

Commune de Punaauia



PLAN DE PRÉVENTION DES RISQUES NATURELS

NOTE MÉTHODOLOGIQUE



Sommaire

1. INTRODUCTION	3
2. BASE DE DONNEES CARTOGRAPHIQUES	4
3. DOCUMENTS CARTOGRAPHIQUES	7
3.1. ZONES CARTOGRAPHIEES AU TITRE DU PPR.....	7
3.2. CARTE DES ENJEUX	8
3.2.1. <i>Les éléments cartographiés</i>	8
3.2.2. <i>Origine et traitement des données</i>	8
3.3. CARTE INFORMATIVE DES PHENOMENES NATURELS	9
3.4. CARTES DES ALEAS	10
3.4.1. <i>Aléa cyclonique</i>	10
3.4.2. <i>Aléa inondation</i>	17
3.4.3. <i>Aléa mouvement de terrain</i>	27
3.4.4. <i>Aléa tsunami</i>	44
3.5. PLAN DE ZONAGE REGLEMENTAIRE	46
4. BIBLIOGRAPHIE	48
5. ANNEXES	49

Liste des figures

Figure 1 : Zone d'emprise du PPR de Punaauia.....	7
Figure 2 : Configurations types testées avec le logiciel TALREN	35
Figure 3 : Détermination de la largeur de bande de retrait minimale $L_{1,5}$	36
Figure 4 : Schéma de situation des différents paramètres de morphologie de versant.....	37
Figure 5 : schéma de principe de réalisation d'un PPR	46

Liste des tableaux

Tableau 1 : phénomènes cycloniques ayant intéressé la Polynésie (1970 – 2004)	12
Tableau 2 : nombre de cyclones d'intensité connue par archipel	12
Tableau 3 : houles de références par archipels	12
Tableau 4 : valeurs paroxysmales par archipel	13
Tableau 5 : 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)	34
Tableau 6 : Tableau récapitulatif de l'influence des paramètres géométriques sur le coefficient de stabilité.....	38
Tableau 7 : Tableau récapitulatif de l'influence des paramètres physiques du sol sur le coefficient de stabilité	38
Tableau 8 : 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.....	39

1. Introduction

La Polynésie est exposée à divers phénomènes naturels dangereux dont les manifestations historiques et récentes sont nombreuses (huit cyclones meurtriers de 1843 à 1998, dont plusieurs centaines de morts au début du siècle ; mouvement de terrain de grande ampleur, notamment à Raiatea en 1998, inondations importantes régulièrement avec de nombreux dégâts et pertes humaines).

Une prise en compte de ces phénomènes, tant au niveau de la construction, de l'aménagement, de l'information des populations et de la préparation à la gestion de crise, sont indispensables pour réduire autant que possible leurs effets dommageables.

Les Plans de Prévention des Risques naturels (PPR), instaurés par la délibération de l'assemblée de Polynésie n°2001-10 APF du 1^{er} février 2001, permettent de prendre en compte de manière réglementaire les aléas, dans la construction et l'aménagement notamment.

Pour tous les aléas présents, l'objectif de la Polynésie est de couvrir l'ensemble du territoire par des PPR, dans un délai court (mi 2006). Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières a été chargé de réaliser ces PPR par la convention n° 2.2513 du 26 décembre 2002 relative aux modalités de concours du BRGM à l'élaboration des PPR en Polynésie.

De manière effective, le BRGM travaille sous couvert du Service de l'Urbanisme (SAU).

Le présent rapport a pour objectif de décrire les données utilisées ainsi que la méthodologie mise en œuvre pour l'élaboration des documents constitutifs des PPR en général et du PPR de Punaauia en particulier :

- La carte des enjeux ;
- La carte informative des phénomènes naturels ;
- Les cartes des aléas naturels ;
- Le plan de zonage réglementaire ;
- Le rapport de présentation ;
- Le règlement.

Il ne s'agit donc pas d'une pièce constitutive du PPR. Le présent rapport est destiné au SAU et en général à des techniciens plutôt qu'au grand public. Il sert à faciliter l'instruction du PPR en explicitant les choix opérés et les résultats obtenus.

2. Base de données cartographiques

La base de données cartographiques utilisée pour la réalisation des Plans de Prévention des Risques sur les communes de Polynésie Française, a été fournie essentiellement par le Service de l'Urbanisme sous format vecteur Microstation ou sous forme de données raster, courant 2004.

Les données vecteurs sont disponibles sur un nombre réduit d'îles. Sur l'île de Tahiti, elles se structurent de deux manières : la zone de Paea à Mahina à une échelle au 2000^{ème} avec une précision de 40 cm en planimétrie et le reste de l'île plus la presqu'île au 5000^{ème} avec une précision variant de 50 cm à 1 m en planimétrie (communication orale du SAU).

Les données vecteurs sur Moorea, Bora Bora, Raiatea ont été fournies à 1/5000 avec une précision variant de 50 cm à 1 m en planimétrie.

Pour les autres îles de la Polynésie, le BRGM dispose de données raster à des échelles variables (du 50000^{ème} au 10000^{ème} cf. : *tableau « Données utilisées et disponibles pour la réalisation des Plans de Prévention des Risques sur les communes de Polynésie Française »*) ou ne dispose pas de données.

Les fichiers vecteurs ont été fournis avec une extension « .dgn », Ils étaient projetés soit dans un nouveau système géodésique, le Réseau Géodésique de la Polynésie Française pour l'île de Tahiti ; soit dans différents systèmes locaux propres à la Polynésie Française.

Il était donc nécessaire de reprojecter ces derniers dans le système RGPF suivant le fuseau correspondant (la Polynésie est divisée en 5 fuseaux : les 4, 5, 6, 7 et 8) Ces fichiers ont donc été convertis au format MapInfo (logiciel SIG utilisé par le BRGM) en appliquant la projection Universal Transverse Mercator, WGS84, Hémisphère Sud, fuseau correspondant puisque le système RGPF n'est pas disponible dans MapInfo.

Les paramètres de transformation du système RGPF vers le système WGS84 sont de l'ordre de :

Translation x en m	0.072
Translation y en m	-0.507
Translation z en m	-0.245
Rotation x en "	0.0183
Rotation y en "	-0.0003
Rotation z en "	0.007
S(facteur d'échelle)	0.999999991

Les données fournies par le Service de l'Urbanisme comprennent :

- Le Plan Général d'Aménagement (lorsqu'il existe),
- L'orographie,
- L'hydrographie,
- Les voies de communication routières,
- Les surfaces d'activités et de bâti,
- Des éléments des réseaux d'eau et d'électricité,

Elles ont été complétées par des données provenant d'autres organismes :

- Les réseaux électriques sur Tahiti, Moorea, Bora Bora au format numérique et sur Huahine, Taputapuatea/Tumaraa (Uturoa, Raiatea), Tahaa, Ua Pou, Ua Huka, Tubuai, Tikehau, Rurutu, Rimatara, Rangiroa, Maupiti, Mataiva, Makatea village au format papier fournis par Electricité De Tahiti.
- Les limites communales réalisées par le BRGM.

D'une manière générale, les tables MapInfo ont été décomposées et restructurées afin de refléter les différentes couches d'information nécessaires à la réalisation des cartes.

Ainsi, le PGA se présente au format ArcView avec un label permettant de caractériser la zone ; pour l'intégration dans notre SIG, il a fallu restructurer ce fichier afin de disposer de polygones ayant chacun une information cohérente (nom de la zone, descriptif de la zone, zonage utilisée pour le PPR).

Il en est de même pour les bâtiments lorsque l'information était disponible, celle ci a été directement extraite des tables sources (cimetière, terrain de sport...) sinon elle a été repérée suite à un traitement visuel de l'information (les bâtiments administratifs et techniques, les établissements scolaires, les établissements de santé...). Chaque table créée a été renommée et restructurée afin d'être facilement exploitable sous MapInfo.

Un fond de carte des limites communales sur la Polynésie Française au 250000^{ème} a été fourni par le service de l'urbanisme. Mais il était très difficile de lui superposer de la topographie au 2000^{ème} et au 5000^{ème}. De ce fait, le BRGM a réalisé un fichier des limites communales en s'appuyant sur celui disponible mais en réinterprétant les limites à partir d'un Modèle Numérique de Terrain au pas de 25 m.

Le trait de côte sur les îles de Tahiti et Moorea, est une extraction du thème de l'orographie, il s'agit de la sélection par commune des courbes de niveaux avec une altitude de 0 m pour la zone de Paea à Mahina (échelle au 2000^{ème}) et d'une sélection sur le « level » 38 correspondant à la limite de côte pour le reste de Tahiti (échelle au 5000^{ème}).

Pour les autres îles, le trait de côte sera tiré des BD topographiques existantes (couche hydrographie) et/ ou sera numérisé à partir des cartes raster.

Note méthodologique de réalisation du PPR de Punaauia

Archipel	Ile	Fonds scannés	Fonds Vecteurs	Echelle d'édition	Date Edition	Origines et date d'acquisition	Zonage (par défaut l'île)
Australes	Rurutu	oui		10000	1984		
	Tubuai	oui		10000	1983		
	Rimatara	oui		10000			
	Raivavae	oui		20000			
Marquises	Fatu Hiva	oui		30000	1977		
	Hiva Oa	oui		50000			
	Nuku Hiva	oui		50000			
	Ua Pou	oui		50000			
	Ua Huka	oui		30000			
Société	Bora Bora	oui		20000			
		oui (qualité TM)	oui	5000		SAU acquis mai 2004	
	Huahine	oui		20000			
		oui		5000			
	Maupiti	oui		15000			
		oui (qualité TM)		5000			
	Moorea	oui		20000			
			oui	5000		SAU acquis mai 2004	
	Raiatea	oui		100000			
		oui		40000			
oui			5000				
		oui	5000		SAU acquis mai 2004		
Tahaa	oui		100000				
	oui		20000				
Tahiti			Oui	5000		SAU acquis mai 2004	de Papenoo à Papara plus presqu'île
			Oui	2000		SAU acquis mai 2004	de Paea à Mahina
Tuamotu-Gambier	Makatea	oui		10000			
		oui		50000			
	Rangiroa	cartes marines (3jpeg)		2* 10000			
				1* 30000			
				20000			
Mataiva	oui		20000				
Makemo	oui		50000				
Tikehau	oui		50000				

Données utilisées et disponibles pour la réalisation des Plans de Prévention des Risques sur les communes de Polynésie Française

3. Documents cartographiques

3.1. ZONES CARTOGRAPHIÉES AU TITRE DU PPR

Pour chaque commune, il est nécessaire de définir la zone d'emprise du PPR, à savoir celle qui est concernée par l'établissement d'un plan de zonage réglementaire, ce qui implique qu'un zonage des l'aléa peut être établi avec un niveau de précision suffisant.

