

COMMUNE DE PUNAAUIA

PLAN DE PREVENTION DES RISQUES NATURELS PREVISIBLES

*« Mouvements de terrain, inondation,
submersion marine d'origine cyclonique et liée aux tsunamis »*



NOTE DE PRESENTATION

Révision n° 2 du PPR

NOVEMBRE 2024

Arrêté n° 2424 CM du 11/12/2024



Sommaire

1. Objet du Plan de Prévention des Risques	7
1.1. Introduction	7
1.2. Objectif du PPR	7
1.3. Procédure.....	7
1.4. Forme et contenu	8
1.5. Implications.....	8
1.6. Définitions.....	8
1.7. Méthodologies.....	9
1.8. Données disponibles.....	9
2. Le secteur d'étude : la Commune de Punaauia	10
2.1. Situation géographique	10
2.2. Contexte morphologique.....	10
2.3. Contexte géologique.....	11
2.4. Les risques naturels	11
3. Les phénomènes naturels observés	12
3.1. Les mouvements de terrain	12
3.1.1. Les phénomènes physiques	12
3.1.2. Phénomènes historiques de la commune	14
3.1.3. Méthodologie de cartographie	15
3.1.3.1. Généralités.....	15
3.1.3.2. Les niveaux d'aléas mouvements de terrain	16
3.1.4. La cartographie des aléas mouvements de terrain à Punaauia.....	18
3.2. Les inondations.....	20
3.2.1. Les phénomènes physiques.....	20
3.2.2. Les phénomènes historiques de la commune	22
3.2.3. Méthodologie de cartographie	23
3.2.3.1. Généralités.....	23
3.2.3.2. Les niveaux d'aléas	24
3.2.4. La cartographie de l'aléa à Punaauia	24
3.3. Les cyclones	28
3.3.1. Les phénomènes physiques.....	28
3.3.1. Les phénomènes historiques	29
3.3.2. Méthodologie de cartographie	29

3.3.2.1.	Modélisations.....	29
3.3.2.2.	La cartographie à Punaauia.....	31
3.4.	Les tsunamis.....	32
3.4.1.	Les phénomènes physiques.....	32
3.4.2.	Les phénomènes historiques sur la commune.....	34
3.4.1.	Cartographie de l'aléa à Punaauia.....	34
4.	Les enjeux sur Punaauia.....	35
4.1.	Notion générale.....	35
4.2.	Présentation générale.....	35
5.	Le zonage des risques et le règlement.....	36

Annexes

Annexe 1 –	Présentation de l'approche déterministe.....	38
Annexe 2 –	Détermination des débits de crue de projet pour une crue centennale.....	43
Annexe 3 –	Modèle utilisé pour caractériser l'aléa submersion marine d'origine cyclonique.....	46
Annexe 4 –	Lexiques des sigles et termes techniques.....	47

Liste des figures

Figure 1 :	Procédure schématique pour l'élaboration des PPR.....	7
Figure 2 :	Délimitation de la commune de Punaauia.....	10
Figure 3 :	Eboulement du 13 décembre 2002 au PK 14.9.....	14
Figure 4 :	Eboulement dans le quartier de Punavai Nui daté du 05 janvier 2010.....	15
Figure 5 :	Proposition de classification des phénomènes de glissement de terrain en fonction de leurs caractéristiques.....	17
Figure 6 :	Proposition de classification des phénomènes d'éboulement et de chutes de blocs selon leurs caractéristiques.....	17
Figure 7 :	Proposition d'évaluation de l'intensité de l'aléa mouvements de terrain selon l'importance des parades à mettre en place, les caractéristiques des phénomènes associés et leur gravité potentielle sur les biens et les personnes (Selon le guide PPR – Risques Mouvements de terrain, MATE 1999).....	18
Figure 8 :	Erosion de berge au niveau de la Matatia suite aux évènements pluvieux majeurs survenus en janvier 2017.....	22
Figure 9 :	Définition de l'aléa inondation en fonction de la hauteur de submersion et de la vitesse d'écoulement des eaux.....	24
Figure 10 :	Liste des cours d'eau de la commune de Punaauia ayant fait l'objet d'une étude hydraulique.....	24
Figure 11 :	Destructions après le passage du cyclone Emma (Mars 1970 – Source : Historique des cyclones de Polynésie Française de 1831 à 2010 ; Meteo France).....	29
Figure 12 :	Trajectoires des évènements cycloniques historiques ayant concernés la Polynésie.....	30

Figure 13 : élévation du niveau marin selon le GIEC (2019).....	30
Figure 14 : définition de l'aléa surcote marine selon le couple (H, V).....	31
Figure 15 : définition des classes l'aléas pour l'action mécanique des houles.....	31
Figure 16 : schéma de la combinaison des aléas.....	31
Figure 17 : Caractéristiques d'un tsunami en fonction de la profondeur (d'après CEA, 2002).....	32
Figure 18 : Caractéristiques physiques d'un tsunami. Avec h : profondeur ; H : hauteur de la vague de l'océan ; c : vitesse de la vague ; λ : longueur d'onde de la vague	32
Figure 19 : Hauteurs des inondations (en m) observées à Tahiti lors du Tsunami de mai 1960 (séisme du Chili) (source Orstom).	34
Figure 20 : Jeu de données de caractéristiques des sols en conditions naturelles (établi à partir d'une synthèse de données du Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie et d'essais géotechniques pour les mamu)	39
Figure 21 : Détermination de la largeur de bande de retrait minimale $L_{1,5}$	40
Figure 22 : Schéma de situation des différents paramètres de morphologie de versant	41
Figure 23 : Tableau récapitulatif de l'influence des paramètres géométriques sur le coefficient de stabilité	41
Figure 24 : Tableau récapitulatif de l'influence des paramètres physiques du sol sur le coefficient de stabilité	42

1. Objet du Plan de Prévention des Risques

1.1. Introduction

L'ensemble du territoire polynésien est exposé à des degrés divers, à des aléas naturels tels que les mouvements de terrain, les inondations, la houle, les marées de tempête, et les tsunamis (raz-de-marée). Ils ont, par le passé, été à l'origine de nombreux dommages ; depuis 1996, ils ont provoqué la mort de 22 personnes et plus de dix-neuf milliards de francs pacifiques de dégâts. La législation des PPR (Plans de Prévention des Risques) émane de ce constat et d'une volonté de renforcement de la prévention des risques naturels prévisibles.

Une prévention efficace passe, entre autres, par la prise en compte des aléas naturels dans l'aménagement du territoire. Le Plan de Prévention des Risques (PPR) instauré par la délibération de l'assemblée de Polynésie n°2001-10 APF du 1^{er} février 2001 portant modification du code de l'aménagement, constitue le document réglementaire permettant cette prise en compte. Cette délibération recense les risques qui pourront faire l'objet d'un PPR et précise la procédure administrative.

1.2. Objectif du PPR

L'objectif principal d'une telle démarche est la protection des personnes, des biens et des activités, en précisant les aléas et en formulant des règles d'utilisation des sols en adéquation avec les orientations du ou des ministères concernés par la problématique des risques.

1.3. Procédure

L'établissement du plan de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) est ordonné par arrêté du Conseil des Ministres. L'arrêté doit déterminer le périmètre mis à l'étude et la nature des risques pris en compte. Il est notifié aux maires des communes concernées par le périmètre du P.P.R.

Les PPR sont établis ou révisés soit par la direction de la construction et de l'aménagement (anciennement le service de l'urbanisme), soit par un organisme ou technicien compétent, sous le contrôle d'une commission des PPR dont la composition est déterminée par arrêté du Conseil des Ministres.

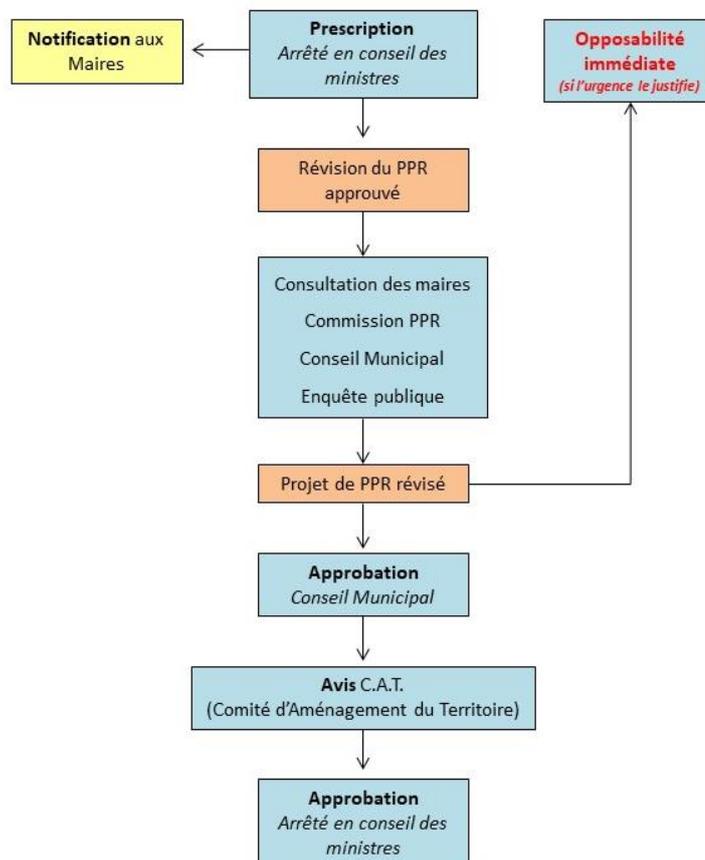


Figure 1 : Procédure schématique pour l'élaboration des PPR

1.4. Forme et contenu

L'Article D.181-1 mentionne le champ d'application des PPR :

«Article D.181-1 (Dél. n° 2001-10 APF du 1^{er} février 2001)

Les plans de prévention des risques naturels prévisibles dits P.P.R. sont destinés à délimiter des zones plus particulièrement exposées aux risques naturels prévisibles, tels que les inondations, les mouvements de terrain, les séismes, les éruptions volcaniques, les tempêtes, les cyclones, les raz de marée ou tsunamis. »

En outre, l'article D.181-3 (Dél. n° 2001-10 APF du 1^{er} février 2001) mentionne les documents qui constituent le PPR :

- 1) Un rapport de présentation indiquant le secteur géographique concerné, la nature des phénomènes naturels pris en compte et leurs conséquences possibles compte tenu de l'état des connaissances ;
- 2) Un ou plusieurs documents graphiques délimitant les zones mentionnées aux 1° et 2° de l'article D.181-2 ;
- 3) Un règlement précisant :
 - les mesures d'interdiction et les prescriptions applicables dans chacune de ces zones en vertu des 1° et 2° de l'article D.181-2 ;
 - les mesures de prévention et de protection mentionnées au 3° de l'article D.181-2 et les mesures relatives à l'aménagement, l'utilisation ou l'exploitation des constructions, des ouvrages, des espaces mis en culture ou plantés existants à la date de l'approbation du plan, mentionnées au 4° de l'article D.181-2. Le règlement mentionne, le cas échéant, celles de ces mesures dont la mise en œuvre est obligatoire et le délai fixé pour leur mise en œuvre.

1.5. Implications

Une fois approuvé, le PPR prévaut sur le plan général d'aménagement (PGA) ou le plan d'aménagement de détail (PAD). En leur absence, il prévaut sur les règles générales d'urbanisme. En effet, la mise en conformité du PGA avec les dispositions du PPR peut s'avérer nécessaire lorsque ces documents divergent, pour rendre cohérentes les règles d'occupation du sol. Le PPR est annexé au PGA quand il existe comme servitude d'utilité publique.

Le fait de construire ou d'aménager un terrain dans une zone interdite par un plan de prévention des risques ou de ne pas respecter les conditions de réalisation, d'utilisation ou d'exploitation prescrites par ce plan est puni des peines prévues aux articles D.117-1 et D.117-2 du code de l'aménagement.

1.6. Définitions

Les Plans de Prévention des Risques Naturels se basent sur la définition de trois éléments déterminants :

- **Aléa** : Phénomène naturel (ex : inondation, mouvements de terrain, cyclone etc.) caractérisé par une **intensité** donnée associée à une **probabilité d'occurrence/apparition**. Dans le cadre des PPR, il est convenu un **aléa de référence**. Ce dernier fixe les seuils qu'il convient de prendre en compte pour la réalisation d'aménagement durable et pour préserver la sécurité des personnes et des biens, en dehors des phénomènes majeurs à exclure.
Ainsi, l'intensité d'un aléa peut-être directement rattachée aux notions de dommages aux biens et de gravité pour les personnes.

- **Enjeux** : Ensemble de personnes, bien, activités, patrimoine etc. susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel. Dans le cadre des PPR en Polynésie française, les enjeux sont caractérisés par des zones à enjeux fort (zone couverte par le PPR) et à enjeux moindres (zone non couverte par le PPR). L'ensemble de l'île de Punaauia a été considérée comme à enjeux fort.
- **Risque** : Notion caractérisée par le croisement des zones à enjeux et un ou plusieurs aléas naturels.

1.7. Méthodologies

La méthodologie générale de réalisation des Plans de Prévention des Risques en Polynésie française s'inspire grandement des guides méthodologiques métropolitains suivants :

- Guide méthodologique Plans de Prévention des Risques Littoraux (2014) – Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) ;
- Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR), Guide général, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, La Documentation Française, 1999 ;
- Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR) – Risques Mouvements de terrain, Guide Méthodologique, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, La Documentation Française, 1999 ;
- Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR) – Risques Inondations, Guide Méthodologique, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, La Documentation Française, 1999.

L'ensemble des guides précise notamment les méthodes de caractérisation des aléas utilisés dans le cadre des PPR. Les chapitres ci-dessous énoncent pour chaque aléa, les méthodologies utilisées pour l'élaboration du PPR de la Commune de Punaauia, en référence aux guides PPR métropolitains.

1.8. Données disponibles

Les données utilisées pour affiner les cartographies des aléas sont les suivantes :

- Donnée cadastrale : Direction des affaires foncières, 2022
- Photos satellites : © 2007 DigitalGlobe, Inc., a Maxar company
- Photos satellites : © 2011 DigitalGlobe, Inc., a Maxar company
- Photos satellites : © 2013 DigitalGlobe, Inc., a Maxar company
- Photos satellites : © CNES 2014, Distribution Airbus DS
- Photos satellites Pléiades : © 2017 DigitalGlobe, Inc., a Maxar company
- Photos satellites Pléiades : © 2020 Maxar Technologies
- Données LIDAR (Light Detection and Ranging) : données topo et bathymétriques, autour du décimètre. Service de l'Urbanisme, 2015
- Données LIDAR (Light Detection and Ranging) : données topographiques, Direction de l'Équipement, 2020
- Modèle Numérique de Terrain. Service de l'Urbanisme, 2013
- Carte des formations de surface de Tahiti, Feuille Punaauia-Paea, 1/25 000, 1987
- Carte des formations géologiques de Tahiti, Feuille Punaauia-Paea, 1/25 000, 1987

2. Le secteur d'étude : la Commune de Punaauia

2.1. Situation géographique

Punaauia est une commune de l'île de Tahiti à environ 7 km au sud de la capitale de Papeete située sur la côte ouest. Elle fait partie des Iles du Vent dans l'archipel des îles de la Société. Sa superficie est de 76 km². Elle est limitrophe du nord au sud, dans le sens horaire, des communes de Faa'a, Pirae, Mahina, Hitia'a O Te Ra, Papara et Paea.

La partie urbanisée concerne la zone Ouest de la commune, au niveau du littoral.

La commune de Punaauia compte 28 103 habitants (recensement de 2017).



