoulement ;

6- A défaut de mesure dans la rivière et sur les ouvrages positionnés dans le lit, la calibration du modèle n'a pu se réaliser qu'à partir des témoignages des riverains évaluant les hauteurs d'eau atteintes lors des crues les plus importantes. Le souvenir humain est ici la seule donnée existante.

6.2. Construction géométrique et données utilisées.

La première étape de la modélisation hydraulique est la schématisation géométrique du cours d'eau par la succession de ses profils en travers (Figure 51). Ces profils couvrent la largeur de plein bord allongée sur les rivières où le risque de submersion est apparent (faible dénivellation et constructions).

La composition virtuelle du lit s'est appuyée sur le relevé topographique de 32 sections distinctes. L'extension de ces profils sur l'espace habité s'est construite à partir positions géo-référencées et des élévations extraites des Modèles Numériques de Terrain. La précision est variable, en relation avec la donnée sous-jacente, données LIDAR⁴ (SHOM⁵, 2015) ou MNT plus « classique » (Figure 52).

Les singularités du lit sont reproduites numériquement. Les rétrécissements et les élargissements découlent directement de l'emprise géométrique des profils en travers.

Les ouvrages traversants (pont, passerelle, seuil) sont implémentés dans un module spécifique.

Des structures latérales sont également intégrées afin de mieux représenter la réalité. Ces obstacles à l'écoulement transversal figurent les ouvrages de protection qui s'élèvent au-dessus des berges. L'objectif est de rehausser la limite de débordement en des positions bien précises.

Au-delà de la largeur de plein bord se trouvent les habitations, les bâtiments en général. Ils sont représentés schématiquement comme des blocs d'obstruction, se sont des obstacles que l'eau ne peut pas franchir sur les profils transversaux. La position géographique est récupérée à partir des couches géo-référencées. Par contre, la hauteur des bâtiments n'est pas connue. Une valeur uniforme de 250 cm a été appliquée.

⁴ Laser Detection And Ranging

⁵ Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

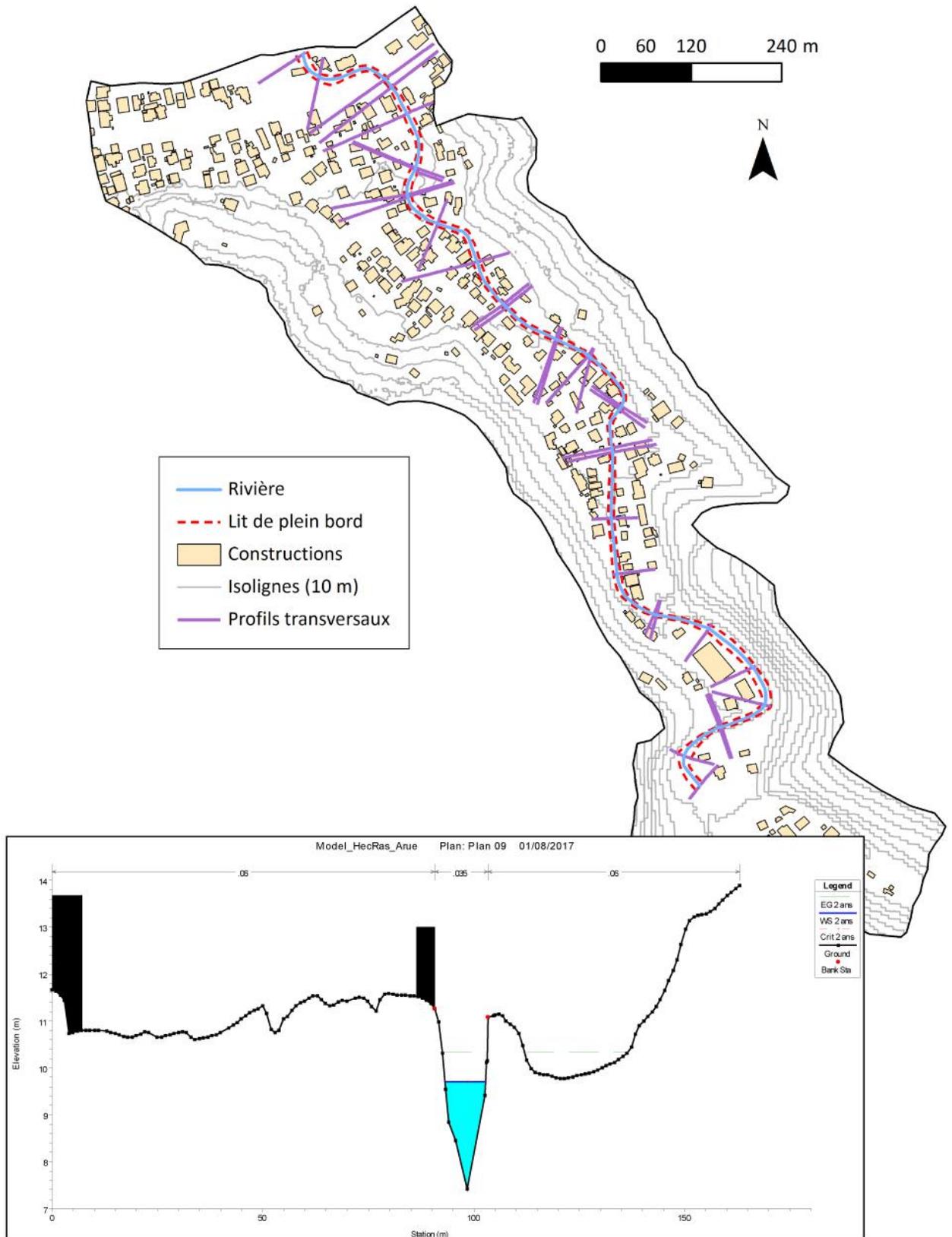


Figure 51 : Traitement numérique du lit de la rivière à partir des profils transversaux et aperçu du résultat dans le logiciel de modélisation.

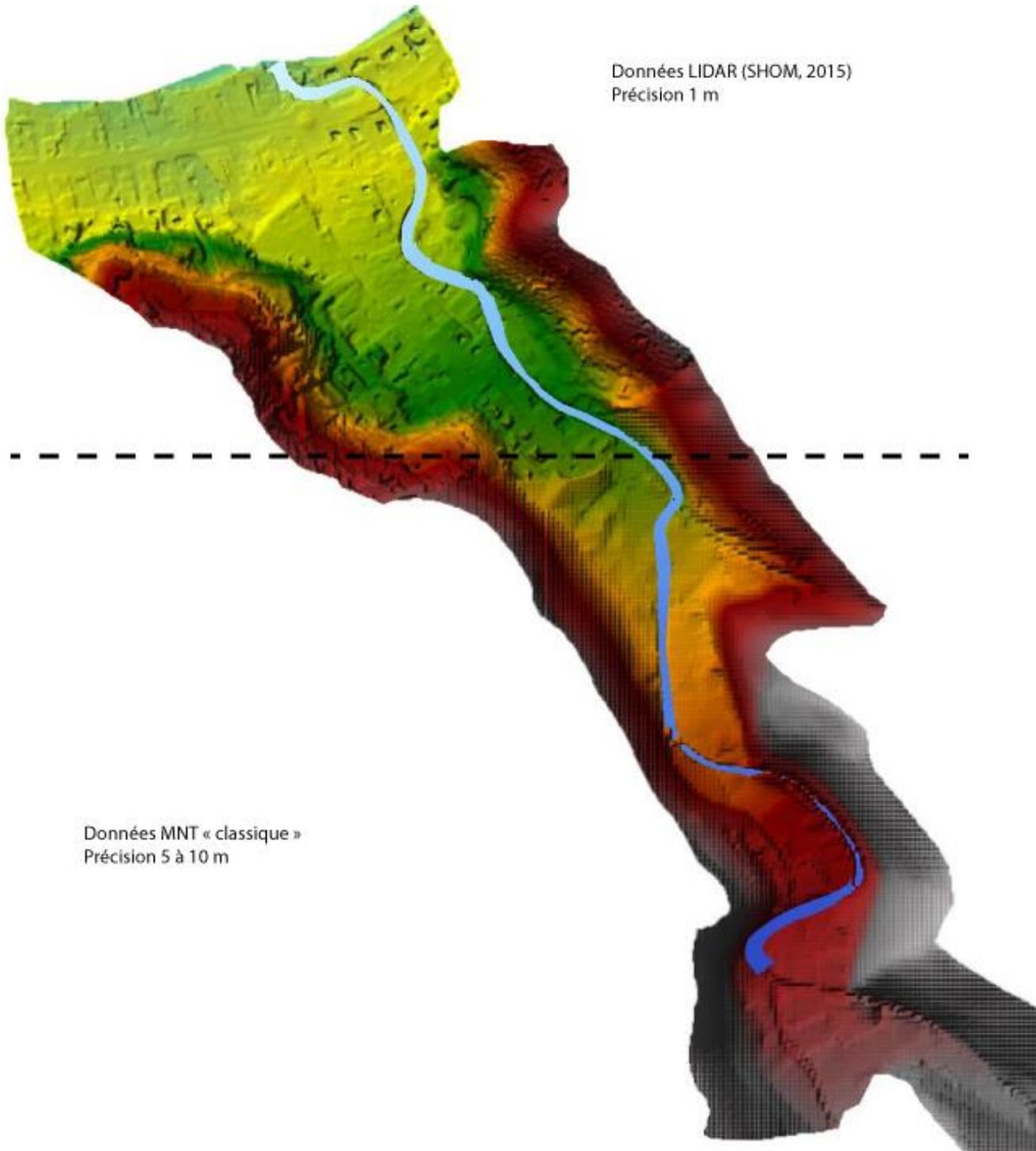


Figure 52 : Surface TIN de la basse vallée de Tefa'aroa.
La précision est accrue sur les 500 m autour de la bande côtière.

6.3. Coefficient de rugosité de Manning

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. Dans la modèle, chaque profil transversal est divisé en 3 sections qui sont représentées au centre par le canal d'écoulement ou lit de plein bord (Channel), et par les espaces des deux rives au-delà des berges (Left Over Bank, Right Over Bank). Pour chacune de ces sections, le coefficient de Manning doit être renseigné. Il est généralement exprimé en $[s.m^{-1/3}]$.

La démarche pour cette rivière fut de considérer séparément les 7 tronçons en long délimités par les ruptures de pente (Section 2.6). Ils sont présumés homogènes (Tableau 6).

Le chenal, c'est-à-dire l'emprise du lit délimitée par la largeur de plein bord, est recouvert de matières minérales : de blocs, de pierres et de galets. Le pavage est plutôt uniforme pour les tronçons amont. Lorsque la pente diminue, l'amoncellement de pierres est plus irrégulier et la rugosité augmente. Le coefficient de Manning fut ainsi évalué pour le lit mineur entre 0.04 et 0.05 en fonction de l'état du lit et des berges.

Pour les espaces au-delà des berges qui appartiennent à la géométrie du lit majeur, les surfaces sont urbanisées. Le sol est soit revêtu de bitume, soit soumis à un tassement favorisant le ruissellement. La conséquence est une rugosité réduite. Le coefficient de Manning est estimé entre 0.018 et 0.0275, essentiellement en fonction de la couverture du sol : surface largement urbanisée avec route, jusqu'à surface en terre remblayée et végétalisée.

Tableau 6 : Détermination des coefficients de Manning $[s.m^{-1/3}]$ pour chaque tronçon de rivière depuis l'amont. Chenal (Channel) et espaces du lit majeur au-delà des berges (Left Over Bank, Right Over Bank).