La zone d'emprise peut donc se superposer à toute la commune mais dans la plupart des cas, elle est infra communale. En effet, il existe dans les communes des zones qui ne peuvent être couvertes par un zonage d'aléa en raison de leur inaccessibilité. C'est le cas par notamment des zones de relief très escarpé situées dans la partie centrale des îles hautes et dépourvues d'enjeux où le zonage de l'aléa mouvement de terrain est impossible à réaliser à l'échelle requise pour le PPR.

A Punaauia, la zone d'emprise du PPR correspond à celle de l'établissement par le SAU de la base de données cartographique à 1/2000. Cette zone large d'environ 5 km depuis la côte couvre amplement tous les secteurs urbanisés de la commune.

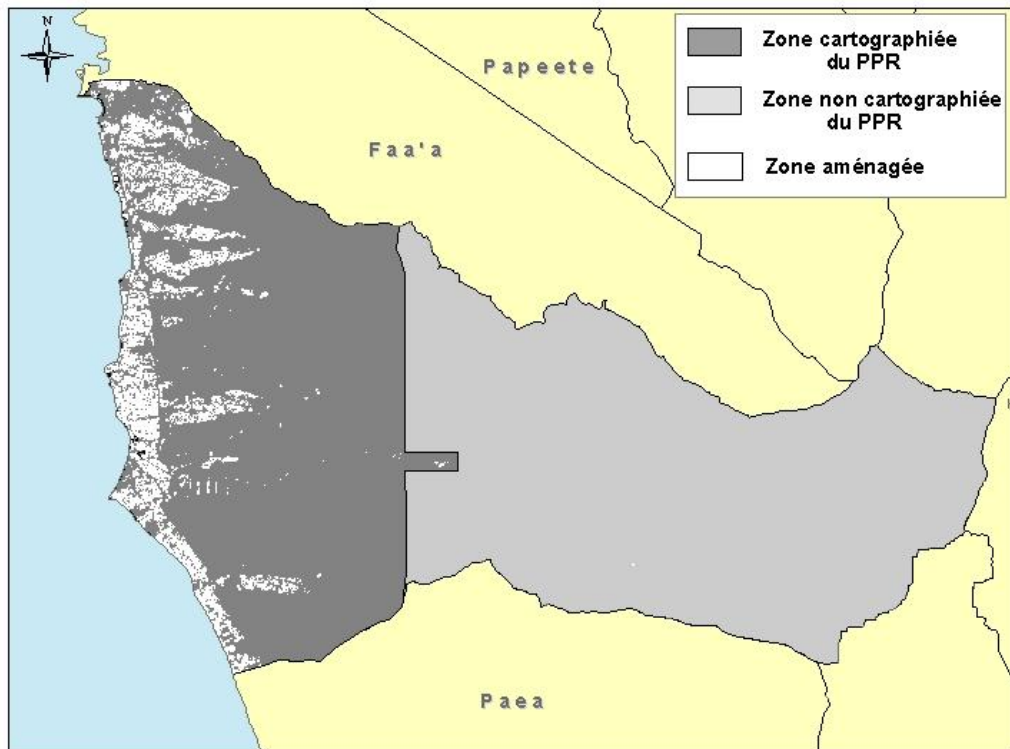


Figure 1 : Zone d'emprise du PPR de Punaauia.

3.2. CARTE DES ENJEUX

3.2.1. Les éléments cartographiés

Compte tenu du nombre élevé d'éléments exposés et de leur importance variable, le parti a été pris de représenter ces éléments par catégorie de type d'enjeux :

- Les bâtiments d'intérêt public et économique :
 - Les bâtiments administratifs et techniques,
 - Les bâtiments ayant une activité économique et/ou industrielle,
 - Les établissements scolaires,
 - Les établissements de santé ;
- Les bâtiments de secours et sécurité ;
- L'habitat ;
- Les bâtiments d'activités d'agrément et de loisirs :
 - Les hébergements touristiques,
 - Les bâtiments relevant de la culture et/ou du sport,
 - Le patrimoine,
 - Les lieux de culte ;
- Les infrastructures de communication :
 - Les routes,
 - Les infrastructures de transport,
 - Les grands ouvrages ;
- Les grands réseaux : 3 thèmes
 - L'eau et l'environnement,
 - L'énergie,
 - La communication.

Ces six catégories sont reprises sur chacune des cartes d'aléas.

Cette typologie des enjeux est superposée à une simplification du zonage du Plan Général d'Aménagement.

- Zone Industrielle, d'Activités et d'Equipements (zones US, UT et UE),
- Zone d'Habitat (zones UC et à différencier au cas par cas),
- Zone Urbaine (zones UA, UB et UC),
- Zone Naturelle et protégée (zones N),
- Zone de Projet (à différencier au cas par cas).

3.2.2. Origine et traitement des données

Les données sont extraites de la base de données topographiques du SAU. Ces données sont complétées au fur et à mesure par un inventaire de l'existant effectué par des agents du BRGM lors de leurs interventions sur le terrain, mais également par la réception de données de divers organismes notamment pour les grands réseaux.

La commune a remis au BRGM en avril 2004 un document représentant l'ensemble des enjeux ponctuels reporté sur des photographies aériennes.

Les axes routiers ont été répertoriés par le BRGM suivant trois catégories : 1) le réseau principal correspond à la route de ceinture ; 2) le réseau secondaire permettant l'accès aux habitations 3) le réseau d'accès aux bâtiments de secours et sécurité.

Les fonds de carte du PGA ont été recalés par le BRGM dans le système de coordonnées utilisé en Polynésie française. Le PGA de Punaauia a été remis au BRGM par le SAU en mai 2004 dans une version provisoire, après accord de la commune.

Sur les îles où le BRGM ne dispose que de fond raster à moyenne échelle, les éléments topographiques sont numérisés et complétés lors de déplacements sur le terrain. Ces données ne seront alors pas utilisables pour une cartographie à grande échelle.

3.3. CARTE INFORMATIVE DES PHENOMENES NATURELS

Nous avons opté pour la représentation d'une part des informations de type ponctuel (localisées précisément sur le territoire communal) et d'autre part les informations concernant la commune en général.

Les événements mentionnés sur les cartes sont extraits de la base de données ARAI et proviennent de différentes sources :

- Articles de journaux (La Dépêche) ;
- Rapport d'étude, de mission ;
- Données bibliographiques, Ouvrage encyclopédique de type « *Le mémorial Polynésien* » ;
- Recueil d'informations auprès de la population.

Sur la commune de Punaauia, les événements mentionnés sur la carte informative des phénomènes, ont été rapportés au BRGM par des particuliers (mouvements de terrain du 26/03/04 et ceux de 1998) ou par les pompiers (mouvements de terrain 17/12/2002, dépression tropicale 01/12/02). Les autres événements sont tirés de la littérature (Le mémorial polynésien, tome3 ; La dépêche du 27/02/78, du 23/02/99, du 24/02/99; La Dépêche et Les nouvelles de Tahiti du 22/12/98, du 03/04/03 et du 02/05/03).

3.4. CARTES DES ALEAS

3.4.1. Aléa cyclonique

3.4.1.1. *Méthodologie générale*

Dans un premier temps, une typologie des configurations côtières de Polynésie a été déterminée (cf. ci après). L'analyse de la répartition des îles en fonction de cette typologie permet ensuite de définir la localisation des zones représentatives particulières qui feront l'objet de modélisations détaillées en 3 dimensions (3D). De manière générale les côtes seront traitées à l'aide de modèles plus simples en 2D.

Cette approche pose d'une part la question des modèles utilisés et celle des données de base nécessaires au fonctionnement de ces modèles.

La typologie des configurations côtières de Polynésie est la suivante :

Côtes sans lagon ni récif frangeant (hors bords d'atolls) : Marqueses, Rurutu, une partie de Tahiti Iti, Rapa et Makatea

Plages et baies

Il est distingué une zone d'impact direct de la houle (potentiel destructeur important par l'eau ou les blocs poussés ou projetés ; érosion possible). L'impact est plus limité en largeur en cas « d'obstacles » naturels ou anthropiques : murs, enrochements, En arrière de cette première zone, il peut y avoir de l'inondation. Le zonage dépend en définitive de la morphologie des sites (topographie et bathymétrie).

Falaise

Etant donné le contexte, il est indiqué le long de la côte une bande de largeur forfaitaire qui est le plus souvent exagérée par rapport à la réalité.

Côtes à récif immergé : côté nord de Tahiti

Les plus fortes houles déferlent au niveau du récif. L'impact au rivage va ensuite dépendre de la profondeur du récif et de la distance par rapport au rivage.

Côtes des îles hautes avec lagon : la plupart des îles hautes avec lagon

A priori, la houle en pleine mer n'arrive pas jusqu'au rivage. Il faut toutefois considérer une houle de très faible ampleur au sein du lagon (avec zone d'impact direct limitée) et une montée des eaux (inondation) liée au phénomène d'ensachage.

Côtes au droit des passes des îles hautes avec lagon : la plupart des îles hautes avec lagon

Il convient de déterminer une valeur de houle au rivage afin d'estimer une zone d'impact direct. Idéalement une modélisation tridimensionnelle dans l'axe de la passe devrait être réalisée.