Figure 2 : Délimitation de la commune de Punaauia

2.2. Contexte morphologique

Tahiti est une île d'origine volcanique entourée presque complètement par un récif corallien qui marque la limite entre le lagon et l'océan. Le récif s'interrompt aux embouchures des rivières formant ce que l'on appelle des passes.

Culminant à 2 241 m, Tahiti est la plus haute île de Polynésie. L'île est constituée de deux systèmes éruptifs distincts définissant l'île principale « Tahiti Nui » et la presqu'île « Tahiti Iti ». Son relief est escarpé et la majeure partie de l'île est occupée par des pentes de plus de 50% avec de grandes vallées qui pénètrent en couloirs étroits jusqu'au centre de l'île. En dehors de la plaine côtière étroite qui encercle l'île les pentes inférieures à 10% sont quasi inexistantes. On dénombre peu de plateaux, les principaux étant celui de Tamanu au cœur de la vallée de la Punaruu et le plateau de Viriviriterai à 900 m d'altitude presque au centre de l'île.

Résultant d'une action érosive intense, le réseau de rivières et de ruisseaux est dense sur cette île. Tahiti se place ainsi au premier rang devant les autres îles de Polynésie pour le nombre de cours d'eau ainsi que pour l'étendue de leurs bassins versants. Cependant, les dimensions de ceux-ci restent modestes puisqu'aucun ne dépasse 80 km². Le régime d'écoulement torrentiel de ces cours d'eau est toujours très marqué.

La commune de Punaauia s'étend de la Pointe de Tataa (Pk 5W) jusqu'au Pk 18,5 environ, sur une largeur de quinze kilomètres en moyenne vers l'intérieur des terres. La plaine littorale, quant à elle, s'étend sur une largeur de 0,3 à 0,9 km. La commune est fermée au centre de l'île par le cirque de la Punaruu, limité par les monts Aorai (2 066 m), Orohena (Sommet de l'île 2 241 m), Teamaa (1 532 m) et Mahutaa (1 501 m) qui, du nord en allant vers le sud, forment un arc de cercle orienté à l'ouest. D'une superficie de 75,9 km², Punaauia représente environ 7,2% de la surface totale de l'île de Tahiti. C'est la sixième commune de l'île, en terme de superficie. La commune s'inscrit dans un contexte de fortes pentes et est traversée par de nombreuses vallées dont la principale est la vallée de la Punaruu.

Punaauia se situe sur la côte Ouest de Tahiti Nui, l'une des zones les moins exposées aux alizés et de ce fait l'une des plus sèches de l'île.

Punaauia appartient à la zone urbaine du grand Papeete qui s'étend de Mahina au nord, à Paea au sud-ouest. Punaauia est limitée au nord par la commune de Faa'a et au sud par la commune de Paea.

2.3. Contexte géologique

La carte géologique de P. Gelugne et R. Brousse (1987) indique que Tahiti Nui est un volcan d'environ 6000 m de haut dont les deux tiers se trouvent sous la mer. Pour la partie émergée, les âges d'édification sont compris entre 2,5 et 0,3 millions d'années. Trois phases de construction de la partie aérienne du volcan ont été reconnues :

- la première est celle de la formation d'un volcan en bouclier,
- la deuxième est celle de l'effondrement de la caldeira,
- durant la troisième phase les remparts de la caldeira ont été attaqués par l'érosion.

Les travaux de A. Hildenbrand proposent une autre interprétation de l'édification de la partie émergée (« Etude géologique de l'île volcanique de Tahiti-Nui (Polynésie française) : évolution morphostructurale, géochimique et hydrologique ». Thèse Paris Sud, 2002, A. Hildenbrand).

Il n'y aurait pas de Caldeira à Tahiti Nui, mais deux stades principaux d'édification séparés par les glissements de grande ampleur au nord et au sud de l'île.

Dans la commune de Punaauia des alluvions d'origine marine et terrestre forment la plaine côtière. Les versants sont constitués de coulées de lave formant des empilements de niveau rocheux massifs et fracturés et de brèches de scories, d'épaisseur métrique à plurimétrique. La vallée de la Punaruu est marquée par la présence de formations brèchiques (dites « volcano-sédimentaires ») formant des plateaux plus ou moins étendus « accrochés » aux versants abrupts. C'est le cas par exemple du plateau de Tamanu.

La disposition des enjeux ainsi que le contexte morphologique et géologique font que la commune de Punaauia est globalement peu exposée aux risques naturels. Cependant les aléas présents en Polynésie se sont tous manifestés sur le territoire communal.

2.4. Les risques naturels

Pour la commune de Punaauia, les aléas naturels pris en compte dans le cadre du présent PPR sont :

- l'aléa **mouvements de terrain** comprenant les glissements de terrain et les chutes de blocs ;
- l'aléa **inondation** par débordement de cours d'eau ou de ravines ;
- l'aléa **submersion** marine d'origine **cyclonique** ;
- l'aléa **submersion** marine liée au **tsunami**.

3. Les phénomènes naturels observés

3.1. Les mouvements de terrain

3.1.1. Les phénomènes physiques

Un mouvement de terrain est un déplacement plus ou moins brutal du sol et du sous-sol. Il est fonction de la nature et de la structure des couches géologiques. Il peut résulter d'un ou plusieurs facteurs déclenchant :

- altération naturelle des terrains ;
- action de l'eau (modification des caractéristiques mécaniques des terrains après saturation en eau lors de fortes pluies, érosion liée aux écoulements) ;
- action de l'homme (modification des caractéristiques géométriques des terrains, rejets d'eau non contrôlés, ...) ;
- sollicitation sismique .

Deux ensembles de mouvements de terrains sont distingués : les mouvements lents (fluage / reptation, glissements) et les mouvements rapides. Les mouvements rapides sont scindés en deux groupes, suivant le mode de propagation, en masse ou sous forme remaniés. Les mouvements en masse comprennent les effondrements, les chutes de pierre ou de blocs, les éboulements ou écroulements et certains glissements. Les mouvements à l'état remaniés visent les laves torrentielles et les coulées boueuses.

▪ **Mouvements Lents**

Ils sont de 2 types en Polynésie : les glissements de terrain et les phénomènes de fluage / reptation.

➤ Les glissements de terrain

Il s'agit du déplacement d'une masse de terrain cohérente, le long d'une ou plusieurs surfaces de rupture de géométrie variable. Suivant la géométrie, on distingue généralement les glissements plans et les glissements circulaires. Dans de nombreux cas, les glissements affectent des remblais mis en place dans des zones en pente, pour l'édification de routes et de bâtiments divers.

➤ Les phénomènes de fluage / reptation.

Ce type de mouvement se caractérise par la présence d'arbres inclinés et/ou d'une végétation moutonnée et/ou d'une surface topographique irrégulière. Dans certains cas, les zones affectées peuvent être le siège de glissements superficiels d'ampleur modérée, en particulier lors de fortes pluies.

En cas de fortes pluies, les zones affectées peuvent être le siège de ravinements généralisés qui alimentent alors en charges solides les cours d'eau en crue.

▪ **Mouvements rapides en masse**

➤ Chute de pierres, de blocs ou de gros blocs

Le volume total mobilisé est inférieur à 100 m³. En Polynésie, il s'agit le plus souvent d'instabilités affectant des parements rocheux naturels et sont observés dans toutes les îles hautes. Les instabilités se produisent également au sein de versants à forte pente et mobilisent des formations en place ou des éboulis.

➤ Eboulement ou écoulement

Comme précédemment, il s'agit de mouvements à composante de déplacement vertical prépondérante, mais dans ce cas les volumes mobilisés sont plus importants (supérieurs à 100 m³). Les matériaux mobilisés sont généralement rocheux et plus ou moins altérés. D'après les données disponibles, le type le plus fréquent en Polynésie concerne des parements rocheux naturels et est observé dans toutes les îles visitées. Les éboulements affectent également des talus constitués de mamu plus ou moins altéré (argiles et blocs).

➤ Glissement de terrain

Il s'agit de phénomènes *a priori* du même type que les glissements d'évolution lente. La distinction porte sur l'évolution rapide du phénomène, en particulier lors de sollicitations pluvieuses exceptionnelles ou d'actions anthropiques. Ils affectent principalement le mamu très altéré mais également des matériaux remaniés, en particulier les produits d'érosion accumulés en bas de pente.

▪ **Mouvements rapides à l'état remanié**

Ces mouvements sont de quatre types :

➤ Les laves torrentielles

Elles résultent du transport de matériaux en coulées visqueuses dans le lit des torrents. Elles résultent de la mobilisation de masses glissées au sein de cours d'eau, sans qu'il y ait nécessairement eu formation d'un barrage naturel.

➤ Les coulées de boue

Ce type de phénomène concerne :

- d'une part la fluidisation et l'écoulement rapide d'une formation argileuse en place en raison d'une importante teneur en eau. Des coulées de ce type ne sont pas connues (pour le moment) en Polynésie ;
- d'autre part, la mobilisation des matériaux issus de glissements ou d'éboulements. De nombreux phénomènes de ce type se sont produits à Raiatea et Tahaa en 1998. Dans certains cas, les matériaux mobilisés englobent des éléments rocheux et / ou des végétaux. On parle alors de coulées de débris.

➤ Les glissements – coulées sur fortes pentes

Ils sont fréquents à l'intérieur des îles hautes aux reliefs escarpés et affectent des versants à très forte pente. Ils se produisent en général lors de fortes précipitations. Ils résultent de glissements plans superficiels (épaisseur métrique à infra métrique) mobilisant des matériaux altérés en place ou déjà mobilisés. Il en résulte des cicatrices beaucoup plus longues que larges. Elles peuvent atteindre quelques centaines de mètres de long pour quelques mètres à quelques dizaines de mètres de large. Le phénomène reste superficiel tant que la pente est élevée. Ensuite, il évolue le cas échéant en coulée de débris.

➤ Les arrachements superficiels

Ce type d'instabilité vise ici l'ablation superficielle de matériaux, liés aux écoulements pluviaux.

3.1.2. Phénomènes historiques de la commune

Bien qu'aucune perte en vie humaine ne soit à déplorer sur la commune, Punaauia n'est pas épargnée par ces phénomènes. Ainsi en décembre 2000, un bâtiment industriel (entreprise Remi Chung) a été partiellement détruit dans la zone industrielle de la Punaruu par un glissement de terrain survenu au cours de fortes pluies. En décembre 2002, un éboulement rocheux au PK 14,9, d'un volume proche de 150 à 200 m³, a provoqué la ruine partielle d'une habitation (cf. photographies de la Figure 3), des dommages liés aux impacts de blocs et de boue sur une autre et le comblement total de la piscine attenante, par des blocs éboulés. En mars 2004, au PK 14.5, un bloc important s'est détaché d'une paroi de quelques mètres de haut sans causer de dégâts. Un événement similaire s'était déjà produit auparavant et avait entraîné la destruction d'une voiture. Egalement, un événement de chute d'un bloc de 2 tonnes a été recensé vers le PK 15,5 en juillet 2014 et un éboulement s'est produit vers la route du CFPa en septembre 2016.

Au PK 17 (il y a une vingtaine d'années, date inconnue), une chute de blocs provenant du tiers supérieur du front de planèze a atteint la plaine habitée et a terminé sa course entre deux maisons, sans faire de dégât.

Un évènement majeur s'est produit en mars 2003 dans une zone inoccupée. Un éboulement en grande masse (2 millions de m³) à la source de la rivière Punaruu s'est propagé sur une dizaine de kilomètres jusqu'au plateau de Tamanu. En 2010, une habitation a été impactée par une chute de blocs (cf. photographies de la Figure 4) au lotissement Punavai Nui. La zone de départ de bloc a été identifiée, elle se situe à plus de 60 m en amont de la construction endommagée.

Depuis 2010, des événements de glissement de talus ou de chutes de blocs de volumes limités ont été répertoriés. Ces évènements n'ont pas causé d'impacts particuliers.

L'ensemble de ces évènements sont recensés dans une base de données géo-référencée et mise en ligne sur le site de la Direction de la Construction et de l'Aménagement.



Figure 3 : Eboulement du 13 décembre 2002 au PK 14.9



Figure 4 : Eboulement dans le quartier de Punavai Nui daté du 05 janvier 2010.

3.1.3. Méthodologie de cartographie

3.1.3.1. Généralités

La méthodologie de cartographie des aléas mouvements de terrain sur la commune de Punaauia est basée sur le guide méthodologique « PPR – Risques de Mouvements de terrain (MATE, 1999) ». Cette dernière a été adaptée au contexte local.

Ainsi, afin de caractériser l'aléa mouvements de terrain, un aléa de référence est retenu. Il est ainsi convenu que le mouvement de référence à prendre en compte pour définir le zonage est conventionnellement le plus fort évènement historique connu. Toutefois, un évènement exceptionnel d'occurrence géologique n'est pas pris en considération.

Il est ainsi considéré de se baser sur le plus fort évènement potentiel vraisemblable à **échéance centennale** ou plus en cas de danger humain.

Dans le cadre de l'élaboration des cartes d'aléas mouvements de terrain, deux méthodologies existent : les méthodes **qualitatives** et **déterministes**.

Les **méthodes qualitatives** consistent à partir de règles d'expert (basées sur l'expérience et l'observation) ou de règles empiriques, à délimiter des zones homogènes en termes de niveau d'aléa. La formulation de règles peut permettre une cartographie assistée par ordinateur. Les méthodes dites « par expertise » sont les plus communément utilisées pour la réalisation de PPR.

Ainsi, l'approche **qualitative** a été majoritairement employée sur la commune. Cette dernière se base au préalable sur :

- des reconnaissances de terrain avec parcours systématique des routes et chemins et observation des affleurements. De nombreuses missions de terrain ont été réalisées entre 2003 - 2006 (BRGM/SAU), en 2015 par le BRGM dans le cadre de la révision n°1¹, en 2017 et 2018 dans le cadre de la révision n°2 par la DCA, et en 2023 par le BRGM² ;
- l'analyse des instabilités figurant dans la base de données BD-ARAI et de la DCA, ainsi que du contexte (géologique, pédologique, géomorphologique) ;
- les différents renseignements obtenus auprès des habitants et des services techniques pour identifier des instabilités ne figurant pas dans les bases de données ou pour obtenir des précisions sur celles déjà identifiées ;
- l'identification par photo interprétation d'indices d'instabilités ou de morphologies remarquables, ainsi que par l'analyse des données LIDAR.

L'approche **déterministe** a été ponctuellement utilisée sur Punaauia. Cette dernière repose sur la mise en œuvre de modèles physiques et mathématiques visant à reproduire les réalités du terrain.

Les résultats sont *a priori* plus précis que précédemment, à condition que les données de base du modèle aient un niveau de précision compatible avec celui du modèle. L'aléa est exprimé de façon quantitative, ce qui n'empêche pas une traduction sous forme qualitative plus facilement compréhensible. L'approche déterministe convient davantage pour les grandes échelles (1/10 000 et plus) et est en général mise en œuvre ponctuellement ou sur des territoires d'extension limitée, étant donné les fortes contraintes liées à la qualité des données de base.

Les deux approches présentées ci-dessus ont été appliquées sur la commune de Punaauia concernant les phénomènes d'éboulement/chutes de blocs et les glissements de terrain. L'approche déterministe est présentée en détail en annexe 1.

3.1.3.2. Les niveaux d'aléas mouvements de terrain

Comme le rappelle le **guide méthodologique** PPR – Risques mouvements de terrain (MATE, 1999), s'agissant de problème d'aménagement, l'aléa est qualifié par son **intensité**.

L'intensité de l'aléa mouvements de terrain est évaluée principalement en fonction de l'importance et de l'ordre de grandeur du coût des mesures qu'il pourrait être nécessaire de mettre en œuvre pour s'en prémunir. Il convient généralement d'appréhender également les aléas en terme de gravité au plan humain afin d'identifier les zones où des mesures relatives à la sécurité des personnes pourraient être définies, recommandées ou prescrites.

