

COMMUNE DE RURUTU

**DOCUMENT
DEFINITIF**

PLAN DE PREVENTION DES RISQUES NATURELS PREVISIBLES

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

NOTE DE PRESENTATION

VERSION MARS 2018



Sommaire

1. Généralités	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
2. Le secteur d'étude : la Commune de Rurutu	11
2.1. Situation géographique	11
2.2. Contexte morphologique	11
2.3. Contexte géologique	11
2.4. Les risques naturels	12
3. Les phénomènes naturels observés	13
3.1. Les mouvements de terrain.....	13
3.1.1. Les phénomènes physiques.....	13
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	16
3.1.4. La cartographie des aléas à Rurutu	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	22
3.2.3.1. Généralités	22
3.2.3.2. Les niveaux d'aléas	23
3.2.4. La cartographie de l'aléa à Rurutu	23
3.3. Les cyclones.....	24
3.3.1. Les phénomènes physiques.....	24
3.3.2. Les phénomènes historiques de la Commune	26
3.3.3. Méthodologie de cartographie	27

3.3.3.1.	Généralités	27
3.3.3.2.	Les niveaux d'aléas	28
3.3.4.	La cartographie à Rurutu	28
3.4.	Les tsunamis	29
3.4.1.	Les phénomènes physiques.....	29
3.4.2.	Les phénomènes historiques sur la commune	31
3.4.3.	Méthodologie de cartographie	31
3.4.3.1.	Généralités	31
3.4.3.2.	Les niveaux d'aléas	33
3.4.3.3.	La cartographie de l'aléa submersion marine à Rurutu	34
4.	Les enjeux sur Rurutu	36
4.1.	Notion générale.....	36
4.2.	Présentation générale	36
5.	Le zonage des risques et le règlement	37

Annexes

Annexe 1 – Présentation de l’approche déterministe	41
Annexe 2 – Détermination des débits de crue de projet pour une crue centennale	47

Liste des figures

Figure 1 : Procédure schématique pour l’élaboration des PPR	7
Figure 2 : Ile de Rurutu	11
Figure 3 : Exemple de falaises calcaires (Nord de Moerai) – Mars 2016.....	11
Figure 4 : Bloc éboulé depuis les falaises calcaires.....	14
Figure 5 : Eboulement au Nord du village de Moerai (Février 2009)- Source Site Internet La Dépêche ...	15
Figure 6: Proposition de classification des phénomènes de glissement de terrain en fonction de leurs caractéristiques.....	17
Figure 7 : Proposition de classification des phénomènes d’éboulement et de chutes de blocs selon leurs caractéristiques.....	17
Figure 8 : 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 9 : Exemple d'aménagements réalisés sur les cours d'eau (Village de Moerai - Mars 2016).....	22
Figure 10 : Définition de l’aléa inondation en fonction de la hauteur de submersion et de la vitesse d’écoulement des eaux.....	23
Figure 11 : Probabilité d’occurrence de phénomènes cycloniques sur la Polynésie française (Service de météorologie de la Polynésie)	25
Figure 12 : Destruction après le passage du cyclone Emma (Mars 1970 – Source : Historique des cyclones de Polynésie Française de 1831 à 2010 ; Meteo France)	26
Figure 13 : Exemple de protections sous forme de mur A gauche Village d’Avera, à droite, Village d’Hauti - Mars 2016.....	27
Figure 14 : Caractéristiques d’un tsunami en fonction de la profondeur (d’après CEA, 2002)	29
Figure 15 : 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	29
Figure 16 : Hauteurs des inondations (en mètre) observées à Tahiti lors du Tsunami de mai 1960 (séisme du Chili) (source Orstom).....	30
- Figure 17 : A gauche, valeurs maximales de run-up enregistrées lors du tsunami de 1946 (Okal et al., 2002). A droite, valeurs de Run-up maximales considérées sur l’île de Rurutu	32
Figure 18 : Représentation schématique de la variation de l’épaisseur de la lame d'eau selon l’altitude (base d’un Run-up de + 6 m) par rapport au terrain naturel (TN)	33
Figure 19 : 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)	42
Figure 20 : Configurations types testées avec le logiciel TALREN.....	43
Figure 21 : Détermination de la largeur de bande de retrait minimale $L_{1,5}$	44
Figure 22 : Schéma de situation des différents paramètres de morphologie de versant	45
Figure 23 : Tableau récapitulatif de l'influence des paramètres géométriques sur le coefficient de stabilité	45

Figure 24 : Tableau récapitulatif de l'influence des paramètres physiques du sol sur le coefficient de stabilité.....46

Figure 25 : Largeurs de bande de sécurité en crête à prendre en compte pour chaque configuration type lors de la cartographie de l'aléa mouvement de terrain46

1. Généralités

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 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.

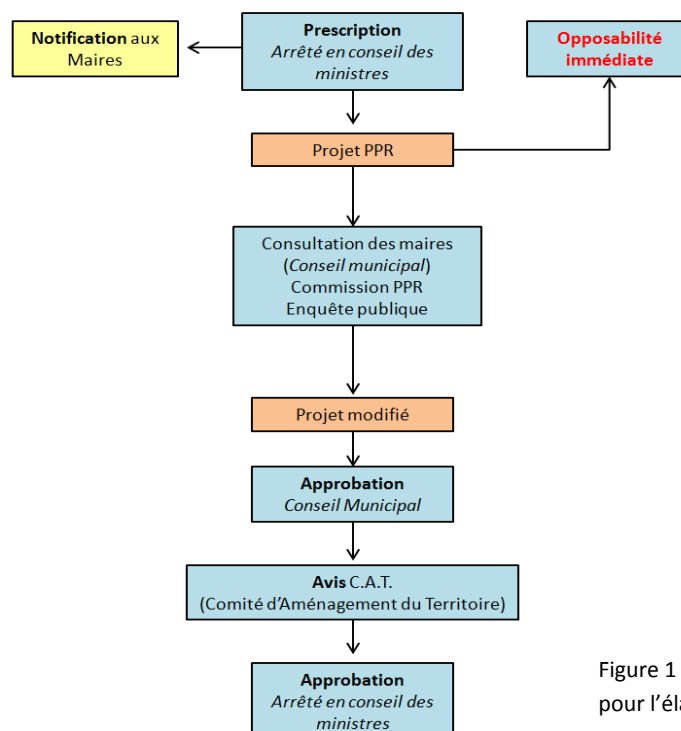


Figure 1 : Procédure schématique pour l'élaboration des PPR

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 Rurutu 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 :

- 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 Rurutu, en référence aux guides PPR métropolitains.

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

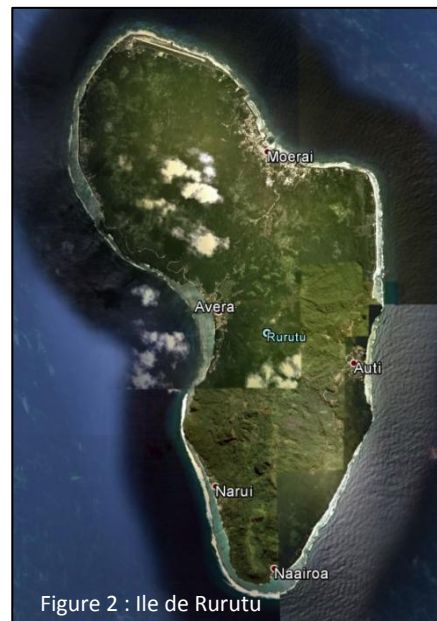
2.1. Situation géographique

Rurutu (ou Eteroa) est située à 572 km au sud-ouest de Tahiti. D'une surface de 32 km², l'île culmine au Mont Manureva (398 m).

L'île de Rurutu compte 2322 habitants (recensement de 2012). La population se concentre principalement dans trois villages, Moerai, chef-lieu de la commune, Avera et Hauti.

2.2. Contexte morphologique

Rurutu se caractérise par une morphologie originale pour la Polynésie : l'île possède un lagon de taille variable et un littoral formé de falaises calcaires. Ces dernières correspondent à l'ancien récif barrière, exondé il y a plusieurs millions d'années.



Les falaises calcaires (« makatea ») sont percées de grottes et de lapiez d'où le surnom d'île troglodyte.

L'intérieur des terres correspond à des collines peu élevées (200 m) de basaltes altérés en mamu, au sommet desquelles culminent quelques pointements de basaltes massifs (massif de Manureva à 398 m).

Le littoral comporte quelques secteurs de plaine restreints entre les falaises.

Figure 3 : Exemple de falaises calcaires (Nord de Moerai) – Mars 2016

2.3. Contexte géologique

La carte géologique à 1/25 000 de Rurutu et Tubuai (Maury et al., 2001) indique que l'île correspond à un volcan qui s'est édifié sur une croûte océanique d'âge Crétacé (80 millions d'années environ).