Tronçon	Left Over Bank	Channel	Right Over Bank
7	0.025	0.045	0.025
6	0.025	0.045	0.025
5	0.025	0.045	0.025
4	0.025	0.041	0.025
3	0.0275	0.0475	0.0275
2	0.018	0.045	0.018
1	0.02	0.475	0.02

6.4. Calage du modèle

La réelle difficulté de la modélisation de la rivière Pohaiatera est relative au manque de données sur le niveau des crues et la délimitation des zones de submersion. Aucun document, aucune archive n'ont pu être retrouvés pour apprécier l'amplitude des inondations. Or ces informations sont essentielles pour la phase de calage de la modélisation (Section 4.1.6). C'est en effet en comparant les résultats obtenus, au terme d'une première exécution du modèle, avec les valeurs observées, que les paramètres de calage peuvent être ajustés pour approcher une représentation cohérente de la réalité. Evidemment, de la précision des données mesurées dépend la qualité de réponse du modèle.

En l'absence de données hydrologiques dans la vallée ou de mesures rigoureuses des hauteurs d'eau au pied des ouvrages d'art ou sur des bâtiments, la seule évaluation possible fut de s'en remettre à quelques témoignages de riverains. Ces informations sont évidemment à apprécier avec toute la circonspection nécessaire. Un souvenir ne peut servir que de talon grossier pour évaluer la vraisemblance générale d'un modèle. Mais à défaut de meilleurs renseignements, la modélisation de la rivière Pohaiatera ne pourra être jugée qu'au regard de ces informations orales.

Au terme des échanges avec les riverains, se sont essentiellement deux témoignages qui permettent d'apprécier l'étendu des débordements. Tout d'abord au niveau du point 3 (Section 3.2.3), la passerelle privée en béton à proximité de la route de ceinture, la berge droite est occupée par un parking d'une surface de 280 m² (Figure 53). Cet espace revêtu est délimité par un mur de 200 cm de hauteur. A l'occasion de la crue à la fin du mois janvier, l'eau aurait envahi cet espace et atteint une hauteur de 80 à 100 cm.



Figure 53 : Parking privé au niveau du point 3.
Lors de la crue du 21 janvier 2017, l'eau aurait atteint une hauteur de 80 à 100 cm.

Plus à l'amont, le point 19 décrit la berge concave d'un virage serré entre deux passerelles (Section 3.6.8). Ce site est particulièrement sensible aux débordements. La hauteur de berge est faible et la rivière débordement régulièrement sur les terrains limitrophes. La fréquence d'1 à 2 fois par an est évoquée.

7. Résultats de la modélisation

7.1. Hydrodynamisme de la rivière lors des crues

7.1.1. Ecoulement et débordement

Pour cartographier l'aléa inondation, les crues ont été simulées dans un modèle en 1D en régime permanent. Les temps de retour choisis pour les pics de crues sont de 2 ans, 10 ans et 100 ans.

L'étude de la crue la moins importante (temps de retour = 2 ans) permet d'observer la résilience de la rivière à la montée des eaux et d'évaluer ses premiers points de faiblesses. Pour les crues plus rares, les volumes d'eau en jeu sont tellement importants qu'il est plus délicat de juger de la vulnérabilité du chenal. Les événements les plus intenses permettent d'apprécier par contre l'étendue des inondations sur les terrains habités et de statuer sur le niveau de risque en qualifiant l'aléa en fonction de la hauteur d'eau atteinte sur chaque parcelle et de la vitesse d'écoulement.

La Figure 54 représente le profil en long de la rivière au cours d'une crue de 44 m³/s (temps de retour = 2 ans). Les ponts et les passerelles sont schématisés par les lignes verticales. Les parallélogrammes gris matérialisent les ouvrages de protection installés au-dessus des berges, généralement des murs de parpaings. Le profil du lit est représenté par la ligne noire parsemée de points. Les deux lignes pointillées figurent les limites, gauche et droite, du chenal d'écoulement. La hauteur d'eau atteinte est désignée par la surface bleue.

Au cours de cet épisode, la rivière draine des volumes d'eau conséquents et elle déborde sur 6 zones avec des dégâts plus ou moins importants. L'observation du profil en long permet d'identifier les positions où les berges sont trop basses (ou le fond du lit trop haut). Les 6 positions sont repérées sur la Figure 54 par une numérotation partant de l'embouchure et remontant vers l'amont.

La **première zone** à proximité de l'embouchure subit un débordement engendré par le mauvais dimensionnement des passerelles 2 et 3 qui se succèdent sur le tronçon. Il est important de noter également que légèrement à l'amont, le pont de la route territoriale semble atteindre sa limite d'écoulement.

A l'amont de la passerelle 8, la berge droite se laisse déborder. Cette **faiblesse n°2** a été identifiée (Section 3.3.1), la hauteur de la berge est trop faible. La pente longitudinale réduite participe au comblement du lit et au déséquilibre hydrodynamique.

Plus à l'amont se sont les **positions 3 et 4** autour du tronçon 5 (Section 3.6) qui délimitent la zone des débordements. L'eau ne peut s'écouler suffisamment sous le tablier de la passerelle 16, le niveau monte à l'aval et déborde autour des berges qui ne sont pas très élevées. Mais à l'aval, le lit semble également trop étroit pour canaliser l'ensemble de l'écoulement. La situation est sensible.



Enfin, les **positions 5 et 6** identifient des débordements qui correspondent à des contraintes hydrodynamiques qui semblent bien engendrées par la présence des passerelles 23 et 25.

Cette première modélisation permet de se rendre compte que le lit mineur a des points de vulnérabilité : des berges parfois trop basses, mais les ouvrages de franchissement sont souvent mal réalisés, positionnés sans tenir compte du niveau des débits qui doivent s'écouler lors des crues importantes. Les aménagements mal calibrés induisent des désordres qui augmentent l'aléa inondation.

La carte représentée sur la Figure 55 illustre la même crue bisannuelle. Les 6 zones de débordement sont identifiées. Les positions 1 et 3 sont particulièrement intéressantes, elles permettent de juger du réalisme des résultats et de la pertinence de la réponse du modèle. La position 1 correspond au parking qui fut inondé en janvier 2017, la position 3 correspond au point de faiblesse numéro 19 identifiée par le témoignage des riverains.

En fonction de la dénivellation du terrain autour du lit mineur l'épanchement des eaux est plus ou moins favorisé. Parfois, l'inondation est très contenue comme pour la zone 5, parfois les terrains sont largement submergés, zone 3 et 4.

Encore une fois une observation attentive des zones inondées appuie la présomption de responsabilité des ouvrages de traverse. **La mise en protection de biens et des personnes pourrait débiter par une évaluation de l'utilité de ces constructions et de leur bon dimensionnement.**

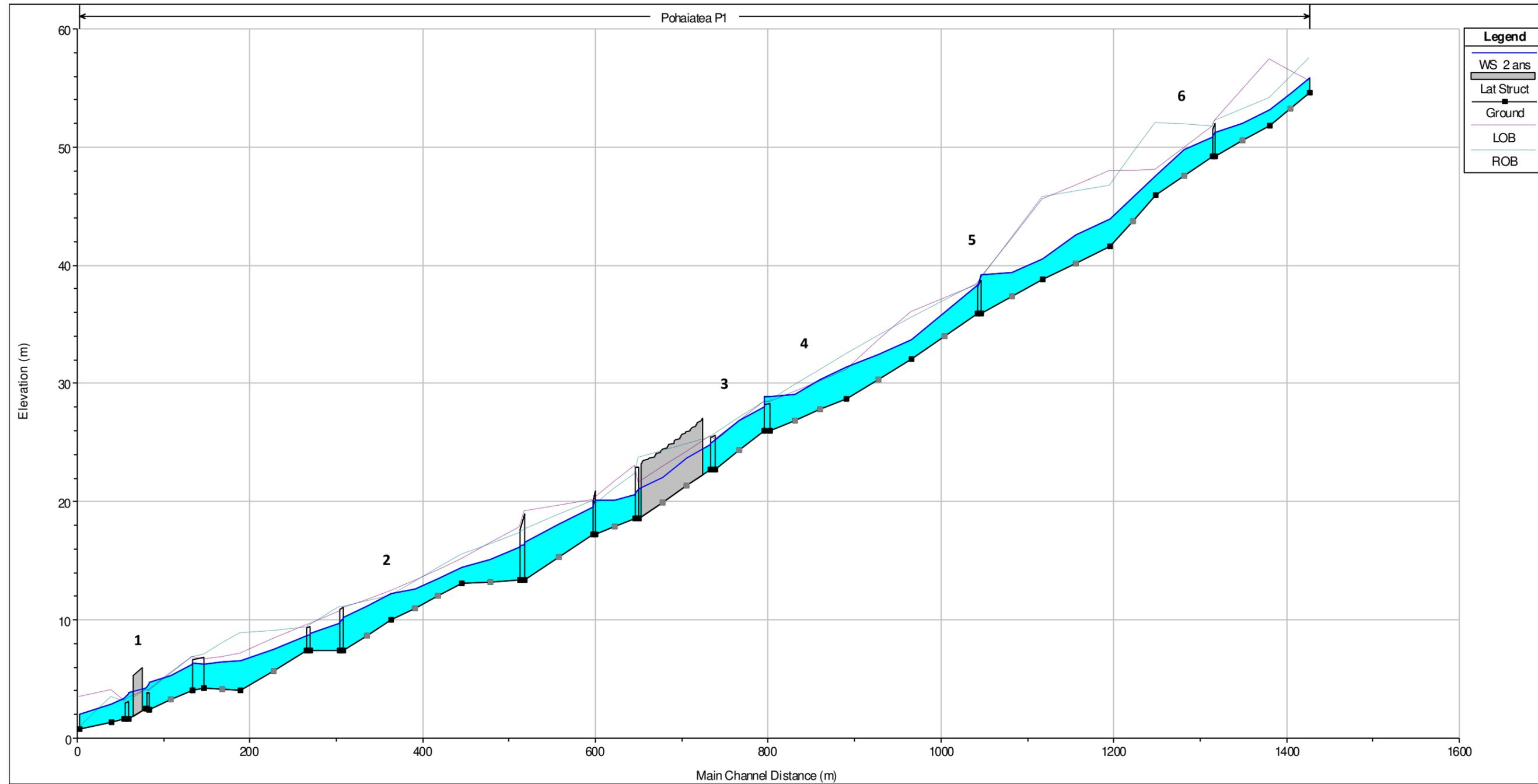


Figure 54 : Profil en long de la rivière Pohaiatera au cours de la crue bisannuelle.