Une évaluation de la **probabilité d'occurrence** des phénomènes de mouvements de terrain a été réalisée conformément au guide méthodologique de mouvements de terrain (MATE, 1999). Une estimation probabiliste basée sur la fréquence des phénomènes est délicate sachant que les phénomènes de mouvements de terrain ne sont pas répétitifs. Ainsi, il est généralement admis, à défaut de pouvoir évaluer de manière quantitative la fréquence de ces derniers, de procéder à une estimation **qualitative**. Elle repose sur la notion principale de **prédisposition du site à produire un évènement donné dans un délai retenu** (aléa de référence). Cela consiste d'une part à évaluer les indices précurseurs observables sur le terrain et d'autre part à apprécier les paramètres du site (géologique, géomorphologique, hydrologique, géotechnique, topographique).

¹ Rapport BRGM/RP-64947-FR de Juillet 2015

² Rapport BRGM/RP-72966-FR de Juillet 2023

Des classes d'intensité croissantes peuvent être identifiées selon que ces mesures sont du ressort d'un propriétaire individuel, d'un groupement de propriétaires, d'un promoteur ou d'un aménageur, ou qu'elles débordent largement le cadre parcellaire et qu'elles nécessitent une intervention et un investissement collectif.

Les éléments cités dans les tableaux ci-dessous constituent une aide à la décision pour la caractérisation de l'aléa mouvements de terrain. A titre indicatif, une classification est proposée concernant les caractéristiques des phénomènes (ainsi que les volumes associés) et leur occurrence pour chaque niveau d'aléa mouvements de terrain. Les caractéristiques des phénomènes peuvent être directement liées aux dégâts potentiels sur un bien, et ainsi, au moyen à mettre en œuvre pour se prémunir du phénomène (définition même de l'aléa mouvements de terrain).

Les deux tableaux ci-dessous proposent une classification des phénomènes de mouvements de terrain.

Index	Description	Qualification
G1	0 à 5 m ³	Glissement faible
G2	5 à 200 m ³	Glissement modéré
G3	200 à 3000 m ³	Glissement moyen
G4	3000 à 50 000 m ³	Glissement important
G5	Supérieur à 50 000 m ³	Glissement majeur

Figure 5 : Proposition de classification des phénomènes de glissement de terrain en fonction de leurs caractéristiques

Index	Description	Qualification
E1	0 à 1 m ³	Chutes de pierres
E2	1 à 10 m ³	Chutes de blocs et éboulement
E3	10 à 200 m ³	Eboulement en masse
E4	200 à 5000 m ³	Eboulement en grande masse
E5	Supérieur à 5000 m ³	Eboulement catastrophique

Figure 6 : Proposition de classification des phénomènes d'éboulement et de chutes de blocs selon leurs caractéristiques

Des avancées scientifiques récentes ont permis de clarifier des éléments de caractérisation de l'aléa chutes de blocs dans le cadre des PPRn (MEZAP, 2014³). Dans le cadre de l'élaboration des cartes d'aléas concernées par des zones sujettes aux chutes de blocs, la direction de la construction et de l'aménagement s'est ainsi inspirée de ce guide (au même titre que l'expertise réalisée par le BRGM sur la commune de Punaauia en 2016).

Conformément à ce guide, et en accord avec les **principes fondamentaux de la caractérisation de l'aléa mouvements de terrain** (GUIDE, MATE, 1999 - Risques Mouvements de terrain, Guide Méthodologique), il a été généralement considéré de classer en aléa fort l'ensemble des zones sujettes à des chutes de blocs supérieures à 1m³ (à l'exception des zones présentant par exemple des falaises de faible hauteur où l'aléa de départ a été considéré comme faible). Il est en effet admis qu'un bloc de cette importance peut avoir un dommage au gros œuvre important (sans ruine) et l'intégrité structurelle du bâtiment sollicitée.

Ce choix est confirmé, vis-à-vis de l'aléa de référence considéré (centennal), par l'importance des parades à mettre en place pour se prémunir de l'aléa, leurs coûts, la gravité sur le plan humain, et l'effet dommageable d'un bloc de cette taille sur un bien. Pour rappel, le guide PPR Mouvements de terrain

³ Guide MEZAP (Janvier 2014): Proposition d'une note technique à l'attention des Service Déconcentrés de l'Etat en charge des procédures PPRn (BRGM, CETE, DGPR, DDT06, DDT38, DDT74, IFSTTAR, Irstea, ONF-RTM)

(MATE, 1999) caractérise une **gravité forte et des victimes associées** potentielles pour des phénomènes de chutes de blocs. Elle est évaluée à moyenne pour des chutes de pierres (inférieures à 1 m³).

La figure ci-dessous résume, dans le cadre d'un PPR, l'ordre de grandeur et l'importance des coûts des mesures de sécurisation à mettre en place en fonction des caractéristiques des phénomènes de mouvements de terrain, et ceci indépendamment du type d'ouvrage ou du bien à protéger. Le degré de **gravité** envisagé est ainsi proposé :

Niveau d'aléa	Importance des parades à mettre en place pour se prémunir de l'aléa	Exemples de mesures de prévention	Phénomènes de glissement de terrain/Chutes de blocs possibles et caractéristiques associées vis-à-vis de l'aléa de référence	Gravité potentielle
Faible	Supportable économiquement et techniquement pour un propriétaire individuel	Purge de quelques blocs, confortement d'un talus, mise en place d'un mur de soutènement de taille réduite	G1 possible, G2 très rare E1 très rare	Accident peu probable
Moyen	Supportable économiquement et financièrement par un particulier à un groupe de particulier	Terrassement de taille moyenne, mise en place de protection contre des chutes de pierre (<m3) ou de glissement (merlon etc.)	G1/G2 courant, G3 rare E1 possible	Accident isolé de taille mineure à moyenne
Fort	Cadre intéressant une aire géographique débordant le cadre de la parcelle (versant) – Parades aux coûts très important et/ou techniquement difficile	Stabilisation d'un important glissement de terrain, confortement d'un pan de falaise rocheuse, mise en place de protection contre des risques de chutes de blocs supérieurs au m3	G1 à G3 courant E1 à E3 courant	Accident possible avec victimes associées

Figure 7 : Proposition d'évaluation de l'intensité de l'aléa mouvements de terrain selon l'importance des parades à mettre en place, les caractéristiques des phénomènes associés et leur gravité potentielle sur les biens et les personnes (Selon le guide PPR – Risques Mouvements de terrain, MATE 1999)

3.1.4. La cartographie des aléas mouvements de terrain à Punaauia

A Punaauia, le zonage a été réalisé majoritairement selon l'approche « par expertise ». Initialement, il existait une cartographie réalisée par le BRGM en 2001 (rapport RP-51226), suivant le même type d'approche. Elle a servi comme document de base mais n'a pas été reprise intégralement car la nature des phénomènes considérés ainsi que les niveaux d'aléas diffèrent sensiblement de ceux retenus pour la mise en œuvre des PPR sur l'ensemble des communes de Polynésie. Aussi, une campagne de terrain complémentaire a été réalisée en 2017 par la direction de la construction et de l'aménagement dans le cadre de la révision n° 2, basée sur l'approche naturaliste et intégrant les études géotechniques à disposition. A noter que le BRGM a été missionné en appui technique pour deux sites sur Punaauia⁴.

Localement, le zonage a été affiné par le BRGM à l'aide du logiciel PIERRE pour définir l'extension des zones affectées par les chutes de blocs et éboulements, essentiellement en front de planèze. La commune dispose de plusieurs « points de calage » avec des chutes de blocs connus en divers points (Cf. : évènements historiques).

⁴ Rapport BRGM/RP-72966-FR de Juillet 2023

Dans une moindre mesure, l'outil TALREN, pour ce qui concerne les glissements de terrain, a été mis en œuvre par le BRGM au sommet des planèzes marquées par une altération importante afin d'aider à la définition de la largeur de la zone d'aléa fort à afficher en crête de versant.

La morphologie de la commune de Punaauia est relativement homogène. D'ouest en est (de la côte vers l'intérieur des terres), on distingue :

- une plaine côtière d'une largeur inférieure à 1 km ;
- des fronts de planèze de plus en plus hauts du nord au sud, passant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres ;
- des sommets de planèze entaillés par des versants secondaires et séparés par des vallées profondes telles que la Matatia, la Punaruu et la Maruapo.

Plaine côtière

L'aléa y est faible à nul. La zone considérée intègre la zone centrale de deux vallées larges à fond plat à savoir celle de Matatia et celle de la Punaruu.

Fronts de planèze

- Entre le nord de la commune et la vallée de la Matatia, le front de planèze est inexistant (passage progressif jusqu'à la plaine) ou haut de quelques dizaines de mètres. Il est généralement rocheux avec un cône d'éboulis inexistant ou réduit. L'aléa est moyen sauf lorsqu'il existe ponctuellement des accumulations colluviales en pied de pente.
- Entre Matatia et la Punaruu, les pentes sont relativement plus fortes et la hauteur des fronts est de l'ordre de 100 m. L'aléa est globalement plus élevé avec des zones d'aléa moyen alternant avec des plages indiquées en aléa élevé. Ce dernier niveau concerne des zones d'accumulation colluviales en pied de versant ainsi de des talus rocheux fracturés sub-verticaux qui sont potentiellement le siège de chutes de blocs ou d'écroulements.
- Au sud de la Punaruu, les fronts sont plus hauts (150 m) et plus escarpés. Des barres rocheuses sont visibles dans la pente et la présence d'un cône d'éboulis est quasi systématique. Des évènements récents sont référencés. L'aléa est globalement élevé.

Sommets de planèze

Côté plaine l'altération est faible et les affleurements sont rocheux. L'aléa est faible à modéré. Au sein des vallées où la pente est plus forte, l'aléa est plus élevé (moyen).

L'altération est de plus en plus marquée vers l'ouest avec l'augmentation de l'altitude et de la pluviométrie. Il y a ainsi un passage progressif vers du mamu C1 vers du mamu C4. L'aléa est moyen au sein des vallées secondaires parcourant les planèzes.

Ponctuellement, on observe en quelques points de la commune au sein des planèzes, des accumulations de colluvions. C'est le cas par exemple sur les hauteurs de Punavai. Même si leur délimitation complète est problématique à partir de rares points d'observation, elles ont été indiquées sur la carte d'aléa en niveau élevé car les matériaux en cause sont par définition potentiellement instables (glissement).

Vallées principales et grands versants

Les zones concernées sont les versants très escarpés des principales vallées qui entaillent profondément les planèzes à savoir Matatia, la Punaruu et la Maruapo. L'aléa mouvement de terrain est globalement élevé. Les phénomènes attendus sont des glissements ou éboulements affectant les parties sommitales et se propageant jusqu'en pied sous forme de coulées de débris, des glissements coulées sur fortes pentes, des éboulements et chutes de blocs au sein des versants et enfin une remobilisation des masses déjà déstabilisées au sein des cônes d'éboulis.

A l'embouchure en rive gauche de la Punaruu et dans toute la vallée de ce cours d'eau, l'aléa éboulement / chute de blocs est élevé en raison de la présence d'une formation géologique particulièrement sensible à ce type d'instabilité. Il s'agit de brèches dites volcano-sédimentaires.

Au regard de la carte d'aléa, les zones habitées concernées par un aléa fort de mouvement de terrain sont peu nombreuses.

3.2. Les inondations

3.2.1. Les phénomènes physiques

Cinq types d'inondations sont susceptibles d'affecter les îles de la Polynésie :

- les inondations dites « pluviales »,
- les inondations dites « fluviales »,
- les crues torrentielles,
- les laves torrentielles et coulées de boue,
- les ruptures d'embâcles.

Plusieurs facteurs influencent l'aléa inondation :

- l'intensité des précipitations,
- le relief,
- l'occupation du sol (imperméabilisation des terrains),
- les surcotes marines.

Les îles hautes sont les plus exposées aux inondations. Les reliefs escarpés du centre des îles induisent des vitesses d'écoulement élevées et des temps de réponse des bassins versants très courts (temps entre une averse et la crue associée). Par ailleurs, les plaines côtières, parfois larges, ne permettent pas une bonne évacuation des eaux.

D'une manière générale, l'intensité du phénomène se définit, pour un site donné, au moyen de deux paramètres : **la hauteur d'eau et la vitesse d'écoulement.**

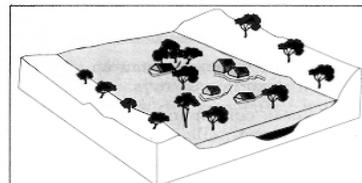
Si la hauteur est directement dépendante des caractéristiques topographiques locales, la vitesse dépend non seulement de la topographie mais également des conditions d'écoulement et de la présence d'ouvrages. Suivant le type d'inondation, l'ordre de grandeur de ces paramètres peut être précisé.

Les phénomènes d'érosion sont également intégrés dans la cartographie de l'aléa inondation.

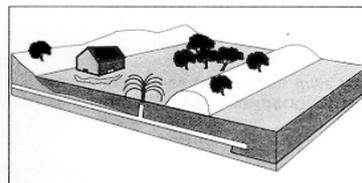
▪ **Inondations pluviales**

Les inondations dites « pluviales » concernent :

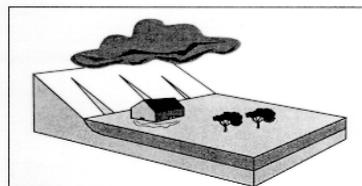
- Les zones de dépression topographique et les zones planes (ou à pente très faible où l'évacuation des eaux ne se fait que très lentement). On parle parfois de zone sub-endoréique : l'infiltration et l'évaporation sont les principaux exutoires des eaux. Dans certains cas, il peut y avoir une remontée du niveau des nappes phréatiques. Lorsque ce type d'inondation intéresse des secteurs étendus, on parle d'inondation de plaine. Ce phénomène n'est cependant pas courant en Polynésie.
- Les plaines urbanisées. Elles se produisent lorsque l'état et la capacité du réseau d'assainissement des eaux pluviales ne permettent pas un bon drainage des eaux tombant sur la plaine.



Débordement direct



Débordement indirect



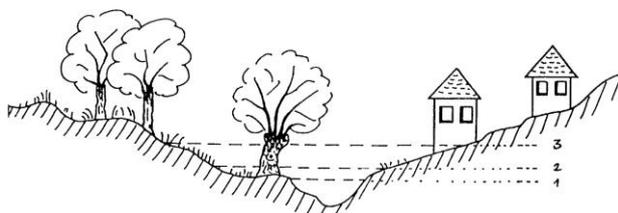
Stagnation d'eaux pluviales

Ces zones peuvent être inondées sans qu'il n'existe de relation directe avec un cours d'eau. Les niveaux d'eau sont d'autant plus importants que les sols sont imperméabilisés (urbanisés).

Généralement, le niveau et la vitesse de l'eau sont limités, sauf au droit des ouvrages d'évacuation. Par conséquent, le plus souvent, ce type d'inondation n'est pas dangereux pour la vie humaine mais peut engendrer localement des dégâts matériels importants.

▪ ***Inondations par débordement des cours d'eau, crues torrentielles et coulées de boue***

Lorsqu'il pleut, le débit des cours d'eau augmente : la rivière est en « crue ». Si la pluie est violente et durable, la rivière peut déborder de son lit et envahir les zones avoisinantes. Ces secteurs sont généralement de faible altitude et de faible pente : ils constituent le lit moyen, voire le lit majeur du cours d'eau.