Cas des Atolls

Sauf cas particulier résultant du terrain, un zonage n'est pas nécessaire dans les atolls, dans la mesure où, en cas de fortes houles (survenant plusieurs fois par siècle), c'est l'ensemble de l'atoll qui est submergé avec un impact dynamique fort aussi bien côté océan que côté lagon. Cela est particulièrement vrai pour les grands atolls. Pour les petits atolls, l'impact dynamique côté lagon serait a priori plus limité. Aussi il peut y avoir une différence de zonage entre l'intérieur et l'extérieur de la bande de terre.

3.4.1.2. Origine des données

Les différents organismes consultés pour l'étude de l'aléa cyclonique en Polynésie sont :

- L'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) ;
- Météo France ;
- Le bureau d'étude BCEOM ;
- DEQ-MAR (Direction de l'Équipement service MARitime) ;
- DEQ-INFRA (Direction de l'Équipement service INFRAstructures) ;
- L'Université d'Hawaï ;
- L'Université de Polynésie ;
- Le SHOM ;
- Le BRGM ;
- Divers sites Internet.

Il ressort de l'analyse des documents que les données les plus anciennes remontent aux années 1830. Les données des années 1830 à 1970 sont relativement floues et ne donnent que très rarement des valeurs chiffrées (hauteur de houle, etc.). Les données s'étalant de 1970 à nos jours sont précises et peuvent servir de support fiable à toute étude.

3.4.1.3. Valeurs de références retenues

La houle

Les données cycloniques historiques s'étalent sur la période allant de 1831 à nos jours, soit un total de 133 ans. Les données numériques fiables (intensité des cyclones, hauteur de houle) n'existent que depuis la saison chaude 1969 – 1970, soit 34 ans (DES GARETS, 2004).

Depuis l'année 1831, 61 cyclones sont répertoriés dans les archives historiques, 39 d'entre eux se sont produits durant les 34 dernières années (1970 – 2004), soit 64% des cyclones inventoriés.

Les analyses qui vont suivre sont effectuées à partir des données existant depuis 1970. De plus nous émettons l'hypothèse qu'un cyclone d'intensité x peut potentiellement se reproduire et atteindre cette intensité en tout point de sa trajectoire.

Les phénomènes cycloniques sont en majeure partie des cyclones tropicaux (vent compris entre 118 et 179 km/h) (Tableau 1)

Ils sont plus fréquents du nord vers le sud et leur intensité augmente également avec la longitude (Tableau 2).

Les houles associées à ces cyclones oscillent entre 4 et 12 mètres d'amplitude (Tableau 3).

type de perturbation	nombre de phénomènes
Cyclone tropical intense	4
Cyclone tropical	17
Dépression tropicale forte	9
Dépression tropicale modérée	9

Tableau 1 : phénomènes cycloniques ayant intéressé la Polynésie (1970 – 2004)

Archipels	Nombre de cyclones	Cyc. Trop. Intense	Cyc. Trop.	Dépr. Trop. forte	Dépr. Trop. Modérée
Marquises	2		1		1
Gambier	11	1	7	1	2
Tuamotu	18	3	7	4	4
Société	20	2	9	5	4
Australes	21	2	10	6	2

Tableau 2 : nombre de cyclones d'intensité connue par archipel

Archipels	houles de références	hauteurs de houle
Marquises	1	7 m
Gambier	5	7 à 11 m
Tuamotu	11	4 à 12 m
Société	9	4 à 12 m
Australes	9	4 à 11 m

Tableau 3 : houles de références par archipels

Archipels	Intensités cycloniques	hauteurs de houle
Marquises	Cyc. Trop.	7 m
Gambier	Cyc. Trop. Intense	11 m
Tuamotu	Cyc. Trop. Intense	12 m
Société	Cyc. Trop. Intense	12 m
Australes	Cyc. Trop. Intense	11 m

Tableau 4 : valeurs paroxysmales par archipel

Etant donnée la faible période couverte par les archives cycloniques (133 ans) et la qualité de celles ci (intensité non définie systématiquement), il semble judicieux de choisir les valeurs de références issues des événements paroxysmaux subis par chaque archipel (Tableau 4).

Il est rappelé que huit cyclones ont été meurtriers durant les derniers 133 ans (1843, 1878, 1903, 1905, 1906, 1983, 1997, 1998). Les décès sont dus soit aux surcotes engendrées par les marées de tempête, soit par les inondations et mouvements de terrains induits par les précipitations.

La majeure partie des victimes est décédée en raison de l'absence d'abris hors d'eau sur les atolls des Tuamotu.

La surcote statique

Elle est composée de la marée astronomique (0.2 m), de la marée de tempête (entre 0 et 1 m) et d'une surélévation moyenne du niveau global des océans (0.3 m). La valeur de la marée astronomique est la valeur moyenne des marées en Polynésie.

La surélévation moyenne du niveau des océans est issue des études du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) à fin 2004.

Enfin, la valeur de la marée de tempête en pleine mer est déduite de la pression au centre du cyclone par rapport à la pression moyenne au niveau de la mer (1 cm par hPa).

3.4.1.4. Logiciels de modélisation

Le but de l'étude est de calculer les surcotes induites par les houles cycloniques au niveau des rivages de la Polynésie française. Les calculs de surcote se feront en :

- 3 dimensions (mode zonal) pour les secteurs à enjeux et/ou au droit des passes (îles hautes avec lagon) ;
- 2 dimensions (mode profil) pour les autres configurations (côtes sans lagon ni récif frangeant, côtes à récif immergé, atolls).

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

Les surcotes liées aux marées de tempête seront calculées par Météo France suivant la méthodologie établie par Daniel (Cf. : PEDREROS, 2004) et intégrées aux modèles de houle.

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

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

Ces deux derniers phénomènes de dissipation sont particulièrement importants en présence de récifs (Cf. : PEDREROS, 2004). De plus, la diffraction pour les secteurs au droit des passes est considérée.

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 (Cf. : PEDREROS, 2004).

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 ne pourra donc pas être appliqué sur les sites à proximité des passes. Ces cas particuliers pourront être traités avec le modèle REFDIF (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 pas les surcotes. Ces dernières peuvent être déterminées en injectant ces tensions dans le modèle SHORECIRC (modèle de circulation quasi 3D consacré aux environnements littoraux).

SWAN

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

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

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

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

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

REFDIF

REFDIF (REFraction DIFfraction), développé par Kirby et Dalrymple (1993 -1994), est un modèle capable de simuler la propagation d'une houle monochromatique en zone côtière. Il se base sur une formulation parabolique de l'équation de Berkhoff (ou dite de "faible pente", 1972) et de l'équation de l'interaction houle-courant de Kirby (1984) résolues suivant un schéma numérique implicite à différences finies de Crank-Nicolson (Cf. : PEDREROS, 2004) :

REFDIF est capable de simuler les phénomènes de :

- Réfraction ;
- Diffraction ;
- Gonflement ;
- d'interaction houle-courant ;
- dissipation liée au déferlement bathymétrique.

SHORECIRC

Le développement du modèle SHORECIRC a débuté en 1992 au sein du « Center for Applied Coastal Research » de l'Université du Delaware ; le modèle a connu depuis lors de nombreuses améliorations et applications en domaine côtier (Cf. : PEDREROS, 2004). Les bases théoriques du modèle peuvent être consultées dans Putrevu et Svendsen (1999) et les détails pratiques concernant son utilisation sont disponibles dans la notice d'utilisation « Quasi-3D nearshore circulation model SHORECIRC version 2.0 » rédigée par Svendsen, Haas et Zhao (Cf. : PEDREROS, 2004).

SHORECIRC est un modèle de circulation instationnaire à surface libre qui résout les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement intégrées suivant la direction verticale (équations de Saint-Venant).

3.4.1.5. Cartographie de l'aléa à Punaauia

Punaauia fait partie des types « **Côtes des îles hautes avec lagon** » et « **Côtes des îles hautes au droit des passes** ». Des opérations de modélisations détaillées ont été mises en œuvre sur la commune. La zone de la passe de Taapuna a fait l'objet d'une modélisation 3D (dite « zonale ») (PEDREROS, 2004 et 2006), et le reste de la zone côtière a été étudié par une approche 2D (dite « en profil ») (PEDREROS, 2004).

Le zonage a donc été établi sur la base des surcotes obtenues par ces modélisations, et conforté par la concordance de données historiques, ainsi que des données recueillies auprès de la commune et de certains riverains.

A Punaauia, en référence au cyclone Reva ayant engendré des vagues de 12 mètres en mer, la surcote marine retenue est de 2 mètres au droit des passes et de 1,5 mètres en arrière du récif. La zone de déferlement des vagues mesure 10 mètres de large au maximum et moins si le sol atteint la cote + 2 m avant ces 10 mètres.

3.4.2. Aléa inondation

3.4.2.1. Méthodologie générale

La définition de l'aléa inondation se fait selon 3 approches différentes suivant les tronçons des cours d'eau :

- interprétation qualitative dans les parties non accessibles ou en partie sommitale des cours d'eau ;
- interprétation semi-quantitative pour les zones sans enjeu et pour les zones à enjeux « non prioritaires » ;
- interprétation quantitative pour les zones à enjeux.

Parties non accessibles des cours d'eaux : interprétation qualitative

Dans les parties très encaissées ou en partie sommitale des cours d'eaux, zones généralement non accessibles en véhicule, le tracé des aléas est réalisé à l'aide des photographies aériennes. Un contrôle et/ ou ajustement de ces tracés par calcul hydrologique et hydraulique est, si possible, réalisé au droit des sections accessibles. Cette méthode est également utilisée sur les petites îles escarpées ne comportant pas de zone à enjeux, peu habitées et ne comportant que des cours d'eau temporaires.