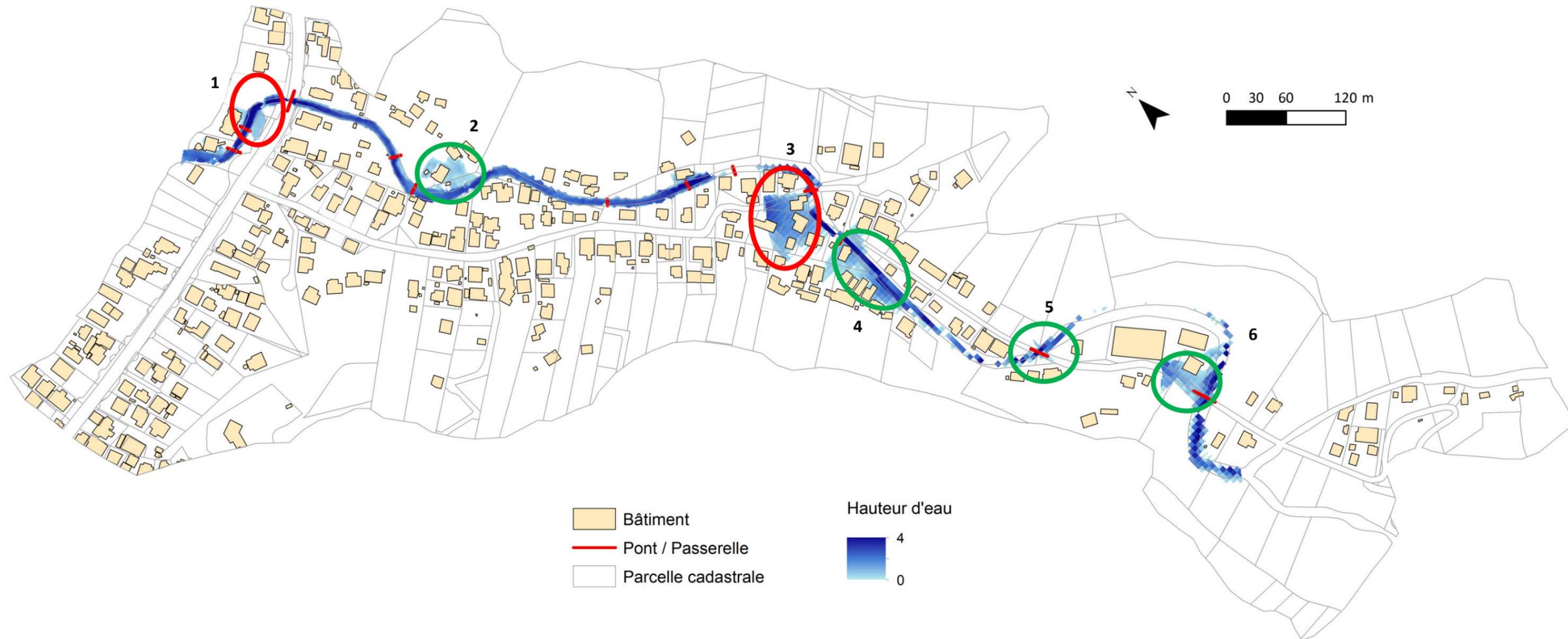


Figure 55 : Zones inondables pour la crue bisannuelles.

7.1.2. Vitesse de l'eau et impacts morphologiques

Le modèle hydraulique permet également de calculer la vitesse de l'écoulement dans le lit du cours d'eau. Cette information est essentielle pour juger la dynamique des forces qui impactent la morphologie du lit.

La Figure 56 présente la carte des vitesses obtenue à partir de l'étude de la crue bisannuelle. Ce sont ces événements probables qui façonnent régulièrement la géométrie du lit de la rivière. Les épisodes plus puissants, décennal et centennal, sont par définition beaucoup plus rares et génèrent des vitesses plus grandes, mais plus uniformes dont la répartition est délicate à observer.

Plusieurs positions sensibles ont été identifiées sur le plan par des lettres majuscules s'égrenant alphabétiquement depuis l'embouchure. Elles sont à mettre en parallèle avec les points d'intérêts repérés lors de l'exploration sur le terrain (Section 3).

Le **tronçon A** désigne la zone autour du pont de la route territoriale. Il est très net que l'ouvrage freine l'écoulement, induisant une montée des eaux jusqu'au débordement. A l'aval du pont, la succession des deux dernières courbes génère une accélération du flux sur les berges concaves expliquant l'affaissement régulier des enrochements (points 1 et 4). La première passerelle rencontrée (point 3) ralentit brutalement le flux expliquant encore une fois le débordement.

La **position B** concentre l'attention sur une vitesse de l'eau plus élevée à l'amont de la passerelle identifiée par le point numéro 9, les fondations d'une habitation sont immédiatement menacées. L'urgence du problème est détaillée dans la Section 3.4. L'écoulement ralentit quelques mètres à l'aval, favorisant le dépôt des matériaux solides qui encombrant le lit. Le changement brutal de l'angle de la pente longitudinale explique en grande partie la variation des vitesses.

La **position C** met en exergue un tronçon rectiligne où l'eau atteint des vitesses élevées (points 13 à 16). Cette observation explique l'incision du lit qui y est observée (Section 3.6.2).

Le coude de la rivière repéré par la **marque D** signale une vitesse accrue à l'aval de la passerelle 17 (Section 3.6.6). L'énergie engagée participe au phénomène d'érosion qui a abouti à l'affaissement de la berge concave (point 14) et à l'incision qui creuse les fondations d'un mur d'enrochement de la berge gauche légèrement vers l'aval (point 15).

Le **repère E** cible la passerelle 20. Cet ouvrage, mal dimensionné, est positionné à l'aval d'une longue ligne droite (Section 3.6.9). L'énergie accumulée par la rivière rencontre un obstacle et se dissipe brutalement. Le débordement à l'amont est inévitable.

Quelques mètres à l'aval de la même passerelle, le lit suit une courbe trop accentuée. La berge gauche est trop basse, protégeant mal un terrain en contrebas qui présente également une dénivellation propice au ruissellement. L'eau cherchant la voie d'écoulement la plus directe déborde régulièrement en cette position de vulnérabilité (Section 3.6.8).



L'enchaînement d'une passerelle mal dimensionnée (point 20) puis d'une courbe trop serrée (point 19) est contraire au bon sens hydraulique. Cette portion de rivière doit être impérativement modifiée pour limiter les débordements. Malheureusement, la maîtrise foncière sera sans doute un problème majeur pour réaliser les travaux nécessaires à cette zone.

Enfin, les **positions F et G** illustrent encore une fois l'impact des ouvrages traversant sur le bon écoulement des eaux. Ceux sont des obstacles qui freinent brutalement l'écoulement, il en résulte des débordements et une accumulation de matériaux puisque le débit solide est largement réduit. En cas d'embâcle, les conséquences peuvent être sérieuses.



Figure 56 : Vitesses de l'eau pour la crue bisannuelles.

7.2. Zones inondables

Afin d'évaluer plus globalement l'aléa inondation pour les habitants et leurs biens dans la vallée de Tefa'aroa, les scénarios de la simulation ont reproduit des crues rares à très rares, d'un temps de retour de 10 à 100 ans. Les débits correspondants s'élèvent à respectivement à 85 m³/s et 133 m³/s.

7.2.1. Crue décennale

Lors de la crue décennale (Figure 57), les surfaces déjà soumises à des inondations lors d'épisodes moins importants s'étendent naturellement, la hauteur de l'eau augmente sensiblement. En complément, trois nouvelles zones se trouvent impactées (signalées par les ellipses vertes sur la Figure 57).

La première se trouve sur la bande côtière, le débordement est initié sur la berge concave, la berge droite à l'aval du pont de la route territoriale. Plusieurs parcelles sont touchées et la route se trouve légèrement submergée.

La seconde est la conséquence directe du mauvais dimensionnement du pont de la route de ceinture. Le débordement se joue par la berge gauche à l'amont de l'ouvrage. Le site en contrebas forme une sorte de cuvette que recueille l'eau entre le lit mineur et la route d'accès au fond de la vallée. Ce type de situation est malheureusement assez classique dans les zones de basses vallées à proximité des embouchures, où les dénivellations du terrain sont très faibles. Les aménagements urbains sur ces petites plaines alluviales aggravent généralement le phénomène.

Le troisième lieu soumis à une inondation lors de la crue décennale est localisé sur la rive droite de la rivière, entre les positions 10 et 13, autour de la passerelle 11. Sur ce tronçon rectiligne, la berge droite est plus basse que la rive opposée. Les débits augmentant, le chenal est trop étroit pour drainer l'écoulement. Plusieurs habitations se retrouvent sous quelques dizaines de centimètres d'eau.

7.2.2. Crue centennale

Au cours de la crue centennale, les impacts s'accroissent considérablement (Figure 58). Les débordements sont généralisés sur les 940 m de la rivière depuis l'embouchure. Les terres touchées se situent alternativement sur les rives gauches et droites en fonction du premier point de vulnérabilité des berges. Tout d'abord, le chenal apparaît sous dimensionné pour drainer la crue centennale. Les aménagements, notamment les passerelles, aggravent les difficultés de l'écoulement notamment sur les positions les plus vers l'amont.

Deux zones sont particulièrement préoccupantes. Le bas de la vallée tout d'abord autour de la route territoriale est largement submergé. Le débordement est de 40 cm au-dessus du tablier du pont. La route d'accès dans la vallée est inondée, ce qui pourrait ralentir l'intervention d'éventuels secours en fond de vallée. Aux points les plus bas, la hauteur d'eau monte jusqu'à 1.6 m.



Le second secteur qui subit les impacts les plus importants lors de la crue centennale se trouve à l'amont de la passerelle 14 en remontant sur 450 m jusqu'à la passerelle 23. Sur ce tronçon se trouvent deux autres ouvrages de franchissement et la succession des deux courbes déjà évoquées aux positions 16 et 19. Les berges subissent un débordement avec un impact inondation plus important sur la rive gauche dont la topographie descend vers l'aval.

La géomorphologie du lit et les passerelles sont ici nuisibles au bon écoulement de l'eau. Le lit doit être redessiné avec des courbes moins accentuées. Les passerelles doivent être redimensionnées pour ouvrir un passage plus large. Dans le cas d'un réaménagement, il est nécessaire de conserver à l'esprit que le transport des matières minérales induit le rehaussement du lit de la rivière lorsque la pente diminue. La structure des ponts favorise cette accumulation. Des actions de curage régulières resteront peut-être nécessaires parce que l'espace du lit mineur est fortement contraint par l'urbanisation.

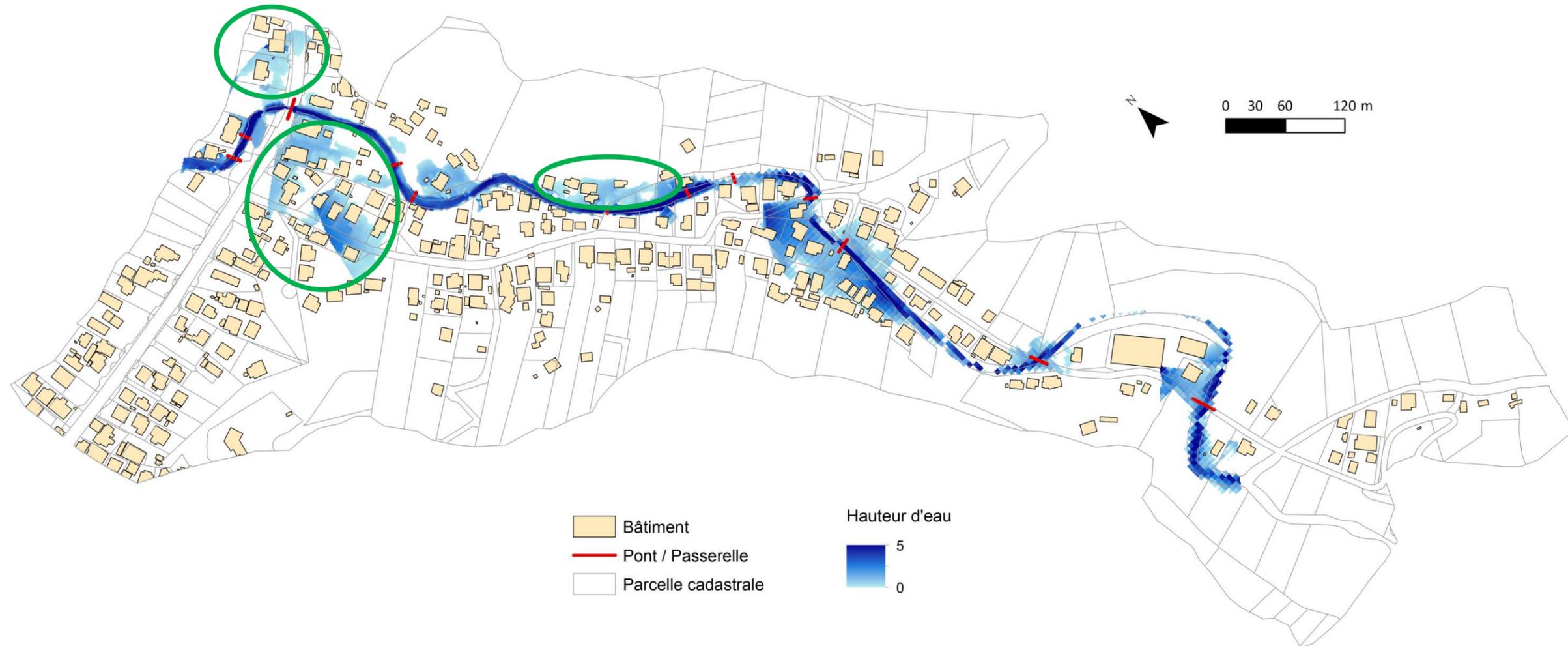


Figure 57 : Zones inondables pour la crue décennale.