1 : Lit mineur

2 : Lit moyen ou champ d'inondation fréquente

3 : Lit majeur (champ d'inondation exceptionnelle)

Il existe deux types de débordement de rivière :

- les débordements directs : il y a submersion des berges ou contournement d'un système d'endiguements limités ;
- les débordements indirects :
 - par remontée de l'eau dans les réseaux d'assainissement des eaux pluviales,
 - par débordement de nappes alluviales,
 - par la rupture d'un système d'endiguement ou autre ouvrage de protection.

Ces écoulements se produisent généralement en régime « fluvial » (hors ouvrage).

En Polynésie, les pentes des bassins versants étant fortes, le régime d'écoulement devient très souvent « torrentiel ». Les vitesses d'écoulement importantes occasionnent un transport de matériaux solides en suspension (matériaux fins et/ou flottables) et parfois (même souvent dans les grands cours d'eau de Tahiti notamment) le charriage de matériaux grossiers.

Les volumes des matériaux transportés qui au cours d'une seule crue peuvent être considérables, peuvent également favoriser la création d'embâcles et/ou la modification du tracé du chenal.

Les énergies libérées au cours d'une crue torrentielle sont importantes et par conséquent peuvent provoquer de nombreux dégâts humains et matériels (destructions d'ouvrages, de bâtiments, de véhicules et mise en péril de personnes).

▪ ***Les laves torrentielles et coulées de boue***

Il s'agit d'un phénomène de crue particulier qui consiste en la propagation d'un volume considérable de boue dense charriant des blocs. Elles ont un pouvoir destructeur plus important qu'une crue torrentielle de débit équivalent en raison essentiellement de la quantité de matériaux charriés ainsi que la densité du fluide qui les transporte.

Les laves torrentielles surviennent dans des cours d'eau caractérisés par une inclinaison forte (> 5°). Les coulées boueuses quant à elles apparaissent dans des matériaux meubles lorsque leur teneur en eau augmente suffisamment pour diminuer brutalement leur cohésion.

▪ **Rupture d'embâcles**

Un embâcle consiste en l'obstruction d'un ouvrage ou d'une section d'un cours d'eau par la formation d'une digue naturelle constituant ainsi une retenue d'eau en amont. La digue peut être constituée soit par des éléments solides (arbres et blocs) arrachés à l'amont et charriés par le cours d'eau, soit par obstruction du cours d'eau suite à un glissement de terrain. Les écoulements peuvent alors entraîner la rupture brutale de la digue et générer ainsi la propagation d'une onde de crue destructrice, onde de crue d'autant plus importante que le volume de la retenue et la hauteur de digue avant sa rupture étaient importants. Cette rupture peut se produire plusieurs jours après la formation de la digue.

Remarque : de nombreuses vallées de la commune ont été aménagées de telle sorte que les cours d'eau ont été canalisés/busés avec parfois des ouvrages souterrains. Aussi, dans ces secteurs urbanisés, l'aléa inondation cartographié correspond plus à du ruissellement urbain où les axes d'écoulement identifiés se font au niveau de caniveaux ou de voiries.

3.2.2. Les phénomènes historiques de la commune

Punaauia subit régulièrement le phénomène inondation lié aux crues des cours d'eau. Ce type de risque est d'ailleurs le plus important auquel soit soumis la commune.

Dès 1978, la presse relate ces phénomènes dans la commune. Ainsi, en février 1978, la Maruapo, au PK 16,5 a débordé, détruisant entièrement une route d'accès. En décembre 1998, La Dépêche de Tahiti indique que « la pluie incessante a raviné les entassements massifs de déchets en amont de la zone industrielle de la Punaruu, et ce sont des milliers de résidus qui se déversent maintenant dans le lagon, emportés par le rivièrre en furie ».

En 1999, Punaauia est considérée comme la commune de Tahiti ayant le plus souffert des inondations. Des habitations ont été inondées, des dégâts ont été recensés dans la vallée de la Punaruu et la route a été coupée au niveau de la Maruapo.

Les 21 et 22 janvier 2017, un phénomène pluvieux très intense, estimé supérieur à une période de retour centennale, a fortement érodé les berges de la Matatia et détruit le pont de cette rivièrre au niveau de la route de ceinture.



Figure 8 : Erosion de berge au niveau de la Matatia suite aux événements pluvieux majeurs survenus en janvier 2017.

En 2023, des désordres se sont produits en aval d'un lotissement en construction au niveau de la ravine de Tetavake.

3.2.3. Méthodologie de cartographie

3.2.3.1. Généralités

La méthodologie de cartographie de l'aléa inondation sur la commune de Punaauia repose sur le guide méthodologique « PPR – Inondation (MATE, 1999) ». Cette dernière a été adaptée au contexte local.

Conformément au guide PPR Inondation (MATE, 1999), la crue de référence considérée est la plus forte connue ou, si cette crue était plus faible qu'une fréquence **centennale**, cette dernière. Dans le cadre de phénomènes d'inondation, les niveaux d'aléas sont déterminés en fonction de l'intensité des paramètres physiques de l'inondation de référence qui se traduisent en termes de dommages aux biens et de gravité pour les personnes. Ce sont essentiellement **les hauteurs d'eau, les vitesses d'écoulement et les durées de submersion.**

L'approche cartographique de l'aléa est différente suivant les tronçons de cours d'eau concernés. Trois types de tronçons ont été déterminés :

- Les parties non accessibles des cours d'eau ;
- Les parties accessibles sans enjeux ou avec enjeux non prioritaires ;
- Les parties au droit des zones à enjeux.

Dans les parties très encaissées ou en partie sommitale des cours d'eau, zones généralement non accessibles en véhicule, le tracé des aléas est réalisé à l'aide des photographies aériennes et des données informatiques disponibles au moment de la réalisation des cartes. Le contrôle et l'ajustement de ces tracés sont, si possible, réalisés au droit des sections accessibles via un suivi de l'axe du cours d'eau au GPS. Dans les parties accessibles aux véhicules, le tracé des aléas est défini par une analyse hydrogéomorphologique au droit de différentes sections d'écoulement réparties le long du cours d'eau (visite de terrain). Cette analyse a principalement pour objectif de bien individualiser, si possible, les différentes composantes du talweg : lit mineur, lit moyen et lit majeur mais également de recenser l'ensemble des ouvrages hydrauliques ayant un impact sur la formation et l'écoulement des crues.

Ces relevés d'observations et d'interprétations sont contrôlés, voire complétés, au moyen :

- des relevés de laisses de crues,
- de calculs hydrologiques et hydrauliques simples au droit de sections spécifiques ou courantes.

Ces informations ponctuelles sont ensuite interpolées afin d'obtenir un tracé des aléas en continu sur la totalité du cours d'eau à l'aide des photographies aériennes et des courbes de niveaux des cartes topographiques.

Dans les zones à enjeux, des modélisations détaillées peuvent-être mise en œuvre afin de simuler les écoulements de surface, c'est à dire de déterminer des hauteurs de submersion, des vitesses d'écoulement et des extensions de zones inondées pour des crues de référence. Il est rappelé que la fréquence centennale a été retenue pour le choix de l'aléa de référence pour les crues torrentielles. Ces modélisations intègrent le phénomène de surcote marine à l'exutoire en contexte d'évènement cyclonique (+1 m). A terme, elles devront également tenir compte de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique selon une valeur à définir d'après les données les plus récentes issues des estimations du GIEC.

3.2.3.2. Les niveaux d'aléas

Comme le rappelle **le guide méthodologique** PPR – Risque Inondation (MATE, 1999), s'agissant de problème d'aménagement, l'aléa est déterminé en fonction de **l'intensité** des paramètres physiques de l'inondation de référence qui se traduisent en termes de **dommages aux biens et de gravité pour les personnes**.

L'aléa inondation est donc essentiellement défini en fonction de la **hauteur de submersion** et de la **vitesse d'écoulement** des eaux comme indiqué dans le tableau suivant :

Vitesse Hauteur	Faible à moyenne Vitesse < 0,5 m/s	Moyenne à forte Vitesse ≥ 0,5 m/s
H < 0,5 m	Faible	Moyen
0,5 m ≤ H ≤ 1 m	Moyen	Fort
H > 1 m	Fort	Très fort

Figure 9 : Définition de l'aléa inondation en fonction de la hauteur de submersion et de la vitesse d'écoulement des eaux

3.2.4. La cartographie de l'aléa à Punaauia

La commune de Punaauia a été traitée par interprétation qualitative et semi-quantitative. Six cours d'eau de la commune ont fait l'objet d'études hydrauliques comprenant une approche par modélisation et sont exposés dans le tableau suivant :

Cours d'eau	Année étude	Linéaire	Bureau d'étude Référence
Matatia	2006	1,4 km	SPEED/BCEOM
Maruapo	2011	0,7 km	EGIS Eau - GRI/n° 04635 D
Vaiopu	2012	1,8 km	EGIS Eau - HSO 11126K
Vaiaoa	2012	0,75 km	SPEED - 1374 11 05-V2
Punaruu	2006 2017	2,8 km	BCEOM/SPEED Vai-Natura - R20161102-HY-P
Nymphea	2020	0,6 km	Groupement INFRA+/SUEZ/SPEED/BEST MC6

Figure 10 : Liste des cours d'eau de la commune de Punaauia ayant fait l'objet d'une étude hydraulique

La plaine côtière représente un cas de figure différent avec des accumulations ponctuelles lors des pluies et un problème général de drainage compte tenu des faibles pentes. Des problématiques de ruissellements urbains participent également à générer des zones inondées.

Plaine alluviale

La morphologie du territoire communal se caractérise par des versants en pente relativement douce, inclinés à l'ouest vers la mer. Ces versants sont ciselés par un réseau hydrographique avec une orientation globalement sub équatoriale.

Les rivières les plus importantes traversent une plaine alluviale variant entre 100 m à plus de 1000 m par endroit, avant d'atteindre les eaux du lagon. Pour les autres, la partie aval de leurs cours est moins nette. Avec un lit mineur plus ou moins marqué au niveau des versants dominant la plaine alluviale, ces petites rivières se perdaient, à l'état naturel, en de multiples petits fossés dans la plaine alluviale, favorisant ainsi le dépôt des matériaux terrigènes. Ces petites ravines sont aujourd'hui plus ou moins canalisées.

Par suite de la faible pente et donc de la difficulté à satisfaire à l'évacuation des eaux pluviales, la totalité de la plaine alluviale peut être considérée avec un aléa faible. Cet aléa est associé à un niveau de risque généralement peu élevé (aucune conséquence sur les vies humaines, et généralement pas ou peu de dégâts structurels majeurs). Une analyse plus fine de cet aléa nécessiterait :

- une enquête sur la fréquence et la localisation des événements observés,
- un diagnostic de l'ensemble des réseaux d'assainissement.

Ravine Vairail/Nymphaea (BV : 0,9 km²)

La partie amont de la ravine est localement terrassée, notamment à la hauteur du centre d'hébergement universitaire. Le cours d'eau est alors canalisé avec une succession de passages aériens ou couverts (enterrés). Des débordements sont possibles lors d'épisodes pluvieux exceptionnels, notamment lors d'accumulations d'embâcles sur les grilles. Dans la partie aval, la concomitance d'événements pluvieux intenses et de marée exceptionnelle peut générer des débordements.

Ravine « Carrefour » ou Papaeria (BV d'environ 0,9 km²)

Dans la partie amont du bassin versant et au droit de la confluence de trois petits thalwegs, des terrassements barrant tout le fond de vallée ont été réalisés sans existence de drain. Cette zone a été classée en aléa élevé.

A mi hauteur du bassin versant, une crue exceptionnelle et /ou une formation d'embâcles peut générer des débordements sur la chaussée puis inonder des habitations riveraines. Dans la partie aval, l'étude hydraulique de 2020 indique l'absence de débordement.

Ravine Paearia (BV d'environ 0,45 km²)

Cette ravine draine un petit bassin versant très urbanisé, notamment dans sa partie amont. Elle est totalement canalisée et fait partie intégrante du réseau d'évacuation d'eaux pluviales. Il conviendrait de vérifier le dimensionnement de cette ravine, sous peine de débordement sur les voiries. Juste à l'amont du centre commercial des écoulements se produisent fréquemment en parallèle du canal d'évacuation.

Rivière de Vaipoopoo (BV d'environ 3 km²)

Petite rivière peu urbanisée dans son ensemble qui récupère notamment les eaux des lotissements en amont.

Ravine de Te Tavake (BV d'environ 0,55 km²)

Petite rivière dont le débit maximal a dû fortement augmenter suite à l'imperméabilisation du bassin versant. Elle débouche sur la plaine alluviale au niveau de l'usine Premium et du parking de la Mairie. Suite aux apports potentiels tant liquides que solides, il est probable, que lors d'épisodes pluvieux conséquents, des débordements importants se produisent. Ce fut le cas notamment lors des fortes pluies de janvier 2023 qui ont impacté le secteur au niveau de la mairie. Ces débordements ont alors tendance à reprendre le trajet d'évacuation initial.

Rivière Matatia (BV d'environ 9 km²) pk : 10,85

Le débit décennal est estimé à 73 m³/s. Le débit centennal est estimé à 150 m³/s.

Malgré les aménagements réalisés dans le lit moyen, il est probable que des débordements de fréquence inférieure ou égale à la décennale se produisent en amont de la confluence avec la rivière Tihute notamment au droit de tous les ouvrages. Au droit de la confluence, des débordements et même une dérivation de cette rivière sont envisageables. En aval, au droit du pont comportant une ancienne station hydrométrique, des débordements relativement fréquents peuvent se produire sur les deux rives et plus rarement inonder certaines habitations de la rive droite.

En aval de la Route Des Plaines, le lit mineur ainsi que le pont de la route de ceinture sont de dimension limitée et des débordements relativement fréquents (fréquence supérieure à la quinquennale) peuvent s'y produire. Les aménagements hydrauliques réalisés dans le cadre de la réalisation de la RDP (dérivation des débits de certaines ravines vers la Matatia) vont aggraver la fréquence de ces débordements.

Lors de l'évènement pluviométrique de janvier 2017, le pont de la Matatia au niveau de la route des plaines a été détruit.

Ravines pk : 11,3 et pk : 12,1 (ravine Maveraura)

Les débits de ces ravines sont détournés sur la Matatia. La rupture de pente des ouvrages d'évacuation des eaux de ces ravines au droit de la RDP favorise les dépôts des sédiments qui risquent, sans entretien, de boucher l'ouvrage et générer ainsi des débordements sur la RDP.

L'autre risque de débordement pouvant être préjudiciable se situe au droit de la section d'entonnement, situé en amont de la RDP, entre le lit naturel et l'ouvrage canalisant les eaux de ces ravines. Ces sections nécessitent un contrôle, voire un entretien, régulier.

Rivière Putuoa (BV d'environ 1,3 km²)

Petit bassin versant peu urbanisé, drainé par deux thalwegs principaux :

- au nord la rivière Putuoa, de plus de deux kilomètres de longueur,
- au sud, une rivière sans nom d'environ quatre kilomètres de long.

Les débordements probables lors des crues exceptionnelles vont principalement se produire :

- au droit de la confluence,
- en aval rive droite de la confluence,
- par débordement du chenal calibré au niveau de la plaine alluviale en aval de la RT2.

Ravine Vaitahuri nord (BV d'environ 1,3 km²)

Le débit décennal est estimé à 8 m³/s. Le débit centennal est estimé à 15 m³/s.

Cette ravine est canalisée en rive droite dans sa partie médiane. Des débordements ponctuels et des instabilités de berges peuvent survenir au droit de certaines parcelles. A noter que lors d'un événement exceptionnel tant sur le plan liquide que solide (probabilité très faible), l'affluent principal pourrait être dérivé vers la ravine du lotissement « Punavai » et modifier ainsi les aléas inondation de ce secteur.