Les premières laves émises sont des basaltes entre 13 et 10 millions d'années, au-dessus du point chaud Macdonald. Ces basaltes sont de nos jours profondément altérés (mamu) et forment les collines basses de Rurutu.

Entre 10 et 6,5 millions d'années, l'enfoncement de l'île (subsidence) permet au récif carbonaté de s'établir autour de l'île.

La dérive de la plaque Pacifique se poursuivant, Rurutu subit un soulèvement tectonique lors de son passage au-dessus du point chaud Tino Mana. Ce bombement provoque l'émersion des basaltes anciens et des calcaires récifaux. Ces calcaires forment aujourd'hui les falaises littorales de l'île, jusqu'à des altitudes de plus de 100 m, ce qui témoigne de l'ampleur du soulèvement.

Le « transit » de Rurutu au-dessus du point chaud Tino Mana se traduit par une reprise de l'activité volcanique il y a environ 1 million d'années. Les nouvelles coulées de basaltes massifs viennent s'épancher sur les basaltes anciens altérés en mamu et sur les falaises calcaires, formant les points culminant de l'île.

Cette histoire géologique particulière explique l'absence actuelle de lagon et de récif.

2.4. Les risques naturels

Pour la commune de Rurutu, 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 écroulement.

Comme précédemment, il s'agit de mouvements à composante de déplacement vertical prépondérant, 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

Ces types d'instabilités visent ici l'ablation superficielle de matériaux, liés aux écoulements pluviaux.

3.1.2. Phénomènes historiques de la commune

Ils sont rares et peu décrits par les riverains. Voici quelques observations de terrain :

- Sur le littoral, des blocs de 2 à 3 m³ sont régulièrement produits par les falaises calcaires ;
- Au Nord du village de Moerai, un pan de falaise entier s'est écroulé sur la route en 2009 ;

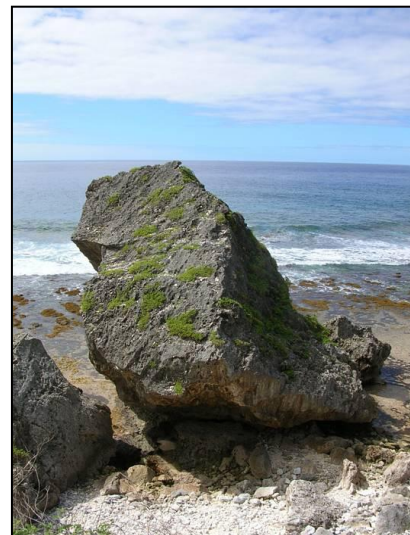


Figure 4 : Bloc éboulé depuis les falaises calcaires.



Figure 5 : Eboulement au Nord du village de Moerai (Février 2009)- Source Site Internet La Dépêche

- Au nord d'Avera, une falaise formée par une coulée de lave prismée, est annuellement le siège de chutes de blocs de 100-200 kg, et moins fréquemment de blocs allant jusqu'à la tonne ;
- La route traversière entre Moerai et Avera est également affectée par quelques glissements peu importants (quelques m³) ;
- Les talus de route taillés dans les formations mamutisées (basaltes altérés en argiles rouges) sont souvent affectés par des glissements de taille mineure.

L'énumération qui précède correspond aux principaux événements récents relevés par des enquêtes de terrain. Elle n'est pas exhaustive.

3.1.3. Méthodologie de cartographie

3.1.3.1. Généralités

La méthodologie de cartographie des aléas mouvements de terrain sur l'île de Rurutu 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 événement historique connu. Toutefois, un événement exceptionnel d'occurrence géologique n'est pas pris en considération.

Il est ainsi considéré de se baser sur le plus fort événement 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.

L'approche **qualitative** a été prédominante sur l'île de Rurutu. Cette dernière se base au préalable sur :

- des reconnaissances de terrain avec parcours systématique des routes et chemins et observations des affleurements. De nombreuses missions de terrain ont été réalisées entre 2003 - 2006 (BRGM/SAU), 2009 (BRGM, concernant la précision de l'aléa mouvements de terrain du secteur de Vitaria), 2015 à 2017 (SAU : précision des aléas) ;
- l'analyse des instabilités figurant dans la base de données BD-ARAI et du contexte (géologique, pédologique, géomorphologique) ;
- les différents renseignements obtenus auprès des habitants et des services techniques pour identifier des instabilités ne figurant pas dans BD-ARAI ou pour obtenir des précisions sur celles déjà identifiées ;
- l'identification par photo interprétation d'indices d'instabilité ou de morphologies remarquables.

L'**approche déterministe** n'a été que ponctuellement utilisée sur l'île de Rurutu. 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.

L'approche déterministe est présentée en détail en Annexe 1.

Les deux approches présentées ci-dessus ont été appliquées sur la commune de Rurutu concernant les phénomènes d'effondrement/chutes de blocs et les glissements de terrain.

3.1.3.2. Les niveaux d'aléas

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).

Des classes d'intensité croissantes peuvent être identifiées selon que ces mesures sont du ressort d'un propriétaire individuel, d'un groupement de propriétaire, 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 6: 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 7 : 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, 2014¹). Dans le cadre de l'élaboration des cartes d'aléas concernées par des zones sujettes aux chutes de blocs, le service de l'urbanisme s'est ainsi inspiré de ce guide (au même titre que l'expertise réalisée par le BRGM sur 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 de taille supérieure 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 sollicité.

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 (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).

¹ 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)

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 proposé dans le tableau ci-dessous.

Niveau d'aléa	Importance des parades à mettre en place pour se prémunir de l'aléa	Exemple de mesures de prévention	Phénomènes de glissement de terrain/Chutes de blocs possibles et caractéristiques associées vis-à-vis de <u>l'aléa de référence</u>	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 8 : 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 à Rurutu

À Rurutu, le zonage a été réalisé selon l'approche « par expertise », sur la base de visites de terrain (de 2003 à 2017).

Ponctuellement, il a pu être précisé les zones d'extension de chutes de blocs grâce à des logiciels de trajectographie 2D ou 3D.

La cartographie de l'aléa mouvements de terrain de l'île de Rurutu s'appuie sur les principales unités géomorphologiques :

- les massifs rocheux formant des falaises, correspondant, soit aux coulées massives du volcanisme récent, soit aux falaises calcaires,

- les versants plus modérés de chaos rocheux, correspondant également aux formations calcaires et volcaniques récentes démantelées sur place,
 - les versants au relief modéré constitués de formations volcaniques anciennes altérées (« mamutisées »),
 - les zones de faibles pentes et les zones côtières, correspondant soit aux plaines alluviales, soit au pied des versants altérés
- Sont cartographiés en **aléa fort** :
- les formations calcaires récifales Miocène présentant un escarpement supérieur à environ 10 m de hauteur. Ces dernières se retrouvent principalement en bord de mer, et ponctuellement à l'intérieur des terres. Elles sont sujettes à des phénomènes de chutes de blocs métriques plusieurs fois par an. Au pied de ces formations, de nombreux blocs de tailles métriques sont observables. Localement, des blocs dépassant les 100 m³ sont visibles même si leur chute n'a jamais été observée par les riverains,
 - les formations volcaniques récentes (basaltes et brèches) formant des falaises ou escarpements supérieurs à environ 10 m. Des éboulements et des chutes de blocs ont également été observés dans les coulées de lave récentes. Certaines d'entre elles sont prismées et favorisent la désolidarisation de colonnes de plusieurs mètres de hauteur. De plus, la fracturation de ces coulées augmente leur caractère instable. Des chutes de blocs de taille plurimétrique sont relatées par les services techniques, en particulier au nord d'Avera (falaise prismée en bord de route),
 - les versants de taille importante, présentant des pentes fortes (supérieures à 35°), composés soit de formation altérée (mamu) soit de chaos rocheux,
 - les zones soumises à des chutes de blocs (> m³), en référence aux dommages potentiels sur un bien et la gravité sur le plan humain. Ces dernières se situent généralement en pied de falaises calcaires/volcaniques, ou, des versants présentant des chaos rocheux susceptibles de libérer des blocs. La largeur de ces zones varie selon la hauteur du versant ou de l'escarpement.

Une zone forfaitaire a été prise en compte dans le zonage de cet aléa. Cette dernière contient la propagation des blocs en fonction des observations de terrain. Pour l'aléa de chutes de blocs, une marge a été considérée en pied de versant pour la propagation des blocs en fonction des observations de terrain (pente, présence d'obstacle, végétation, mur, etc.).