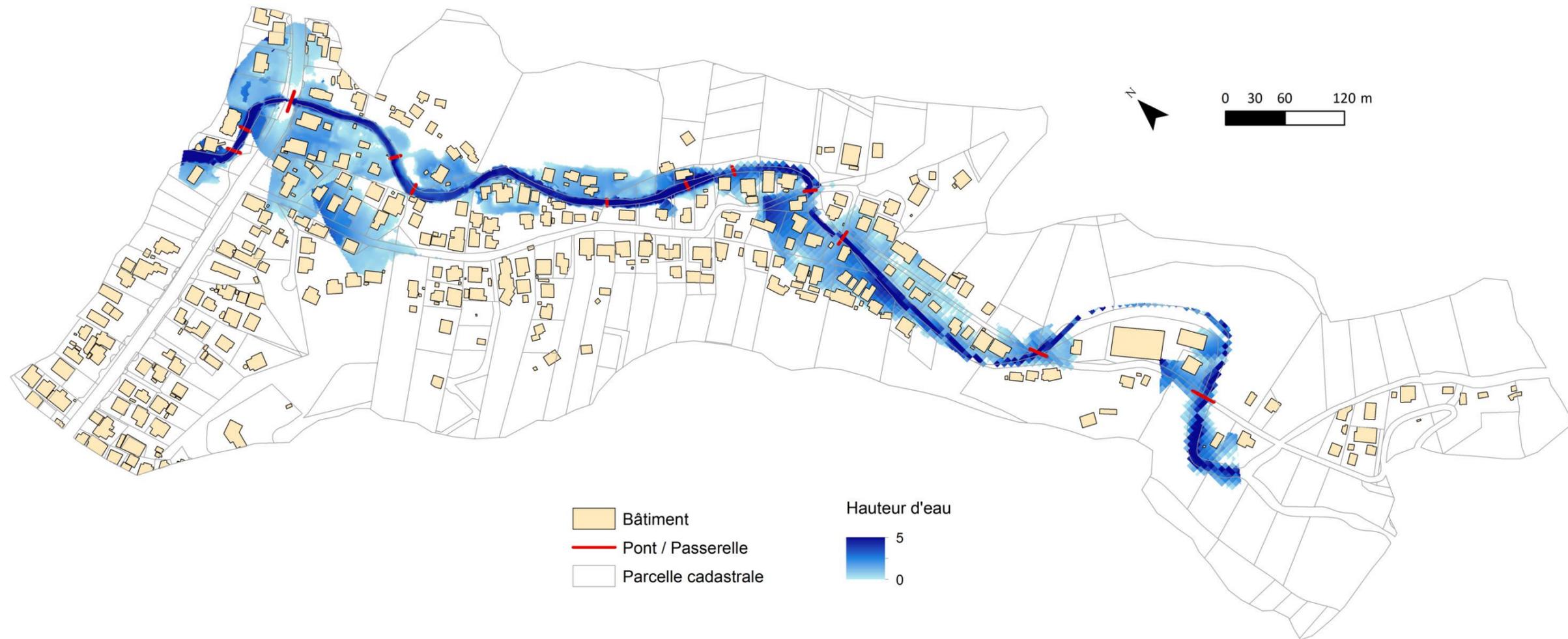


Figure 58 : Zones inondables pour la crue centennale.

7.3. Phénomènes d'embâcles et conséquences

L'un des phénomènes qui peut compliquer l'écoulement de l'eau est la formation d'embâcle. C'est une accumulation de matière solide qui obstrue partiellement, ou complètement, le lit d'un cours d'eau. Ce sont généralement des éléments minéraux (roches, pierres) et végétaux (troncs, feuillages) qui forment ces bouchons. Toutefois, des éléments moins « naturels » peuvent participer. Divers déchets ou les matériaux d'une construction emportés par les flots peuvent se retrouver à l'aval et gêner l'écoulement. La poutre métallique mal scellée décrite dans la section 3.6.3 est un exemple d'élément pouvant participer à la formation d'un embâcle si la rivière l'emporte.

La rivière Pohaiatera est traversée par une douzaine de passerelles. Il est compliqué d'envisager tous les types de scénarios possibles autour de ces ouvrages. Un espace obstrué a des conséquences à l'aval. Un débordement consécutif à un embâcle peut diminuer le débit restant dans la rivière.

Pour évaluer l'impact de passerelles partiellement obstruées dans la rivière étudiée, trois ouvrages ont été considérés. Le pont de la route territoriale, la passerelle 8 et la passerelle 20 qui est le point amont d'une zone fortement impactée par les inondations. La modélisation des embâcles s'est traduite par une réduction de l'espace d'écoulement de 50% comme cela est notifié dans le cahier des charges de l'étude. La simulation fut exécutée en considérant les crues bisannuelle, décennale et centennale.

Les conséquences des embâcles s'observent exclusivement autour du pont de la route de ceinture. Les obstructions à l'amont ne déclenchent pas d'extension des surfaces inondées. En outre, les effets autour de la voie routière s'observent essentiellement pour la crue bisannuelle. L'évolution est moins marquée pour les crues plus rares.

La faible ouverture initiale sous les passerelles amont engendre assez rapidement des débordements, les forts débits ne peuvent être drainés. Les embâcles n'aggravent pas forcément la situation.

La Figure 59 est une représentation cartographique de l'impact des embâcles pour la crue bisannuelle. Un débordement important est visible dans la zone limitrophe à la route de ceinture. La voie d'accès au fond de la vallée est touchée. Les cartes présentant les résultats pour les crues plus rares sont consultables dans l'atlas accompagnant ce rapport d'étude.

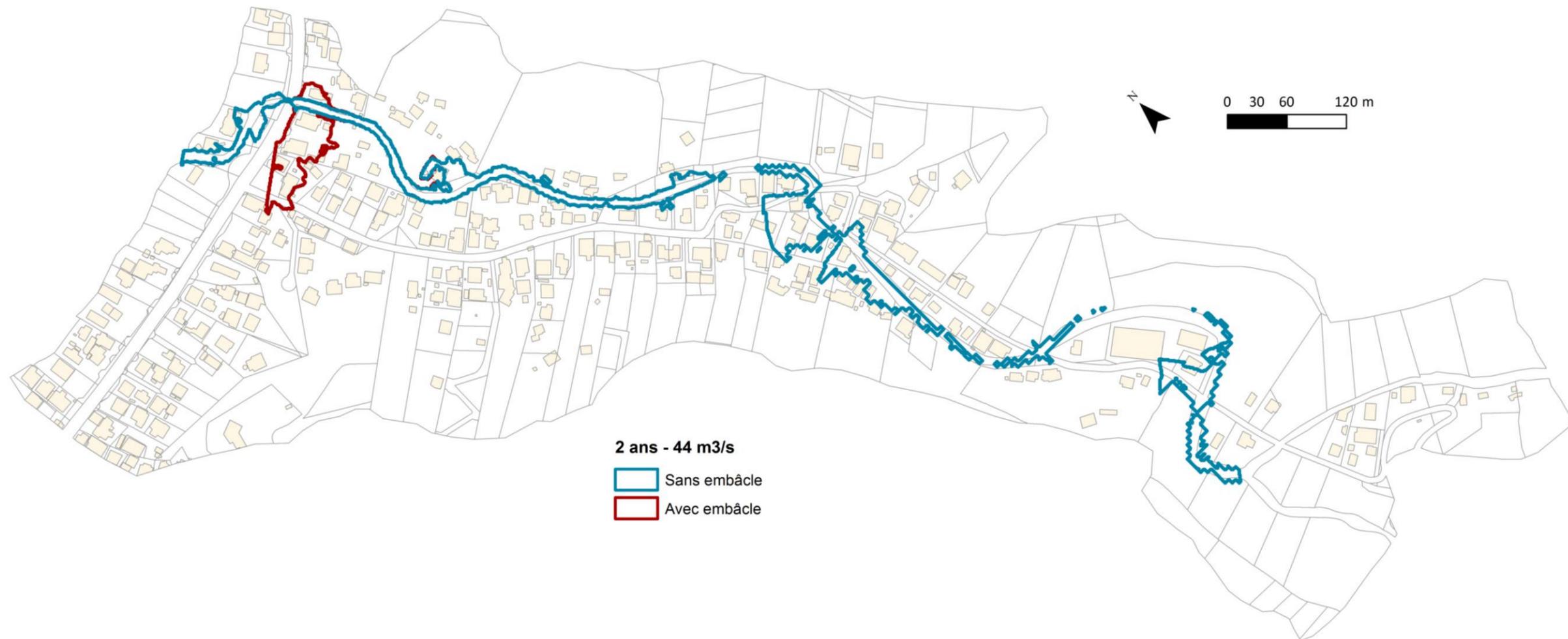


Figure 59 : Effets des embâcles pour la crue bisannuelle.



7.4. Montée du niveau de la mer

Lors des fortes tempêtes qui engendrent une pluviométrie exceptionnelle et des débits très importants, la houle peut également se lever en augmentant le niveau de la mer à l'embouchure. Ce phénomène peut contrarier l'évacuation des eaux ruisselant de la vallée.

Ce scénario fut implémenté dans le modèle pour apprécier un impact éventuel. Le niveau de la mer fut élevé de plus 1 mètre.

C'est uniquement au cours de la crue centennale que la zone inondée s'étend. L'évolution n'est pas très évidente, l'eau monte essentiellement sur la route de ceinture (Figure 60).

Il semblerait que le chemin tortueux des derniers 150 m à l'aval du pont de la route de ceinture limite les effets d'une embouchure submergée par les vagues. Toutefois, la surface inondée reste conséquente sans l'effet d'une élévation du niveau de la mer. La superficie des terres submergées autour de l'exutoire est de 2.5 ha, pour un total de 6 ha sur toute la basse vallée.