Il faut également signaler, qu'au droit du premier virage lorsque l'on se dirige de la RT2 vers le lotissement "Punavai", la présence du mur et d'un seuil rustique en enrochement favorisent des débordements en rive gauche lors de crues rares. Ces débordements vont alors emprunter la voirie et inonder le rond point de la RT2.

En amont immédiat de la RT2 se trouve un ouvrage d'entonnement permettant d'évacuer directement en mer les eaux de cette ravine au moyen d'une canalisation de diamètre 2,6 m. Une grille de protection est située en amont immédiat de cette canalisation, et ceci afin d'éviter aux principaux corps flottant ou charriés d'entrer dans la canalisation. Cette grille, nécessaire au bon fonctionnement de l'ouvrage, risque néanmoins d'être obstruée lors des crues fortement chargées et générer ainsi des débordements pouvant être destructeurs. Un aménagement complémentaire (fosse à sédiment située plus en amont) ou un nettoyage fréquent, voire même durant les crues (dégrilleur), paraît indispensable.

Ravine Vaiopu (BV d'environ 0,8 km²) pk : 14,2 environ

Ce petit bassin versant de forme très allongé possède un fond de vallée particulièrement pentu. Il fait actuellement l'objet d'une urbanisation intensive qui aura pour principale conséquence d'augmenter les débits. Des lotissements sont en cours de réalisation dans la partie amont du bassin.

Afin d'aménager au mieux les parcelles du lotissement amont (lotissement SAGE), la ravine a été confinée en rive droite.

Les débits décennal et centennal estimés sont de 10,8 m³/s et 22,8 m³/s respectivement. En crue décennale, la Vaiopu est globalement non débordante, le lit mineur ayant une capacité suffisante pour évacuer le débit de pointe. Toutefois, certains ouvrages vont engendrer des débordements ponctuels.

Pour une crue centennale, plusieurs points de débordements sont recensés et qui se concentrent sur la rive gauche où le cours d'eau a été confiné. Il n'est pas relevé de débordement en aval de la RDO jusqu'à l'embranchement avec la Punaaru.

Rivière Punaaru (BV d'environ 44,6 km²) pk : 14,4

Le débit décennal est estimé à 257 m³/s. Le débit centennal est estimé à 422 m³/s.

Cette rivière est la plus importante du territoire communal. Elle prend sa source dans les reliefs centraux de l'île de Tahiti Nui, au niveau du mont Orohena. Une importante zone d'extraction (gravières) et une importante zone industrielle occupent le fond de la vallée en amont immédiat de la RT2. La rivière est aménagée (principalement par des digues en enrochements) depuis le début de la zone d'extraction jusqu'au lagon.

Le débit décennal apparaît bien canalisé par le lit de la rivière, mais on relève néanmoins des débordements au niveau d'un gué et surtout au niveau de l'embouchure. Pour un débit centennal, plusieurs zones de débordement sont identifiées avec deux principales qui se situent à l'embouchure et au niveau de la zone industrielle en amont du pont de la RDO.

Rivière Maruapo (BV d'environ 4 km²)

Le débit décennal est estimé à 36 m³/s. Le débit centennal est estimé à 76 m³/s

Des débordements relativement fréquents peuvent se produire au droit de la confluence avec son principal affluent. Ces deux cours d'eau semblent avoir de fortes potentialités de transport solide.

Lors d'une crue particulièrement violente accompagnée de transports solides importants ou de coulées boueuses, c'est-à-dire lors d'un événement particulièrement exceptionnel, un changement de lit (dérivation du cours d'eau en rive gauche) pourrait se produire.

Ravine sans nom (BV d'environ 0,55 km²)

Cette ravine présente un talweg encaissé puis, au droit de son débouché sur la plaine alluviale, un cône de matériaux grossiers. Ce cône situé en pied de falaise suggère une mise en place par coulées boueuses.

Le lit mineur étant peu marqué, des débordements ou un changement de lit au droit de ce cône peuvent être envisagés.

Ravine Vaioa (BV d'environ 1,7 km²)

Le débit décennal est estimé à 18 m³/s. Le débit centennal est estimé à 36m³/s. Pour une crue de fréquence décennale, des débordements sont identifiés dans la partie aval de cette ravine.

3.3. Les cyclones

3.3.1. Les phénomènes physiques

Les phénomènes cycloniques se produisent assez régulièrement dans un couloir privilégié Cook – Australes – Rapa ou dans son voisinage.

Le risque de subir une dépression tropicale forte ou un cyclone (vent moyen près du centre supérieur ou égal à 48 nœuds) semble très faible aux Marquises. Des Tuamotu à la Société, on peut estimer entre 4 et 8 (croissant du Nord Est au Sud Ouest de la zone) le nombre de cyclones de ce type à attendre par siècle (source Météo France). Les atolls des Tuamotu, étant donné leur étendue en longitude et latitude ainsi que leur dispersion relative, ne paraissent menacés de subir un cyclone que tous les dix à vingt-cinq ans en moyenne c'est à dire 4 à 10 cyclones par siècle (DUPON J.F.). Aux australes enfin, c'est une fois tous les deux à trois ans que se produirait un événement cyclonique de forte intensité.

On sait que la zone intertropicale située sur plus de 45° de latitude, à cheval sur l'équateur, reçoit un maximum de rayonnement solaire. C'est donc là que les couches supérieures de l'océan accumulent une grande quantité d'énergie solaire qui repasse finalement, en grande partie, à l'atmosphère par les voies du rayonnement infrarouge et surtout, de l'évaporation (Météo France).

Pendant, il semble bien que les réserves thermiques accumulées dans la mer soient supérieures aux pertes qui s'opèrent par ces voies classiques et que des « soupapes de sécurité » (les cyclones) soient nécessaires pour rétablir l'équilibre entre gain et perte de chaleur par la mer.

▪ **La marée de tempête**

La marée de tempête se révèle comme un phénomène des plus dangereux parmi ceux qui accompagnent le cyclone tropical. Elle se traduit par un écart plus ou moins important entre le niveau de la mer observé et celui qui est simplement lié au phénomène de marée astronomique.

Une tempête, tropicale ou non, se traduit par un minimum de pression de dimensions comprises entre quelques centaines et quelques milliers de kilomètres de rayon. Par effet barométrique, la surface de la mer subit, sous la dépression, un soulèvement qui est encore accentué par des effets dynamiques liés au vent qui accompagne la dépression et au déplacement propre de celle-ci.

Ainsi se forme une onde dont le mécanisme interne est le même que celui de la marée astronomique, et dont la hauteur dépend du creux barométrique, de la vitesse de déplacement de ce dernier, des caractéristiques géométriques du bassin océanique, etc.

Les îles de la Polynésie étant dépourvues de plateau continental et sans baies importantes, les surcotes marines associées aux cyclones sont relativement faibles (pour un cyclone de classe 5, la surcote engendrée au rivage est de l'ordre de 1 à 2 mètres pour des vagues atteignant 10 à 12 mètres de haut).

Les données cycloniques historiques s'étalent sur la période allant de 1831 à nos jours. Les données numériques fiables (intensité des cyclones, hauteur de houle) n'existent que depuis la saison chaude 1969 – 1970.

Depuis l'année 1831, au moins 73 cyclones sont répertoriés dans les archives historiques, 39 d'entre eux se sont produits durant les 46 dernières années (1970 – 2010), soit 64% des cyclones inventoriés.

▪ ***Le choc mécanique des vagues***

Le choc mécanique des vagues est lié à la pression exercée par l'impact des vagues sur les structures. Les chocs mécaniques des vagues sont extrêmement violents et sont considérés comme un aléa à part entière. Ce phénomène peut être très destructeur lors des phénomènes cycloniques majeurs.

Lorsqu'un tel phénomène atteint une structure ou un bâtiment existant, les marges de manœuvre pour diminuer la vulnérabilité de l'ouvrage sont faibles. Pour cette raison, il est recommandé d'adopter une posture d'adaptation et d'anticipation des phénomènes caractérisés en privilégiant une implantation la plus éloignée possible du bord de mer, a fortiori et si possible en dehors de l'aléa choc mécanique.

3.3.1. Les phénomènes historiques

Il n'existe pas d'histoire des phénomènes de houle, ni de marée de tempête en Polynésie. Néanmoins, certains de ces phénomènes sont connus, ils apparaissent régulièrement dans l'histoire de la Polynésie et sont parfois relatés dans la presse.

Les Tuamotu ont été particulièrement touchés par les cyclones du début du XXe siècle. La houle y a provoqué plusieurs centaines de morts. Aussi, les témoignages rapportent qu'en 1905 les vagues seraient rentrées jusqu'à 180 m à l'intérieur de Papeete. En général, les cyclones qui ont eu lieu au cours du XXe siècle ont été accompagnés de houles plus ou moins importantes.

Sans être exceptionnelles, les houles qui affectent la Polynésie peuvent avoir des conséquences dommageables. En 1999, à Huahine par exemple, la porte de la mairie de Haapu a éclaté sous l'assaut des vagues, de nombreux complexes touristiques et habitations ont été inondés. A Tahiti, dans la commune de Papenoo, au niveau du trou du souffleur, la houle peut bloquer la circulation pendant plusieurs jours. A Rangiroa lors du cyclone Orama, plusieurs maisons sont « traversées » par les vagues.

Il est rappelé que huit cyclones ont été meurtriers durant les derniers 133 ans (1843, 1878, 1903, 1905, 1906, 1983, 1997, 1998). Les décès sont dus à toute ou partie des causes suivantes : effets directs de la houle, surcotes engendrées par les marées de tempête, inondations et mouvements de terrains induits par les précipitations.



Figure 11 : Destructions après le passage du cyclone Emma (Mars 1970 – Source : Historique des cyclones de Polynésie Française de 1831 à 2010 ; Meteo France)

3.3.2. Méthodologie de cartographie

3.3.2.1. Modélisations

La cartographie de l'aléa surcote marine est issue d'un travail de modélisation par BRL Ingenierie (2022) intégrant la donnée topographique et bathymétrique LIDAR (2015).

La première étape de l'étude a consisté à déterminer les événements de référence par analyse des cyclones historiques et à déterminer les cyclones de période de retour centennale. Ainsi, 77 cyclones observés sur la période entre 1976 et 2021 ont été sélectionnés. Il a été défini des points d'analyse pour couvrir les façades des îles à partir desquelles sont générées des conditions cycloniques extrêmes de référence. La première méthode est basée sur la détermination de cyclones extrêmes synthétiques prenant en compte des vents cycloniques, la distance de passage de l'œil du cyclone au site, le rayon cyclonique, la variation de l'intensité du vent au cours de l'évolution du cyclone, sa vitesse de déplacement ainsi que sa trajectoire. La seconde méthode est basée sur l'extrapolation directe de la base de données générées par les cyclones historiques.

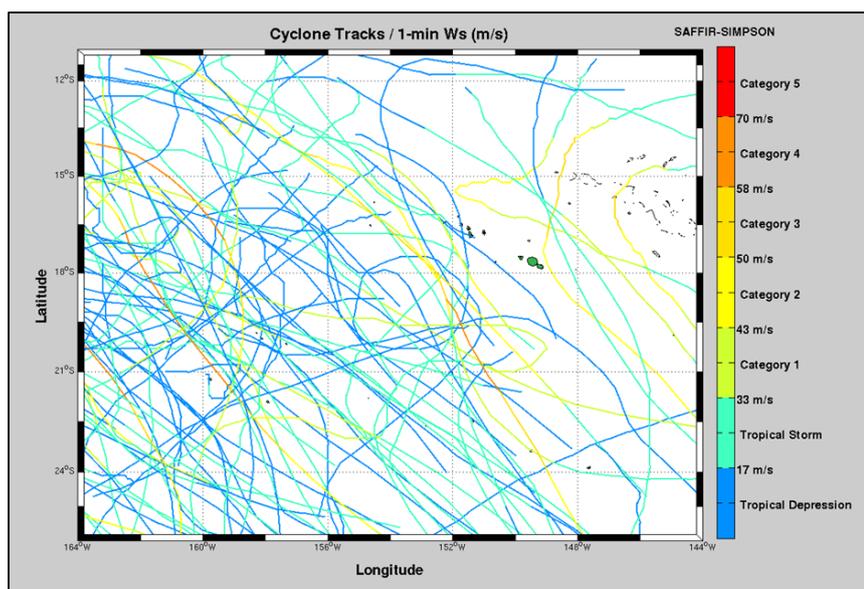


Figure 12 : Trajectoires des événements cycloniques historiques ayant concernés la Polynésie.

Les conditions cycloniques de référence les plus sécuritaires ont été retenues, avec pour Moorea et Tahiti des conditions centennales uniquement, et pour Bora Bora les conditions du cyclone WASA (1991) pour certains points de référence.

Sur cette base, les états de mer générés par ces cyclones extrêmes ont été calculés pour chaque point de référence et propagés jusqu'aux sites d'étude à l'aide du modèle SWAN (Cf. : Annexe 3).

Dans le cadre de l'étude, il a été demandé de modéliser également la surcote marine en intégrant une augmentation du niveau marin de 60 cm afin de tenir compte de l'impact du changement climatique. Cette valeur est estimée à l'horizon 2120 dans le cas d'un scénario « optimiste » de diminution des émissions de gaz à effet de serre (le scénario le plus pessimiste projetant une élévation de +1,4 m) par le GIEC⁵. Les estimations du GIEC sur l'élévation du niveau marin à l'échelle planétaire sont exposées dans le tableau ci-après. A noter que depuis 2019, de nouvelles estimations, cette fois à l'échelle régionale, ont été déterminées par le GIEC et sont légèrement plus pessimistes pour la Polynésie française.

Horizon	Année	Scénario RCP2.6			Scénario RCP8.5		
		bas	médiane	haut	bas	médiane	haut
20 ans	2040	+0.03m	+0.09m	+0.14m	+0.05m	+0.11m	+0.16m
50 ans	2070	+0.11m	+0.21m	+0.31m	+0.24m	+0.36m	+0.49m
80 ans	2100	+0.18m	+0.34m	+0.48m	+0.50m	+0.74m	+0.98m
100 ans	2120	+0.21m	+0.38m	+0.54m	+0.65m	+1.01m	+1.36m

Figure 13 : élévation du niveau marin selon le GIEC (2019)

⁵ Groupement d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

Pour la modélisation du phénomène de submersion marine, il est pris en compte la marée de tempête, la surcote de vague et le jet de rive. Pour ce faire, les logiciels Télémac2d et Xbeach ont été employés. Les cartographies en résultant sont une combinaison de la hauteur d'eau couplée avec la vitesse d'écoulement (Cf. : Figure 14).

Hauteur (m)	Vitesse (m/s)		
	< 0,5	0,5 < V < 0,75 m/s	> 0,75 m/s
< 0,5	Aléa faible	Aléa fort	Aléa fort
0,5 < H < 1 m	Aléa moyen	Aléa fort	Aléa très fort
1 m < H < 1,5 m	Aléa fort	Aléa très fort	Aléa majeur
> 1,5 m	Aléa très fort	Aléa majeur	Aléa majeur

Figure 14 : définition de l'aléa surcote marine selon le couple (H, V)

Afin de cartographier la zone de déferlement des vagues, où il est considéré un risque de destruction majeur, le paramètre β (breaking wave coefficient) a été utilisé pour caractériser l'aléa « action mécanique de la houle » (Cf. : Figure 15). Celui-ci traduit le ratio d'énergie dissipée lorsque les houles se brisent sur le littoral. Seule la zone d'aléa fort sera conservée pour ce dernier.

Hs	Beta > - 0,1	Beta < - 0,1
	Hs < 0,25 m	Aléa négligeable
0,25 m < Hs < 0,5 m	Aléa faible	Aléa moyen
Hs > 0,5 m	Aléa moyen	Aléa fort

Figure 15 : définition des classes l'aléas pour l'action mécanique des houles

3.3.2.2. La cartographie à Punaauia

La surcote de référence en mer définie par BRL Ingénierie est de +1,3 m tenant compte de l'élévation du niveau marin à 2120.

