



Section Hydrologie, Hydrogéologie

# Analyse de la crue du 1<sup>er</sup> mai 2023

- rivière Fauoro (Tiirahi), Teahupoo, Tahiti -

## Modélisation - Rapport d'étude

Version 02

### Référence

R20230505-HY

### Commanditaire

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

Cellule Etudes et Conseils en Aménagement (CECA)

#### Vai-Natura SARL

BP. 1003 - 98713 Papeete - Tahiti

Polynésie française

N° RC 11 178 B

N° Tahiti 988550

Phone +689 87 29 16 68

Fax +689 40 66 19 32

[www.vai-natura.com](http://www.vai-natura.com)

[contact@vai-natura.com](mailto:contact@vai-natura.com)

# Vai-Natura SARL

Analyse de la crue du 1<sup>er</sup> mai 2023  
- rivière Fauoro (Tiirahi), Teahupoo, Tahiti -

## Informations relatives au document

### Informations générales

<b>Version</b>	V01
<b>Référence</b>	20230505-M
<b>Ile</b>	Tahiti
<b>Commune</b>	Teahupoo
<b>Rivière</b>	Tiirahi
<b>But de la demande</b>	Analyse de l'aléa inondation Evaluation hydraulique du terrain Préconisations pour l'aménagement du terrain

### Historique des modifications

Version	Date	Rédaction / Vérification	Fonction
V02.3	decembre-2023	Matthieu AUREAU	Hydrologue, Hydrogéologue
V02.1	octobre-2023	Matthieu AUREAU	Hydrologue, Hydrogéologue
V01	juillet-2023	Matthieu AUREAU	Hydrologue, Hydrogéologue

### Demandeur

Organisme/Nom	Contact
CECA / DCA	Emilie NOWAK CHAPELIER Dominique TARDY

# Sommaire

<b>1. Présentation .....</b>	<b>5</b>
1.1. Contexte général.....	5
1.2. Objectifs.....	5
1.3. Rappels initiaux.....	6
<b>2. Analyse historique .....</b>	<b>8</b>
<b>3. Situation cadastrale .....</b>	<b>13</b>
<b>4. Hydrologie de la crue du 1er mai 2023 .....</b>	<b>14</b>
4.1. Evènement exceptionnel .....	14
4.2. Onde de crue .....	16
<b>5. Investigation autour de la crue du 1er mai .....</b>	<b>22</b>
5.1. Diagnostic .....	22
5.2. Emprise de l'inondation.....	27
5.3. Causes probables de l'inondation.....	29
<b>6. Analyse de la modélisation de 2020 (EGIS) .....</b>	<b>32</b>
<b>7. Parcelles du programme de Fare OPH .....</b>	<b>36</b>
7.1. Avis général.....	36
7.2. Description sur les parcelles retenues.....	38
7.3. Observations des constructions sur pilotis.....	39
<b>8. Modélisation hydraulique .....</b>	<b>40</b>
8.1. Type de modèle utilisé.....	40
8.2. Etendu et maillage du modèle.....	41
8.3. Rugosité du terrain .....	42

<b>9. Résultats de la modélisation .....</b>	<b>43</b>
9.1. Reproduction de la crue du 1 <sup>er</sup> mai 2023 .....	43
9.2. Redéfinition de la crue centennale.....	46
9.3. Proposition d'une nouvelle cartographie de l'aléa inondation .....	47
9.4. Parcelles du programme Fare OPH.....	49
<b>10. Proposition d'aménagement .....</b>	<b>51</b>
10.1. Diagnostic global.....	51
10.2. Recommandations et avis.....	51
<b>11. Conclusion .....</b>	<b>54</b>
<b>12. Bibliographie.....</b>	<b>55</b>
<b>13. Annexes .....</b>	<b>57</b>
13.1. Approche hydrologique .....	57
13.1.1. Objectifs .....	57
13.1.2. La méthode rationnelle .....	58
13.1.3. Principe de la méthode GRADEX .....	59
13.1.4. Estimation des crues extrêmes .....	60
13.2. Abaque des coefficients de rugosité de Manning (Chow, 1959).....	61
13.3. Protection et gestion des berges .....	64
13.3.1. Enrochement .....	65
13.3.2. Enrochements percolés.....	68
13.3.3. Mur de soutènement en béton.....	68
13.3.4. Gabions.....	69
13.3.5. Mise en œuvre .....	71
13.3.6. Génie civil ou génie végétal.....	71
13.3.7. Techniques végétales ou mixtes .....	72

## 1. Présentation

### 1.1. Contexte général

Un premier point toponymique est nécessaire pour préciser les noms de lieu utilisés. La vallée de Tiirahi est traversée par la rivière Fauoro. Cette dernière aurait été renommée Tiirahi, comme la vallée, après de très grandes crues survenues dans les années 1930<sup>1</sup>. Toutefois sur les cartes topographiques (IRD/ORSTOM (1993)), les 2 noms sont donnés. La confusion, ou le remplacement, entre les noms de rivières et de vallées est assez courante en Polynésie, même s'il semble que chacune de ces entités géographiques était nommés autrefois bien distinctement. Au bout de son parcours, la rivière Fauoro / Tiirahi trouve son exutoire dans la baie qui fait face à la passe de Havae.

Le 1<sup>er</sup> mai 2023 a été marquée par une inondation importante dans la basse vallée de Tiirahi. La rivière Fauoro est sortie de son lit et a submergé une zone de plaine assez largement habitée. Il se trouve également que l'embouchure de la rivière rencontre un site mondialement connu à travers le monde, la vague de Teahupo'o qui accueillera les épreuves de Surf pour les Jeux Olympiques en août 2024. Les enjeux sont donc très importants. L'évènement exceptionnellement pluvieux du 1<sup>er</sup> mai à rencontrer une houle très importante qui s'est abattue le même jour sur la côte Ouest de Tahiti.

Plusieurs études ont déjà été menées sur cette basse vallée (VAIAD, 2007 ; VAIAD, 2011 ; SPEED, 2020, EGIS, 2021). Les premiers témoignages ont laissé penser que l'onde de submersion ne correspondait pas aux dernières modélisations hydrauliques simulant le débordement de la rivière. Des questions se sont également posées par rapport à un atterrissement du lit sur certains tronçons qui aurait favorisé l'inondation.

### 1.2. Objectifs

Le premier objectif de cette étude est donc de documenter objectivement l'évènement du 1<sup>er</sup> mai 2023 et de décrire hydrologiquement et hydrauliquement le phénomène de submersion et l'avancer de la lame d'eau dans la plaine.

Les données collectées seront également très utiles pour calibrer un nouveau modèle hydraulique et tenter de reproduire numériquement la crue du 1<sup>er</sup> mai. A partir de cette paramétrisation consolidée, il sera alors possible de lancer une nouvelle simulation et intégrant des hypothèses comme un évènement centennal ou la formation d'un embâcle.

La dernière phase de ce travail doit aboutir à des recommandations d'aménagements et d'occupation du sol visant à réduire le risque. Rappelons dès à présent que le risque est la rencontre d'un enjeu face à un aléa. L'aléa est, dans ce contexte, le débordement de la rivière engendrant par un évènement météorologique dans un espace d'écoulement potentiellement trop étroit. L'enjeu couvre les habitations, et plus largement, les zones concernées par des activités humaines.

---

<sup>1</sup> Com. Pers., Ormond PARKER, habitant de Teahupo'o, né en 1935 (information trouver sur le site <https://www.rivieresdetahiti.com/>)

### 1.3. Rappels initiaux

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

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

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

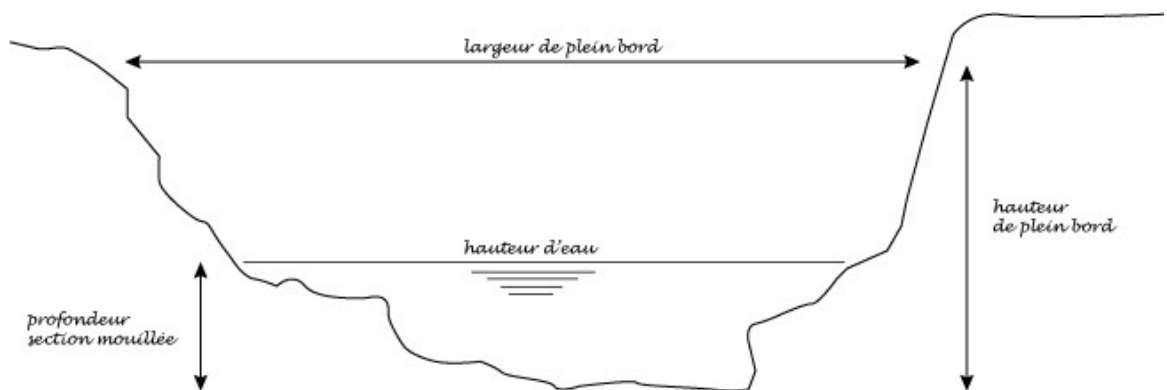


Figure 1 : Géométrie du profil en travers d'un cours d'eau.

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

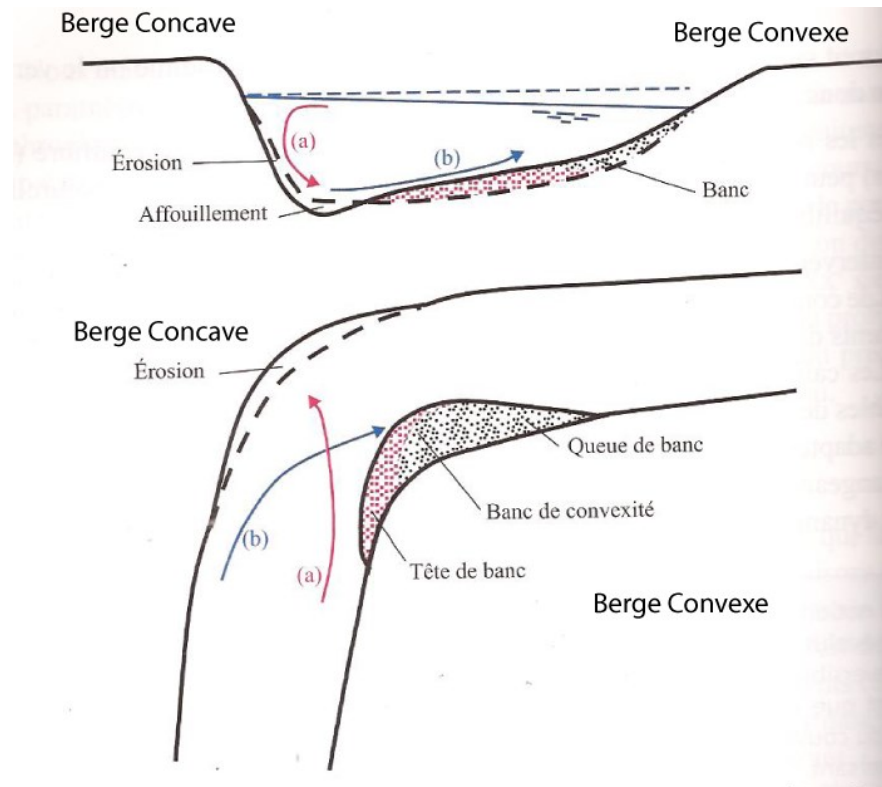


Figure 2 : Schémas de la courbe d'une rivière et évolution des profils.  
(tiré et adapté de Degoutte, 2012)

- la berge est un talus incliné qui sépare le lit mineur du lit majeur. Elle doit être différenciée de la rive dont l'espace géographique est plus vague : la zone de séparation entre les milieux aquatique et terrestre. La berge est composée d'un socle, de la pente du talus et du « haut du talus » ou « haut de berge ».

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

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

## 2. Analyse historique

La rivière Fauoro s'écoule dans la vallée de la Tiirahi dans l'espace géographique de Teahupo'o. Elle trouve son exutoire en face de la passe de Havae qui est réputée à travers le monde pour la vague qui vient frapper le récif.

Si la vallée de Tiirahi est étroite et encaissé à travers les sommets et les crêtes de l'Ouest de la presqu'île, elle s'écoule sur le dernier kilomètre dans une plaine alluviale qui est occupée par des habitations et quelques champs agricoles. Les activités humaines ont amené au cours du temps une modification du lit de la rivière avec un tracé plus rectiligne et plus canalisé. Il est aussi plus étroit sur les 450 derniers mètres entre un gué à l'amont et l'embouchure.

L'analyse des photos aériennes et satellites depuis 1955 est riche en enseignement sur l'histoire récente de cette rivière. Elle a permis de tracer les berges à chaque époque et d'en suivre leur évolution (Figure 3).

En 1955, le lit présente beaucoup plus de méandres et occupe un espace globalement plus vaste si l'on compare aux berges actuelles. On observe notamment deux méandres à travers l'actuel rive droite, à l'aval du gué. Il traverse un espace aujourd'hui bâti qui fut impacté par l'inondation du 1<sup>er</sup> mai. On pourra également remarquer qu'à cette époque l'exutoire de la rivière se trouve un peu plus à gauche, sur l'actuelle rive droite. Un banc de sable assez important se trouvait dans l'axe du dernier tronçon. La rivière se rejetait dans le lagon dans une zone où plusieurs habitations ont subi l'inondation du 1<sup>er</sup> mai 2023.

La première modification notable du tracé eu lieu entre 1955 et 1960 avec la suppression de ces méandres. La canalisation du lit s'est accentuée au cours du temps avec un cheminement toujours plus rectiligne. Si dans les premières décennies, les terres dégagées sur les rives ont été exploitées pour l'agriculture et la plantation de cocoteraies, à partir des années 1990 de plus en plus de constructions apparaissent sur ces espaces autrefois occupées par la rivière (Figure 4 à Figure 9).

Il est certain que l'espace laissé à la rivière a été largement réduit au cours du temps pour augmenter les terres disponibles pour le développement des activités humaines. Le cadastre a même entériné cette situation (cf. Section suivante).

Cette canalisation progressive du lit a contraint l'écoulement dans un espace contenu entre des berges redessinés et consolidés. L'énergie de l'eau ne peut plus se dissiper dans les zones d'expansion que les méandres ouvraient. Il en résulte un risque de débordement et de submersion qui augmente.

En observant l'évolution historique de la rivière, on se rend bien compte que l'espace pour l'écoulement a été réduit, l'aléa augmente, avec dans le même temps une occupation des rives qui croit, les enjeux sont plus grands. Il en résulte mécaniquement un niveau de risque plus élevé.

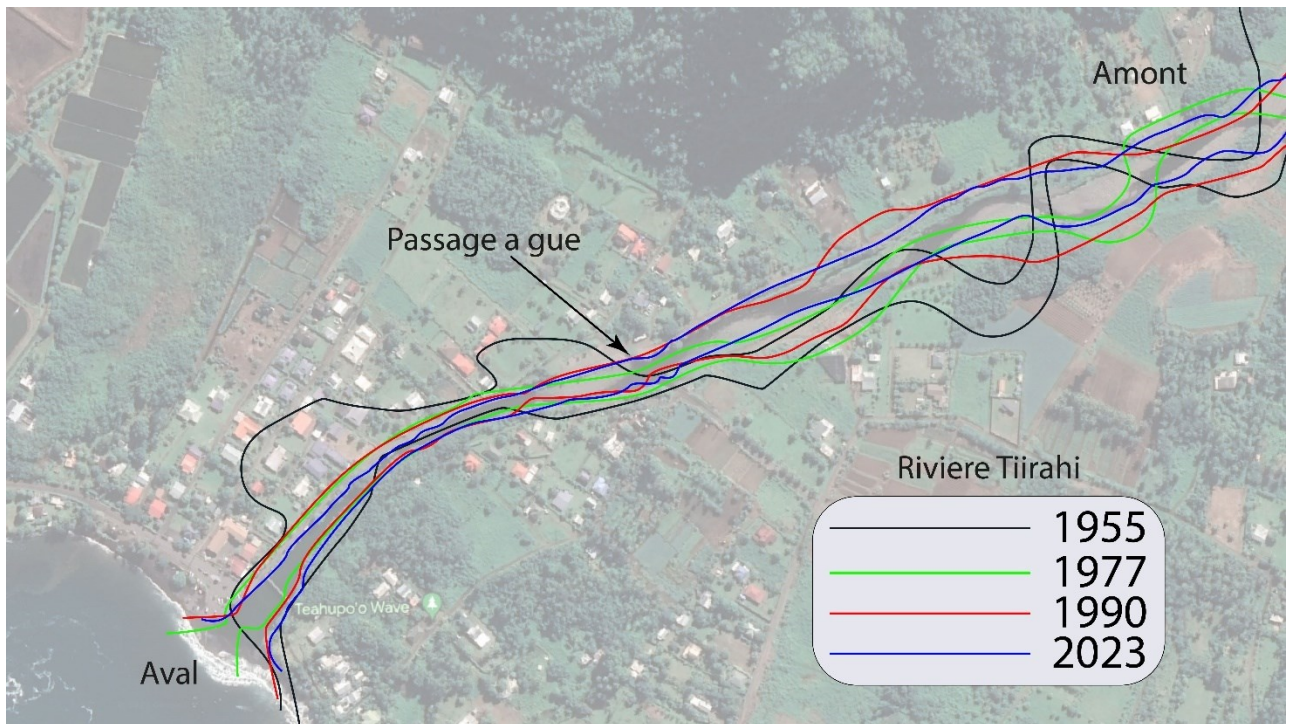


Figure 3 : Evolution historique des berges de la rivière Fauoro sur son dernier tronçon à travers la plaine alluviale.

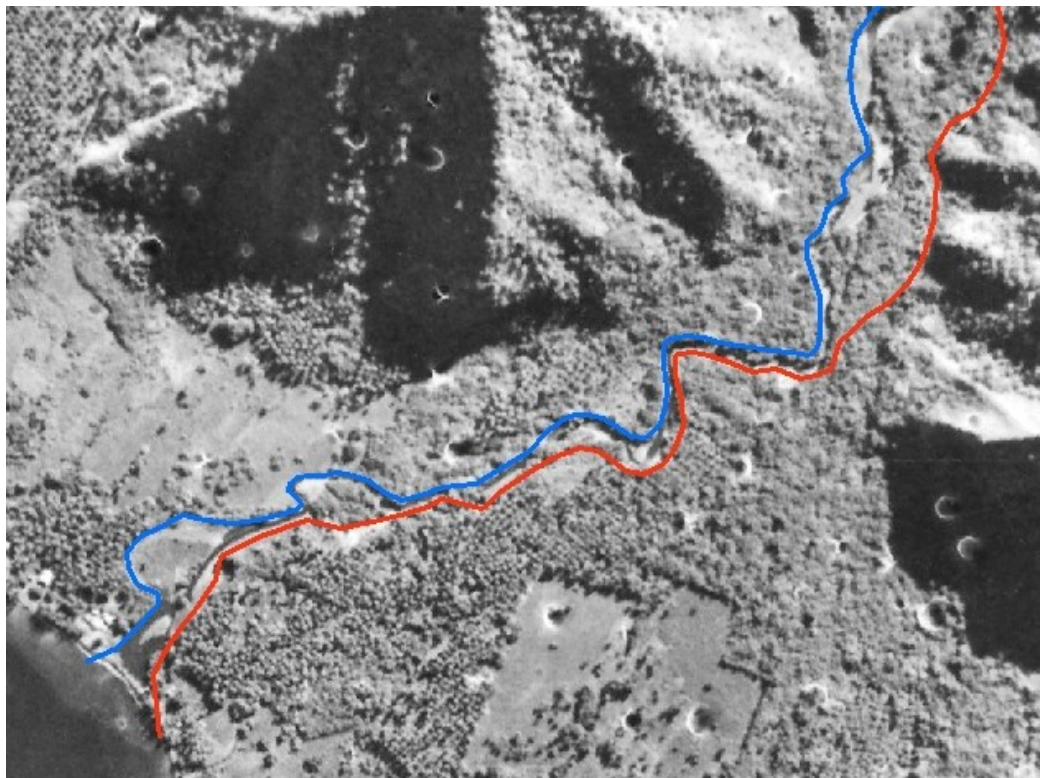


Figure 4 : Situation de la rivière Fauoro et de ses rives en 1955.

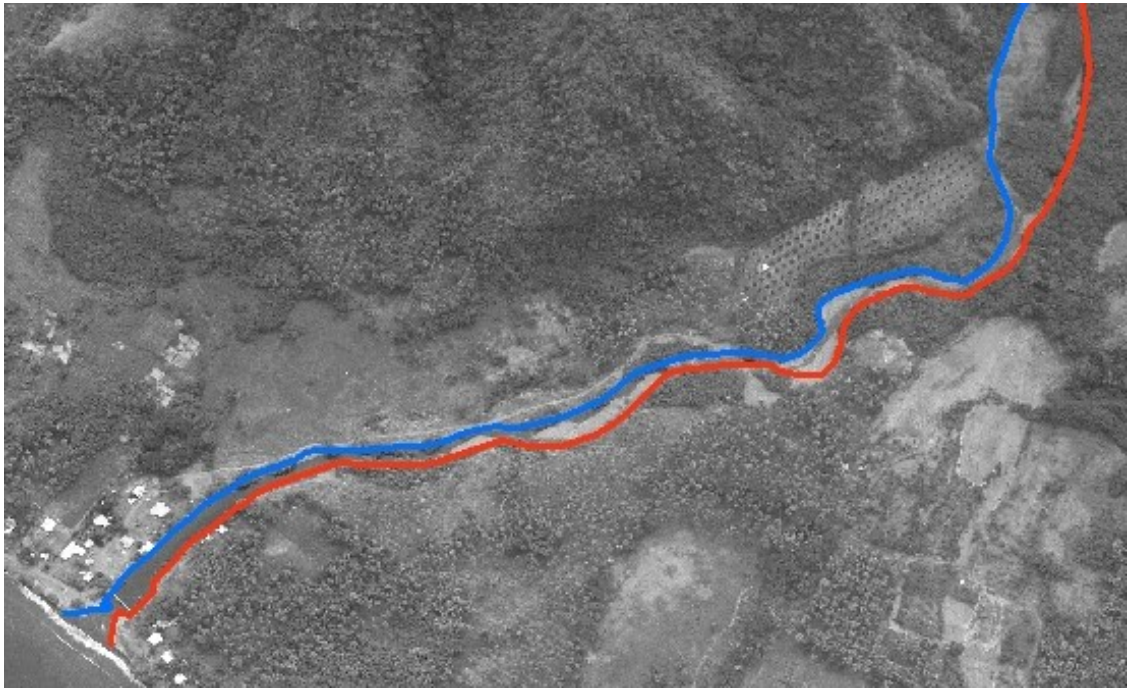


Figure 5 : Situation de la rivière Fauoro et de ses rives en 1977.

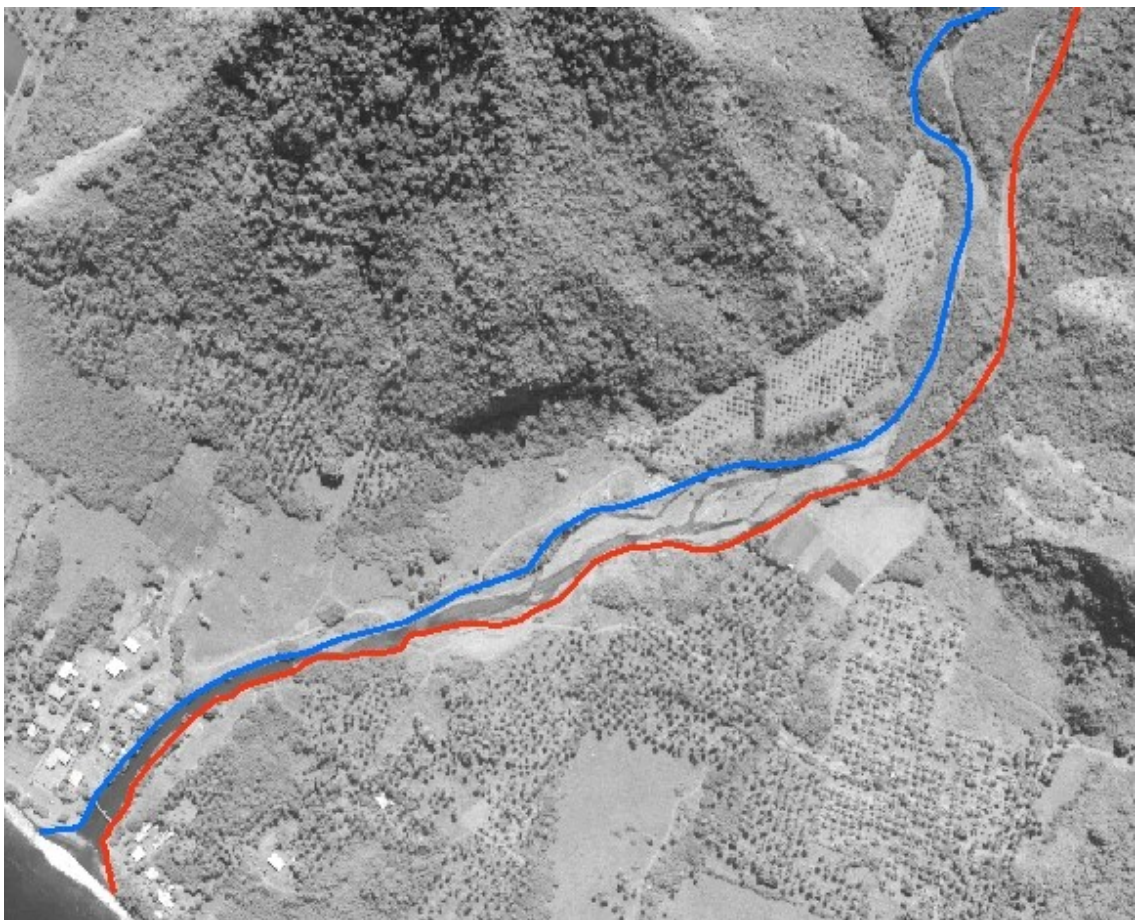


Figure 6 : Situation de la rivière Fauoro et de ses rives en 1990.