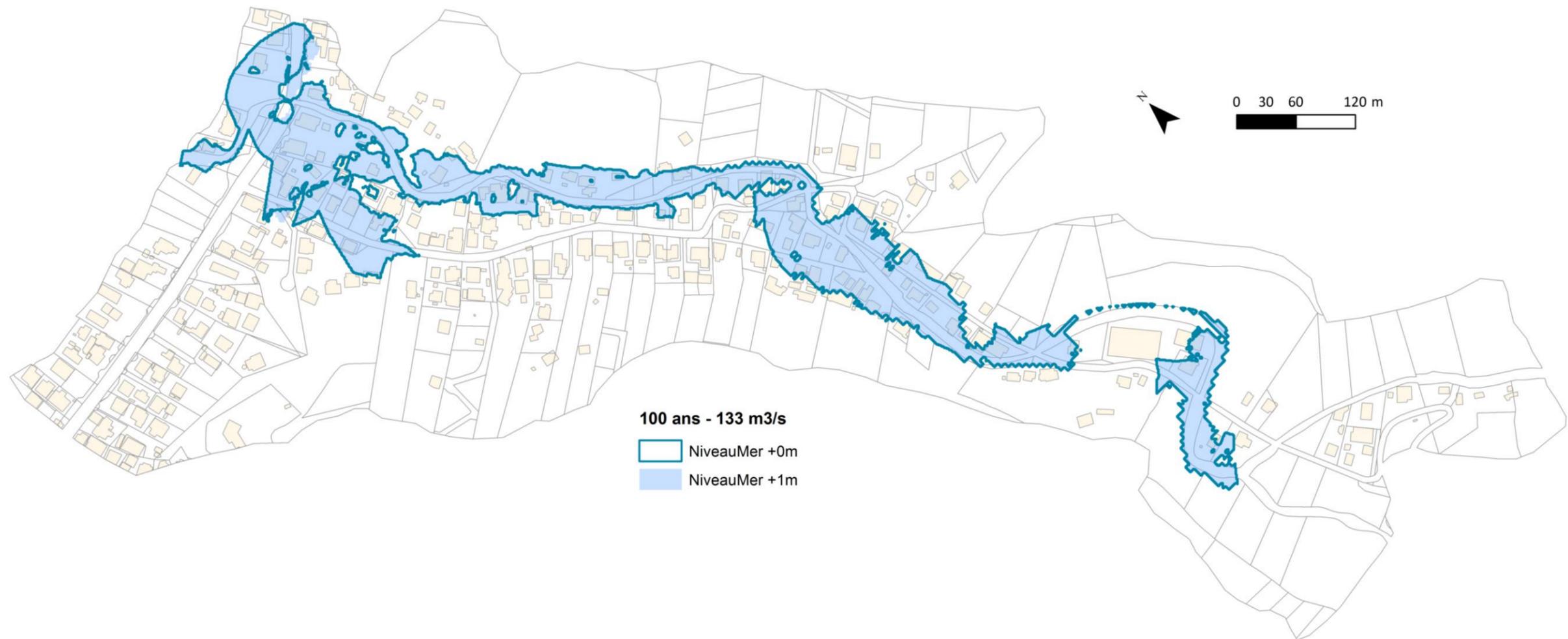


Figure 60 : Terres submergées avec une élévation du niveau de la mer (+ 1m).

7.5. Cartographie de l'aléa inondation

L'aléa inondation est qualifié en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement à partir des résultats obtenus pour la modélisation de la crue centennale. Les limites sont rappelées dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Qualification de l'aléa inondation en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse de l'eau.

Aléa	Vitesse [m/s]	
	Faible à moyenne <i>Vitesse < 0.5</i>	Moyenne à forte <i>Vitesse >= 0.5 m/s</i>
Hauteur d'eau [m]		
$H < 0.5 \text{ m}$	Faible	Moyen
$0.5 \leq H < 1$	Moyen	Fort
$H \geq 1$	Fort	Fort

Au terme de la modélisation, il a été possible de distinguer chaque parcelle cadastrale située dans la vallée de Tefa'aroa en fonction du risque face à l'aléa inondation (Figure 61). Il en ressort 28 terrains soumis à un aléa « Très fort », ce qui représente une surface totale de 3.17 ha au voisinage immédiat du lit mineur de la rivière. L'aléa « Fort » concerne 46 parcelles pour une surface de 18.7 ha. Enfin l'aléa « Moyen » qualifie 33 parcelles sur 5.8 ha et l'aléa « Faible » s'applique à seulement 9 parcelles d'une surface totale inférieure à l'hectare.

Tableau 8 : Projection des résultats obtenus par la cartographie de l'aléa inondation sur les parcelles cadastrales.

Aléa	Nombre de parcelles	Surface [ha]
Fort	74	21.9
Moyen	33	5.8
Faible	9	0.8

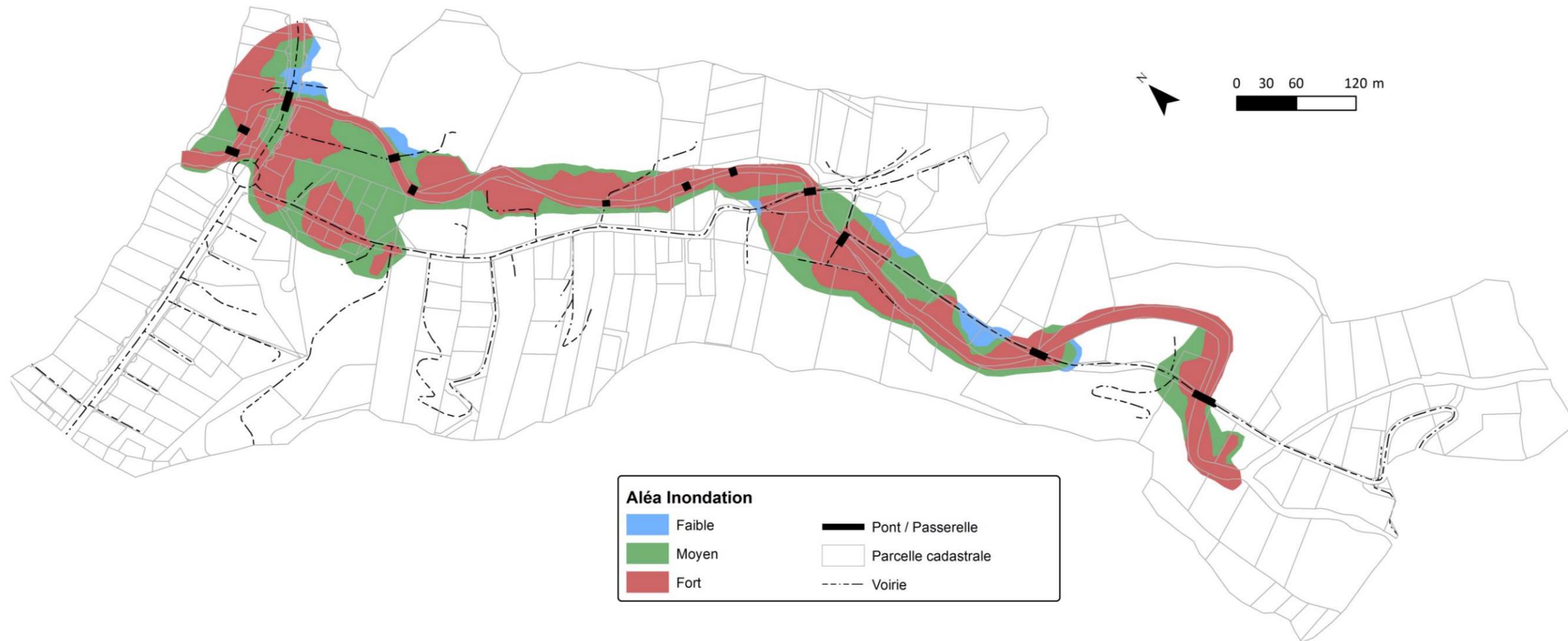


Figure 61 : Cartographie de l'aléa inondation autour de la rivière Pohaiatera, vallée de Tefa'aroa.

8. En amont de la confluence

La modélisation a été réalisée de l'embouchure à la première confluence amont en couvrant une distance de 1 500 m. Au-delà, les deux bras de rivière ont été remontés pour juger de leur état hydraulique et apprécier les risques de débordement.

Au terme de ces investigations, il est apparu que les deux bras ont un profil hydromorphologique beaucoup plus naturel qu'en aval. Les lits sont plus étroits, mais plus profonds. Cette géométrie est largement induite par une pente longitudinale forte (> 5%) caractéristique de cours d'eau en zone montagneuse.

Des enrochements stabilisent les berges sur 200 m au-dessus de la confluence, le lit est dans un état plus naturel à l'amont, les berges sont en terre et rochers, stabilisées par la végétation. Le pavage est régulier, formé de galets et de pierres plus grosses issues de l'érosion naturelle. Ces matériaux sont mobilisables par la rivière lors des crues. Les débits solide et liquide semblent se réguler naturellement.

Les berges et le lit des deux bras sont en bon état. Aucun signe de débordement significatif n'a pu être observé. En outre, la mémoire des riverains ne révèle aucune inondation récente en amont de la confluence.

Toutefois, la végétation est importante et les lits sont étroits. La formation d'embâcles ne peut être exclue générant nécessairement un risque. Ainsi un classement en aléa fort est indispensable pour l'emprise du lit de la rivière comme pour une bande d'approximativement 5 m de part et d'autre des berges.

9. Erosion des berges et risques

Au cours des investigations de terrain, de nombreuses zones d'érosion ont été identifiées et répertoriées (Section 3). L'énergie de l'écoulement peut endommager les berges de plusieurs manières : des enrochements s'affaissent ou sont emportés ; des affouillements localisés creusent les fondations des murs de protection ; une incision plus générale du lit peut modifier toute sa structure géométrique et menacer l'intégrité des ouvrages de protection ; lorsque les berges sont en terre notamment sur la berge convexe d'un coude de la rivière prononcé.

Ces zones d'érosion fortes ont été reportées sur la carte de la Figure 62. Ces informations ont permis d'apprécier les risques futurs pour les terrains jouxtant la rivière et de délimiter les zones d'aléa fort au risque inondation à proximité immédiate du lit.

En fusionnant cette dernière donnée avec la carte de l'aléa inondation obtenue par la modélisation, il ressort une cartographie plus complète des risques actuels et futurs de l'aléa (Figure 63).