Cette propagation dépend de la morphologie du versant : elle est faible pour la plupart des falaises calcaires verticales, ou importante pour les versants en longues pentes, par exemple pour le massif de Manureva où des blocs issus des sommets ont dévalé les versants.

- Sont cartographiés en **aléa moyen** :
- les versants de taille modérée, présentant des pentes moyennes (de 15 à 30° environ), constitués de chaos rocheux (d'origine calcaire ou volcanique) qui sont parsemés de blocs de taille métrique à plurimétrique qui s'éboulent régulièrement ; leur propagation apparente (difficulté de localiser l'origine des blocs observés) est faible et très certainement absorbée par la pente modérée et par la densité de blocs,
 - les versants de taille modérée, présentant des pentes moyennes (de 15 à 30° environ), constitués de formations volcaniques anciennes mamutisées ; ils produisent des chutes de pierre (< m³) dans les formations peu altérées, et des petits glissements de terrain ou coulées de boue dans les formations très altérées. Ces phénomènes sont la plupart du temps observés au niveau des talus routiers ou des terrassements. Ils sont donc principalement liés à l'action anthropique. Ces versants à l'état naturel sont rarement affectés de mouvements de terrain.

Sont cartographiées en **aléa faible** :

- les zones de faibles pentes (< 15°), généralement situées en pied de versant. Ces dernières pourront-êtré soumises à des glissements de taille mineure (quelques m3) et des chutes de pierres.

Sont cartographiées en **aléa nul** :

- les zones de bord de mer, généralement composées de plaines côtières sableuses. Aucun phénomène de mouvements de terrain n'est envisagé sur ces zones.

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**.

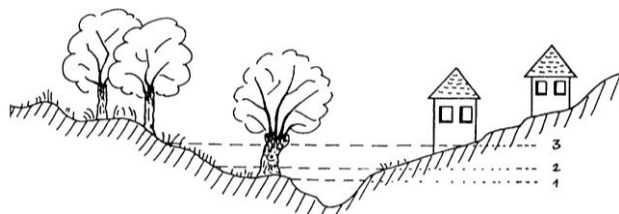
Si la hauteur est directement dépendante des caractéristiques topographiques locales, la vitesse dépend non seulement de la topographie mais également des conditions d'écoulement et de la présence d'ouvrages. Suivant le type d'inondation, l'ordre de grandeur de ces paramètres peut être précisé.

▪ **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.

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).



1 : Lit mineur

2 : Lit moyen ou champ d'inondation fréquente

3 : Lit majeur (champ d'inondation exceptionnelle)

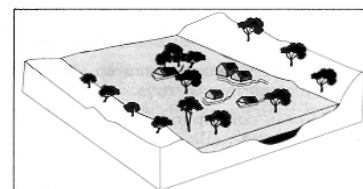
Généralement, le niveau et la vitesse de l'eau sont limités, sauf au droit des ouvrages d'évacuation. Par conséquent, le plus souvent, ce type d'inondation n'est pas dangereux pour la vie humaine mais peut engendrer localement des dégâts matériels importants.

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

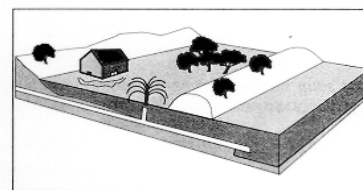
Lorsqu'il pleut, le débit des cours d'eau augmente : la rivière est en « crue ». Si la pluie est violente et durable, la rivière peut déborder de son lit et envahir les zones avoisinantes. Ces secteurs sont généralement de faible altitude et de faible pente : ils constituent le lit moyen, voire le lit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

Il existe deux types de débordement de rivière :

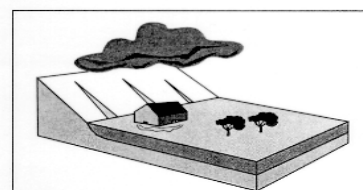
- les débordements directs : il y a submersion des berges ou contournement d'un système d'endiguements limités ;
- les débordements indirects :
 - par remontée de l'eau dans les réseaux d'assainissement des eaux pluviales,
 - par débordement de nappes alluviales,
 - par la rupture d'un système d'endiguement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



Débordement direct



Débordement indirect



Stagnation d'eaux pluviales

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.

3.2.2. Les phénomènes historiques de la commune

Par le passé, la commune de Rurutu a subi des phénomènes d'inondations liées aux crues des cours d'eau, mais aucun n'a été répertorié dans la presse. Des discussions avec la municipalité et le service de l'équipement, confirment que le village d'Hauti a été inondé à plusieurs reprises (déplacements en pirogue dans le village). Ce constat a été confirmé par de nombreuses personnes âgées, lors des missions de terrain de 2017. Des aménagements, sous la forme de dalots (Figure 9), ont été réalisés sur une majorité des talwegs dans les villages, ce qui aurait pour effet de diminuer l'ampleur des inondations. Cependant aucun événement pluvieux important et récent n'a permis de les tester. Par exemple, des inondations sont encore décrites dans la partie septentrionale du village de Hauti. Des témoins (2016/2017) confirment avoir vu par le passé des débordements de ces caniveaux dans le village de Moerai.

En dehors de ces plaines côtières, des ruissellements provenant des versants en amont entraînent des phénomènes de stagnation des eaux (secteur proche de l'aéroport inondé sur environ 50 cm tous les ans).



Figure 9 : Exemple d'aménagements réalisés sur les cours d'eau (Village de Moerai - Mars 2016)

3.2.3. Méthodologie de cartographie

3.2.3.1. Généralités

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

Conformément à ce guide, 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 est, si possible, réalisé 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.

Le détail concernant les modélisations envisageables sur l'île de Rurutu est présenté en Annexe 2

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 10 : 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 Rurutu

Sur la commune de Rurutu, les cours d'eau accessibles ont systématiquement fait l'objet de visites de terrain et le zonage a été établi, suivant l'approche semi-quantitative, basée sur l'analyse morphologique des lits et des berges. Cela concerne l'ensemble des cours d'eau situés en plaine

(aménagés ou non) et les embouchures de rivières. Certains cours d'eau ont ainsi pu être observés assez loin à l'intérieur des terres.

Plus en amont, les cours d'eau ont fait l'objet d'observations ponctuelles. Ces rivières et ravines étant encaissées, le zonage de l'aléa revient à « souligner » les axes d'écoulement.

Les bassins versants de l'île de Rurutu sont de faible superficie (moins de 5 km²) et les rivières permanentes sont rares. Le climat tropical amène cependant de fortes précipitations durant l'été austral. Ainsi, la problématique d'inondation à Rurutu concerne peu les crues de cours d'eau, mais davantage les débordements en plaine des marais et des cours d'eau, dus à l'ensablement des estuaires.

Autrefois, à chaque précipitation importante, les talwegs étaient à l'origine de débordements qui inondaient les villages. Depuis, dans chaque village, des aménagements de ces talwegs ont été réalisés (mise en place de caniveau béton), sans pour autant être correctement dimensionnés. En effet, aucune étude hydraulique n'a été réalisée pour vérifier le dimensionnement de ces ouvrages, qui ont été raccordés aux ponts préexistants. Aucun événement important récent n'a permis de tester leur dimensionnement. Une étude hydraulique permettrait de vérifier de façon précise si les capacités hydrauliques de ces ouvrages sont suffisantes.

Les trois villages principaux, Moerai, Avera et Hauti, sont construits dans des cuvettes. Les débordements des rivières entraînent donc systématiquement une inondation sur l'ensemble ou une grande partie de la cuvette. Certains aménagements semblent cependant avoir résolu ce problème d'inondation ; par ailleurs, la présence de vastes tarodières en amont de ces villages permet d'atténuer localement les débordements.

Hormis ces plaines côtières, il existe également des zones planes où l'absence de talwegs marqués génère des phénomènes de ruissellement, à l'origine d'inondations stagnantes.

Egalement, à l'estuaire de nombreuses rivières, les eaux marines envahissent les talwegs, déposant des quantités importantes de débris coralliens ou de sable, et formant progressivement de petites digues naturelles. D'après les enquêtes de terrain, il semble que ces estuaires ne soient pas purgés régulièrement, ce qui peut freiner l'évacuation des eaux vers l'océan et favoriser des inondations.

La cartographie de l'aléa inondation a permis de distinguer plusieurs unités morphologiques :

- l'axe principal des talwegs (naturels et aménagés) et les lits mineurs sont en aléa fort ;
- leurs cônes alluviaux au niveau des plaines côtières sont cartographiés en aléa moyen ou faible. Ces derniers correspondent à des zones de fluctuation du cours d'eau en cas de submersion de berge, et sont sujets à des inondations lors de précipitations exceptionnelles ;
- les tarodières sont cartographiées en aléa moyen ou fort. Ce sont des zones irriguées et inondables qui peuvent jouer le rôle de zone tampon pour les talwegs en aval ;
- certaines cuvettes connues pour leurs inondations récurrentes sont en aléa moyen (nord d'Hauti ou d'Avera par exemple) ;
- l'enveloppe hydrogéomorphologique maximale des embouchures est en aléa faible.