Parties accessibles sans enjeux ou avec enjeux non prioritaires : interprétation semi-quantitative

Zones naturelles

Dans les parties accessibles en véhicules et pouvant être encore considérées comme naturelles, le tracé des aléas est défini par une analyse hydrogéomorphologique au droit de différentes sections d'écoulement réparties le long du cours d'eau (analyse des photographies aériennes puis visite de terrain). Ces analyses auront principalement pour objectif de bien individualiser, si possible, les différentes composantes du thalweg : lit mineur, lit moyen et lit majeur mais également de recenser l'ensemble des ouvrages hydrauliques ou ayant un impact sur la formation et l'écoulement des crues.

Ces relevés 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 (*Annexe 1*).

Zones fortement remaniées

Dans les zones ne pouvant plus être considérées comme naturelles, il n'est pas possible de définir les différents lits par analyse hydrogéomorphologique. Aussi la méthodologie est inversée : des calculs hydrologiques et hydrauliques simples sont effectués pour vérifier la cohérence des résultats par l'approche hydrogéomorphologique.

Report des résultats

Les informations ponctuelles, obtenues précédemment, seront 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.

Suivant les conditions d'écoulement existantes au droit des points de contrôle, les calculs hydrauliques seront réalisés au moyen (*Annexe 1*) :

- des formules de Manning Strickler au droit des zones à écoulement torrentiel ;
- par utilisation de relation spécifique au droit de sections singulières (seuil, pont, écoulement en régime critique,) ;
- de petits modèles d'écoulement simplifié au droit des zones d'écoulement fonctionnant en régime fluvial. Ce cas devra cependant être considéré comme exceptionnel car ces zones à faibles pentes seront généralement, pour les îles habitées, des zones à enjeux.

Le rendu des aléas est réalisé sur des fonds de carte au 1/25 000 avec possibilité pour certains secteurs de report au 1/10 000.

Pour les bassins versants « ou îles » où l'on ne dispose pas de cartographie au 1/25 000° (ou moins), il ne paraît pas envisageable d'effectuer un report satisfaisant. Il paraît alors préférable de réaliser un report à titre informatif (forme et répartition générale des zones d'aléa), et de préciser ces zones au moyen de distances approximatives par rapport aux ouvrages ou bâtiments remarquables, le tout illustré par des photographies.

Au droit des zones à enjeux : interprétation quantitative

Afin de définir les aléas à une échelle mieux adaptée aux enjeux, 1/5000° par exemple, on réalise, au droit de ces zones, des modélisations hydrauliques détaillées. Le chapitre suivant précise :

- les principales données nécessaires ;
- les contraintes de modélisations souhaitées ;
- les principaux résultats attendus.

Certaines modélisations ont déjà été réalisées sur des cours d'eau de Tahiti. Le rendu cartographique de ces études fait apparaître les zones inondables en différenciant 3 hauteurs de submersion (0-0,5/ 0,5-1,0 / +1,0). et pour certaines le lit mineur. Ce rendu

est par conséquent différent de ce que l'on se propose de faire tant du point de vue des cartes d'aléas réalisées par analyse hydrogéomorphologique (« enveloppe » des crues décennale et centennale) que par modélisation hydraulique (où l'on ajoute à cette notion de fréquence la notion de hauteur et de vitesse d'écoulement). Les résultats de ces modélisations, sauf s'il y a actualisation, seront néanmoins directement intégrés en l'état aux cartes d'aléas.

Sur les cartes d'aléas définis à partir de modélisation figurera un libellé distinctif qui pourra par exemple rappeler le numéro du rapport d'étude.

Par ailleurs, les modélisations d'écoulements à surface libre n'intègrent généralement pas les événements tels que formation d'embâcles, écoulement de berges ou autres... Afin d'envisager de tels événements lors de crues de fréquence rare, l'enveloppe hydrogéomorphologique sera, si possible, ajoutée aux tracés des aléas définis par modélisation.

3.4.2.2. Détermination des débits des crues de projet

Il est proposé de prendre comme référence les crues de projet définies en France métropolitaine. A défaut d'études locales de diagnostic concernant les crues torrentielles (circulaire du 16/08/1994), ce sont les directives de la circulaire du 24 janvier 1994 concernant les crues de plaine qui ont été retenues. Cette circulaire définit « une crue de référence qui est la plus forte connue ou, si cette crue était plus faible qu'une fréquence centennale, cette dernière ».

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 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 :

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

ou

$$Q_{100} = \underbrace{A.K.[C_{(10)} \cdot I_{(tc,10)}]}_{Q_{10}} + \underbrace{C}_{1} (I_{(tc,100)} - I_{(tc,10)})$$

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

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

Bassins versants urbains

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

Bassins versants ruraux

Formule générale

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

L'équation générale se résume à :

$$Q_p(T) = k \cdot C(T) \cdot I_{(tc,T)} \cdot A$$

où

$Q_p(T)$ est le débit de pointe de crue (en m^3/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 diverses formules existant dans la littérature, les plus répandues étant probablement Kirpich, Passini, Giandotti, Turazza (Annexe 2). 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.

3.4.2.3. Cartographie de l'aléa inondation à Punaauia

La commune de Punaauia a été traitée par interprétation qualitative et semi-quantitative. Le principal cours d'eau du territoire communal, la rivière Punaruu, est couvert par un zonage déterministe réalisé par le BCOEM et repris dans le PPR. Toutefois, une mise à jour de cette étude est recommandée et est proposée dans le cadre des études détaillées d'ARAI. La plaine côtière représente un cas de figure différent avec des accumulations ponctuelles lors des pluies et un problème général de drainage compte tenu des faibles pentes.

La suite fournit les commentaires et explications correspondant aux différentes situations rencontrées dans la commune.

Plaine alluviale

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

Les rivières les plus importantes traversent une plaine alluviale variant entre 100 m à plus de 1000m par endroit, avant d'atteindre les eaux du lagon.

Pour les autres, la partie aval de leurs cours est moins nette. Avec un lit mineur plus ou moins marqué au niveau des versants dominant la plaine alluviale, ces petites rivières se perdaient, à l'état naturel, en de multiples petits fossés dans la plaine alluviale, favorisant ainsi le dépôt des matériaux terrigènes. Ces petites ravines sont aujourd'hui plus ou moins canalisées.

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

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

Ravine Vairail (BV : 0,9 km²)

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

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

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

A mi hauteur du bassin versant, une crue exceptionnelle et /ou une formation d'embâcles peut générer des débordements sur la chaussée puis inonder des habitations riveraines. Dans la partie avale, des débordements peuvent se produire au droit de la confluence avec la ravine Vairail.

Ravine Paeria (BV d'environ 0,45 km²)

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

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

Petite rivière dont le débit maximal a du fortement augmenté suite à l'imperméabilisation du bassin versant. Elle débouche sur la plaine alluviale au niveau de l'usine Premium et du parking de la Mairie. Suite aux apports potentiels tant liquides que solides, l'actuel système d'évacuation des eaux paraît fortement sous dimensionné. Il est probable, que lors d'épisodes pluvieux conséquents, des débordements importants se produisent. Ces débordements auront probablement tendance à reprendre le trajet d'évacuation initial.

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

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

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

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

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

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

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

Rivière Putuoa (BV d'environ 1,3 km²)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ce petit bassin versant de forme très allongé possède un fond de vallée particulièrement pentu. Il fait actuellement l'objet d'une urbanisation intensive qui aura

pour principale conséquence d'augmenter les débits. Des lotissements sont en cours de réalisation dans la partie amont du bassin et une ZAC est en cours de réalisation dans sa partie intermédiaire.

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

Ces travaux de déviation comportent des ouvrages (pont du lotissement SAGE et pont de la route au droit de la partie aval de la ZAC) et une section courante (au droit de la ZAC) sous dimensionnés. Ces ouvrages et le chenal de la ZAC ne permettent visiblement pas l'évacuation d'une crue décennale. Des débordements importants sont donc à prévoir. Ces débordements, vu la pente, risquent de générer des écoulements à forte vitesse et constituer ainsi une menace pour la stabilité des remblais et des constructions.

Au droit de la RT2, une fosse de dépôts et de dissipation d'énergie a été réalisée. Cet ouvrage a visiblement été mal calé, il génère des débordements sur le parking du stade qui s'évacuent ensuite sur le rond point.

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

Le débit décennal est estimé à 224 m³/s. Le débit centennal est estimé à 493 m³/s.

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

Editée en septembre 2000, le BCEOM a réalisé, à l'aide d'une modélisation mathématique des écoulements, une cartographie de la crue centennale de la Punaruu. Cette modélisation n'incluait pas la modélisation de la Vaitopu ni ses débits. Les résultats de cette modélisation indiquent, lors de la crue exceptionnelle de référence :

- un débordement du lit mineur au niveau de la zone industrielle, entre la brasserie de Tahiti et le poste de chloration,
- un débordement au niveau du quartier proche du lagon.

Suite aux importantes extractions et travaux réalisées depuis dans le cours d'eau, on peut toutefois supposer que le lit du cours d'eau n'est plus exactement identique et que la ligne d'eau ne serait plus exactement la même. Il conviendrait ainsi de vérifier régulièrement que les modifications induites par ces travaux ne changent pas significativement la ligne d'eau et les zones d'aléa.

Rivière Maruapo (BV d'environ 3,8 km²)

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

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

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

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

Cette ravine présente un talweg encaissé puis, au droit de son débouché sur la plaine alluviale, un cône de matériaux grossiers. Ce cône situé en pied de falaise suggère une mise en place par coulées boueuses. Le lit mineur étant peu marqué, des débordements ou un changement de lit au droit de ce cône peuvent être envisagés.

Ravine Vaiaoa (BV d'environ 0,7 km²)

Le débit décennal est estimé à 17 m³/s. Le débit centennal est estimé à 35 m³/s

Pour une crue de fréquence décennale, des débordements sont probables dans la partie aval de cette ravine.

3.4.3. Aléa mouvement de terrain

3.4.3.1. *Méthodologie générale*

Différentes méthodologies de cartographie de l'aléa mouvements de terrain peuvent être mises en œuvre en fonction du contexte. Mais, quelle que soit l'approche, l'élaboration d'une carte d'aléa comporte deux phases principales :

- 1) Une **phase analytique** consacrée au recueil de l'information de base nécessaire à la mise en œuvre de la phase suivante.
- 2) Une **phase de synthèse et d'interprétation** qui vise à déduire des données de base ou à produire à partir de celle-ci, une information nouvelle concernant l'aléa.

