Collectivité Départementale de Mayotte







Microzonage sismique de Mamoudzou-centre, Mayotte

Étude réalisée dans le cadre du projet de Service public 2001-RIS-444

décembre 2002 BRGM/RP-51839-FR 2002 MAYOTTE 05



Collectivité Départementale de Mayotte







Microzonage sismique de Mamoudzou-centre, île de Mayotte

Étude réalisée dans le cadre du projet de Service public 2001-RIS-444

P. Sabourault, O. Sedan, J.C. Audru, C. Mathon, J.L. Nédellec, A. Bitri, M. Bour et B. Lebrun, et, avec la collaboration de J.P. Rançon

> décembre 2002 BRGM/RP-51839-FR 2002 MAYOTTE 05



Microzonage sismique de Mamoudzou-centre

Mots clés : aléa sismique, effets de site, liquéfaction, mouvements de terrain, aménagement, géophysique, Mayotte, Comores

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Sabourault P., Sedan O., Audru J.C., Mathon C., Nédellec J.L., Bitri A., Bour M., et. Lebrun B, avec la collaboration de Rançon J.P. (2002) – Microzonage sismique de Mamoudzou-centre, Mayotte. Rapport BRGM/RP-51839-FR, 2002 MAYOTTE 05, 107 pages, 43 Figures, 12 Tableaux et 1 Annexe.

© BRGM, 2002, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'aléa sismique régional de Mayotte a été étudié par le BRGM en 2000 (Terrier *et al.*, 2000). Cette analyse régionale présentait le contexte tectonique de Mayotte et les paramètres des séismes qui touchent Mayotte.

À la suite de cette étude à caractère régional, la Direction de l'Équipement de Mayotte a souhaité qu'une étude de l'aléa sismique local soit réalisée sur le secteur de Mamoudzou-centre, depuis le carrefour du Baobab, au sud, jusqu'à la colline de la Préfecture, au nord (termes de la convention d'étude du 28 septembre 2000, OS n° 05/SAUH/OSIG). Un projet de Service public a été bâti par le BRGM, cofinancé à parts égales par la dotation de Service public du BRGM et par la Collectivité Départementale de Mayotte. Le rapport de Bour (2002) propose d'assimiler **Mayotte à une zone Ib de sismicité** par analogie avec la réglementation parasismique française.

La géologie de Mamoudzou correspond à une superposition verticale et à des passages latéraux de formations volcaniques. Ce sont des coulées de lave et des pyroclastites, dont certaines sont massives et saines, alors que d'autres sont meubles et altérées. S'y superposent des formations superficielles récentes ou actuelles. Ce contexte géologique, ainsi que la morphologie d'origine volcanique suggèrent que des effets de site lithologiques, topographiques, des phénomènes de liquéfaction et des mouvements de terrain peuvent être induits par des séismes.

L'approche adoptée s'appuie principalement sur les recommandations formulées par l'Association Française du Génie Parasismique (AFPS, 1993) pour les études de microzonage. Cependant, pour l'évaluation des effets de site, compte tenu par ailleurs du manque de données géotechniques, nous avons utilisé les spectres des Eurocodes EC8, plus adaptés aux connaissances scientifiques actuelles. Pour le dimensionnement des ouvrages, les règles PS 92 seront utilisées avec les spectres ainsi obtenus.

Les résultats sont fournis sous la forme de cartes à 1/10 000. Leur lecture permet de connaître, en tout point de la zone d'étude :

- la zone de réponse sismique homogène vis à vis des effets de site lithologiques et, par suite, le spectre de réponse à utiliser pour l'application des règles de construction parasismique PS 92 ;
- l'existence de phénomènes d'amplification topographique ;
- la susceptibilité à la liquéfaction ;
- le type et l'intensité de l'aléa mouvement de terrain.

• Les mesures SASW et H/V, acquises à Mayotte en mai 2002, ont été utilisées pour aider à la classification des sols selon les normes EC-8. En sortie, un spectre de réponse élastique a été associé à chaque zone homogène de Mamoudzou.

Quatre zones de réponse sismique homogène (c'est à dire se comportant qualitativement et quantitativement de façon homogène sous une sollicitation sismique) **sont définies pour le microzonage de Mamoudzou-centre**. Ces 4 zones correspondent à 4 configurations de sols, elles sont présentées page 68 (Figure 38) et sont rappelées ci-dessous.



Ces 4 zones sont caractérisées par 4 spectres de réponse à utiliser pour l'application des règles de construction parasismique. Ces spectres fournissent des accélérations horizontales maximales qui sont présentées page 65 (Figure 37).

- le spectre de la zone de type B, avec une accélération maximale de 0.2g (pour T=0)
- le spectre de la zone de type C, avec une accélération maximale de 0.22g (pour T=0)
- le spectre de la zone de type D avec une accélération maximale de 0.27g (pour T=0)
- le spectre de la zone du cratère de Kavani (spectre spécifique), avec une accélération maximale de 0.22g (pour T=0)

Ces spectres sont rappelés ci-dessous.



• La carte des phénomènes d'amplification topographique est présentée page 72 (Figure 41) et rappelée ci-dessous.



- Kavani Ka
- La carte des phénomènes potentiels de liquéfaction est présentée page 77 (Figure 42) et rappelée ci-dessous ;

• La carte de l'aléa mouvement de terrain est présentée page 82 (Figure 43) et rappelée ci-dessous;



Des recommandations en matière de prévention et de protection parasismiques sont présentées à la fin de ce rapport. On notera par exemple que pour les maisons individuelles, il est possible d'utiliser à Mayotte les recommandations préconisées par l'AFPS sous forme d'un guide intitulé : **Guide CP-MI Antilles**. Bien que cet ouvrage ait été initialement rédigé à des fins d'application aux Antilles, les mesures qui y sont proposées sont tout à fait adaptées à Mayotte.

Microzonage sismique de Mamoudzou-centre

Sommaire

Syn	thèse	5
1.	Introduction	15
2.	Cadre géographique et géologique	17
2.1.	Le bassin des Comores	17
2.2.	L'île de Mayotte	19
2.3.	Le secteur de Mamoudzou-centre	22
3.	Données géotechniques disponibles	27
4.	Prospections SASW et H/V mises en œuvre à Mamoudzou	29
4.1.	Présentation des méthodes	29
	4.1.1. La méthode SASW	29
	4.1.2. La méthode H/V bruit de fond	30
	4.1.3. Exemples de mesures	31
5.	Modèle géotechnique 3d	37
5.1.	Analyse géologique	38
5.2.	Apport des prospections géophysiques	41
	5.2.1. Profils SASW réalisés dans la zone d'étude	41
	5.2.2. Proposition de profils synthétiques par formations lithologiques	46
5.3.	Élaboration du modèle geotechnique tridimensionnel	48
6.	Définition du mouvement sismique au rocher	51
6.1.	Spectre de réponse élastique au rocher	51
6.2.	Recherche d'accélérogrammes synthétiques et réels	52
7.	Détermination de spectres de réponse tenant compte des effets de s	site
litho	ologiques	55
7.1.	Principe	55
7.2.	Pourquoi les « EuroCode 8 » ?	55
1.3.	Principe des EuroCode 8	56
	7.3.1. Conditions de sols	56
7 4	7.3.2. Spectres de reponse	50
7.4. 7.5	Comparation das apostras EC 8 et das masuras U/V	57
1.5.	7.5.1 Zono P	59
	7.5.1. Zone B	59
	7.5.2. Zone C	61
76	Spectres de reponse spécifiques	01 61
7.0.	7.6.1 Modèle CyberQuake	61
	7.6.2 Définition de la colonne de sol de Kavani	67
	7.0.2. Definition de la colonne de soi de Kavani	04

	7.6.3. Spectres de réponse du cratère de Kavani	63
8.	Spectres et zonage des effets de site lithologiques	65
8.1.	Spectres de réponse retenus pour le microzonage	65
8.2.	Carte de zonage des effets de site lithologiques	67
8.3.	Précautions	67
	8.3.1. Modifications du mouvement sismique par des effets de remplissage bords de vallées et des discontinuités latérales	de 67
	8.3.2. Phénomènes de liquéfaction	67
9.	Effets de site topographiques	69
9.1.	Définition	69
9.2.	Cartographie des effets de site topographiques	69
	9.2.1. Principes	69
	9.2.2. Cartographie	70
10.	Susceptibilité à la liquéfaction	73
10.1	.Méthodes d'étude	73
10.2	Carte de susceptibilité à la liquéfaction	76
10.3	Rappel concernant l'évaluation des effets de sites :	76
11.	Aléa mouvements de terrain	79
11.1	.Méthode d'étude	79
11.1	.2. Les facteurs permanents	80
11.1	.3. Les facteurs variables	80
11.2	Carte de l'aléa mouvement de terrain	81
12.	Conclusions et recommandations	83
12.1	.Conclusions de l'étude	83
12.2 les d	Recommandations pour la prise en compte des résultats du microzonage da locuments d'urbanisme et D'aménagement	ans 83
12.3	Une attention particulière à apporter au choix du site de construction	87
13.	Bibliographie	88
Ann Mar	nexe 1 : Synthèse des mesures SASW et H/V effectuées en mai 2002 s moudzou-centre	sur 91

Liste des annexes

Annexe 1 – Résultats des mesures SASW et H/V réalisées sur la zone d'étude.

Liste des illustrations

FIGURES

Figure 1 - Plan de situation du secteur d'étude	16
Figure 2 - Le bassin des Comores entre les blocs continentaux africains et malgaches	18
Figure 3 - La génération des laves des Comores (Späth et al., 1996)	18
Figure 4 - Schéma interprétatif de Mayotte dans son contexte géodynamique	19
Figure 5 - Schéma structural de Mayotte (Stieltjes, 1988)	21
<i>Figure 6 - Coupe synthétique représentant les relations entre les différentes formations géologiques</i>	
observées à Mayotte	22
Figure 7 - Extrait de la carte géologique à 1/50 000 de Mayotte	22
Figure 8 - cartographie géologique à 1/10 000 de Mamoudzou	23
Figure 9 - Coupes géologiques interprétatives passant par Mamoudzou	24
Figure 10 - Dispositif SASW utilisé à Mayotte	29
Figure 11 - Dispositif H/V utilisé à Mayotte	30
Figure 12 - Position des points de mesures SASW (en vert) et H/V (en rouge) de la campagne de mai	
2002 sur Mamoudzou	32
Figure 13 - Courbe H/V pour le site de la Préfecture (point 10)	33
Figure 14 - Profil SASW pour le site de la Préfecture, vitesses Vs en rouge, Vp en bleu.	33
Figure 15 - Courbe H/V sur le site de la pointe Mahabo.	34
Figure 16 - Profil de vitesse des ondes P et S, déterminé par la SASW sur le site de la pointe Mahabo	35
Figure 17 - Carte lithologique issue de la classification de Mamoudzou-centre	39
Figure 18 - Coupes lithologiques prévisionnelles des principaux ensembles lithologiques de	
Mamoudzou-centre	39
Figure 19 - Position des points SASW réalisés à Mamoudzou et superposés à la carte lithologique	41
Figure 20 - Profils de vitesse des ondes S aux points 6 et 8 (formation F1) déterminés par la méthode	!
SASW	43
Figure 21 - Profils de vitesse des ondes S aux points 10 et 34 (formation APY2) déterminés par la	
méthode SASW.	44
Figure 22 - Profil de vitesse des ondes S au points 12 (formation F2) déterminé par la méthode SASW	V.45
Figure 23 - Profil de vitesse des ondes S au point 33 (formation RS) déterminés par la méthode SASW	V.45
Figure 24 - Profil de vitesse des ondes S au point 38 (formation AL) déterminé par la méthode SASW	46
Figure 25 - Principe d'élaboration du modèle tridimensionnel	49
Figure 26 - Coupes NO-SE des profondeurs des interfaces entre formations lithologiques	50
Figure 27 - Spectre de réponse élastique retenu (en rouge) pour caractériser le mouvement au rocher	r
pour le microzonage de Mamoudzou-centre	51
Figure 28 - Accélérogrammes au rocher retenus pour calculer la réponse sismique des terrains à	
Mamoudzou	53
Figure 29 - Comparaison entre le spectre au rocher retenu pour le microzonage de Mamoudzou et le	s
spectres des mouvements associés, synthétique et réel	53
\hat{F} igure 30 - Carte de valeurs continues du paramètre $V_{s,30}$	
Figure 31 - Pré-zonage brut défini à partir des valeurs du paramètre V _{s.30}	59
Figure 32 - Spectre de réponse de la zone B (EC8) et périodes de résonance des courbes H/Vmesurée.	s
dans cette zone	60
Figure 33 - Spectre de réponse de la zone C (EC8) et périodes de résonance des courbes H/V mesurée	2 <i>S</i>
dans cette zone	60
Figure 34 - Spectre de réponse de la zone D et E (EC8) et périodes de résonances des courbes H/V	
mesurées sur cette zone	61