Figure 7 : Situation de la rivière Fauoro et de ses rives en 2007.



Figure 8 : Situation de la rivière Fauoro et de ses rives en 2015.



Figure 9 : Situation de la rivière Fauoro et de ses rives en 2023.

### 3. Situation cadastrale

La première chose qui est surprenant lorsque l'on regarde le cadastre (Figure 10) autour du tronçon de la rivière Tiirahi à travers la plaine alluviale, est la non concordance du tracé réel et des limites du cadastre. Ceci est surtout vrai sur le tronçon à l'amont du gué actuel. Le dessin des berges a évolué plus vite que la mise à jour administrative des frontières des parcelles. Il faut aussi considérer que le cadastre est un outil relativement figé par rapport à une entité morphologiquement dynamique. A minima, le lit moyen, voir le lit majeur, devrait être pris en compte dans sa description spatiale.

Les parcelles CS2 et CS16 sont domaniales et aujourd'hui non occupées. Elles longent la berge gauche du cours d'eau sur 333 m. Leur position est intéressante si l'on souhaite redonner un peu d'espace au lit. L'acquisition de la parcelle voisine CS10 permettrait de disposer d'une continuité linéaire de 500 m sur cette berge gauche et d'envisager des solutions « douces », par opposition à aux solutions « lourdes » telles que les enrochements. Les parcelles CI12, CI13 et CI16 à l'aval offrirait également de l'espace pour améliorer la gestion des crues.

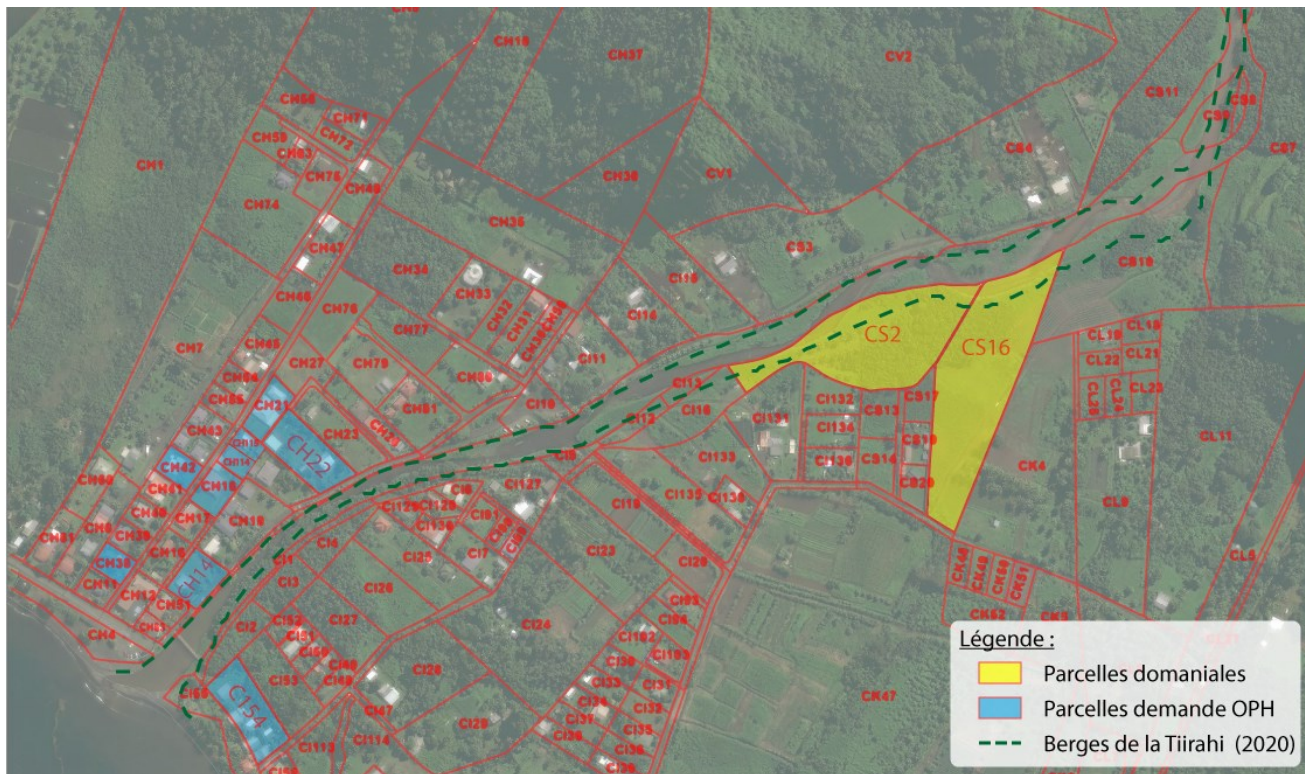


Figure 10 : Situation cadastrale autour de la rivière Fauoro dans sa dernière section à travers la plaine alluviale.

## 4. Hydrologie de la crue du 1er mai 2023

### 4.1. Evènement exceptionnel

Une crue est avant tout un évènement hydrologique liée à un épisode de fortes, voire de très fortes précipitations. A l'exception du lâcher d'eau d'un barrage, évidemment. L'évènement météorologique est ici particulièrement intéressant, et même particulièrement exceptionnel.

Pour l'étudier nous nous basons sur les données de 3 stations pluviométriques (Tableau 1). La première est gérée par Météo France, elle se trouve sur la rive droite de la rivière Fauoro dans la plaine alluviale à la côte 10 m. Elle a été installée en 2021, il y a donc peu de recul historique. Nous complétons notre analyse avec les données de la station Aivaro P1 entretenu par la cellule hydrologie du GEGDP (DEQ) qui se trouve dans la vallée voisine d'Aivaro également à 10 m d'altitude. Pour évaluer avec les temps de retour associés à la durée des précipitations, nous nous appuyons sur l'analyse de la station de Taravao P1 qui se trouve à 630 m d'altitude, à 4 km du fond de la vallée de Tiirahi et à 9 km de l'embouchure. Cette station a pour principal avantage d'être la plus proche parmi les stations pluviométriques historiques sur l'île de Tahiti et d'avoir fait l'objet d'une analyse statistique (Cahiers de l'ORSTOM, Wotling, 1998) sur les différentes durées d'averses (5 min, 15 min, 30 min ...).

Tableau 1 : Description des stations pluviométriques utilisées.

Station	Date d'installation	Altitude	Latitude	Longitude
Teahupo'o <i>vallée de Tiirahi</i>	04/10/2021	10 m	17°51'34"S	149°14'48"W
Aivaro P1	12/01/2023 <i>La station historique date de 1975</i>	10 m	17°50'39"S	149°14'57"W
Taravao P1 <i>Plateau</i>	1989	630 m	17°46'34"S	149°15'09"W

L'évènement météorologique du 1<sup>er</sup> mai 2023 fut particulièrement intense sur de courtes périodes. Les cumuls enregistrés sont présentés dans le Tableau 2. Il s'agit de cumuls glissants, c'est-à-dire que pour une durée d'averse spécifique, par exemple 30 min, on cherche le cumul maximum lors de l'évènement pluvieux, sans se fixer sur des heures prédéfinies (7:00, 7:30, 8:00 ...). Ainsi, le cumul maximum sur 30 min a été enregistré à 7h12 par la station de MétéoFrance.

Les données de MétéoFrance ne sont disponibles qu'avec un pas de temps de 6 min. La comparaison avec la station de Aivaro n'est alors qu'approximative sur les petites durées (< 30 min).

Les intensités de pluie mesurée sur 30 min, 1 h et 2 h, par la station de Teahupo'o dépassent une récurrence centennale. Les valeurs atteintes sont même supérieures à presque toutes les données disponibles sur Tahiti sur plus 50 ans de mesure. A titre de comparaison, l'intensité sur 30 minutes d'un épisode centennal à Hitiaa, la zone la plus productive de l'île, est de 93.3 mm (alt. 385). Le cumul atteint 136.3 mm (alt. 385) sur 1 h et 207.8 mm (alt. 550) sur 2 h.

Les niveaux atteints sont même supérieurs à ceux relevés pendant le cyclone Veena qui s'est abattu sur Tahiti entre le 11 avril 1983 dont l'une des conséquences les plus marquantes a été l'effondrement du pont traversant la rivière Papenoo à son embouchure.

Tableau 2 : Cumuls pluviométriques enregistrés lors de l'évènement du 1er mai pour différentes durées.

Station	Intensité maximum sur x minutes (en mm ou l/m <sup>2</sup> )					
	5 min (6 min)	15 min (12 min)	30 min	1 h	2 h	24 h
Aivaro	12.5	42	59	88.5	145	149.5
Teahupoo (Tiirahi) - 1 <sup>er</sup> mai	16	30.4	<b>86.9</b>	<b>129.9</b>	<b>183.8</b>	204.3
<i>Estimation du temps de retour</i>	≈ 50 ans	≈ 10 ans	> 100 ans	> 100 ans	> 100 ans	≈ 2 ans
Teahupoo (Tiirahi) - 10 mai	12.3	24.6	43.6	54.8	68.7	150.1
Taravao P1	16.9 (T50)	31.6 (T5)	73.1 (T100)	112 (T100)	160 (T100)	203 (T2)

Les données enregistrées par la station d'Aivaro, qui se trouve à 1 600 m, décrivent également un évènement exceptionnel, même si les cumuls sont significativement plus bas (Figure 11). On remarque un léger décalage dans la temporalité de l'évènement entre les deux sites. La pluie s'est déclenchée 60 minutes plus tard à Teahupo'o. Ces données semblent montrer que l'épisode a été très localisé et particulièrement violent dans la vallée Tiirahi.

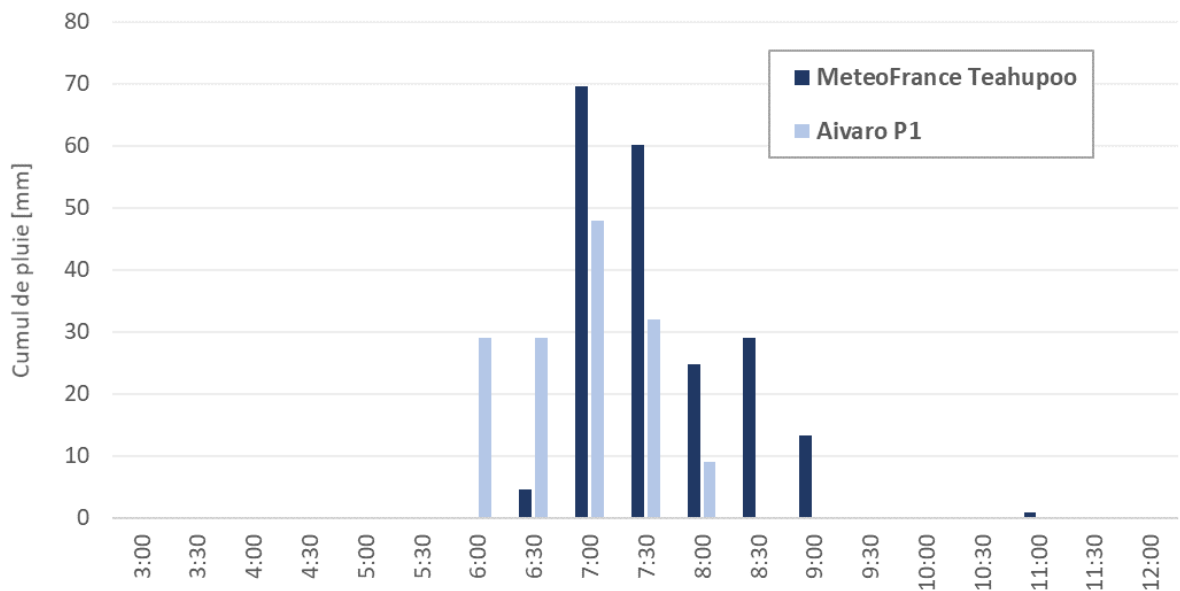


Figure 11 : Hyétogramme des pluies des stations de Aivaro et Teahupo'o le 1 mai 2023, pas de temps 30 min.

**La crue du 1<sup>er</sup> mai 2023 est donc, avant tout, le résultat d'un épisode météorologique extrême sur une courte durée. Un épisode presque unique au regard des annales hydrologique de l'île de Tahiti.**

## 4.2. Onde de crue

La rivière Fauoro (Tiirahi) n'a jamais fait l'objet d'un suivi hydrométrique en continu. Nous ne pouvons donc étudier la dynamique de la cure du 1<sup>er</sup> mai 2023 qu'à partir de la rivière Urihae qui traverse la vallée voisine d'Aivaro qui dispose d'une station limnimétrique depuis 1978 (Danloux, 2003). Au cours de son histoire cette station a subi de nombreux dégâts, elle a été plusieurs fois endommagée et réinstallé. Sa longévité permet toutefois de s'appuyer sur des résultats consolidés.

Le bassin versant de Aivaro couvre une surface de 7 km<sup>2</sup> contre 11 km<sup>2</sup> pour le bassin versant Tiirahi (Figure 12). Les deux vallées sont voisines et présentent des caractéristiques morphologiques similaires (Tableau 3). Elles sont toutes les 2 de forme oblongue avec une largeur relativement stable. Elles sont drainées par des rivières presque parallèles qui sont relativement encaissées. Le bassin versant de Tiirahi est un peu plus grand.

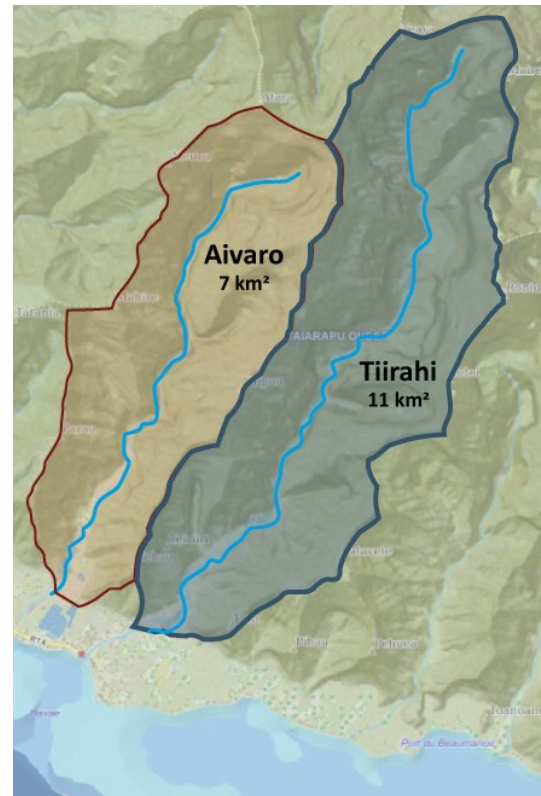


Figure 12 : Bassin versant de Tiirahi et Aivaro.

Tableau 3 : Caractéristiques morphologique des 2 bassins versants.

Bassin Versant	Surface	Longueur	Largeur	Altitude max.
Aivaro	6.43 km <sup>2</sup>	5 km	entre 1.2 et 1.8 km	1 200 m mont Atara
Tiirahi (Teahupo'o)	10.3é km <sup>2</sup>	6.7 km	entre 1.5 et 1.9 km	1 332 m mont Maire Nui

On peut donc considérer d'un point de vue hydrologique que la dynamique des écoulements est assez comparable et l'on peut donc s'appuyer sur les données mesurées sur la rivière Urihae pour estimer les débits de la rivière Fauoro.

Le maximum observé dans la rivière Urihae est une hauteur d'eau de 360 cm correspondant à un débit estimé à 190 m<sup>3</sup>/s, le 11 avril 1998. Lors du cyclone Veena, le 12 avril 1983, le débit aurait atteint 109 m<sup>3</sup>/s.

A partir des données récupérées dans les cahiers de l'ORSTOM et les travaux de Danloux (2003) sur l'évaluation des maximums de crue sur l'île de Tahiti, nous avons pu reconstruire une courbe d'étalonnage permettant de convertir les hauteurs d'eau en débit (Figure 13). Cette projection n'est valable que pour les pics de débit lors des crues les plus importantes. La plage des données d'entrée s'étend de 53 à 190 m<sup>3</sup>/s. La relation obtenue est de très bonne qualité ( $R^2=0.92$ ). On peut ainsi appliquer l'équation de conversion aux données de hauteur d'eau avec un bon niveau de confiance.

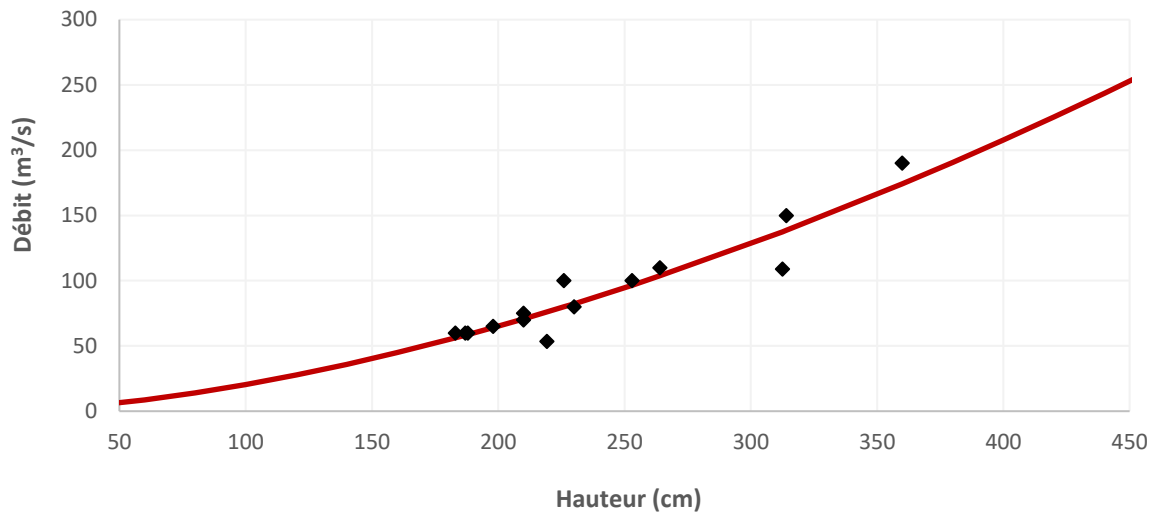


Figure 13 : Courbe d'étalonnage pour les maximums de crues à partir de données entre 1981 et 2003.

Les données brutes, les hauteurs d'eau mesurées en continue, fournies par la cellule hydrologie du GEGDP, couvrent une période de 23 ans entre 1999 et 2023. Sur le graphique présenté sur la Figure 14, seules les hauteurs supérieures à 150 cm sont présentées. Elles permettent de se rendre compte que les données de la crue du 1<sup>er</sup> mai 2023 se trouvent dans la plage de mesure historique. Pour l'analyse de ce graphique, il est important de rappeler que la station n'était plus fonctionnelle entre le 12/09/2019 et le 16/01/2023.

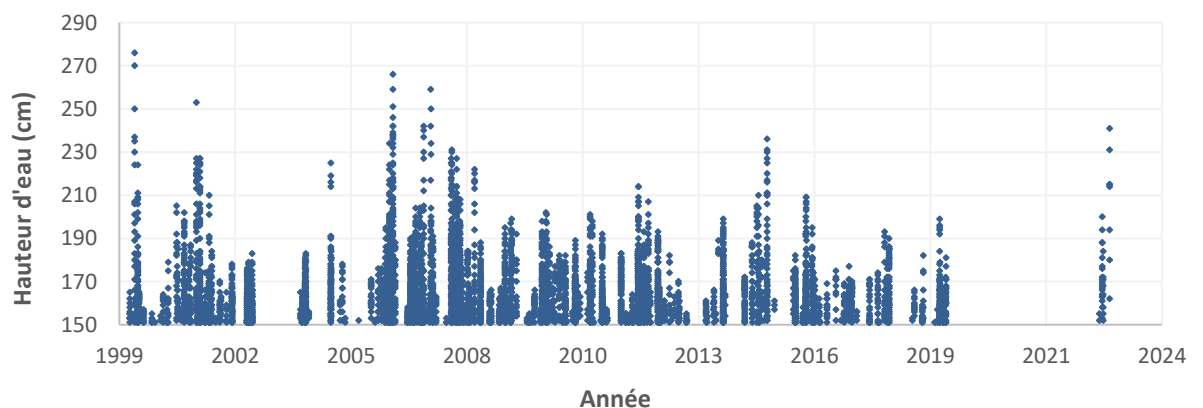
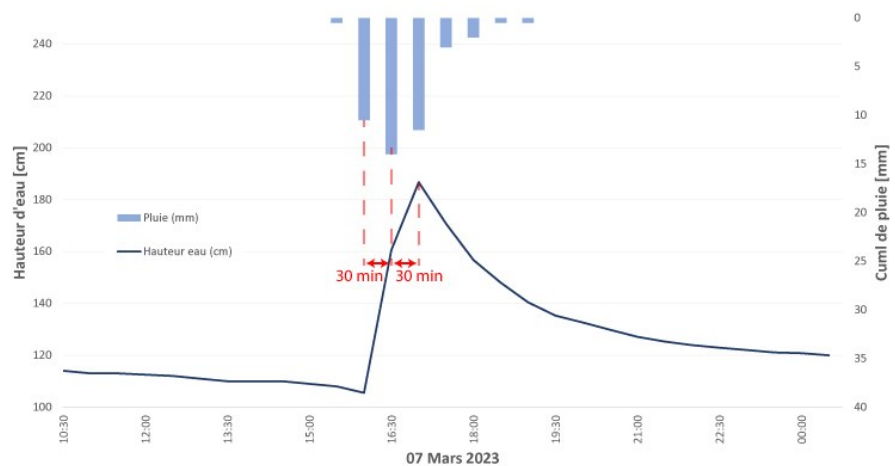
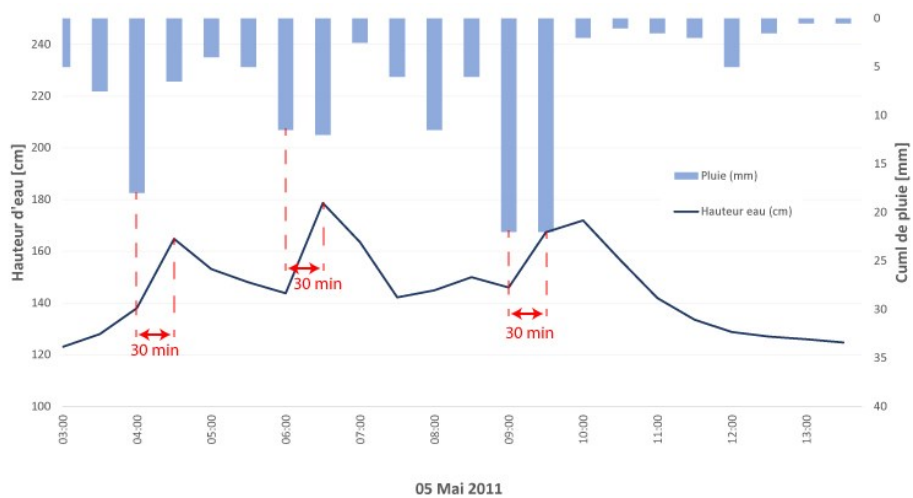
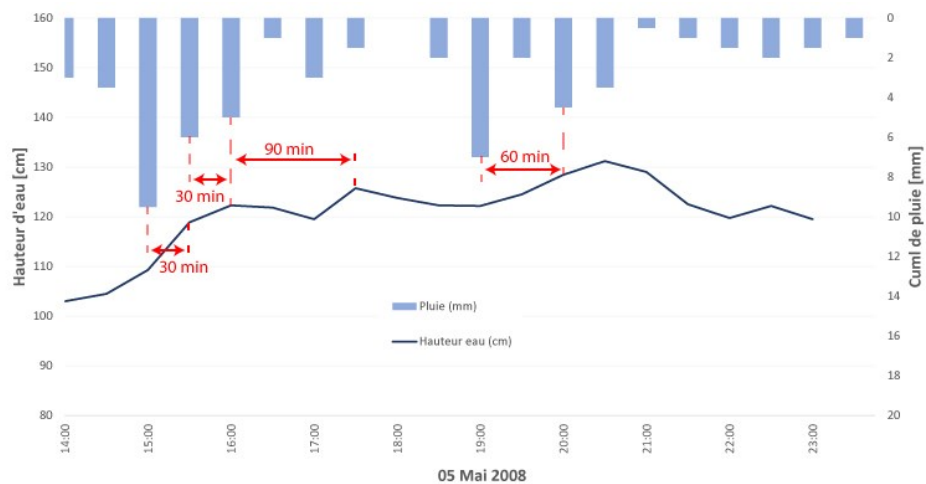


Figure 14 : Hauteurs d'eau mesurées lors des épisodes de crue à la station Aivaro.

