



# Vai-Natura

Section Hydrologie, Hydrogéologie

## Cartographie de l'aléa inondation

- rivière Papeava, Papeete, Tahiti -

### Modélisation - Rapport d'étude

Version complétée et corrigée

#### Référence

R20161102-HY Pa

#### Commanditaire

Bureau d'Etude Génie Civil (BEGC)

Direction de l'Équipement

en collaboration avec le Service de l'Urbanisme (SAU)

#### Vai-Natura SARL

BP. 83 - 98735 Uturoa - Raiatea

Polynésie française

N° RC 11 178 B

N° Tahiti 988550

**Phone** +689 87 29 16 68

**Fax** +689 40 66 19 32

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

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



# Vai-Natura SARL

## Cartographie de l'aléa inondation - rivière Papeava, Papeete, Tahiti

Rapport n° R20161102-HY Pa

**Bureau d'Etude Génie Civil (BEGC)**  
Direction de l'Equipement (DEQ)  
Vallée de Tīpaeru'i

Demandeur

*contact :*  
Stéphanie Pommiez  
**Tel** 40 48 54 12  
**Mail** stephanie.pommiez@equipement.gov.pf

Etude et analyse

Cartographier l'aléa inondation à partir d'une modélisation hydraulique :

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

Commune

Papeete

Ile

Tahiti

Date

28/03/2018



## Sommaire

<b>1. Présentation .....</b>	<b>5</b>
1.1. Contexte général.....	5
1.2. Objectifs.....	6
1.3. Rappels initiaux.....	7
<b>2. Etat des lieux contextuel .....</b>	<b>9</b>
2.1. Géographie et morphologie.....	9
2.2. Topographie.....	10
2.3. Occupation humaine.....	12
2.4. Hydromorphologie et aménagement.....	16
<b>3. Modélisation hydraulique .....</b>	<b>20</b>
3.1. Stratégie de modélisation.....	20
3.2. Construction géométrique et données utilisées. ....	21
3.3. Coefficient de rugosité de Manning .....	24
3.4. Analyse hydrologique .....	26
3.4.1. Données disponibles .....	26
3.4.2. Pluviométrie .....	28
3.4.3. Hydrométrie .....	31
3.5. Remarques complémentaires.....	33
<b>4. Résultats de la modélisation.....</b>	<b>35</b>
4.1. Scénarios.....	35
4.2. Ecoulement et débordement .....	37
4.3. Cartographie de l'aléa inondation .....	39
4.4. Comparaison avec les derniers travaux (SPEED, 2006) .....	46
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>47</b>
<b>6. Bibliographie.....</b>	<b>48</b>



<b>7. Annexes</b> .....	<b>50</b>
7.1. Approche hydrologique .....	50
7.1.1. Objectifs.....	50
7.1.2. La méthode rationnelle .....	51
7.1.3. Principe de la méthode GRADEX .....	52
7.1.4. Estimation des crues extrêmes .....	53
7.2. Abaque des coefficients de rugosité de Manning (Chow, 1959).....	54
7.3. Zones d'aléa fort en tenant compte de l'érosion .....	57
7.4. Comparaison des profils longitudinaux de la Papeava entre 2006 et 2018 .....	59



## 1. Présentation

### 1.1. Contexte général

Pour une mise en sécurité des rivières et protéger les zones urbaines, la Direction de l'Équipement (DEQ) en collaboration avec le Service de l'Urbanisme (SAU) souhaite réaliser une cartographie de l'aléa inondation de la rivière Papeava, dans la vallée du même nom, permettant de finaliser le Plan de Prévention de Risque (PPR) et d'élaborer un programme technique de protection contre les crues.

La rivière Papeava prend sa source sur les contreforts du volcan initial. Elle serpente au cœur d'une étroite vallée, puis rejoint l'océan après avoir traversé une plaine qui aujourd'hui correspond au centre-ville de Papeete, capitale administrative de la Polynésie française. Les enjeux sont donc très importants. Or, la rivière est contrainte dans cette zone où la dénivellation est faible. Les débordements sont fréquents, la couverture urbaine favorise le ruissellement et la propagation des inondations.

En outre, le climat tropical humide engendre des épisodes pluvieux de fortes intensités. Il en résulte des lames d'eau qui produisent des crues puissantes. La rivière doit donc contenir des débits élevés dans un espace d'écoulement réduit par une urbanisation enveloppante.

La cartographie de l'aléa inondation s'appuie sur une modélisation numérique qui intègre l'ensemble de ces contraintes hydrologiques et hydrauliques. L'interprétation des résultats a pour but d'évaluer avec précision l'emprise foncière soumise au risque d'inondation dans la partie occupée autour de la rivière Papeava.



## 1.2. Objectifs

Les objectifs de ces travaux sont multiples : dessiner les cartes de l'aléa inondation ; diagnostiquer les points de dysfonctionnement hydraulique du cours d'eau ; et aboutir à des recommandations d'aménagement pour améliorer la mise en sécurité des biens et des personnes en période de crue.

La délimitation de l'aléa inondation, et son amplitude, s'appuient sur les résultats d'une modélisation numérique qui cherche à reproduire les conditions des crues les plus importantes.

La première étape est le choix du modèle qui résulte de l'équilibre entre les contraintes numériques et les données disponibles. A partir de là plusieurs scénarios sont simulés :

- les niveaux de crues maximales avec différents temps de retour (10 ans, 50 ans, 100 ans) ;
- une variation des conditions aux limites à l'embouchure, c'est-à-dire une variation du niveau de la mer de 1 m pour simuler de fortes houles ;
- la formation d'embâcles d'obstruction partielle, ou complète, qui sont souvent à l'origine d'un écoulement contrarié, d'une montée des eaux et des débordements.

La modélisation tente également d'intégrer les risques maximums sur des tronçons que l'érosion des berges a rendus vulnérables.

Aux termes de l'étude, la cartographie de l'aléa inondation actualisée doit permettre une réévaluation du Plan de Prévention des risques autour de la rivière Papeava. Ce travail servira également de base pour développer des solutions qui limiteront les risques d'atteintes aux biens et aux personnes et améliorera l'hydraulique du cours d'eau.

### 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.

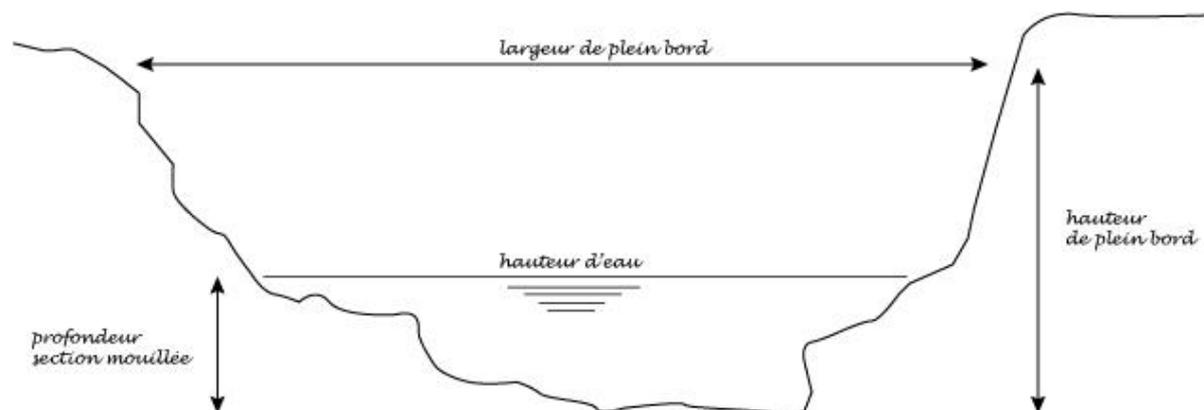


Figure 1 : Géométrie du profil en travers d'un cours d'eau.

- 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.

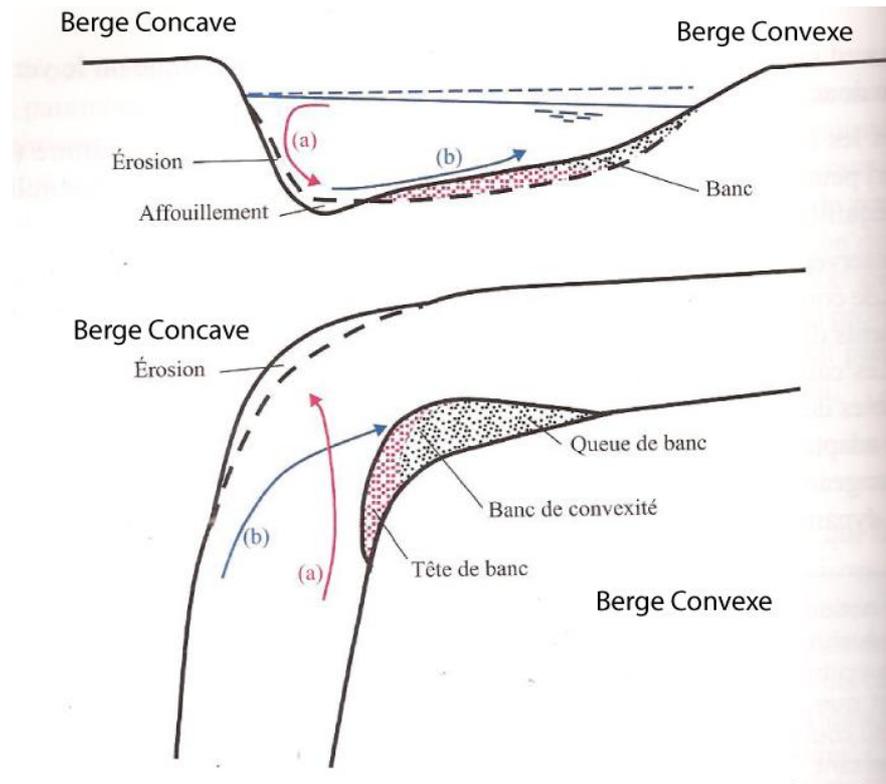


Figure 2 : Schémas de la courbe d'une rivière et évolution des profils.  
(tiré et adapté de Degoutte, 2012)

- 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. Etat des lieux contextuel

### 2.1. Géographie et morphologie

A nord de l'île de Tahiti, la rivière de la Papeava s'écoule dans un bassin versant qui s'allonge sur 7.7 km et couvre une surface de 4.3 km<sup>2</sup> (Figure 3). Dans la partie amont, la plus encaissée, la largeur minimum est de 300 m, elle peut s'ouvrir jusqu'à 1 500 m. Avant de rejoindre l'océan, la rivière traverse une plaine alluviale sur un kilomètre et demi. Aujourd'hui cette zone aval fait partie du centre de la ville de Papeete, elle est fortement urbanisée. La rivière est totalement canalisée sur les 1 000 derniers mètres avant son embouchure.



Figure 3 : Plan de situation du bassin versant de la Hamuta sur l'île de Tahiti.

La morphologie du bassin versant n'est pas exactement identique aux classiques vallées tahitiennes qui prennent naissance sur les contreforts du volcan principal. La forme de la vallée de la Papeava s'intègre dans une planèze qui s'est creusée au cours du temps. Les planèzes sont des plateaux de forme triangulaire inclinés vers la mer. Leur topographie est héritée des anciennes coulées de lave recouvrant les pentes extérieures des volcans. La structure nord de l'île est largement dessinée par la succession de ces planèzes. Elles sont disjointes par l'incision de petites vallées assez profondes et ciselées par un réseau dense de ruisseaux et de ravines à l'écoulement plus ou moins permanent (Bonvalot, 1993).

La zone d'étude couvre une superficie de 3.2 ha, soit 43% du bassin versant (Figure 4). La rivière s'écoule sur une distance de 4 034 m.

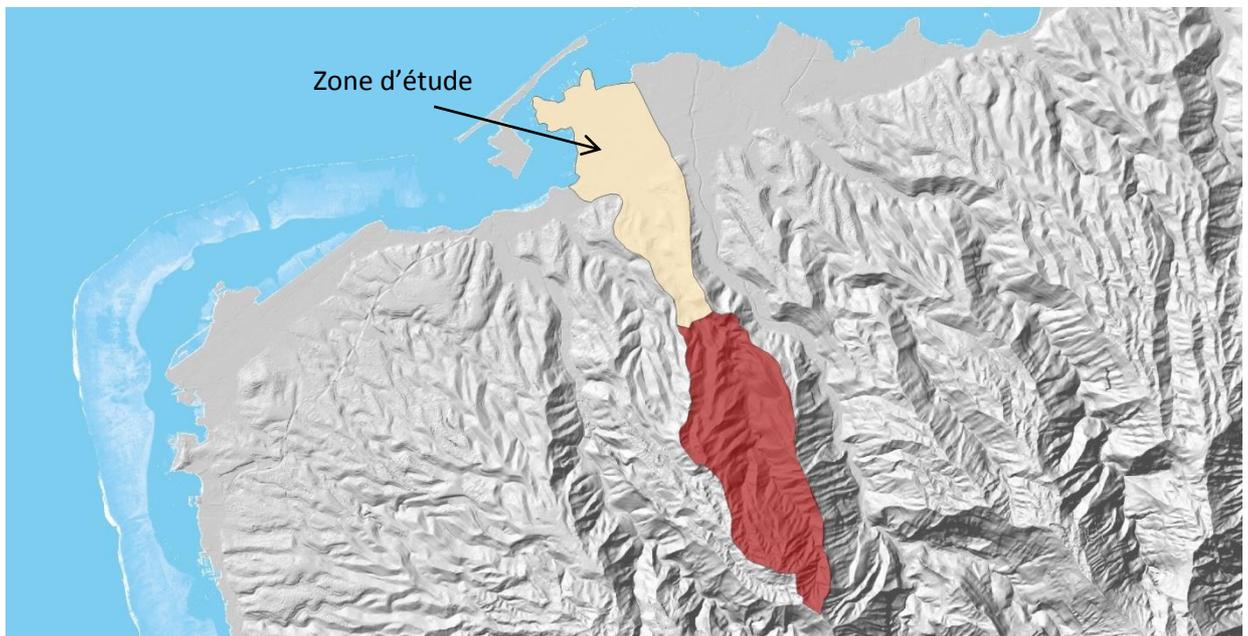


Figure 4 : Bassin versant de la rivière Papeava.  
La zone d'étude à l'aval est délimitée par le polygone beige.

## 2.2. Topographie

L'hydrologie de la vallée est impactée par l'altitude et les pentes. La capacité de ruissellement, ou de rétention, est en grande partie induite par la topographie.

Sur l'ensemble de la vallée, l'altitude moyenne est de 318 m avec un écart-type à 305 m, donc une variabilité importante (Figure 5) qui s'explique par la part importante de la zone côtière dont la hauteur maximum atteint difficilement les 10 m. Sur les crêtes, le point culminant atteint 1 140 m.

La répartition des pentes décrit également une liaison rapide entre une haute et une basse vallée (Figure 6). La zone de transition est encaissée, par contre le fond de la vallée ne présente pas une incision très forte qui caractérise les plus grandes vallées tahitiennes. La morphologie est bien celle d'une vallée de planèzes.

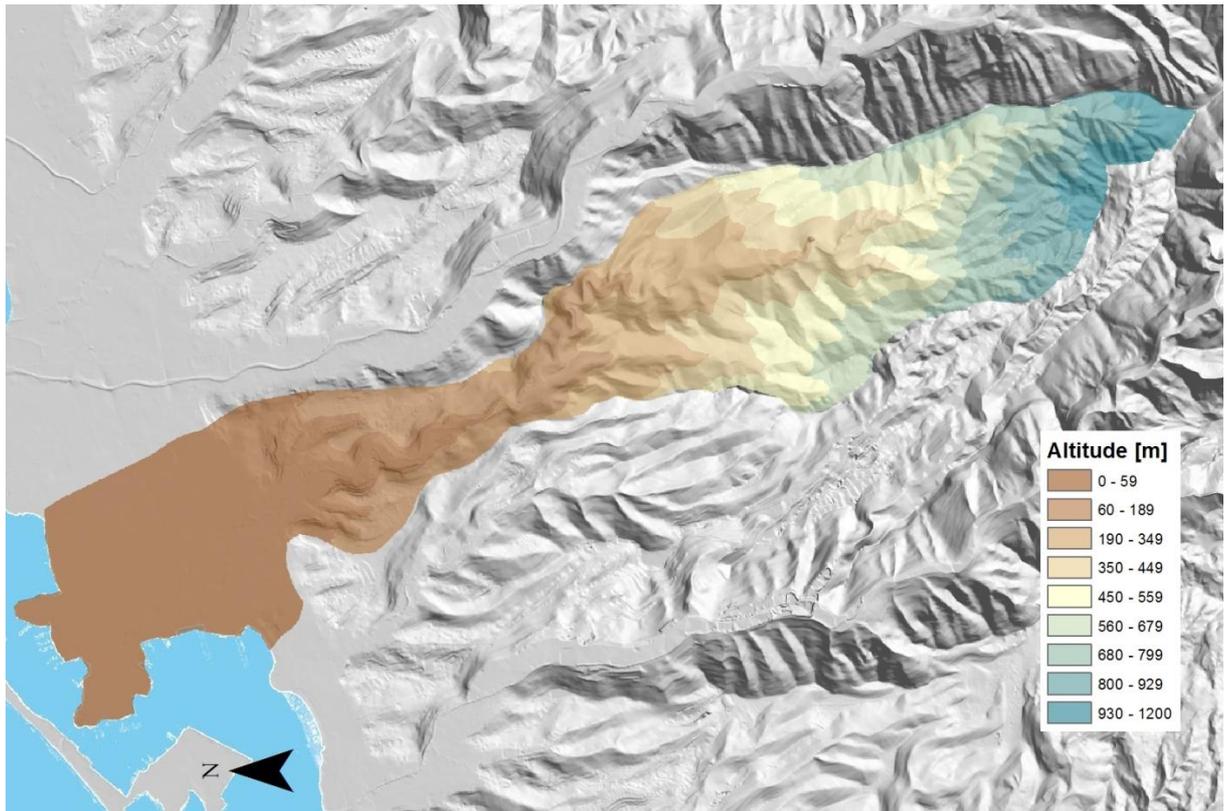


Figure 5 : Répartition des altitudes dans la vallée de la Papeava.