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 (Figure 11).

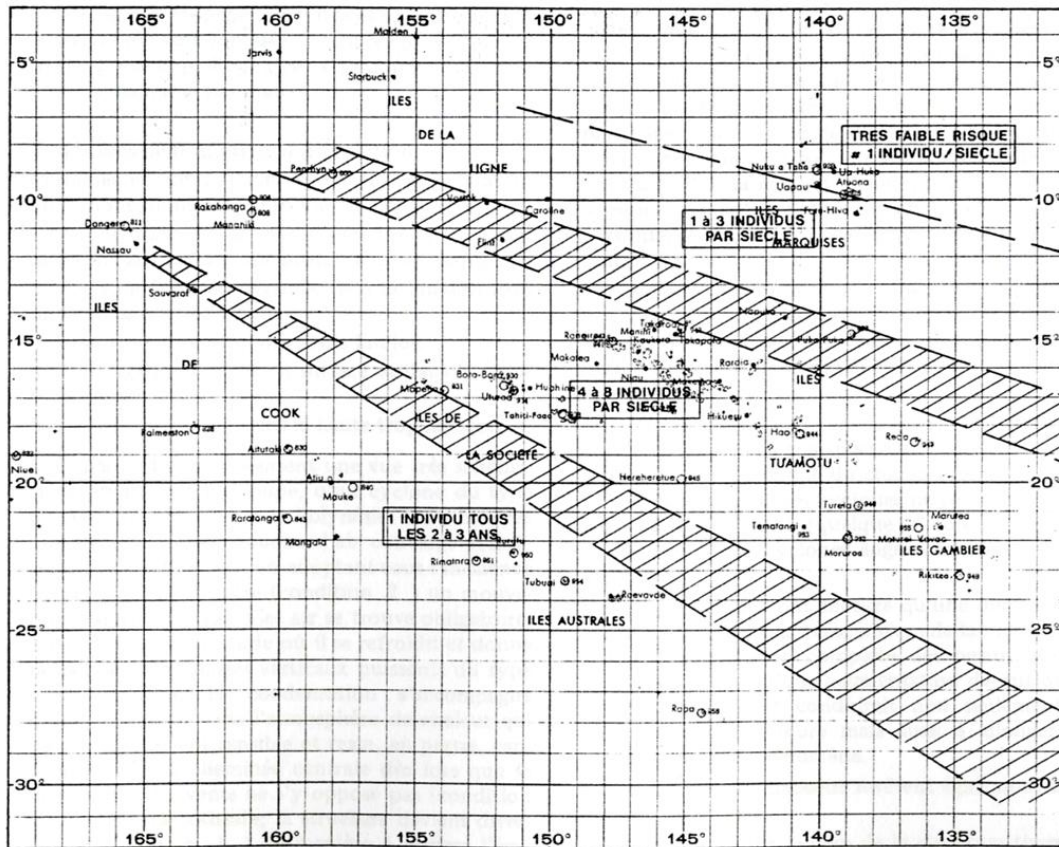


Figure 11 : Probabilité d'occurrence de phénomènes cycloniques sur la Polynésie française (Service de météorologie de la Polynésie)

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).

Cependant, 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.

3.3.2. Les phénomènes historiques de la Commune

La commune de Rurutu a subi des phénomènes de houle, d'origine cyclonique et saisonnière.

Les cyclones Emma (1970), Wasa (1991) et William (1995) ont dévasté les côtes de Moerai, Hauti, Avera, Vitaria et du sud de l'île.



Figure 12 : Destruction après le passage du cyclone Emma (Mars 1970 – Source : Historique des cyclones de Polynésie française de 1831 à 2010 ; Météo France)

Durant le passage du cyclone Emma (Mars 1970), la montée des eaux a été évaluée à 3 m sur l'île. L'eau a pénétré par endroit à plus de 400 m dans les terres. Le district de Moerai a été ravagé à 80 % (35 maisons épargnées sur 350 habitations). La station météo de Rurutu a été complètement démolie.

Lors du passage du cyclone Wasa (1991), le village de Moerai est ravagé. L'hôpital est inondé par la mer et 70 % de l'enrochement de la darse est emporté

Dans les villages, les effets directs de la houle ont été ressentis sur une frange côtière de plusieurs dizaines de mètres et les inondations associées sur plusieurs centaines de mètres. Les destructions ont été très importantes sur les chaussées et les habitations.

Suite à ces cyclones, des protections littorales sous forme de murets ou d'enrochements ont été mises en place (Figure 13).



Figure 13 : Exemple de protections sous forme de mur
A gauche Village d'Avera, à droite, Village d'Hauti - Mars 2016

3.3.3. Méthodologie de cartographie

3.3.3.1. Généralités

Deux modèles peuvent être utilisés pour simuler la propagation de la houle :

- la modélisation en 2 dimensions (profil),
- la modélisation en 3 dimensions (spatiale).

La modélisation 2D (le long d'un profil) est adaptée à des contextes simples et facilement transposables, par exemple dans une zone de lagon en arrière d'un récif sans passe. Un à trois profils sont tracés et la surcote obtenue peut être retenue pour tout le lagon.

La modélisation 3D est adaptée aux zones complexes (passe + baie ou zone portuaire), elle prend en compte divers phénomènes comme la réfraction et la diffraction de la houle.

Des modélisations en 3D sont réalisées dans un certain nombre de sites représentant les différentes situations côtières en Polynésie. Les résultats obtenus sont ensuite extrapolés au linéaire côtier n'ayant pas fait l'objet d'une modélisation détaillée en 3D.

La cartographie de l'aléa est tributaire des résultats de la modélisation et de la transposition des résultats sur les fonds topographiques.

Les valeurs caractéristiques de la houle (hauteurs, période et directions), de la pression atmosphérique et du vent (vitesse et direction) utilisées en entrée des modèles sont établies à partir des données cycloniques paroxysmales enregistrées depuis 1970. La bathymétrie utile aux différents calculs est fournie par le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine).

Pour simuler de façon réaliste la transformation et l'action de la houle au niveau des zones d'intérêt, les simulations tiennent compte des phénomènes suivants :

- propagation dans l'espace ;
- réfraction ;
- gonflement (shoaling) ;
- dissipation par déferlement ;
- dissipation par frottement au fond.

De plus, la diffraction est considérée pour les secteurs au droit des passes.

Il existe actuellement trois grandes familles de modèles de houle qui tiennent compte de ces phénomènes. Ils sont basés sur :

- l'équation de conservation d'action de la houle - modèles spectraux ;
- les équations de Berkhoff ;

- les équations de Boussinesq modifiées.

Les modèles de la dernière famille sont très complets, capables de simuler l'action de chacune des vagues arrivant sur le rivage (déferlement et jet de rive). Ils nécessitent, néanmoins, des données très précises en entrée et d'énormes ressources en calcul et en post-traitement. Ils ne sont pas adaptés à cette étude. Ce type de modèle est le plus souvent implanté très localement et couplé à un ou plusieurs modèles spectraux de grande emprise qui l'alimentent en temps réel à des fins d'alerte en cas d'inondation.

Les modèles spectraux (conservation de l'action de la houle) sont plus adaptés. C'est le cas de SWAN, référence internationale des modèles de ce type en génie côtier, qui présente l'avantage de calculer directement la surcote. Son seul défaut concerne la non prise en compte de la diffraction. Il n'est donc pas appliqué sur les sites à proximité des passes. Ces cas particuliers peuvent être traités avec le modèle REFDIR (résolution des équations de Berkhoff, une autre référence en génie côtier) qui prend en compte la diffraction. Cependant, ce modèle calcule les tensions de radiation et non les surcotes. Ces dernières peuvent être déterminées en injectant ces tensions dans le modèle SHORECIRC (modèle de circulation quasi 3D consacré aux environnements littoraux).

3.3.3.2. Les niveaux d'aléas

L'impact d'un cyclone en termes de submersion marine se décompose en deux phénomènes :

- la zone de déferlement de la houle ;
- la zone inondée par la surcote marine.

Les niveaux d'aléa sont directement issus de cette dichotomie :

- la zone de déferlement de la houle est classée en aléa fort. Elle mesure entre 10 et 50 mètres de large depuis le rivage, en fonction de la morphologie côtière. En présence d'obstacles (murs, enrochements, micro-falaise, ...), la zone d'impact est plus limitée en largeur ;
- la zone inondée par la surcote marine se décompose en deux zones :
 - une zone d'aléa faible pour les submersions marines inférieures à 0,5 m ;
 - une zone d'aléa moyen pour les submersions marines supérieures à 0,5 m ;
 - éventuellement une zone d'aléa fort pour les submersions supérieures ou égales à 1 m.