La hauteur d'eau maximum enregistrée le 1<sup>er</sup> mai à 7:45 (277 cm) n'est peut-être pas le pic de la crue puisque la sonde a été emportée au cours de cet événement. A partir des données historiques disponibles dans la vallée d'Aivaro (limnimétrie et pluviométrie), nous avons étudié différentes crues présentant des caractéristiques similaires pour évaluer le temps de réponse de la rivière suite à une épisode pluviométrique court mais relativement intense. Il apparaît que l'onde de crue apparaît plus souvent 30 minutes après le pic des précipitations. Le temps s'allonge à 60 voire 90 minutes si le cumul de pluie est moins élevé.



Si l'on regarde à présent les données du 1<sup>er</sup> mai, la sonde fut arrachée à 7:45, soit 45 minutes après le maximum de précipitation cumulé sur 30 minutes. La pluie s'est ensuite totalement arrêtée. On peut alors raisonnablement penser que le sommet de l'onde de crue était pratiquement atteint. La hauteur d'eau enregistrée a atteint 277 cm, si l'on prend une marge de 5% pour majorer l'estimation, on atteint une hauteur maximum de 290 cm. L'application de la relation d'étalonnage prédit que le débit aurait atteint 112 m<sup>3</sup>/s.

En prenant en compte, la différence de surface couverte par les bassins versant (10.3 ha pour Tiirahi et 6.4 pour Aivaro) et en considérant que les autres caractéristiques géomorphologiques sont similaires (pentes, altitudes, sols, ...), nous appliquons une relation de proportionnalité pour évaluer le maximum de crue pour la rivière Fauoro. D'autre part, nous savons que sur 60 min (temps de concentration des bassins versants), le cumul des précipitations a été 47% plus important dans la vallée Tiirahi. L'application d'une nouvelle relation de proportionnalité nous permet d'estimer **le débit maximum de la crue du 1<sup>er</sup> mai sur la rivière Fauoro à 263 m<sup>3</sup>/s.**

--

Les travaux de Joël Danloux, en 2003, sur les maximums de crue sur l'île de Tahiti nous renseigne sur la rivière Aivaro et son hydrologie lors des grandes crues.

Le débit maximum connu est évalué à 190 m<sup>3</sup>/s, le 11 avril 1998, par conversion de la hauteur d'eau. Les chroniques historiques ont permis de calculer les débits caractéristiques de crue pour cette rivière. C'est l'application de la loi de Galton qui s'ajuste le mieux à la distribution statistique.

La plus forte crue connue aurait un temps de retour de presque 50 ans. Il serait légèrement inférieur à 10 ans pour la crue du 1<sup>er</sup> mai 2023 (112 m<sup>3</sup>/s).

Tableau 4 : Débits caractéristiques de la rivière Urihae dans la vallée Aivaro.

Période de retour	10 ans	50 ans	100 ans
Aivaro (cote 8)	117 m <sup>3</sup> /s	188 m <sup>3</sup> /s	224 m <sup>3</sup> /s

Pour estimer ces débits caractéristiques pour les rivières qui n'ont jamais fait l'objet d'un suivi hydrométrique, Danloux applique la formule empirique de Craeger parce qu'« elle tient compte du fait que le débit spécifique [sur Tahiti] diminue [...] quand la superficie du bassin augmente. Il cale les coefficients de Craeger sur les plus fortes crues des bassins versant mesurés. Le débit maximum calculé par cette formule pour la rivière Urihae (Aivaro) est de 187 m<sup>3</sup>/s, une valeur très proche de la mesure (190 m<sup>3</sup>/s). La méthode apparaît donc tout à fait fiable.

Ce travail a permis d'estimer les débits caractéristiques de la rivière Fauoro alors qu'elle n'a jamais fait l'objet d'une campagne de mesure.

Tableau 5 : Débits caractéristiques de la rivière dans la vallée Tiirahi.

Période de retour	10 ans	50 ans	100 ans
Fauoro (Tiirahi)	182 m <sup>3</sup> /s	289 m <sup>3</sup> /s	347 m <sup>3</sup> /s

Ces estimations ont été considérées comme surestimées par certaines études postérieures dont les projections hydrologiques ont été reprises dans le tableau suivant.

Source	Méthode	Q <sub>10</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>50</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>100</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>100</sub> spécifique (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	Commentaires
VAIAD - 2007 Etude d'aménagement de la rivière	Reprise de la méthode de Craeger	180	290	350	35	Méthode bien décrite et argumenté par Danloux (2003)
VAIAD - 2011 Schéma d'aménagement de la rivière	Méthode rationnelle à partir des données du pluviographe de Taravao Coef. de ruissellement fixe à 0.5	108	170	223	22	Coef. de ruissellement fixe peu justifiable par rapport aux caractéristiques torrentielles des rivières polynésiennes
SPEED - 2020 Cartographie de l'aléa inondation	Méthode rationnelle à partir des données du pluviographe de l'aéroport de Faa'a	110	172	199	20	La pertinence d'utiliser les données pluviométriques du Nord de l'île sur un bassin versant de la presqu'île est à discuter
EGIS - 2021	Méthode rationnelle à partir des données du pluviographe de Taravao Coef. de ruissellement variable	135 (Cr = 0.6)	195 (Cr = 0.7)	243 (Cr = 0.8)	24	La méthodologie est cohérente même si la méthode rationnelle est très générale.

Il est difficile de statuer avec certitude sur ces différentes estimations puisque la rivière Fauoro n'a jamais été mesurée directement. Toutefois les travaux de Danloux, bien que datant un peu, se base sur une analyse précise des données réelles des crues, sur toute l'île de Tahiti, et s'appuie une méthodologie décrite en détail et justifiée. Nous avons tendance à préférer cette approche plus statistique.

En considérant les estimations de Danloux, **le débit maximum atteint le 1<sup>er</sup> mai 2023 dans la rivière Fauoro est d'occurrence presque cinquantennale (Q<sub>50</sub>)**. Il dépasse un temps de retour centennal (Q<sub>100</sub>) si l'on reprend les projections d'EGIS.

Il est bien certain que l'évènement peut être classé comme rare à très rare. Comme l'averse qui a déclenché la montée des eaux a été très intense, mais courte dans le temps, nous pensons qu'un évènement météorologique plus global, comme une tempête tropicale ou un cyclone, peut, et a pu, générer des débits plus élevés avec une probabilité supérieure à 1/100. L'analyse précise des hauteurs d'eau mesurées lors des épisodes de 1983 et 1998 par Danloux plaide pour cette hypothèse.

L'onde de crue a été reconstituée à partir de la cinétique enregistrée le 1<sup>er</sup> mai 2023 par la station de la rivière Urihae (Aivaro). La même dynamique est utilisée pour simuler la montée de crue d'un évènement centennal (Figure 15). C'est ce schéma qui sera paramétré dans la modèle hydraulique.

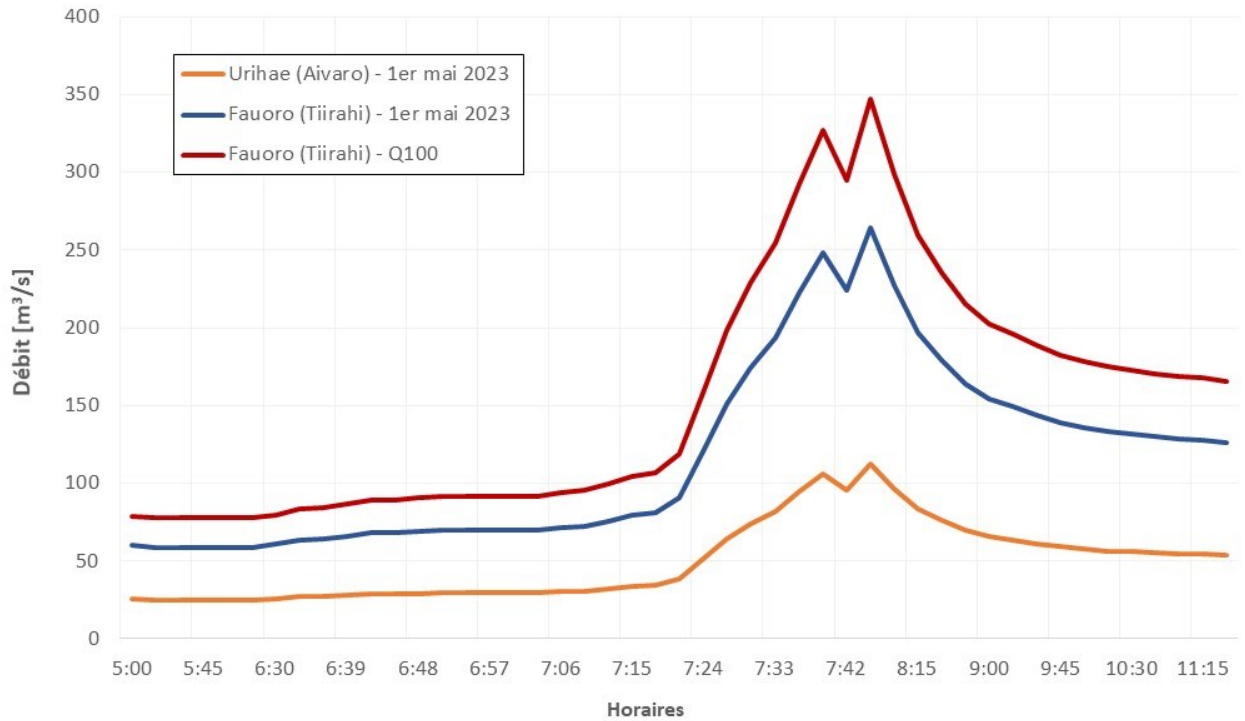


Figure 15 : Ondes de crue reconstituées à partir des données de la station hydrométrique d'Aivaro.

## 5. Investigation autour de la crue du 1er mai

### 5.1. Diagnostic

Un diagnostic détaillé du lit de la rivière a été réalisé entre le 5 et le 7 juin 2023. L'objectif était d'observer sur le terrain le fonctionnement hydraulique de la rivière et de relever les indices laissés par la crue permettant de mieux comprendre la dynamique de débordement et de l'inondation.

Deux crues se sont donc succédées les 1 et 10 mai 2023. Dans les semaines suivantes, les services de la Direction de l'Équipement (SST<sup>2</sup> puis INFRA<sup>3</sup>) se sont succédés pour déplacer et « nettoyer » les débris végétaux et les amas alluvionnaires qui se sont accumulés dans différents endroits du lit. Les observations réalisées début juin intègrent donc ces dernières modifications anthropiques.

Le schéma d'exploration a été divisé en deux sections : à l'aval, puis à l'amont du gué. Les îlots alluvionnaires sont surtout présents à l'amont, le gué est un obstacle au transport solide et à la migration des alluvions qui s'accumulent à l'amont. La rivière a lors du mal à évacuer naturellement les éléments les plus importants et c'est surtout du sable et de limons que l'on retrouve à l'embouchure.

La partie aval est plus étroite avec une section dans la largeur minimale est de 15 m, tandis qu'à l'amont du gué la largeur est toujours supérieure à 30 m.

Sur la section aval, la berge droite est soutenue par des enrochements sur tout son linéaire, ce qui permet, entre autres, de porter et protéger la piste qui longe la rivière. La berge gauche est un peu plus naturelle avec la présence d'une ligne de Purau (*Hibiscus tiliaceus*) à proximité de la passerelle pour piéton. À la suite de la crue du 1<sup>er</sup> mai, plusieurs tronçons apparaissent fragilisés et certains particulièrement endommagés avec un affaissement important à l'aval immédiat du gué, sur les 2 berges (Figure 24). Plus globalement, les enrochements sont souvent très verticaux, constitués de blocs posés les uns sur les autres sans vraie cohésion, ni transition granulométrique, ou géotextile. Certaines pierres se détachent (Figure 22) déstabilisant tout l'aménagement (Figure 23).

Les travaux d'urgence entrepris depuis les 2 crues du début du mois de mai ont permis de consolider les berges à l'aval du gué. C'est à ce niveau que les eaux ont débordé et ont commencé à envahir les rives. Ce passage qui permet aux véhicules de traverser est solide, on discerne bien des pavages artificiels implantés dans le lit de part et d'autre du gué (Figure 28). Les berges ont été essentiellement « protégées » en poussant les alluvions sur les berges. Ces amas ne sont pas du tout en cohésion avec une granulométrie très variable (Figure 25). Il est certain qu'une nouvelle crue emportera ces éléments très mobiles.

Sur la section à l'amont du gué, les dégâts de la crue n'étaient plus directement visibles lors de notre passage. La piste, qui fut en partie emportée en berge droite, est aujourd'hui reconstruite par les équipes de la Direction de l'Équipement. Le talus n'est pas consolidé, simplement reconstitué en bougeant les matériaux alluvionnaires du centre du lit vers le bord. Il est fort probable que cette

---

<sup>2</sup> Subdivision Territoriale de Tahiti

<sup>3</sup> Arrondissement Infrastructure

« protection » ne soit pas assez solide pour résister à l'énergie d'une nouvelle crue. La piste encore s'affaissée sous la déstabilisation de la berge droite.

Pour compléter le diagnostic, il faut noter que la passerelle qui enjambe l'embouchure a été endommagée par de gros débit végétaux (souches + troncs) qui ont frappé le tablier. L'incertitude sur la stabilité de l'ouvrage a poussé les autorités à en interdire l'accès.

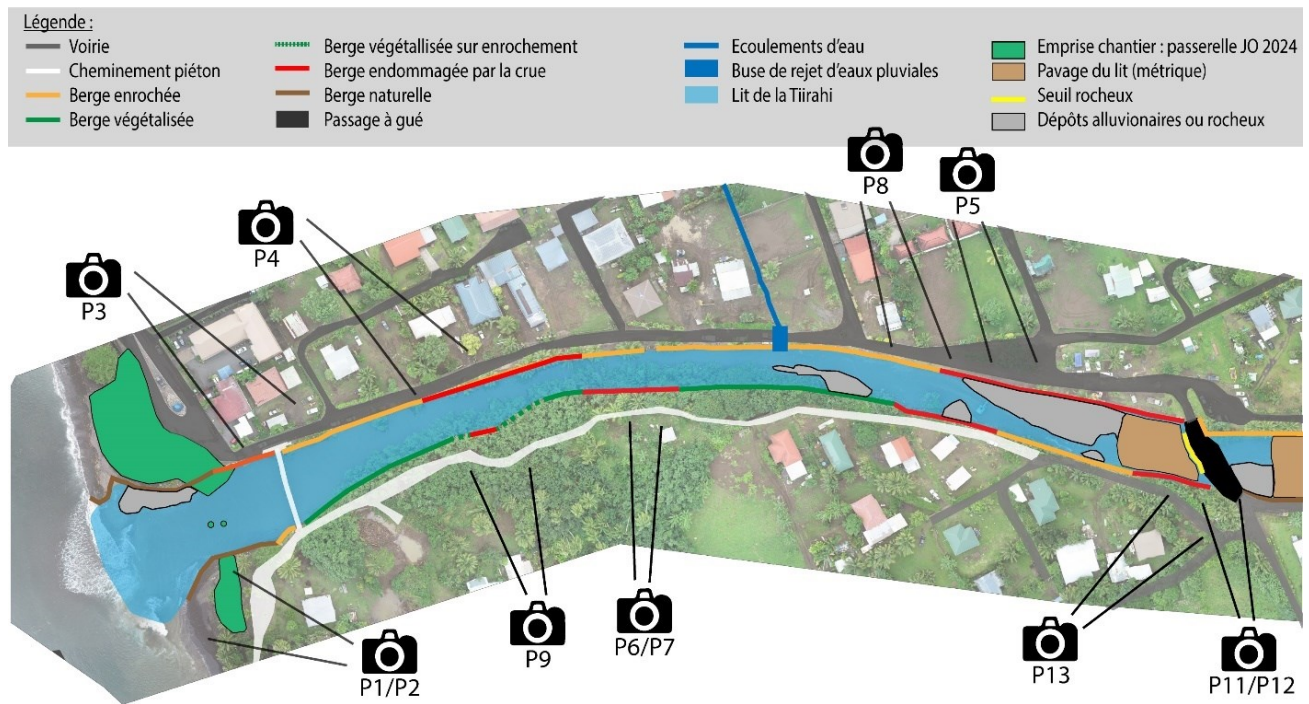


Figure 16 : Etat morphologique des berges de la rivière Fauoro à l'aval du gué.



Figure 17 : Photo P1, embouchure de la rivière.



Figure 18 : Photo P2, passerelle vue depuis l'embouchure.



Figure 19 : Photo P3, berge gauche végétalisée (Purau) vue depuis la berge droite.



Figure 20 : Photo P4, affaissement localisé de la berge gauche au cœur de la section de Purau.



Figure 21 : Photo P5, partie amont de la section avec des Purau. La berge est consolidée avec un enrochement assez ancien et instable.



Figure 22 : Photo P6, l'enrochement rive droite est par endroit instable avec des blocs qui se sont décrochés.



Figure 23 : Photo P7, la berge droite a été ouverte à la fin de la crue pour permettre à l'eau qui avait envahi les habitations de s'évacuer.



Figure 24 : Photo P8, l'enrochement s'est totalement affaissé et la berge gauche a été fortement endommagée sur cette section juste à l'aval du gué.



Figure 25 : Photo P9, amas d'alluvion posé contre la berge droite par les services de l'équipement après la crue du 1er mai.



Figure 26 : Photo P10, buse servant d'exutoire vers la rivière pour un petit ruisseau prenant sa source dans des résurgences sur la rive droite.



Figure 27 : Photo 11, vue vers l'amont depuis le gué. La berge droite est enrochée, la berge gauche est laissée plus libre.



Figure 28 : Photo P12, vue du gué qui est consolidé par un seuil artificiel constitué d'un pavage de gros blocs métrique.

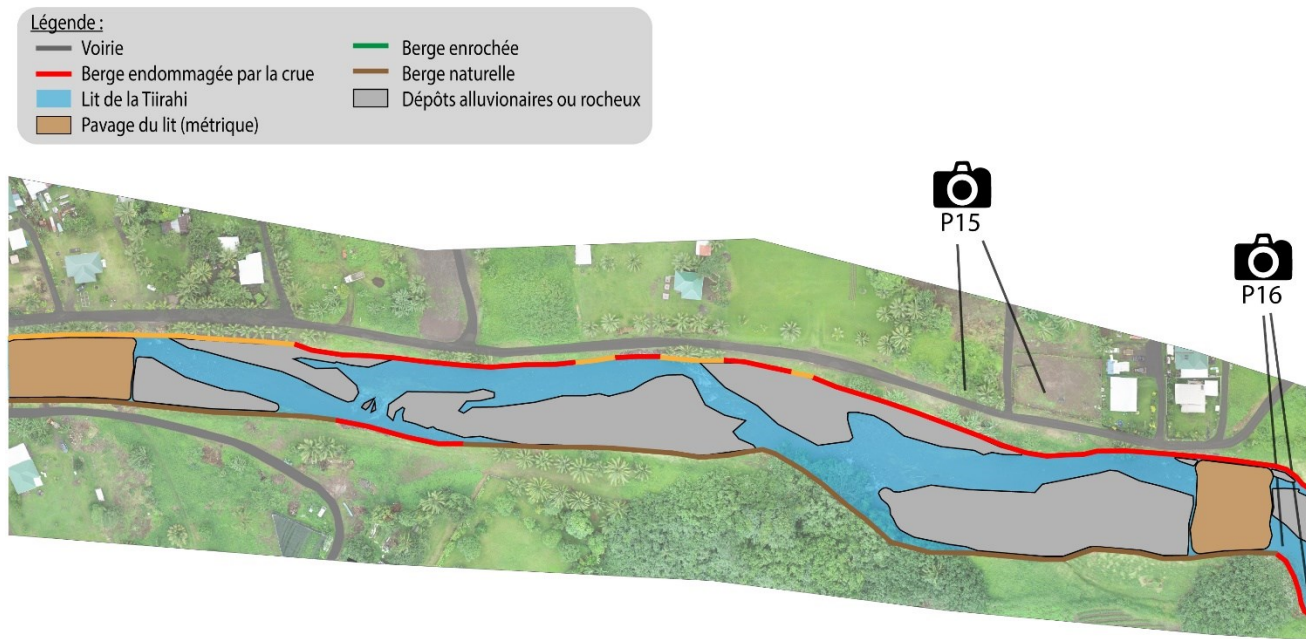


Figure 29 : Etat morphologique des berges à l'amont du gué dans la zone de plaine alluviale.



Figure 30 : Lit de la rivière vers l'amont vue depuis le gué.



Figure 31 : Photo P16 - La berge gauche à l'entrée de la plaine alluviale s'est affaissée sous l'effet de la crue.



Figure 32 : Photo P15 - Servitude de desserte du fond de la zone habitée, reconstituée après la crue du 1er mai 2023.

## 5.2. Emprise de l'inondation

L'un des objectifs des investigations de terrain était de correctement retracer l'emprise de la zone inondée. Nous avons relevé le maximum des hauteurs d'eau atteintes, par rapport au sol, lors de la crue du 1<sup>er</sup> mai. Les informations recueillies sont projetées sur la carte suivante (Figure 33). Les valeurs en vert, sont certaines. Elles sont issues de mesure que nous avons réalisé sur des éléments fixes, essentiellement le long des murs des bâtiments lorsque la trace des plus hautes eaux était encore apparente. Les données en orange sont viables, elles sont également issues de mesure basée sur des niveau d'eau situés par les riverains. Les valeurs colorées en rouge sont plus incertaines, ceux sont des témoignages qu'il n'a pas été possible de corroborer par des mesures.

Nous avons complété notre travail à partir des images de drones qui ont pu être pris juste après l'événement. Elles nous ont servis à délimiter l'étendue de l'inondation.

Puis, à partir d'une méthode de krigeage<sup>4</sup>, ou kriging, nous avons réussi à reconstruire l'emprise de l'inondation avec une projection spatiale des hauteurs d'eau. Ce travail permet de reproduire fidèlement la conséquence du débordement de la rivière le 1<sup>er</sup> mai (Figure 34). Il nous servira également de système de calage pour la modélisation de l'aléa inondation.



Figure 33 : Hauteurs d'eau relevées après la crue du 1er mai.

En vert les mesures sont sûres, en orange les valeurs sont qualifiées de correctes, les données les plus incertaines sont en rouge.

<sup>4</sup> Le krigeage est une technique d'interpolation statistique permettant d'estimer spatialement des valeurs inconnues. Plus les données sont nombreuses et étendues spatialement, plus l'interpolation est fiable.