Parmi les méthodes mises en œuvre dans la phase de synthèse et d'interprétation, on distingue les méthodes qualitatives des méthodes 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 en France.

L'aléa est généralement exprimé de façon qualitative (faible, moyen, fort).

L'approche qualitative ne permet pas toujours une grande précision dans la définition des contours et des niveaux d'aléa. Elle est plus appropriée pour des échelles de zonage de 1/10 000 ou moins.

Les **méthodes déterministes** reposent sur la mise en œuvre de modèles physiques et mathématiques reproduisant plus ou moins fidèlement la réalité. 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 d'avantage pour les grandes échelles (1/10000 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.

3.4.3.2. Phase analytique

Pour chaque commune faisant l'objet d'un zonage de l'aléa, la phase analytique consiste en la mise en œuvre autant que possible des points suivants :

- analyse des instabilités figurant dans BD-MVT et BD-ARAI au sein de la zone étudiée ou encore dans un contexte géologique et morphologique proche équivalent à celui de la zone étudiée ;
- recherche documentaire relative au secteur d'étude dans BD-ARAI (données géologiques, pédologiques, formations superficielles, ...) ;
- contact avec la commune concernée pour identifier des instabilités ne figurant pas dans ARAI ou pour obtenir des précisions sur celles déjà identifiées ;
- recherche dans BD-ARAI des photographies aériennes disponibles et collecte des photos les plus pertinentes auprès du Service de l'Urbanisme ;
- analyse des données topographiques et cartographiques disponibles. La précision du support cartographique va déterminer la précision du zonage ; Il est illusoire de vouloir produire des cartes à grande échelle si le support décrivant la topographie n'est pas suffisamment précis ;
- analyse des enjeux et du PGA en particulier lorsqu'il existe (ou à défaut de la répartition des zones urbanisées à partir des fonds cartographiques disponibles). Répartition du territoire à étudier, en 3 grands secteurs : 1) une zone à traiter à précision relativement grande – zones densément construites ou présence d'enjeux sensibles ; 2) une zone où une précision moindre est requise et/ou possible – habitat dispersé ; 3) une zone à ne pas cartographier en l'absence d'enjeux ;
- identification par photo interprétation d'indices d'instabilité ou de morphologies remarquables (barres rocheuses par exemple), qui feront ensuite l'objet d'une interprétation sur le terrain ;
- réalisation de reconnaissances de terrain avec parcours systématique des routes et chemins et observation des affleurements. La densité d'observation est a priori plus élevée dans les zones 1 mentionnées ci-avant. Un inventaire de mouvements de terrain (indices et instabilités avérées) est effectué. Autant que possible, il est fait appel au témoignage des riverains afin de mettre en évidence des désordres passés. Il est procédé à un relevé de la nature géologique et lithologique des affleurements. La plupart des affleurements étant constituée de mamu (du nom local des altérites), la nature de ce mamu est systématiquement notée, suivant les différentes classes indiquées dans le tableau ci-après. Il est également noté la présence de masses importantes de colluvions ;
- élaboration d'une carte de répartition du mamu, des colluvions et des alluvions. En ce qui concerne le mamu, 3 catégories sont distinguées : rocher sain ou mamu peu altéré (de nature rocheuse) ; mamu I ou II (peu altéré) ; mamu III et IV (altéré à très altéré) ; Si les données ponctuelles du terrain sont suffisantes, la carte est obtenue à partir d'une appréciation de la morphologie sur les

photographies aériennes, en tenant compte par ailleurs du contexte géologique et structural ;

Classe de mamu	Description lithologique
Mamu stade IV	De couleur le plus souvent ocre ou rouge, la structure ayant disparue. On peut y trouver parfois quelques boules moins altérées.
Mamu stade III	Souvent bariolé, sa structure et sa texture sont encore visibles. Il contient déjà une proportion notable de «pâte» emballant les blocs, et les boules en voie d'altération. Il se désagrège à la main.
Mamu stade II	De couleur gris ou ocre, plus rarement rouge, la structure et la texture y sont bien visibles. Assez cohérent, il a la consistance de la craie. Il contient toujours des panneaux beaucoup moins altérés.
Mamu stade I	Le plus souvent de couleur grise lorsqu'il provient de lave compacte ou vacuolaire, sa roche mère est bien discernable. Il ne se désagrège pratiquement plus sous la main. Il contient des boules peu ou pas altérées.
Mamu stade 0 ou lave altérée	Lave apparemment saine contenant des phéno-cristaux en cours de transformation. L'altération s'installe.
Lave saine	Lave saine.

3.4.3.3. Approche globale en Polynésie : zonage par « expertise »

Le présent chapitre a pour but de décrire la méthodologie mise en œuvre en Polynésie pour la réalisation des zonages de l'aléa mouvements de terrain, dans le cadre des PPR et selon une approche globale. La « globalité » est entendue par rapport à l'ensemble du territoire communal, par opposition à l'étude détaillée de sites particuliers (voir plus loin).

En Polynésie, le zonage vise exclusivement les îles hautes. Si une cartographie existe déjà, elle est reprise intégralement si elle est jugée de qualité suffisante.

Après la mise en œuvre systématique d'une phase analytique, la cartographie est réalisée « par expertise ». L'auteur de la carte, à partir de l'expérience acquise sur le terrain, notamment suite à l'analyse en retour de mouvements de terrain qui se sont produits et à partir de son expérience générale, détermine les facteurs de causalité susceptibles d'expliquer au mieux les instabilités observées.

A partir de ces règles et en appliquant le principe de causalité (les mêmes règles produisent les mêmes effets), des zones d'aléa homogène sont identifiées. Les règles et raisonnements sont explicités autant que possible mais la restitution n'est jamais exhaustive. En effet, le géologue applique intuitivement des règles de reconnaissance et de décision dont la diversité est telle qu'il est impossible de les formuler en totalité.

Comme indiqué précédemment, l'approche par expertise est qualitative et conduit à une expression qualitative de l'aléa. Pour autant qualitative qu'elle soit, cette approche n'est pas moins rigoureuse et performante que les méthodes déterministes. Elle est intégratrice et peut s'accommoder d'un faible volume de données de base.

Pour les communes de Polynésie, en fonction de la quantité et de la qualité des données de base disponibles, la cartographie réalisée vise à identifier et à délimiter des entités territoriales homogènes, qu'il est possible de caractériser en terme de niveau d'aléa. L'homogénéité est exprimée vis-à-vis de divers paramètres : la pente moyenne, la géologie, la lithologie, le contexte structural, la morphologie...

Les principales entités retenues à l'échelle utilisée sont :

- les planèzes
- les versants (vallée, talweg)
- les fronts de planèze
- les plateaux

Les planèzes sont les pentes originelles des différents volcans boucliers qui se sont succédés à Tahiti (ou dans d'autres îles). Elles correspondent à des portions planes faiblement inclinées vers la mer (pentes de 5 à 10°), d'au moins quelques km², au dessus d'un empilement de coulées de lave métriques.

On classe les planèzes en trois sortes, selon qu'ils sont constitués de roche saine ou qu'ils présentent un certain degré d'altération (mamu I-II ou mamu III-IV). Les instabilités y sont quasiment inexistantes. L'aléa y est faible à localement moyen.

Localement, on observe des zones d'accumulations de colluvions dont l'origine n'est pas toujours établie. La présence de ces matériaux instables, sur une surface significative, peut entraîner la délimitation d'une zone d'aléa moyen ou fort dans un environnement globalement moins exposé.

En ce qui concerne les versants, on distingue les versants secondaires, les versants principaux et les grands versants.

Les versants secondaires sont de faibles hauteurs (inférieures à 100 mètres) et de pentes plus ou moins fortes (de 15 à 25° en moyenne). Ils se développent de part et d'autre d'axes d'écoulement au sein des planèzes. On distingue les versants secondaires rocheux, les versants secondaires « mamutisés » de faible extension (hauteur inférieure à 30 mètres) et de plus grande extension (hauteur entre 50 et 100 mètres)

Les indices de mouvements de terrain sont peu nombreux. L'aléa est généralement faible à modéré.

Les versants principaux sont des versants de 100 à quelques centaines de mètres de hauteur, formant les bords de planèze de part et d'autre des cours d'eau principaux. On classe ces versants en fonction de leur nature, de leur morphologie et de leur situation.

Sont ainsi distingués les versants rocheux à pentes modérées à fortes (35 à 45° en moyenne), les versants mamutisés à pentes modérées, les versants de la zone d'effondrement sud de Tahiti Nui (pentes autour de 45° et hauteurs de l'ordre de 100 à 200 mètres), les versants composites de nature brèchique (ou présentant des plaquages volumineux de matériaux brèchiques) et les versants de type « Trachyte » ou « Phonolite » (avec des formations rocheuses armant les sommets et reposant sur du mamu).

Des mouvements de terrain ainsi que indices d'instabilité sont répertoriés. L'aléa est en général moyen à fort.

Les grands versants sont des versants de plusieurs centaines de mètres de haut, de pente forte (supérieure à 50°), de toute nature. L'aléa éboulement / glissement-coulée sur forte pente est élevé.

Les fronts de planèze forment le type de versant le plus important à cerner car ces entités font la transition entre la plaine habitée et les planèzes, parfois habitées. En fonction de la pluviométrie moyenne, on distingue les fronts à dominante rocheuse (comme à Tahiti - Punaauia – côte ouest) et des fronts altérés tels que ceux qui sont visibles à Tahiti, côte est aux environs de la presqu'île.

Au sein des fronts à dominante rocheuse, on distingue les fronts de hauteur modérée (100-150 mètres au plus), de grande hauteur (100 à 200 mètres), les fronts subverticaux et les fronts constitués de lahar / brèche.

L'aléa y est moyen à élevé, selon la nature et la morphologie de ces versants.