3.3.4. La cartographie à Rurutu

Sur la commune, la baie de Moerai a fait l'objet d'une étude détaillée par la réalisation d'une modélisation 3D. Par extension, le résultat obtenu peut être appliqué à l'ensemble du territoire communal.

Les hauteurs modélisées de houle correspondent aux valeurs maximales atteintes lors des cyclones survenus depuis 1970. À Rurutu, en référence à une hauteur de houle de 11 m en mer, la surcote marine modélisée est de 1,8 m.

La zone de déferlement des vagues est évaluée forfaitairement à 50 m de large (au droit des baies). Des zones peuvent être inondées par les vagues en arrière de cette zone forfaitaire, mais les destructions devraient être moindres.

À Rurutu, la surcote marine induite par la houle cyclonique (1,8 m) est inférieure à celle engendrée par les plus importants tsunamis connus (run-up de 6,3 m en 1946).

Pour cette raison et en considérant le phénomène le plus défavorable, **il n'est pas proposé de cartographie de l'aléa surcote marine liée à la houle cyclonique.**

Cependant, le risque de phénomène cyclonique a été considéré en parallèle du risque de tsunami. En effet, lorsque le run-up maximal considéré est de + 3 m pour le risque de tsunami, le risque de houle cyclonique a aussi été pris en compte pour la cartographie finale de l'aléa submersion marine.

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.

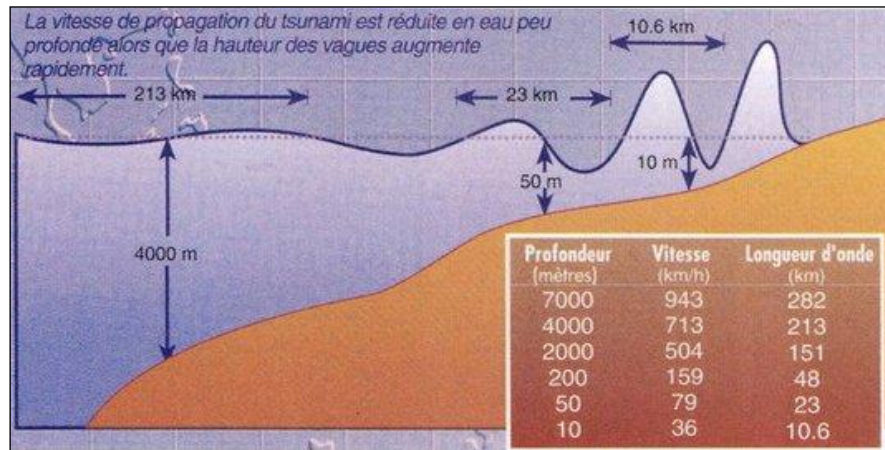


Figure 14 : Caractéristiques d'un tsunami en fonction de la profondeur (d'après CEA, 2002)

En plein océan les vagues des tsunamis n'excèdent que rarement 2 m (Figure 15), 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 15 : 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).

L'île de Rurutu peut être rattachée au groupe des îles hautes avec barrière de corail (même si la largeur du lagon est variable selon les villages de l'île).

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 9).

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).

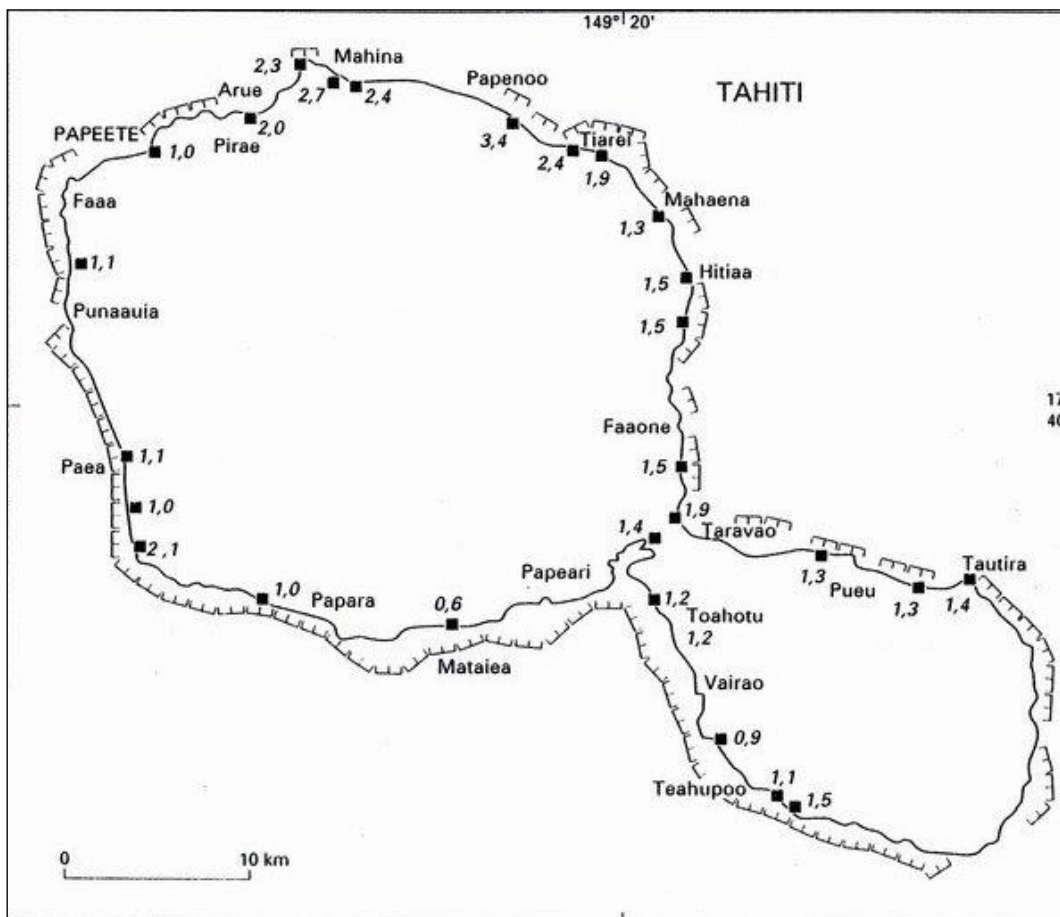


Figure 16 : Hauteurs des inondations (en mètre) observées à Tahiti lors du tsunami de mai 1960 (séisme du Chili) (source Orstom).

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). 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.

3.4.2. Les phénomènes historiques sur la commune

Deux tsunamis importants ont affecté la commune de Rurutu au cours du siècle dernier.

Le séisme des Aléoutiennes de 1946 aurait engendré une hauteur de run-up de 6,3 m pour une frange inondée de près de 120 m à l'intérieur des terres, au niveau du temple de Hauti. Des témoignages récents (2017) ont permis de confirmer la présence du tsunami en 1946, au niveau du village d'Hauti.

Le séisme du Chili de 1960 a également engendré un tsunami, mais aucune valeur de submersion ou de run-up n'a été relevée à Rurutu lors de cet événement.

Sur les côtes directement exposées à l'océan comme la commune de Rurutu, les tsunamis touchent de plein fouet le rivage (même avec l'atténuation relative induite par les hauts fonds), et le déferlement des vagues est à l'origine de nombreux dégâts.

3.4.3. Méthodologie de cartographie

3.4.3.1. Généralités

Des modélisations de l'aléa tsunami ont été réalisées la commune de Rurutu pour la baie de Moerai par le CEA dans le cadre du projet ARAI (Rapport CEA DIF/DASE/LDG/265/2006/DO de 2006).

Pour les tsunamis issus des séismes historiques ayant affecté la région, les valeurs les plus élevées fournies par les modèles correspondent au séisme des Tonga-Kermadec de 1865 (M = 8,3) : la valeur de run-up simulée atteint 4,5 m.

Or, les valeurs observées de run-up suite au séisme des Aléoutiennes de 1946 auraient atteint 6,3 m au niveau du temple d'Hauti. Des valeurs de run-up de + 3 m en moyenne ont été enregistrées dans le reste des villages de l'île (Figure 17).

Ainsi, le phénomène le plus défavorable a été considéré (tsunami de 1946) pour caractériser l'aléa de submersion marine par tsunami. Cependant, après de nombreux témoignages oraux (2017), il apparaît nécessaire de considérer en parallèle le risque cyclonique vu de sa récurrence dans les témoignages (Emma (1970), Wasa (1991) et William (1995)).