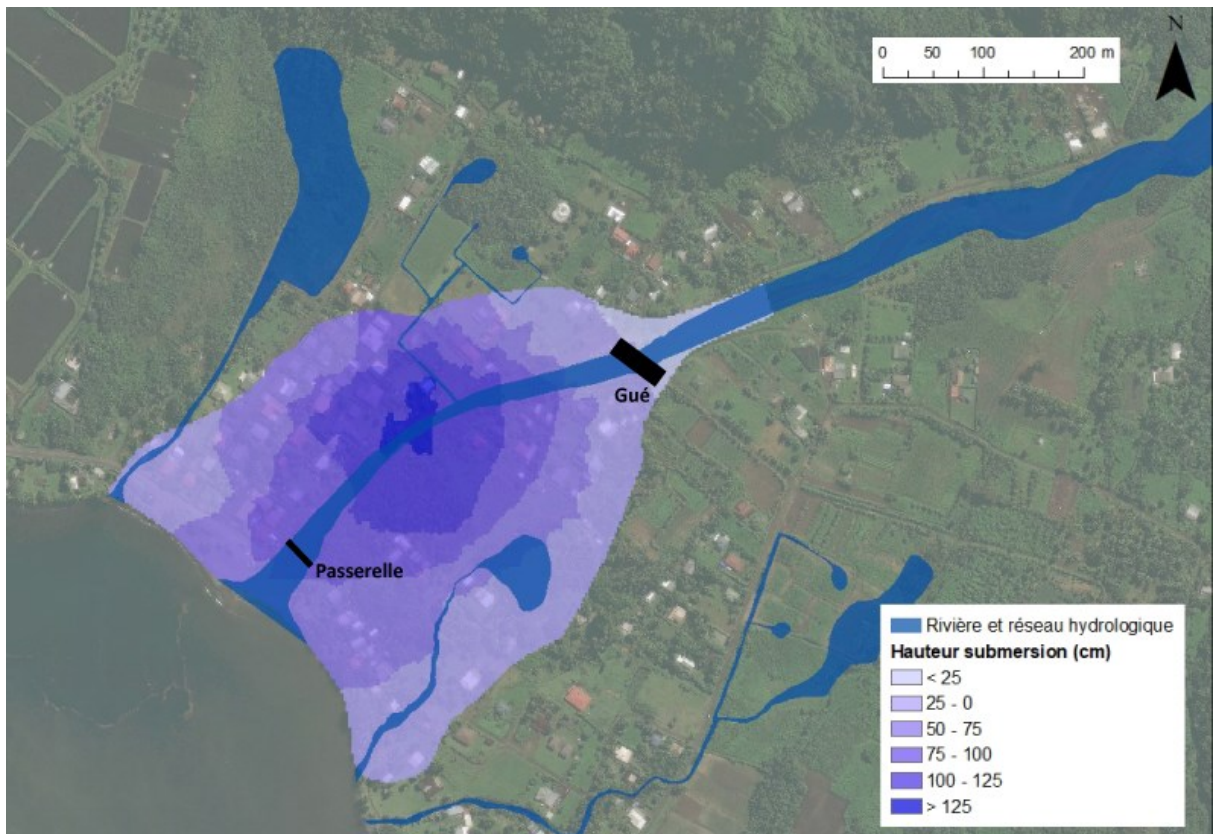


Figure 34 : Etendue de l'inondation du 1er mai reconstituée par la méthode du krigeage à partir des hauteurs de submersion collectées sur le terrain.

Le débordement a débuté à une centaine de mètres à l'amont du gué, mais c'est vraiment au niveau de ce gué, où les berges sont nécessairement ouvertes pour permettre le passage des véhicules, que l'écoulement a quitté le lit.

La zone inondée a couvert une surface de 16 ha où près de 70 habitations sont concernées. L'eau n'est pas rentrée dans les lieux de vie des maisons posées sur pilotis. Sur 2.6 ha (16%) le niveau d'eau est monté à plus d'100 cm par rapport au niveau du sol et c'est sur seulement 2 000 m<sup>2</sup> (1%) que la hauteur d'eau a dépassé les 125 cm.

Les hauteurs d'eau les plus importantes se concentrent au cœur de la zone d'habitation, dans la proximité immédiate du lit de la rivière surtout sur la berge gauche. On remarquera que l'on se trouve au niveau du tronçon le plus étroit du lit. Il est possible qu'un apport d'eau supplémentaire depuis la rivière ait participé à une élévation du niveau observé sur la rive droite.

Les précipitations exceptionnelles ont également fait monter en charge les petits ruisseaux qui draine les résurgences dans la plaine alluviale. Ces écoulements annexes ont augmenté les quantités d'eau et ont accentué l'impression de submersion vécu par les riverains.

### 5.3. Causes probables de l'inondation

L'inondation engendrée par la crue du 1<sup>er</sup> mai 2023 est avant tout le résultat d'un événement météorologique exceptionnel. Une cellule orageuse localisée et très puissante s'est abattue sur la vallée. Les cumuls pluviométriques, sur 30 min, 1h et 2h, ont atteint des valeurs presque jamais vues sur l'île de Tahiti. Il en a résulté une montée de crue très importante dont nous estimons l'occurrence à 50 années.

On peut s'interroger sur l'origine d'un tel phénomène. Il s'agit peut-être uniquement d'un phénomène très rare, d'une rareté statistique. La seconde hypothèse serait de le lier aux modifications climatiques liées au réchauffement de la planète. D'en d'autres région du monde, on observe de plus en plus d'évènements de ce type, localisé, et très puissant avec une grande charge énergétique. Pour le moment, et sans plus de recul ces projections ne sont que des spéculations. Les chercheurs, les ingénieurs et les décideurs doivent cependant rester attentifs à cette question.

Le 1<sup>er</sup> mai s'inscrit dans un contexte croisé avec l'apparition d'une très forte houle engendrant de forts courant et une élévation du niveau de la mer. Cet évènement naturel, et indépendant du développement de la cellule orageuse, n'a pas facilité l'évacuation des eaux vers le lagon. Mais son impact n'a été que secondaire dans le phénomène d'inondation.

Au-delà de l'évènement météorologique et de la forte houle, les conditions de la submersion ont été aussi la conséquence de situations localisées qui sont en grande partie liées aux actions anthropiques.

L'espace laissé à la rivière s'est réduit au cours des dernières décennies, et l'occupation humaine sur les rives s'est densifiée avec des habitations de plus en plus proche des berges. La zone de plaine qui est étudié est un delta alluvionnaire formé au cours du temps par les dépôts sédimentaires transportés par la rivière dont le tracé du lit mineur évolue dans son histoire. Aujourd'hui l'embouchure est canalisée, mais en cas de très fortes crues, comme celles qui ont été à l'heure au début du mois de mai, Il n'est pas étonnant de voir l'eau se disperser dans un espace élargi.

Toutefois, nous avons identifiés des dysfonctionnements localisés qui ont contribué à favoriser le débordement en augmentant son impact :

- manque d'espace du lit de la rivière sur le tronçon à l'aval du gué ;
- les berges présentent des fragilités ponctuels parce que les enrochements ne sont pas de bonne qualité (inclinaison trop importante, blocs posés les uns sur les autres sans assurer de cohésion, pied de berge mal stabilisé, ...) ;
- la piste de déserte du quartier a participé à la réduction de l'espace d'écoulement ;
- le gué a été un point de débordement identifié par les riverains. L'orientation de ses accès, dans le sens du courant, et leur inclinaison relativement faible, ont offert des voies d'écoulement aux flux de la rivière (Figure 35). D'autre part les berges, à l'aval immédiat de cet ouvrage, se sont en partie affaissées sous l'effet énergétique du courant. C'est ici, un point de plus grande fragilité de la rivière ;
- plusieurs habitations sont trop proches des berges de la rivière ;
- les murets ou les murs en parpaing, qui délimitent les propriétés, contrarient la transparence hydraulique, concentre les écoulements dans les servitudes et sur les terrains plus ouverts ;

- les palissades du chantier de la nouvelle passerelle ont empêché l'évacuation de l'eau vers le lagon. C'est le seul impact du chantier ;
- les ruisseaux, alimentés par des résurgences à travers la plaine de la rive gauche, sont montés en charge et ont eu du mal à s'évacuer. Cette eau s'est rajoutée au flux venant du débordement de la rivière.

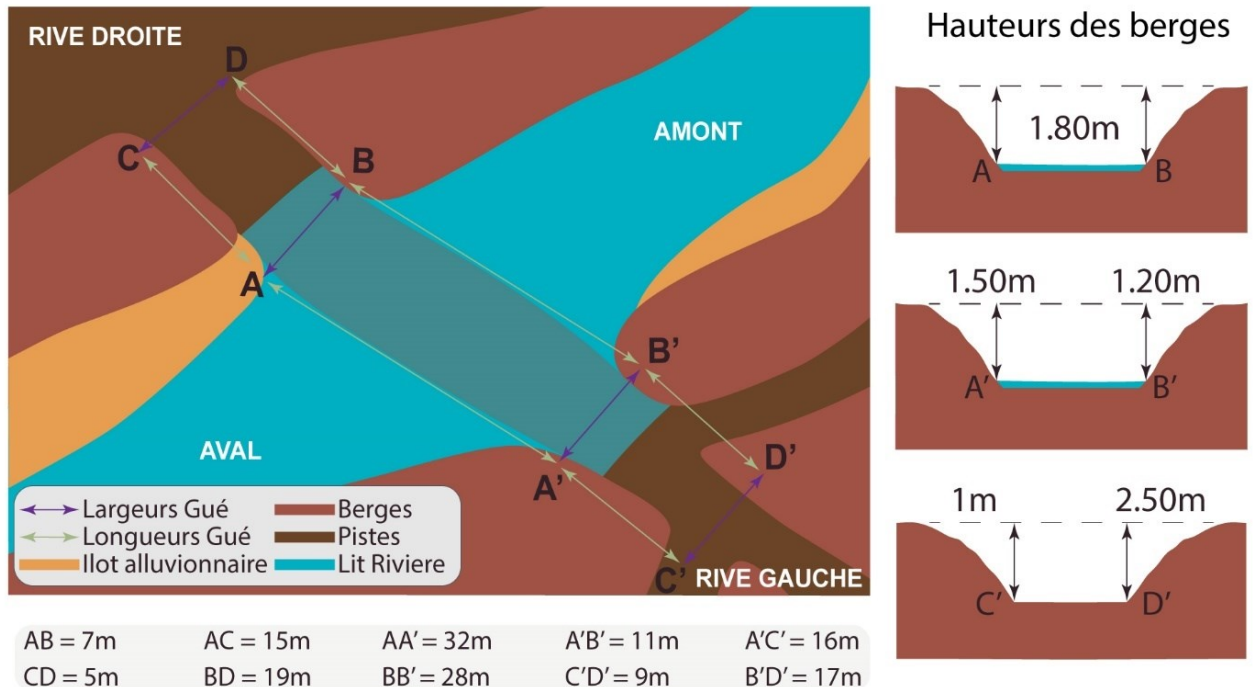


Figure 35 : Schéma géométrique du gué.

D'autres hypothèses ont été évaluées mais invalidés par avoir été étudiées et confrontées à la réalité du terrain et des indices collectés :

- beaucoup d'éléments végétaux et même des parties d'arbres ont été transportés par la rivière pendant la crue. Et même si la passerelle existante a été endommagée par ces projectiles, aucun embâcle ne s'est formé et n'a accentué le débordement ;
- des glissements de terrain récents, peut-être engendrés par l'orage du 1<sup>er</sup> mai, sont visibles dans le fond de la vallée (Figure 36). Nous avons été explorer ces zones. Même si des stocks alluvionnaires sont très visibles en remontant le lit de la rivière (Figure 37), nous n'avons observé aucun signe d'embâcle naturel qui aurait cédé brutalement ;
- l'aggradation du lit de la rivière qui aurait pu être le résultat d'un manque de curage n'est pas prouvé. L'analyse des relevés topographiques précis depuis 2020 n'a pas révélé de rehaussement.

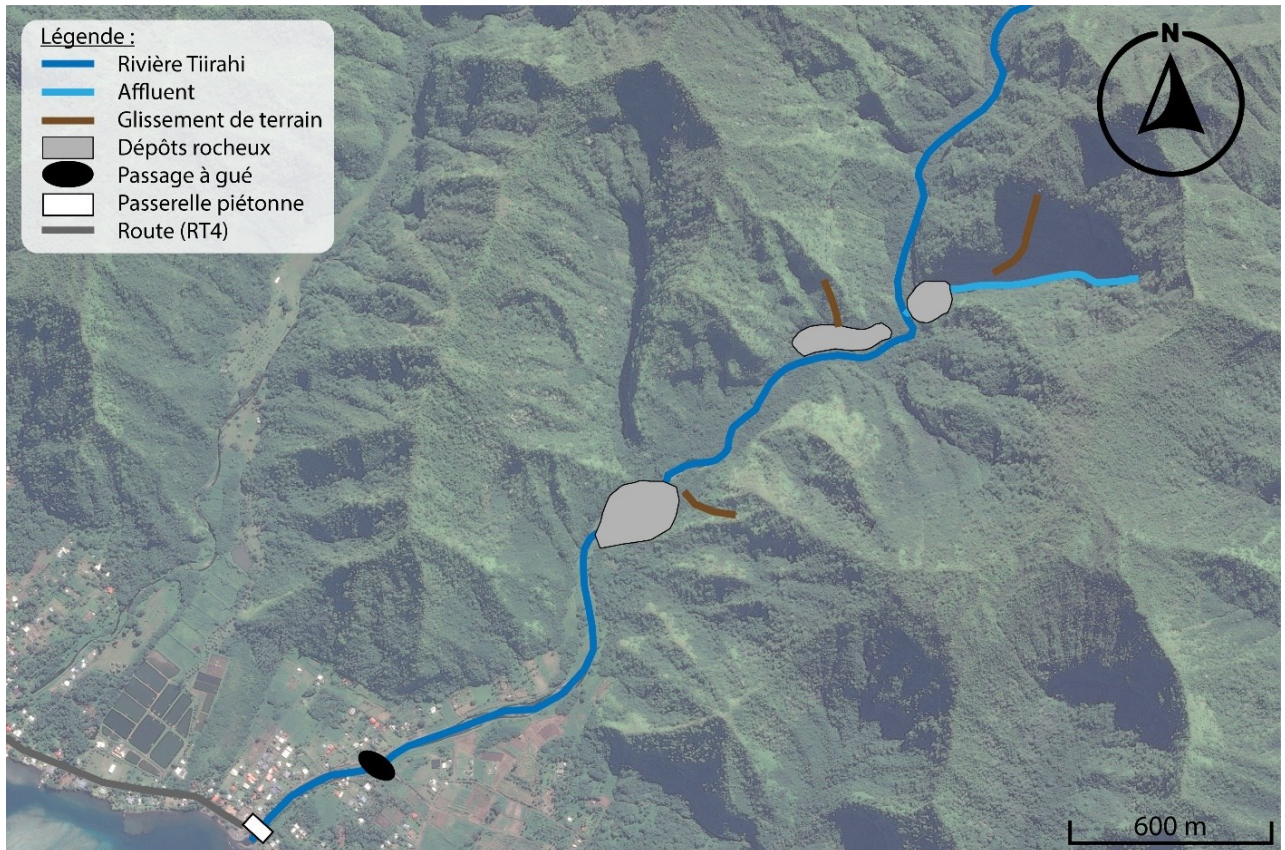


Figure 36 : Observation des glissements de terrain et des atterrissements alluvionnaires dans la haute vallée.



Figure 37 : Atterrissement alluvionnaire observé dans la haute vallée.

## 6. Analyse de la modélisation de 2020 (EGIS)

La dernière modélisation hydraulique de la rivière date de 2020, elle a été réalisée par le groupe EGIS Eau. Nous avons tout d'abord comparé les relevés topographiques de l'époque, réalisés par le cabinet de géomètre WILD, avec les données issues d'un MNT produit à partir d'orthophotos prises par un drone dans la semaine suivant la crue du 1<sup>er</sup> mai. Ce nouveau MNT offre une précision de 10 cm. La seule difficulté avec ces nouvelles données est la non différenciation du couvert végétal, rendant inexploitable l'information recueillie sur 150 m un peu à l'amont de l'embouchure dans la zone de Purau en rive gauche.

Les profils en travers exportés en 2023 ont été exactement calés sur les 19 profils relevés en 2020. Ce travail nous a permis de reconstituer l'actuel profil en long du lit, de comparer les 2 tracés, puis d'observer plus précisément quelques-uns des profils en travers.

Il apparait que le lit de la rivière a très peu varié en 3 ans, la pente est stable et on ne distingue aucun atterrissement significatif, ni même d'incision (Figure 38). Les profils en travers nous montrent même que la forme du lit s'est très peu modifiée (Figure 39). Nous en déduisons que **la morphologie du lit n'est pas une des raisons qui a favorisé le débordement de la rivière lors de la crue du 1<sup>er</sup> mai. Les curages dans la rivière n'ont pas d'intérêt hydrologique, ils ne réduisent pas le risque.** La rivière est suffisamment mobile pour équilibrer sa morphologie en transportant les matières alluvionnaires qui sont très présentes dans le fond de la vallée.

Cet avis pourrait se nuancer si un grand banc de sable venait à se constituer juste à l'embouchure.

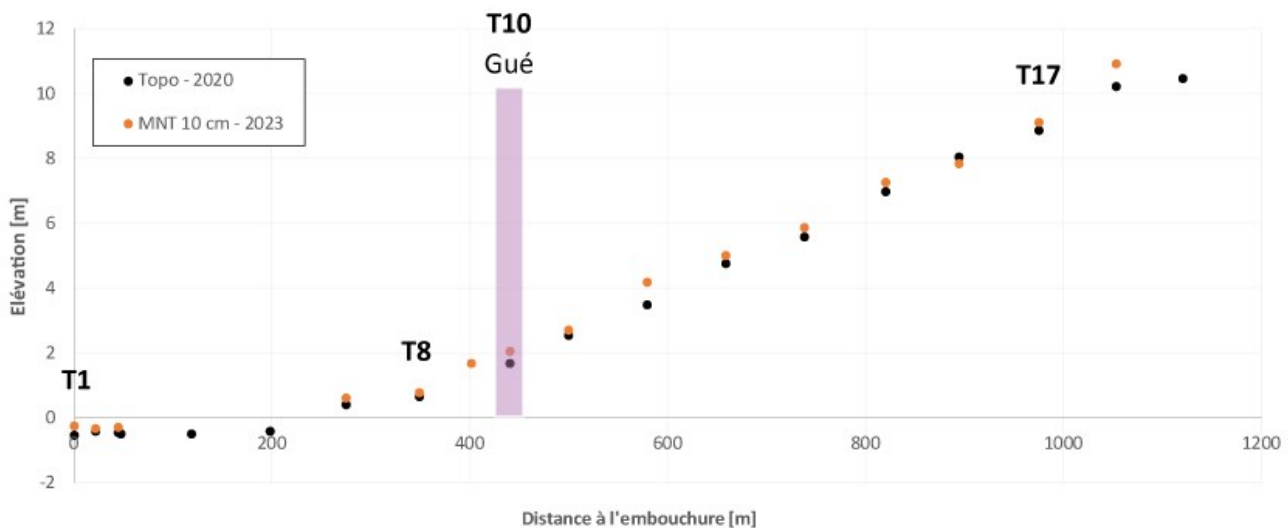


Figure 38 : Comparaison des profils en long de la rivière Fauoro entre 2020 et 2023.

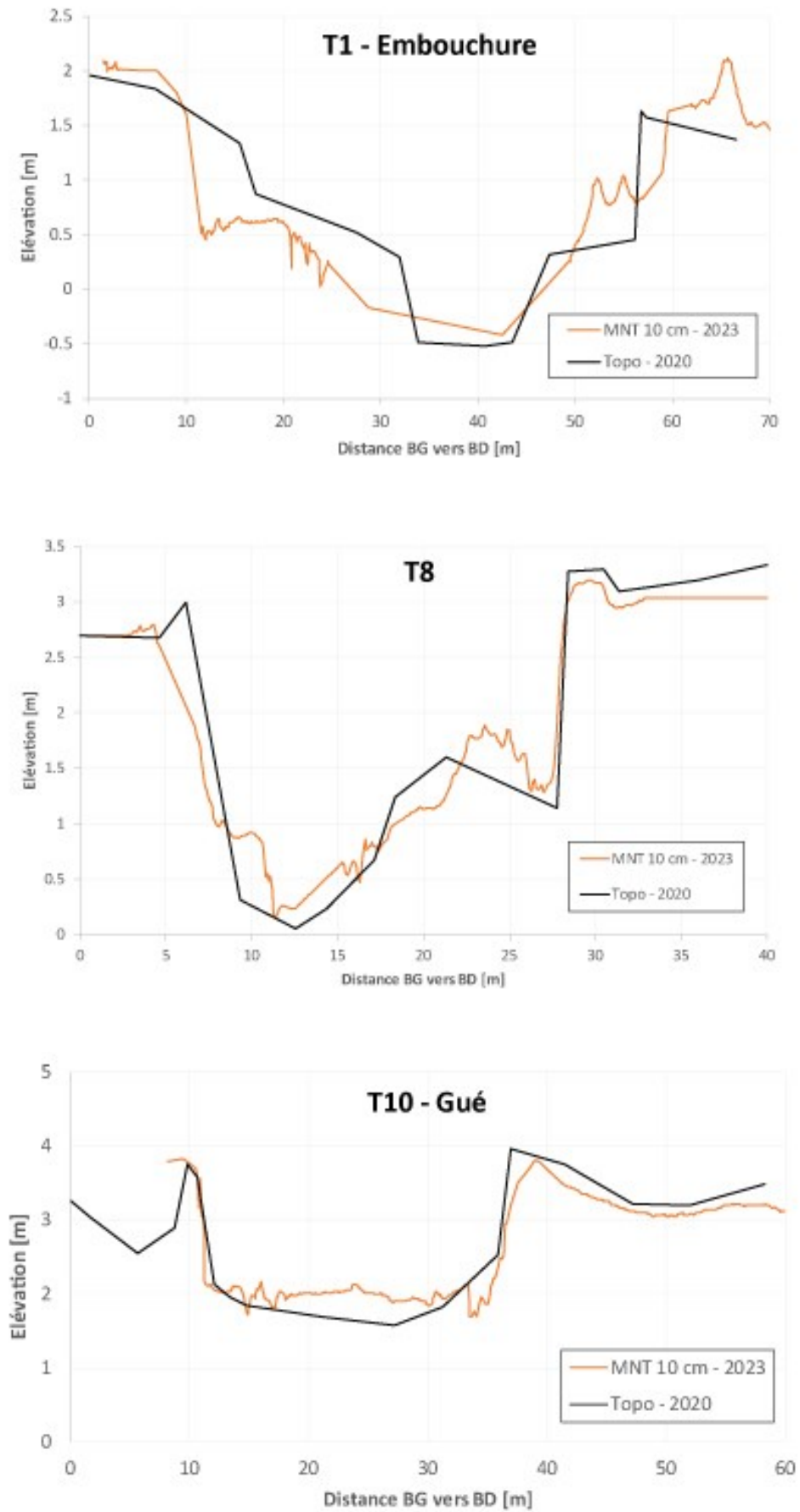


Figure 39 : 3 profils en travers comparés entre 2020 et 2023.  
Les profils débutent en rive gauche, pour aller vers la rive droite.

Si l'on s'intéresse à présent au résultat de la modélisation proposée par EGIS en 2020, on observe que l'emprise d'un débordement projeté avec une crue centennale (Figure 40) est presque identique à l'emprise de l'inondation qui a été observée en le 1<sup>er</sup> mai 2023 (Figure 41). Cette impression très largement confirmer lorsque l'on projette le contour de l'espace inondé en 2023 sur la simulation de 2020 ( $Q_{100}$ ) (Figure 42). Donc sur ce point-là, les travaux menés en 2020 ont généré une réponse de qualité. Remarquons également, que le point de débordement de la rivière se trouve bien au niveau du gué qui est le point de fragilité essentiel du chenal d'écoulement.



Figure 40 : Résultat de la simulation d'une crue centennale à partir de la modélisation de 2020.

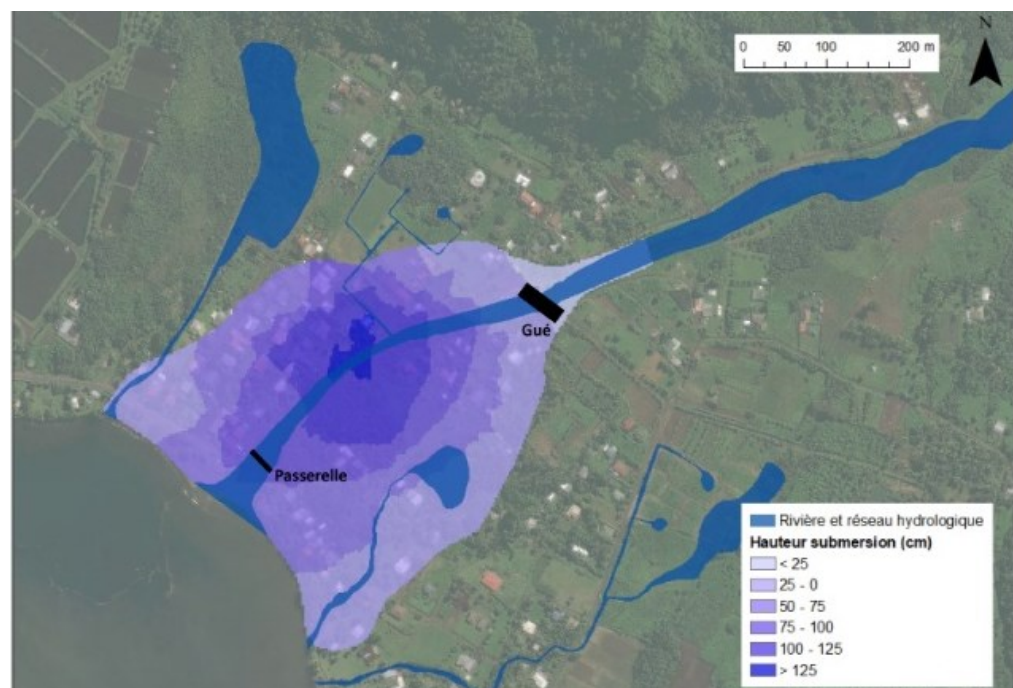


Figure 41 : Emprise de la submersion lors de la crue du 1er mai 2023.