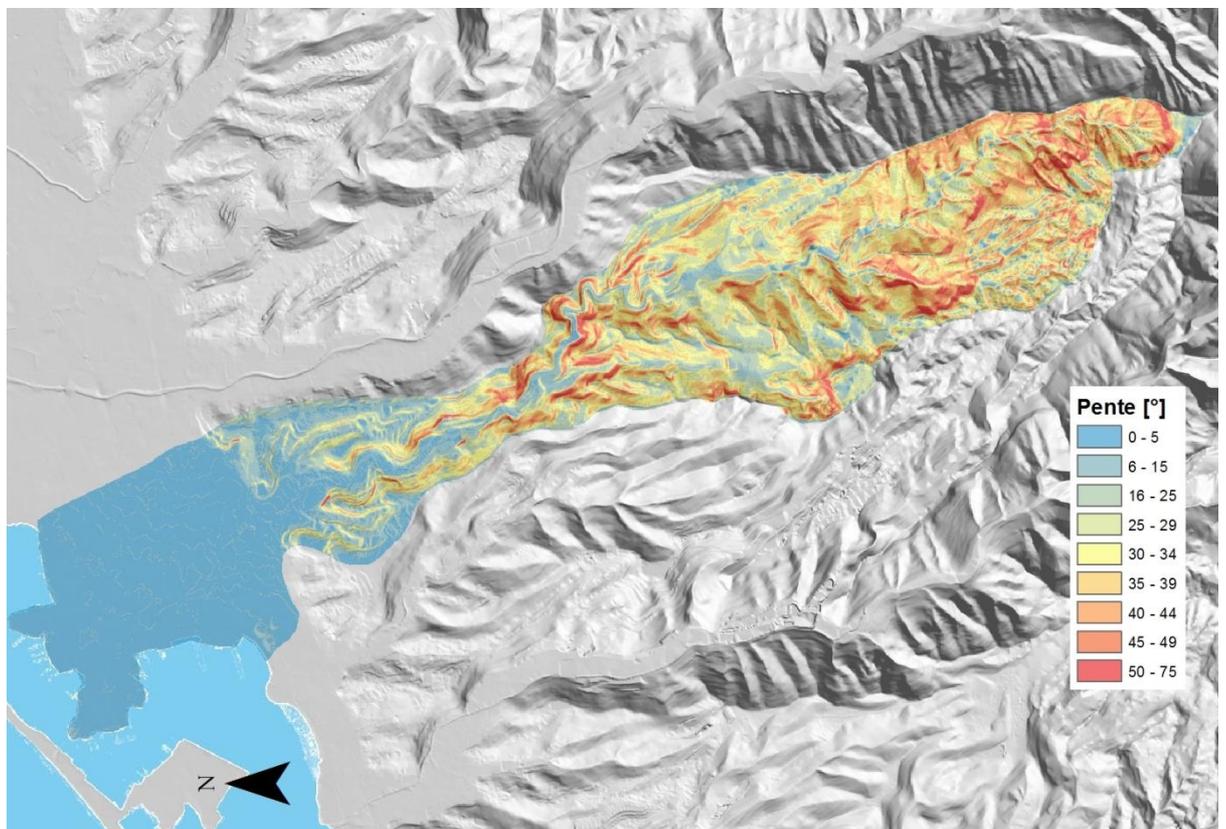


Figure 6 : Répartition des pentes dans la vallée de la Papeava.

### 2.3. Occupation humaine

Le bas de la vallée de la Papeava est très fortement urbanisé (Figure 10). Le quartier de la Mission délimite la transition entre le tracé du cours d'eau dans la vallée, puis dans la zone très urbaine.

Dans la partie amont, la rivière s'écoule dans un lit contraint entre des habitations empiétant parfois jusqu'à la limite des berges. Le lit présente une texture en terre pavée par des éléments rocheux plus ou moins dégradés. La pérennité du chenal et la protection des constructions ont nécessité des enrochements des berges sur de longs tronçons.

Quelques points d'histoire nous renseignent sur les caractéristiques du cours d'eau et de son lit dans la zone aval. La plaine où s'écoule la Papeava était occupée de marécages. Un plan de 1845 (Figure 7) dessine un exutoire dans la rade de Papeete, situé aux alentours du point de côte qui deviendra le rond-point du Pacifique, au bout de l'avenue du Prince Hinoi.

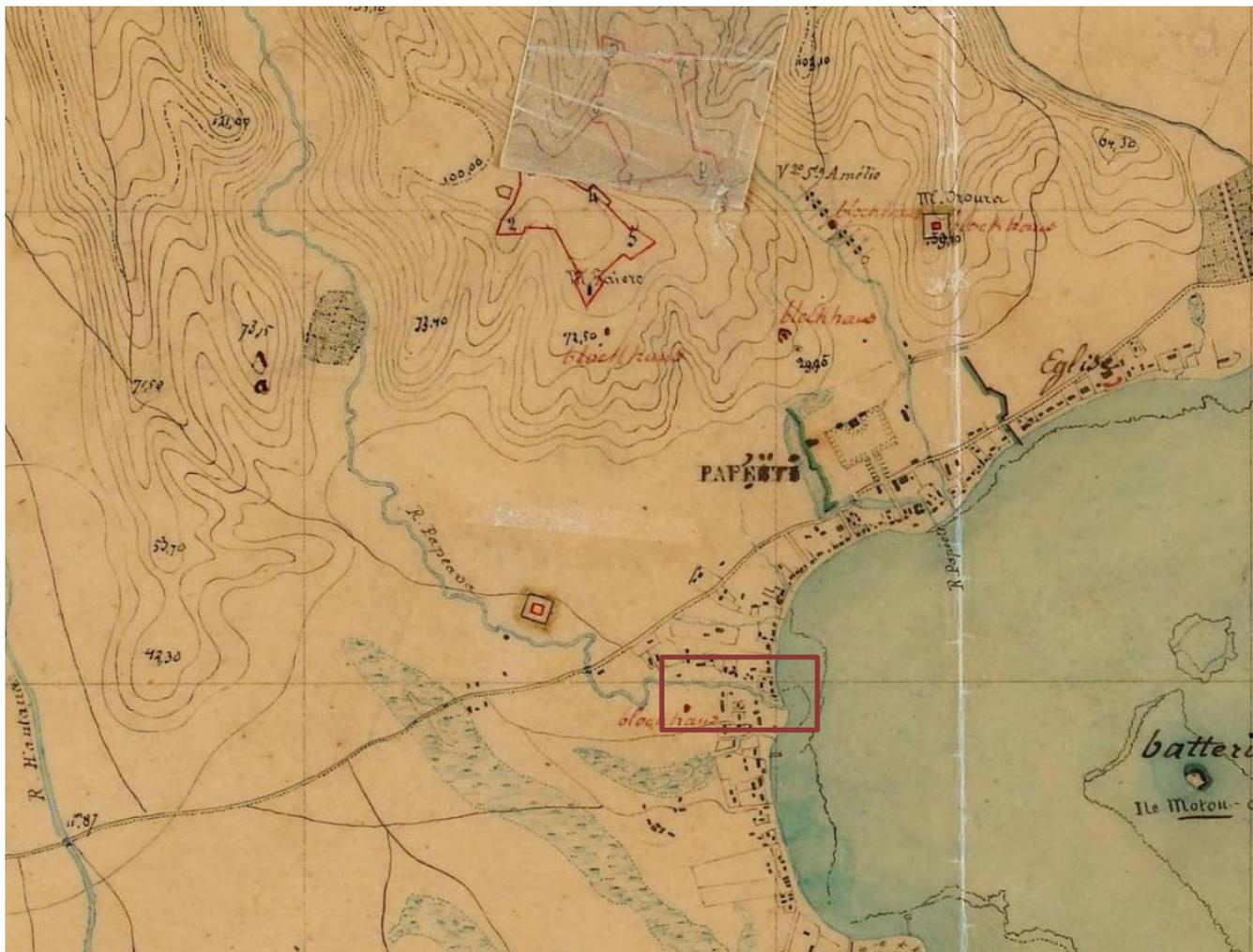


Figure 7 : Plan de Papeete et des Environs. Possessions Française de l'Océanie, 1845.  
L'exutoire de la Papeava est encadré en rouge.  
(Fonds des Archives nationales d'outre-mer, <http://anom.archivesnationales.culture.gouv.fr>)

Pour protéger la ville d'inondations récurrentes, des fortifications furent érigées en 1847. Elles sont visibles sur un plan de 1897 (Figure 9 et Figure 9). Elles furent détruites des années plus tard face à l'extension de la cité. La rue des Remparts trouve ses racines dans cette mémoire urbaine.

Le lit de la rivière est aujourd'hui drainé dans un canal de béton, dont 400 m sont totalement recouverts. Les derniers aménagements de la rivière datent de 1970.

La rive droite est essentiellement occupée par des zones résidentielles, avec une densité d'habitations importante. La rive gauche est plus largement recouverte de bâtiments administratifs, d'immeubles d'entreprises, ainsi que des entrepôts et des commerces notamment dans le quartier nord de Fare Ute. La rade de Papeete est proche, la gare maritime se situe à moins de 200 m du chenal.



Figure 8 : Plan de Papeete dessiné pour la Direction de l'Artillerie de la place de Papeete, daté du 25 novembre 1897 (tiré de Bailleul, 2016).

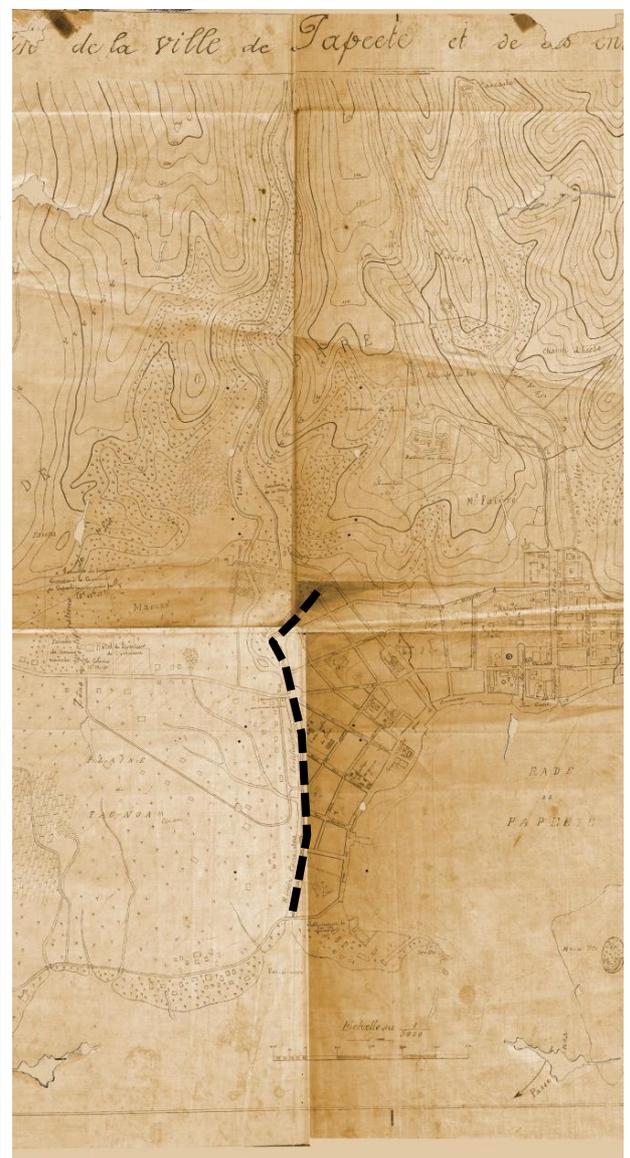


Figure 9 : Plan de Papeete de 1897. Le trait noir dessine la ligne de rempart.

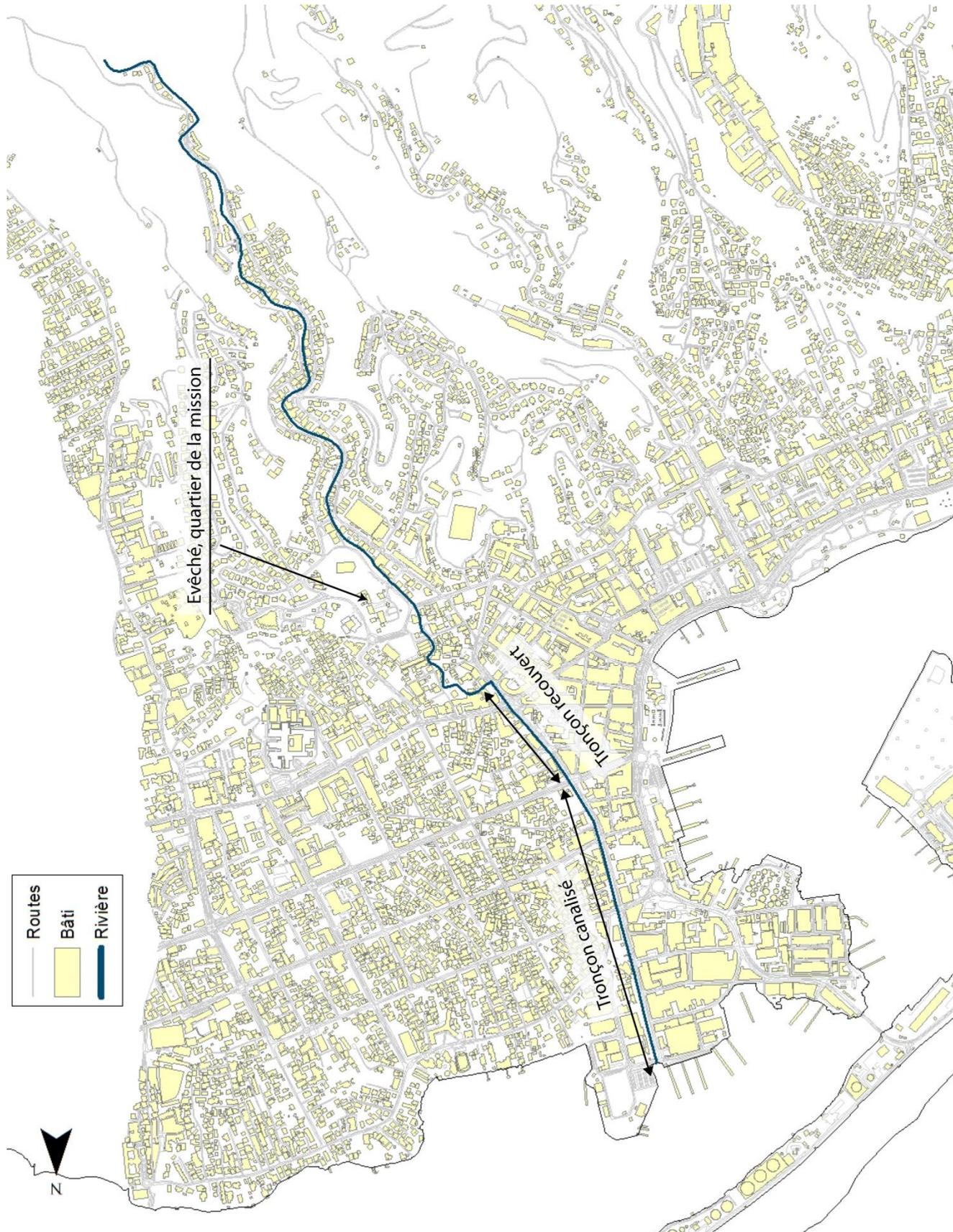


Figure 10 : Occupation et urbanisation de la basse vallée de la Papeava.

Les photos aériennes prises depuis les années 1950 (Figure 11 à Figure 14), nous renseignent sur l'évolution des aménagements autour de l'embouchure. Ces clichés, mis à disposition par la cellule Topographie du SAU, témoignent de la création puis de l'expansion de la zone portuaire de Motu Uta. En 1955, l'embouchure de la Papeava est largement ouverte sur le lagon. L'espace d'expansion de l'eau se réduit au fur et à mesure du développement urbain, de nombreuses terres sont gagnées sur le lagon. L'effet néfaste est un engorgement de l'exutoire de la rivière favorisant les débordements et les inondations en amont.