Figure 35 - Profils des vitesses Vs obtenus par la méthode SASW, pour le point 6(à gauche) et le poin	nt 8
(à droite)	63
Figure 36 - Spectres de réponse élastiques horizontaux (amortissement 5%) du cratère de Kavani	
comparés aux spectres des règles EC8 zone D et E	64
Figure 37 - Spectres retenus pour les 4 zones du microzonage sismique de Mamoudzou-centre	65
Figure 38 - Carte des effets de site lithologiques, zones EC8	68
Figure 39 - Principe de calcul du coefficient τ pour l'évaluation des effets de site topographiques	69
Figure 40 - Choix des profils pour le calcul du coefficient τ	70
Figure 41 - Carte des effets de site topographiques	72
Figure 42 - Carte de la susceptiblité des dépôts au phénomène de liquéfaction	77
Figure 43 - Carte de l'aléa mouvements de terrain	82

Liste des tableaux

Tableau 1 - Analyse géologique des différents sols de la zone d'étude.	38
Tableau 2 - Classification des terrains de la zone d'étude en fonction de la géologie	38
Tableau 3 - Classification des classes de sol selon les EC-8	42
Tableau 4 - Épaisseurs des types de terrains par formations lithologiques	47
Tableau 5 - Profondeur de la base des types de sols par formations lithologiques	48
Tableau 6 - Valeurs du coefficient de site S défini dans les règles EC-8 (réf EC-8, 2002)	56
Tableau 7 - Affectation d'une valeur de vitesse moyenne pour chaque type de sol	57
Tableau 8 - Colonne de sol définie pour le calcul du mouvement sismique sur la zone de Kavani	62
Tableau 9 - Valeurs caractéristiques des spectres de réponse élastique (T en secondes et R en g)	66
Tableau 10 - Expressions analytiques des spectres de réponse élastique.	66
Tableau 11 – Susceptibilité des dépôts sédimentaires à la liquéfaction en fonction de la nature et de l'	âge
du dépôt (Youds et Perkins, 1978 in AFPS, 1993)	74
Tableau 12 – Susceptibilité des dépôts sédimentaires à la liquéfaction en fonction de leur âge et de la	
position de la nappe phréatique (AFPS, 1993)	74

1. Introduction

L'île de Mayotte est une région de sismicité modérée, mais elle a néanmoins été touchée par deux séismes depuis 10 ans :

- le séisme du 1^{er} décembre 1993 avait une magnitude « moyenne » (Mb = 5,2). Son épicentre était situé à 40 km à l'ouest de Mayotte ; l'intensité épicentrale avait été estimée à VII-VIII MSK (Terrier *et al.*, 2000). Au total, le séisme avait généré 1,7 M€(11 MF) de dégâts sur le territoire de Mayotte (Audru *et al.*, 2002).
- le séisme du 23 septembre 2001. Ce séisme était de « faible » magnitude (Mb = 4,1) et son épicentre était situé à environ 50 km au nord-nord-est de Mayotte. Il a été ressenti de manière fort différente en divers points de Mayotte, mais aucun dégât n'a été constaté.

En 2000, le BRGM a réalisé une étude de l'aléa sismique régional pour Mayotte (Terrier *et al.*, 2000). Cette analyse présente le contexte tectonique de Mayotte et les paramètres des séismes pouvant affecter l'archipel. Des mouvements sismiques de référence sont déduits de cette évaluation régionale, ils sont calculés « au rocher horizontal affleurant », et ne tiennent donc pas compte des conditions locales de site. Le séisme de référence a les caractéristiques suivantes : magnitude de 5,2 à une distance de 10 km. L'intensité épicentrale correspondante est estimée à VII-VIII MSK. Les spectres de réponse élastique correspondant à ce séisme sont calés à une accélération horizontale de 0,16 g.

À la suite de cette étude à caractère régional, la Direction de l'Équipement de Mayotte a souhaité qu'une étude de l'aléa sismique local soit réalisée sur le secteur de Mamoudzou-centre, depuis le carrefour du Baobab, au sud, jusqu'à la colline de la Préfecture, au nord (termes de la convention d'étude du 28 septembre 2000, OS n° 05/SAUH/OSIG). Un projet de Service public a été bâti par le BRGM, cofinancé à parts égales par la dotation de Service public du BRGM et par la Collectivité Départementale de Mayotte. Mamoudzou est en effet le chef-lieu humain et économique de Mayotte, et à ce titre, c'est actuellement une ville où les aménagements sont en pleine expansion (Figure 1).

L'approche adoptée s'appuie principalement sur les recommandations formulées par l'Association Française du Génie Parasismique (AFPS, 1993) pour les études de microzonage. L'étude a consisté à cartographier successivement :

- Les zones homogènes en terme de réponse sismique. Le zonage est adapté au contexte géologique particulier de Mayotte et à la quasi-absence de données géotechniques disponibles. Des mesures SASW et H/V acquises à Mayotte en mai 2002 ont été utilisées pour aider à la classification des sols selon les règles européennes EC-8. Sur une seule zone (la dépression volcanique de Kavani), un calcul spécifique de mouvement sismique a été réalisé. En sortie, un spectre de réponse élastique est associé à chaque colonne de sol représentative d'un secteur de Mamoudzou. Le microzonage est donc de niveau intermédiaire A-B ;
- Les zones susceptibles d'être soumises à des effets topographiques. Cette analyse a été faite selon les règles PS92 ;

- Un zonage de la susceptibilité des sols au phénomène de liquéfaction. Devant le manque de données géotechniques, une approche de niveau A a été utilisée ;
- Les zones susceptibles d'être soumises à l'aléa mouvements de terrain. La cartographie a été réalisée selon une approche naturaliste.



Figure 1 - Plan de situation du secteur d'étude

2. Cadre géographique et géologique

2.1. LE BASSIN DES COMORES

L'archipel de Mayotte est situé dans l'océan Indien, dans le bassin des Comores au sud du bassin fossile de Somalie. Le secteur des Comores est probablement formé de croûte océanique peu ancienne (créée depuis 160 Ma¹) : en effet, les cartes bathymétriques du NERC (1994) situent le plancher des Comores à une profondeur intermédiaire entre la profondeur de la croûte continentale (très ancienne) des marges africaine et malgache (Figure 2), et la profondeur des croûtes océaniques (moins anciennes) des bassins de Somalie et du Mozambique (Desgrolard, 1996 ; Malod *et al.*, 1991).

La croûte océanique du bassin des Comores supporte les quatre îles volcaniques de Grande Comore, Mohéli, Anjouan et Mayotte. L'île volcanique la plus récente est celle de Grande Comore (volcan actif de Karthala culminant à 2 263 m) et la plus ancienne celle de Mayotte. Les laves des quatre îles correspondent à des séries alcalines fortement sous-saturée (Stieltjes, 1988).

L'origine de ces îles est toujours discutée. Selon certains (Emerick et Duncan, 1982), elles seraient la manifestation de surface de la dérive de la plaque africaine au dessus d'un point chaud ; selon d'autres, les Comores seraient la partie émergée d'une dorsale lente (Upton, 1982). Un autre modèle (Nougier et al., 1986) propose que les Comores résultent d'une activité volcanique plus ou moins synchrone suivant des failles d'échelle lithosphériques. Enfin, un modèle plus récent (Späth et al., 1996) reprend l'idée du réservoir de magma dans le manteau : les laves auraient subi des cristallisations fractionnées pendant leur ascension dans des « chevelus » à travers un plancher océanique en mouvement (Figure 3).

Les failles et les volcans des Comores se sont installés il y a environ 8 Ma suivant les traces d'anciennes failles transformantes du bassin de Somalie (-150 à -118 Ma, orientées N170°E) et suivant les directions encore plus anciennes des failles qui ont accompagné le rifting Karroo (-190 Ma et -175 Ma, N140°E) en Afrique (Esson *et al.*, 1970; Bachèlery et Coudray, 1993). Ces alignements sur des axes fossiles sont clairement observables sur le terrain à Mayotte.

De nos jours, l'activité volcanique est concentrée sur le volcan du Karthala à la Grande Comore. L'activité tectonique régionale se traduit par la distension continentale de l'Afrique suivant les failles des rifts Est-africains (Chorowicz, 1992). L'ouverture du rift est-africain se poursuit en mer en utilisant le système de failles de la ride de Davie (Mougenot *et al.*, 1986) ; cette déformation active semble également progresser vers le sud–est, c'est à dire vers les Comores et Madagascar (Figure 4). Il est probable que ce phénomène remette en activité les anciennes failles du bassin des Comores ou même de Madagascar.

La sismicité des Comores et de Mayotte a donc probablement une double origine, volcanique et tectonique.



Figure 2 - Le bassin des Comores entre les blocs continentaux africains et malgaches (Desgrolard, 1996)



Figure 3 - La génération des laves des Comores (Späth et al., 1996)



Extension de direction EW

Figure 4 - Schéma interprétatif de Mayotte dans son contexte géodynamique

2.2. L'ILE DE MAYOTTE

Située à mi-chemin entre la côte du Mozambique et celle de Madagascar, Mayotte est la plus méridionale et la plus ancienne des quatre îles des Comores. Elle est formée d'une île principale, Grande Terre, entourée d'une trentaine d'îlots épars dont le plus important est celui de Petite Terre. Grande Terre mesure environ 40 km du nord au sud et 20 km d'est en ouest, sa superficie est d'environ 370 km². Les terres sont entourées d'un vaste lagon de 1100 km². L'île de Mayotte a une population estimée à 160 265 habitants au 30 juillet 2002 (source INSEE).