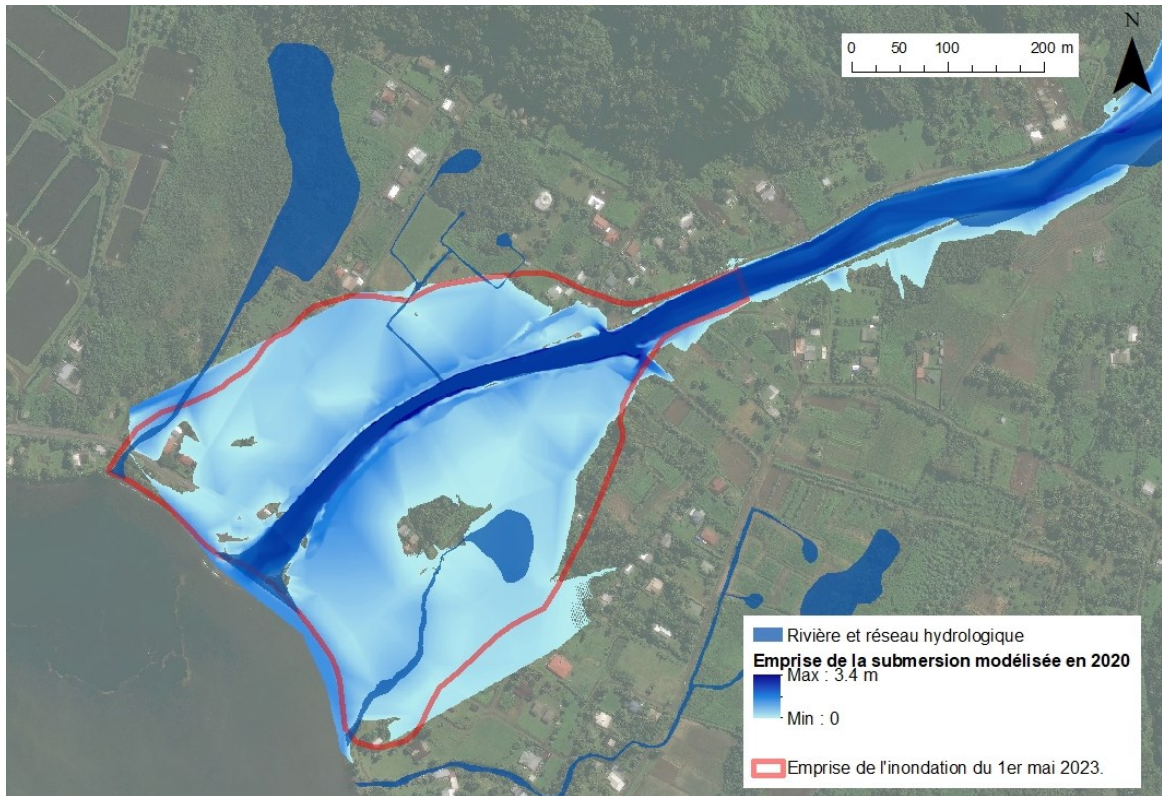


Figure 42 : Projection de la simulation de 2020 ( $Q_{100}$ ) et la limite de submersion observée en 2023.

La différence notable est liée aux hauteurs d'eau simulées qui sont significativement inférieures aux relevés réalisés après la crue du 1<sup>er</sup> mai. L'explication la plus plausible semble bien être liée à l'estimation des débits de la rivière qui nous apparaissent sous-estimée au regard des résultats obtenus à travers l'analyse hydrologique (cf. Section 4).

Les nouvelles données recueillies après la crue doivent permettre d'ajuster la simulation avec des valeurs de référence. En 2020, le modélisateur ne disposait pas de valeurs de références suite à une crue pour caler le modèle.

## 7. Parcelles du programme de *Fare* OPH

### 7.1. Avis général

Avant l'événement du 1<sup>er</sup> mai, l'OPH<sup>5</sup> avait engagé un programme de réhabilitation des habitats en proposant aux propriétaires un habitation en préfabriqué répondant aux normes actuelles (*Fare* OPH), en remplacement de leur maison, généralement de plain-pied, posée sur une dalle en béton.

L'implantation de ces *Fare* doit répondre à certaines normes relatives à la structure du sol et aux risques face aux aléa. La crue récente de la Fauoro pose donc la question de la stabilité du sol, en cas de crue, et surtout de la hauteur d'eau pouvant être atteinte en cas de submersion.

Nous avons alors mené un inventaire plus systématique sur les parcelles concernées par ce programme pour en évaluer le risque face à l'aléa inondation et la possibilité d'implantation des *Fare* OPH.

Il est important de noter que les constructions proposées par l'OPH sont posées sur des structures en pilotis avec un vide sanitaire de 150 cm compatible avec une transparence hydraulique en cas de submersion du terrain.

La Figure 43 permet de situer les différentes parcelles concernées par le programme de l'OPH. La plupart se trouvent en rive droite, seule la C154 est en rive gauche au niveau de l'embouchure.



Figure 43 : Parcelles retenues pour des *Fare* OPH.

<sup>5</sup> Office Polynésien de l'Habitat

Sur le cliché réalisé par drone (Figure 44), quelque heure après le pic de la crue du 1<sup>er</sup> mai, on s'aperçoit que l'enveloppe de la lame d'eau a submergé toutes les parcelles concernées. Le Tableau 6 précise leurs caractéristiques et la hauteur d'eau atteinte au maximum lors de la crue. Cette information a été collectée sur chaque parcelle à partir du témoignage des habitants puis vérifiée à travers les signes apparents sur les murs. La parcelle la plus impactée, la CH22, avec des hauteurs de submersion supérieures à 120 cm, est aussi la plus proche de la zone de débordement à l'amont. Elle est également située très proche de la berge droite.



Figure 44 : Emplacement des parcelles concernées par le programme OPH.  
(vue de drone le 1<sup>er</sup> mai 2023, image collectée sur facebook)

Tableau 6 : Description et hauteurs d'eau relevées des différentes parcelles du programme de l'OPH.

Parcelles	Num OPH	Rive	Superficie en m <sup>2</sup>	Hauteur crue en cm
CH14	2	RD	1 736	85
CH18	3	RD	1 351	74
CH21	4	RD	1 405	90
CH22	5_1	RD	1 092	<b>177</b>
	5_2	RD	1 435	<b>130</b>
	5_3	RD	733	<b>150</b>
CH38	6	RD	880	69
CH42	7	RD	972	45
CH115	8	RD	526	80
CH114	9	RD	519	80
C154	10_1	RG	1 323	85
	10_2	RG	1 149	61
	10_3	RG	1 513	32

## 7.2. Description sur les parcelles retenues

La parcelle CI54, située sur la rive gauche, est occupée par trois maisons. Elles sont toutes de plain-pied, posées sur des dalles de béton. Elle a été fortement impactée par la crue, l'eau est montée entre 32 et 85 cm en fonction des maisons (Figure 45 et Figure 46).



Figure 45 : Parcelle CI54 lors de l'inondation  
(photo de la propriétaire)



Figure 46 : Parcelle CI54 - 7 juin.

En rive droite, les habitations sont assez semblables avec parfois une dalle en béton un peu plus épaisse, jusqu'à 50 cm au-dessus du niveau du sol (Figure 47). La parcelle la plus impactée a été la CH22 avec des hauteurs d'eau dépassant les 150 cm (Figure 48).



Figure 47 : Parcelle CH18, le 1<sup>er</sup> mai  
après l'onde de crue.



Figure 48 : Maison située au plus proche de la rive droite (CH22).

### 7.3. Observations des constructions sur pilotis

En investiguant dans la zone habitée, il est apparu que les constructions sur pilotis n'ont pas vu l'eau rentrer dans les habitations. Les terrains ont bien subi la lame d'eau, mais elle n'est pas montée suffisamment. Les planchers se trouvent à 120 cm au-dessus du niveau du sol.

D'autre part, le diagnostic visuel n'a laissé apparait aucune fragilisation des fondations des Fare sur pilotis.

Il apparait donc que les constructions sur pilotis sont réellement efficaces pour protéger les habitations et leurs habitants. D'autre part la transparence hydraulique, que cette situation offre, laisse circuler l'eau et évite une concentration trop importante, et donc une élévation mécanique, de l'eau sur des zones avoisinantes.



Figure 49 : Relevé de la hauteur atteinte au maximum de la crue



Figure 50 : Fare OPH en Rive droite, surélevé à 120 cm au-dessus du sol.

Il faut aussi noter que les infrastructures enterrées comme les systèmes d'épurations ont lourdement été touchés. Le sol s'est totalement saturé et les fosses septiques ont très souvent bougées avec une remontée par flottaison. Ces mouvements ont engendré des fuites, des déplacements de raccords et des ruptures de canalisations. Les habitants ont souvent témoigné du désagrément des matières sales expulsées des systèmes d'assainissement, puis voguant dans le courant de l'inondation.



Figure 51 : Système épuratoire submergé et déplacé lors de la crue du 1er mai.

## 8. Modélisation hydraulique

### 8.1. Type de modèle utilisé

La partie de la rivière que nous cherchons à modéliser traverse la plaine alluviale sur 1 100 m avant son embouchure. Sur cette section le lit est assez contraint entre des berges aménagées, plus ou moins stabilisées. Son parcours est assez rectiligne, il n'y a plus vraiment de méandre à travers un lit majeur. L'écoulement peut être considéré comme unidirectionnel, de l'amont vers l'aval, sans interférence transversale.

La modélisation hydraulique a été réalisée en s'appuyant sur le logiciel HEC-RAS<sup>6</sup>. Nous avons choisi d'appliquer une modélisation 2D qui permettait de s'adapter aux données disponibles tout en générant une simulation réaliste et surtout calibrée par rapport aux données collectées sur le terrain après la crue du 1<sup>er</sup> mai 2023.

Nous avons reconstruit un modèle numérique de terrain à partir de 3 sources de données (Figure 52) :

- MNT de Tahiti datant de 2013 dont la précision est supérieure à 5 m ;
- Données photogrammétriques obtenues à partir des clichés pris par une drone, quelques jours après la crue du 1<sup>er</sup> mai. La topographie est très précise, quelques centimètres, par contre le fond la végétation et le sol sous l'eau ne sont pas nettoyés et couvrent le sol réel. Cette couche ne peut être utilisée que partiellement ;
- Relevés topographiques par profils transversaux dans le lit de la rivière, réalisés en 2019 par un bureau de géomètre-topographe, dans le cadre de la mise à jour de la modélisation hydraulique de la rivière (EGIS, 2020).

Avant de générer le modèle numérique du lit de la rivière, les profils de 2019 ont été réajustés à partir des valeurs extraites de la photogrammétrie, la géométrie du lit a été un peu modifiée par la crue du 1<sup>er</sup> mai 2023, surtout le tronçon amont de la zone de plaine.

Le résultat n'est pas parfait, nécessairement moins bon qu'un relevé LIDAR, mais il a permis de s'approcher au mieux de la réalité du terrain avec les données existantes. Il est surtout important d'apprécier les limites du modèle de terrain utilisé pour bien interpréter les résultats de la simulation hydraulique :

- Le MNT de 2013 génère des tuiles sur la plaine avec une précision assez mauvaise pour une zone très plane ( $\geq 1$  m) ;
- La frontière entre les données de 2023 et de 2013 génère un saut topographique non naturel. Il y a également un artefact sur la couche 2023, en rive gauche à proximité de l'embouchure.

---

<sup>6</sup> Hydrologic Engineering Centers River Analysis System

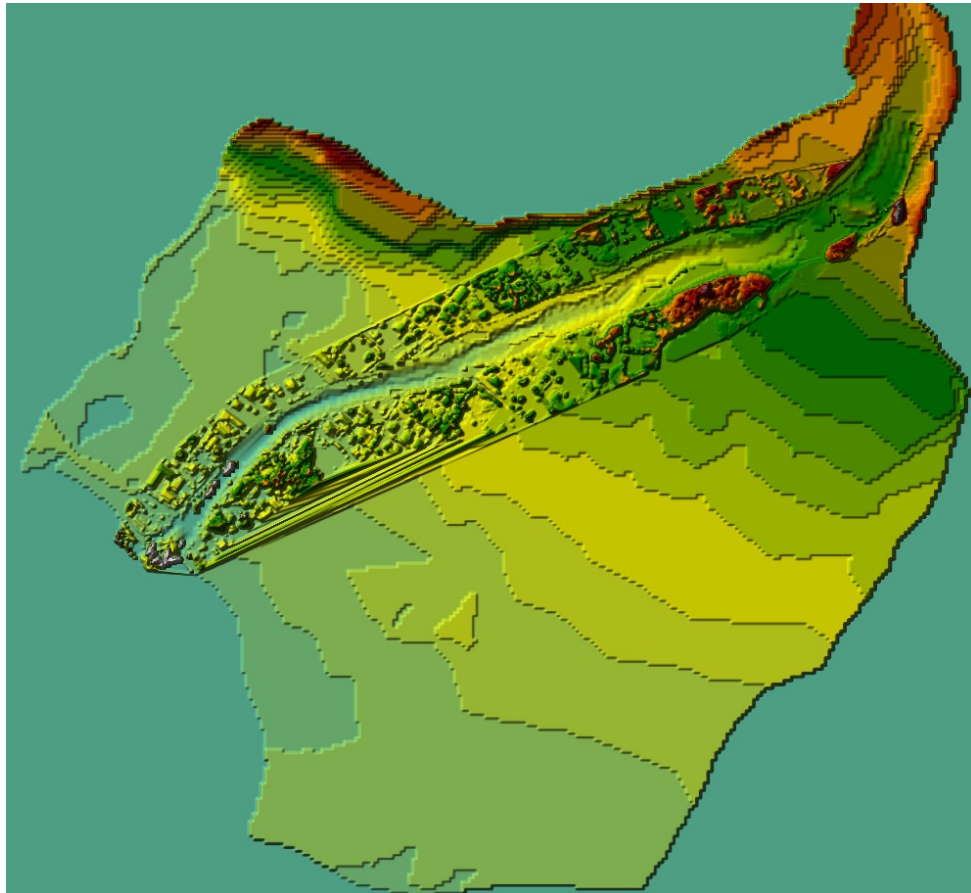


Figure 52 : Modèle Numérique de Terrain de la plaine de la Tiirahi reconstitué à par tir de 3 sources de données.

## 8.2. Etendu et maillage du modèle

Le terrain est discrétisé en 12 294 cellules de  $10 \times 10 \text{ m}^2$  sur la plaine et une précision beaucoup plus grande sur les berges de la rivière où se produisent les débordements. La précision atteint  $2 \times 2 \text{ m}^2$ .

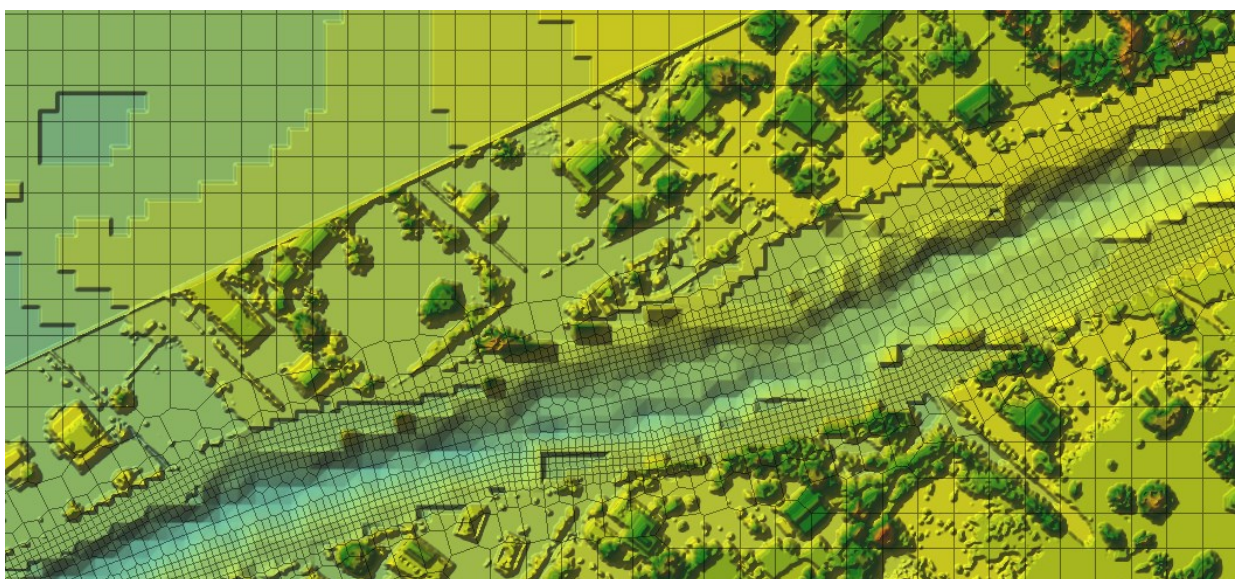


Figure 53 : Discrétisation du terrain en cellules polygonales sur le tronçon de rivière autour du gué à 460 m de l'embouchure.

### 8.3. Rugosité du terrain

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

Dans le paramétrage initial, c'est la nature des surfaces qui guident la valeur choisie pour le coefficient de Manning. La répartition géographique des différents coefficients de rugosité en fonction du type d'occupation du sol est présentée sur la carte de la Figure 54.

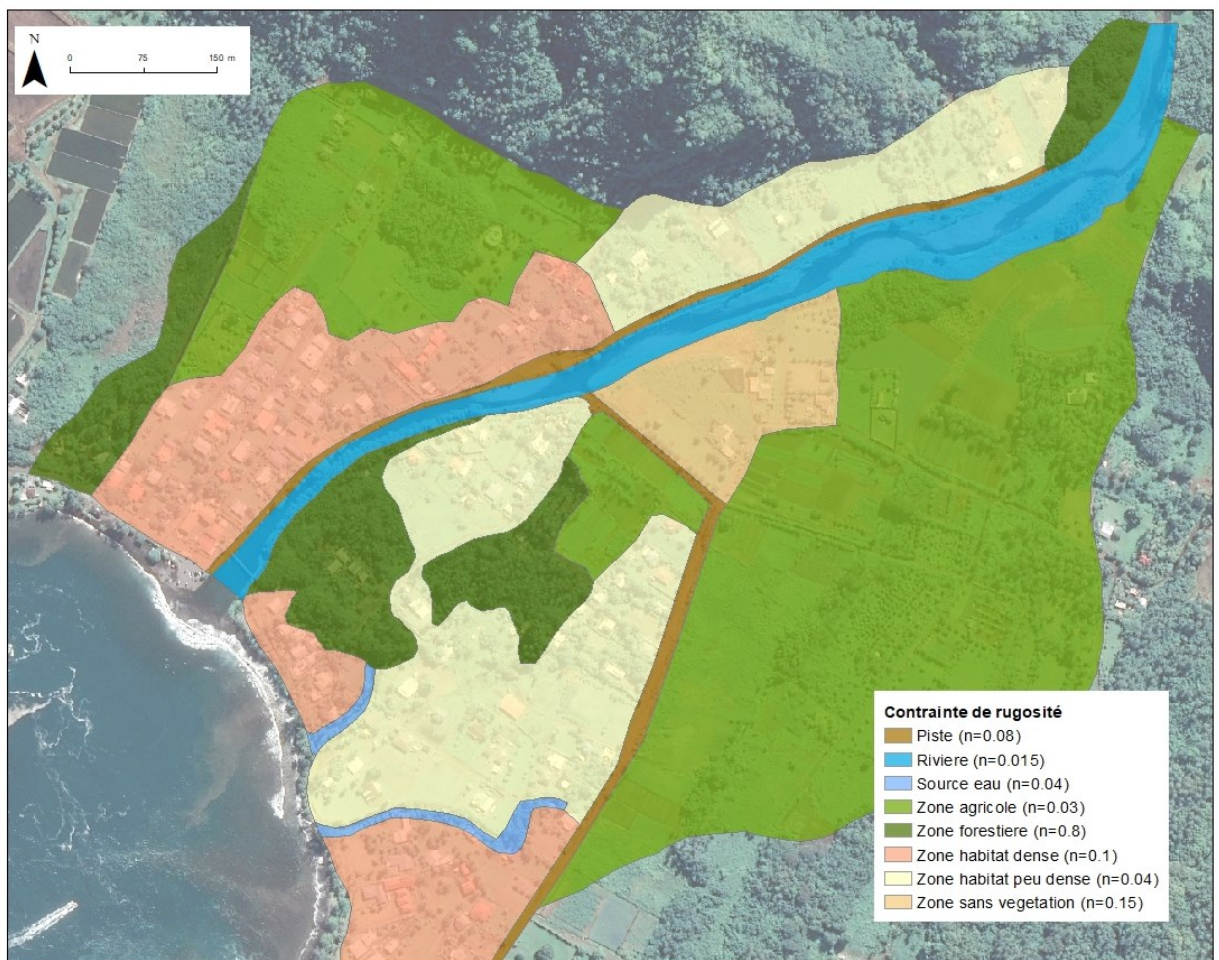


Figure 54 : Découpe de la zone d'étude en fonction de la couverture au sol, liée à la contrainte de rugosité (coefficient de Manning ( $n$ )).

## 9. Résultats de la modélisation

### 9.1. Reproduction de la crue du 1<sup>er</sup> mai 2023

La modélisation réalisée sur la crue du 1<sup>er</sup> mai 2023 est assez réaliste si l'on se réfère aux données collectées lors de cet évènement (Figure 55). L'étendue de l'inondation se trouve à l'aval du gué, à 450 m à l'amont de l'embouchure. Il y a deux zones qui nous apparaissent comme des erreurs de la modélisation liée à un MNT pas assez précis :

- En rive droite, le MNT de 2013 ne génère aucune pente et le flux de l'inondation s'étend, sans doute, un trop loin ;
- En rive gauche, l'artefact engendré par la photogrammétrie, à partir des clichés de drone de mai 2023, forme une digue virtuelle qui fausse la diffusion de l'onde de submersion.



Figure 55 : Hauteurs d'eau maximum projetées par le modèle après simulation de la crue du 1er mai 2023.

Le calage du modèle a été effectué à partir des hauteurs d'eau maximum mesurées sur les murs des habitations (cf. Section 5.2). Les résultats obtenus sont plutôt de bonne qualité avec seulement quelques centimètres d'écart (Figure 56). Les projections du modèle sont meilleures à proximité des berges et surtout sur les points où les mesures sont considérées comme sûres (pastilles vertes).

Mais c'est aussi la dynamique de l'écoulement qui est obtenue par cette nouvelle modélisation qui permet de juger de la qualité de la projection numérique. La rivière déborde d'abord en rive droite, comme l'indique le témoignage des riverains, à 06:45 du matin (Figure 57). Le point de débordement se trouve à 170 m à l'aval du gué. Ce radier engendre un débordement à partir de 07:30 (Figure 58). Pour rappel, le débit maximum de la rivière est atteint à 07:45.

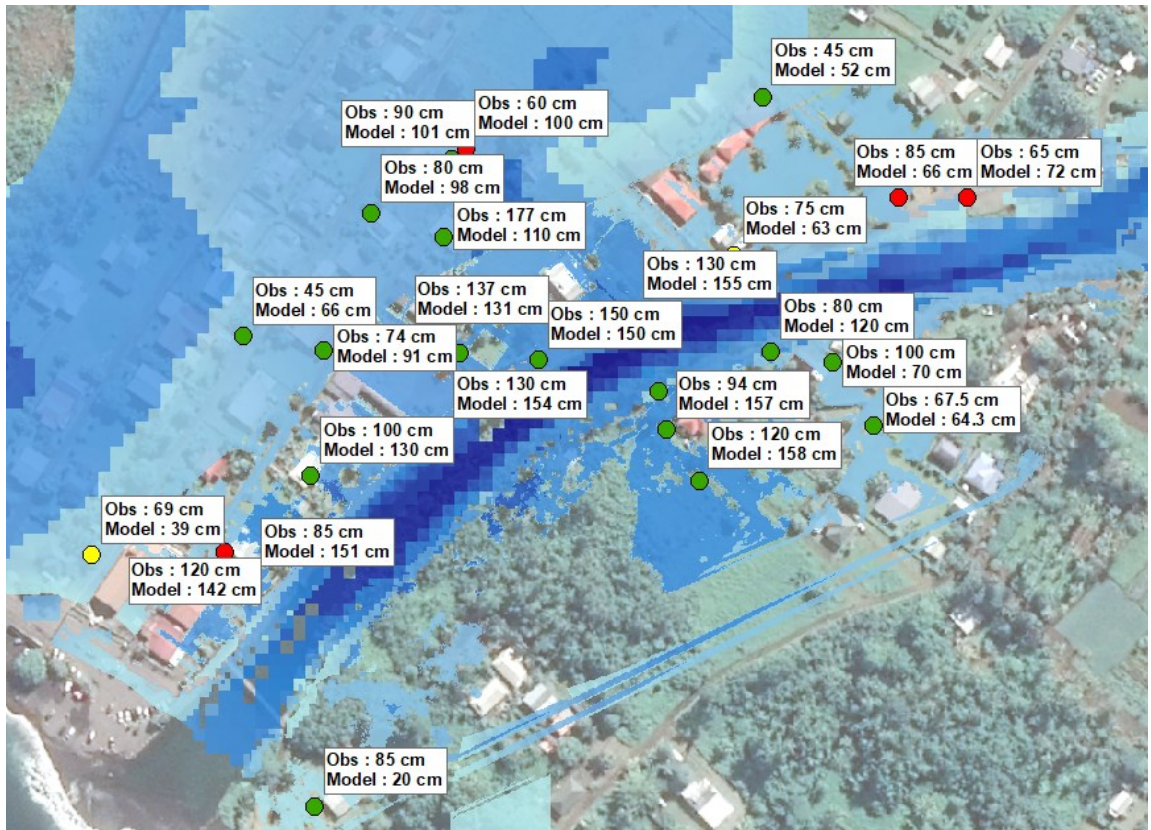


Figure 56 : Comparaison entre les hauteurs d'eau maximum relevées sur le terrain et la simulation du modèle.