Figure 11 : Embouchure de la Papeava  
- 1955 -



Figure 12 : Embouchure de la Papeava  
- 1960 -



Figure 13 : Embouchure de la Papeava  
- 1976 -

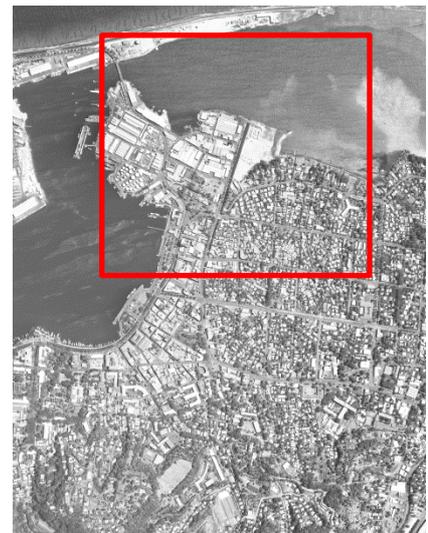


Figure 14 : Embouchure de la Papeava  
- 1981 -

## 2.4. Hydromorphologie et aménagement

En amont du quartier de la Mission, la rivière s'écoule dans un lit aux contours à peu près naturel où les berges sont, par endroit, soutenues par des enrochements plus ou moins stabilisés. Ce tronçon présente à l'amont une pente longitudinale de 3.4% qui s'atténue vers 1% en atteignant la ville (Figure 22 et Figure 23).

Dans la zone urbaine, le cours d'eau est totalement canalisé dans un ouvrage de béton (Figure 15). Il est même recouvert sur 400 m le long de la rue des remparts jusqu'à l'avenue du Prince Hanoï (Figure 17 et Figure 18). Ce tronçon présente plusieurs dysfonctionnements hydrauliques :

- la pente est très faible, de 0.6% en s'atténuant à moins de 0.1% en approchant de l'embouchure ;
- les berges ne sont pas très élevées et réduisent encore à l'embouchure. La route est au même niveau que la berge (Figure 16). En cas d'inondation, les eaux ruissellent facilement sur ces axes de circulation ;
- de nombreuses canalisations d'assainissement sont connectées dans le lit bien en dessous du niveau de débordement entraînant un effet de reflux en cas de crue (Figure 19 et Figure 20) ;
- le pont à l'embouchure limite la section d'écoulement ;
- une montée des eaux dans le lagon peut compliquer l'évacuation des eaux.



Figure 15 : Canal de la Papeava dans la zone urbaine.  
Vue vers l'aval.



Figure 16 : Canal de la Papeava dans la zone urbaine.  
Vue vers l'amont.



Figure 17 : Entrée amont du tronçon recouvert.



Figure 18 : Sortie aval du tronçon recouvert.



Figure 19 : Déversement d'une buse d'assainissement des eaux pluviales.



Figure 20 : Connexion du système d'assainissement d'eau pluviale d'un quartier mitoyen.

Un autre élément peut perturber l'hydraulique de la rivière, 25 ponts ou passerelles ont été identifiés sur le tronçon étudié (en comptant la section recouverte comme un ouvrage traversant), soit 1 tous les 155 mètres. Leur structure se rapproche souvent plus du dalot que de l'ouvrage d'art. L'écoulement des eaux est contraint par l'espace qui se réduit sous chacun de ces ponceaux et le risque d'embâcle augmente significativement (Figure 21).



Figure 21 : Passerelle au niveau de la caserne de Papeete.

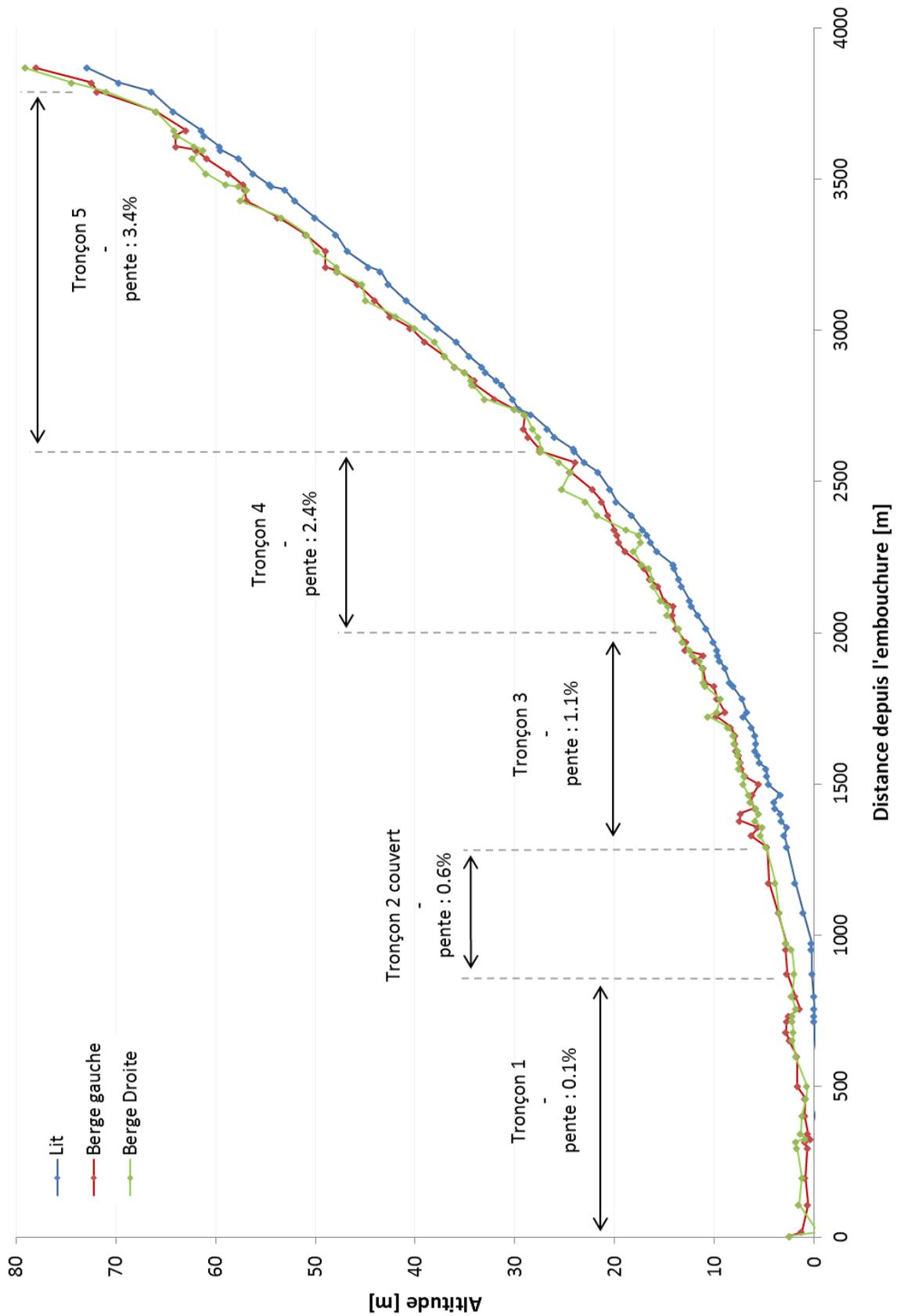


Figure 22 : Profil en long de la rivière Papeava dans la basse vallée (3 800 km).  
(relevé topographique réalisé par le cabinet Wild Géomètres)

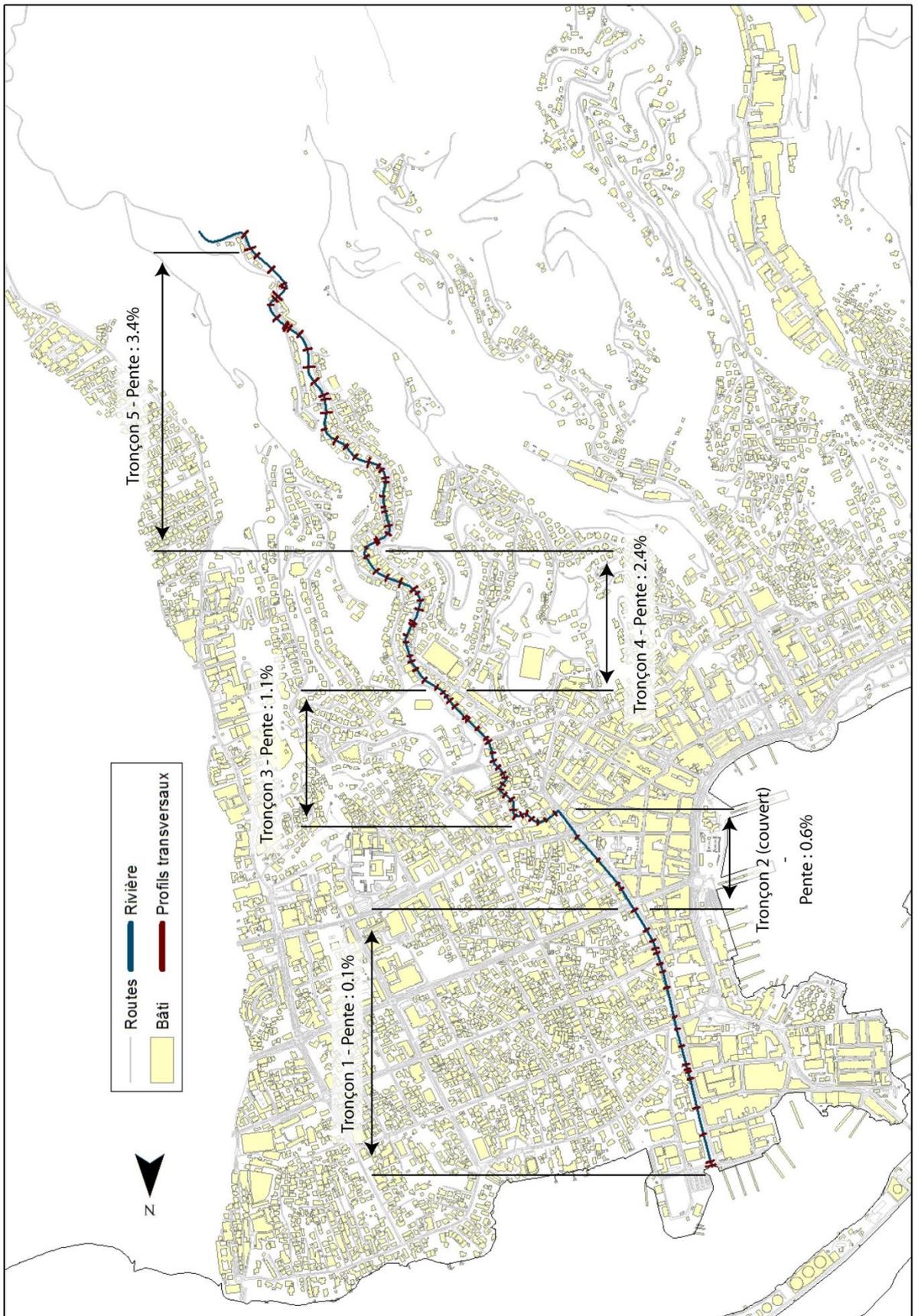


Figure 23 : Plan de situation de la rivière Papeava divisée en 5 tronçons.



## 3. Modélisation hydraulique

### 3.1. Stratégie de modélisation

La zone d'étude autour de la rivière Papeava traverse la plaine côtière fortement urbanisée. La topographie y est très peu accidentée, la direction des écoulements peut alors difficilement s'y résumer à un aspect unidimensionnel. En outre, les données de terrain disponibles offrent une bonne précision. Ces arguments suggèrent l'utilisation d'un modèle en deux dimensions pour correctement représenter les écoulements de la rivière Papeava et l'évolution des inondations lorsque le lit déborde dans basse vallée.

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

- 1- La surface d'étude est discrétisée en cellules polygonales de 30 m de côté. La précision est augmentée dans le chenal d'écoulement dont le profil fut relevé par un cabinet de géomètre, et autour des voies de circulation qui favorisent la dispersion rapide des eaux ;
- 2- Les singularités du lit naturelles (rétrécissement, élargissement, coude) ou artificielles (pont, gué ...), sont intégrées dans la représentation du modèle ;
- 3- Les données hydrologiques permettent de reconstruire les hydrogrammes de crue et de se baser sur un régime d'écoulement non-permanent (*Unsteady flow*) ;
- 4- A défaut de mesures directes dans le lit de la rivière, la calibration du modèle est réalisée à partir des témoignages des riverains évaluant les hauteurs d'eau atteintes lors des crues les plus importantes. Le souvenir humain et quelques photos sont ici les seules données utilisables.

Les détails des choix techniques sont précisés dans les paragraphes suivants.

### 3.2. Construction géométrique et données utilisées.

La représentation de la zone d'étude s'appuie sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT). La vallée de la Papeava a été reconstituée à partir de deux jeux de données géographiques, fournies par la cellule cartographie du Service de l'Urbanisme de Polynésie française, qui furent combinées pour obtenir une représentation topographique continue (Figure 24) :

- l'opération « LIDAR Polynésie française 2015 » a permis de générer des données topographiques très précises relevées par un laser aéroporté (SHOM<sup>1</sup>, 2015). C'est essentiellement la bande côtière du nord à l'ouest de l'île de Tahiti qui fut couverte. Pour la vallée de Hamuta, ces données couvrent une distance de 2 380 m vers l'amont en partant de la ligne côtière avec une précision de 1 m ;
- au-delà le terrain est dessiné par un MNT un peu moins précis (> 5m) datant de 2013.

Pour affiner la représentation géométrique du chenal d'écoulement dans le modèle, des relevés topographiques furent réalisés par le bureau d'étude Wild Géomètres sous la supervision de la Direction de l'Équipement. Les 168 profils en travers couvrent la largeur de plein bord de la rivière. Ils ont permis de reconstituer très précisément le chenal d'écoulement sur tout le tracé modélisé (Figure 23).

Les singularités du lit (rétrécissement, élargissement, coude) sont contrôlées dans la représentation géométrique du profil en long. Enfin, les ouvrages traversants (pont, passerelle) sont intégrés dans la modélisation à partir des relevés du bureau de géomètre.

La représentation géographique en deux dimensions de la zone d'étude nécessite un discrétisation de l'espace par un maillage de cellules polygonales (Figure 25). Initialement le quadrillage s'est construit autour de cellules couvrant 1 225 m<sup>2</sup> (30x30). Un maillage resserré encadre le lit de plein bord de la rivière (5x5), ce qui améliore significativement la précision du modèle. Globalement, le maillage est formé par 4 494 cellules d'une superficie moyenne de 490 m<sup>2</sup>. La plus petite couvre une aire de 20 m<sup>2</sup>, la plus grande 2 500 m<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

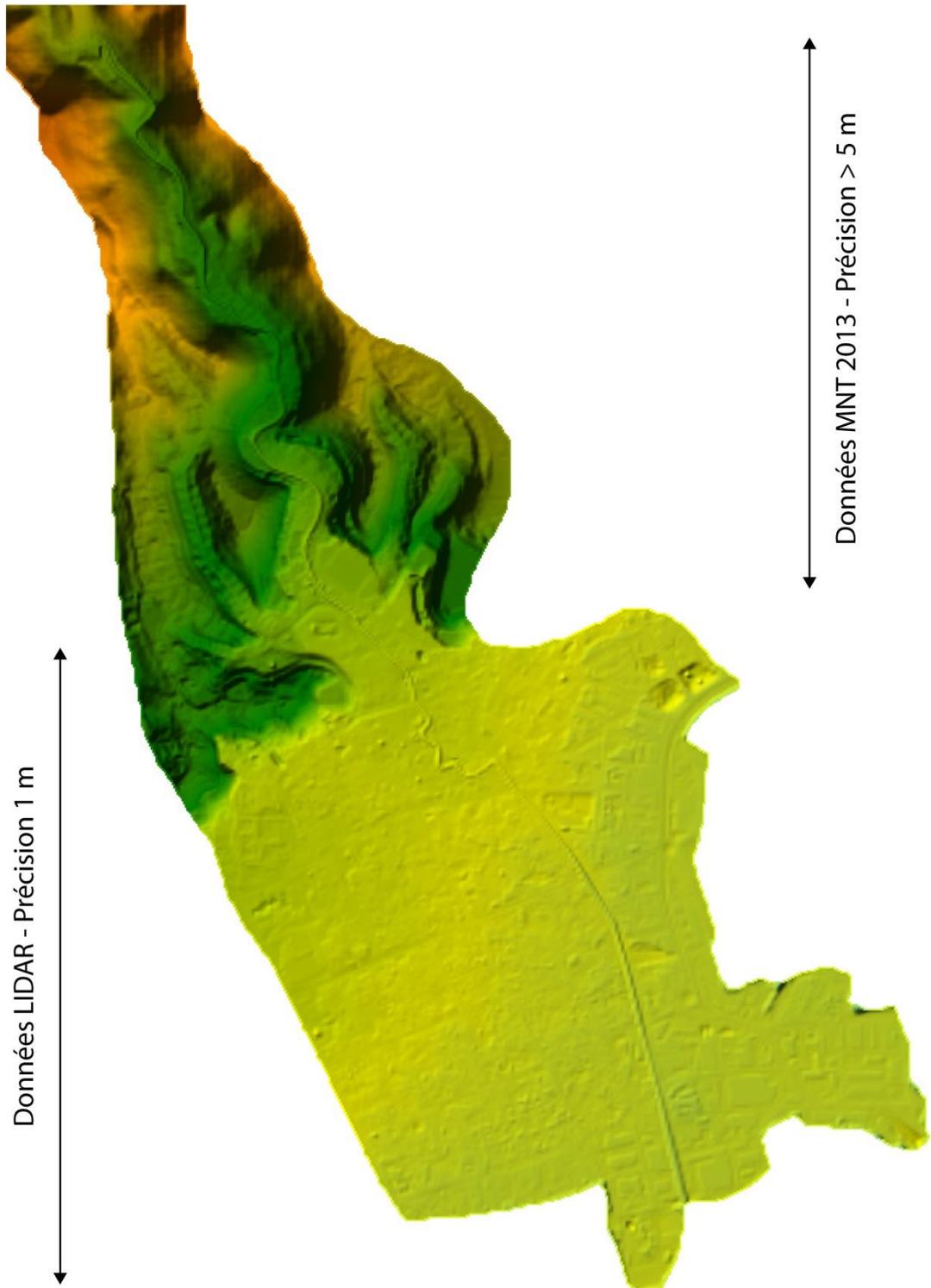


Figure 24 : MNT reconstitué de la basse vallée de la Papeava.