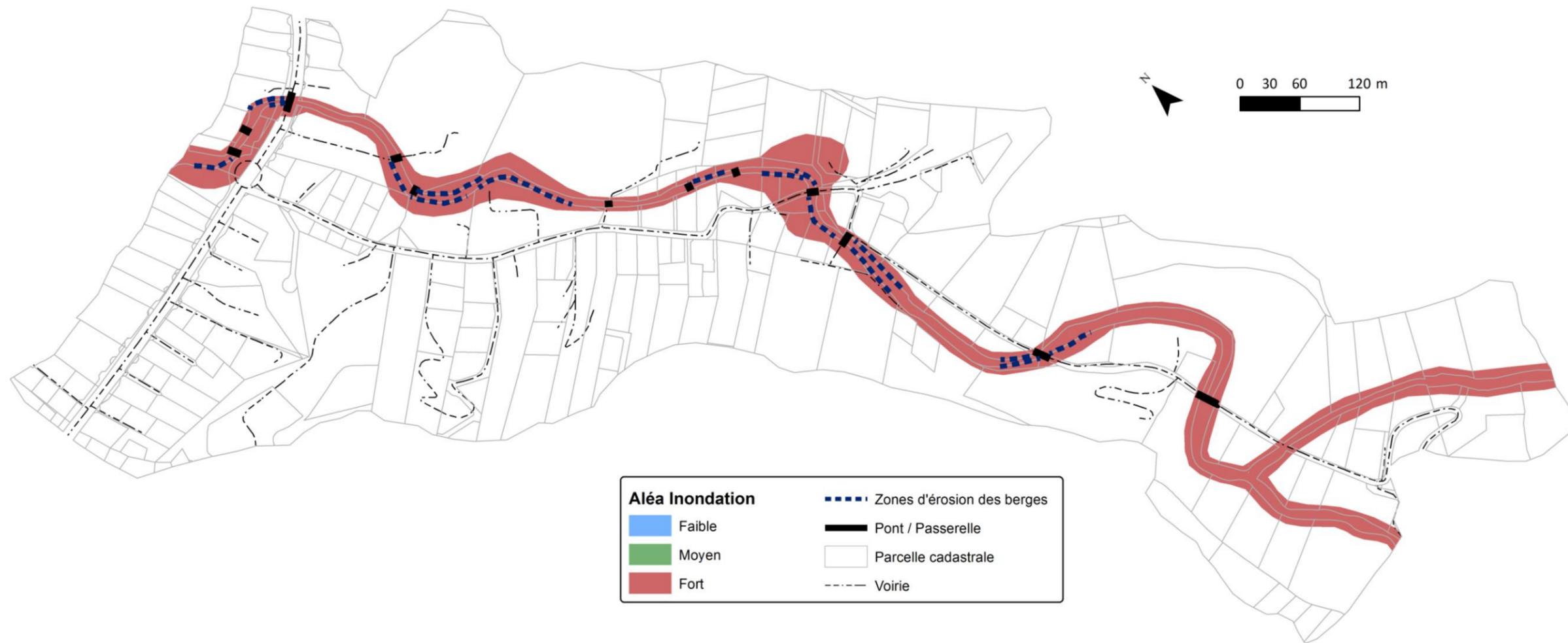


Figure 62 : Erosion des berges et risques inhérents.

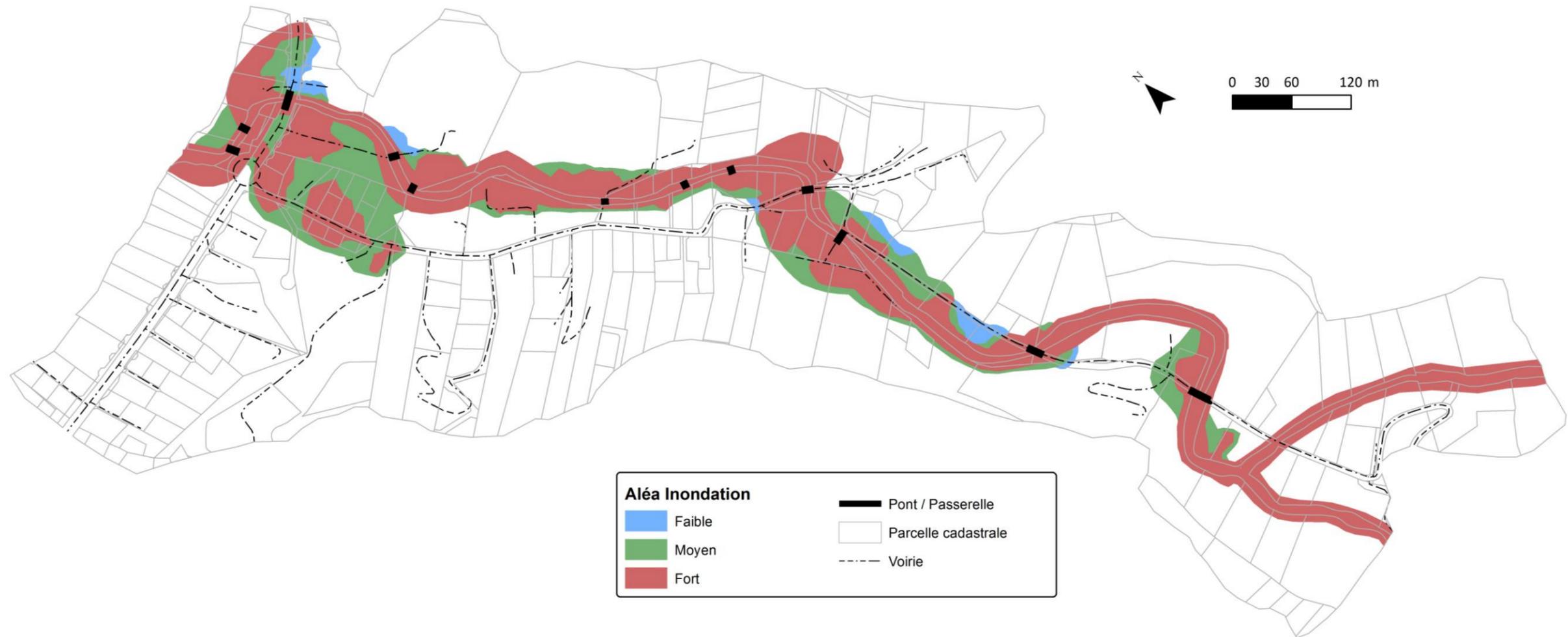


Figure 63 : Cartographie complète de l'aléa inondation autour de la rivière Pohaiatera.

10. Aménagements envisageables

L'analyse hydromorphologique de la rivière Pohaiatera ainsi que la modélisation des phénomènes d'inondations ont fait ressortir un état général de la rivière assez mauvais. L'état des berges et du lit sont très inégal en fonction des tronçons du cours d'eau. L'urbanisation importante de la basse vallée laisse peu d'espace au chenal et certaines habitations sont construites avec une proximité inquiétante du bord de la rivière. A ce panorama peu résilient, il faut ajouter la présence d'une douzaine de passerelles permettant de franchir le lit. Certaines sont en très mauvais état et leur affaissement ne peut être exclu.

Il serait réellement délicat de rendre un aspect naturel et totalement sécurisant au lit de la rivière Pohaiatera. Les crues les plus puissantes engendrent un tel débit que les infrastructures pour s'en protéger seraient déraisonnables. Par contre, plusieurs points peuvent être améliorés pour protéger les habitants et leurs biens :

- les passerelles doivent être examinées. Celles qui sont brinquebalantes et peu utilisées doivent être enlevées. Les autres doivent être surélevées et leur implantation consolidée. L'espace offert à l'écoulement doit s'accroître ;
- le pont de la route territoriale à proximité de l'embouchure doit être détruit, reconstruit et largement surélevé ;
- la succession des deux virages près de l'embouchure doit être redessinée. Les berges seront consolidées par des enrochements suffisamment dimensionnés et correctement disposés. Les deux passerelles (points 2 et 3) installées par des riverains doivent être enlevées ;
- les passerelles 7 et 8 doivent être également supprimées. Une route d'accès à la berge droite doit être ouverte depuis la route de ceinture.
- le tronçon de rivière entre les points 9 et 11 doit être entièrement reprofilé. La pente de la rivière doit être accentuée, et les berges surélevées d'au moins 1 m à gauche et 2 m sur la droite. Le risque est important et les travaux urgents. Certaines habitations courent un danger immédiat.
- le dernier tronçon où il est important d'intervenir pour protéger les riverains s'étend entre le point 15 et le point 21. Les passerelles 17 et 20 doivent être reconstruites et surélevées. Mais surtout, le tracé qui lie les deux coudes 19 et 16 doit être redessiné. L'emprise foncière d'un tel projet imposera des modifications cadastrales, mais sans cette action importante, les enrochements de berges ne tiendront pas et les inondations continueront. Avec le temps les dégâts s'aggraveront et impacteront de plus en plus les habitations.

Mais avant d'entreprendre les travaux les plus conséquents, il est indispensable de conserver à l'esprit qu'une modification de la structure géomorphologique du lit d'une rivière a nécessairement des effets à l'aval. Il est inutile d'engendrer un nouveau déséquilibre. Le débit solide doit être pris en compte.

11. Conclusion

Dans la basse vallée de Tefa'aroa, la rivière Pohaiatera s'écoule à travers une zone urbanisée où le tracé naturel du lit à laisser place à un chenal contraint par différentes constructions et les aménagements de voirie. Les équilibres hydromorphologique et hydraulique du cours d'eau ont été profondément modifiés.

Même si le cours d'eau est intermittent, il draine tout de même un bassin contributif de 7 km². Lorsque les pluies torrentielles d'un climat tropical s'abattent sur la vallée, les débits engendrés par le ruissellement de surface peuvent atteindre des niveaux très élevés que le lit de la rivière doit pouvoir drainer.

Au débit liquide s'ajoute un débit solide qui correspond aux éléments minéraux charriés par l'énergie des eaux. Lorsque la rivière est contrainte, et perd son équilibre naturel s'engage un mécanisme de compensation guidé par l'écoulement le plus efficace. L'érosion des berges, l'incision du lit ou au contraire son rehaussement sont autant de processus induits par une énergie mal dissipée. Les conséquences les plus immédiates lors d'une crue sont des débordements.

Dans les étroites vallées tahitiennes, le gradient entre les débits extrêmes, du plus faible au plus élevé, est tel que le lit mineur est souvent insuffisant pour drainer les écoulements les plus intenses, les plus rares. Lorsque le lit majeur est aménagé, les inondations sont généralement inévitables. Toutefois, l'objectif des pouvoirs publics, gestionnaires des cours d'eau, est de limiter les dangers qui sont avant tout engendrés par un mauvais contrôle de la puissance des flots.

La rivière Pohaiatera est contrainte dans son tracé par le contournement d'obstacles liés à l'aménagement des hommes. Elle est aussi traversée par une douzaine d'ouvrages de franchissement qui limite l'espace d'écoulement.

L'expertise hydromorphologique et la modélisation hydraulique ont permis de mettre exergue les points de plus grande vulnérabilité. Trois situations sont particulièrement problématiques et urgentes à résoudre.

Le pont de la route territoriale à proximité de l'embouchure qui est sous-dimensionné, peu entretenu, et qui est le siège d'un rehaussement du lit. L'ouvrage doit être reconstruit en ouvrant un espace d'écoulement plus large.

A 400 m de l'embouchure, l'état du lit est particulièrement mauvais. La pente longitudinale est trop faible, les berges trop basses, et surtout les habitations qui sont toutes proches sont menacées d'affaissement. La présence de deux ouvrages traversants complique la situation. La protection des biens et des personnes impose un recalibrage de ce tronçon de rivière.

Encore à l'amont, une succession de deux virages serrés et la présence de deux passerelles induisent des débordements et une érosion dangereuse. Le chenal doit être redessiné et



l'aménagement de la rivière repensé pour éviter des conséquences plus dramatiques dans le futur. Cette dernière zone de danger est située à 780 m de l'embouchure.

La modélisation hydraulique a permis d'éditer une cartographie de l'aléa inondation en dessinant l'étendu des débordements en fonction de la fréquence des crues. Les calculs ont également abouti à la requalification des parcelles cadastrales en fonction de l'aléa.