Figure 57 : Premier débordement à rive gauche à 06:45 le 1er mai 2023.

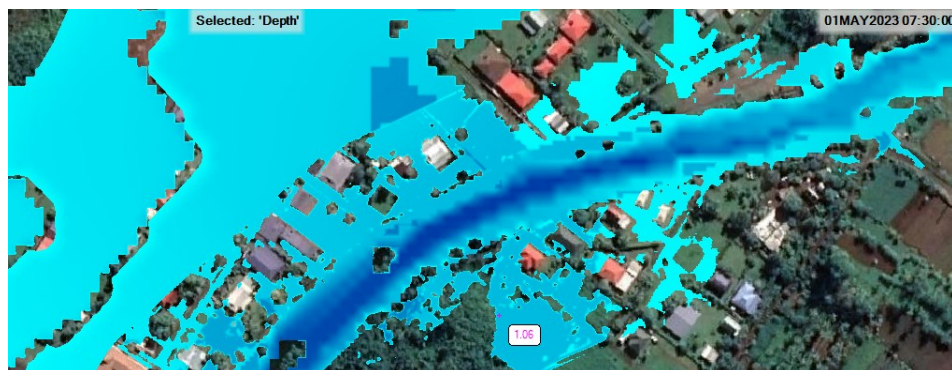


Figure 58 : L'inondation s'étend avec le gué qui se trouve submergé, 07:30 du matin.

La ligne d'eau maximum lors de cette crue du 1<sup>er</sup> mai a été projetée sur le profil en long de la rivière. On s'aperçoit tout de suite que les débordements ne se déclenche qu'à l'aval du gué. La pente longitudinale diminue, l'écoulement est moins rapide, mais c'est aussi sur cette dernière section du cours d'eau que le lit a été le plus réduit en largeur. Les images aériennes historiques le montrent très bien (cf. Section 2).

L'embouchure de la vallée de la Tiirahi était un delta qui pouvait se remplir d'eau à l'occasion de grandes crues. Le lit de la rivière a été canalisé pour disposer de plus de terrains d'abord agricoles qui se sont transformé en terrain de construction. Aujourd'hui, lorsque la nature se manifeste dans toute son énergie, l'eau n'a plus d'espace pour s'éprendre, l'aléa augmente donc. Et comme de plus en plus de personnes vivent sur les rives de la rivière, l'enjeux augmente. **Le risque est logiquement accru.**

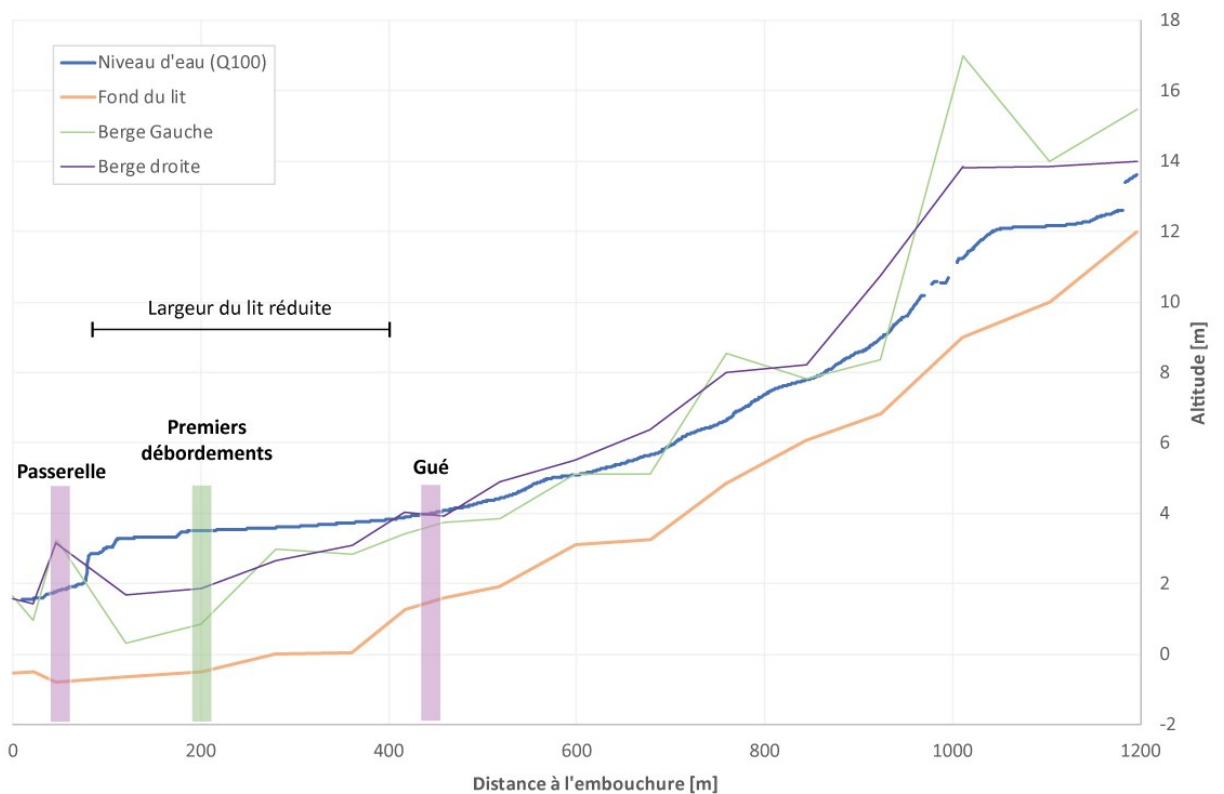


Figure 59 : Profil en long de la rivière avec le niveau d'eau simulé lors de la crue du 1<sup>er</sup> mai 2023 (263 m<sup>3</sup>/s).

## 9.2. Redéfinition de la crue centennale

En considérant que la modélisation pour la crue de 1<sup>er</sup> mai 2023 reproduit assez fidèlement l'évènement qui a été observé, il a été possible de simuler une crue centennale en s'appuyant sur l'onde de crue estimée pour un tel évènement (cf. Section 4.2).

Les résultats, hauteurs d'eau et vitesses de l'eau sont présentés sur les Figure 60 et Figure 61 . Projection de l'inondation n'est pas très différente de l'étendu de la submersion observée le 1<sup>er</sup> mai. Il y a évidemment un peu plus d'eau avec des hauteurs qui augmentent et une énergie, vitesse de l'eau, qui se renforce. On notera que les berges à l'amont du gué se font submergées et que la piste d'accès au fond de la plaine sera en partie détruite. Ce qui arrive de tout façon, même avec des crues plus fréquentes.

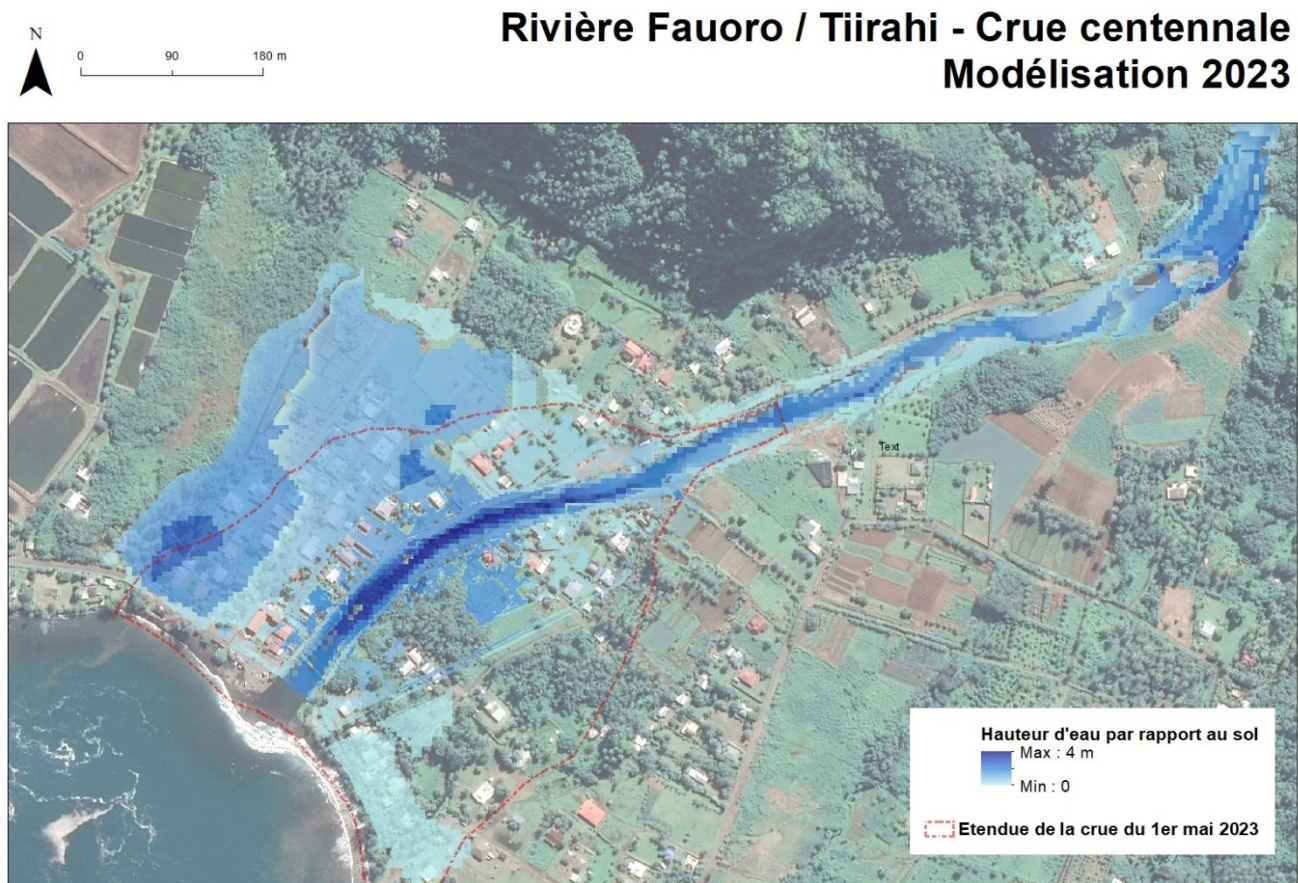


Figure 60 : Hauteurs d'eau obtenue par la simulation d'une crue centennale ( $Q_{100} = 347 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

## Rivière Fauoro / Tiirahi - Crue centennale Modélisation 2023

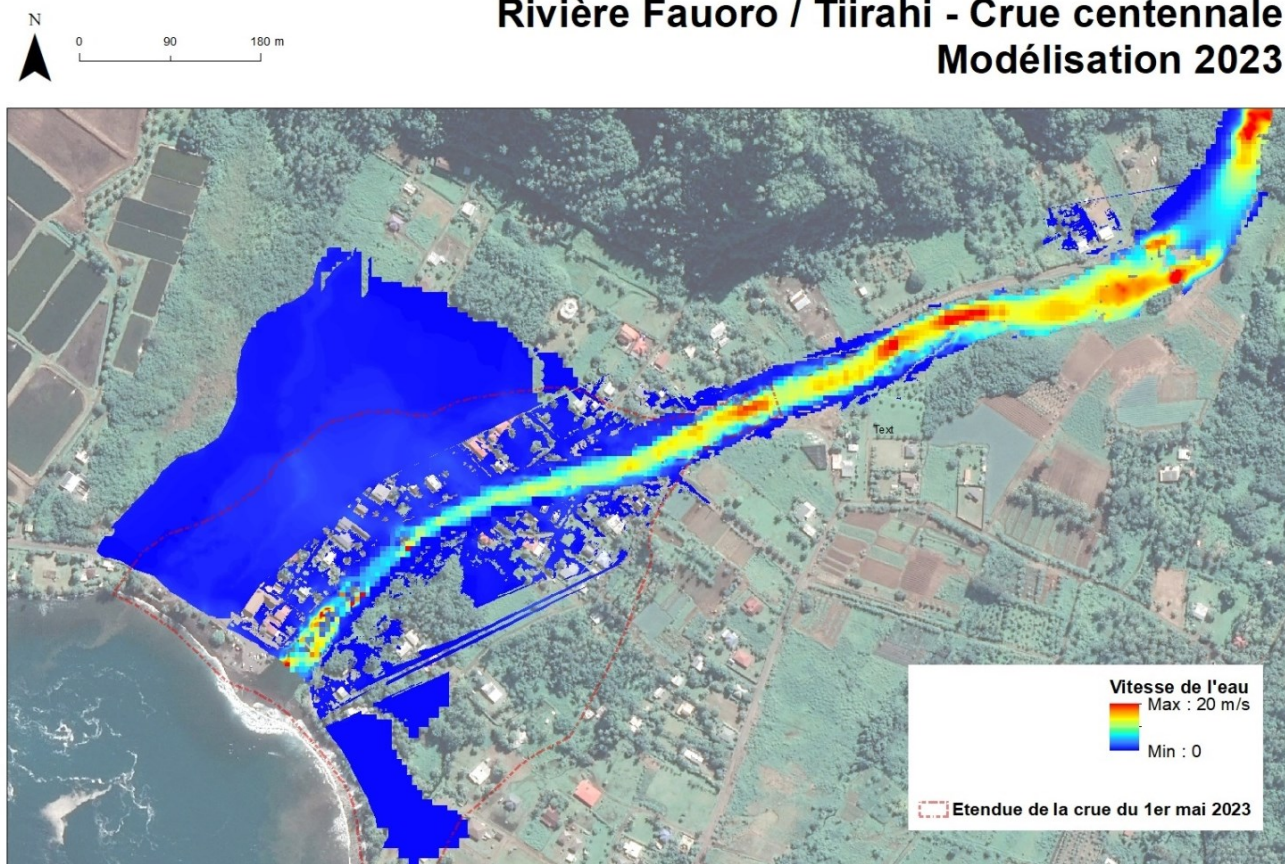


Figure 61 : Vitesse de l'eau obtenue par la simulation d'une crue centennale ( $Q_{100} = 347 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

### 9.3. Proposition d'une nouvelle cartographie de l'aléa inondation

La nouvelle modélisation permet de proposer une mise à jour de la cartographie de l'aléa inondation dans la zone de plaine de la rivière Tiirahi (). Pour rappel, l'aléa inondation est mesuré sur une échelle à trois niveaux : un aléa faible, moyen et fort. La graduation s'évalue en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement simulée. Les règles de calcul sont reprises dans le tableau ci-dessous.

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

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

## Rivière Fauoro / Tiirahi - Crue centennale Modélisation 2023

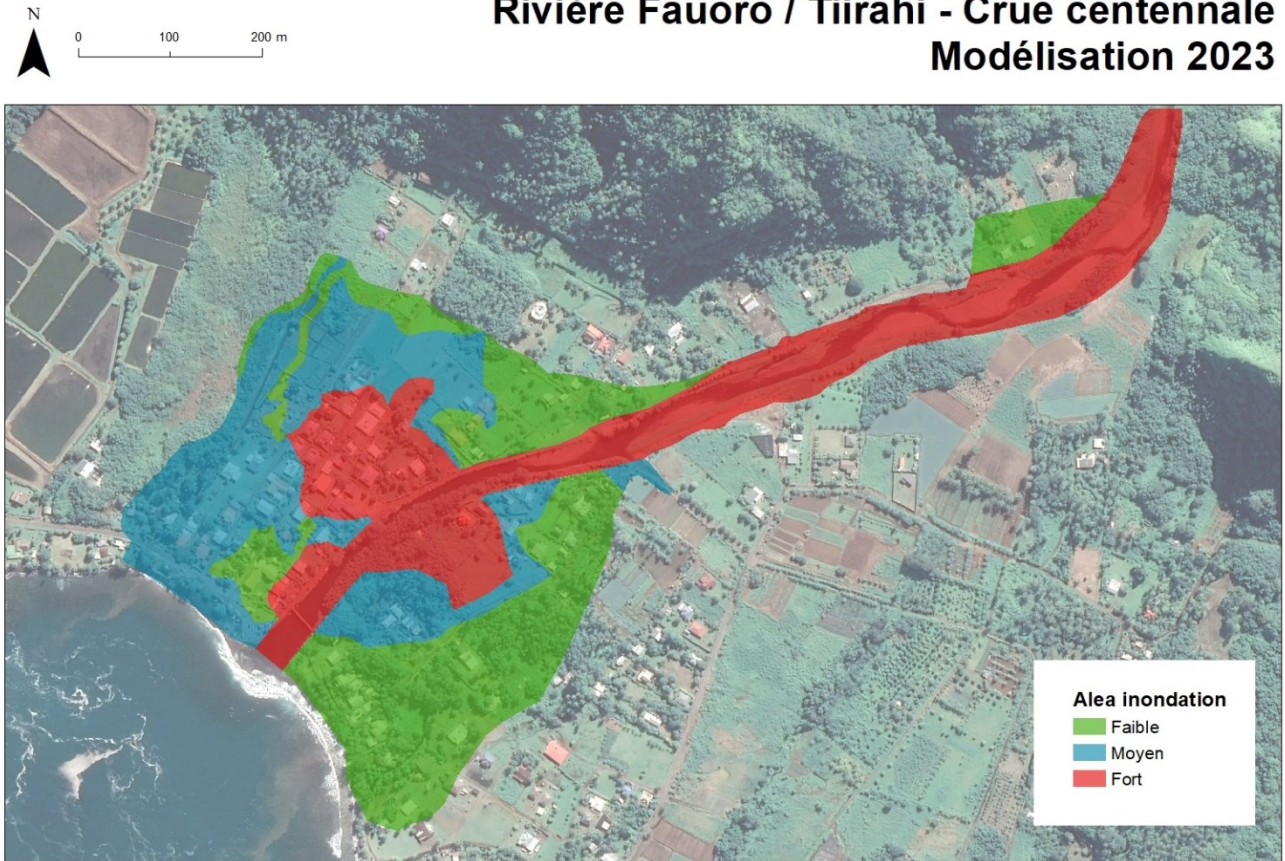


Figure 62 : Proposition de mise à jour de la cartographie de l'aléa inondation, rivière Fauoro / Tiirahi.

## 9.4. Parcelles du programme Fare OPH

Les parcelles intégrées au programme de l'OPH dans la vallée ont été analysées à travers les nouvelles informations et notamment les projections réactualisées de la crue centennale. La plupart des parcelles concernées sont assez nettement situées sur des zones où le risque est fort (en rouge sur la Figure 63). Toutefois, si l'on analyse en détail les raisons de ce classement (Tableau 8), il apparaît que la hauteur d'eau ne dépasse pas les 100 cm, sauf pour la parcelle CH22, et que la vitesse n'excède pas les 1 m/s. C'est la combinaison de ces deux paramètres (> 50 cm et > 0.5 m/s) qui qualifie le risque fort.

Le dimensionnement des fondations et des pilotis des Fare OPH a été soumis à une étude structure permettant de valider la résistance des constructions face aux contraintes d'un risque fort pour l'aléa inondation (cf. Annexe 13.3). Les hypothèses de travail sont :

- Pilotis de section carrée de 30 cm de côté ;
- Fondations ancrées à 65 cm / TN ;
- Hauteur des pilotis 150 cm ;
- Résistance à une vitesse de l'eau de 0.75 m/s.

**Nous considérons que des constructions sur pilotis suivant les règles de construction prévues dans l'étude structure sont compatibles avec une gestion raisonnable du risque.** Ces règles doivent être obligatoirement suivies. Nous ajoutons deux contraintes supplémentaires **obligatoires** pour sécuriser les différents projets :

- Pas de construction à proximité de la berge, la distance doit être d'au moins 15 m ;
- La transparence hydraulique doit toujours être assurée ;

En prenant en compte ces règles que nous comparons avec le résultat de la simulation, **nous donnons un avis favorable pour l'implantation des Fare OPH sur la presque totalité des parcelles**, à l'exception de la parcelle CH18 dont la vitesse d'eau prédite s'élève à 0.84 m/s (Tableau 8). L'avis défavorable pourrait être levé si une étude structure précise que les spécifications de construction peuvent résister à cette vitesse de l'eau.

--

Dans le cadre de l'aménagement d'habitations, rappelons la problématique des assainissements individuels qui ont débordé parce que le sol était saturé. La mise en œuvre d'une petite station d'épuration situé en dehors de la zone inondable pourrait être une solution technique. Sans doute plus difficile à mettre en œuvre si les habitants ne se regroupent pas en association, ou s'ils ne font pas appels à un syndic.

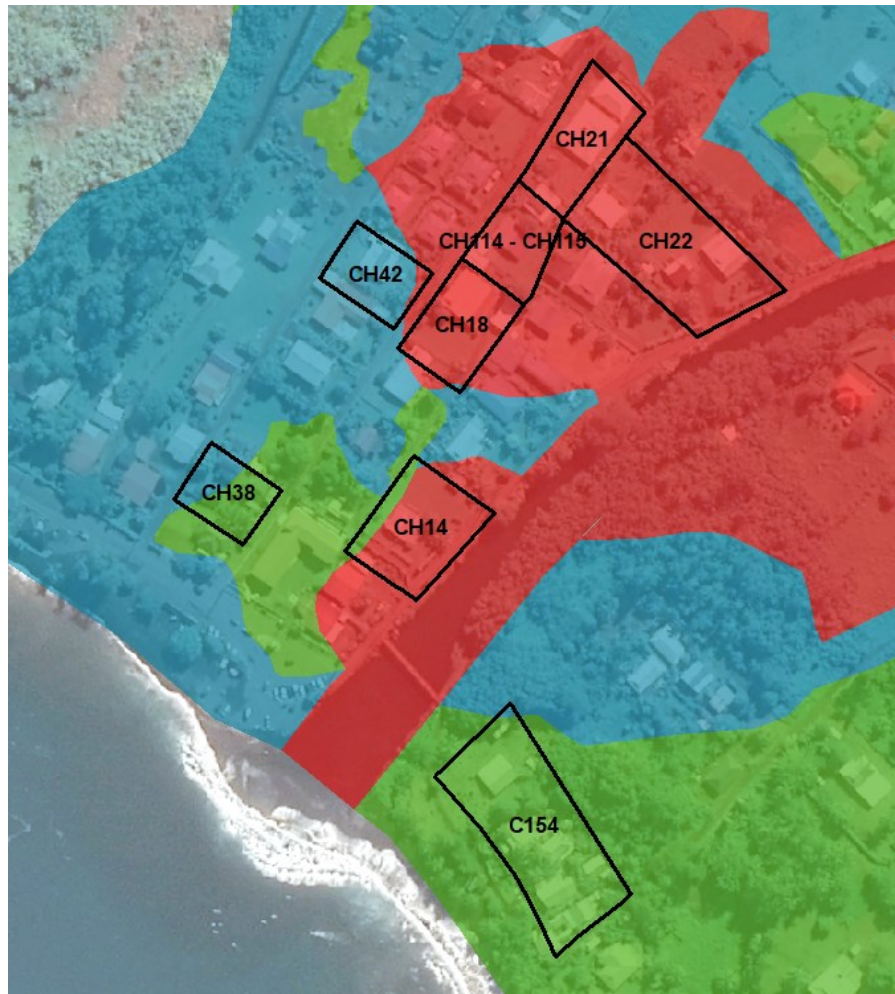


Figure 63 : Projection du risque lié à l'aléa inondation pour les parcelles du programme OPH.

Tableau 8 : Projection des hauteurs et vitesse d'eau moyenne suite à une crue centennale.