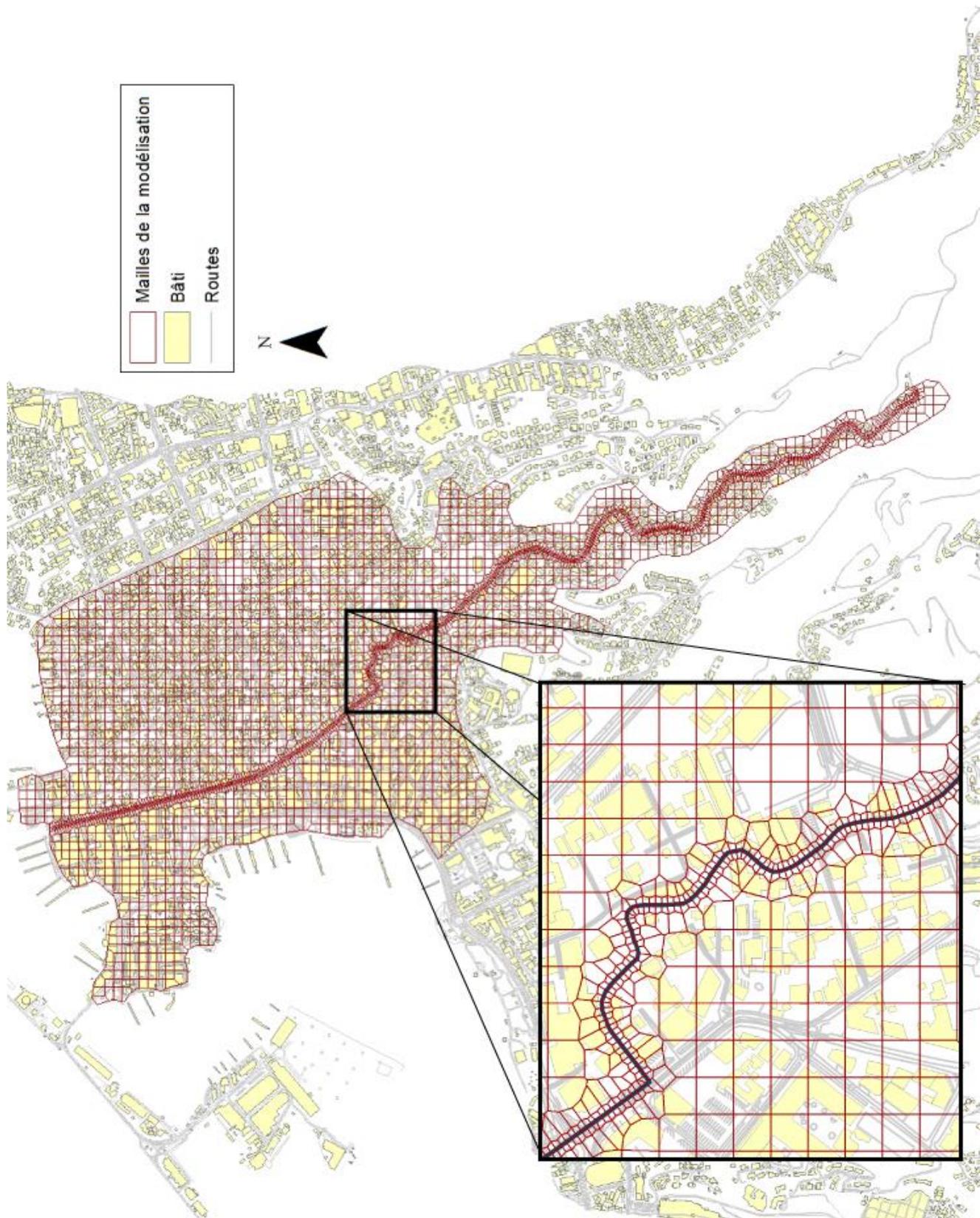


Figure 25 : Discretisation de la zone d'étude par un maillage de 4 494 cellules.  
Le maillage est resserré autour du lit de plein bord.



### 3.3. Coefficient de rugosité de Manning

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

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

En fonction des caractéristiques de rugosités des surfaces, plusieurs zones ont été différenciées et un coefficient de Manning distinct a été appliqué. Pour les espaces les plus urbanisés, le sol est soit revêtu, soit soumis à un tassement favorisant le ruissellement. La conséquence est une rugosité réduite. Le coefficient de Manning est estimé entre 0.013 (surface revêtue : ciment, bitume) et 0.05 (terre-plein en terre), essentiellement en fonction de la couverture du sol. Les valeurs ont été initialement définies à partir des tables, consultables en annexe de ce document, qui ont fait l'objet de nombreuses validations et de plusieurs publications (e.g., Brunner, 2016).

En fonction des résultats obtenus au terme des premières simulations, les coefficients de rugosité sont corrigés, ce sont les paramètres d'ajustement du modèle qui permettent d'obtenir la réponse la plus fidèle à la réalité des informations de calage recueillies. La cohérence physique de ces paramètres de frottement reste toutefois le guide du modélisateur.

La répartition géographique des valeurs du coefficient de rugosité est présentée sur la carte de la Figure 26.

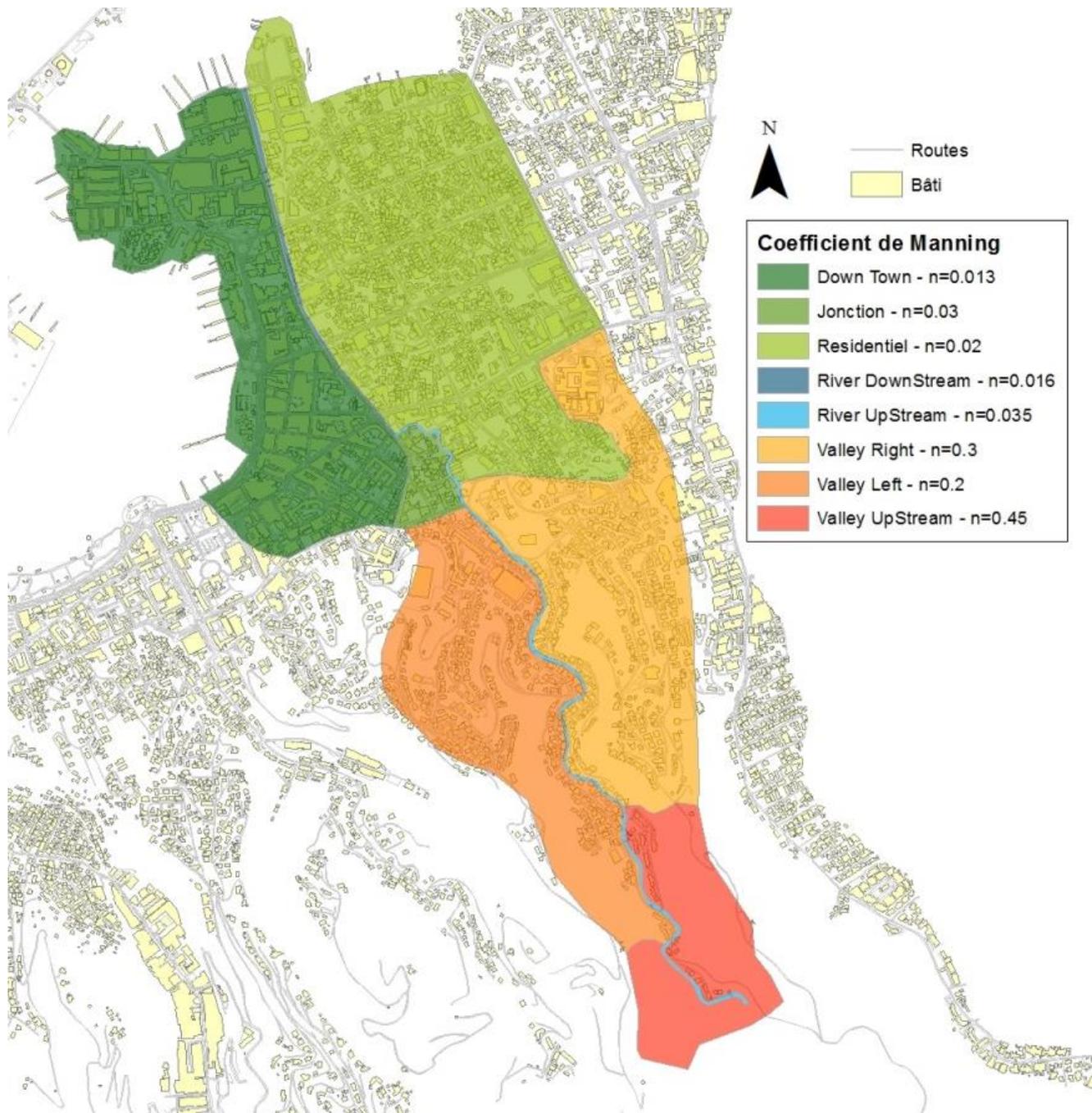


Figure 26 : Répartition géographique des coefficients de rugosité.

### 3.4. Analyse hydrologique

#### 3.4.1. Données disponibles

Sous l'influence prépondérante des alizés d'est/nord-est, les courants aériens des systèmes dépressionnaires se heurtent aux reliefs des îles hautes et cherchent à les contourner ou à les surmonter. La topographie joue ainsi un rôle important dans le déclenchement des épisodes pluvieux. Lorsque les masses d'air humide remontent les pentes du relief (phénomènes d'ascendance), elles rencontrent des températures plus basses en altitude, ce qui favorise la condensation et donc les précipitations (Cauchard et Bergès, 1990). Les versants est, au vent, subissent des précipitations beaucoup plus abondantes qu'à l'ouest, sous le vent (Figure 27). Après avoir franchi les crêtes, les courants aériens redescendent le long des pentes, le vent et les nuages se dissipent alors. En altitude, le cumul annuel de pluie peut atteindre plus de 10 000 mm d'eau. Dans la partie ouest de l'île, la pluviométrie annuelle s'établit plutôt entre 3 500 à 4 000 mm (Lafforgue, 1993) (Figure 28). Les disparités pluviométriques sont également dues à l'altitude et à la saisonnalité.

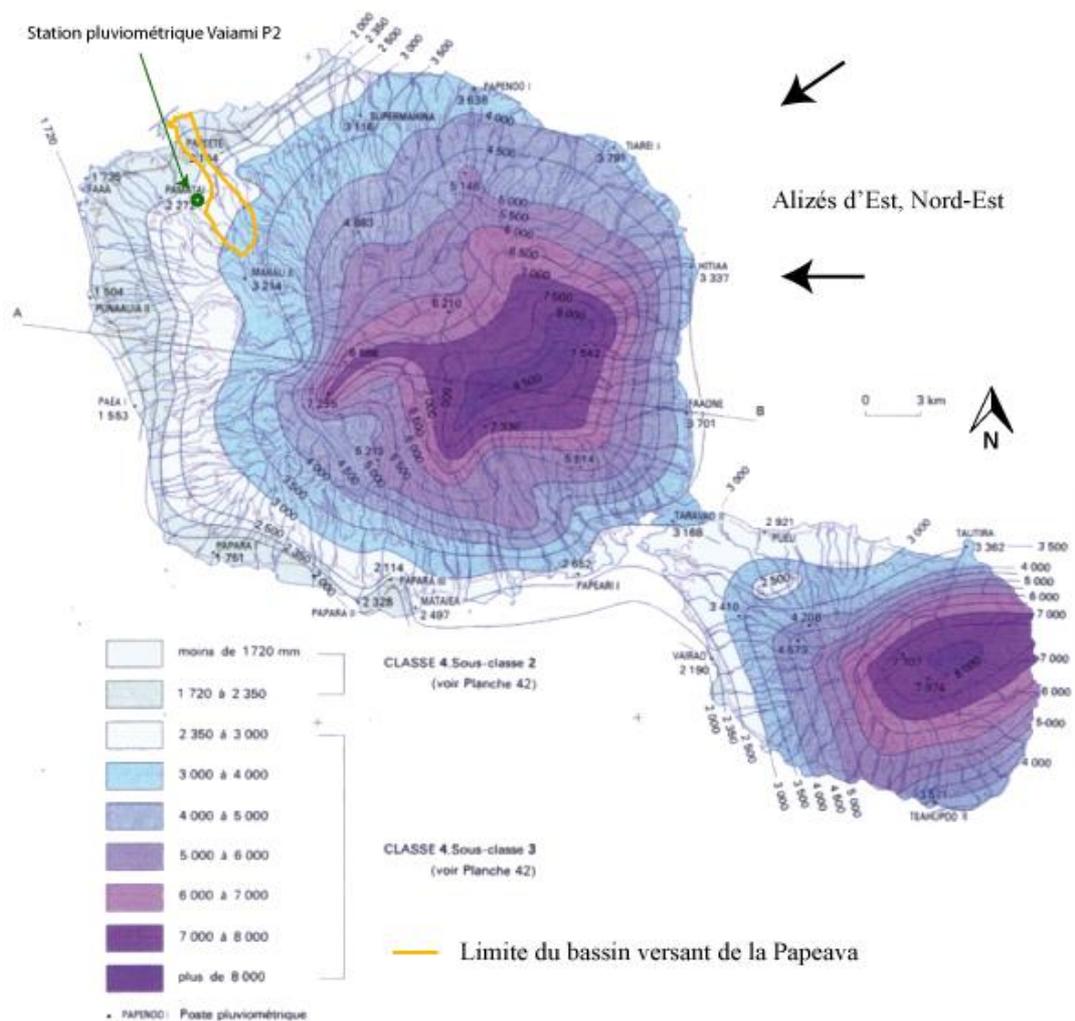


Figure 27 : Isohyètes des précipitations moyennes annuelles de l'île de Tahiti.  
(tiré de Lafforgue, 1993)

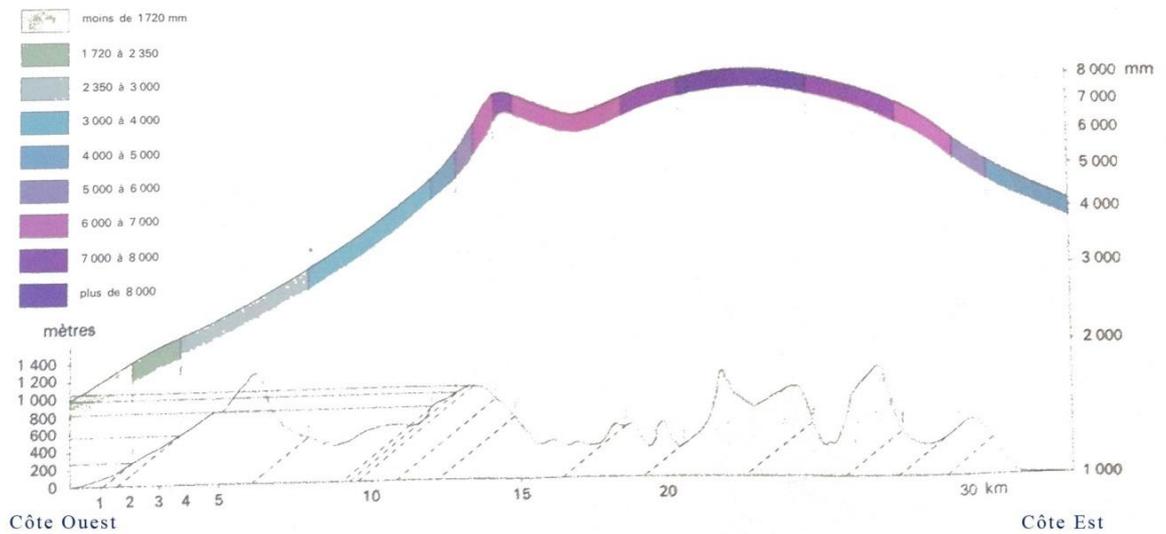


Figure 28 : Dissymétrie pluviométrique entre les versants est et ouest sur l'île de Tahiti.  
(Lafforgue, 1993).