Mayotte est une île volcanique qui résulte de l'édification de deux principaux massifs volcaniques entre -8 et -4 Ma puis de leur submersion progressive à partir de -2 Ma (Figure D). L'activité volcanique s'atténue puis se termine il y a 80 000 ans. Ces deux massifs volcaniques étaient probablement alimentés par des « chevelus » issus de réservoirs magmatiques plus profonds (Figure 3) situés à quelques kilomètres de profondeur sous le plancher océanique.

Pour les besoins de notre étude, nous avons effectué une synthèse de l'histoire géologique de Mayotte à partir de trois sources de données : Stieltjes (1988), Thomassin (1999) et Debeuf et Bachèlery (2001) :

- il y a environ 8 millions d'années, deux volcans boucliers basaltiques émergent, formant les parties actuellement au sud et au nord de Mayotte (Figure 5) ;

- entre 5 et 3,5 millions d'années, le volcanisme se poursuit par l'extrusion de phonolites qui forment, entre autres, les dômes de Choungui, de Saziley ou du Benara;
- entre 3,5 et 2 millions d'années, des laves continuent de s'épancher depuis les zones sommitales des appareils volcaniques. Un troisième volcan émerge puis disparaît dans le nord-ouest de Mayotte (îlot de Mtsamboro) ;
- entre 1,8 et 1,4 millions d'années, une nouvelle phase d'émission de coulées de phonolites visqueuses recouvre en partie les coulées de laves plus anciennes (massifs de M'Tsapéré et de Combani)
- la plaque océanique commence à s'enfoncer sous le poids de l'île, marquant probablement le début de l'installation des récifs coralliens (on retrouve des fragments de coraux dans les dépôts ultérieurs).
- il y a 500 000 ans, une phase de volcanisme explosif est à l'origine de dépôts pyroclastiques (cendres, lapilli, blocs) sur de larges surfaces, elle ouvre des cratères d'explosion (*maars*) à Kaouéni et Kavani et de petits cônes de scories à Dzaoudzi ;
- il y a 80 000 ans, les dernières éruptions volcaniques de Mayotte sont également explosives ; leurs témoins sont des cratères surbaissés (Pamandzi) et de petits cônes de scories (Mahabo, etc.).

Des failles normales et des décrochements recoupent l'ensemble de Mayotte, mais aucune structure néotectonique n'y a été observée à ce jour. Les failles observées (N170°, N140° et N040°) sont probablement le résultat :

- du rejeu de failles de la croûte océanique, héritées de l'activité de la ride de Davie, du bassin de Somalie, voire du rifting Karoo (Cf. paragraphe 2.1) ;
- des déformations et de la fracturation propres à la mise en place et à l'évolution des appareils volcaniques.

En mer, une carte bathymétrique sommaire, dressée à partir cartes de navigation du $SHOM^2$ (1974 à 2000), laisse supposer l'existence de pointements volcaniques, de grands glissements sous-marins, ainsi que la trace de failles récentes (escarpements conservés), mais dont rien à ce jour ne permet de dire qu'elles puissent être actives (Audru *et al.*, 2002).

La longue évolution géomorphologique de Mayotte depuis les dernières éruptions volcaniques se traduit par : des reliefs peu élevés culminant à 680 m (à titre comparatif, 2263 m sur l'île de la Grande Comore), des profils d'altération épais d'une dizaine de mètres et par une couronne récifale qui illustre la subsidence générale de l'île. La coupe géologique de la Figure 6 synthétise ces observations.

L'évolution géologique contemporaine se traduit par le comblement des dépressions volcaniques et des cratères d'explosion, l'érosion et l'altération argileuse des séries volcaniques, l'altération karstique des récifs coralliens et l'installation de plages sableuses et de lagunes à mangroves.

² Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.



Figure 5 - Schéma structural de Mayotte (Stieltjes, 1988)



Figure 6 - Coupe synthétique représentant les relations entre les différentes formations géologiques observées à Mayotte

2.3. LE SECTEUR DE MAMOUDZOU-CENTRE

Mamoudzou est la commune la plus importante de Mayotte avec 45 845 habitants en juillet 2002 (source INSEE). En raison du peu de données géologiques détaillées correspondant à l'échelle de cette étude (Figure 7), des levés complémentaires ont été réalisés en septembre 2001 par D. Debeuf et P. Bachèlery, du Laboratoire des Sciences de la Terre de l'Université de La Réunion dans le cadre de ce projet (Figure 8).



Figure 7 - Extrait de la carte géologique à 1/50 000 de Mayotte, centrée sur Mamoudzou (Stieltjes, 1988)

Légende des couleurs : vert = basaltes à néphéline, orange = pyroclastites, ocre = basaltes de fond de vallée, pointillés bleus = scories basaltiques, CJ = alluvions et F = dépôts littoraux.



Figure 8 - cartographie géologique à 1/10 000 de Mamoudzou (Debeuf et Bachèlery, 2001) ; coupes présentées sur la Figure 9



Figure 9 - Coupes géologiques interprétatives passant par Mamoudzou, d'après la cartographie géologique de Debeuf et Bachèlery (2001) ; localisation des coupes sur la Figure 8

La synthèse des travaux anciens et récents suggère que la géologie de Mamoudzou correspond à une superposition ou à des passages latéraux de formations volcaniques. Ce sont des coulées de lave et des pyroclastites, dont certaines sont massives et saines, alors que d'autres sont meubles et altérées. S'y superposent des formations superficielles récentes ou actuelles.

Par ordre chronologique, on trouve les formations suivantes dans ce secteur de Mamoudzou :

- des basaltes peu ou pas altérés correspondant à des coulées de laves anciennes : par exemple, les basaltes que l'on observe sur l'estran du port de plaisance ou du Baobab ou encore ceux de la Convalescence ;
- des argiles rouges correspondant à l'altération climatique et hydrothermale intense de ces coulées de laves anciennes; par exemple, le centre-ville de Mamoudzou;
- des retombées pyroclastiques (cendres, lapilli et blocs) consolidées, issues des cratères explosifs de Kavani et Kaouéni : par exemple, le quartier des 100 villas ;
- des dépôts pyroclastiques altérés plus friables que les précédents ; par exemple, le sommet du quartier de la Convalescence ;
- des coulées de laves tardives correspondant à la fin de l'activité des cratères de Kavani et Kaouéni : par exemple, la montagne de Kavani.
- des projections scoriacées et des coulées de basalte correspondant aux dernières phases éruptives : par exemple, la pointe Mahabo ;
- des sables de plage, des argiles alluviales et colluviales de fond de vallée et des vases de mangroves : il s'agit par exemple de la dépression de Kavani ou du carrefour du Baobab ;
- des formations artificielles de remblai : le remblai de la déviation de Mtsapéré (en cours d'aménagement) ou de la zone de RHI de Mahabo.

Ces coupes soulignent la forte hétérogénéité verticale et latérale des formations géologiques du sous-sol de Mamoudzou. On retrouve en particulier, comme de manière générale dans l'île, la superposition de laves massives et d'altérites (succession de phases d'activité volcanique et de périodes d'altération). Cette hétérogénéité lithologique est renforcée par le fait que certaines coulées de lave ont emprunté des paléo-vallées, ce qui aboutit à une forte imbrication des formations géologiques dans l'espace. Le fond du cratère (*maar*) de Kavani est probablement occupé par les pyroclastites ; des colluvions de versants et des alluvions ont ensuite comblé cette dépression. Du point de vue de la transmission des ondes sismiques, ce dispositif implique de forts contrastes de vitesse, cette superposition pouvant être répétée plusieurs fois à Mamoudzou.

Microzonage sismique de Mamoudzou-centre

3. Données géotechniques disponibles

La BSS vient d'être créée et commence à être renseignée à Mayotte (Mouron, 2001). Il n'y a pas de coupe disponibles dans le secteur d'étude. Le BRGM dispose seulement de trois coupes de forage (Lachassagne *et al.*, 2000) situés à environ 2 km au nord de la zone d'étude (indices nationaux 1230-7X-0019, 0020 et 0021). Ces logs suggèrent que le cratère est profond sur les bordures (60 m) et qu'il peut atteindre 100 m au centre. Le remplissage est formé de dépôts sableux (situés plutôt vers la base et correspondant à des pyroclastites) puis d'argiles et de limons (plutôt vers le sommet). Dans l'axe du cours d'eau actuel, on retrouve des galets et des graviers correspondant à des alluvions anciennes.

Le bureau d'étude SEGC a bien voulu nous fournir les données géotechniques publiques dont il disposait sur ce secteur (SEGC, 2001 et 2002). Dans la dépression de Kavani, des sondages à la tarière ont rencontré 0,2 à 0,5 m de remblais puis 0,7 à 1,7 m de limons argileux peu sableux devenant plus argileux en profondeur (alluvions). Un sondage de sismique réfraction indique 2,6 m de matériaux meubles à 350 m/s puis des matériaux à 600m/s jusqu'à 6 m de profondeur ; un autre sondage réalisé à environ 300 m indique également 2 m de formations lentes à 350 m/s, puis une formation rigide à 1475 m/s.

L'analyse de la lithostratigraphie de ces forages a permis d'estimer, par analogie, la géométrie et la nature du remplissage du cratère de Kavani (situé lui dans la zone d'étude, mais pour lequel on ne dispose pas de données). Cette analogie doit être maniée avec précaution, compte-tenu notamment de la taille plus réduite du cratère de Kavani et de sa connexion moins directe avec le lagon.

Microzonage sismique de Mamoudzou-centre

4. Prospections SASW et H/V mises en œuvre à Mamoudzou

En complément de l'analyse géologique et géotechnique, et pour palier le déficit de données relatives au sous-sol, il est apparu nécessaire de compléter les quelques données existantes par des mesures géophysiques. Nous avons donc mis en œuvre simultanément les méthodes SASW (Spectral Analysis of Surface Waves / Analyse Spectrale des Ondes de Surface) et H/V (rapport spectral entre les composantes horizontale et verticale du bruit de fond sismique) décrites ci-après. Ces deux méthodes permettent d'obtenir des renseignements supplémentaires concernant les épaisseurs et la vitesse de propagation des ondes de cisaillement des différentes formations géologiques.

4.1. PRESENTATION DES METHODES

4.1.1. La méthode SASW

Cette méthode est basée sur la dispersion des ondes de surface pour la détermination des vitesses des ondes de cisaillement Vs dans les premières dizaines de mètres du sous sol (Bitri *et al.*, 1997). Elle permet d'obtenir un profil de vitesse, en plusieurs points, pour un coût largement inférieur aux méthodes destructives habituellement utilisées en géotechnique (*cross-hole*). La vitesse des ondes de cisaillement Vs intervient dans l'évaluation des modifications du signal sismique à la surface par rapport au mouvement au rocher (effets de site). C'est donc un paramètre déterminant dans une étude d'aléa sismique local ou de microzonage sismique.

Le matériel nécessaire pour effectuer des mesures sismiques des ondes de surface est composé d'une centrale d'acquisition sismique, de géophones (Figure 10) et d'une source impulsionnelle (ici une chute de marteau).