--

Affaire suivie par

Matthieu Aureau

Docteur en hydrologie et hydrogéologie
pour la société **Vai-Natura SARL**



12. Bibliographie

- Anderson M. P., 1983. Ground-water modeling - the emperor has no clothes. *Ground Water* 21, n°6, pp. 66-69.
- Bonvallet J., 1993. La géologie, Atlas de la Polynésie française, Edition de l'ORSTOM. Pp. 112.
- Brunner G.W., 2016. HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual, Version 5.0. Pp. 171.
- Cauchard G. et Bergès F., 1990. Le climat. Encyclopédie de la Polynésie I, les îles océaniques. Christian Gleizal / Les Editions de l'Alizé, pp. 57-70.
- Degoutte G., 2012. Diagnostic, aménagement et gestion des rivières. Hydraulique et morphologie fluviales appliquées. 2^e édition. Edition Lavoisier, Paris. Pp. 542.
- Guillot P., Duband D., 1967. La méthode du GRADEX pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies - IASH, publication N° 84.
- Groupe de travail du CFGB - Les crues de projet des barrages : méthode du gradex - Design flood determination by the gradex method - Bulletin du Comité Français des Grands Barrages - Spécial Durban - 18^{ème} Congrès CIGB / ICOLD - N° 2, 1994.
- Hildenbrand A., Gillot P.Y. et Le Roy I., 2004. Volcano-tectonic and geochemical evolution of an oceanic intra-plate volcano: Tahiti-Nui (French Polynesia). *Earth and Planetary Science Letters*, 217(3), pp. 349-365.
- Hildenbrand A., Gillot P.Y. et Bonneville A., 2006. Off shore evidence for a huge landslide of the northern flank of Tahiti-Nui (French Polynesia). *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 7, Q03006, doi:10.1029/2005GC001003.
- Hingray B., Picouet C. et Musy A., 2009. Hydrologie 2, Une science pour l'ingénieur. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, pp. 522.
- Jamet R., 1990. Géologie des îles hautes. Encyclopédie de la Polynésie I, les îles océaniques. Christian Gleizal / Les Editions de l'Alizé, pp. 105-120.
- Lévêque, 2016. Quelles rivières pour demain ? Réflexions sur l'écologie et la restauration des cours d'eau. Edition QUae, pp 287.
- Lafforgue A., 1987. Annales hydrologiques de l'île de Tahiti de 1971 à 1986. Edition de l'ORSTOM. Service de l'Équipement 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.

Lafforgue A., 1993. La climatologie des îles, Atlas de la Polynésie française, Edition de l'ORSTOM, pp. 112.

Lafforgue A., Robin J., 1989. Etudes hydrologiques sur les îles de Raiatea et Tahaa de 1980 à 1989. Institut française de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), Centre de Tahiti - Section Hydrologie. Archives d'hydrologie n°89/8. Pp. 229.

Léotot C., 1988 - Cycles éruptifs géochimiques et géochronologiques du volcan de Taravao (archipel de la Société), modèle de hotspot tahitien et de l'alignement de la Société (Polynésie française) - Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, Orsay, pp. 366.

Nédellec JL., Mathon C., 2006. Programme ARAI - Programme 3.1. - Cartographie de l'aléa mouvements de terrain - caractérisation géotechnique des altérites volcaniques (« mamu »). Rapport final. BRGM/RP-54835-FR 108 p, 39 illustrations, 20 tableaux, 9 annexes hors texte.

ONEMA, 2011. Pourquoi restaurer ? Restauration physique des cours d'eau, Connaissance. Pp.25.

de Saint-Venant A. B., 1871. Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leurs lits. Comptes Rendus des séances de l'Académie des Sciences, 73, 237-240.

SHOM, 2015. Opération « Lidar Polynésie française 2015 » commandée par le Service de l'Urbanisme de Polynésie française (SAU), avec en assistance à maîtrise d'ouvrage le Shom. Zones : Partie Nord-Ouest de Tahiti ; Partie Nord-Est de Moorea ; Ile de Bora Bora.

13. Annexes

13.1. Quelques notions sur l'hydromorphologie d'une rivière

Une rivière est un milieu hétérogène et dynamique, physiquement mobile dans l'espace et le temps. Sa forme évolue en fonction des zones géographiques et topographiques qu'elle traverse, et en fonction des variations climatiques saisonnières ou pluriannuelles. Sa diversité structurelle offre une grande variété de situations physiques et biologiques favorisant le développement d'une multitude d'habitats écologiques.

Le système dynamique est contrôlé par l'évolution et l'interaction des débits liquide et solide. Le débit liquide Q est un flux qui varie au grès des précipitations et de la saisonnalité. Le débit solide Q_s correspond au transport des matériaux fins ou plus grossiers. Ces deux processus façonnent la morphologie du cours d'eau en réglant les phénomènes d'érosions et de dépôts.

Sur l'amont, la pente est généralement forte, le débit liquide est important, il favorise une érosion significative. Plus à l'aval, lorsque la dénivellation décroît le lit est plus large, le cours d'eau perd de l'énergie et les éléments solides charriés se déposent. L'équilibre fluvial est obtenu lorsque le profil en long du cours d'eau est stable c'est-à-dire lorsque les apports solides sont équivalents, en volume, aux sédiments qui sont naturellement extraits du lit. Lors d'un épisode de crue, le débit solide augmente, certains dépôts sédimentaires sont mobilisés modifiant alors la morphologie de la rivière. Le système retrouvera ensuite sa stabilité en comblant naturellement les zones en déficit, ou en prélevant les surplus sédimentaires. La vie d'une rivière est rythmée par cette succession d'évènements énergiques qui font varier débit liquide et débit solide.

Pour protéger des habitations et/ou favoriser le développement d'activités anthropiques, des aménagements modifient la structure naturelle du cours d'eau. Il peut s'agir : d'une « canalisation » de l'écoulement, un parcours plus rectiligne permet l'exploitation d'une surface foncière plus importante ; de l'implantation d'un ouvrage pour faciliter le franchissement ; ou de la mise en protection de berges par des méthodes dites « lourdes » (gros enrochement ou édification de murs). L'impact humain sur une rivière peut également s'illustrer par l'extraction d'alluvions dans le lit mineur ou l'implantation de captages (ou de barrages) pour de la production d'eau. Toutes ces actions, et bien d'autres, influencent profondément sur l'équilibre physique de la rivière. Les conséquences sont variables, mais peuvent être parfois désastreuses.

Lorsque l'intervention humaine n'est pas régulée et initiée dans un plan global de gestion, des phénomènes induits par l'énergie d'un écoulement qui n'a pu se dissiper naturellement engendrent des dégâts très importants. Les inondations peuvent être plus fréquentes et plus destructrices, l'érosion s'accroît, la qualité de l'eau baisse, des écosystèmes disparaissent. Ce tableau peu engageant est pourtant régulièrement observé dans les vallées aménagées de Polynésie française.



La mise en protection des biens et des personnes, qui reste la priorité principale de la force publique, ne doit plus se contenter d'édifier des ouvrages lourds et coûteux qui sont mal stabilisés. Il est illusoire d'imaginer conditionner la nature, d'en dompter la puissance et la mobilité. Le réaménagement hydraulique d'un cours d'eau doit à la fois considérer l'échelle locale d'un risque avéré (e.g., effondrement de berge), mais également une échelle plus large prenant en compte l'hydrodynamisme des sections amont et aval. Le tracé de la rivière doit pouvoir être repensé. Les méandres et les zones inondables ont un rôle important pour la stabilité de la rivière. Les premiers ralentissent les écoulements, les secondes stockent les « eaux de crues » réduisant les débits maximum atteignant l'aval (ONEMA, 2011). Un débit liquide moins élevé est moins érosif.



13.2. Points centraux des sections transversales (*Cross Section*)

River Station	X	Y	Z
1426.936	233663.061	8059877.496	56.906
1379.698	233641.946	8059929.348	57.796
1317.529	233691.687	8059977.185	52.112
1314.305	233695.598	8059978.281	52.127
1249.294	233751.491	8059995.753	48.31
1194.055	233733.844	8060041.744	46.676
1115.534	233678.881	8060091.799	43.429
1044.044	233612.456	8060112.329	37.692
1040.274	233608.571	8060113.657	39.118
962.7382	233553.957	8060168.964	36.041
887.7462	233549.189	8060244.308	31.403
799.2006	233546.812	8060331.457	28.908
793.3237	233546.166	8060336.996	28.951
737.1219	233558.048	8060394.807	25.699
732.5015	233560.265	8060398.163	25.732
649.0533	233524.087	8060456.109	22.345
645.0009	233519.385	8060458.618	22.988
598.9581	233479.839	8060479.642	20.226
596.5109	233477.666	8060480.586	20.312
516.8951	233410.621	8060524.76	17.558
511.6086	233406.753	8060528.376	17.512
444.2189	233368.987	8060585.975	16.437
363.489	233320.409	8060633.223	12.324
307.6839	233276.213	8060671.309	11.7
303.8198	233276.855	8060676.752	9.617
268.9077	233287.149	8060714.073	9.129
265.4779	233288.168	8060715.515	9.383
189.4772	233275.255	8060782.396	6.912
148.1378	233258.463	8060819.427	6.549
134.4293	233249.825	8060829.959	6.313
39.30182	233163.117	8060828.383	4.661
3.237481	233131.519	8060857.502	3.537

13.3. Abaque des coefficients de rugosité de Manning

Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
Canaux artificiels, fossés				
Ciment lissé	0.01	0.011	0.012	0.013
Mortier de ciment	0.011	0.012	0.013	0.015
Aqueducs en bois raboté	0.01	0.012	0.013	0.014
Aqueducs en bois non raboté	0.011	0.013	0.014	0.015
Canaux revêtus de béton	0.012	0.014	0.016	0.018
Moëllons bruts	0.017	0.02	0.025	0.03
Pierres sèches	0.025	0.03	0.033	0.035
Moëllons dressés	0.013	0.014	0.015	0.017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisse	0.011	0.012	0.013	0.015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0.0225	0.025	0.0275	0.03
Canaux en terre droits et uniformes	0.017	0.02	0.0225	0.025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0.025	0.03	0.033	0.035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0.035	0.04	0.045	-
Canaux en terre à larges méandres	0.0225	0.025	0.0275	0.03
Canaux en terre dragués	0.025	0.0275	0.03	0.033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0.028	0.03	0.033	0.035
Cours d'eau naturels				
Propres, rives en ligne droite	0.025	0.0275	0.03	0.033
Idem 1 avec quelques herbes et pierres	0.03	0.033	0.035	0.04
Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0.035	0.04	0.045	0.05
Idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0.04	0.045	0.05	0.055
Idem 3, avec quelques herbes et pierres	0.033	0.035	0.04	0.045
Idem 4, avec pierres	0.045	0.05	0.055	0.06
Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0.05	0.06	0.07	0.08
Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0.075	0.1	0.125	0.15



13.4. Coefficients de rugosité appliqués pour chaque *Cross Section*

River Station	Frctn (n/K)	LOB	Channel	ROB
1426.936	n	0.025	0.045	0.025
1379.698	n	0.025	0.045	0.025
1317.529	n	0.025	0.045	0.025
1315	Bridge			
1314.305	n	0.025	0.045	0.025
1249.294	n	0.025	0.045	0.025
1194.055	n	0.025	0.045	0.025
1115.534	n	0.025	0.045	0.025
1044.044	n	0.025	0.045	0.025
1042	Bridge			
1040.274	n	0.025	0.045	0.025
962.7382	n	0.025	0.045	0.025
887.7462	n	0.025	0.045	0.025
799.2006	n	0.025	0.045	0.025
795	Bridge			
793.3237	n	0.025	0.045	0.025
737.1219	n	0.025	0.045	0.025
735	Bridge			
732.5015	n	0.025	0.045	0.025
730	Lat Struct			
649.0533	n	0.025	0.045	0.025
647	Bridge			
645.0009	n	0.025	0.045	0.025
598.9581	n	0.025	0.045	0.025
597	Bridge			
596.5109	n	0.025	0.041	0.025
516.8951	n	0.025	0.041	0.025
513	Bridge			
511.6086	n	0.025	0.045	0.025
444.2189	n	0.025	0.045	0.025
363.489	n	0.0275	0.0475	0.0275
307.6839	n	0.0275	0.0475	0.0275
305	Bridge			
303.8198	n	0.0275	0.0475	0.0275
268.9077	n	0.0275	0.0475	0.0275
266	Bridge			
265.4779	n	0.0275	0.0475	0.0275
189.4772	n	0.018	0.0475	0.018
148.1378	n	0.018	0.0475	0.018
140	Bridge			
134.4293	n	0.018	0.0475	0.018
120	n	0.018	0.0475	0.018
115	Bridge			
110	n	0.02	0.0475	0.02
100	Lat Struct			
60	n	0.02	0.0475	0.02
55	Bridge			
50	n	0.02	0.0475	0.02
39.30182	n	0.02	0.0475	0.02
3.237481	n	0.02	0.0475	0.02