Les données hydrologiques de la Polynésie française sont actuellement sous la gestion de la cellule hydrologie du GEGDP<sup>2</sup>, sous la tutelle de la Direction de l'Équipement. Cette cellule maintient le réseau de mesure actuellement déployé sur l'île de Tahiti, mais hérité de la section hydrologie de l'ORSTOM<sup>3</sup> qui installa les premiers appareils de mesure en 1972. Actuellement, 26 stations équipées d'un appareil automatique enregistrent en continu la dynamique de l'aléa pluviométrique. Les données informatisées les plus anciennes datent de 1987.

La vallée de la Papeava s'est creusée à travers une planète du bouclier originel (cf. Section 2.1). A l'amont de la plaine alluviale, son profil est celui d'un bassin versant étroit, mais allongé. Cette configuration ne couvre pas une superficie très grande et des contreforts abrupts encadrent le fond de vallée. La capacité de réservoir de ce bassin versant est alors limitée. La conséquence est un débit de base faible, proche de l'étiage. Par contre en saison humide, les épisodes pluvieux sont particulièrement intenses et les débits peuvent s'accroître dans des proportions très importantes.

<sup>2</sup> Groupe d'Etude et de Gestion du Domaine Public

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

### 3.4.2. Pluviométrie

Le calcul hydrologique doit permettre de simuler une onde de crue correspondant à un évènement rare, à très rare ( $Q_2$ ,  $Q_{10}$ ,  $Q_{50}$  ou  $Q_{100}$ ). En fonction des données disponibles, différentes approches sont envisageables (cf. Section 7.1).

Dans le cas de la rivière de la Papeava, l'étude s'appuiera sur le principe de la méthode rationnelle en cherchant à convertir l'intensité des épisodes de pluie en débit. Dans le contexte de la modélisation hydraulique, le débit est estimé en entrée de la zone d'étude soit à la côte 75 m.

L'hydrologie dans le bassin versant de la Papeava s'appuie sur les données du pluviomètre VAIAMI P2 situé sur la crête ouest ( $149^{\circ}33'32''$  W -  $17^{\circ}34'32''$  S) à l'altitude de 470 m. Sa position et la taille réduite de la vallée permettent d'utiliser les résultats de cette station pour spatialiser les pluies dans la zone contributive.

Les données disponibles couvrent une période de 27 ans entre 1988 et 2015. Même si certaines années présentent quelques lacunes, la chronique des cumuls annuels (Figure 29) permet d'apprécier l'hydrologie de la zone. Le cumul de pluie annuel moyen s'élève à 1 866 mm (ou  $l/m^2$ ) avec une variabilité importante entre les années particulièrement sèches (ex : 1 039 mm en 1992) et les années les plus humides (3 073 mm en 2007). Ces valeurs, tirées des données brutes, sont légèrement inférieures aux chroniques éditées par l'ORSTOM en 1993 (Lafforgue, 1993).

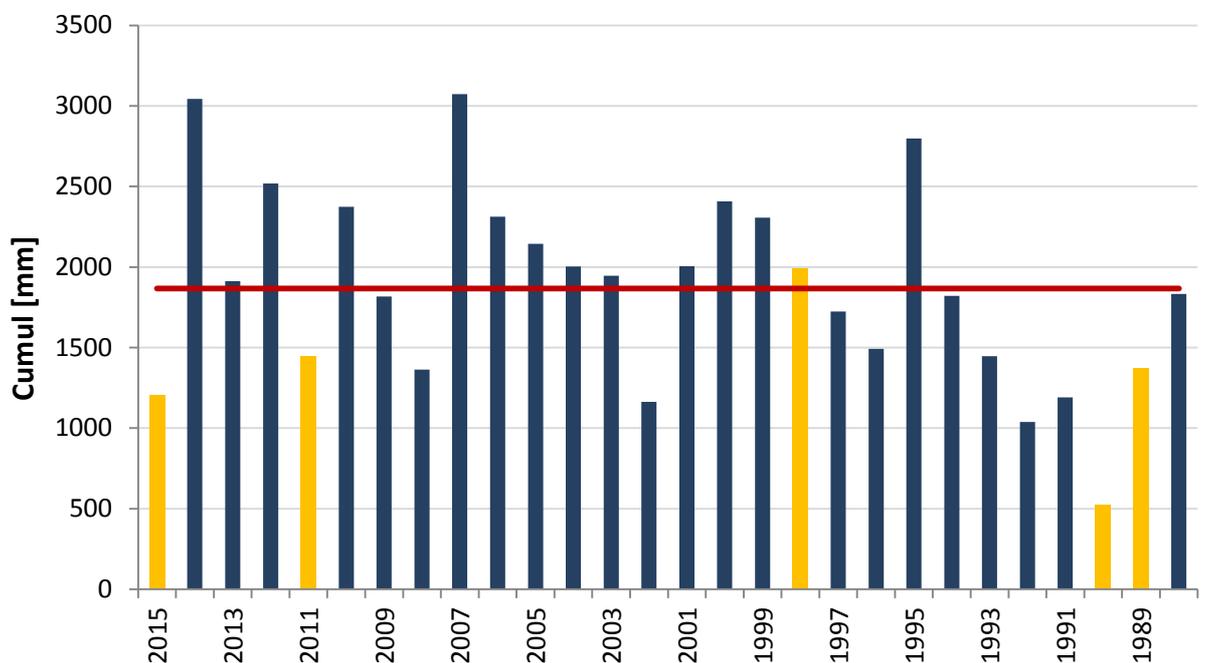


Figure 29 : Cumul pluviométrique annuel entre 1993 et 2017.  
Les années présentant des lacunes sont distinguées par la couleur jaune.

L'analyse des cumuls moyens mensuels (Figure 30) permet d'observer la saisonnalité tropicale qui apparaît clairement avec une différenciation forte entre la période humide de décembre à mars et la période sèche élargie entre avril et novembre.

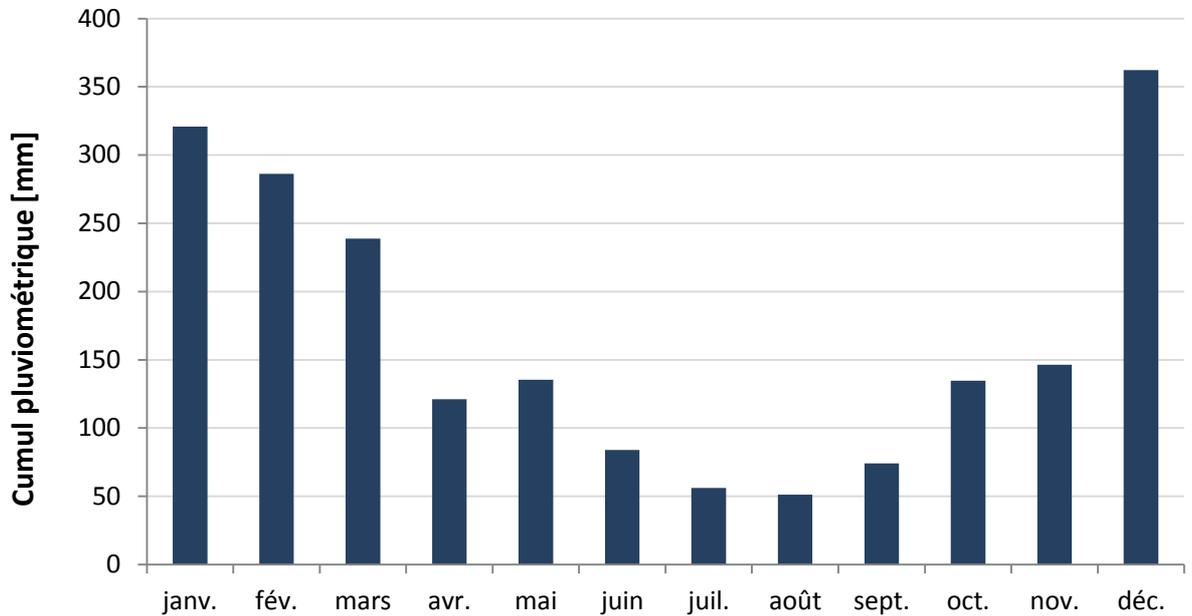


Figure 30 : Cumul pluviométrique mensuel moyen entre 1988 et 2018 pour la station Vaiami.

Pour convertir la pluie en débit, surtout dans le cadre d'un épisode particulièrement intense, il est nécessaire de déterminer le temps de concentration du bassin versant qui doit correspondre au temps mis par une molécule d'eau pour atteindre un point de la rivière à partir du moment où la goutte touche toujours le sol.

La zone contributive en amont de la zone de modélisée couvre une surface de 430 ha, sa longueur est de 4 300 m pour une variation maximum de l'altitude de 1 065 m. La pente moyenne est de 25%. Ces paramètres géographiques permettent de calculer le temps de concentration de la zone (Tableau 1).

Tableau 1 : Estimation du temps de concentration de la zone contributive de Hamuta, au-delà de la zone habitée, à 3 500 m de l'embouchure.  
(surface = 430 ha ; longueur = 4 300 m ; pente moyenne = 25%)

Méthode Kirpich <i>BV urbain</i>	Méthode Passini <i>Bv rural</i>	Méthode Ventura <i>Bv rural</i>	Méthode Giandotti <i>Bv rural</i>	Méthode Ventura <i>Bv rural</i>
21	34.5	32	34	39

Les temps de concentration calculés ne sont pas longs, ils correspondent à une zone contributive peu étendue. Les méthodes s'appliquant plus aisément aux bassins versants ruraux sont préférées. Au regard des résultats et du retour d'expérience d'autres vallées similaires, le temps de concentration choisi est de 35 min.

Le Tableau 2 présente les pics de pluviométrie sur une durée de 35 min pour chaque année entre 1987 et 2015. La station de la Vaiami a enregistré un record, le 30 décembre 2004 entre 15h55 et 16h30 avec un maximum à 44 mm (ou l/m<sup>2</sup>). L'amplitude est importante avec une variation allant de 1 à 4 en fonction des années.

Tableau 2 : Cumul pluviométrique maximum par année sur une période de 35 min

Année	Station Fautaua	Année	Station Fautaua
2015	40	2000	32
2014	37.5	1999	24.5
2013	41	1998	35.5
2012	29.5	1997	26.5
2011	25.5	1996	21.5
2010	39.5	1995	26.5
2009	32	1994	14.5
2008	25	1993	13
2007	40	1992	11.5
2006	41.5	1991	14
2005	43	1990	10.5
2004	44	1989	13
2003	38.5	1988	19.5
2002	27.5	1987	14.5
2001	24.5		

Même si le recul historique n'est pas totalement suffisant (28 ans), l'analyse fréquentielle des pluies par la loi de Gumbel a permis d'estimer les événements rares avec de longues périodes de retour pour la station pluviométrique étudiée (Tableau 3).

Tableau 3 : Hauteur d'eau précitée en mm (ou l/m<sup>2</sup>) en 40 min lors d'évènements météorologiques rares, à très rares.

Période de retour	2 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Vaiami (alt. 470 m)	26	42	48	56	62

Dans la nuit du 21 au 22 janvier 2017, la rivière Papeava a largement débordé et inondé les rues de Papeete. En se référant aux données enregistrées cette nuit-là, il apparaît que le niveau des précipitations (38 mm cumulés sur 35 min) présente un temps de retour inférieur à 10 ans.

### 3.4.3. Hydrométrie

Dans la formule de la méthode rationnelle, l'intensité de la pluie est rapportée à la hauteur d'eau précipitée en une heure [mm/h]. L'une des hypothèses sous-jacentes est de considérer qu'au cours d'un pas de temps défini la pluie est uniforme dans l'espace. Cette approximation ne représente pas la réalité d'un épisode météorologique, notamment lorsque le relief est escarpé sous un climat tropical où l'intensité d'un orage peut être très localisée. L'altitude joue par exemple un rôle très important dans la spatialisation de la pluie (Aureau, 2014). Ce biais ne pourrait être corrigé qu'en disposant d'un réseau de stations pluviométriques plus dense pour spatialiser. Toutefois les estimations obtenues avec les données disponibles ont une légitimité forte.

En appliquant la formule de la méthode rationnelle, l'intensité de la pluie sur 35 min est rapportée à la taille du bassin versant contributif ajusté d'un coefficient de ruissellement. Ce coefficient est un paramètre difficile à estimer puisqu'il est très lié aux conditions morphologiques (pentes), aux conditions du sol (infiltration) et du couvert forestier (évapotranspiration) spécifique à chaque bassin versant. Seules des mesures sur le long terme permettraient d'évaluer exactement sa valeur, ou plus justement ses valeurs qui sont également conditionnées par l'intensité d'une averse et des conditions initiales (sol saturé ou non).

Plusieurs travaux ont cherché à évaluer des coefficients de ruissellement et à classer les vallées de Polynésie française en fonction de ce paramètre (Bouvier et Denat, 2006 ; Wotling, 2001 ; Lafforgue et Robin, 1989). L'exercice est difficile et les valeurs proposées sont extrêmement volatiles (de 0.25 à 1) en fonction des contextes géographique, morphologique et hydrologique. D'un point de vue plus général, la méthode GRADEX soutient des coefficients de ruissellement qui tendent vers 1 lors des averses les plus intenses avec un temps de retour supérieur à 10 ans. Afin de tenir compte des spécificités physiques et environnementales du bassin versant et des études passées, la valeur de  $C_r$  est choisie évolutive pour la vallée de la Papeava : 0.5 pour des temps de retour inférieur à 10 ans ; 0.6 pour un évènement décennal ; 0.7 pour des temps de retour de 20 ans et 50 ans ; et enfin 0.8 pour les épisodes centennaux.

Les estimations de débit obtenues sont élevées, mais cohérentes avec les valeurs calculées dans d'autres études. Les résultats sont comparés à l'étude de 2006 (SPEED), à un travail de Joël Danloux dans les années 80 et aux estimations calculées à partir des paramètres de Montana fournis par le GEGDP (Tableau 4). Nos calculs aboutissent à des débits, décennal et centennal, équivalents aux résultats de 2006. Si les valeurs obtenues à partir des coefficients de Montana sont équivalentes pour les évènements les plus rares, les estimations des crues, bisannuelle et décennale, sont significativement plus élevées.

Tableau 4 : Débits de pointe estimés pour les crues rares à très rares.

Débit de pointe [m <sup>3</sup> /s]	Période de retour			
	100 ans	50 ans	10 ans	2 ans
<b>Vai-Natura (2018)</b>	102	80	52	16
<b>Speed (2006)</b>	95	-	50	-
<b>Danloux J.</b>	65	-	35	-
<b>avec coef. Montana</b>	103	85	65	49

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

Pour terminer l'approche hydrologique et améliorer la précision de la modélisation, il est utile de disposer de l'onde de crue. Comme il n'existe pas de mesures directes, l'hydrogramme se construit à partir d'un évènement de pluie intense avec un pas de temps correspondant au temps de concentration du bassin versant. L'épisode choisi est celui du 20 février 2005. Le pic de crue est atteint à 21h30, il s'agit de la crue maximum observée ( $Q_{\max} = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (Figure 31).

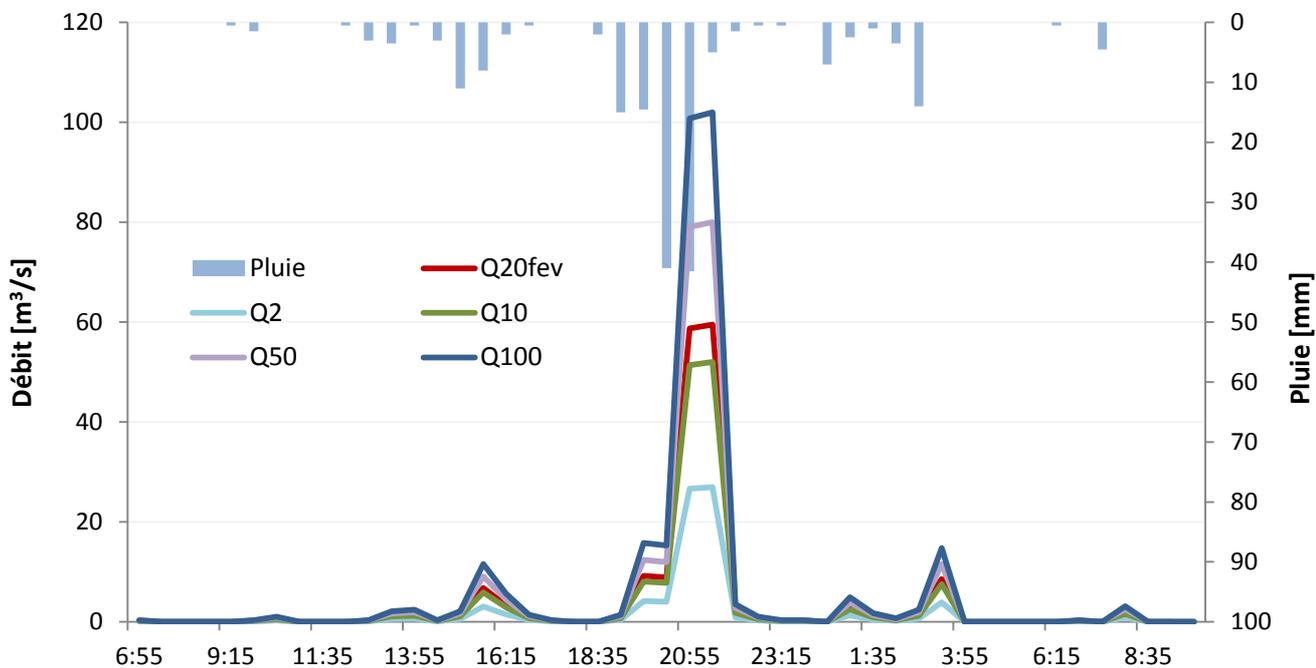


Figure 31 : Ondes de crue reconstruites à partir de l'épisode de pluie du 20 février 2005.