Figure 10 - Dispositif SASW utilisé à Mayotte (à gauche : « flûte » de géophones, à droite : station d'acquisition)

Les ondes de surface se propagent parallèlement à la surface de la terre. Dans le cas d'un milieu dont les propriétés élastiques varient avec la profondeur, la vitesse des ondes de surface varie avec la longueur d'onde, et donc avec la fréquence. Cet effet est appelé dispersion. Suivant la fréquence considérée, les ondes de surface contiennent de l'information sur les milieux traversés entre la surface et la profondeur maximale de pénétration des différents modes. En analysant la dispersion de ces ondes, il est donc possible d'obtenir des informations sur les valeurs des paramètres physiques à différentes profondeurs. Le maximum d'énergie dans le diagramme de dispersion donne les courbes de dispersion. Ces courbes, ainsi que les barres d'erreurs associées, sont ensuite inversées à partir d'un modèle de vitesse *a priori*, dans le but de retrouver le profil vertical de vitesse des ondes S.

4.1.2. La méthode H/V bruit de fond

De nombreuses techniques théoriques, numériques ou instrumentales ont été développées pour estimer les effets de site lithologiques (Sabourault, 1999). Les techniques expérimentales font généralement appel à un site de référence, c'est-à-dire un site rocheux n'amplifiant pas le mouvement sismique. Ce site rocheux n'est pas toujours présent sur les zones d'études, ce qui peut engendrer des erreurs dans les estimations des effets de site. C'est pourquoi des techniques plus récentes, ne faisant pas intervenir de site de référence, ont été mises au point. L'une de ces techniques consiste, à partir de l'enregistrement du bruit de fond ambiant, à calculer le rapport spectral entre les composantes horizontales et la composante verticale : c'est la méthode appelée couramment H/V (Nogoshi, 1971, Nakamura, 1989 et 1996). Le dispositif expérimental est constitué d'un sismomètre trois composantes et d'une station d'acquisition (Figure 11).



Figure 11 - Dispositif H/V utilisé à Mayotte (à gauche : la station d'acquisition et à droite : le sismomètre tridimensionnel 5 secondes)

Les principes physiques sous-tendus par cette méthode ne sont actuellement pas tous bien cernés. Cependant, de nombreuses expériences ont comparé cette méthode avec des méthodes classiques et ont montré sa capacité à évaluer la fréquence propre du site puis, en conjonction avec d'autres éléments, les effets de site proprement dits. L'explication la plus communément admise est la suivante : soit un modèle très simple constitué d'une couche meuble (souvent sédimentaire) surmontant un demi-espace homogène. Le bruit de fond est engendré par des sources proches comme le trafic urbain et donc composé d'ondes de surface. Seules les composantes horizontales sont amplifiées par les réflexions sur les interfaces des couches sous-jacentes. La composante verticale du bruit de fond contient, elle, la signature des sources de bruit. On suppose également que la base de la couche sédimentaire n'est pas affectée par les ondes de surface. Pour obtenir une pseudo-fonction de transfert à l'aide du bruit de fond, en s'affranchissant de l'effet de source, on divise donc le spectre d'une composante horizontale par le spectre de la composante verticale (d'où l'appellation H/V). Ce rapport donne avec une bonne précision la fréquence de résonance fondamentale du site (ou fréquence propre), mais également une amplification spectrale relative qui dépend notamment du mode de traitement du signal. Les différentes amplifications relatives peuvent être comparées entre elles à condition d'avoir été établies avec les mêmes traitements.

En définitive, la réalisation d'une campagne de mesures ponctuelles H/V permet, en première approche, de déterminer en chaque point de mesure la fréquence propre du sol. Lorsque la géométrie du site peut être assimilée à un milieu mono-dimensionnel, On peut relier l'épaisseur d'une couche sédimentaire meuble (ayant un fort contraste d'impédance avec le substratum rocheux) à sa fréquence de résonance fondamentale f_0 par l'expression :

 $H = \frac{V_s}{4f_0}$

avec H : épaisseur moyenne de la couche meuble,

 V_s : vitesse moyenne de propagation des ondes S dans la couche meuble,

 f_0 : fréquence de résonance fondamentale de la couche meuble.

La connaissance de deux paramètres permet donc d'estimer le troisième : V_s et f_0 connues donnent H par exemple (Sabourault et Bitri, 2001).

4.1.3. Exemples de mesures

Pendant le mois de mai 2002, une campagne de mesures SASW et H/V a été réalisée à Mayotte.

Nous avons représenté sur la Figure 12 ci-après l'emplacement des 7 profils SASW et des 15 points de mesures H/V.



Figure 12 - Position des points de mesures SASW (en vert) et H/V (en rouge) de la campagne de mai 2002 sur Mamoudzou

À titre d'exemple, nous présentons sur les figures 13 et 14 les résultats obtenus sur le site de la Préfecture (point 10) et sur les figures 15 et 16 les résultats obtenus à la pointe Mahabo (point 33). La totalité des résultats sur Mamoudzou-centre est présentée en annexe.

Aide à la lecture des courbes

Courbes H/V : en abscisse est reportée la fréquence et en ordonnée l'amplitude du rapport spectral H/V. Lorsque le site étudié est soumis à un effet de site, la courbe H/V présente un pic plus ou moins net à la fréquence de résonance du sol.

Courbes SASW : l'axe des abscisses indique la valeur de la vitesse de propagation des ondes S (en rouge) et P (en bleu), alors que l'axe des ordonnées indique la profondeur associée.

Point 10 : site de la Préfecture

Le profil SASW indique des vitesses Vs faibles (autour de 230 m/s) en surface, puis en augmentation progressive avec la profondeur jusqu'à un milieu assez rapide au-delà de 35 m (vers Vs = 500 m/s). Le rapport H/V indique une fréquence de résonance entre 2.5 Hz et 3 Hz. L'amplitude du pic associé témoigne d'un effet de site (lithologique et/ou topographique).



Figure 13 - Courbe H/V pour le site de la Préfecture (point 10)



Figure 14 - Profil SASW pour le site de la Préfecture, vitesses Vs en rouge, Vp en bleu.

Les mesures montrent ici les limites des deux méthodes si les données géotechniques sont insuffisantes. En effet, la courbe SASW ne montre pas de contraste net de vitesse qui permettrait d'individualiser les formations géologiques. La fréquence de résonance très nette montrée par H/V pourrait alors s'interpréter de 3 façons différentes :

- soit la courbe H/V « voit » l'interface vers 18 m. Mais dans ce cas, la formule fo = V_s / 4H donne une fréquence de résonance autour de 4 Hz, sensiblement différente de la fréquence de 3 Hz donnée par la méthode H/V ;

Rapport BRGM/RP-51839-FR, 2002 MAYOTTE 05

- soit la courbe H/V « voit » une interface plus profonde que la profondeur d'investigation de SASW mais dans ce cas, il y a désaccord entre les vitesses déterminées par SASW et la profondeur de cette interface, car il faudrait des vitesses plus fortes sur une couche plus profonde pour obtenir la fréquence de résonance de 3 Hz ;
- soit H/V voit un effet topographique qui doit être important à la Préfecture.

Point 33 : pointe Mahabo.

La situation est ici différente. Les mesures ont été réalisées sur un secteur plat de la pointe Mahabo formé de projections scoriacées, de nature proche du rocher. Ces formations correspondent à une épaisseur importante de dépôts de caractéristiques médiocres.

Ceci est confirmé à la fois par la mesure H/V qui présente un pic à 4 Hz et par la mesure SASW qui montre une interface nette à 15 m. La vitesse de propagation moyenne des ondes de cisaillement dans les 15 premiers mètres est d'environ 240 m/s, ce qui correspond bien aux 4 Hz déterminés par la mesure H/V. Les deux mesures sont donc cohérentes



Figure 15 - Courbe H/V sur le site de la pointe Mahabo.



Figure 16 - Profil de vitesse des ondes P et S, déterminé par la SASW sur le site de la pointe Mahabo

Pour l'ensemble des mesures, il apparaît que les deux méthodes sont complémentaires mais, pour être utilisées dans une analyse plus complète et très précise, elles nécessitent de pouvoir être corrélées à des données géotechniques plus fournies.

La méthode SASW permet d'obtenir des vitesses de propagation des ondes dans les formations géologiques superficielles. Dans certains cas, elle permet également de déterminer des interfaces entre des formations de caractéristiques géotechniques différentes. Quant à la méthode H/V, outre la fréquence de résonance du sol, elle permet de cartographier et de regrouper des sols de réponse sismique homogène.

Microzonage sismique de Mamoudzou-centre
5. Modèle géotechnique 3d

Le microzonage sismique nécessite une représentation cohérente du sous-sol de la zone d'étude, en particulier afin d'évaluer les effets de site en tout point de la zone. Cette représentation tridimensionnelle constitue le modèle géotechnique.

La méthode choisie pour élaborer le modèle de Mamoudzou est la suivante :

- Analyse géologique :

Les différentes formations géologiques repérées par la cartographie sont analysées et classées (regroupées ou subdivisées) en fonction de leur lithologie (roches de nature ou de caractéristiques physiques similaires. Une carte lithologique résulte de cette classification. Chaque secteur est caractérisé par une colonne lithostratigraphique simplifiée, décrivant les formations géologiques superficielles et leur épaisseurs au droit de la zone.

- Apport des prospections géophysiques :

Les regroupements lithologiques sont affinés en fonction des résultats de la prospection géophysique (SASW principalement). De nouvelles colonnes sont proposées qui ne sont plus exprimées sous forme qualitative. Elles décrivent des classes de vitesses d'ondes S (Vs) et leurs épaisseurs au droit de nouvelles zones, dérivées de la carte lithologique. Les Vs sont directement fonction des caractéristiques mécaniques des terrains et peuvent être considérées comme un paramètre géotechnique.

- Élaboration du modèle tridimensionnel :

Le fait de caractériser par une série de valeurs d'un paramètre géotechnique, homogène et identique quelle que soit la nature du sous sol, les colonnes associées au zonage géotechnique, permet d'interpoler ces valeurs d'un secteur à un autre. Cette interpolation permet de produire un modèle numérique tridimensionnel duquel on peut dériver automatiquement des coupes et surtout connaître en tout point de la zone d'étude les caractéristiques de la colonne de sol situé sous ce point. Bien sur, la précision de ce modèle est fonction de toutes les incertitudes qui se combinent au cours de son élaboration. Il n'est que le reflet des hypothèses choisies pour exprimer au mieux la connaissance imparfaite du sous-sol de Mamoudzou.

5.1. ANALYSE GEOLOGIQUE

Index	Formation géologique	Code lithologique
1	Remblais	Х
2	Dépôts de mangrove	М
3	Alluvions / colluvions	F1/F2
4	Laves basaltiques	RB/RS
5	Pyroclastites	APY/APY2
6	Altérites (basaltes très altérés)	AL
7	Basaltes massifs, sains ou peu altérés	RB

Elle résulte de l'analyse de la carte à 1/10000 (Figure 8) et d'observations de terrain.

Tableau 1 - Analyse géologique des différents sols de la zone d'étude.