Parcelles	Num OPH	Rive	Hauteur d'eau (cm)	Vitesse de l'eau (m/s)	Avis pour la constructibilité (Fare OPH)
CH14	2	RD	96	0.75	Favorable
CH18	3	RD	64	0.84	Défavorable
CH21	4	RD	78	0.7	Favorable
CH22	5_1	RD	110	0.75	Favorable
	5_2	RD			
	5_3	RD			
CH38	6	RD	55	0.3	Favorable
CH42	7	RD	82	0.49	Favorable
CH115	8	RD	73	0.74	Favorable
CH114	9	RD	73	0.74	Favorable
CI54	10_1	RG	9	0.1	Favorable
	10_2	RG			
	10_3	RG			

## 10. Proposition d'aménagement

### 10.1. Diagnostic global

Depuis plus de 50 ans, la rivière a été canalisée pour disposer de plus de terre exploitable et de zones constructibles. Le lit a même été réduit en largeur sur la dernière section, à l'aval du gué où la pente est la plus faible. Comme des habitations se trouvent de part et d'autre des berges, les contraintes foncières ne permettront pas de rendre cet espace à la rivière. Dans un tel scénario, il faudrait interdire toute construction sur au moins 50 m des part et d'autre des berges et lancer des travaux pour élargir significativement le lit.

Il est illusoire d'imaginer contenir techniquement les crues les plus importantes. Les inondations du 1<sup>er</sup> et du 7 mai se reproduiront. Il est par contre possible de minimiser les dégâts, de reculer un peu le seuil de débordement, et d'améliorer la mise en sécurité des habitants en imposant des constructions surélevées sur pilotis pour assurer une vraie transparence hydraulique.

A plus long terme, il nous semble important de réfléchir à un plan d'urbanisation à l'échelle de la plaine autour de la rivière Fauoro et de ne plus autoriser de construction à proximité des berges, notamment dans la zone d'embouchure. Cette recommandation pourrait être généralisée à une large majorité des cours d'eau de l'île de Tahiti.

### 10.2. Recommandations et avis

La proposition d'aménagement que nous proposons s'articule sur 2 grands axes : améliorer la protection des berges sur le tronçon aval pour reculer le seuil de débordement et offrir un espace d'épanchement plus étendu à l'amont où les enjeux sont moins importants. L'objectif est d'éviter une course à des infrastructures toujours plus lourdes, plus coûteuses et dont la pérennité est loin d'être acquise, tout en améliorant la sécurité des riverains.

1- Sur le tronçon à l'aval du gué, les berges qui ont été endommagées, ou qui sont fragiles, doivent être consolidées en enrochement (Figure 64) en suivant les préconisations habituelles en termes de stabilité géotechnique :

- Enrochements moyens de 100 à 400 kg, non percolés ;
- Pente du talus inférieure à  $2/3^7$  ( $\approx 34^\circ$ ) ;
- Stabilisation de l'enrochement en protégeant le pied de berge avec l'implantation de gros enrochements ancrés sous le niveau du lit ;
- Mise en place d'un géotextile de transition entre le sol et l'enrochement.

---

<sup>7</sup> La pente s'exprime dans le sens vertical/horizontal.

La végétation sur la berge gauche, essentiellement constituée d'une ligne de purau (*Hibiscus tiliaceus*), est en mauvaise état. D'un point de vue purement mécanique nous conseillons de renforcer ce tronçon de berge avec des enrochements. Attention toutefois, cet espace est favorable à la nidification du Héron strié (*Butorides striata* (Peale, 1848) sous-espèce *patruelis*) qui est protégé par la réglementation (espèce protégée catégorie A).

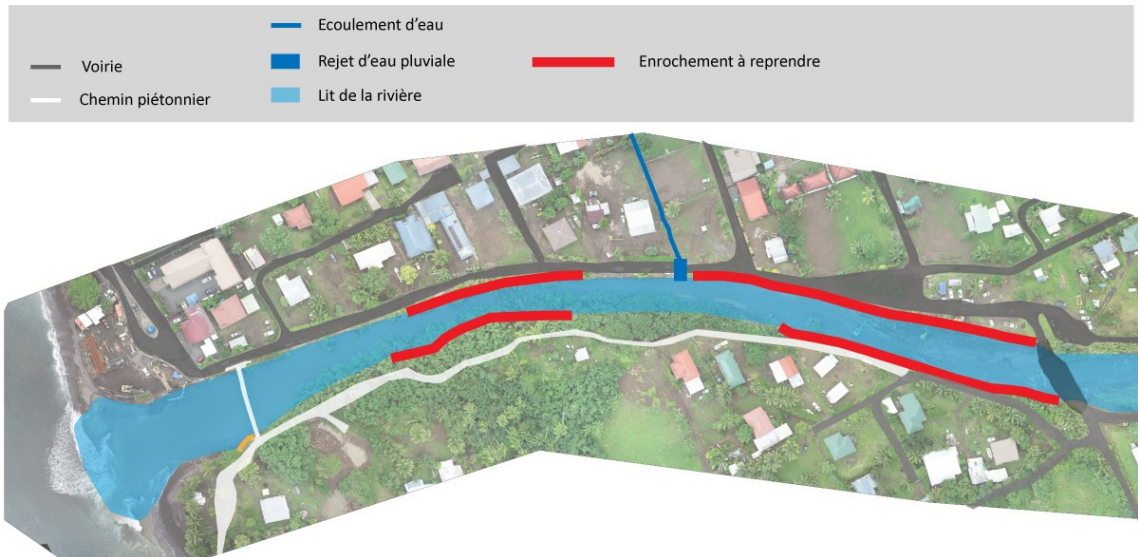


Figure 64 : Schéma de la section aval de la rivière Fauoro avec préconisations pour consolidation des berges.

2- Les rampes d'accès au gué favorisent la remontée de l'eau sur chacune des rives. La modélisation et les témoignages ont bien montré que le radier n'est pas le premier point de débordement en cas de crue, mais l'eau finit par passer. Si l'on considère qu'il est important de laisser la possibilité de franchissement aux véhicules motorisés, cette voie de connexion entre les deux rives peut être conservée. Un aménagement assez simple doit alors être mise en œuvre : il s'agit d'orienter les rampes d'accès dans le sens inverse à l'écoulement (Figure 65).

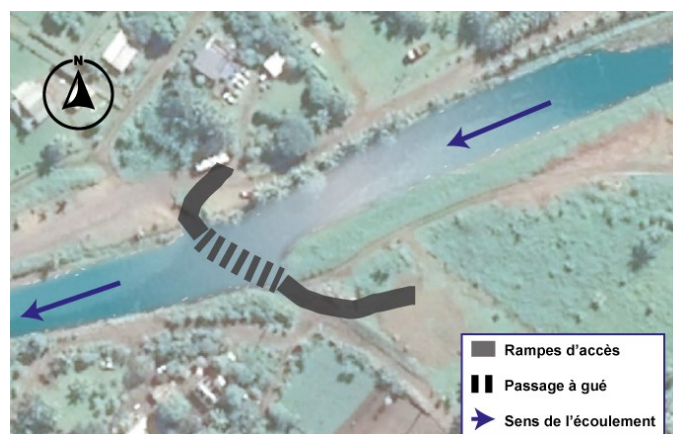


Figure 65 : Proposition d'aménagement pour la modification du tracé des rampes d'accès au gué.

En considérant l'équilibre hydraulique de la rivière, nous conseillerions plutôt de construire un pont suffisamment large pour s'implanter au-delà des berges, sans impacter le lit. Cette solution aurait l'avantage de permettre un franchissement même en cas de crue.

3- Dans l'optique de trouver une solution résiliente pour la basse vallée, nous proposons de développer un projet où de l'espace sera rendu à la rivière afin qu'elle puisse s'épandre et dissiper une partie de son énergie en cas de crue. Les parcelles CS2 et CS16, à l'amont de la zone de plaine, sont domaniales. Il apparaît alors possible de dédier ce terrain à la rivière. Il faudrait également disposer de la parcelle CS10 pour assurer une continuité naturelle à l'écoulement. Il serait sans doute possible d'échanger CS10 avec la moitié Sud de CS16 qui ne sera pas touchée par le projet.

La ligne en pointillée rouge sur la Figure 66 permet de se représenter la nouvelle limite de berge que l'on pourrait projeter. L'idée n'est pas de simplement creuser la rive et de reculer la berge gauche. Il s'agit de développer un espace d'expansion de crue qui ne sera pas en eau continuellement, mais facilement inondable. La rive droite pourra être protégée par une berge renforcée mais avec des techniques de génie végétal, éventuellement mixte, pour assurer la stabilité du talus.

L'espace d'expansion de crue pourra être occupé par une végétation indigène de bord de rivière, on peut imaginer des forêts de puaru, peut-être quelques mape (*Inocarpus fagifer*). Une partie pourra être occupée par des cultures à cycle court. Cette zone sera inondée périodiquement.

Cette solution serait assez novatrice autour d'une rivière Polynésienne et respectueuse de l'environnement naturel du cours d'eau. Une étude plus spécifique regroupant des expertises hydrauliques et botaniques devra être menée pour s'assurer des meilleurs choix en termes de gestion des débordements et de la stabilisation végétale du site.

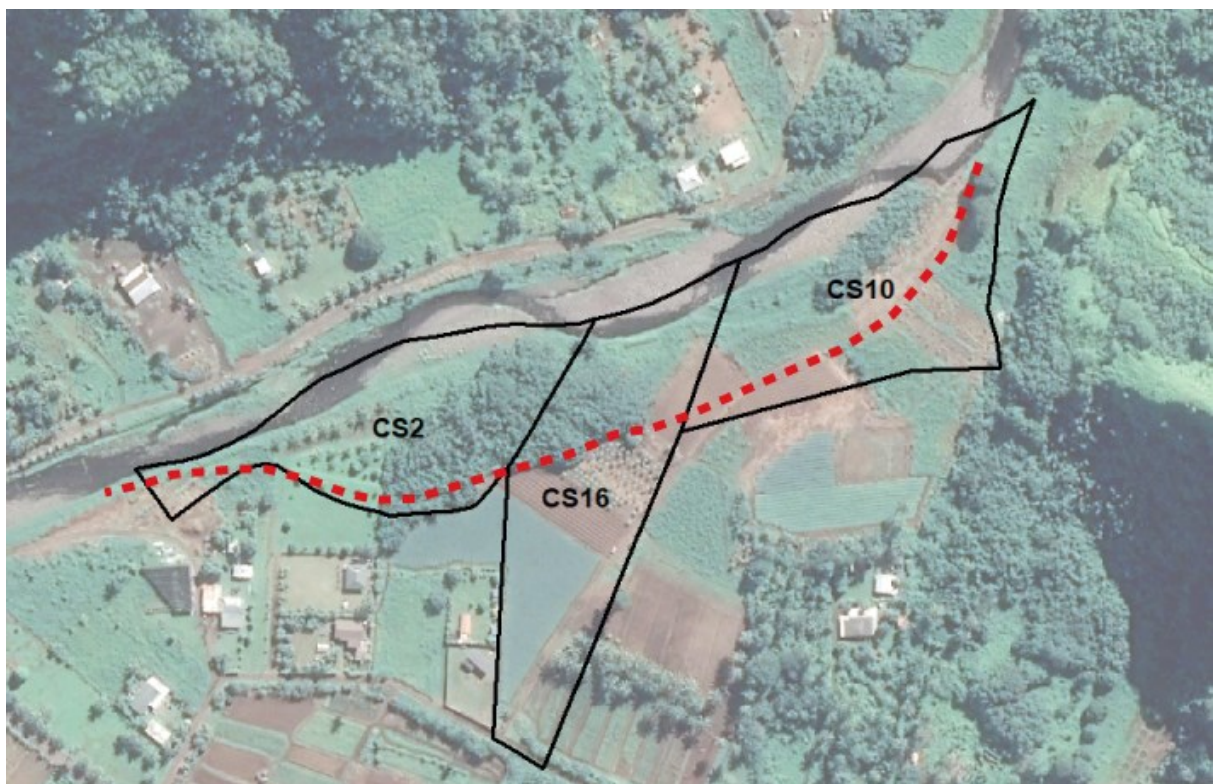


Figure 66 : Proposition d'aménagement d'une zone d'expansion de crue à l'amont de la zone de plaine de la Tiirahi.

## 11. Conclusion

La rivière Fauoro, également nommée Tiirahi, a connu une inondation majeure le 1<sup>er</sup> mai 2023, résultant principalement d'un épisode météorologique violent mais de courte durée. Des cumuls de pluviométrie records ont été atteints pour des durées de 30 min à 2 heures. La crue qui en a résulté a été estimée pour un temps de retour de 50 ans.

Si le l'écoulement a été très important, les aménagements autour du lit de la rivière depuis 70 ans ont accentué les conséquences difficiles pour les riverains. Les débordements se sont produits à l'aval du gué qui permet aux voitures de traverser. Ce tronçon long de presque 500 m a été particulièrement impacté par les aménagements autour de la rivière. La construction de logement, toujours plus près des berges, a finalement réduit la section d'écoulement au fil du temps. Dans cette zone près de l'embouchure, la pente est moins prononcée et l'écoulement plus lent. Il en résulte nécessairement une montée des eaux et un débordement lorsque le débit est important. L'eau n'a plus d'espace et a du mal à s'évacuer, d'autant que la houle peut être forte, ce qui fut le cas en mai dernier.

Grâce à cette étude, l'évènement du 1<sup>er</sup> mai a pu être rapidement documenté, fournissant des données précises sur l'étendue de la zone inondée, hauteurs d'eau et les dégâts. Ces informations ont permis de calibrer correctement une nouvelle modélisation. Il a ainsi été possible de reproduire numériquement cette crue. Cela a permis de mieux comprendre les points de débordement et la dynamique de la lame d'eau sur les rives. La simulation a également retracé l'impact plus fort sur la rive droite, la zone la plus habitée.

La projection d'une crue centennale a ensuite montré que l'emprise de l'inondation ne serait pas forcément plus étendue, par contre les hauteurs d'eau attendues seront plus élevées. L'énergie du courant sera aussi plus puissante. Une nouvelle carte du risque liée à l'aléa inondation a pu être proposée pour une mise à jour du PPR<sup>8</sup>.

Il est illusoire d'imaginer pouvoir contenir les crues les plus importantes en aménageant à grands frais le lit de la rivière. La nature nous rappelle très régulièrement que sa puissance n'est pas domptable. La situation foncière autour de la rivière, surtout vers le tronçon aval, ne permettra sans doute pas une solution interdisant une occupation du sol sur 50 m, voire plus, de part et d'autre des berges. Nous proposons donc une solution plus globale intégrant le risque, améliorant la protection des infrastructures en cas de crue réduite, et la préservation d'un espace plus important en amont de la plaine pour laisser la rivière s'étendre un peu plus largement.

--

---

<sup>8</sup> Plan de Prévention des Risques

*Affaire suivie par*

**Matthieu Aureau**

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

## 12. Bibliographie

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

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

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

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

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

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

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

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

Lafforgue A., 1987. Annales hydrologiques de l'île de Tahiti de 1971 à 1986. Edition de l'ORSTOM. Service de l'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.

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

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

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

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

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

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

## 13. Annexes

### 13.1. Approche hydrologique

#### 13.1.1. 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'hyétogramme 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.

### 13.1.2. 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.

### 13.1.3. Principe de la méthode GRADEX

Un principe bien plus robuste fut testé et validé, par un groupe de recherche de la société EDF<sup>9</sup> (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 maximums 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.

---

<sup>9</sup> Electricité de France

### 13.1.4. 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).

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

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

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

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

### 13.3. Protection et gestion des berges

La rivière est un milieu dynamique. Les berges sont soumises aux forces de l'eau qui les font évoluer. Ce processus est une évolution naturelle et permanente. L'érosion est le plus souvent induite par un courant qui vient frapper la berge en suivant un angle plus ou moins droit (Figure 67). Ce phénomène fragilise particulièrement la berge concave dans les courbes. Il peut également être induit par la présence d'obstacles dans le lit (tronc d'arbre ou banc de sable) qui créent un courant réfléchi vers une berge. Les seuils et les confluences perturbent également l'écoulement et favorisent l'action érosive de l'eau sur les berges.

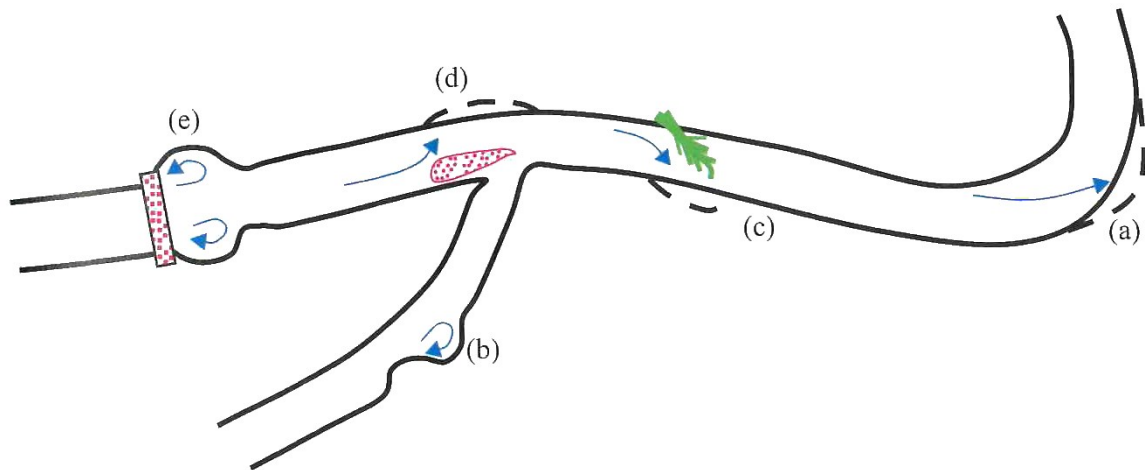


Figure 67 : Zone de vulnérabilité pour les berges face à l'érosion (tiré de Degoutte, 2012).

(a) berge concave dans une courbe ; (b) courant retour à l'amont d'une confluence ; (c) courant réfléchi après la chute d'un arbre ou (d) la présence d'un banc de sable ; (e) dissipation d'énergie à l'aval d'un seuil.

Le développement humain autour des rivières a tendance à figer la situation du lit tout en créant des enjeux à protéger. Lorsque les berges se fragilisent, une intervention de soutien devient nécessaire. Une stratégie de protection des berges doit s'enclencher si les enjeux économiques et/ou sociaux sont importants. Il faut alors juger du niveau de vulnérabilité des occupations du lit majeur.

En fonction de la situation et des contraintes physiques, deux risques menacent les berges : l'érosion et le glissement du talus. Plusieurs procédés de réparation et de soutien sont envisageables. On peut distinguer les techniques de génie civil et celle de génie végétal. Ces pratiques sont différentes, mais elles ne doivent pas être opposées, des approches mixtes offrent de bons résultats. Pour prévenir un risque de glissement, la zone la plus importante à renforcer est le pied de berge. Si l'érosion de la berge est globale, il faudra allonger la protection vers le haut, soit par un revêtement minéral, soit par une technique végétale.

Bien qu'il existe un large panel de solutions, les techniques présentées dans ce document sont les plus adaptées au contexte des rivières polynésiennes en considérant à la fois la spécificité hydromorphologique des rivières, mais aussi les contraintes en moyen et matériaux.

Les premiers paragraphes de cette section détaillent les solutions de génie civil (enrochement, mur ou gabions) avant de discuter des techniques végétales et mixtes.

### 13.3.1. Enrochement

Les enrochements, comme les gabions, présentent plusieurs avantages pour la protection des berges. Ils offrent une certaine « souplesse » face à la déformation du sol et des affouillements, ils ont une bonne capacité de drainage et peuvent être posés aussi bien à sec que dans un environnement mouillé.

La stabilisation de berges par enrochement est un aménagement devant répondre à certaines instructions de construction, au risque de se dégrader, de s'affaisser ou même de s'effondrer. Les erreurs les plus souvent observées sont induites par une pente trop forte du talus ou une structure sans appui dans le sol (Figure 68).

La réalisation technique d'un enrochement dépend de la configuration de la berge et des contraintes hydrauliques. Quelques règles doivent être respectées pour s'assurer de la stabilité et de la résistance de l'ouvrage de protection. Les préconisations déclinées dans cette section se veulent une adaptation raisonnée des directives des aménageurs et des normes européenne (*e.g.* : Degoutte, 2012 ; EPFL, 2008).



Figure 68 : Enrochement mal réalisé qui s'est totalement affaissé. Raiatea, 2016.

#### ***Pente du talus***

On considère généralement qu'un enrochement « libre » (non bétonné) sera stable au glissement pour des pentes inférieures ou égales à  $1/2^{10}$  ( $\approx 23^\circ$ ). La limite maximum acceptable est une pente de  $2/3$  ( $\approx 34^\circ$ ). Au-delà il faut utiliser soit des enrochements percolés (liaison en béton) se rapprochant d'un mur de protection, soit des gabions (en gradins ou verticaux).

#### ***Socle, Recharge***

Pour contrer le risque d'affouillement (érosion en pied de berge), il est indispensable d'assurer une stabilisation de l'enrochement en protégeant le pied de berge. Il est possible de traiter le risque d'enfoncement du lit en protégeant le pied de berge par un rideau parafouille en pieux de bois ou en palplanche. Une autre approche consiste à renforcer le pied de berge en accumulant des blocs de roche sous la surface du lit (Figure 69). Cette seconde solution est la plus utilisée en Polynésie française. Elle a l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et de ne nécessiter que des matériaux minéraux accessibles. Elle est aussi moins onéreuse. Ce socle stabilisant un enrochement est aussi nommé « recharge ».

---

<sup>10</sup> La pente s'exprime dans le sens vertical/horizontal.

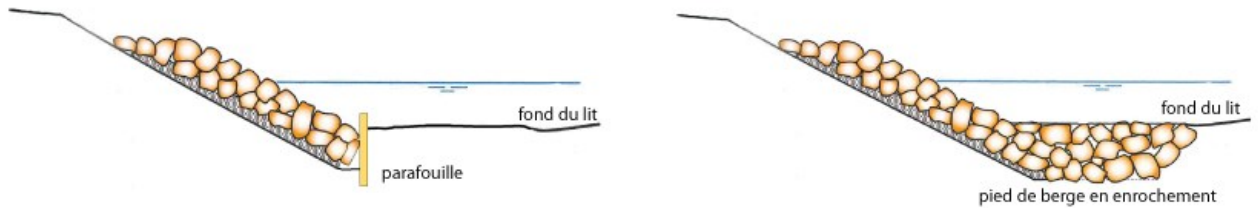


Figure 69 : Gestions du pied de berge dans un enrochement (adapté de Degoutte, 2012).

La protection du pied de berge est un élément tout à fait essentiel de la structure d'un enrochement. L'objectif est de prévenir tout risque d'affouillement localisé d'un courant venant « attaquer » la base de la berge. Par contre, si sur cette section le lit est soumis à un phénomène d'incision plus généralisée, l'ouvrage sera inefficace à moyen terme (Figure 70). L'incision ne peut être corrigée qu'en identifiant la cause qui résulte le plus souvent d'un déséquilibre à l'amont (retenue d'eau, seuil, extraction d'alluvions ...).

**Pour dimensionner l'emprise du socle, quelques recommandations peuvent être précisées. La profondeur, sous la ligne de sol, doit être égale à 3 fois le diamètre moyen des blocs du pied de berge. Sa largeur, son emprise sur le lit, est plus délicate à estimer. Elle est préconisée à 1.5 fois à l'enfoncement prévisible du lit. Si une berge soumise à un affouillement localisé de 100 cm de profondeur est protégée par un enrochement, la recharge en pied de berge de cet enrochement sera allongée sur 150 cm.**

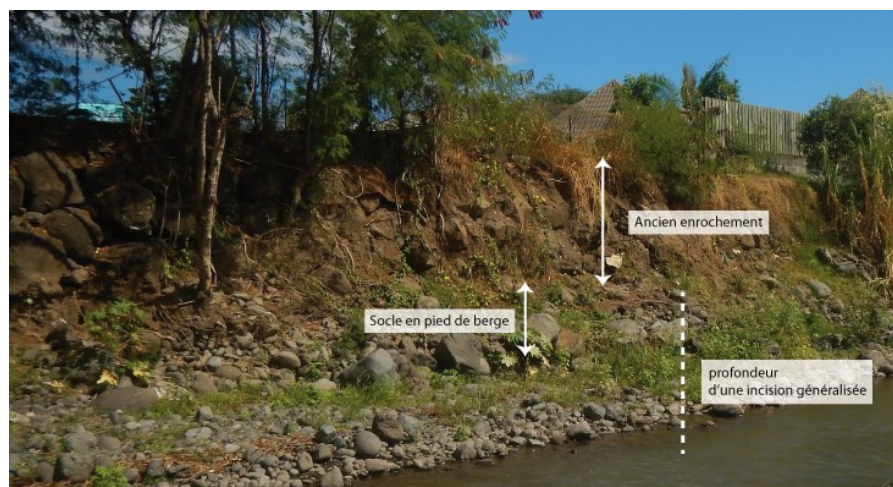


Figure 70 : Incision de la rivière Punaru'u.  
Le fond du lit se retrouve à plusieurs mètres sous le socle d'un ancien enrochement.