Les plateaux sont enfin des zones plus ou moins planes en altitude ne correspondant pas à des planèzes. Il existe des plateaux étendus comme par exemple les parties sommitales des dépôts de brèches sédimentaires, des plateaux intra-caldeira résultant du remplissage en pied de zone d'effondrement, de sommets tabulaires d'intrusions diverses et des plateaux relictuels au sein de versants. L'aléa y est faible.

Dans tous les cas, la présence de colluvions entraîne la délimitation de zones spécifiques ou des sous types des entités décrites précédemment.

Localement, le niveau d'aléa ou les contours des zones peuvent être affinés par la mise en œuvre ponctuelle d'une approche déterministe et la mise en œuvre d'outils de simulation (logiciel TALREN pour la stabilité de talus et logiciel PIERRE pour la simulation de chute de blocs).

3.4.3.4. Etude détaillée de Sites particuliers : 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 événements connus. Il conviendra à terme de mettre en œuvre une opération de « lâchers de blocs » en Polynésie afin de disposer de paramètres spécifiques aux versants locaux.

Utilisation de TALREN en appui à l'approche globale

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

Tableau 5 : 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 à la Figure 2.

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.

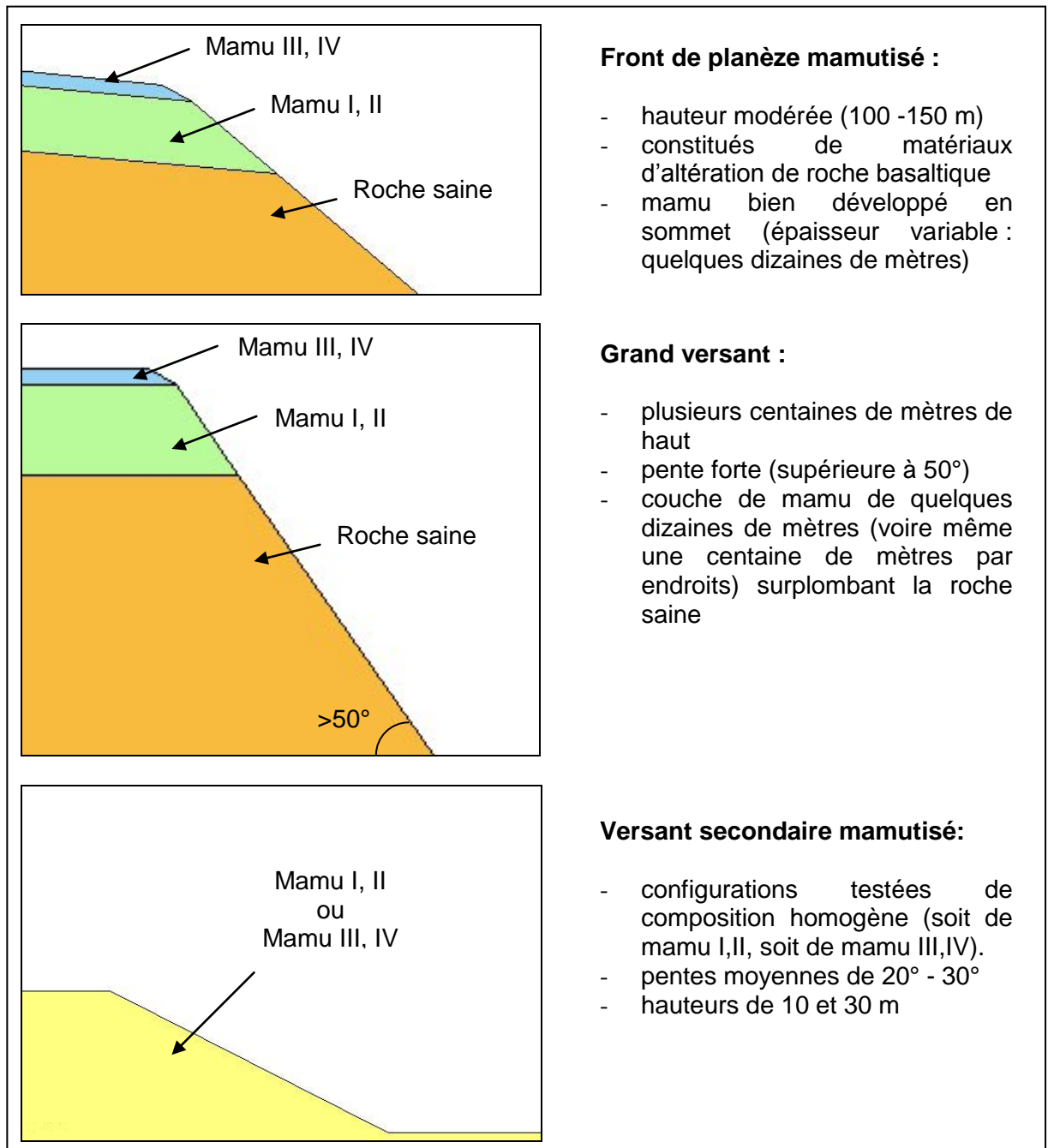


Figure 2 : Configurations types testées avec le logiciel TALREN

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 3).

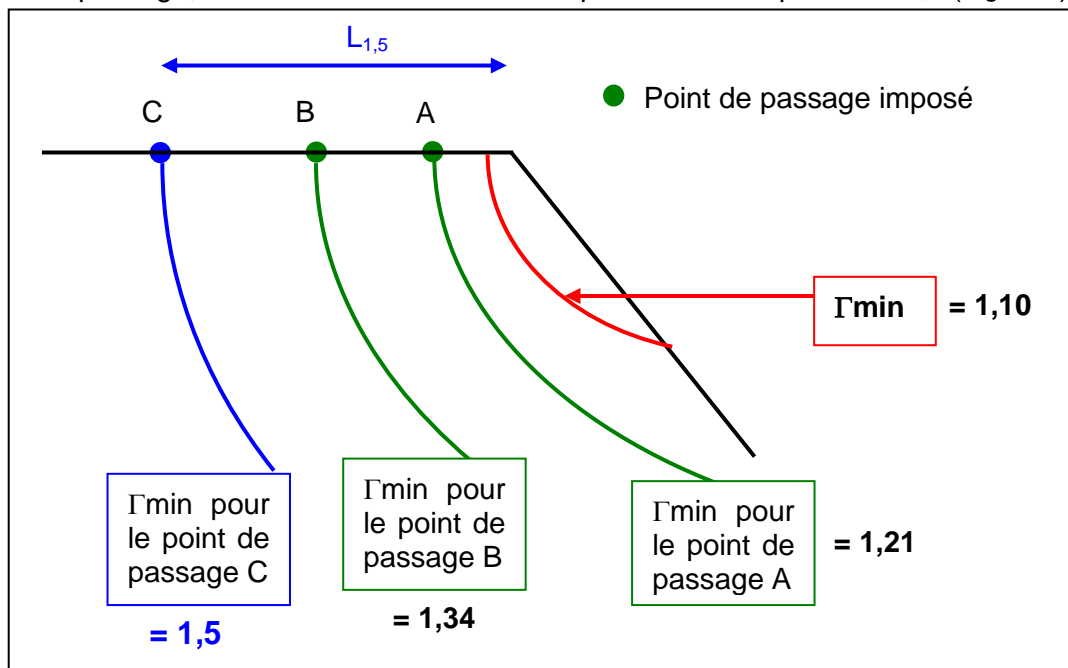


Figure 3 : Détermination de la largeur de bande de retrait minimale $L_{1,5}$

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

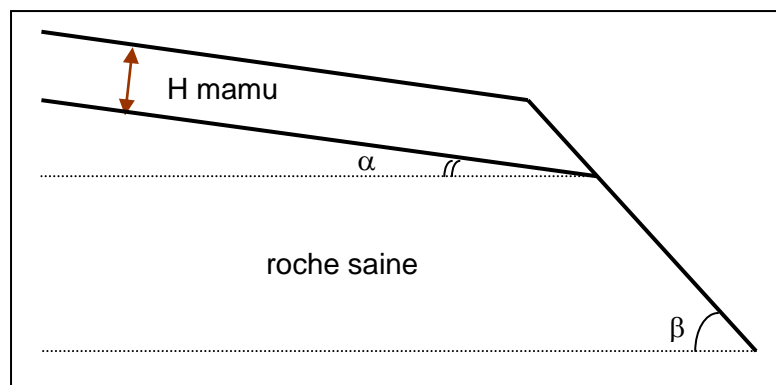


Figure 4 : Schéma de situation des différents paramètres de morphologie de versant

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 le Tableau 6.

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

Tableau 6 : 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 (cf. Tableau 8).

◆ 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	-	+	+++

Tableau 7 : 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

Tableau 8 : 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 le Tableau 8.

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.**

Utilisation de PIERRE en appui à l'approche globale

Dans ce cas, l'outil de simulation est utilisé pour aider à définir l'extension des zones affectées en pied de versant ou au sein des versants, par des chutes de blocs.

Un utilitaire PIERROTEAU couplant l'outil de cartographie (MapInfo) et PIERRE a été mis au point. Sur la carte en cours de réalisation, un profil est tracé. Pour ce profil, PIERRE est lancé pour 100 blocs de taille fixe (0,8 m³) avec des paramètres physiques du profil identiques à un site de calage en France métropolitaine et des blocs mobilisés à partir du premier point en amont du profil. Les points d'arrêt des blocs sont ensuite directement affichés sur la carte. A noter que le jeu de paramètres utilisé permet de reproduire des chutes de blocs dans la région de Tahiti.

Sur une zone donnée, en reliant les points d'arrêt les plus aval des différents profils, il est possible de tracer la limite avale de la zone d'aléa. Mais il s'agit bien d'une aide à la cartographie et si les phénomènes réels sont démentis ou que l'opérateur souhaite intégrer une marge de sécurité pour tenir compte des incertitudes, le zonage pourra être sensiblement différent.