Dans les alluvions/colluvions, on a distingué le remplissage du cratère de Kavani (F1) des alluvions moins épaisses de son exutoire (F2).

Dans les laves basaltiques, on a distingué les projections scoriacées (RS) de la pointe Mahabo et les laves de basaltes massifs (RB).

Dans les pyroclastites issues de cratères d'explosion de Kaouéni et Kavani et discordantes sur les basaltes sous-jacents, on a distingué des dépôts épais (APY) et des dépôts moins épais (APY2).

Au final, on aboutit à la nouvelle classification des formations géologiques superficielles du Tableau 2.

Index	codes lithologique	Formation géologique				
1	Х	Remblais				
2	М	Dépôts de mangrove				
3	F1	Alluvions / colluvions du cratère de Kavani				
4	F2	Alluvions de l'exutoire de Kavani				
5	AL	Altérites (basaltes très altérés)				
6	APY	Pyroclastites épaisses				
7	APY2	Pyroclastites peu épaisses				
8	RB	Basaltes massifs, sains ou peu altérés/Laves				
		tardives pro parte				
9	RS	Laves et projections scoriacées				

Tableau 2 - Classification des terrains de la zone d'étude en fonction de la géologie

Ces distinctions ont permis d'élaborer une carte lithologique (Figure 17).



Figure 17 - Carte lithologique issue de la classification de Mamoudzou-centre



Figure 18 - Coupes lithologiques prévisionnelles des principaux ensembles lithologiques de Mamoudzou-centre

Pour chaque ensemble lithologique en surface, on a établi une coupe prévisionnelle indiquant *a priori* et à l'aplomb du secteur considéré les formations géologiques profondeur (Figure 18).

Ces coupes sont considérées comme indicatives de la nature et de la structure du soussol de Mamoudzou. Elles s'arrêtent à environ 30 mètres, profondeur au-delà de laquelle les descriptions seraient trop sujettes à caution.

- X : remblais d'une épaisseur de 2 à 7 m. Ce remblais est mis en place le plus souvent sur les dépôts de mangrove (M).
- M : dépôts de mangrove. Sables, vases, argiles et silts.
- F1: dépression de Kavani. Remplissage colluvionnaire / alluvionnaire épais, pouvant être supérieur à 30 m d'épaisseur au centre de la structure : galets, sables, argiles et sables argileux. Ce remplissage devrait reposer sur des dépôts pyroclastiques.
- F2 : alluvions. Galets, sables et argiles sur quelques mètres d'épaisseur. Repose sur la formation AL et passe latéralement à la formation M .
- AL : Altérites. Argiles d'altération du basalte d'une dizaine de mètres d'épaisseur. Surmontent une dizaine de mètres de basalte moins altéré reposant sur du basalte sain ;
- APY : Pyroclastites altérées sur une dizaine de mètres d'épaisseur reposant sur des pyroclastites moins altérées d'une douzaine de mètres d'épaisseur. L'épaisseur totale des pyroclastites est d'environ 20 à 30 m. Elles reposent soit sur des altérites (AL), soit sur des basaltes massifs (Rb).
- APY2 : formation similaire à APY, mais moins épaisse.
- RB : formation basaltique altérée sur moins de 10 m surmontant un basalte sain ;
- RS : formation basaltique scoriacée, peu compactée, d'épaisseur largement supérieure à 30 m.

5.2. APPORT DES PROSPECTIONS GEOPHYSIQUES

5.2.1. Profils SASW réalisés dans la zone d'étude

Sept profils SASW ont été réalisés dans la zone d'étude. Ils sont localisés sur la carte lithologique présentée en Figure 19.



Figure 19 - Position des points SASW réalisés à Mamoudzou et superposés à la carte lithologique

L'analyse de ces profils se base sur la classification des terrains adoptée pour la détermination des effets de site par les EuroCode 8 (EC8) donnée dans le Tableau 3.

Ce tableau décrit en fait des colonnes stratigraphiques types, et non des types de sols. Par soucis de commodité, et sachant que la détermination des effets de site se fera suivant la méthode EC8, nous classons les types de terrains en utilisant les classes de vitesses d'onde de cisaillement (Vs) des EC-8.

A savoir :

Type de terrains	Vs (m/s)
Sa	>800
Sb	360-800
Sc	180-360
Sd	<180

	-	Paramètres			
Classe de sol	Description du profil stratigraphique	V _{s,30} (m/s)	N _{SPT} (bl/30cm)	c_u (kPa)	
А	Rocher ou tout autre formation proche du rocher, incluant au plus 5 m de formation plus molle en surface.	> 800	_	_	
В	Dépôts de sable très dense, de gravier ou d'argile très dure, au moins sur plusieurs dizaines de mètres, caractérisés par une augmentation graduelle des propriétés mécaniques avec la profondeur.	360 - 800	> 50	> 250	
С	Dépôts profonds de sable dense ou moyennement dense, de gravier ou d'argiles dures avec des profondeurs de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres.	180 - 360	15 - 50	70 - 250	
D	Dépôts de sols de cohésion faible à moyenne (avec ou sans couches de sols mous cohérents) ou dépôts prédominants de sol cohérent mou à ferme.	< 180	< 15	< 70	
E	Profil de sol consistant en une couche de surface d'alluvions avec une valeur de $V_{s,30}$ des classes C ou D et des épaisseurs variant entre 5 et 20 m, reposant sur du matériau plus ferme de $V_{s,30} > 800 \text{ m/s}$				
S ₁	Dépôts contenant (ou consistés de) des couches d'au moins 10 m d'épaisseur, d'argiles / limons avec une forte plasticité (PI > 40) et une forte teneur en eau.	< 100 (indicative)	-	10 - 20	
S_2	Dépôts de sols liquéfiables, d'argiles molles ou tout profil de sol non compris dans les classes $A - E$ ou S_1				

Tableau 3 - Classification des classes de sol selon les EC-8

- $V_{s,30}$ est la vitesse moyenne des ondes de surface, elle est calculée selon l'expression suivante:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$
(3.1)

où h_i et V_i représentent l'épaisseur et la vitesse des ondes S (à petite déformation) de la formation ou couche *i*, sur un total de N, existant dans les 30 premiers mètres. Le site est classé suivant la valeur de $V_{s,30}$ si celle ci est disponible, sinon, la valeur de N_{SPT} sera utilisée.

- N_{SPT} est le nombre de coups au pénétromètre statique,
- C_u est la cohésion non drainée.

Profils pour les points de mesure 6 et 8 (Kavani, formation F1)

La lithologie de ces profils peut être interprétée comme suit :

- une vingtaine de mètres de sol de formations géologiques de mauvaise qualité mécanique, de type d, pouvant présenter des niveaux particulièrement faibles ;
- une épaisseur non définie de terrains de meilleure qualité (type Sc).

Il n'est pas possible de préciser si les niveaux détectés à partir de 20 m de profondeur correspondent toujours au remplissage alluvial/colluvial ou bien s'ils correspondent à des altérites (de pyroclastites ou de laves) au fond du cratère.



Figure 20 - Profils de vitesse des ondes S aux points 6 et 8 (formation F1) déterminés par la méthode SASW

Profils pour les points de mesure 10 et 34 (Préfecture et Cent Villas, formation APY2)

Ces deux profils sont analysés en parallèle, car ils ont été acquis tous les deux sur des formations superficielles en apparence similaires. Ils sont pourtant très différents.

Le profil 10 montre une augmentation régulière des vitesses d'ondes jusqu'à des profondeurs importantes (40 m.) sans qu'un substatum rocheux soit atteint. Les 18 premiers mètres sont constitués de terrains de type Sc, qui passent ensuite à des terrains de type Sb. Si ce profil semble indiquer la présence de matériaux de moins en moins altérés avec la profondeur, il n'est pas cohérent avec le fait qu'à cet endroit, une faible épaisseur de pyroclastites devrait surmonter des basaltes sains, ce qui devrait se traduire par un contraste plus net entre les deux formations et par des valeurs de vitesses plus élevées passée la première dizaine de mètres. Le fait que le profil SASW n° 10 ait été effectué à proximité d'une rupture de pente explique peut être qu'il soit relativement peu fiable.

Le profil 34 montre :

- 5 à 6 m de formations à 400 m/s (type Sb), correspondant aux pyroclastites altérées ;
- 16 à 17 m de terrains dont les vitesses varient de 600 à 750 m/s (type Sb), correspondant aux pyroclastites saines. Ces vitesses sont cohérentes avec les mesures obtenues sur les pyroclastites saines de la carrière de Hamama, au nord de Mamoudzou ;



- Un substratum rocheux à 950 m/s (type Sa), très certainement de nature basaltique.

Figure 21 - Profils de vitesse des ondes S aux points 10 et 34 (formation APY2) déterminés par la méthode SASW

Profils pour le point de mesure 12 (Baobab, formation F2)

Ce profil, implanté sur les alluvions et la mangrove du carrefour du Baobab montre :

- jusqu'à environ 5 m de profondeur, des vitesses très faibles inférieures à 300 m/s (sol de type Sd);
- jusqu'à 16 m, des vitesses variant de 300 à 360 m/s (terrain de type Sc);
- au delà, des terrains de type Sb.

Les 16 premiers mètres peuvent être interprétés comme des alluvions, qui reposent soit sur des alluvions plus compactes, soit sur des basaltes altérés.



Figure 22 - Profil de vitesse des ondes S au points 12 (formation F2) déterminé par la méthode SASW

Profils pour le point de mesure 33 (pointe Mahabo, formation Rs) :

Ce profil montre :

- 15 m de formations de type Sc (200-250 m/s), qui passent nettement à
- des sols de type Sb (450 600 m/s).

Les 15 premiers mètres correspondent soit à des colluvions accumulées dans cette zone relativement plane, soit à des projections scoriacées altérées. La première hypothèse paraît plus vraisemblable, en raison de la transition nette entre les deux formations du profil. Les projections scoriacées altérées présenteraient plutôt des vitesses comprises entre 450 et 600 m/s, et les projections saines des vitesses supérieures ou égales à 600 m/s.



Figure 23 - Profil de vitesse des ondes S au point 33 (formation RS) déterminés par la méthode SASW

Profils pour le point de mesure 38 (Mamoudzou centre, formation AL) :

Ce profil montre une augmentation régulière des vitesses, (formation de type Sc jusqu'à 16 mètres, de type Sb ensuite).

Le substratum rocheux basaltique (vitesse de l'ordre de 950 m/s) n'est pas atteint, malgré une profondeur d'investigation importante (35 m.).

Ce profil est cohérent avec le comportement que l'on attend d'une altérite, à savoir une dégradation progressive des matériaux avec la profondeur.



Figure 24 - Profil de vitesse des ondes S au point 38 (formation AL) déterminé par la méthode SASW

5.2.2. Proposition de profils synthétiques par formations lithologiques

L'établissement de profils synthétiques a pour but d'établir un modèle tridimensionnel. Ce sont des coupes définies par classes de vitesse Vs, ces coupes correspondent à la synthèse des données précédentes et des données de prospection générale sur Mayotte (*in* Audru *et al.*, 2002). Ces coupes se limitent aux 30 premiers mètres de profondeur, d'une part parce qu'il est délicat d'extrapoler au-delà, d'autre part parce que la méthode de détermination des effets de sites (EC8) repose sur la connaissance de ces 30 premiers mètres.