L'aléa submersion marine total, tel qu'il figure sur les cartes de risque, résulte de la combinaison de la submersion marine et de l'action mécanique des houles (Cf. : Figure 16 ci-après). Seul l'aléa fort « action mécanique » a été conservé dans la cartographie des aléas. Les aléas de niveau majeur et très fort de submersion marine ont été fusionnés.

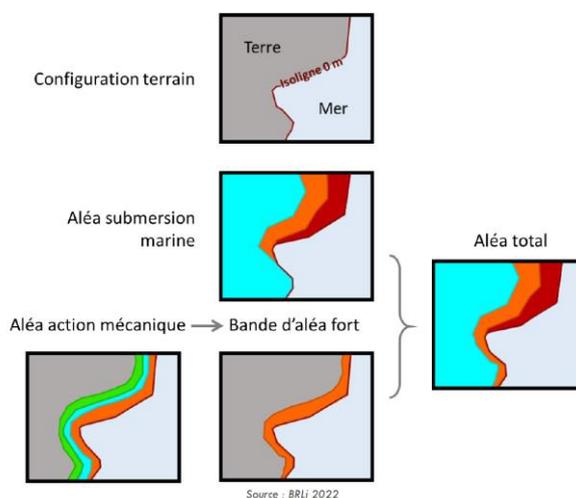


Figure 16 : schéma de la combinaison des aléas

A noter que la cartographie de l'aléa est tributaire des résultats de la modélisation et de la transposition des résultats sur les fonds topographiques disponibles. En l'occurrence, la donnée topographique LIDAR acquise en 2015 couvrant l'ensemble de la plaine littorale de Punaauia a été utilisée.

L'aléa fort de submersion marine a été prolongé jusqu'en haut de plage qui constitue une zone de transit sédimentaire où son aménagement non contrôlé pourrait générer un risque pour les avoisinants (érosion, évolution du trait de côte).

3.4. Les tsunamis

3.4.1. Les phénomènes physiques

Les tsunamis sont dus à des mouvements des fonds marins ou des côtes. De même que les houles longues d'origine lointaine, ils sont totalement indépendants des conditions météorologiques locales et peuvent intervenir sous un ciel serein. Ils en sont d'autant plus dangereux.

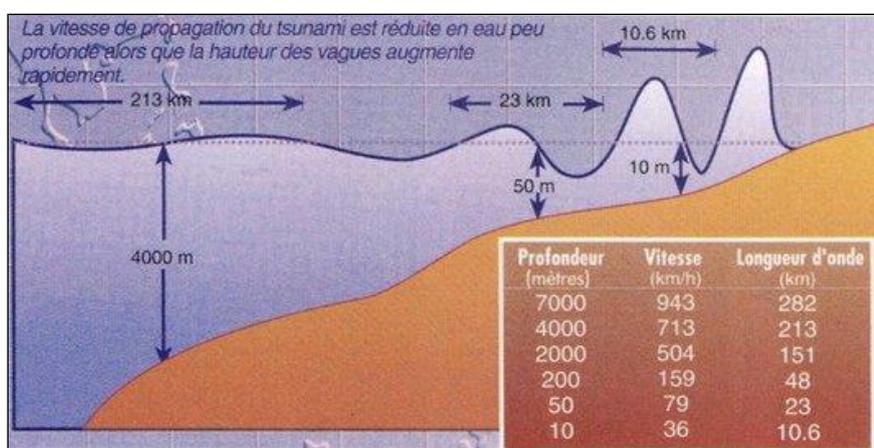


Figure 17 : Caractéristiques d'un tsunami en fonction de la profondeur (d'après CEA, 2002)

En plein océan les vagues des tsunamis n'excèdent que rarement 2 m (Cf. : Figure 18), à cause de leur grande longueur d'onde (qui peut varier de 50 à 200 km) et de leur vitesse de plusieurs centaines de km/h. C'est au voisinage des côtes qu'elles deviennent très dangereuses.

h	H	C		λ
		km/h	m/s	
m	m	km/h	m/s	km
5 000	1	800	222	267
2 000	1.25	504	140	168
1000	1.5	356	99	119
500	1.8	252	70	84
20	4	55	15.3	18.3
5	5.6	38	10.4	12.5
2	7.1	34	9.5	11.4

Figure 18 : Caractéristiques physiques d'un tsunami. Avec h : profondeur ; H : hauteur de la vague de l'océan ; c : vitesse de la vague ; λ : longueur d'onde de la vague

En Polynésie, les pentes des côtes plongeant dans l’océan sont fortes et souvent, l’existence d’une barrière de récif, à bonne distance du littoral, atténue les effets des tsunamis. Ce « talus » escarpé, ainsi que la forme convexe arrondie des petites îles a tendance à réfléchir et disperser l’énergie au lieu de la concentrer.

Mais il y a des exceptions. Le cas des îles Marquises est nettement plus défavorable. Les grandes baies à faible pente, ne bénéficiant pas de la protection de barrières récifales, piègent et concentrent l’énergie propagée dans l’eau. La mer envahit alors le rivage et les plaines côtières sur plusieurs centaines de mètres, lorsque les altitudes sont faibles.

Dans la plupart des cas, le tsunami se traduira par une montée des eaux, sans vague déferlante, provoquant des inondations de la plaine littorale.

L’incidence d’un tsunami est dictée par la bathymétrie côtière. Il faut donc considérer la configuration des côtes et du littoral des îles polynésiennes :

- les îles hautes avec barrières de récif (îles du vent, îles sous le vent, Gambier) ;
- les îles hautes sans barrière de récif (îles Marquises, Tahiti iti) ;
- les atolls (Tuamotu).

Deux des îles Australes peuvent être rattachées au groupe des îles du vent, les trois autres aux îles Marquises.

Pour les petites îles polynésiennes, les fortes pentes de la côte plongeant dans l’océan font que les tsunamis ne pourront pas se développer et atteindre de grandes amplitudes.

De 1830 à nos jours, seuls 18 tsunamis ont touché les côtes polynésiennes. A Papeete, les hauteurs enregistrées varient entre 0,05 et 1,15 m. La hauteur paroxysmale a été atteinte lors du tsunami du 23 mai 1960 suite au séisme du Chili (MI 9,5) plus fort séisme jamais enregistré (Figure 19). Il n’existe que peu de renseignements sur le Tsunami des Aléoutiennes en avril 1946 (le plus important Tsunami du siècle). Il semble que les amplitudes de 1960 aient été largement dépassées, entraînant des dégâts importants à Papeete, sur la côte nord et un peu partout dans l’île. A Papeete et Arue plusieurs maisons du bord de mer, construites en bois, ont été déplacées (J. Talandier).

Trois cas de figures semblent se détacher suivant l’origine du tsunami : 1) la côte ouest de l’Amérique du Sud ; 2) la côte nord du Pacifique ; 3) l’arc insulaire des Tonga Kermadec.

Le plus fort tsunami jamais enregistré se situe sur la côte ouest de l’Amérique du sud et a engendré une inondation de 1 à 2 m sur la côte de Tahiti. Il ne reste pas de description précise du tsunami de 1946, originaire des Aléoutiennes, mais il semble que la surcote engendrée ait été significativement plus importante que celle du tsunami de 1960, dans les zones les plus exposées (côtes nord de Tahiti dépourvues de lagon).

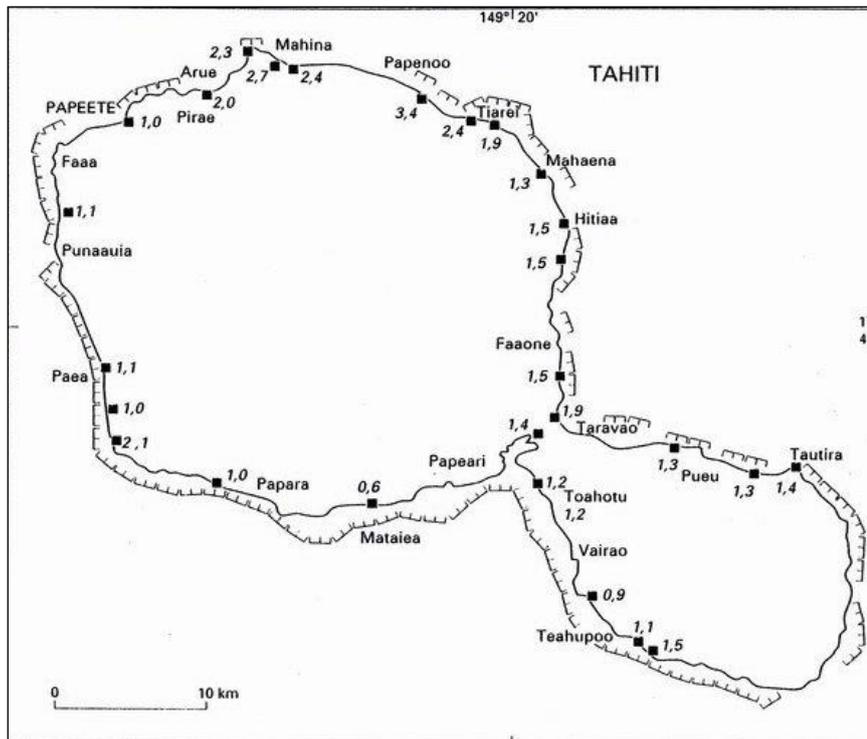


Figure 19 : Hauteurs des inondations (en m) observées à Tahiti lors du Tsunami de mai 1960 (séisme du Chili) (source Orstom).

Enfin d'après une simulation réalisée par le CEA en 2005 pour l'aéroport de Faa'a, un tsunami naissant au niveau de l'archipel des Tonga / Kermadec, suite à un séisme majeur (magnitude 8) ne devrait pas engendrer de surcote supérieure à 1 m.

Enfin, le tsunami le plus récent et notable ressenti en Polynésie, celui du Japon le 11 mars 2011, a été perçu sur la côte ouest de Tahiti comme l'équivalent d'une marée de quelques dizaines de centimètres d'amplitude.

3.4.2. Les phénomènes historiques sur la commune

Deux tsunamis particulièrement destructeurs ont affecté la commune de Punaauia au cours du siècle dernier. Le plus connu est celui ayant fait suite au plus fort séisme jamais enregistré. Ce séisme s'est produit sur les côtes chiliennes en mai 1960 et a entraîné une inondation marine de 1,1 m de haut sur le littoral de la commune.

Un autre séisme important a eu lieu en 1946, mais il ne reste pas de descriptions précises du tsunami engendré. Cependant il semble que la surcote associée ait été significativement plus importante que celle de 1960. Néanmoins, la surcote à Punaauia n'a pas dépassé 1 mètre.

Une valeur du même ordre est attendue en cas de tsunami originaire des Tonga-Kermadec. Dans tous les cas, il s'agit d'inondations lentes se succédant en plusieurs phases et non de déferlements destructeurs.

3.4.1. Cartographie de l'aléa à Punaauia

Punaauia fait partie des communes de Polynésie bénéficiant d'une protection relative offerte par le récif et le lagon. Il existe cependant des passes ainsi qu'une baie ouverte où cette protection est moindre.

Le phénomène d'inondation par un tsunami est très proche de la surcote marine liée au cyclone. Ainsi la carte d'aléa met en évidence les mêmes zones vulnérables que celles décrites dans le cadre de l'aléa houle cyclonique et marée de tempête.

4. Les enjeux sur Punaauia

4.1. Notion générale

Les enjeux correspondent à l'ensemble des habitants, des biens personnels et surtout immobiliers, des activités, des moyens de communication, du patrimoine culturel et des sites à protéger.

L'appréciation des enjeux passe d'abord par l'analyse des différents types d'occupations et d'usages du sol actuels et projetés au travers notamment des différents schémas d'urbanisme et d'aménagement du territoire (PGA, PAD,...).

Un PGA existe sur la commune de Punaauia et a été rendu exécutoire par l'arrêté n° 263 CM du 18 mai 2005 et révisé selon l'arrêté n° 345 CM du 24 mars 2017.

4.2. Présentation générale

Deuxième commune par sa population, Punaauia comptait 28 103 habitants, au dernier recensement réalisé en 2017. La commune connaît un des plus forts taux d'augmentation avec une population qui ne comptait que 5 245 habitants en 1971. Le taux d'accroissement moyen annuel est de 2,70 % par an depuis 25 ans (pour un taux moyen de croissance de 1,74 % pour l'île de Tahiti). En 2017, la densité de la commune était de 370 habitants au km², mais autour de 2 300 habitants au km² en considérant la zone réellement urbanisée.

De près de 1 km de large au maximum au niveau de la Pointe des Pêcheurs, la plaine côtière concentre une grande partie des habitations.

Les hauteurs ont également commencé à s'urbaniser et la tendance est à l'occupation des parties hautes par des lotissements.

Punaauia est une commune où prédominent les aspects résidentiels et touristiques (hôtels, pensions de famille, marina, ...), mais également des activités secondaires avec une zone industrielle importante dans la vallée de la Punaruu notamment. Elle comporte trois bâtiments de classe D (gendarmerie et centre de secours) et possède parmi ses installations une centrale EDT.

Punaauia dispose aussi d'un pôle culturel avec le Musée de Tahiti et des îles Te Fare Iamanaha, et surtout d'une université. Elle compte quatorze établissements scolaires. Il n'existe aucun dispositif de santé hormis dispensaire et centres médicaux (cabinets).

L'extension de la zone urbaine du « Grand Papeete » qui va de Mahina à Paea, a entraîné une forte hausse du trafic routier sur cette commune de la côte ouest. L'ouverture de la Route des Plaines permet de traverser rapidement la commune en évitant l'ancienne route de ceinture (RDC). Cette voie rapide, réservée à la grande circulation, libère donc l'ancienne RDC qui a développé une vocation de voirie urbaine desservant les riverains.

Une station d'épuration communale localisée à la Matatia traite les eaux usées de l'ensemble de la commune.

5. Le zonage des risques et le règlement

Les aléas sont déclinés par nature (inondation, mouvements de terrain et submersion marine) et par niveau d'aléa (faible, moyen, fort et majeur).

Les risques sur Punaauia sont obtenus par le croisement des aléas entre eux avec la zone à enjeux. Sachant que l'ensemble de l'île, à l'exception de la zone non cartographiée, a été considéré comme une zone à enjeux, les zones de risques sont homogènes par rapport aux mesures réglementaires qui s'appliquent. Par exemple, les prescriptions concernant un aléa moyen de mouvements de terrain dans une zone d'habitat naturelle sont les mêmes que pour un aléa mouvements de terrain moyen dans une zone urbaine.

Il en résulte donc un certain nombre de zones de risques pour lesquelles un règlement spécifique est rédigé.

Le règlement du PPR se compose de 3 parties principales intitulées :

- Portée du PPR – Dispositions générales ;
- Dispositions communes, applicables à l'ensemble du territoire ;
- Règlement par zones de risque.

Les deux premières parties sont générales et s'appliquent à l'ensemble de la Polynésie. La troisième partie s'applique également à l'ensemble de la Polynésie mais dépend du type de zones de risques présentes sur la commune traitée.

ANNEXES

Annexe 1 – Présentation de l'approche déterministe

❖ **Généralités**

Ce type d'approche est mis en œuvre pour l'étude de sites définis par la Direction de la Construction et de l'Aménagement et le Ministère en charge des risques. Il est nécessaire dans ce cas de réaliser au préalable une campagne de reconnaissance spécifique (levés topographiques, sondages, caractérisation des sols en laboratoire, ...).