Ainsi, en complément de la méthodologie de cartographie de l'aléa tsunami sur la commune de Rurutu, il a été convenu de prendre en compte le risque cyclonique dans la cartographie générale.

Ce dernier a été évalué ponctuellement grâce aux témoignages des habitants et des destructions passées (ex. : destruction du bâtiment de la gendarmerie situé à plus de 50 m du rivage actuel). Il est néanmoins nécessaire de prendre en compte que lors des trois cyclones principaux qui ont touché l'île, aucune protection n'était présente. Des murs de protection sur le littoral ont depuis été érigés dans la majorité des villages.

L'île de Rurutu possède un lagon dont la largeur est variable. Les valeurs moyennes peuvent-être données :

- Avera : 300 à 400 m,
- Moerai : 150 m,
- Vitaria : de 100 m (Nord) à 300 m (Sud),
- Hauti : Moins de 70 m,
- Narui : de 100 m (Nord) à 250 m (Sud),
- Naairoa : de 100 m à 300 m.

Ces distances sont un des éléments essentiels explicatifs aux variations de valeurs de run-up maximum atteinte sur les différents villages de l'île, lors du tsunami de 1946. En effet, les valeurs maximales enregistrées de run-up peuvent-être mises en cohérence avec l'étroitesse du lagon au niveau du village d'Hauti (70m) (et probablement la topographie sous-marine).

Ainsi, il a été choisi de considérer les valeurs maximales de run-up suivantes :

- l'ensemble de la côté Est (incluant le village d'Hauti) : + 6 m,
- le reste de l'île : + 3 m.

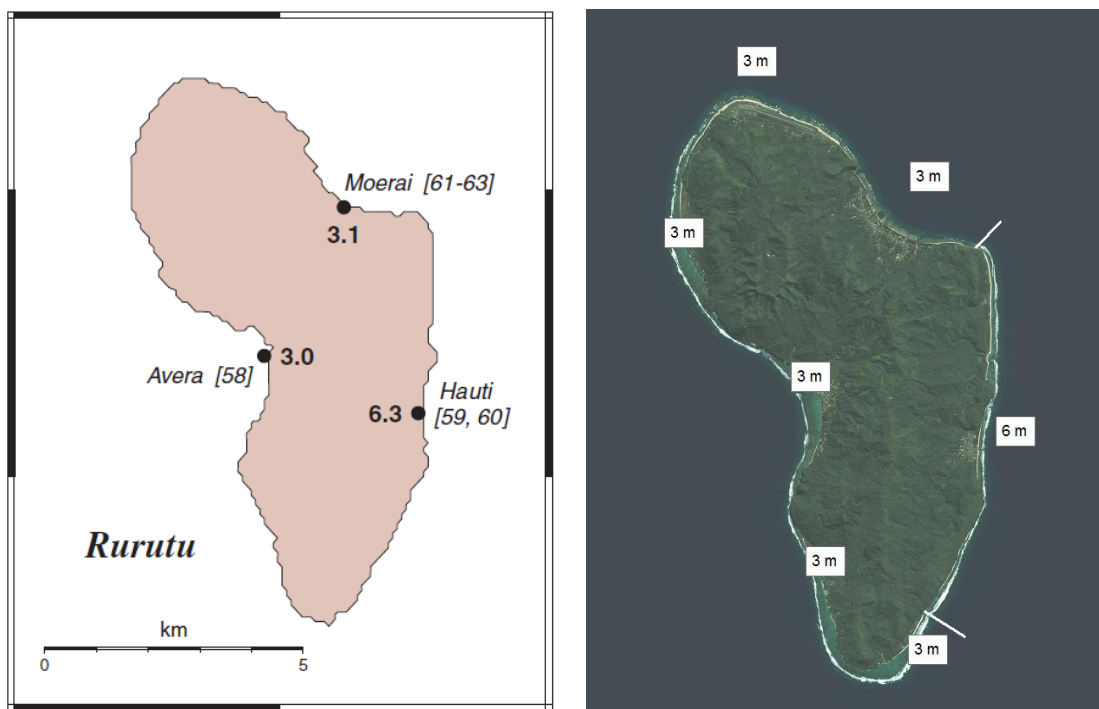


Figure 17 : A gauche, valeurs maximales de run-up enregistrées lors du tsunami de 1946 (Okal et al., 2002). A droite, valeurs de Run-up maximales considérées sur l'île de Rurutu

De plus, en cas de tsunami, la hauteur de la lame d'eau varie considérablement avec l'altitude du terrain naturel. Ainsi, il peut ainsi être considéré que plus le terrain naturel est élevé, moins l'épaisseur de la lame d'eau serait importante.

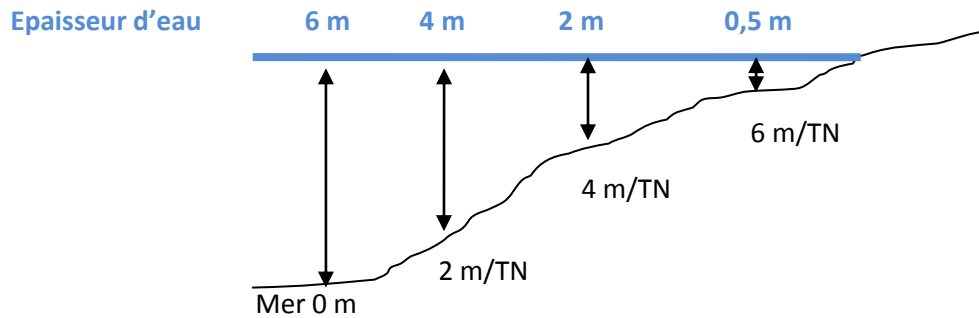


Figure 18 : Représentation schématique de la variation de l'épaisseur de la lame d'eau selon l'altitude (base d'un run-up de + 6 m) par rapport au terrain naturel (TN)

3.4.3.2. Les niveaux d'aléas

Même si l'impact des vagues diminue progressivement depuis la côte, il est délicat de fixer une limite entre la zone de déferlement du tsunami avec et sans destruction.

A la date de l'approbation du PPR de la commune, aucune donnée d'altitude précise permettant d'évaluer les limites d'aléas n'existait (notamment la zone à 3 ou 4 m d'altitude). Les choix cités ci-après ont donc été adaptés vis-à-vis des visites de terrains effectuées en 2016 et 2017, qui ont permis de caller au plus proche de la réalité les différents niveaux d'aléas.

- Pour **les zones d'aléa fort** : une bande forfaitaire d'environ 50 m à généralement été matérialisée au droit des baies à faible altitude. En fonction de la valeur de run-up maximale retenue, les choix suivants ont été considérés :
 - **Run-up de 3 m** : si l'altitude est nettement supérieure à 3 m dans la bande des 50 m, l'aléa fort a pu être réduit au droit de certaines limites et une zone d'aléa moyen se retrouve en amont (exemple : cas de falaise de bord de mer). Après des vérifications de terrain, certaines zones du bord de mer présentent une altitude approximative de 3 m. Il apparaît donc délicat de donner une limite précise entre l'aléa fort et l'aléa moyen. Dans ces cas précis, il a été évalué la possibilité de diminuer la bande d'aléa fort, notamment si un ouvrage de protection était présent (mur de protection en bord de mer). Les zones non protégées par un ouvrage et situées à 3 m d'altitude environ ou en-dessous, ont systématiquement été cartographiées en zone d'aléa fort.
 - **Run-up de 6 m** : la même logique est appliquée. Cependant, des marges de sécurité ont été prises en élargissant la zone d'aléa fort par endroit, notamment sur les parcelles situées entre la route de bordure et la plage (souvent à des hauteurs aux alentours de 4 m).
- Pour **les zones d'aléa moyen** : une bande d'aléa moyen se retrouve en amont de la zone d'aléa fort. Pour la zone où le run-up de 3 m a été retenu, la zone d'aléa moyen est cartographiée jusqu'à la cote + 3 m par rapport au niveau de la mer. Pour les zones de run-up à + 6 m, la zone d'aléa fort a été étendue jusqu'à la cote + 4 m (par mesure de sécurité, sachant que ces zones devraient être soumises à des inondations plus fortes en cas de tsunami).

Dans la zone d'aléa moyen, des **destructions partielles ou totales sont possibles** notamment dans les zones de fortes vitesses. Toutefois, les dégâts attendus seront quantitativement moins importants que dans la zone de déferlement le long du rivage.

Dans cette zone, la cote de référence à considérer pour la construction doit être de 1 m par rapport au sol.