La constitution, pour certaines formations, de coupes d'épaisseur minimales, moyennes et maximales, s'explique par les variations latérales de faciès lithologique (Cf. paragraphe 2.3). Il est aussi précisé comment les valeurs des Vs ont été obtenues lorsqu'elles ne découlent pas des mesures. Le parti a été pris de prendre systématiquement au moins 2 m de terre végétale au sommet du profil.

Coupes	Туре	Χ	Μ	F1	F2	AL	APY	APY2	Rb	Rs
	de sol	(1)	(1)	(2)	(3)		(4)	(4)	(5)	
Moyenne	Sd	10	10	20	5	2	2	2	2	2
	Sc	15	15	10	10	13	2	2	3	13
	Sb	5	5	-	15	10	26	21	10	15
	Sa	-	-	-	-	5	-	5	15	-
Minimale	Sd	0		15	5					
	Sc	15		15	5					
	Sb	15		-	20					
	Sa	-		-	-					
Maximale	Sd	15		25						
	Sc	15		5						
	Sb	-		-						
	Sa	-		-						

Tableau 4 - Épaisseurs des types de terrains par formations lithologiques

Commentaires du tableau

(1) Pour les formations X et M, on ne dispose pas de mesures sur la zone d'étude. Par contre, le point 40 de la prospection générale de Mayotte (*in* Audru *et al.*, 2002) a été réalisé sur le remblai en cours de mise en place sur la mangrove de Mtsapéré. La mauvaise réponse des terrains n'a pas permis de prospecter la mangrove au-delà de 8m de profondeur. Il apparaît que les vitesses du remblai et de la mangrove sont comparables, elle sont faibles (environ 200m/s).

Pour la formation X, le Point 12 renseigne sur la position du substratum altéré, qui se trouve à 15 m de profondeur. L'épaisseur du couple remblais-dépôts de mangrove varie donc dans ce secteur *a priori* entre 0 et environ 15 m. La formation M présente une succession similaire, mais l'épaisseur de sol d est *a priori* supérieure.

(2) Les variations d'épaisseur sont fonction de la position de la coupe par rapport au centre du cratère de Kavani : épaisseur maximale au centre, minimale en bordure.

(3) La coupe minimale correspond au pertuis débouchant sur le carrefour du baobab, la coupe moyenne au reste de la formation F2.

(4) Il est proposé de prendre sur le site de la Préfecture, la coupe de la formation AL à la place de la coupe de la formation APY2.

(5) Cette coupe ne s'appuie pas sur des mesures directes à Mamoudzou, mais résulte d'une interprétation de mesures réalisées ailleurs à Mayotte, ainsi que d'une mise en cohérence avec les observations géologiques de terrain (*in* Audru *et al.*, 2002).

Le Tableau 5 reprend le tableau précédent, en indiquant la profondeur de la base de chaque type de terrain.

Coupes	Type de	Х	Μ	F1	F2	AL	APY	APY2	Rb	Rs
	sol									
Moyen	Sd	10	10	20	5	2	2	2	2	2
	Sc	25	25	>30	15	15	4	4	5	15
	Sb	>30	>30	-	>30	25	>30	25	15	>30
	Sa	-	-	-	-	>30	-	>30	>30	-
Mini	Sd	2		15	5					
	Sc	15		>30	10					
	Sb	>30		-	>30					
	Sa	-		-	-					
Maxi	Sd	15		25						
	Sc	>30		>30						
	Sb	-		-						
	Sa	-		-						

Tableau 5 - Profondeur de la base des types de sols par formations lithologiques

5.3. ÉLABORATION DU MODELE GEOTECHNIQUE TRIDIMENSIONNEL

La modélisation a abouti à une représentation appuyée sur 4 types de terrains ; c'est pourquoi nous avons choisi d'élaborer un modèle tridimensionnel surfacique, qui va consister en quatre représentations cartographiques :

- le modèle numérique de terrain (MNT), qui représente la géométrie de la surface topographique ;
- trois cartes maillées, représentant respectivement les altitudes de la base des formations de type Sd, Sc et Sb.

Ces trois cartes sont strictement superposables au MNT, la taille de maille étant de 25m. Elles ont été élaborées suivant cette méthode 3 :

- saisie d'un nombre important de sondages fictifs sur l'ensemble de la zone d'étude ;

association automatique des valeurs (profondeur des interfaces entre types de sols) du

- Tableau 5 à chacun de ces sondages, en fonction de la formation lithologique sur laquelle ils sont implantés. On a arbitrairement fixé à 30 m les valeurs supérieures de cette profondeur ;
- correction des valeurs en limite de formations, pour tenir compte des variations d'épaisseur au sein d'une même formation (en particulier au niveau du cratère de Kavani, des alluvions de l'exutoire, des remblais) ;
- interpolation des profondeurs (avec une maille de 25 m) pour la base des sols de type Sd, Sc et Sb ;
- calcul des côtes des trois interfaces en retranchant la profondeur de l'altitude (MNT).

La Figure 25 schématise les étapes successives de cette méthode.

Le modèle géotechnique ainsi constitué permet :

³ Le logiciel utilisé est MapInfo pour la gestion des cartes vectorielles, et son extension Vertical Mapper pour l'interpolation et la gestion des cartes *raster*.

- de tracer automatiquement des coupes (Figure 26) passant par n'importe quel point de la zone d'étude, afin notamment de vérifier la cohérence de la représentation du sous-sol, et de pouvoir être exploité pour l'évaluation de l'aléa local (effets de sites, liquéfaction, mouvements de terrain),
- de pouvoir déterminer automatiquement, en tout point du territoire étudié, une colonne de sol qui sera interprétée en terme d'effet de site lithologique.



Figure 25 - Principe d'élaboration du modèle tridimensionnel



Figure 26 - Coupes NO-SE des profondeurs des interfaces entre formations lithologiques, déterminées grâce au modèle géotechnique

6. Définition du mouvement sismique au rocher

L'étude d'évaluation de l'aléa sismique régional de Mayotte (Terrier *et al.*, 2000), propose un Séisme Maximum Historiquement Vraisemblable (SMHV). Il s'agit du séisme du 1^{er} décembre 1993, d'intensité épicentrale estimée à VII-VIII MSK, de magnitude 5,2, ramené au droit de tout point de l'île à une profondeur de 10 kilomètres.

Le mouvement sismique de référence produit par ce SMHV est caractérisé par une accélération horizontale maximale au rocher affleurant de 0,16 g.

À partir de ce résultat et des estimations complémentaires faites par Bour (2002), nous proposons une valeur de l'accélération de calage de 0,15 g pour le mouvement sismique de référence à prendre en compte pour l'étude de microzonage sismique de Mamoudzou.

6.1. SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE AU ROCHER

L'étude de Terrier *et al.* (2000) a permis de proposer un spectre de réponse du mouvement sismique au rocher horizontal affleurant. Nous avons comparé ce spectre obtenu avec le spectre S0 des règles PS-92 en vigueur en France. Pour tenir compte du contenu fréquentiel plus élevé en basses périodes sur le spectre du SMHV, nous proposons de modifier le spectre S₀ en élargissant son plateau vers les basses périodes : la limite inférieure du plateau passe ainsi de 0,15 s à 0,10 s. Ce spectre S₀ modifié est le spectre retenu pour définir le mouvement sismique de référence pour le microzonage sismique de Mamoudzou. Ce spectre est compatible avec le spectre de la zone A des EC-8.



Figure 27 - Spectre de réponse élastique retenu (en rouge) pour caractériser le mouvement au rocher pour le microzonage de Mamoudzou-centre

6.2. RECHERCHE D'ACCELEROGRAMMES SYNTHETIQUES ET REELS

Sur la base du spectre de réponse de la Figure 27 calé à 0,15 g, deux accélérogrammes sont proposés pour être ultérieurement utilisés pour les calculs de réponse sismique des terrains à Mamoudzou.

Le premier est une forme d'onde synthétique générée par le programme *Simqke* (Gasparini et Vanmarcke, 1976). Par itérations, ce code génère des histoires temporelles en accélération, artificielles et statistiquement indépendantes, dont les spectres de réponse sont en concordance avec les spectres simplifiés donnés en entrée. Les accélérogrammes synthétiques sont construits en superposant des composantes sinusoïdales à phases pseudo-aléatoires et en multipliant la trace stationnaire résultante par une fonction définie par l'utilisateur. Cette fonction représente la variation de l'intensité du mouvement du sol avec le temps. Une enveloppe exponentielle a été choisie dans nos simulations. Cette enveloppe permet d'obtenir une trace dont la montée n'est pas trop brutale et dans laquelle l'accélération maximale est observée cinq secondes environ après le premier mouvement. La Figure 28 présente l'accélérogramme synthétique ainsi obtenu, avec le spectre correspondant sur la Figure 29.

Le deuxième accélérogramme est un enregistrement réel, que l'on recherche dans des bases de données mondiales de mouvements forts du sol. En plus du calage à la forme de spectre spécifié, la recherche d'un accélérogramme réel doit également respecter des critères de contexte tectonique similaire, de site d'enregistrement rocheux, de magnitude et distance comparables. L'accélérogramme que nous avons sélectionné provient de la crise sismique de Mammoth Lakes (Californie) survenue le 7 janvier 1983. Dans cette région, le régime local en extension est en accord avec les mécanismes en faille normale caractéristiques de l'archipel des Comores. De magnitude 5.4, le séisme a été enregistré à une distance de 11 km à la station nommée « Convict Creek ». Ses caractéristiques sont voisines de celles du séisme de référence, à savoir magnitude de 5,2 et distance focale de 10 km. Nous retenons la composante Est-Ouest de l'accélération du sol, qui présente un pic à 0,15 g. Le caractère rocheux du site d'enregistrement a été vérifié à partir du rapport spectral de la composante Est-Ouest sur la composante verticale, qui montre un niveau relativement stable et jamais supérieur à 3 sur la gamme de fréquences qui nous intéresse.

La Figure 28 présente l'accélérogramme réel enregistré à « Convict Creek », avec le spectre correspondant sur la Figure 29. La présence de pics marqués (comme celui entre 0,15 s et 0,20 s) est caractéristique des signaux réels. Il faudra en tenir compte lors de l'interprétation des résultats de calcul de la réponse sismique des terrains à Mamoudzou.



Figure 28 - Accélérogrammes au rocher retenus pour calculer la réponse sismique des terrains à Mamoudzou



Figure 29 - Comparaison entre le spectre au rocher retenu pour le microzonage de Mamoudzou et les spectres des mouvements associés, synthétique et réel

Microzonage sismique de Mamoudzou-centre

7. Détermination de spectres de réponse tenant compte des effets de site lithologiques

7.1. PRINCIPE

Une fois identifiée la source sismique devant être retenue à Mayotte, il convient de calculer les mouvements du sol pouvant lui être associés. Ces mouvements de référence, représentatifs de la spécificité de la source sont, dans un premier temps, définis pour une condition standard de sol, dite au "rocher horizontal affleurant " (Cf. Chapitre 6). Ils sont ensuite repris, en considérant les caractéristiques géomécaniques et le comportement dynamique des sols pour tenir compte des spécificités du site.