Deux outils de simulation sont ensuite utilisés : il s'agit du logiciel TALREN (©Terrasol) pour l'étude de la stabilité de talus et versants en ce qui concerne les glissements de terrain. Pour simuler les chutes de blocs et éboulements, il s'agit du logiciel PIERRE (©BRGM).

L'approche déterministe est mise en œuvre par ailleurs ponctuellement en appui à l'approche globale. Dans ce cas les outils de modélisation sont mis en œuvre à partir de données régionales et donnent des ordres de grandeur.

❖ **L'outil TALREN**

TALREN est un logiciel pour l'analyse de stabilité des structures géotechniques, développé par Terrasol. Il s'applique aussi bien aux pentes naturelles qu'aux ouvrages en terre, avec ou sans renforcement et permet d'intégrer des paramètres hydrauliques, sismiques et de surcharge.

Il calcule pour une configuration donnée, les coefficients de sécurité correspondants à des surfaces de rupture choisies par l'utilisateur, et met en évidence le coefficient de sécurité minimal trouvé pour ce choix de surfaces. Il donne ainsi la surface de rupture critique et le coefficient associé.

Pour déterminer le coefficient de sécurité, TALREN laisse le choix entre 3 méthodes de calcul : la méthode de Bishop, la méthode de Fellenius et la méthode des perturbations. Ces méthodes sont des méthodes classiques, dites « des tranches », c'est-à-dire que le talus est découpé en tranches verticales d'épaisseur unitaire et l'on considère l'équilibre limite de chaque tranche.

La large utilisation de TALREN et la fiabilité de ses résultats en font un outil reconnu et utilisé en France dans la plupart des organismes publics, militaires, des bureaux d'études, des écoles et universités. En 2003, TALREN était utilisé par environ 400 organismes à travers le monde.

❖ **L'outil PIERRE**

PIERRE est un modèle de simulation trajectographique développé conjointement par le BRGM et l'université British Columbia du Canada. Il est utilisé par le BRGM et fait partie des modèles dits « à trajectoire enveloppe », orientés vers l'analyse des conditions limites de propagation : limites d'extension probables, caractéristiques limites probables des trajectoires (hauteur, vitesse, énergie cinétique). Ce type de modèle correspond aux conditions limites de propagation générées par l'enchaînement d'impacts successifs les plus défavorables sur l'ensemble de la trajectoire. Les valeurs affectées aux paramètres de calcul sont une estimation de leurs limites probables résultant de l'analyse d'observations effectuées sur différents sites d'éboulements pour lesquels on dispose de données précises.

En effet, les coefficients d'absorption caractérisant l'amortissement au moment de l'impact sont déterminés empiriquement et / ou par rétro-analyse. Après une chute de blocs, il est possible de localiser avec une certaine précision leurs impacts sur la pente et donc, en effectuant la démarche inverse de celle du calcul de trajectoire, de retrouver les coefficients d'absorption des différents sols impactés. On procède au calage en faisant varier les données du modèle jusqu'à obtention du chemin exact des blocs observés (concordance entre trajectoires observées et simulées). Actuellement, le logiciel est utilisé avec des paramètres définis empiriquement en reproduisant des événements connus. Il conviendra à terme de mettre en œuvre une opération de « lâchers de blocs » en Polynésie afin de disposer de paramètres spécifiques aux versants locaux.

❖ Utilisation de TALREN en appui à l'approche globale

➤ Données exploitées

Il a été défini un jeu de caractéristiques géomécaniques moyennes des différentes formations lithologiques, à partir des données géotechniques disponibles sur la Polynésie. Aussi, dans le cadre du projet d'étude ARAI, le BRGM a réalisé une étude⁶ ayant pour objectif d'améliorer la connaissance générale des formations de « mamu », en se basant sur l'exploitation de données d'archives et par le biais d'investigations géotechniques. Les résultats permettent de distinguer trois grands faciès géomécaniques pour ces formations géologiques et propose des valeurs caractéristiques géomécaniques moyennes pour chacun.

Les caractéristiques moyennes des formations rencontrées en Polynésie française sont les suivantes :

Matériaux	γ_h (kN/m ³)	φ' (°)	C' (kPa)
Colluvions à blocs	20	28	3
Basalte	22	45	30
Lahars	22	30	3
Mamu III, IV	18	35	20
Mamu I à II	22	35	35

Figure 20 : Jeu de données de caractéristiques des sols en conditions naturelles (établi à partir d'une synthèse de données du Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie et d'essais géotechniques pour les mamu)

A partir de ces caractéristiques, la stabilité a été évaluée pour différents cas de figure réalistes. Pour chaque configuration, il est calculé un facteur de sécurité minimal et la largeur en deçà de laquelle la stabilité n'est pas assurée. Cette largeur est appelée largeur en crête ou largeur de bande de retrait et notée L.

➤ Configurations testées

L'objectif est de faciliter la cartographie en fixant des limites de zones par analogie avec les configurations types suivantes :

- les fronts de planèzes mamutisés,
- les grands versants,
- les versants secondaires mamutisés.

Compte tenu de l'optimisation du logiciel aux calculs en sol meuble, seules des configurations formées en totalité ou en partie de mamu ont été testées.

⁶ BRGM/RP-54835-FR de août 2006

➤ *Méthode d'étude utilisée :*

TALREN estime la stabilité d'un talus à partir de la géométrie de celui-ci et des paramètres régissant les types de sol présents. L'estimation de cette stabilité repose sur des calculs d'un coefficient de stabilité Γ , qui correspond, pour une surface de rupture donnée, au rapport de la contrainte de cisaillement maximale mobilisable à la contrainte de cisaillement mobilisée le long de la surface de rupture. Théoriquement, une configuration est instable si ce coefficient est inférieur à 1, mais compte tenu des incertitudes sur les données, on considère qu'elle l'est pour un coefficient inférieur à 1,5.

Le coefficient Γ_{\min} calculé par TALREN correspond au coefficient de stabilité obtenu pour la surface de rupture potentielle la plus défavorable, donc celle qui risque le plus d'induire un glissement. Une configuration est dite stable lorsque le Γ_{\min} associé vaut au moins 1,5.

La bande de retrait est la zone en tête de versant dans laquelle il existe un risque d'instabilité ($\Gamma_{\min} < 1,5$). Elle est délimitée par la largeur en crête $L_{1,5}$ et correspond à la zone concernée par des instabilités. Cette largeur en crête $L_{1,5}$ est estimée en recherchant à partir de quelle distance du bord du versant, une surface de rupture passant à cette distance aurait un coefficient de stabilité d'au moins 1,5. En pratique, on impose un point de passage à la surface de rupture et on recherche alors pour quel point de passage, le coefficient de stabilité critique Γ_{\min} est supérieur à 1,5 (figure ci-dessous).

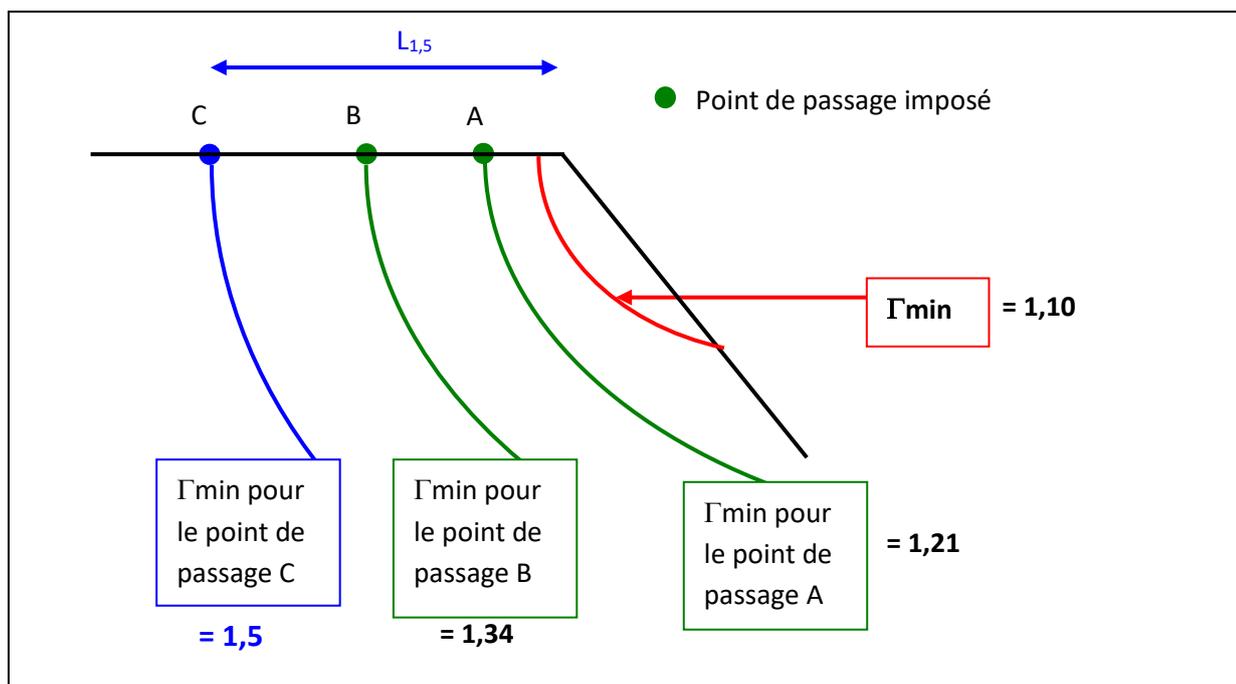


Figure 21 : Détermination de la largeur de bande de retrait minimale $L_{1,5}$

On obtient de cette manière, la bande en tête de versant où il y a un risque d'instabilité. La connaissance de cette bande permet ensuite d'aider à délimiter sur carte l'étendue de la zone instable en tête. Mais en définitive, c'est le géologue responsable de l'élaboration de la carte d'aléa qui choisit le tracé final.

➤ **Calage :**

On choisit habituellement une valeur de Γ_{\min} égale à 1,5 pour caractériser la stabilité limite d'un talus. Cette valeur inclut une marge de sécurité qui correspond aux incertitudes sur la précision des données et l'homogénéité des couches, hypothèse nécessaire pour la réalisation du calcul mais non ou rarement vérifiée dans la réalité.

Dans la réalité et sans approximation de calculs, la limite de stabilité d'un talus est obtenue pour $\Gamma_{\min} = 1$. Les largeurs observées de bande de terrain déstabilisé, lors d'instabilités avérées, doivent donc correspondre aux largeurs calculées par TALREN pour un coefficient Γ_{\min} pris égal à 1 (largeurs notées L_1). Ce calage est nécessaire pour justifier l'utilisation de la valeur 1,5 dans les calculs.

Les valeurs de largeurs L_1 sont calculées en conditions naturelles, pour les différentes configurations de front de planèze et de grand versant (configurations où les glissements ont lieu le plus fréquemment). Ces valeurs calculées concordent bien avec les valeurs de largeurs en crête mesurées pour des glissements réels.

➤ **Influence des paramètres géométriques, physiques et hydrogéologiques d'un versant donné sur la stabilité de l'ensemble :**

◆ **Géométrie du versant**

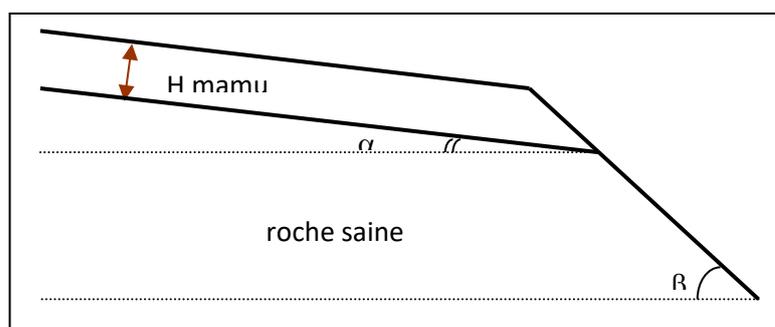


Figure 22 : Schéma de situation des différents paramètres de morphologie de versant

L'influence des différents paramètres géométriques d'un versant, à savoir : l'épaisseur de terrains altérés H , la pente du versant β , la pente à l'interface des terrains α , a été estimée en faisant varier séparément chaque paramètre.

Les résultats obtenus lors de l'étude sont résumés dans la Figure 23.

Paramètres géométriques	Morphologie et structure du versant		
	α	β	H
Influence sur le coefficient de stabilité	+	+++	++

Figure 23 : Tableau récapitulatif de l'influence des paramètres géométriques sur le coefficient de stabilité

En ce qui concerne la morphologie et la structure du versant, les paramètres α et H sont les plus difficiles à appréhender sur le terrain. Or, ils ont une influence limitée sur le coefficient de stabilité. A l'inverse, la pente du versant β est le paramètre le plus influent mais également le plus facile à mesurer.

Les variations de géométrie d'un versant ne semblent donc pas entraîner de grosses incertitudes sur les valeurs de largeur de sécurité en crête calculées grâce à TALREN.).

◆ Paramètres physiques

L'influence des caractéristiques du sol a également été évaluée en faisant varier séparément chacun des paramètres suivants : la cohésion C, le poids volumique (conditions naturelles) γ_h , l'angle de frottement interne φ .

Paramètres physiques	Type de sol		
	γ_h	C	φ
Influence sur le coefficient de stabilité	-	+	+++

Figure 24 : Tableau récapitulatif de l'influence des paramètres physiques du sol sur le coefficient de stabilité

La forte influence de l'angle de frottement interne du sol considéré justifie le caractère indicatif des résultats de largeur de sécurité en crête, leur prise en compte comme ordre de grandeur, et au final le choix définitif effectué par le géologue qui intègre les données du terrain.

◆ Paramètres hydrogéologiques

La saturation en eau peut être modélisée sous TALREN par l'ajout d'une nappe libre qui suit le relief. Les valeurs obtenues permettent de juger de la très grande influence d'une éventuelle saturation en eau des terrains mais restent indicatives et, dans la plupart des cas, ne concordent pas avec les observations faites sur le terrain. En effet, une nappe libre pour laquelle la saturation en eau affecte toute la hauteur du versant, est rarement, voire jamais observée dans la réalité. Ce choix de modélisation peu réaliste nécessite donc d'autant plus une grande prudence dans l'exploitation des résultats. Les valeurs de largeurs de sécurité retenues sont de ce fait plus proches des valeurs de L obtenues en conditions naturelles.

Annexe 2 – Détermination des débits de crue de projet pour une crue centennale

A défaut d'études locales de diagnostic concernant les crues à régimes torrentielles, il a été considéré comme référence les crues de projet définies en France métropolitaine. Le guide PPR – Risques inondation (MATE, 1999) rappelle les grands principes. La circulaire du 24 Janvier 1994 précise que l'évènement à retenir pour le zonage est, conventionnellement « la plus forte connue ou, si cette crue était plus faible qu'une fréquence centennale, cette dernière ».

Ce choix répond à la volonté (MATE – Risques Inondation 1999) :

- De se référer à des évènements qui se sont déjà produits, qui sont donc non contestables et susceptibles de se produire de nouveau et dont les plus récents sont encore dans les mémoires ;
- De privilégier la mise en sécurité des de la population en retenant des crues de fréquences rares ou exceptionnelles.

Etant entendu que les risques induits par « les crues torrentielles » sont au moins aussi élevés que par « les crues de plaines », la fréquence centennale a été également retenue pour le choix de l'aléa de référence pour les crues torrentielles.

Calcul de la crue centennale

La détermination de la valeur centennale est obtenue en considérant qu'au-delà de la pluie de fréquence décennale (point pivot) toute augmentation de la pluie ruisselle. Il n'y a donc pas lieu de définir et ou ajuster un nouveau coefficient de ruissellement.