- Pour **les zones d'aléa faible** : en amont des zones d'aléa moyen, une bande d'aléa faible a été cartographiée jusqu'à la cote + 6 m par rapport au terrain naturel. Cette zone correspond à une zone de sécurité où des inondations sont possibles en cas de tsunami, mais demeureront plus limitées.

Dans cette zone, la cote de référence à considérer pour la construction doit-être de 0,5 m par rapport au sol.

3.4.3.3. La cartographie de l'aléa submersion marine à Rurutu

Afin de caractériser au plus proche de la réalité l'aléa de submersion marine sur l'île de Rurutu, il est nécessaire de prendre en compte les événements extrêmes passés, soit :

- Le tsunami du 1er avril 1946 ;
- Le cyclone Emma (1970).

Dans la majorité des cas, c'est l'aléa tsunami qui a été considéré comme prédominant. Cependant, le risque cyclonique a été évalué en parallèle dans la cartographie finale de l'aléa submersion marine, notamment dans les zones où le run-up maximal est de + 3 m. En effet, cette valeur correspond approximativement à la hauteur maximale évaluée de la houle cyclonique lors du cyclone Emma, en 1970.

Ainsi, en général, sur l'île de Rurutu, les abords de l'ensemble des villages sont concernés par :

- un aléa fort sur une largeur d'environ 50 m (au droit des baies à faibles altitudes),
- un aléa moyen jusqu'à la cote + 3 m (ou + 4 m selon la valeur considérée de run-up max),
- un aléa faible jusqu'à la cote + 6 m.

L'ensemble des plages est concerné par un aléa fort de tsunami.

La zone de « Taero » située à l'est (non urbanisée) est concernée par un aléa moyen.

Le tableau ci-après récapitule l'ensemble des choix considérés pour la cartographie finale de l'aléa de submersion marine.

Zones	Côte considéré	Aléa Fort	Aléa Moyen	Aléa Faible
Côte Est	+ 6 m	Bande de 50 m (hors zones de falaise côtière)	Si altitude < 4 m (Zone Nord-est de l'île)	Au delà de la zone d'aléa moyen, entre +4m et + 6m d'altitude
Hauti	+ 6 m (run-up maximal tsunami)	Bande de 50 m	L'ensemble du village jusqu'à + 3m environ	Au delà de la zone d'aléa moyen, entre + 4m et + 6m
Moerai	+ 3 m (tsunami) et + 3 m (Cyclone Emma 1970)	Bande de 50 m dans le village, réduite ponctuellement quand l'altitude est supérieure à environ $\pm 3m$ (Est village)	L'ensemble du village jusqu'à + 3m environ (en amont de la zone d'aléa fort)	Au delà de la zone d'aléa moyen, entre + 3m et + 6m
Aéroport	+ 3 m (tsunami) et + 3 m (Cyclone Emma 1970)	Bande de 50 m	Existant localement quand l'altitude est $\pm 3m$ en arrière de la bande d'aléa fort (50 m)	L'ensemble de la zone de l'aéroport
Vitaria	Bande de 50 m	Bande de 50 m réduite à la route approximativement (altitude $\pm 3m$)	Existant localement quand l'altitude est $\pm 3m$ en arrière de la bande d'aléa fort	Zone en amont de la zone d'aléa fort (côté montagne) jusque $\pm 6m$
Avera	+ 3 m (tsunami) et + 3 m (Cyclone Emma 1970)	Bande de 50 m dans le village, réduite ponctuellement quand l'altitude est supérieure à environ $\pm 3m$ (NW)	L'ensemble du village jusqu'à + 3m environ	Au delà de la zone d'aléa moyen, entre + 3m et + 6m
Zone de Narui	+ 3 m (tsunami) et + 3 m (Cyclone Emma 1970)	50 m au niveau des zones de faible altitude (zones des deux ravines) et réduite dans les zones où l'altitude est $\pm 3m$	En amont de la zone d'aléa fort, jusqu'à $\pm 3m$ d'altitude	En amont des zones d'aléa fort, quand l'altitude est > 3m
Côte Sud	+ 3 m (tsunami) et + 3 m (Cyclone Emma 1970)	Bande de 50 m (hors zones de falaise côtière)	Si altitude < 3 m	Au-delà de la zone d'aléa moyen, entre + 4m et + 6m d'altitude

4. Les enjeux sur Rurutu

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'occupation et d'usage du sol actuels et projetés au travers notamment des différents schémas d'urbanisme et d'aménagement du territoire (PGA, PAD,...).

Aucun PGA n'est aujourd'hui réalisé sur la commune.

4.2. Présentation générale

Rurutu comptait 2 322 habitants, au dernier recensement réalisé en 2012. Ainsi, en 2012 la densité de population de la commune était de 72 habitants au km². Le littoral rassemble la majeure partie de la population, en particulier dans la partie septentrionale de l'île.

Le village de Moerai, chef-lieu de la commune est situé sur la côte nord de l'île en face de la seule passe navigable de l'île (Tauraatua). Il comporte un centre d'artisanat, la poste, la gendarmerie, les écoles et une infirmerie. L'aéroport est situé dans le nord de l'île.

La commune rassemble en particulier plusieurs sites archéologiques d'intérêt, dont le plus grand marae des îles Australes. D'une manière générale, l'activité touristique est peu développée sur cette commune où l'on ne compte que cinq structures d'accueil.

Le plateau Tetuanui, est quant à lui un vaste verger sur lequel se trouve des plantations d'avocats, d'oranges, de vanille, de café, de patates douces et de taro encore cultivées à l'ancienne.

L'ensemble de la commune est desservi par la route de ceinture qui donne accès à la plupart des zones littorales. L'intérieur de l'île est accessible par la route traversière.

L'ensemble de la commune de Rurutu a été considéré comme une zone à enjeux fort, c'est-à-dire potentiellement urbanisable.

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, et fort).

Les risques sur Rurutu sont obtenus par le croisement des aléas entre eux avec la zone à enjeux. Sachant que l'ensemble de l'île a été considéré comme une zone à enjeux, les zones de risques sont homogènes par rapport aux mesures réglementaires qui s'appliquent. Nous obtenons 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 le Service de l'Urbanisme 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 évènements 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**

Quand on considère un versant donné, la limite amont de la zone d’aléa ne se situe pas exactement au niveau de la ligne marquant la crête du versant. Elle va au-delà et englobe une zone peu pentue en arrière. Quelle largeur doit-on considérer pour cette zone ? Accessoirement, quel est le niveau d’aléa ?

La réponse peut être donnée par l’observation de l’extension des cicatrices morphologiques résultants d’instabilités passées, dans des contextes similaires. Une évaluation de la stabilité avec TALREN peut également apporter des réponses. Mais il n’est pas possible de mener des reconnaissances de sol de manière systématique et de multiplier les points de « calage ». Par ailleurs, il se pose le problème de définir précisément la ligne marquant la crête du versant, à partir de laquelle mesurer cette largeur. Nous nous placerons dans le cas idéal d’une rupture de pente bien marquée pour les calculs, mais la crête d’un versant est le plus souvent arrondie, et de ce fait, la ligne de crête est difficilement délimitable.

➤ *Données exploitées*

Il a été défini pour cette étude, un jeu de caractéristiques géomécaniques moyennes des différentes formations lithologiques, à partir des données géotechniques disponibles sur la Polynésie. Les caractéristiques sont les suivantes :

Matériaux	γ_h (kN/m ³)	φ (°)	C (kPa)
Colluvions à blocs	20	28	3
Basalte	22	45	30
Mamu III, IV et lahars	22	30	3
Mamu I à II	22	32	6

Figure 19 : 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)

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.

Ces configurations et leurs caractéristiques sont présentées dans la figure ci-dessous.

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.