### 3.5. Remarques complémentaires

La rivière Papeava est utilisée comme exutoire dans le système de drainage des eaux pluviales de la ville, notamment par les quartiers situés sur la rive est. De nombreuses connexions sont visibles dans le tronçon canalisé (Figure 19 et Figure 20). Ces ouvertures sont situées à peu près à mi-hauteur des murs qui structurent le canal. Lors des grandes crues, le niveau d'eau est largement supérieur à ces embrasures. Par un effet de pression, l'eau a plutôt tendance à refluer vers ces systèmes d'assainissements plutôt qu'alimenter la rivière. Ce phénomène accentue l'inondation dans les quartiers alentour en contrariant fortement l'évacuation des eaux, mais n'impacte pas le débit de la rivière qui est de toute façon très important. Aucun point d'alimentation complémentaire n'a donc été considéré dans la modélisation.



Figure 32 : Exutoire d'un réseau d'assainissement des eaux pluviales dans la rivière Papeava.

Les 25 ponts, ou passerelles, qui émaillent le cours de la Papeava ont été intégrés à la modélisation en reprenant les données relevées lors de la mission de mesure topographique. La partie couverte du chenal est schématisée dans le modèle comme un dalot de 400 m de longueur.

Les observations recueillies lors de la phase de terrain sont présentées et géo-référencées sur la carte de la Figure 33. Les hauteurs d'eau reportées sont issues des témoignages des riverains et des indices relevés sur les ouvrages ou les murs d'habitation à la suite de l'inondation du centre-ville de Papeete le 22 janvier 2017.

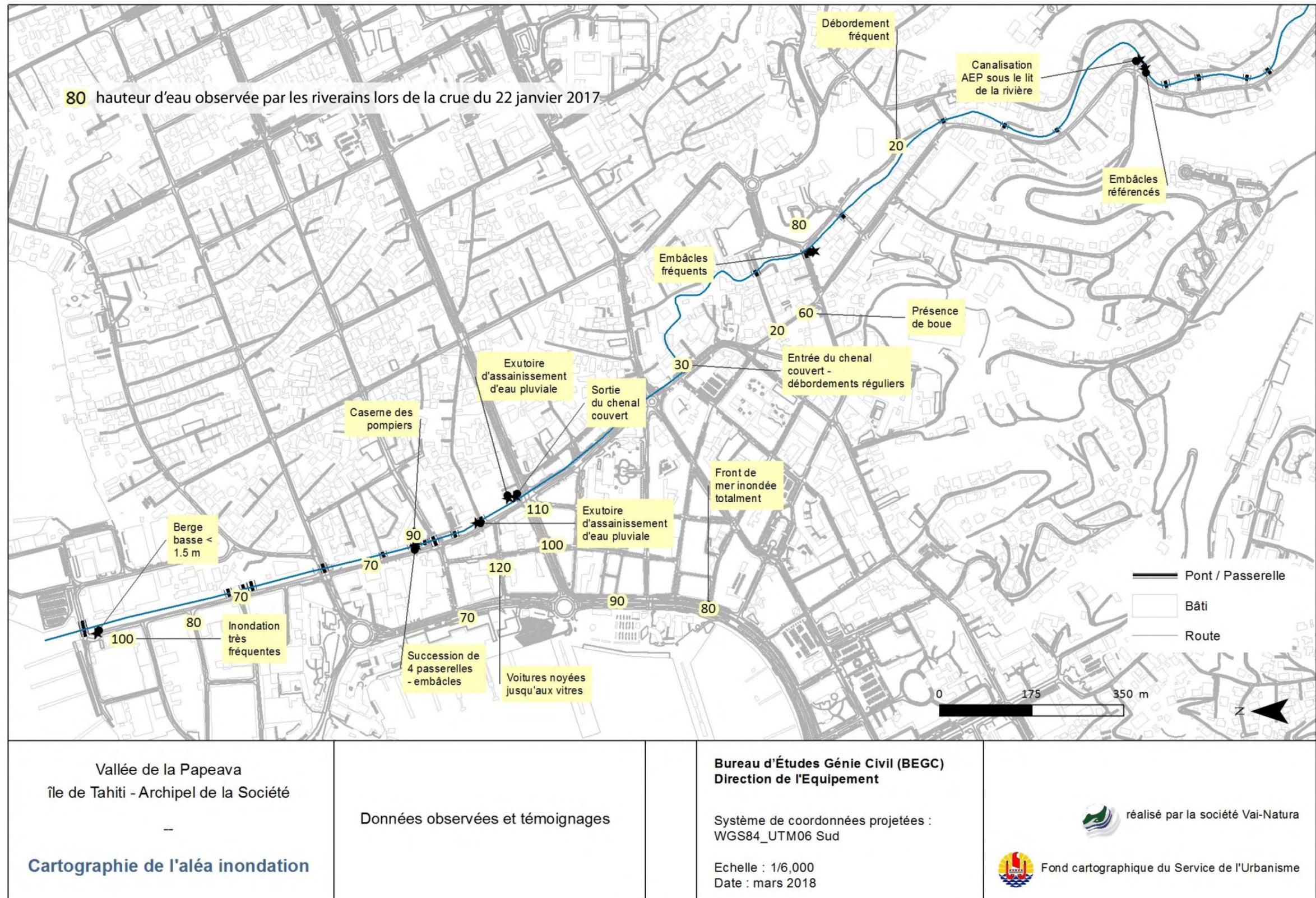


Figure 33 : Données observées et témoignages autour de la rivière Papeava.

## 4. Résultats de la modélisation

### 4.1. Scénarios

La modélisation hydraulique de la rivière Papeava est construite en deux dimensions sur un régime transitoire. Plusieurs scénarios furent testés en faisant varier le débit et la situation hydraulique conformément aux préconisations du cahier des charges de l'étude. Les débits testés sont la crue décennale ( $Q_{10} = 52 \text{ m}^3/\text{s}$ ), la cinquantennale ( $Q_{50} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et la crue centennale ( $Q_{100} = 102 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Pour cette dernière, le niveau de la mer est considéré avec un niveau de la mer à l'embouchure de 1 m. Une dernière simulation prend en compte des embâcles sous certains ponts ou passerelles de la rivière pendant la crue centennale.

Le pic de la crue du 22 janvier 2017 qui inonda une large partie du centre-ville de Papeete est estimé avec un temps de retour inférieur à 10 ans. En considérant, les précipitations sur une période plus longue que le temps de concentration du bassin versant, l'épisode devient plus rare. Le cumul du mois de janvier 2017 est de 986, soit le mois de janvier le plus humide depuis 29 ans. Les quelques photos présentées (Figure 34 à Figure 37) permettent de se rendre compte de l'impact des inondations dans la cité et des débordements. Ces clichés furent récupérés sur les réseaux sociaux.



Figure 34 : Rivière Papeava à 150 m à l'aval de la caserne des pompiers.



Figure 35 : Débordement de la Papeava, tronçon à la sortie de la section couverte.



Figure 36 : Inondations sur l'avenue du Pince Hinoi.



Figure 37 : Inondations au niveau de la gare maritime.

La situation des 25 ponts/passerelles qui traversent la rivière a nécessité une approche spécifique. Les relevés topographiques permettent d'intégrer leur géométrie dans la structure du lit de plein bord. Par contre, les conditions d'obturation partielle ou totale d'une passerelle ont imposé une contextualisation du problème. Il n'aurait pas été réaliste de simuler des embâcles sous les ouvrages. Une passerelle peut s'obstruer si l'espace initial sous le tablier est réduit, si le tronçon amont est fortement végétalisé par des espèces connues pour se déstabiliser, si elle se trouve en un point d'une discontinuité morphologique de la rivière qui ralentirait l'écoulement (rétrécissement, aplatissement de la pente en long, aval d'un coude prononcé), ou si elle n'est pas précédée par un autre ouvrage présentant les mêmes conditions.

Ainsi, l'impact des embâcles fut évalué sous 6 ponts/passerelles qui traversent la Papeava. Cette sélection est le résultat de la situation des ouvrages, des témoignages de riverains et des agents de la Subdivision Technique de Tahiti (STT) de la DEQ qui participent à l'entretien des rivières. Ces ponts sont situés par des cercles jaunes sur la carte de l'aléa inondation  $Q_{100}$  :

- le pont de l'embouchure dont l'espace sous le tablier limite l'évacuation des eaux vers le lagon ;
- la passerelle des pompiers qui est l'ouvrage le moins ouvert de la partie canalisée traversant la ville (hauteur sous tablier = 1.85). Cet ouvrage traversant est suivi d'une succession de 3 passerelles sur une distance inférieure à 80 m, leur section d'écoulement est à peine plus large ;
- l'entrée à l'amont du tronçon couvert de la rivière. Dans la modélisation, la canalisation est schématisée par un grand dalot long de 400 m ;
- le pont de l'évêché est la limite entre la vallée et l'entrée dans le centre-ville. Les embâcles sont également récurrents sous cet ouvrage ;
- le pont au niveau du complexe sportif d'Excelsior. Un embâcle s'est formé lors de la crue de janvier 2017 ;
- une passerelle, à 490 m à l'amont de du pont précédent, qui relie les rues Monseigneur Paul Maze et Papeava. Cet ouvrage traversant est réputé sensible par les agents du STT.

Ces ouvrages traversants offrent peu d'espace sous le tablier, l'accumulation de matières minérales et végétales peut bloquer la totalité de l'écoulement. Les embâcles sont alors modélisés en considérant une obstruction complète du chenal.

Il est intéressant de noter que dans les scénarios des crues les plus fortes, le lit est tellement submergé que les obstructions sous les passerelles sont peu détectables. L'impact des embâcles est prégnant lors des crues moins importantes, mais plus régulières.

## 4.2. Ecoulement et débordement

La capacité d'écoulement du lit de plein bord s'apprécie en observant le niveau de la rivière sur un profil en long. La Figure 38 reprend la géométrie du lit (trait noir) en intégrant les lignes des berges (trait vert pour la berge droite et trait rouge pour la berge gauche). Le profil en bleu est celui d'une crue centennale en tenant compte des embâcles. Le chenal déborde avant la crue décennale, le profil est donc proche pour les autres débits simulés.

Les débordements sont généralisés sur tout le tronçon étudié. La partie amont qui offre une pente plus forte favorise l'écoulement et la hauteur d'eau n'est pas excessive. Avant l'embouchure, le niveau de la rivière dépasse nettement le lit de plein bord de plus d'1 m, notamment sur la berge gauche, côté route. Naturellement, la partie recouverte du canal ne déborde pas, par contre l'eau submerge le lit à son amont.

Il apparaît assez nettement que le lit de la rivière est mal calibré pour drainer le ruissellement du bassin versant. Le dernier évènement du 22 janvier 2017 prouve un sous-dimensionnement du chenal pour des crues dont le temps de retour est inférieur à 10 ans. La modélisation fait apparaître des débordements même pour des évènements bisannuels.

Les cercles orange sur la Figure 36 signalent l'effet des embâcles sous le pont de l'archevêché et la passerelle du complexe sportif. Le débordement est notable avec une chute du niveau d'eau sur quelques dizaines de mètres sur le tronçon aval. Les embâcles à l'aval sont moins significatifs, la submersion des ouvrages débute même sans embâcles, les sections d'écoulement sont insuffisantes.

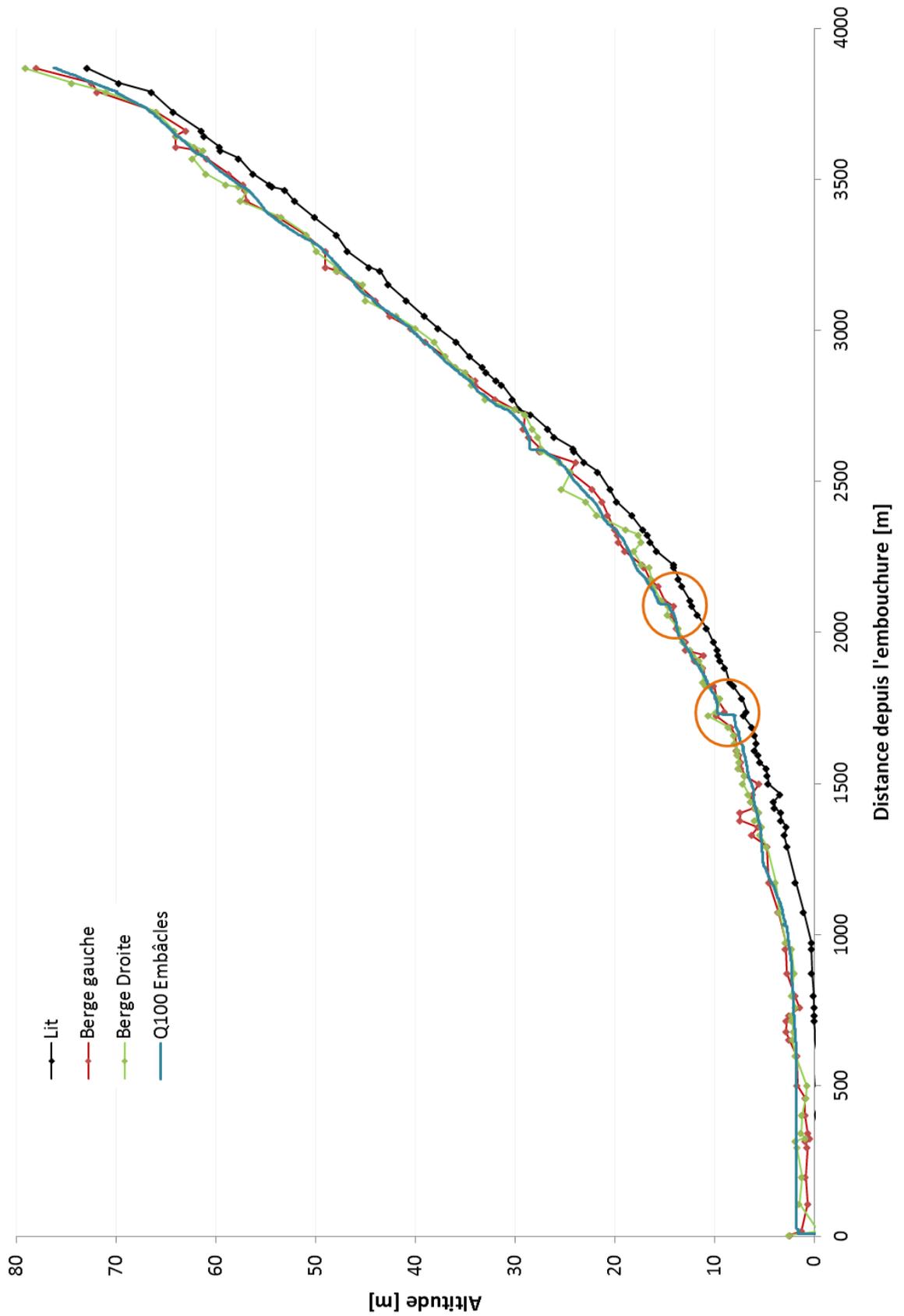


Figure 38 : Lignes d'eau dans le lit de la rivière pour la crue centennale ( $Q_{100} = 102 \text{ m}^3/\text{s}$ ) avec embâcles.

### 4.3. Cartographie de l'aléa inondation

L'aléa inondation est mesuré sur une échelle de trois niveaux : faible, moyen et fort. L'échelle s'évalue en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement obtenues pour la modélisation. Les règles de calcul sont rappelées dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Qualification de l'aléa inondation en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse de l'eau.

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

Les cartes l'aléa inondation sont éditées sur les Figure 39 à Figure 43 :

- la crue décennale ( $Q_{10}$ ) ;
- la crue cinquantennale ( $Q_{50}$ ) ;
- la crue centennale ( $Q_{100}$ ) en tenant compte d'un niveau de la mer de +1m ;
- la crue centennale ( $Q_{100}$ ) en tenant compte d'un niveau de la mer de +1m et de la formation d'embâcle ;
- et l'enveloppe de la crue maximale observée ( $Q_{max}$ ), c'est-à-dire celle du 20 février 2005.