Les calculs à réaliser pour déterminer les mouvements sismiques tenant compte des conditions de site nécessitent des données géophysiques et géotechniques qui ne sont pas disponibles actuellement sur Mayotte. Avec les seules données en notre possession, des calculs auraient certes été possibles pour l'ensemble de la zone d'étude (et ils ont été effectués), mais les incertitudes sur les résultats se sont avérés être très importantes. Nous avons donc préféré adopter une démarche simplifiée, tout en utilisant au maximum les données géophysiques acquises dans le cadre de ce projet.

Il s'agit de réaliser un microzonage de niveau intermédiaire A-B, c'est-à-dire basé essentiellement sur des données de base existantes (géologie, géotechnique, manifestations historiques de phénomènes) et sur l'application de la réglementation parasismique (AFPS, 1993). À partir de l'épaisseur et de la nature géotechnique des formations géologiques présentes sur la zone d'étude, plusieurs catégories de sites sont différenciées. À chacune d'elles est ensuite associé un spectre de réponse élastique.

7.2. POURQUOI LES « EUROCODE 8 » ?

Le premier choix se portait naturellement vers la réglementation en vigueur en France, c'est-à-dire les PS-92 (AFNOR, 1995), qui distinguent 4 catégories de sites, S_0 à S_3 , ayant des caractéristiques mécaniques allant des meilleures aux plus médiocres. Néanmoins, depuis l'établissement des spectres de réponse S_0 à S_3 préconisés dans les règles parasismiques françaises, de gros progrès ont été réalisés, essentiellement grâce à l'acquisition de nombreux enregistrements accélérométriques lors des tremblements de terre successifs que nous avons connus dans le monde. De plus, ces données complémentaires se sont avérées être cohérentes avec les nouveaux modèles théoriques qui intègrent la physique des phénomènes affectant la propagation des ondes sismiques. Ces évolutions importantes ont été intégrées dans l'établissement très récent des nouvelles règles parasismiques américaines (UBC, 1997) et européennes dites EuroCode 8 (2001). C'est la raison pour laquelle nous avons préféré nous référer et utiliser les dernières préconisations, à la fois en matière de classification de sites et de définition des spectres de réponse associés à ces sites.

7.3. PRINCIPE DES EUROCODE 8

7.3.1. Conditions de sols

Les règles EC-8 distinguent cinq catégories principales de sites (A à E), avec deux catégories secondaires S_1 et S_2 (Cf. Tableau 6). Les classes S_1 et S_2 correspondent à des configurations stratigraphiques particulières pour lesquelles des études spécifiques doivent être conduites. Par contre, la distinction entre les différentes catégories A à E est fondée sur trois paramètres :

- $V_{S,30}$, vitesse moyenne des ondes S sur les 30 premiers mètres⁴ (les valeurs pivot étant 800 m/s, 360 m/s, 180 m/s),
- N_{SPT}, le nombre de coups au pénétromètre statique (valeurs pivot: 50 et 15),
- C_u, la cohésion non drainée (valeurs pivot 250 kPa et 70 kPa).

7.3.2. Spectres de réponse

La définition des spectres de réponse EC-8 repose sur la catégorisation en différentes classes de sites définies précédemment. Mais seules les catégories A à E sont caractérisées par un spectre de réponse EC-8 ; du fait de leur complexité, les classes S_1 et S_2 doivent faire l'objet d'études particulières, où des formes spectrales spécifiques seront définies.

Deux types de spectres (Type 1 et Type 2) sont définis pour chaque classe de site A à E ; leur choix est basé sur la magnitude des séismes attendus dans la région considérée : Type 1 pour $M_S \ge 5,5$ et Type 2 pour $M_S < 5,5$. L'idée est ici de tenir compte des différences sensibles dans le contenu fréquentiel des sources sismiques potentielles : plus de basses fréquences pour des forts séismes et plus de hautes fréquences pour des séismes modérés.

Le spectre de réponse élastique à 5% d'amortissement, pour la composante horizontale du mouvement du sol, est défini par une expression analytique (réf EC-8, 2002). Nous rappelons simplement ici (Tableau 6) la valeur du coefficient d'amplification de site S. Ainsi, pour une classe de site et un séisme de référence donnés, l'accélération de calage du spectre de réponse au site sera égale à l'accélération de calage du spectre au rocher, multipliée par le coefficient de site S.

Classe	Coefficient de site S		
Classe	Type 1	Type 2	
А	1.0	1.0	
В	1.2	1.35	
С	1.15	1.5	
D	1.35	1.8	
E	1.4	1.6	

Tableau 6 - Valeurs du coefficient de site S défini dans les règles EC-8 (réf EC-8, 2002).

⁴ $V_{S,30} = 30 / \sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}$, h_i et V_i étant l'épaisseur et la vitesse des ondes S de la couche i sur un total de

7.4. CARTOGRAPHIE

Le modèle tridimensionnel permet de calculer, en tout point du territoire, la valeur $V_{s,30}$ définie précédemment. Il faut pour cela affecter une vitesse Vs à chaque type de sol, ceux-ci étant définis par des classes de vitesse, et non par une valeur unique :

Type de sol	Vs (m/s)	Vs pour le calcul
	Classe EC-8	
А	>800	950
В	360-800	400
С	180-360	250
D	<180	160

Tableau 7 - Affectation d'une valeur de vitesse moyenne pour chaque type de sol.

Le choix, arbitraire, de ces valeurs de Vs est un compromis entre des valeurs allant dans le sens de la sécurité (elles sont inférieures à la moyenne des bornes), et les vitesses effectivement mesurées par la reconnaissance SASW.

Les résultats du calcul se présentent sous forme d'une carte de valeur continue de $V_{s,30}$ (Figure 30).

Une classification, en respectant les bornes de la norme EC8, permet d'établir un prézonage brut (Figure 31).

Ce zonage, toutefois, repose sur un modèle qui ne fait que représenter la connaissance partielle du sous-sol de Mamoudzou. Il n'a qu'une valeur indicative. La carte définitive proposée (Figure 38) propose une autre classification, pour deux secteurs particuliers, le cratère de Kavani et les zones de mangrove.

Le cratère de Kavani :

Apparaissant en zone D sur le pré-zonage, la classification définitive de cette zone sera discutée dans la suite du texte. En effet, les mesures H/V montrent, comme il est classiquement observé pour ce type de structure présentant un remplissage très important de terrains de très faibles caractéristiques mécaniques, et des fréquences de résonance relativement basses, qui ne sont pas pris en compte par les spectres EC8. Nous allons donc réaliser un calcul spécifique de mouvement sismique.

Les zones de mangrove et de mangrove remblayée :

La connaissance de ces zones, difficiles à prospecter, ne repose que sur des extrapolations d'un nombre très limité de points de mesures. Le fait que ces zones présentent (Cf. Chapitre 10) une susceptibilité élevée à la liquéfaction ne fait que traduire les mauvaises caractéristiques mécaniques, sur des épaisseurs importantes, que l'on a observé pour ces formations dans des contextes similaires (notamment aux Antilles françaises, Fort-de-France en Martinique et Pointe-à-Pitre en Guadeloupe).

Cette méconnaissance ne nous permet pas, contrairement au cas du cratère de Kavani, de proposer un spectre spécifique.

En conséquence, et plutôt que de ne pas proposer de spectre forfaire pour ces zones, nous avons pris le parti de les classer en zone D. Nous recommandons toutefois de réaliser, avant tout projet d'aménagement significatif, des reconnaissances spécifiques, qui viendront par ailleurs compléter celles nécessaires pour préciser la susceptibilité à la liquéfaction.



Figure 30 - Carte de valeurs continues du paramètre $V_{s,30}$



Figure 31 - Pré-zonage brut défini à partir des valeurs du paramètre $V_{s,30}$

7.5. COMPARAISON DES SPECTRES EC-8 ET DES MESURES H/V

Le paragraphe précédent a permis de délimiter des zones correspondant aux catégories de site B, C et D, chacune étant classée sur une gamme de variation du paramètre $V_{s,30}$. Pour compléter cette analyse, nous allons calculer les différents spectres des EC-8 correspondants aux zones identifiées et nous allons comparer les valeurs des périodes couvertes par les plateaux de ces spectres avec les périodes de résonance des sols caractérisées par la méthode H/V. Ceci permettra de vérifier si les spectres des EC-8 sont bien adaptés aux terrains de Mamoudzou. Lorsque cela n'est pas le cas, ou bien lorsque que les connaissances géotechniques disponibles sur la zone nous permettent de conclure que le spectre des EC8 n'est pas adapté, nous avons réalisé un calcul de mouvement sismique spécifique.

7.5.1. Zone B

Trois points de mesures ont été réalisés sur la zone B (points 34, 35 et 36, Cf. annexe 1). Les courbes H/V montrent à chaque fois un pic bien marqué à une période autour de 0,33 s. La Figure 32 donne le spectre des EC8 pour la zone B et indique la période de résonance du sol déterminée par la méthode H/V. On voit que cette période de résonance est proche des valeurs correspondant au plateau du spectre de réponse. On peut donc penser que le spectre de la zone B est adapté.



Figure 32 - Spectre de réponse de la zone B (EC8) et périodes de résonance des courbes H/Vmesurées dans cette zone

7.5.2. Zone C

Huit points de mesure ont été réalisés sur la zone C (points 10, 11, 12, 13, 33, 37, 38 et 62, Cf. annexe 1). Les courbes H/V montrent à chaque fois un pic bien marqué à une période comprise entre 0,25 et 0,38 s. La Figure 33 montre le spectre des EC8 pour la zone C et indique la gamme de périodes de résonance du sol déterminées par la méthode H/V. On voit que ces périodes de résonance sont proches des valeurs correspondant au plateau du spectre de réponse. On peut donc penser que le spectre de la zone C est adapté.



Figure 33 - Spectre de réponse de la zone C (EC8) et périodes de résonance des courbes H/V mesurées dans cette zone

7.5.3. Zones D / E

Cette zone correspond au cratère de Kavani, qui est une structure particulière qui correspond à la zone D (éventuellement E). Quatre mesures H/V ont été réalisées sur cette zone (points 6, 7, 8 et 9, Cf. annexe 1). Les périodes de résonance déterminées varient de 1 à 2,1 s. La Figure 34, montre les spectres des zones D et E, et indique la gamme de périodes de résonance déterminées par H/V. On voit que ces périodes de résonance sont sensiblement différentes des valeurs correspondant au plateau du spectre de réponse. On peut donc penser que les spectres EC8 ne rendent pas correctement compte des effets de site sur cette zone. Les connaissances géologiques et géotechniques sur cette zone, ainsi que la cohérence des données géophysiques nous permettent d'effectuer un calcul spécifique de la réponse sismique de ces sols.



Figure 34 - Spectre de réponse de la zone D et E (EC8) et périodes de résonances des courbes H/V mesurées sur cette zone

7.6. SPECTRES DE REPONSE SPECIFIQUES

Dans le cas du cratère de Kavani, nous avons vu que le spectre des EC8 n'est pas adapté (le plateau s'arrête à 0.3 s, alors que la période fondamentale varie de 0.4 à 1 s). D'autre part, les connaissances sur cette zone nous permettent de penser que la réponse du sol n'est pas « classique ». Nous avons donc décidé de réaliser un calcul de mouvement sismique en surface par une méthode numérique.