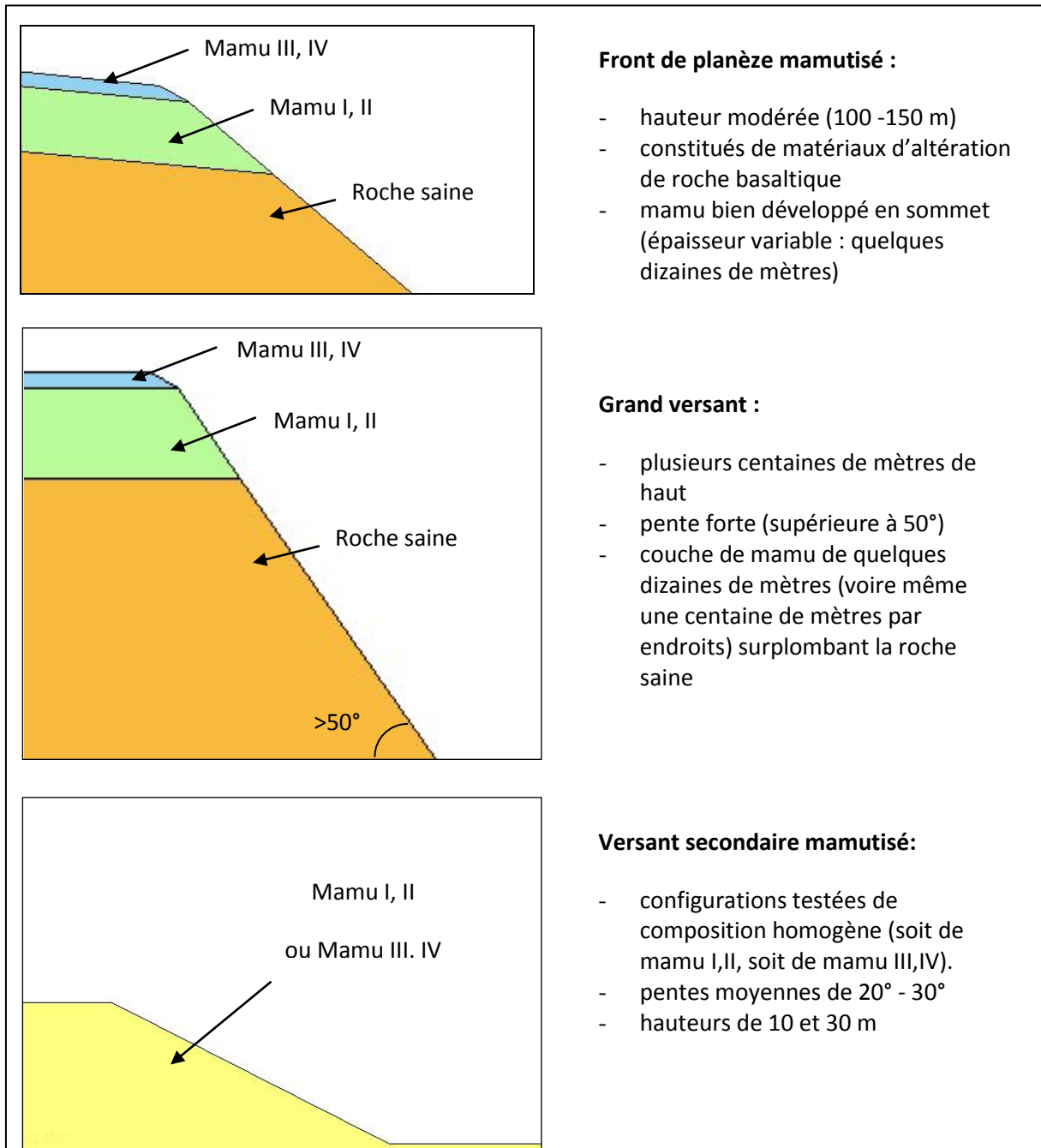


Figure 20 : Configurations types testées avec le logiciel TALREN

➤ *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).

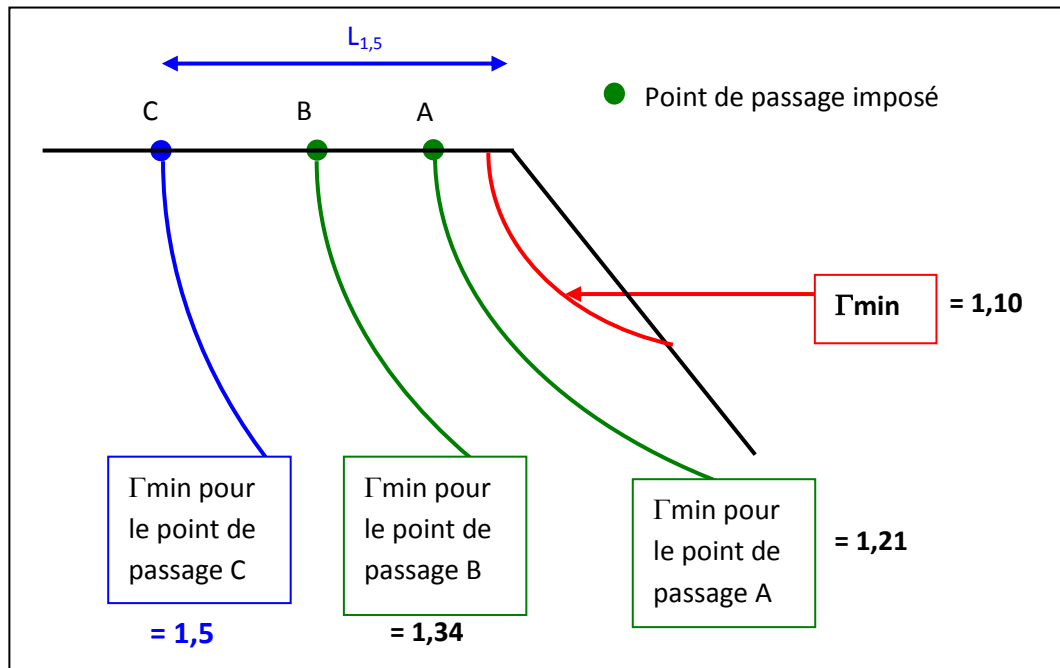


Figure 21 : Détermination de la largeur de bande de retrait minimale $L_{1,5}$

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.

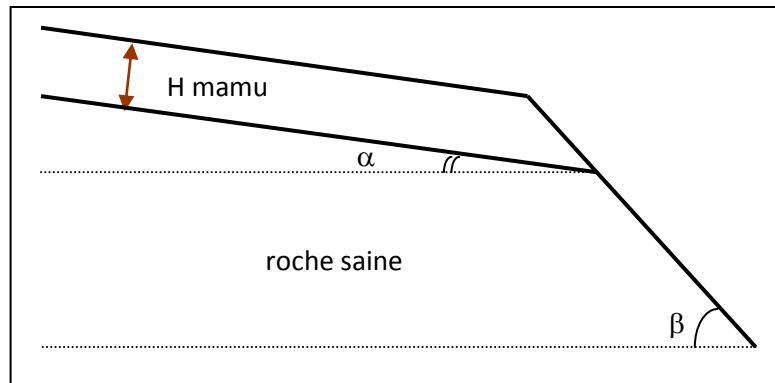
➤ *Calage :*

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 ont été 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 a été modélisée sous TALREN par l'ajout d'une nappe libre qui suit le relief. Les valeurs obtenues ont permis 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.

➤ Résultats :

Configurations types testées	Largeur de bande de sécurité en crête
Front de planèze mamutisé	L = 50 m
Grand versant	L = 70 m
Versant secondaire mamutisé	L = 10 à 50 m selon la pente et la hauteur du versant

Figure 25 : Largeurs de bande de sécurité en crête à prendre en compte pour chaque configuration type lors de la cartographie de l'aléa mouvement de terrain

A partir des calculs effectués par TALREN pour un jeu de caractéristiques de sol donné et de considérations géométriques et hydrogéologiques, les valeurs de largeur en crête retenues sont celles présentées dans la Figure 25.

Ces valeurs sont une moyenne de base à ajuster au cas par cas pour la cartographie de l'aléa. La mise en évidence des limites de variation des différents paramètres implique que les données théoriques calculées puissent être prises en défaut au profit de la réalité terrain. Par ailleurs, rappelons que les restrictions du logiciel aux calculs dans un sol homogène impliquent une imprécision non négligeable des résultats. Il ne s'agit donc pas d'un catalogue de valeurs à appliquer dans tous les cas, mais d'une aide à l'appréciation des distances à prendre en compte lors de la cartographie.

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

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

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{Q_{10}} \quad \uparrow \quad 1$$

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

(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 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). 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.

Bibliographie

- DES GARETS.E. (2004) – Bilan des connaissances sur les surcotes marines en Polynésie. Rapport BRGM provisoire, 50 p.
- 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.
- 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.
- M. Terrier, O. Sedan-Miegemolle, Ch. Mathon, A. Nachbaur (2009) Cartographie des aléas mouvements de terrain, île de Rurutu (Polynésie française), Rapport BRGM/RP-57363-FR
- Nachbaur A., Stollsteineer 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
- PONS S. (2015). Compte rendu de mission du 2 au 6 novembre 2015 sur la commune de Rurutu (Réf. PPR 15-2015)
- PONS S. (2016). Compte rendu de mission du 7 au 11 mars 2016 sur la commune de Rurutu (Réf. PPR 16-2016)
- PONS S. (2016). Compte rendu de mission du 21 au 23 novembre 2016 sur la commune de Rurutu (Réf. PPR 76-2016)
- PONS S. (2017). Compte rendu de mission du 20 au 24 février 2017 sur la commune de Rurutu (Réf. PPR. 01-2017)
- 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.