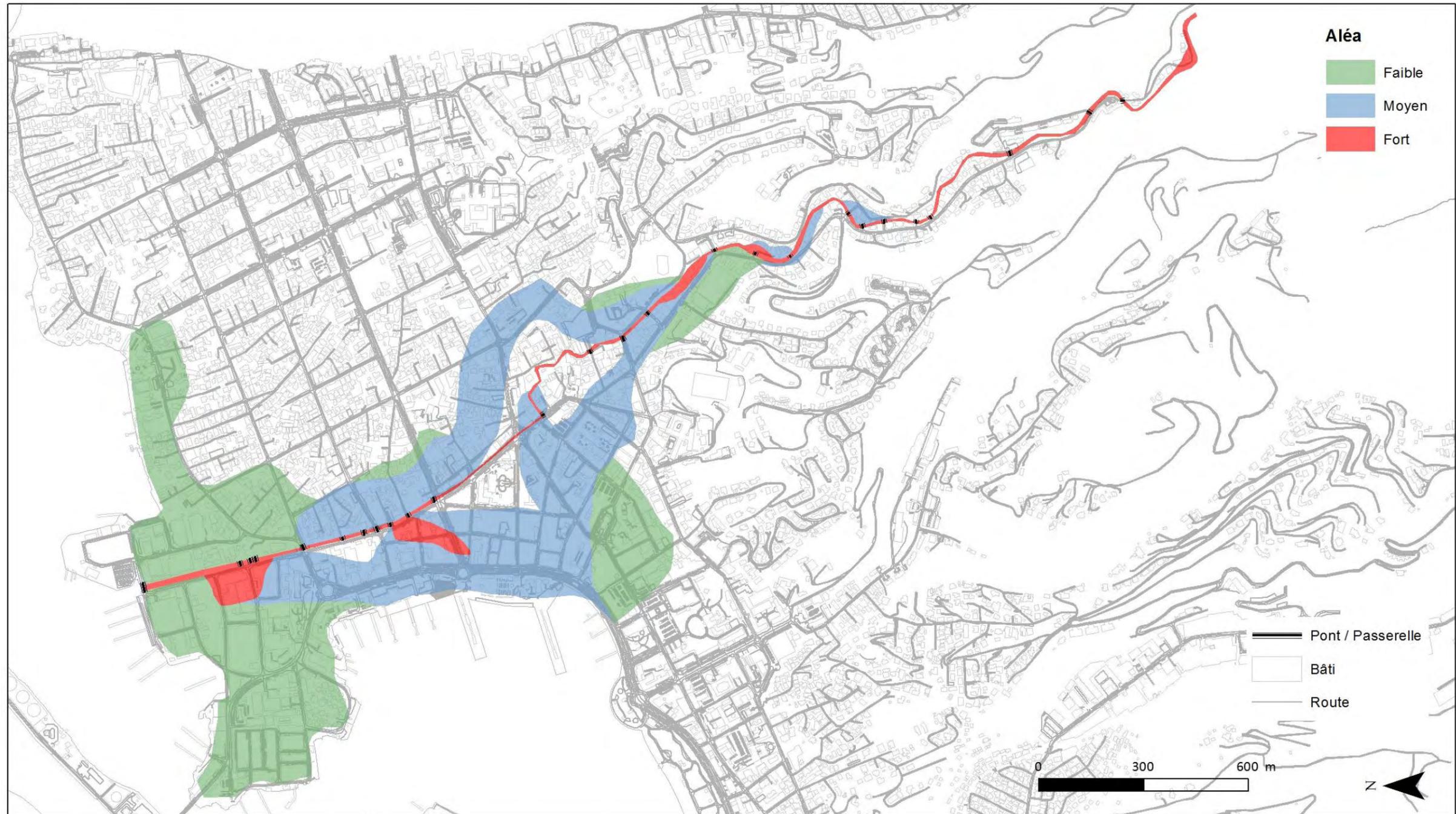
Les zones soumises à l'aléa inondation sont assez étendues. La faible dénivellation dans la plaine et l'urbanisation très couvrante favorise l'expansion des eaux.

La carte de la crue décennale met en évidence une problématique autour de la zone de l'évêché et de l'ouvrage qui traverse la rivière. L'inondation se propage sur la rive droite vers l'école de Fariipiti. La rive gauche est elle aussi submergée, le flux traverse la ville vers la rade de Papeete. D'une certaine manière le pont de l'évêché « protège » le quartier immédiatement à l'aval, où le tracé de la rivière très sinueux ne favorise pas l'écoulement. Par contre, l'entrée du canal couvert est un point de débordement. Le dalot n'est pas suffisamment dimensionné. Le canal couvert offre tout de même une protection aux rues alentour. La dernière partie de la rivière canalisée jusqu'à la zone de Fare Ute, présente 2 points de fragilité qui imposent une couverture par un aléa fort. Le premier se trouve au niveau de la caserne des pompiers où se trouve une succession de 4 passerelles qui proposent fort peu d'espace à l'eau. Le second est situé au niveau de 3 passerelles face aux magasins Yune tung, Kim Fa et Guilloux. Il paraît évident que ces ouvrages sont mal calibrés.

Les crues plus fortes,  $Q_{50}$  et  $Q_{100}$ , augmentent logiquement l'emprise des inondations et le niveau des aléas, avec une zone rouge qui s'étend sur la rive gauche dans le centre-ville de Papeete. Les photos de l'évènement du 20 janvier 2017 confortent cette conclusion.



La dernière carte (Figure 42) présente l'aléa d'une crue centennale en intégrant l'effet des embâcles. Au-delà de l'augmentation, par la modélisation, de la surface de l'aléa fort jusqu'au front de mer, certaines zones autour du lit de la rivière furent classées par l'expertise pour tenir compte de l'érosion des berges et des zones de protection réglementaires autour des rivières (délibération n°13/1958 du 7 février 1958, sur le régime des eaux et forêts). Ces espaces qui furent corrigés, ou ajoutés, sont discutés en annexe de cette étude (Section 7.3).



<p>Vallée de la Papeava île de Tahiti - Archipel de la Société</p> <p>—</p> <p><b>Cartographie de l'aléa inondation</b></p>	<p><b>Modélisation</b></p> <p>—</p> <p>Q10 = 52 m<sup>3</sup>/s</p>	<p><b>Bureau d'Études Génie Civil (BEGC)</b> Direction de l'Équipement</p> <p>Système de coordonnées projetées : WGS84_UTM06 Sud</p> <p>Echelle : 1/10,000 Date : mars 2018</p>	<p> réalisé par la société Vai-Natura</p> <p> Fond cartographique du Service de l'Urbanisme</p>
---	---	---	---

Figure 39 : Cartographie de l'aléa inondation pour la rivière Papeava pour la crue décennale, 52 m<sup>3</sup>/s.

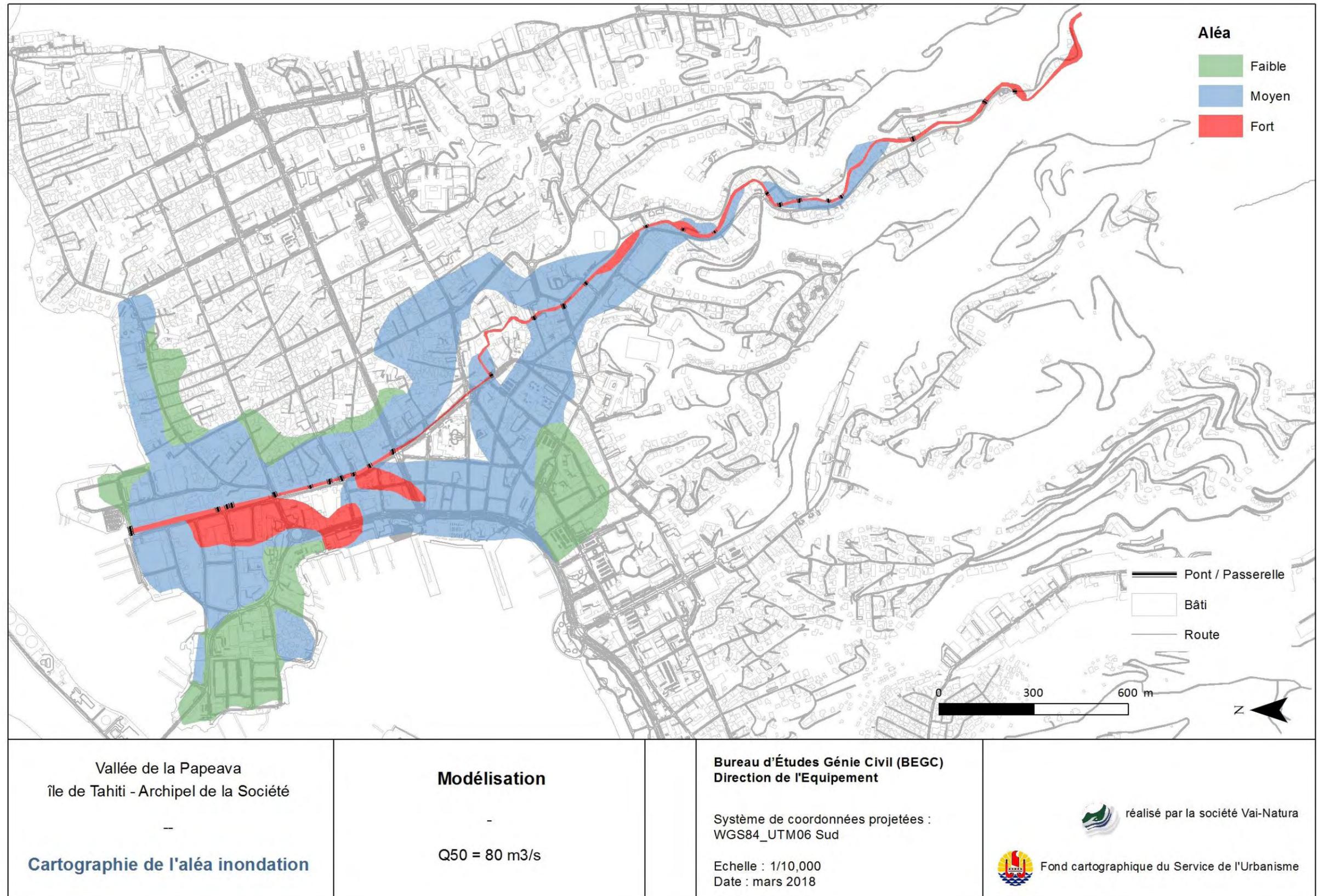
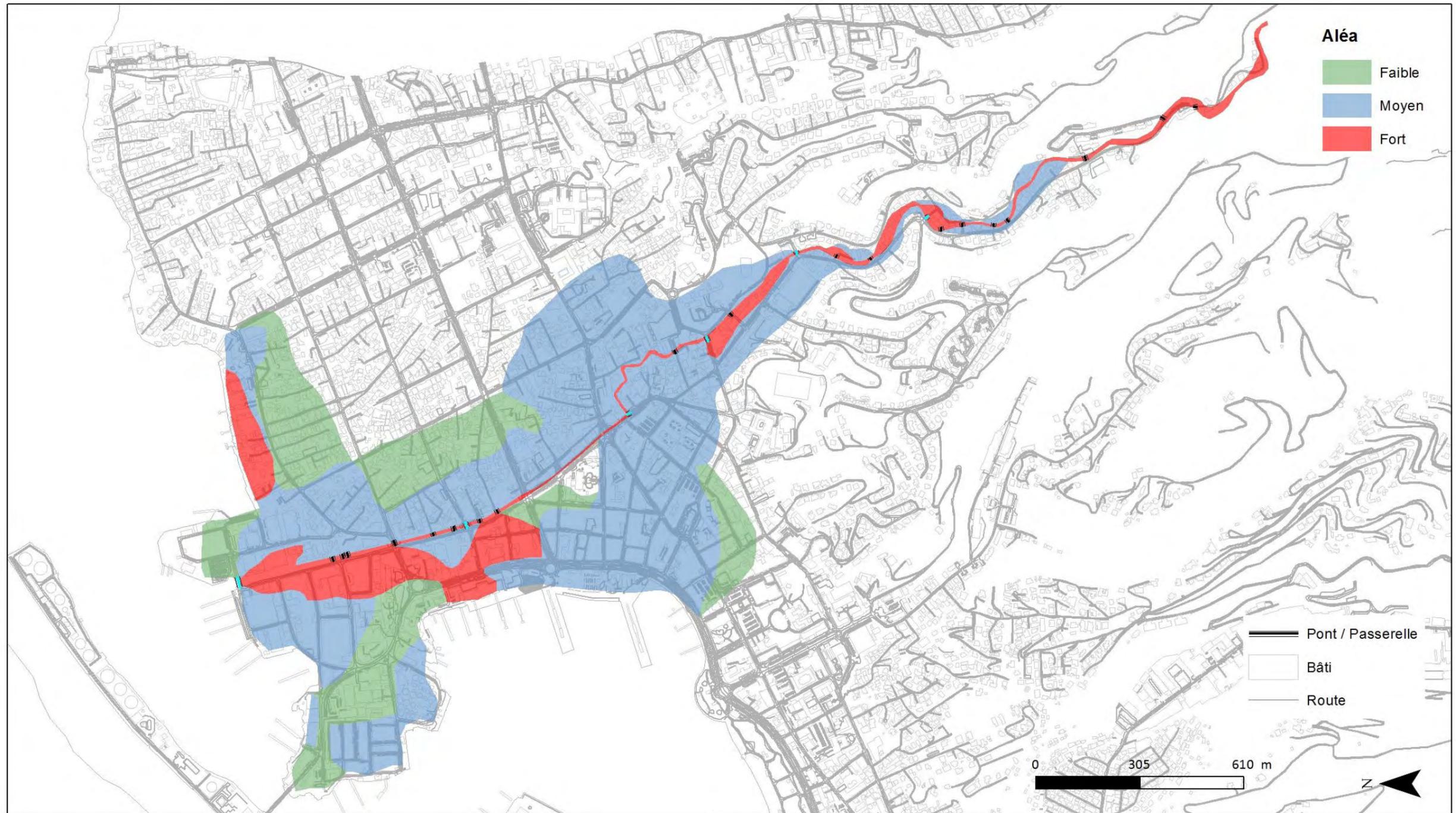


Figure 40 : Cartographie de l'aléa inondation pour la rivière Papeava pour la crue cinquantennale, 80 m<sup>3</sup>/s.



<p>Vallée de la Papeava île de Tahiti - Archipel de la Société</p> <p>—</p> <p><b>Cartographie de l'aléa inondation</b></p>	<p><b>Modélisation</b></p> <p>—</p> <p>Q100 = 102 m<sup>3</sup>/s</p> <p>niveau mer + 1 m</p>	<p><b>Bureau d'Études Génie Civil (BEGC)</b> Direction de l'Équipement</p> <p>Système de coordonnées projetées : WGS84_UTM06 Sud</p> <p>Echelle : 1/10,205 Date : mars 2018</p>	<p> réalisé par la société Vai-Natura</p> <p> Fond cartographique du Service de l'Urbanisme</p>
---	---	---	---

Figure 41 : Cartographie de l'aléa inondation pour la rivière Papeava pour la crue centennale, 102 m<sup>3</sup>/s.

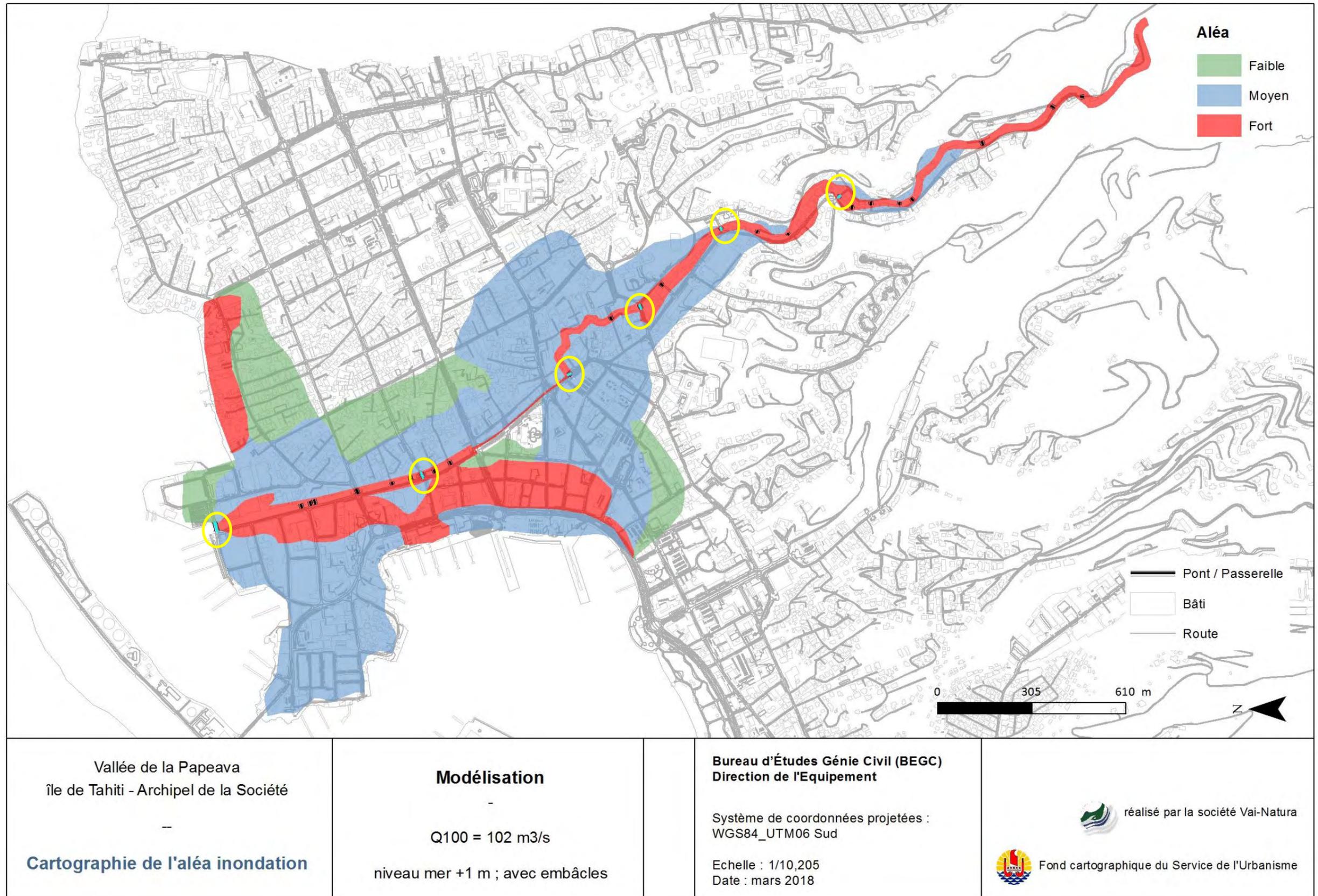


Figure 42 : Cartographie de l'aléa inondation pour la rivière Papeava pour la crue centennale, 102 m<sup>3</sup>/s - niveau de la mer + 1m - avec embâcles.