Le protocole expérimental à l'origine du « jeu de données métropolitaines » est le suivant :

Un lâcher de 100 blocs a été effectué dans une pente de 35° sur un dénivelé de 160 mètres. La hauteur de lâcher des blocs était de + 5 mètres par rapport aux terrains naturels. Les blocs étaient de forme parallélépipédique aux arêtes arrondies avec un volume moyen de 0,8 m³ pour une masse moyenne de 2,23 tonnes (min. 0,5 m³ 1,44 t max. 1,26 m³ 3,53 t).

3.4.3.5. Définition des niveaux d'aléa

Quelle que soit l'approche mise en œuvre, des niveaux d'aléa sont définis. Quatre niveaux sont considérés : faible (à modéré), moyen, fort et majeur. Dans la pratique, les niveaux d'aléas forts et majeurs étant confondus, seulement trois niveaux d'aléas sont identifiés : faible, moyen à fort, et fort.

La signification des niveaux d'aléa est exprimée pour différents critères :

- la « portée » ou demande de prévention potentielle (DPP) ;
- la gravité ;
- la période de retour exprimée pour des phénomènes d'ampleur variée.

L'ampleur des phénomènes à considérer est la suivante pour les glissements de terrain :

index	Description	Qualification
G1	0 - 5 m ³	glissement faible
G2	5 - 200 m ³ (env. 100 m ³)	glissement modéré
G3	200 - 3 000 m ³ (env. 1 000 m ³)	glissement moyen
G4	3 000 - 50 000 m ³ (env. 20 000 m ³)	glissement important
G5	sup. à 50 000 m ³	glissement majeur

Pour les éboulements et chutes de blocs, la typologie est la suivante :

Index	Description	Qualification
E1	0 - 10 m ³ (éléments inf. à 1 m ³)	Chute de blocs
E2	10 - 200 m ³ (éléments inf. à 5 m ³)	Eboulement
E3	200 - 5 000 m ³ (éléments inf. à 10 m ³)	Eboulement en masse
E4	5 000 à 500 000 m ³	Eboulement en grande masse
E5	sup. à 500 000 m ³	Eboulement catastrophique

Pour l'ensemble des trois critères considérés, la signification des niveaux d'aléa est la suivante :

Niveau d'aléa	Portée	Gravité	Périodes de retour associées aux phénomènes de glissement	Périodes de retour associées aux phénomènes d'éboulement et de chute de blocs
Faible	parade individuel économiquement et techniquement	pas d'accident ou improbable	Quelques (0 à 9) G1 tous les 10 ans environ G2 à G5 improbables	1 bloc tous les 100 ans
Moyen	parade collective, supportable par quelques individus (immeuble collectif, petit lotissement)	accident isolé	Quelques G1 tous les 5 ans environ Quelques G2 tous les 10 ans environ Un G3 tous les 50 à 100 ans G4 et G5 improbables	1 bloc tous les 50 ans ou plus
Fort	cadre dépassant la parcelle, parade au coût prohibitif et techniquement difficile	quelques victimes	Quelques G3 tous les 10 ans environ Un G4 tous les 50 à 100 ans	1 bloc tous les 10 ans ou plus, associé à des phénomènes de tpe E1 à E3
Majeur	pas de parade technique	quelques dizaines de victimes ou plus	Un G5 tous les 100 ans environ Quelques G4 tous les 100 ans environ	Un E4 ou un E5 tous les 100 ans

3.4.3.6. Cartographie de l'aléa à Punaauia

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

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

Plaine côtière

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

Fronts de planèze

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

Sommets de planèze

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

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

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

Vallées principales et grands versants

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

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

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

3.4.4. Aléa tsunami

3.4.4.1. Cadre général – travaux futurs

C'est le CEA qui réalise dans le cadre du programme ARAI, la plupart des travaux concernant l'aléa tsunami. Le CEA détient l'expérience et les outils nécessaires à l'analyse du phénomène tsunami. De plus il assure, via le LDG (Laboratoire de Géophysique) la surveillance de ces aléas en Polynésie.

A terme, la cartographie de l'aléa tsunami va s'appuyer sur l'étude de différents sites typiques des contextes morphologiques polynésiens. Ainsi des études détaillées, comprenant une modélisation fine du phénomène et l'estimation d'une surcote à terre, vont être entreprises dans chaque archipel. Les résultats de ces études seront ensuite extrapolés sur toutes les cotes polynésiennes afin d'aboutir à une cartographie globale de l'aléa.

Dans l'attente de ces études, les zonages sont réalisés sur la base des données historiques disponibles (F. SCHINDELE, H. HERBERT, D. REYMOND (2005)) et sur la nature des différentes configurations côtières.

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

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

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

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

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

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

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.

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.

Trois cas de figures semblent se détacher suivant l'origine du tsunami :

- la côte ouest de l'Amérique du Sud ;
- la côte nord du Pacifique ;
- l'arc insulaire des Tonga Kermadec.

3.4.4.2. Cartographie de l'aléa à Punaauia

Punaauia fait partie des communes de Polynésie bénéficiant d'une protection relative offerte par le récif et le lagon. Il existe cependant des passes ainsi qu'une baie ouverte où cette protection est moindre. Deux tsunamis destructeurs ont affecté la commune de Punaauia au cours du siècle dernier.

Le plus connu est celui ayant fait suite au plus fort séisme jamais enregistré. Ce séisme s'est produit sur les côtes chiliennes en mai 1960 et a entraîné une inondation marine de 1,1 m de haut sur le littoral de la commune.

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

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

3.5. PLAN DE ZONAGE REGLEMENTAIRE

Les enjeux ponctuels ainsi que les zones du PGA sont regroupés en quelques zones d'enjeux simplifiées (Zone industrielle d'activité et d'équipements, zone urbaines, etc.). Les enjeux ponctuels (poste de secours, hôpitaux, etc.) sont signalés sur la carte des enjeux.

Les aléas sont déclinés par nature (inondation, mouvements de terrains, etc.) et par niveau (aléa fort, moyen à fort et faible à moyen)

Les risques sur la commune sont obtenus par le croisement des aléas et des enjeux ; les zones de risques sont homogènes par rapport aux mesures réglementaires qui s'appliquent. Par exemple les prescriptions concernant un aléa moyen de mouvement de terrain dans une zone d'habitat dispersé sont les mêmes que pour un aléa mouvement de terrain moyen dans une zone urbaine. Nous obtenons donc un certain nombre de zones de risques pour lesquels un règlement spécifique est rédigé (Figure 5).

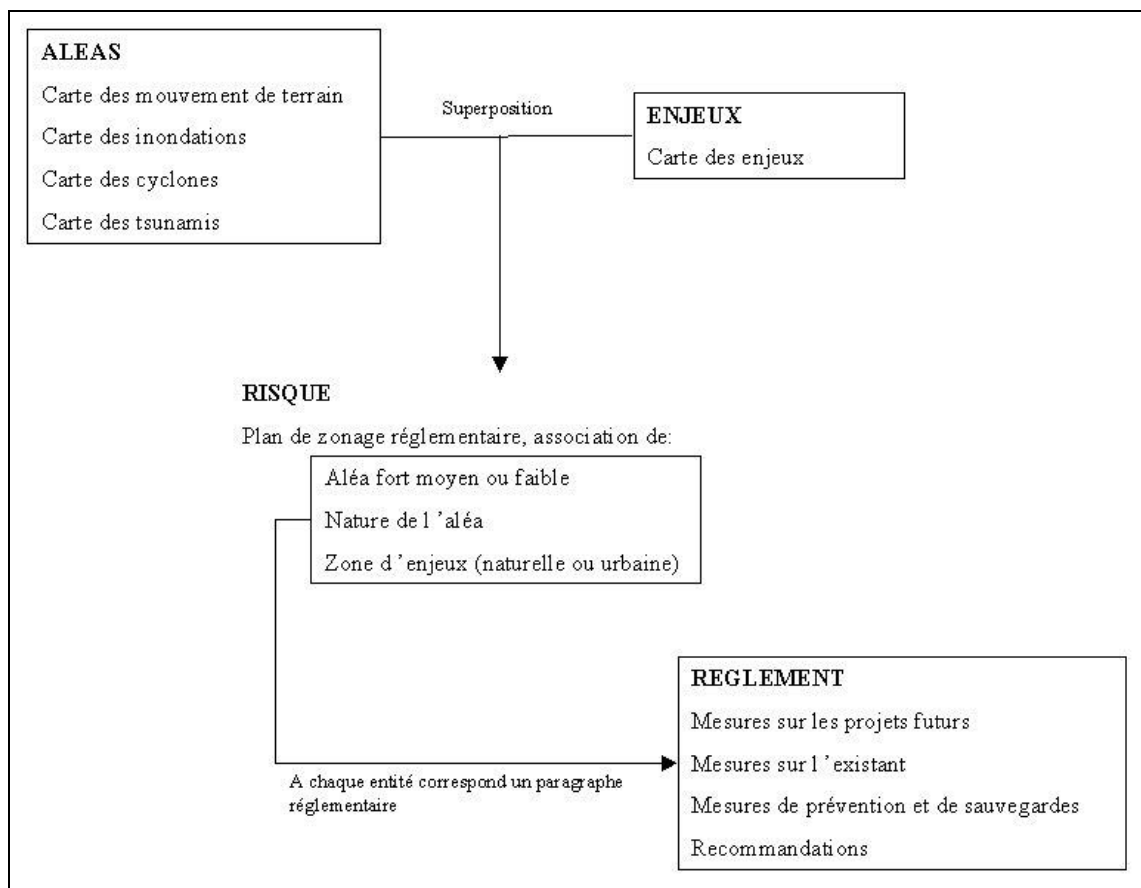


Figure 5 : schéma de principe de réalisation d'un PPR

A chaque zone correspond un règlement décliné en 3 parties principales :

- Mesures concernant les constructions futures.
- Mesures concernant l'existant.
- Mesures de prévention et de sauvegarde.

Dans chacune de ces parties les aléas sont traités de façon indépendante. Ainsi la lecture du plan de zonage va indiquer, pour une habitation donnée, la zone d'enjeux, le niveau d'aléa atteint et sa nature.