Cela se traduit par l'équation suivante :

$$Q_{100} = Q_{10} + k(P_{100}(tc) - P_{10}(tc)) \cdot A / tc$$

ou

$$Q_{100} = A.K. [\underbrace{C_{(10)} \cdot I_{(tc,10)}}_{Q_{10}} + \overset{\uparrow}{C} (I_{(tc,100)} - I_{(tc,10)})]$$

$$Q_{100} = Q_{10} + A.K. (I_{(tc,100)} - I_{(tc,10)})$$

(avec $K = 1/3,6$ si A en km^2 et I en mm/h)

Bassins versants urbains

La formule de Caquot, mise au point et utilisée en métropole, a été adaptée au contexte local de Tahiti par actualisation, à l'aide des coefficients de Montana, des coefficients de l'équation. Elle peut donc être utilisée, sous réserve de respecter les conditions de validité, pour le calcul des débits maxima décennaux des petits bassins versants urbains de Tahiti. Pour les autres îles de Polynésie, il convient d'actualiser cette formule, en appliquant la même méthode, avec les données pluviométriques observées en local.

Bassins versants ruraux

Formule générale

Afin de répondre au mieux à l'objectif fixé, tout en limitant les informations aux informations disponibles, nous proposons d'utiliser la méthode rationnelle pour la détermination du débit maximal instantané de fréquence décennale puis d'utiliser au-delà la méthode du GRADEX.

L'équation générale se résume à :

$$Q_p(T) = k \cdot C(T) \cdot I(tc, T) \cdot A$$

où

$Q_p(T)$ est le débit de pointe de crue (en m³/s) de période de retour **T** ;

$C(T)$ coefficient de ruissellement pour la période de retour T ($0 < C \leq 1$) ;

$I(tc, T)$ l'intensité d'une averse représentative du bassin versant dont la durée est égale au temps de concentration **tc** du bassin pour la période de retour **T** ;

A la superficie du bassin versant ;

k un coefficient d'ajustement fonction des unités utilisées.

$$(k = 1/3.6, \text{ pour } A \text{ en km}^2 \text{ et } I \text{ en mm /h})$$

Cette méthode, simple et robuste d'utilisation, présente l'intérêt de faire intervenir :

- la notion de « temps de concentration », temps qui dépend de la morphologie du bassin versant,
- la pluviométrie,
- le coefficient de ruissellement, facteur dépendant notamment de la géologie, de la couverture végétale et du taux d'imperméabilisation.

Les principales difficultés d'utilisation de cette formule consistent en :

- l'estimation du temps de concentration et,
- la détermination du coefficient de ruissellement.

Détermination du temps de concentration

L'estimation du temps de concentration peut être réalisée au moyen de formules divers existants dans la littérature, les plus répandues étant probablement Kirpich, Passini, Giandotti, Turazza. Ces formules sont plus ou moins bien adaptées suivant la pente des bassins versants considérés.

Le choix de la formule (ou de la combinaison de formules), à retenir pour une utilisation régionale ou adaptée à des familles de bassins versants, peut être réalisé en comparant les valeurs calculées à l'aide de ces formules avec celles obtenues à partir des hydrogrammes et ietogrammes de crues observés au droit de bassins versants jaugés.

Valeur de la pluie de durée égale au temps de concentration

S'il existe des données d'intensités pluviométriques (courbes IDF) au droit d'une station pluviométrique représentative du bassin versant, il suffit de calculer les hauteurs pluviométriques

décennale et centennale survenant pour une durée égale au temps de concentration du bassin versant. Lorsqu'il existe plusieurs postes, une pondération (méthode de Thiessen ou autre) pourra être réalisée.

Dans le cas où il n'existerait pas d'information sur les intensités pluviométriques sur le bassin versant, il est cependant possible d'estimer les valeurs fréquentielles des pluies de durée égale au temps de concentration à partir d'informations disponibles sur les pluies journalières. Les hauteurs pluviométriques de durée inférieure à la journée seront déterminées au poste journalier en considérant que le rapport de ces hauteurs pluviométriques avec la pluie journalière, à fréquence donnée, est identique au rapport trouvé à la station pluviographique la plus proche ou à celle jugée la comparable.

Estimation du coefficient de ruissellement

Une fois cette difficulté écartée, la valeur du coefficient de ruissellement de fréquence décennale peut être définie « régionalement » (par secteur d'île) à l'aide des valeurs décennales obtenues par ajustement statistique au droit des bassins versants jaugés. Il suffit ensuite d'utiliser cette valeur pour les bassins versants similaires (orientation et altitude maximale) non jaugés.

Dans l'hypothèse où l'on ne dispose pas de valeurs observées (ajustement statistique ou valeurs maximales observées) sur l'île, la valeur du coefficient de ruissellement décennal sera choisie parmi ceux de l'île la plus proche et la plus semblable en considérant le contexte géologique, l'altitude maximale du bassin versant et son orientation.

Annexe 3 – Modèle utilisé pour caractériser l'aléa submersion marine d'origine cyclonique

SWAN

Le modèle SWAN (Simulating WAVes Nearshore), développé à l'Université de Technologie de Delft (Pays-Bas), permet de calculer de façon réaliste les paramètres décrivant la houle au niveau des zones côtières, des lacs et des estuaires, à partir de données de vent, de bathymétrie et de courants. Une description détaillée du modèle est donnée par Holthuijsen et al. (Cf. : PEDREROS, 2004). SWAN est basé sur l'équation spectrale de conservation de l'action de la houle qui est résolue suivant un schéma implicite en différences finies (PEDREROS, 2004).

SWAN peut modéliser les processus de **propagation** suivants :

- Propagation à travers un espace géographique ;
- Gonflement de la houle
- Réfraction due à des variations spatiales du fond ou des courants ;
- Blocage ou réflexion par des courants de retour ;
- Transmission à travers des obstacles, blocage ou réflexion à cause de ces obstacles.

SWAN modélise également les processus suivants de **génération et de dissipation** dus à la houle :

- Génération par le vent ;
- Interactions houle – houle (quadruplets et triads) ;
- Dissipation par moutonnement ;
- Dissipation par déferlement dû aux variations de profondeur ou aux courants ;
- Dissipation par frottement au fond.

Annexe 4 – Lexiques des sigles et termes techniques

Aléa : Phénomène naturel (ex.: mouvement de terrain, inondation, crue,...) d'une intensité donnée avec une probabilité d'occurrence/apparition.

Bassin de risque : Entité géographique homogène soumise au même phénomène naturel.

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

CAPF : Code de l'Aménagement de Polynésie française.

Carrière : Exploitation de gîtes de matériaux pour une durée initiale maximale de 10 ans (Art. LP 2210-1 CMAE) et permettant de livrer par année au moins 50 000 m³ de matériaux transformés ou non (Art. LP 2210-6 CMAE)

Cartographie réglementaire des risques naturels : Volet essentiel de la politique de lutte contre les catastrophes naturelles visant à déterminer les zones exposées et à définir les mesures de prévention nécessaires.

Catastrophe naturelle : Phénomène ou conjonction de phénomènes dont les effets sont particulièrement dommageables.

Champ d'expansion des crues : Secteurs non-urbanisés ou peu urbanisés indispensables au stockage des importants volumes d'eau apportés par la crue. Les champs d'expansion des crues participent au laminage de celles-ci.

CMAE : Code des mines et des activités extractives de la Polynésie française.

Crue : Phénomène d'augmentation du débit du cours d'eau, pendant une durée plus ou moins longue, consécutive à des averses plus ou moins importantes.

Désordres : Expression des effets directs et indirects d'un phénomène naturel sur l'intégrité et le fonctionnement des milieux.

DCA : Direction de la Construction et de l'Aménagement

Domages : Conséquences défavorables d'un phénomène naturel sur les biens, les activités et les personnes. Ils sont en général exprimés sous forme quantitative ou monétaire, il peut s'agir de dommages directs, indirects (induits), intangibles (non qualifiables), etc.

Embâcle : Accumulation de matériaux transportés par les flots (végétation, rochers, véhicules, déchets, etc.) qui réduisent la section d'écoulement, et que l'on retrouve en général bloqués en amont d'un ouvrage (pont) ou dans les parties resserrées d'une vallée. Les conséquences d'un embâcle sont dans un premier temps la rehausse de la ligne d'eau en amont de l'embâcle, une augmentation des contraintes sur la structure supportant l'embâcle et dans un second temps un risque de rupture brutale de l'embâcle, ou de l'embâcle et de sa structure porteuse, occasionnant une onde potentiellement dévastatrice en aval.

Enjeux : Personnes, biens, activités, moyens, patrimoine, etc..., susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel. Les enjeux s'apprécient aussi bien pour le présent que le futur.

ERP : Etablissement recevant du public.

Extraction : Exploitation de gîtes de matériaux soumis à autorisation préalable, ne répondant pas aux critères du régime des carrières du CMAE ni aux dispositions du CAPF sur les permis d'aménager.

Exutoire : Point le plus en aval d'un réseau hydrographique, où passent toutes les eaux pluviales et/ou de ruissellement drainées par le bassin.

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

LIDAR : Light detection and ranging. Données topo-bathymétriques de grande précision.

MNT : Modèle numérique de terrain, topographie du sol.

Mouvement de terrain : Phénomènes naturels tels que glissements de terrain, éboulements et chutes de blocs rocheux, coulées de boue, laves torrentielles, érosion, etc....

Phénomène naturel : Manifestation, spontanée ou non, d'un agent naturel.

Pluviométrie : Evaluation quantitative des précipitations, de leur nature et distribution. Elle est calculée par diverses techniques. Plusieurs instruments sont utilisés à cette fin, dont le pluviomètre/pluviographe est le plus connu.

Prévention : Ensemble des dispositions visant à réduire les impacts d'un phénomène naturel : connaissance des aléas, réglementation de l'occupation des sols, mesures actives et passives de protection, information préventive, prévisions, alerte, plans de secours, etc....

Risque naturel : Possibilité qu'un phénomène naturel menace des enjeux et puisse entraîner des pertes en vies humaines, ou des dommages sur les biens et en activités. Le risque est le produit d'un aléa et d'un enjeu.

Risque majeur : il se caractérise par sa faible fréquence, sa gravité et l'incapacité de la société exposée à surpasser l'événement. Des actions sont dans la plupart des cas possibles pour le réduire, soit en atténuant l'intensité de l'aléa, soit en réduisant la vulnérabilité des enjeux.

Servitude d'utilité publique : limitations administratives au droit de propriété et d'usage du sol, instituées par l'autorité publique dans un but d'intérêt général. Ces servitudes dites administratives sont établies au profit de la collectivité.

SHOM : Service hydrographique et océanographique de la marine

Talwegs (ou thalweg) : Zones en creux d'un terrain où les eaux sont collectées. Les talwegs s'opposent aux lignes de crêtes.

Terrassement : Ensemble des opérations permettant de préparer un terrain : travaux de fouilles, tranchées, enlèvement de la terre, transport des déchets et autres actions antérieures à une construction, un aménagement ou une autre transformation de l'espace extérieur, soumis au CAPF (Art. LP 114-12 et suivants).

Vulnérabilité : Exprime au sens le plus large, le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les personnes, les biens et les activités. On peut distinguer la vulnérabilité économique et la vulnérabilité humaine.

Annexe 5 : Bibliographie – Principaux ouvrages consultés

Bernon N. (2022) - Avis sur l'étude géotechnique apiGEO n°A152-SW-19 du 25/03/2021, relative à la sécurisation du lotissement Tihu'Uti (Punaauia). Rapport provisoire V2. BRGM/RP-72175-FR, 26 p.

Bernon N., Garnier C. (2023) - Appuis techniques relatifs aux aléas naturels en Polynésie française. Rapport final V1. BRGM/RP-72966-FR, 32 p, 8 ill., 1 ann.

Carnus F., Le Coz L. – (2021) – Caractérisation de l'aléa submersion marine d'origine cyclonique via les données LIDAR à Tahiti, Moorea et Bora Bora. Phase 1 – Etat des lieux – BRL Ingénierie - 92 p.

Carnus F., Le Coz L. – (2022) – Caractérisation de l'aléa submersion marine d'origine cyclonique via les données LIDAR à Tahiti, Moorea et Bora Bora. Phases 2 et 3 – Modélisation et transcription de l'aléa – BRL Ingénierie - 84 p.

Cellule Etudes et Conseils en Aménagement (2023) – n° 541/VP/DCA du 23/02/2023 – Révision n°2 du Plan de Prévention des Risques naturels de Punaauia – Précisions cartographiques à la parcelle – 67 p.

Collectif (groupe de travail MEZAP). Guide technique MEZAP. Caractérisation de l'aléa rocheux dans le cadre d'un Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRn) ou d'un Porter à connaissance (PAC). BRGM, 2021. Collection scientifique et technique. ISBN : 978-2-7159-2760-5

DES GARETS.E. (2004) – Bilan des connaissances sur les surcotes marines en Polynésie. Rapport BRGM provisoire, 50 p.

EGIS Eau (2010) – Cartographie de l'aléa inondation au droit des cours d'eau de Polynésie française. Cours d'eau Maruapo – Rapport GRI / N° 04635D

EGIS Eau (2012) – Cartographie de l'aléa inondation au droit des cours d'eau de Polynésie française. Cours d'eau Vaiope – Rapport HSO 11126K

Guide méthodologique Plans de Prévention des Risques Littoraux (2014) – Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE)

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

Nachbaur A., Stollsteiner P., Mompelat JM., Sedan O. (2015). Plan de Prévention des Risques Naturels de la commune de Punaauia (Polynésie française). Appui technique et méthodologique. Rapport final. BRGM/RP-64947-FR, p. 91, 24 ill., 8 ann., CD.

LAMBERT J. (2004) – Relevé de phénomènes naturels en Polynésie française (1831 – 2003) – Etude documentaire. BRGM/RP-52267-FR, 37 p.

PEDREROS.R. (2004) – Détermination des surcotes engendrées par les houles cycloniques en Polynésie – 1 - Méthodologie. BRGM/RP-52000-FR juillet 2004

PEDREROS.R. (2005) – Détermination des surcotes engendrées par les houles cycloniques en Polynésie – 2 – Mise en place de la modélisation. Rapport provisoire.

PEDREROS.R. (2006) – Détermination des surcotes engendrées par les houles cycloniques en Polynésie – 3 – Cahier des simulations. Rapport provisoire.

Annexe 5 : Bibliographie – Principaux ouvrages consultés

Service de l'urbanisme, n°281 MLA.SAU du 03 février 2017 – Compte-rendu des observations générales et remarques suites aux inondations du 21 et 22 janvier 2017 sur les communes de Mahina, Faa'a, Papeete, Pirae et Punaauia

SPEED/BCEOM (2006) – Cartographie de l'aléa inondation au droit des cours d'eau de Polynésie française. Cours d'eau Matatia

SPEED (2009) - Diagnostic hydraulique du lit mineur de la Piafau – Affaire n° 1150 08 EP

SPEED/BCEOM (2016) – Cartographie de l'aléa inondation au droit des cours d'eau de Polynésie française. Cours d'eau Piafau – Rapport n° 1721 15 02

SPEED (2020) – Mission MC6 – Modélisation 2D avec cartographie des zones inondables

STOLLSTEINER (2003) – Assistance technique pour l'évaluation et la cartographie de l'aléa inondation en Polynésie française – Compte rendu de mission.

F. SCHINDELE, H. HERBERT, D. REYMOND (2005) – Aléa sismique et aléa tsunami en Polynésie française – Lot 3.4 – Catalogue des tsunamis observés en Polynésie française. CEA/DIF/DASE/LDG/708/2005/DO.

Vai Natura (2017) – Cartographie de l'aléa inondation – rivière Punaru'u, Punaauia, Tahiti – Rapport n°R20160102-HY P.