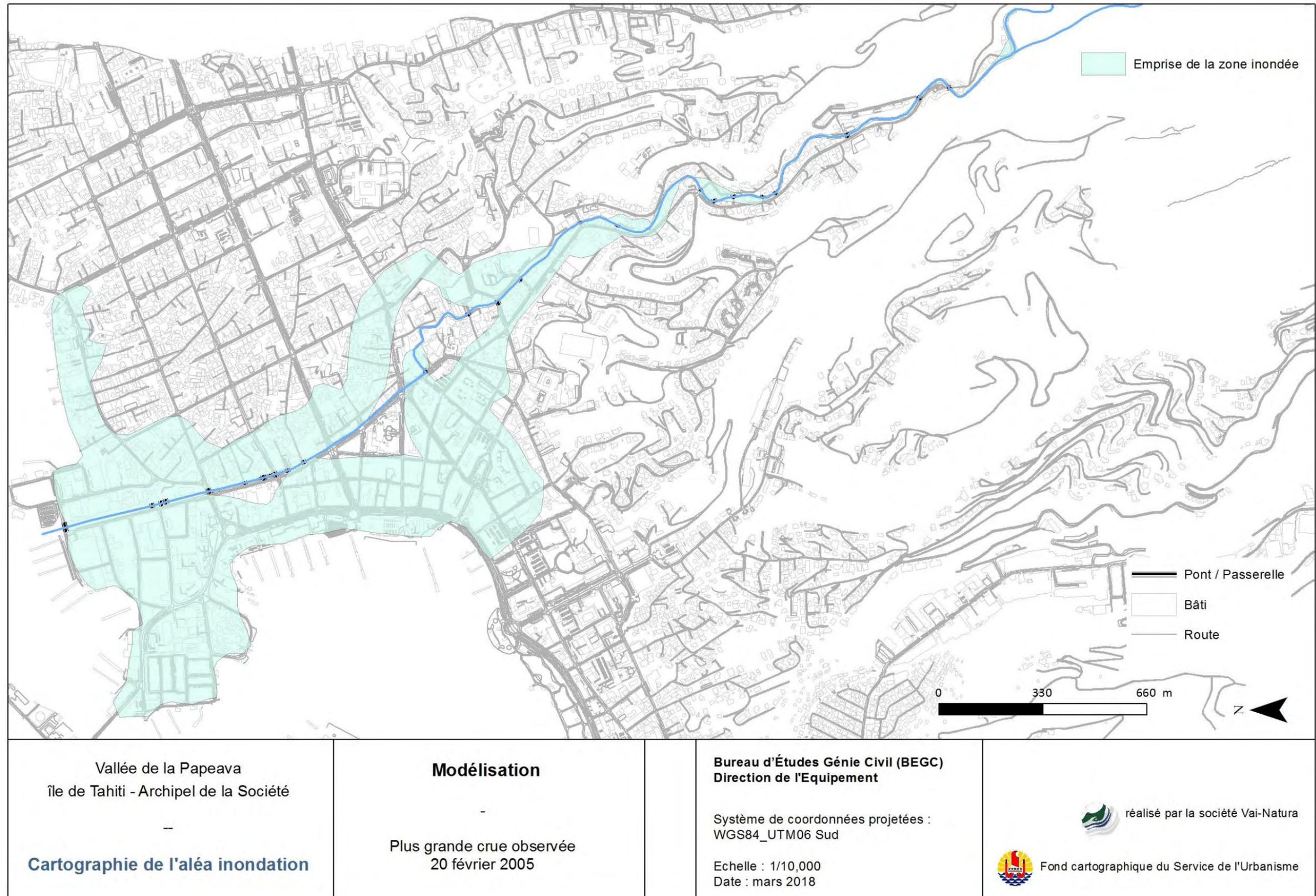


Figure 42 : Enveloppe de la zone inondable lors de la crue du 20 février 2005 ( $Q_{max} = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

#### 4.4. Comparaison avec les derniers travaux (SPEED, 2006)

La cartographie de l'aléa inondation obtenue peut être regardé en appréciant des travaux antérieurs notamment une modélisation réalisée en 2006. Les comparaisons resteront relativement sommaires, le document décrivant les travaux de 2006 n'entre pas dans tous les détails d'utilisation et de mise en action du modèle.

En 2006, la modélisation s'est basée sur un système à casiers (ou modèle quasi-2D). Le tracé de la rivière à travers la plaine alluviale urbanisée justifie de considérer l'aspect multidirectionnel des écoulements. La délimitation des zones à casiers impose une bonne connaissance géographique et topographique de la rivière et des zones alentours. Les caractéristiques des berges connectant les casiers au lit de la rivière doivent être connues et bien renseignées. Pour l'étude de 2018, le choix d'une modélisation purement 2D permet une discrétisation de l'espace plus précise sans bornage anticipé des zones inondables.

L'approche hydrologique de 2006 n'est pas très détaillée. On sait simplement que les débits sont obtenus à partir des données recueillies sur la station pluviométrique de la Fautaua. Or cette station se trouve relativement loin du bassin versant de la Papeava, et elle est positionnée sur l'une des crêtes du mont Aorai, le troisième sommet de l'île. Ceci étant précisé, les débits de pointes pour les périodes de retour décennales et centennales calculés en 2006 sont proches des résultats que nous avons obtenus en 2018 (cf. Section 3.4.3). L'épisode météorologique utilisé pour reconstituer l'hydrogramme de crue en 2006 est celui du 13 avril 1983.

Dans la zone urbanisée, l'étude de 2006 considère que les réseaux de collecte des eaux de pluie qui sont connectés à la Papeava doivent être intégrés à la modélisation en ajoutant 12% du débit final à l'amont du canal couvert. Ce sujet est discuté dans la Section 3.5 de ce document. Lorsque la rivière est soumise à une très forte crue, son niveau est tel que l'eau reflux par les ouvertures d'assainissement. Ce phénomène crée un problème d'évacuation des eaux, le réseau de drainage est saturé et ne fonctionne plus. Il n'alimente plus la rivière, le débit n'a donc pas été augmenté dans notre étude. Cette hypothèse est confirmée par les témoignages des agents de la cellule STT de la DEQ.

Entre 2006 et 2018, la structure morphologique du lit montre une stabilité de la géométrie du lit et de son profil longitudinal (cf. Section 7.4). Les données de 2006 couvrent un linéaire de 2 600 m contre 4 000 m en 2018.



## 5. Conclusion

La rivière Papeava est un cours d'eau aux enjeux importants. Elle traverse le centre-ville très urbanisé de Papeete. La zone contributive est une petite vallée encaissée dans une planèze. Ce système hydromorphologique favorise le ruissellement au détriment de l'infiltration. La réactivité du bassin versant à un épisode météorologique significatif est rapide. Il en résulte des crues soudaines qui sont difficilement drainées.

La modélisation hydraulique en deux dimensions a permis de mettre en exergue l'importance du risque inondation dans cette vallée. L'enveloppe des submersions est étendue, mais reste conforme aux observations relevées lors de la crue du 20 janvier 2017. Les conséquences furent impressionnantes pour les riverains, pourtant cet évènement n'était pas exceptionnel avec un temps de retour de 10 années.

Au terme des investigations, il apparaît que la section d'écoulement de la rivière est globalement trop étroite. L'urbanisation grandissante a contraint le lit dans une géométrie trop cintrée. Dans la partie amont, la situation est surtout délicate pour les habitations à proximité immédiates des berges. Par contre, dans le centre de Papeete, la faible dénivellation du terrain et la calibration insuffisante du canal d'écoulement favorisent largement la submersion des berges et l'épanchement des eaux.

Une attention particulière doit être portée sur les nombreuses passerelles qui traversent le cours d'eau. Leur géométrie réduit la section d'écoulement et favorise les débordements. Ces ouvrages sont des points de vulnérabilité pour la rivière. Certains sont le lieu d'embâcles et de submersions régulières. Mais si ces ponts sont enlevés, ou corrigés, l'écoulement sera mieux guidé dans le lit. Par contre, l'impact d'un débit plus fort vers l'aval pourrait engendrer une réponse différente dans des sections actuellement protégées, et d'autres passerelles deviendraient les nouveaux points de blocages. La correction de la rivière doit bien s'envisager dans un point de vue global, une modification localisée du lit aura des influences aval et amont.

L'entretien des rivières est une action indispensable lorsque le lit d'un cours d'eau est canalisé. Les éléments solides (minéraux ou végétaux) s'accumulent rapidement à l'occasion d'une crue. Par contre, ils ne sont plus répartis naturellement, ils engendrent un exhaussement du lit et augmentent le risque de débordement. Or, la contrainte foncière et le non-respect de la servitude de curage contrarient fortement l'intervention des services techniques. Certains tronçons sont presque inaccessibles pour les engins. La mise en sécurité des biens et des personnes doit aussi passer par une prise en compte de ces contraintes et des solutions doivent être apportées.

--

*Affaire suivie par*

**Matthieu Aureau**

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



## 6. Bibliographie

- Anderson M. P., 1983. Ground-water modeling - the emperor has no clothes. *Ground Water* 21, n°6, pp. 66-69.
- Aureau M., 2014. Modélisation des Écoulements en Surface et Souterrains : vallée de la Punaru'u - Tahiti. Thèse de doctorat. Ecole doctorale du Pacifique (ED469).
- Brousse R., 1990. Géologie des îles hautes. Encyclopédie de la Polynésie I, les îles océaniques. Christian Gleizal / Les Editions de l'Alizé, pp. 41-56.
- Brunner G.W., 2016. HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual, Version 5.0. Pp. 171.
- Cauchard G. et Bergès F., 1990. Le climat. Encyclopédie de la Polynésie I, les îles océaniques. Christian Gleizal / Les Editions de l'Alizé, pp. 57-70.
- Chow Ven Te, 1959. *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Inc., New-York, USA, pp. 680.
- 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.
- Dupon J. F., Bonvallot J., Vigneron E., Gay J. C., Morhange C., Ollier C., ... & Laidet D. ,1993. Atlas de la Polynésie française. Ed. de l'ORSTOM, 213 rue La Fayette, 75480 Paris Cedex 10, France, ISBN 2-7099-1147-7
- EGIS, 2012. Cartographie de l'aléa inondation au droit des cours d'eau de Polynésie française, programme ARAI 3, cours d'eau Vaiopu. Rapport d'étude. Service de l'Urbanisme, Section Etudes et Plan. Pp. 44.
- Ferry L., 1988. Contribution à l'étude des Régimes Hydrologiques de l'Île de Tahiti, Rapport de thèse, Université de Paris XI, pp. 330.
- Guillande R., Gelugne P., Bardintzeff J.M, Brousse R., Chorowicz J., Deffontaines B. et Parrot J.F., 1993. Cartographie automatique de zones à aléas de mouvements de terrain sur l'île de Tahiti à partir de données digitales. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 164 (4), pp. 577-583.
- Haverkamp R., Debionne S., Viallet P., Angulo-Jaramillo R. et de Condappa D., 2006. Movement of moisture in the unsaturated zone. In "Groundwater Engineering Handbook". 2nd edition, Ed. J. W. Delleur, CRC Press LLC, Boca Raton, Fl., U.S.A, Chapter 6, pp. 1-58.



Hildenbrand A., Gillot P.Y. et Le Roy I., 2004. Volcano-tectonic and geochemical evolution of an oceanic intra-plate volcano: Tahiti-Nui (French Polynesia). *Earth and Planetary Science Letters*, 217(3), pp. 349-365.

Hingray B., Picouet C. et Musy A., 2009. *Hydrologie 2, Une science pour l'ingénieur*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, pp. 522.

Hopmans J. W., Nielsen D. R. et Bristow K. L., 2002. How useful are small-scale soil hydraulic property measurements for large scale-scale vadose zone modeling? In *Heat and Mass Transfer in the Natural Environment: A Tribute to J.R. Philip*, Eds. D. Smiles, P. Raats, and A. Warrick, Geophysical Monograph 129, American Geophysical Union, pp. 247-258.

Jamet R., 1990. Géologie des îles hautes. *Encyclopédie de la Polynésie I, les îles océaniques*. Christian Gleizal / Les Editions de l'Alizé, pp. 105-120.

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

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

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

Masson M. et Jousse M., 1988. Schéma expérimental d'exploitation de matériaux et d'aménagement de la vallée de la Punaruu. C.E.T.E. Méditerranée. Département Aménagement, Construction, Environnement. Toulouse, France, pp.75.

Manning R., 1891. On the flow of water in open channels and pipes. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, 20, pp. 161-207.

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

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

SPEED et BCEOM, 2006. Cartographie de l'aléa inondation au droit des cours d'eau de Polynésie française, cours d'eau Hamuta. Rapport d'étude. Service de l'Urbanisme, Section Etudes et Plan. Pp. 36.

Vai-Natura, 2013. Modélisation du bilan hydrologique de la haute vallée de la Punaruu. Vai-Natura pour l'Université de Polynésie française. SAS Vai-Natura, BP. 83, 98735 Uturoa, Raiatea, Polynésie française. R20130907HY, pp. 129.

## 7. Annexes

### 7.1. Approche hydrologique

#### 7.1.1. 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.

### 7.1.2. 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.

### 7.1.3. Principe de la méthode GRADEX

Un principe bien plus robuste fut testé et validé, par un groupe de recherche de la société EDF<sup>4</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 maximum peuvent être déduits directement de la distribution des pluies extrêmes. Le sens physique de cette approche est de considérer qu'au-delà d'un certain seuil, dans l'intensité d'une averse, l'infiltration se stabilise. Le corolaire est un coefficient de ruissellement  $C_r$  fixe qui s'approche de 1.

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

---

<sup>4</sup> Electricité de France

#### 7.1.4. 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).



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

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
<i>B. Lined or Built-Up Channels</i>			
<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. Gunité, good section	0.016	0.019	0.023
f. Gunité, wavy section	0.018	0.022	0.025
g. On good excavated rock	0.017	0.020	
h. On irregular excavated rock	0.022	0.027	
<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

### 7.3. Zones d'aléa fort en tenant compte de l'érosion



<p>Vallée de la Papeava île de Tahiti - Archipel de la Société</p> <p>—</p> <p><b>Cartographie de l'aléa inondation</b></p>	<p><b>Erosion</b></p> <p>—</p> <p>Zones d'expertise</p>	<p><b>Bureau d'Études Génie Civil (BEGC)</b> Direction de l'Équipement</p> <p>Système de coordonnées projetées : WGS84_UTM06 Sud</p> <p>Echelle : 1/10,000 Date : mars 2018</p>	<p> réalisé par la société Vai-Natura</p> <p> Fond cartographique du Service de l'Urbanisme</p>
---	---	---	---



ID	Area [m <sup>2</sup> ]	Alea définitif	Alea calculé	Commentaires
27	7541	3	2	Zone à proximité du canal - submersions fréquentes
28	7964	3	2	Zone à proximité du canal - submersions fréquentes
29	8304	3	2	Coulées de boues observées
33	3393	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
34	1773	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
54	2917	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
57	955	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
58	862	3	1	Erosion des berges et servitude de curage
60	4302	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
61	126	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
62	208	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
65	1847	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
66	440	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
68	2090	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
69	3803	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
70	578	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
71	3991	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
72	2555	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
73	494	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
74	1411	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
75	4598	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
76	410	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
77	3337	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
78	4271	3	1	Erosion des berges et servitude de curage
79	1202	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
80	2791	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
81	906	3	2	Erosion des berges et servitude de curage
82	4455	3	2	Zone à proximité du canal - submersions fréquentes



### 7.4. Comparaison des profils longitudinaux de la Papeava entre 2006 et 2018