### **Blocs**

Les blocs de roches qui sont utilisés dans les enrochements de berges doivent à priori répondre à une norme précise (NF EN 13 383-1). Il n'existe pas de carrière accréditée pour produire ces matériaux en Polynésie française. Il est donc bien difficile d'appliquer ce type réglementation. On peut toutefois se s'inspirer des limites des trois grandes classes :

- petits enrochements entre 45 et 250 mm de diamètre. Ils sont surtout utilisés pour remplir des gabions ;
- enrochements moyens de 5 à 300 kg manipulés en vrac. Ils sont utilisés pour protéger les rivières à l'écoulement lent (ce qui est rare en Polynésie française à cause du régime torrentiel des cours d'eau) et le haut des talus lorsque la protection de la berge s'élève jusqu'à la limite du lit de plein bord ;
- gros, ou lourds, enrochements au-dessus de 300 kg manipulés individuellement. Ces blocs servent de base aux enrochements, ils sont également utilisés pour la recharge en pied de berge. Dans la pratique on utilisera rarement des éléments de plus 1 200 kg.

### **Transition granulaire ou géotextile**

Les blocs structurant l'enrochement ne peuvent être simplement posés contre le talus en terre de la berge. Lors des crues, les particules de sol peuvent être entraînées à travers les roches. À terme, toute la berge se déstabilise et l'aménagement s'affaisse. Pour contenir ce phénomène, il faut interposer une transition granulaire, c'est-à-dire des cailloux de diamètres différents qui assurent la transition granulométrique entre les gros blocs et la berge en terre. La réalisation de ce tapis granulaire n'est pas toujours évidente et peut prendre un certain temps. **On utilisera préférentiellement un géotextile qui jouera le même rôle de protection et de transition.**

Les propriétés du géotextile doivent à la fois s'opposer à la migration des particules de sol tout en empêchant le phénomène de colmatage. Le maillage doit être suffisamment étroit pour que les grosses particules de sol soient retenues, mais suffisamment large pour que les plus petites puissent migrer. La taille du maillage dépend beaucoup de la texture du sol.

Il faut éviter un géotextile trop fin qui ne serait pas suffisamment résistant (Dégoutte et Fry, 2002). S'il est trop épais, le risque de colmatage augmente. Enfin, les géotextiles sont très sensibles aux UV. Il est très important de ne pas les exposer à la lumière, surtout lors de la phase de pose.

### **Longueur**

Un enrochement doit être prolongé, surtout à l'amont, au-delà du linéaire de berge à protéger. Il est important de limiter au maximum les risques d'infiltration entre la berge et les blocs.

### 13.3.2. Enrochements percolés

Lorsque la pente de la berge ne peut pas être taillée en suivant un angle inférieur à 34° (2/3), le risque de glissement est trop important. Les blocs doivent être liés avec du béton, le résultat est un mur de protection.

Cette solution ne doit être utilisée que lorsque les enjeux sont forts (risque immédiat pour des bâtiments ou la voirie). C'est une technique lourde qui a une influence directe sur le régime hydraulique. La rugosité de la berge diminue ce qui accélère l'écoulement. Ces murs de protection augmentent la vulnérabilité de chenal à l'aval, mais également à l'amont et sur la berge opposée si celle-ci n'est pas suffisamment protégée. **La canalisation bétonnée d'un lit de rivière est souvent le début d'un engrenage d'interventions toujours plus lourde et onéreuse.**

Les règles rappelées pour les enrochements classiques sont toujours à respecter, notamment le socle de soutien en pied de berge. Ce type d'ouvrage se fragilise par la pression de l'eau qui pourrait s'infiltrer entre la berge et la couverture percolée. Il est alors indispensable d'interposer un géotextile drainant et d'équiper le mur de barbacanes régulières. Le diamètre de ces drains doit être suffisant pour éviter tout colmatage (Ø 60 à 100 mm).

L'allongement du mur au-delà de la zone à protéger est encore plus indispensable que pour un enrochement « classique ».

### 13.3.3. Mur de soutènement en béton

En zone urbaine, les contraintes en termes d'espace sont tellement fortes que la seule solution envisageable est un canal cimenté (Figure 71).

Dans ce cas, les berges sont protégées par des murs de soutènement en béton armé avec une semelle de fondation pour contrer la poussée du talus (Figure 72). Ce socle pourra être enfoui dans le sol sur 20 à 30 cm afin de protéger la base de la berge du risque d'affouillement localisée.

L'épaisseur du mur est entre 60 et 100 cm en fonction des contraintes. L'estimation du volume de béton par mètre de longueur est de 12.7 m<sup>3</sup>/m (données de l'Ecole Polytechniques de Lausanne).



Figure 71 : Canalisation de la rivière Papeava dans le centre-ville de Papeete.

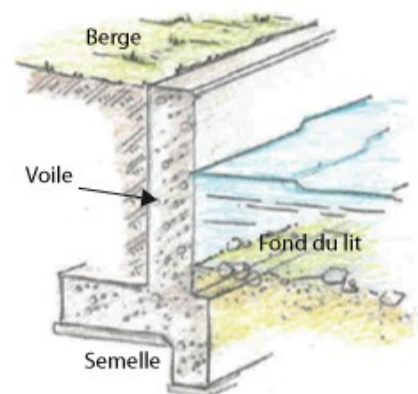


Figure 72 : Schéma de coupe d'un mur de soutènement avec semelle.

### 13.3.4. Gabions

Les gabions sont des structures grillagées parallélépipédiques emplis de cailloux, de fragments de roches ou de galets (Royet et *al.*, 1992). Ces cages sont positionnées les unes à côté des autres pour former un mur de soutènement ou revêtir une berge. En hydraulique de rivière, les gabions sont également utilisés pour construire des seuils. Leur taille standard est une épaisseur d'1 m, pour une largeur d'1 m également. La longueur s'étend de 1.5 à 4 m.

Ils peuvent être posés sur un axe vertical et former un véritable mur de protection. Ils pourront également être agencés dans une structure en gradins (Figure 76). Ils soutiennent aussi bien les berges d'une rivière naturelle (Figure 74) qu'ils canalisent un cours d'eau (Figure 73).



Figure 73 : Canalisation d'un cours d'eau par des gabions (© lebleu-pro.fr)



Figure 74 : Soutien de berges par gabions. Vallée Aiurua, Tahiti.

Il ne faut pas oublier une protection anti-affouillement à la base du mur de la structure (Figure 75). Il faut faire attention à bien positionner les gabions sur une berge fixe, le principal écueil est en effet un ravinement de la berge derrière les gabions qui deviennent alors totalement inefficaces.

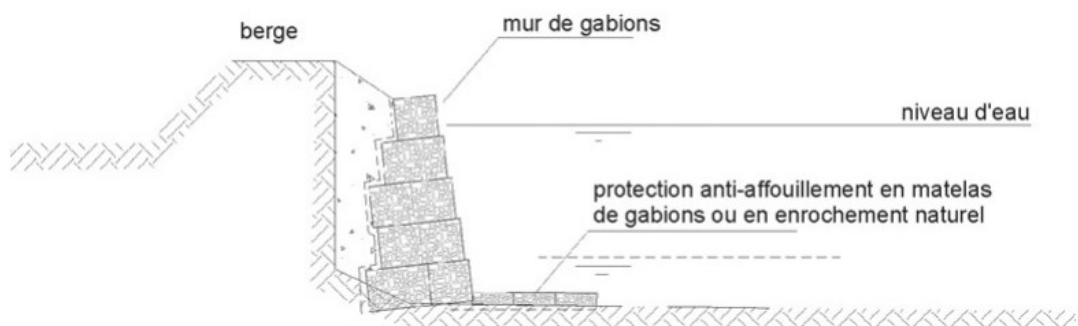


Figure 75 : Coupe type d'un mur en gabions destiné à protéger une berge (source : Maccaferri, France).

On peut également citer le procédé de matelas *Renos* qui utilise des gabions de grandes dimensions en plan, mais de faible épaisseur (Figure 77). Cette technique n'est pas, à notre connaissance utilisée en Polynésie française. La disponibilité de la structure métallique en sans doute la raison.



Figure 76 : Structure en gradin pour protéger une berge à forts enjeux.



Figure 77 : Protection de berge en matelas Renos  
(© Maccaferri.com)

Pour plus de lisibilité, les principaux avantages d'une solution « gabions » sont réunis dans la liste suivante :

- très bonne résistance hydraulique ;
- bonne souplesse hydraulique en acceptant une certaine déformation ;
- la rugosité d'une berge en gabions limite la vitesse de l'eau et donc son pouvoir érosif ;
- le drainage de l'eau est constant, il n'y pas de pression sous-jacente ;
- la mise en œuvre est simple. Les structures grillagées peuvent être transportées sans engin mécanique permettant ainsi une installation dans des sites difficiles d'accès tout en évitant l'ouverture de pistes impactant l'environnement. **Les cages sont emplies de pierres et de cailloux de tailles réduites pouvant être prélevés sur place (Ø 45 à 180 mm) ;**
- la géométrie des gabions s'adapte très bien aux différentes situations (lignes droites, coudes)
- bonne intégration paysagère et environnementale. Un écosystème peut se développer en pied de berge. Le couvert végétal s'intégrera aisément sur le haut d'un talus en gabions.
- les mailles grillagées sont relativement durables et résistantes. Les fils de fer doivent être au minimum galvanisés. Ils peuvent être revêtus d'un alliage en zinc aluminium. Les grillages ont une maille hexagonale à double torsion pour offrir une plus longue résistance ;
- facilement remplaçables si certains signes de fragilité apparaissent.

Pour les inconvénients, on citera essentiellement la sensibilité des gabions aux embâcles, la végétation charriée peut se coincer dans les mailles du grillage, et le coût qui peut -être élevé sur de longs linéaires.

### 13.3.5. Mise en œuvre

Bien que l'enrochement d'une berge ou la pose de gabions semblent une tâche de génie civil relativement simple, elle demande une grande technicité autant de la part du concepteur que de l'entreprise exécutrice. Les malfaçons ne sont pas rares et les conséquences d'un enrochement éboulé peuvent être pires que l'état initial. Il est donc important de suivre les quelques règles de base qui permettent d'éviter les défaillances grossières et de ne pas oublier les étapes initiales comme le talutage de la berge ou la pose d'un géotextile. La réalisation d'un socle de soutien est essentielle, quelle que soit la solution mise en œuvre.

Un ouvrage de génie civil sur une berge a généralement pour objet la protection des rives, mais il ne faut pas oublier qu'il impacte l'hydraulique générale du cours d'eau. Il est important de tenir compte des modifications de la rugosité pour minimiser des dégâts en d'autres sections du lit.

### 13.3.6. Génie civil ou génie végétal

La rivière est un espace naturel dynamique. Sa morphologie évolue sous l'influence des phases d'écoulement. Mais l'écoulement est aussi influencé par la morphologie du lit. L'équilibre de la rivière est le résultat de ces interactions croisées entre les différentes composantes du système hydraulique.

Pour préserver, ou retrouver, cet équilibre dans un cours d'eau on préférera toujours une approche « naturelle » ou végétale en opposition aux ouvrages de protection lourds (murs, enrochements, empierrement ...) qui, souvent, accentue les désordres en perturbant la dynamique des écoulements (augmentation de la vitesse et de la force érosive du courant ; érosion plus agressive du lit et des berges ; déséquilibre du transport sédimentaire).

La végétalisation des berges fait partie des principes de gestion fortement encouragés par l'Agence française pour la biodiversité (AFB), anciennement l'ONEMA (Office National de l'eau et des milieux) ou par un institut tel que l'IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologie pour l'Environnement et l'Agriculture).

Le but des recommandations actuelles est de contrarier au minimum la vie naturelle d'un cours d'eau et de ses « divagations », répondant aux épisodes de crues, qui jalonnent son histoire. L'intérêt de ces préconisations n'est pas uniquement paysager ou environnemental, la reconstruction végétale apporte de vraies solutions mécaniques en favorisant par exemple l'augmentation de la rugosité, ou en assurant une stabilité plus pérenne des berges et des talus.

Toutefois, lorsque l'enjeu est important et le danger imminent, une mise en sécurité efficace s'impose, un ouvrage lourd est souvent inévitable (enrochement, mur, ...). Mais encore une fois une approche environnementale (végétalisation des berges) doit être d'abord envisagée.

Les solutions mixtes sont aussi des approches performantes. Le risque de glissement peut être contenu par un enrochement ou des gabions en pied de berge. L'érosion étant prévenue par une végétalisation efficace du haut des talus.

### 13.3.7. Techniques végétales ou mixtes

Au-delà de l'intérêt environnemental, le génie végétal apporte plusieurs avantages hydrauliques et morphologiques. En se développant le système racinaire des plantes, il renforce la structure du sol et stabilise les berges. La végétalisation des hauts de talus participe à la lutte contre l'érosion et son efficacité s'accroît dans le temps. En pied de berge, le couvert végétal favorise l'augmentation de la rugosité et limite la puissance érosive de l'écoulement. Il contribue également au piégeage des sédiments.

Ces techniques plus en adéquation avec le milieu naturel ont également des atouts sur le plan paysager et biologique en favorisant la réimplantation d'une ripisylve<sup>11</sup> qui offre un refuge pour la faune de rivière. Le concept de corridor biologique est développé.

Un autre avantage non négligeable est un coût de mise en œuvre moins important que les solutions de génie civil. Par contre, l'entretien est contraignant. Il demande une mobilisation de moyen (financement et main d'œuvre) non négligeable surtout en considérant le nombre de cours d'eau sur Tahiti. Des solutions pourraient émerger en recherchant l'implication des riverains et des associations de sauvegarde et de protection des vallées.

Lorsque les végétaux sont implantés sur le haut des berges au-dessus des enrochements, on parle de techniques mixtes (Figure 78). En fonction du contexte, il est également possible de totalement recouvrir l'enrochement d'une couche de terre ou de s'appuyer sur d'un géotextile biodégradable en fibres naturelles (Figure 79).

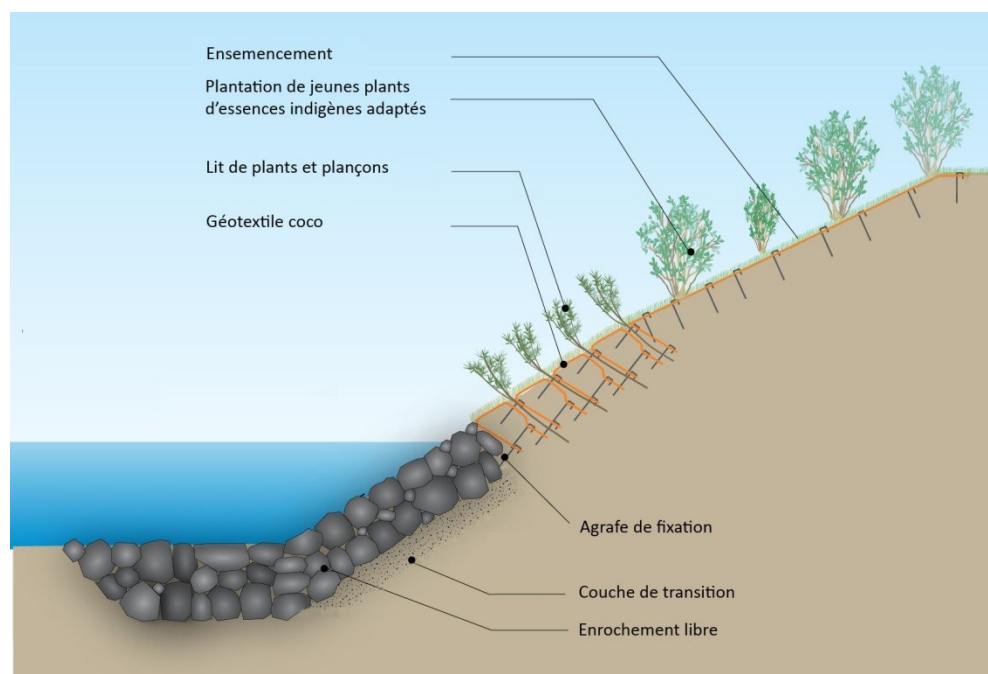


Figure 78 : Exemple d'une technique mixte (enrochement en pied de berge et haut de berge végétalisé).  
(© genibiodiv.irstea.fr)

<sup>11</sup> Formations boisées, buissonnantes et herbacées présentes sur les rives d'un cours d'eau



Figure 79 : Végétalisation d'un enrochement à partir d'un support en géotextile naturel.  
(tiré de Evette et *al.*, 2015)

De nombreux mémoires et manuels inventorient les différentes techniques végétales et leurs mises en application en fonction de contextes très variés (e.g., Evette et *al.*, 2015 ; Malavoy, 2007 ; Vernier, 2009 ; Barbry, 2002 ; Lachat, 1994). Actuellement, cette approche est fort peu utilisée pour les rivières polynésiennes. Pourtant, le génie civil n'offre pas toujours des solutions très efficaces et les ouvrages finissent par se déstabiliser au cours des années. Il est donc important d'évaluer ces nouvelles solutions en les adaptant au contexte spécifique des îles hautes polynésiennes. La revégétalisation des berges doit s'appuyer sur des espèces locales connues pour leur rôle de stabilisateur de sol et par leur résilience à la montée des eaux.

La mise en œuvre des techniques végétales uniformes ou mixtes nécessitera le conseil et l'appui de compétences particulières pour choisir les bonnes essences en termes de croissance et d'ancrage dans le sol. Des spécialistes de la Direction de l'Agriculture ou des scientifiques indépendants (biologistes, forestiers ...) seraient des soutiens de choix pour accompagner la maîtrise d'œuvre.

Sans anticiper une approche plus spécialisée, quelques espèces d'intérêts peuvent déjà être proposées :

- bas de berge : plantes herbacées - *ape*, *piato*, *maa pape* ;
- talus : *vetiver*, *mou* (roseau), *tia iri*, *auti*, *fara* ;
- haut de berge : *mape*, *hotu*, *pacaille*, *tumu vi*, *tumu uru*, *tapotapo taratara*.

Sur le haut de la berge, les espèces fruitières seraient préférées pour inciter la population riveraine à s'impliquer dans l'entretien du cours d'eau, le lit, mais aussi le haut des berges.

Le développement des techniques végétales pour la stabilisation des berges ne doit pas être confondu avec la lutte nécessaire contre l'évolution anarchique des espèces invasives et opportunistes autour des cours d'eau. Ces essences ne sont pas adaptées au contexte hydraulique polynésien. Lors des fortes crues elles s'affaissent facilement et créent un apport important en éléments végétaux qui participent à la formation d'embâcle à l'aval, et donc au débordement des eaux.

### 13.4. Etude structure (Fare OPH)



Pirae, le 13/05/2020

Nombre de pages (y compris celle-ci) : 3

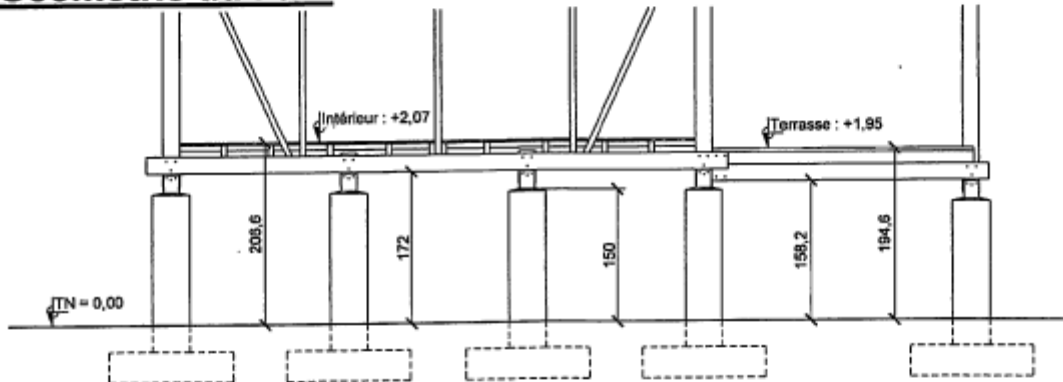
Auteur : Alain Audemar	Objet: Dimensionnement des fondations et des pilotis des Fare OPH, en zones rouge risque inondation
Destinataire : OPH / SOCOTEC	

## NOTE D'HYPOTHÈSES 20.1026 – NH 01-0

### Codes de référence :

BAEL 91/99  
NV65  
DTU 13.1

### Géométrie du Fare



Les pilotis sont de section carrée de 30 cm de côté.  
Les fondations sont ancrées de 65 cm / TN (dito les Fare actuels).

### Charges permanentes

Poids propre du bois de structure des Fare : 560 kg/m<sup>3</sup>.  
Poids propre de panneaux de fibrociment au sol de 2 cm d'épais (1 250 kg/m<sup>3</sup>), et des entretoises en 3"x3" d'espacement ~60 cm : 29 kg/m<sup>2</sup>.  
Poids tôles avec pannes : 10 kg/m<sup>2</sup>.  
Poids des murs de façades : 27 kg/m<sup>2</sup>.  
Poids des cloisons intérieures : 49 kg/ml.

### Charges d'exploitation

Une charge généralisée pour l'intérieur et la terrasse de 150 kg/m<sup>2</sup> = 1,5 kPa.

### Charge climatique

Selon le code NV65, la région III, site Exposé. C'est-à-dire une pression dynamique de vent normal de :  $90 \times 1,25 = 112,5$  daN/m<sup>2</sup>.  
On applique le coefficient de dimension pour la trame du Fare à 3,05m :  $\delta(3,05) = 0,90$ .

Soit une pression de calcul au vent normal de :  
 $W = 112,5 \times 0,90 = 101 \text{ daN/m}^2 = 1,01 \text{ kPa}$ .

### **Charge accidentelle**

L'aléa inondation « très fort » (zone rouge) est défini par le couple hauteur d'eau (H), vitesse de l'eau (v) suivant :

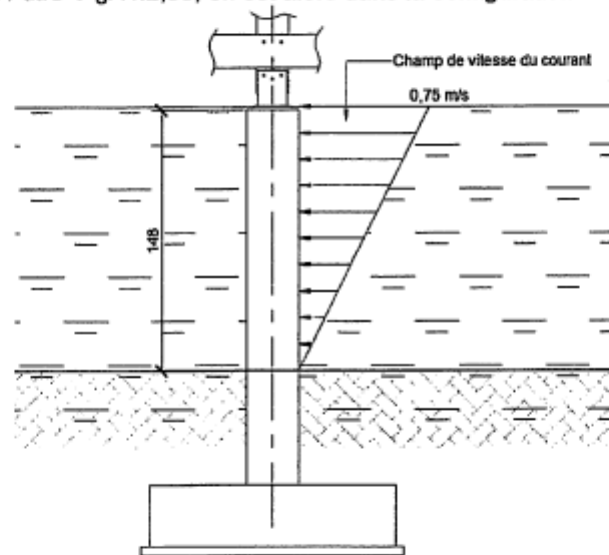
- $H > 1 \text{ m}$ .
- $v \geq 0,5 \text{ m/s}$ .

Nous nous plaçons dans la configuration suivante :

- $H > 1,50 \text{ m}$ .
- $v \geq 0,75 \text{ m/s}$ .

Compte tenu des faibles vitesses d'écoulement, on ne prend pas en compte l'affouillement du TN autour des pilotis.

Selon le fascicule 61 titre V §A4.2.53, on est alors dans la configuration suivante :



### **Combinaisons**

Les conditions dimensionnantes sont celles qui génèrent un moment de renversement de la semelle (vent et courant). On se placera donc toujours en condition déjaugée (semelle et potelet). Cela est plus défavorable, car la poussée d'Archimède réduit la charge descendante, et donc la stabilité.

Les charges sont :

- G : permanentes
- Q : exploitation
- W = vent normal
- C = courant

ELS

G + Q  
G + W

ELU  
1,35G + 1,5Q  
G + 1,8 W

ELU Accidentel  
G + C + 0,2 W

### **Justifications**

#### Fondation

On prendra une contrainte de travail du sol de 1 bar à l'ELS, soit 0,15 MPa à l'ELU.

#### Béton arme

Béton C25/30  
Fissuration préjudiciable  
Enrobage 4 cm.

### **Méthodologie**

L'ossature du Fare F5T est modélisée en 3D avec le logiciel ACORD Bat 3D. Cela permettra de récupérer la descente de charge (G, Q et W) sur les appuis.

À partir de cette descente de charges, il sera réalisé :

- La vérification de la stabilité de la fondation
- La vérification de la résistance (ferraillage) de la semelle et du potelet.

Il sera produit :

- la note de calculs par le logiciel ACORD Bat 3D pour la descente de charges.
- La note de calculs des vérifications de fondation et du béton armé.
- Un plan de coffrage et de ferraillage des pilotis (semelles et potelets) pour le Fare « spécial zone rouge risque inondation ».