Ces trois informations croisées renvoient à un paragraphe spécifique du règlement suivant que celui ci est consulté pour un projet futur ou existant.

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. Enfin la quatrième partie concerne les recommandations propres à la commune.

4. Bibliographie

DES GARETS.E. (2004) – Bilan des connaissances sur les surcotes marines en Polynésie. BRGM/RP-XXXXX-FR, 50 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.

Remarque : Cette bibliographie liste les rapports internes aux BRGM ayant servi à l'élaboration de la méthodologie des zonages du PPR. La bibliographie propre à ces rapports (dont fait référence le texte) n'a pas été redétailée.

5. Annexes

Annexe 1 : Calculs hydrauliques en régime permanent	50
Annexe 2 : Formulaire.....	53

Annexe 1 : Calculs hydrauliques en régime permanent

CALCUL DES DEBITS EN REGIME PERMANENT UNIFORME

Ce calcul doit permettre d'évaluer le débit de débordement du lit mineur d'un cours d'eau dans le cas où il n'y a pas de modification du régime d'écoulement, quel que soit celui-ci, c'est à dire notamment, mais pas obligatoirement, en l'absence d'ouvrage.

On utilise, pour estimer ce débit au milieu d'un tronçon, la formule de Manning Strickler.

Son utilisation suppose :

- que le tronçon est suffisamment droit pour l'assimiler à un tronçon rectiligne et suffisamment long pour qu'au droit de la section de calcul il n'y est pas d'influence des extrémités,
- que la section courante de ce tronçon est de forme quasiment constante,
- qu'il n'y a pas de variation significative de la pente de la ligne d'eau. Cette pente, pouvant être considérée comme constante sur le tronçon lors des hautes eaux, est, si les hypothèses précédentes sont vérifiées, proche voire égale à la pente moyenne du fond du thalweg.

Formule de Manning Strickler : $Q = K.S.Rh^{2/3} . \sqrt{i}$

avec : **Rh** : Rayon hydraulique = S/P
P : périmètre mouillé (m)
S : surface mouillée (m²)
i : pente de la ligne d'eau (en m/m)

Le coefficient de Strickler est un coefficient qui traduit la rugosité (frottements) du fond et des berges du lit.

REGIME PERMANENT VARIE : SECTIONS SINGULIERES

Au droit de sections singulières (pont, rétrécissement ou élargissement brusque, seuil, vannes, rupture de pente, ..) il se produit très souvent un changement du régime de l'écoulement (courbe de remous).

Régime de l'écoulement :

Il se caractérise par le nombre de FROUDE (Fr) . Il correspond au rapport des forces d'inertie sur les forces de gravité.

$$Fr = V/\sqrt{gh}$$

avec :

V : vitesse de l'écoulement (m/ s), **h** : hauteur d'eau (m), **g** : 9,81

Trois régimes :

- **Fr < 1, régime fluvial**
- **Fr = 1, régime critique**
- **Fr > 1, régime torrentiel**

Le régime d'écoulement va dépendre notamment de la pente de la ligne d'eau et de la hauteur d'eau de l'écoulement.

Au droit de ces sections singulières, deux cas peuvent généralement se produire en présence d'ouvrages de longueur limitée.

Cas 1 : l'ouvrage ne modifie pas la largeur d'écoulement. L'impact de l'ouvrage ne réhaussera généralement pas de façon significative la ligne d'eau. Si la pente de l'ouvrage est suffisante, la rugosité généralement plus faible au droit de l'ouvrage permettra d'éviter une surélévation de la ligne d'eau. Le débit de débordement du lit mineur pourra être définie en amont ou en aval de l'ouvrage au moyen de l'utilisation de la formule de Manning Strickler dans une section droite appartenant à un tronçon rectiligne (cf. page précédente).

Cas 2 : l'ouvrage (pont, buse, ...) ou la formation d'embâcles implique une réduction importante de section d'écoulement. Cet ouvrage va alors induire une modification du régime d'écoulement.

Régime torrentiel

Dans le cas des rivières de Tahiti ou plus généralement de Polynésie, les cours d'eau sont relativement pentus au droit de leur débouché dans la plaine, leurs écoulements en crues s'effectuent ainsi la plupart du temps en régime torrentiel.

L'écoulement va ainsi passer du régime torrentiel au régime fluvial, avec formation d'un ressaut, en amont de l'ouvrage puis repasser en régime torrentiel en aval de l'ouvrage. Au droit d'une des sections de l'ouvrage, l'écoulement va donc s'effectuer en régime critique.

Régime fluvial

Dans le cas de certaines rivières de Tahiti ou de certains cours d'eau des îles de Polynésie française, la plaine alluviale est suffisamment conséquente pour que la pente terminale (avant l'exutoire) soit faible pour que le régime final de ces cours d'eau s'effectue en régime fluvial.

La présence d'un ouvrage de dimension restreinte peut générer une modification locale des conditions d'écoulement et générer ponctuellement un écoulement en régime critique. Les débordements du lit mineur peuvent alors se produire, soit au niveau du lit mineur soit au niveau de l'ouvrage si la réduction de section est suffisamment importante. Il convient alors de calculer quel est la condition la plus restrictive.

Le calcul en section courante s'effectue en utilisant la formule de Manning Strickler au droit d'une section amont à l'ouvrage en respectant les conditions d'application définies dans les pages précédentes.

Le calcul du débit critique au droit de l'ouvrage est défini ci après.

Calcul du débit critique maximal au droit d'un ouvrage

Il est possible dans le contexte du passage en régime critique, dans les deux cas précédent, de définir par un calcul simple le débit maximal pouvant transiter par l'ouvrage. Ce calcul consiste à considérer par approximation que le débit réel sera inférieur, ou au mieux égal, au débit "critique" pouvant transiter dans la section de l'ouvrage. Ce débit "critique" peut être calculé en considérant l'équation :

$$\text{Débit critique : } Q_c = \sqrt{gS^3 / b}$$

Avec :

S : section d'écoulement de l'ouvrage (m²),

b : largeur du plan d'eau (m),

g : 9,81

Le débit de débordement du lit mineur est dicté par l'ouvrage (il se produit en amont) pour un débit inférieur, ou au mieux égal, au débit Q_c.

Cas particulier d'un seuil :

Dans le cas où l'ouvrage existant est un seuil, la relation de transformation hauteur débit est mieux connue. Cette relation va dépendre des caractéristiques de ce seuil (forme, hauteur, dénivelée,...) mais s'il s'agit d'un seuil standard, une première estimation peut être réalisée en considérant que la hauteur d'eau en amont du seuil sera régie par la relation hauteur débit :

$$Q = 1,5.b.H^{1,5}$$

Avec :

b : largeur du seuil (m),

H : charge amont sur le seuil (m).

Annexe 2 : Formulaire

DÉTERMINATION DU TEMPS DE CONCENTRATION Tc

Définition : le temps de concentration Tc est défini comme le temps mis par l'eau partant du point le plus éloigné de l'exutoire (en durée d'écoulement) pour rejoindre ce dernier.

Le temps de concentration Tc, peut être estimé par différentes formules :

Formule de KIRPICH

$$Tc = 0,0195.(L/i^{0,5})^{0,77}$$

avec

- Tc : temps de concentration du bassin versant (mn)
- L : longueur du thalweg principal (m)
- i : pente moyenne du thalweg principal (m/m)

Cette formule a été développée à partir des données du SCS pour sept bassins ruraux dans le Tennessee (États-Unis) avec un lit bien marqué et des pentes fortes (3 à 10 %).

Formule de GIANDOTTI

$$Tc = 60. [0,4 . A^{0,5} + 0,0015 . L] / [0,8 . (i . L)^{0,5}]$$

avec

- Tc : temps de concentration du bassin versant (mn)
- L : longueur du thalweg principal (m)
- i : pente moyenne du thalweg principal (m/m)
- A : superficie du bassin versant (ha)

Formule de VENTURA améliorée par PASSINI

$$Tc = 0,14. [(A . L)^{1/3}] / [(i)^{0,5}]$$

avec

- Tc : temps de concentration du bassin versant (mn)
- L : longueur du thalweg principal (m)
- i : pente moyenne du thalweg principal (m/m)
- A : superficie du bassin versant (ha)

MÉTHODE SUPERFICIELLE (OU DE CAQUOT)

Evolution de la formule rationnelle, modèle déterministe global **qui ne s'applique qu'aux surfaces urbaines drainées par des réseaux.**

Permet le calcul du débit en tout point du réseau.

Limites d'application :

- superficie totale inférieure ou égale à 200 ha,
- pente comprise entre 0,002 et 0,05 m/m,
- rapport (pente maximale/pente minimale) inférieure ou égale à 20,
- coefficient de ruissellement compris entre 0,2 et 1.

SI HORS LIMITES : NÉCESSITÉ D'APPLIQUER UNE AUTRE MÉTHODE :
Modèle de Caquot

Formules utilisées

Le débit maximum se calcule par l'équation

$$Q(F) = K^{1/u} \cdot I^{v/u} \cdot C^{1/u} \cdot A^{w/u}$$

avec :

$$K = (0,5^{b(F)} \cdot a(F)) / 6,6$$

$$u = 1 + 0,287 \cdot b(F)$$

$$v = - 0,41 \cdot b(F)$$

$$w = 0,95 + 0,507 \cdot b(F)$$

avec $a(F)$ et $b(F)$ de la formule des pluies $i(t, F) = a(F) \cdot t^{b(F)}$

et le temps de concentration :

$$T_c = 0,50 \cdot I^{-0,41} \cdot A^{0,507} \cdot Q_p(F)^{-0,287}$$

avec :

I : pente moyenne hydraulique du réseau sur le parcours de l'eau (m/m),

A : surface représentant la somme des surfaces élémentaires d'influence au point de calcul (**ha**),

Q_p(F) : débit de fréquence de dépassement F au point de calcul (m³/s),

L : longueur en hectomètre du parcours de l'eau dans le réseau (**hm**)