13.5. Parcelles désignées par l'aléa inondation dans la vallée de Tefa'aroa

NUM_PARCEL	SEC_PARCEL	ID_CA	SURF_ADOPT	TERRE	Vitesse eau	Hauteur Eau	Aléa Inondation
99	M99	120	441	FENUAHURA LOT N°3	1.559	0.512386	Fort
100	M100	120	397	FENUAHURA LOT N°3	1.861	1.38866	Très fort
55	M55	120	444	AAUPIRI	1.472	1.41387	Très fort
51	M51	120	871	AAUPIRI	2.862	1.49797	Très fort
4	M4	120	708	HAVEA	1.996	1.19815	Très fort
54	M54	120	141	AAUPIRI	1.309	0.483922	Moyen
5	M5	120	1048	MARUAA	1.476	0.788004	Fort
33	M33	120	18784	MARUAA	1.615	0.590467	Fort
34	M34	120	467	AHURIRI	2.27	1.11117	Très fort
35	M35	120	20538	MARUAA	1.391	0.815794	Fort
40	M40	120	590	AAUPIRI	2.21	1.8518	Très fort
41	M41	120	396	AAUPIRI - PAEPAEROA	2.274	0.583651	Fort
42	M42	120	233	AAUPIRI	1.821	1.61575	Très fort
43	M43	120	303	AAUPIRI	1.131	1.00865	Très fort
44	M44	120	336	AAUPIRI	1.398	0.632339	Fort
45	M45	120	345	AAUPIRI	2.645	0.747481	Fort
46	M46	120	252	AAUPIRI	1.818	0.651377	Fort
47	M47	120	26	MARUAA	1.795	1.25299	Très fort
48	M48	120	674	AAUPIRI	1.376	1.50434	Très fort
50	M50	120	789	AAUPIRI	2.193	1.04253	Très fort
56	M56	120	1005	PAEPAEROA	1.26	1.44447	Très fort
57	M57	120	1088	PAEPAEROA	1.325	1.88017	Très fort
82	M82	120	3325	AHURIRI	1.081	0.561494	Fort
83	M83	120	1218	FENUAHURA LOT 6	0.885	0.201268	Moyen
84	M84	120	184	ATITEVAEA	0.807	0.118742	Moyen
85	M85	120	212	ATITEVAEA	0.737	0.037746	Moyen
90	M90	120	26	HAVEA	0.961	0.169409	Moyen
91	M91	120	335	FENUAHURA LOT N°2	0.659	0.114063	Moyen
92	M92	120	260	FENUAHURA LOT N°3	1.665	1.77702	Très fort
93	M93	120	227	FENUAHURA LOT N°4	1.491	1.52509	Très fort
94	M94	120	217	FENUAHURA	1.306	0.357124	Moyen
95	M95	120	47	FENUAHURA LOT 6	1.246	0.383748	Moyen
96	M96	120	528	FENUAHURA LOT N°5	1.189	0.494981	Moyen
97	M97	120	418	FENUAHURA LOT N°5	1.108	1.04596	Très fort
98	M98	120	923	FENUAHURA LOT N°4	1.41	0.737906	Fort
101	M101	120	722	FENUAHURA LOT N°2	1.959	1.101	Très fort
102	M102	120	633	HAVEA	1.372	0.465716	Moyen
105	M105	120	1366	FENUAHURA	0.912	0.402444	Moyen
115	M115	120	9745	ATITEVAEA LOT 2 - PARCELLE B LOT 1	0.796	0.123484	Moyen



NUM_PARCEL	SEC_PARCEL	ID_CA	SURF_ADOPT	TERRE	Vitesse eau	Hauteur Eau	Aléa Inondation
118	M118	120	7974	ATITEVAEA LOT 2 - PARCELLE B LOT 4	1.936	0.226365	Moyen
141	M141	120	1228	ATITEVAEA LOT 2 - PARCELLE B LOT 3	1.98	0.591961	Fort
142	M142	120	2103	FAATAAI LOT 1	0.168	0.121355	Faible
153	M153	120	64	AAUPIRI	2.136	1.94566	Très fort
154	M154	120	889	AAUPIRI	1.05	1.28777	Très fort
155	M155	120	109	AAUPIRI	0.947	1.20072	Très fort
168	M168	120	526	AAUPIRI	1.284	1.08265	Très fort
169	M169	120	504	AAUPIRI	1.457	0.556394	Fort
198	M198	120	921	NOHAITI LOT 3 - (F)	0	0.039298	Faible
200	M200	120	1538	HAVEA (H)	2.234	0.2426	Moyen
201	M201	120	372	HAVEA (I)	0.405	0.045601	Faible
202	M202	120	264	HAVEA (J)	2.385	1.41191	Très fort
203	M203	120	183	MARUAA (K)	0.405	0.153935	Faible
205	M205	120	127	MARUAA (M)	1.52	0.495917	Moyen
206	M206	120	156	MARUAA (N)	1.559	0.628978	Fort
207	M207	120	166	MARUAA (O)	1.001	0.757392	Fort
209	M209	120	25	MARUAA (P)	0.536	0.143152	Moyen
210	M210	120	62	POPOTI (R)	0.64	0.184093	Moyen
212	M212	120	63	POPOTI (T)	1.05	0.422936	Moyen
213	M213	120	979	POPOTI (U)	1.083	0.898403	Fort
239	M239	120	20	POPOTI 3 (AY)	0.766	0.271358	Moyen
240	M240	120	1173	POPOTI 3 (AZ)	0.758	0.348247	Moyen
241	M241	120	40	POPOTI (BB)	0.642	0.040694	Moyen
244	M244	120	14	MARUAA (BE)	0	0.012004	Faible
248	M248	120	51	HAVEA (BI)	1.333	0.546277	Fort
249	M249	120	388	HAVEA (BJ)	1.331	0.803681	Fort
289	M289	120	328	MARUAA Lot B	0.806	0.947546	Fort
290	M290	120	42	MARUAA Lot A	0.34	0.25022	Faible
291	M291	120	653	ATITEVAEA Lot A	1.565	0.048653	Moyen
271	M271	120	1528	MARUAA LOT 1	0.823	0.549389	Fort
272	M272	120	1600	MARUAA LOT 2	0.789	0.49154	Moyen
273	M273	120	826	POPOTI LOT 3	0.958	0.980238	Fort
274	M274	120	2706	MARUAA Lot C	0.652	0.62507	Fort
276	M276	120	15	MARUAA Lot B	2.088	1.04811	Très fort
279	M279	120	2012	POPOTI Lot B	0.746	0.193957	Moyen
283	M283	120	118	MARUAA Lot B	1.403	0.538579	Fort
284	M284	120	62	MARUAA Lot C	1.698	0.772384	Fort
285	M285	120	5342	MARUAA Lot D	1.312	0.605291	Fort
286	M286	120	13	MARUAA Lot A	1.325	0.589345	Fort
294	M294	120	20603	ATITEVAEA Lot B	1.021	0.263727	Moyen
310	M310	120	6214	AHURIRI Lot 2	1.533	0.548135	Fort
311	M311	120	172	MARUAA Lot B	2.313	0.865314	Fort



NUM_PARCEL	SEC_PARCEL	ID_CA	SURF_ADOPT	TERRE	Vitesse eau	Hauteur Eau	Aléa Inondation
329	M329	120	1199	AAUPIRI - PAEPAEROA Lot B	1.76	0.776333	Fort
331	M331	120	2290	VANAAVAITU Lot A	1.234	0.278484	Moyen
333	M333	120	549	VANAAVAITU Lot C	0.665	0.050271	Moyen
2	P2	120	3862	ARAITEFEEA LOT 1	0.457	0.040735	Faible
4	P4	120	3879	ARAITEFEEA LOT 3	0.576	0.785619	Fort
5	P5	120	4777	ARAITEFEEA LOT 4	1.122	1.19355	Très fort
6	P6	120	1500	ARAITEFEEA LOT 4	0.706	0.644159	Fort
7	P7	120	105	TEPUA	0.049	0.1637	Faible
9	P9	120	15204	TEFAAROA 1	1.469	1.42224	Très fort
30	P30	120	12668	TEPUA	1.162	0.764438	Fort
31	P31	120	106	ARAITEFEEA LOT 4	1.133	0.73448	Fort
32	P32	120	295	ARAITEFEEA LOT 3	2.124	1.37445	Très fort
33	P33	120	991	ARAITEFEEA LOT 3 PARCELLE C	2.187	0.579476	Fort
35	P35	120	977	ARAITEFEEA LOT 1	2.444	0.393535	Moyen
36	P36	120	158	PAOTOI PARCELLE	1.434	0.487136	Moyen
37	P37	120	52	PAOTOI PARCELLE	2.002	1.22297	Très fort
38	P38	120	828	PAEPAEROA LOT 5	1.81	0.921519	Fort
39	P39	120	923	PAEPAEROA LOT 4	1.649	0.983763	Fort
43	P43	120	675	ARAITEFEEA LOT 3 PARCELLE B	1.512	0.876321	Fort
48	P48	120	18004	ATITEVAEA PARCELLE LOT 1	0.702	0.504811	Fort
49	P49	120	17646	ATITEVAEA PARCELLE LOT 2	1.094	0.657054	Fort
77	P77	120	46208	ATITEVAEA PARCELLE LOT 3	1.263	0.516501	Fort
69	P69	120	625	ATITEVAEA PARCELLE LOT 3	0.195	0.151031	Faible
73	P73	120	152	PAEPAEROA LOT 5	1.939	0.821532	Fort
80	P80	120	281	PAOTOI PARCELLE	1.24	2.26535	Très fort
120	P120	120	4489	TEFAAROA 1 LOT A	1.907	0.719063	Fort
121	P121	120	907	TEFAAROA 1 LOT B	1.43	0.454155	Moyen
159	P159	120	905	PAOTOI Lot B	1.276	0.343352	Moyen
161	P161	120	932	PAOTOI Lot C	0.739	0.091775	Moyen
139	P139	120	5188	TEPUA - OFAIPAPA Lot 1A1	1.752	0.757235	Fort
140	P140	120	1263	TEPUA - OFAIPAPA Lot 1B1	1.485	0.833226	Fort
141	P141	120	1445	TEPUA - OFAIPAPA Lot 1B2	1.995	0.502051	Fort
142	P142	120	2266	TEPUA - OFAIPAPA Lot 1A2	1.001	0.784956	Fort
156	P156	120	892	PAOTOI Lot A	2.592	0.289191	Moyen