7.6.1. Modèle CyberQuake

La démarche adoptée pour quantifier les effets de site dans le cratère de Kavani est basée sur l'utilisation d'un modèle de comportement linéaire équivalent pour simuler la réponse des sols soumis à des sollicitations sismiques. Il permet de calculer le spectre de réponse d'un site, connaissant les caractéristiques géotechniques de la colonne de terrain sous-jacente et l'accélérogramme auquel elle est soumise. Les données à prendre en compte en entrée du modèle numérique sont :

Rapport BRGM/RP-51839-FR, 2002 MAYOTTE 05

- les différents types de formations identifiés dans le cratère de Kavani et caractérisés par une colonne géotechnique type ;
- un accélérogramme au rocher. Deux signaux temporels ont été proposés comme mouvements de référence pour Mamoudzou : un accélérogramme réel et un synthétique (Cf. Chapitre 6).

La réponse d'une colonne de sol constituée de couches horizontales infinies et soumise à une sollicitation sismique est calculée à l'aide de *CyberQuake*, logiciel développé au BRGM (Modaressi *et al.*, 1997). Ce code est conçu pour fonctionner avec un modèle de comportement des sols, soit linéaire équivalent (ou viscoélastique), soit élastoplastique non linéaire. Nous nous sommes limités dans cette étude au cas linéaire équivalent, car l'amplitude des sollicitations sismiques imposées aux sols (pic d'accélération au rocher de 0.15 g) n'est pas suffisamment élevée pour générer des déformations irréversibles importantes dans ces sols.

Chacune des couches est supposée être constituée d'un matériau homogène et isotrope, et est caractérisée par son épaisseur, sa masse volumique et son module de cisaillement (ou sa vitesse de propagation des ondes S). De plus, elles sont décrites par des courbes G- γ et D- γ , qui caractérisent la variation du module de cisaillement normalisé G/G_{max} et du coefficient d'amortissement D du matériau, en fonction de la distorsion en cisaillement cyclique γ_c . Elles sont obtenues à partir d'essais de laboratoire ou reconnues dans la littérature.

Une analyse de sensibilité a été effectuée pour valider et tester l'influence des paramètres (épaisseur des couches, vitesse des ondes de cisaillement et indice de plasticité) sur la réponse sismique obtenue pour la colonne géotechnique type du cratère de Kavani.

7.6.2. Définition de la colonne de sol de Kavani

La succession des couches lithologiques et géotechniques pour le cratère de Kavani a été définie au Chapitre 5. La colonne de sol utilisée pour le calcul est définie dans le Tableau 8. La Figure 35 montre les profils de vitesses Vs, obtenus par la SASW et qui ont permis de définir les valeurs moyennes de V_s , V_p et ρ . Les valeurs de IP (Indice de Plasticité) permettent de choisir les courbes de module de cisaillement et d'amortissement critique nécessaires au calcul. Plus la valeur de IP est importante, plus le sol est plastique.

sol	épaisseur	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Rho	IP
Type Sd	25	170	500	1800	0 et 15
Type Sc	10	360	660	1830	20
Type Sb	Substratum	980	2250	2250	/

Tableau 8 - Colonne de sol définie pour le calcul du mouvement sismique sur la zone de Kavani



Figure 35 - Profils des vitesses Vs obtenus par la méthode SASW, pour le point 6(à gauche) et le point 8 (à droite)

Nous avons ainsi procédé au calcul de la réponse sismique de cette colonne, soumise à sa base à deux accélérogrammes (réel et synthétique), à l'aide du code de calcul *CyberQuake*.

7.6.3. Spectres de réponse du cratère de Kavani

La Figure 36 montre en vert et bleu les spectres de réponse calculés en prenant les deux valeurs de IP (dernière colonne du Tableau 8), en noir le spectre au rocher choisi et en rouge le spectre retenu pour la zone du cratère de Kavani. Nous accordons une confiance plus grande au spectre correspondant à l'IP 15, c'est pourquoi le spectre retenu se rapproche plus des courbes en bleu.

Le spectre retenu pour le cratère est également comparé aux spectres des EC8 pour les zones D et E. On voit que l'amplification du plateau est beaucoup moins forte pour le spectre retenu que pour ceux des EC8 et que le plateau est beaucoup plus allongé. Cette caractéristique de spectres de réponse est typique de sols de propriétés mécaniques médiocres.



Figure 36 - Spectres de réponse élastiques horizontaux (amortissement 5%) du cratère de Kavani comparés aux spectres des règles EC8 zone D et E

8. Spectres et zonage des effets de site lithologiques

8.1. SPECTRES DE REPONSE RETENUS POUR LE MICROZONAGE

Finalement, 4 zones ont été définies pour le microzonage de Mamoudzou-centre, correspondant à 4 spectres de réponse (Figure 37).

Les spectres des zones B, C et D sont ceux définis dans les règles EC-8, le spectre de la zone du cratère de Kavani a été calculé spécifiquement par une approche linéaire équivalente à partir d'accélérogrammes représentatifs du mouvement sismique au rocher et des paramètres géotechniques des sols rencontrés sur la zone.



Figure 37 - Spectres retenus pour les 4 zones du microzonage sismique de Mamoudzou-centre

Les tableaux 9 et 10 donnent les valeurs analytiques permettant de retrouver les spectres de réponse élastiques pour les 4 zones déterminées pour le microzonage du centre de Mamoudzou.

Sur ces tableaux :

- Ta, Tb, Tc et Td sont les valeurs des périodes (**en secondes**) des points d'inflexions des spectres de réponses ;
- RA et RM sont respectivement les valeurs des accélérations spectrales à période nulle et au plateau du spectre, exprimées **en g**.

Entre TA = 0 s et TB, l'accélération augmente linéairement avec la période de RA à RM.

Entre TB et TC l'accélération est constante, égale à RM. Entre TC et TD = 2 s en général, l'accélération décroît en 1/Tentre TD et T = 4 s, l'accélération décroît en $1/T^2$

Les spectres de dimensionnement utilisés par les bureaux d'études structures pour certains calculs, se définissent simplement en supprimant la branche AB des spectres et en prolongeant la branche BC jusqu'à $T_B=0$.

SPECTRE	TB	T _C	TD	R _A	R _M
Kavani	0.1	-	1	0.22	0.45
B (EC8)	0.15	0.5	2.0	0.2025	0.50625
C (EC8)	0.2	0.6	2.0	0.225	0.5625
D (EC8)	0.2	0.8	2.0	0.27	0.675

Tableau 9 - Valeurs caractéristiques des spectres de réponse élastique (T en secondes et R en g).

SPECTRE	AB	BC	CD	DE
Kavani	0.22+2.3T	0.45	$0.45/T^2$	0.15192/T ²
B (EC8)	0.2025+6.075T	0.50625	0.1266/T	0.16872/T ²
C (EC8)	0.225+3.375T	0.5625	0.1406/T	0.243/T ²
D (EC8)	0.27+4.05T	0.675	0.2025/T	0.243/T ²

Tableau 10 - Expressions analytiques des spectres de réponse élastique.

8.2. CARTE DE ZONAGE DES EFFETS DE SITE LITHOLOGIQUES

La carte présentée en Figure 38 indique à l'échelle du 1/10 000, la répartition géographique des 4 zones présentant une réponse sismique homogène, et caractérisées par un spectre de réponse.

8.3. PRECAUTIONS

8.3.1. Modifications du mouvement sismique par des effets de remplissage de bords de vallées et des discontinuités latérales

Aux effets de site liés à la nature du sous-sol, peuvent s'ajouter des effets de bordure liés au biseau sur les côtés des vallées ou des cratères.

Ces phénomènes peuvent se produire de façon indéniable dans le contexte topographique de Mamoudzou-centre. Ils sont toutefois difficilement quantifiables et n'ont par conséquent pas pu être pris en compte dans cette étude.

8.3.2. Phénomènes de liquéfaction

L'étude de liquéfaction (Chapitre 10) a identifié des zones où les terrains sont susceptibles de liquéfier. Les zones concernées sont les zones D et le cratère de Kavani.

Par conséquent, les spectres de réponse de ces zones ne sont valides que si les matériaux n'ont pas liquéfié. Pour des bâtiments de classe C et D au sens des règles PS-92, il est fortement recommandé d'entreprendre une campagne d'étude spécifique (avec reconnaissances complémentaires) pour caractériser la potentialité de liquéfaction sur la zone concernée avant tout projet de nouvelle construction.



Figure 38 - Carte des effets de site lithologiques, zones EC8

9. Effets de site topographiques

9.1. DEFINITION

On a constaté que, tous facteurs étant apparemment égaux par ailleurs, certaines configurations topographiques pouvaient entraîner des amplifications notoires d'un signal sismique, entraînant une augmentation locale de l'intensité du tremblement de terre.

Il s'agit de zones de rupture de pente, de crête, de bordure de plateau, de sommet.

Pour cette raison, les règles parasismiques PS-92 (et également les EC-8) tiennent compte de ces effets par l'application d'un coefficient multiplicateur d'amplification pour les ouvrages situés en rebord de crête. Ce coefficient τ (Tau) varie entre 1 (pas d'augmentation des accélérations des spectres de dimensionnement) et 1,4 (majoration de 40% des accélérations). Il est obtenu à l'aide de formules empiriques (Cf. 8.2.1).

Toutefois, les résultats des campagnes de mesures ont été parfois en contradiction avec ceux qui étaient attendus. La modélisation du phénomène reste donc encore largement du domaine de la recherche.

Malgré tout, l'application des règles parasismiques impose l'emploi du coefficient τ pour la construction d'ouvrages.

9.2. CARTOGRAPHIE DES EFFETS DE SITE TOPOGRAPHIQUES

9.2.1. Principes

Ces principes sont extrait des règles PS 92.

Le principe du calcul du coefficient τ est le suivant :



Figure 39 - Principe de calcul du coefficient τ pour l'évaluation des effets de site topographiques

La détermination de H laisse une certaine part à l'appréciation. À titre indicatif, on peut considérer comme base du relief le point en dessous duquel la pente générale du site devient inférieure à 0,4

Si l'on considère une arête B délimitant un versant aval de pente I (tangente de l'angle de pente) et un versant amont de pente i, et si :

- $H \ge 10$ m (H étant la hauteur de l'arête au-dessus de la base du relief);

- $i \leq I/3$;

alors le coefficient τ prend la valeur :

$$\begin{split} \tau &= 1 & \text{pour I-i} \leq 0,40 \\ \tau &= 1+0,8(\text{I-i-}0,4) & \text{pour } 0,40 \leq \text{I-i} \leq 0,90 \\ \tau &= 1,40 & \text{pour I-i} \geq 0,90 \\ \text{I et i sont pris en valeur algébrique} \end{split}$$

Sur le tronçon BC du versant amont défini par la longueur b de sa projection horizontale (exprimée en mètres) :

b = minimum de 20xI ou de (H+4)/10

La valeur de τ fait l'objet d'un raccordement linéaire entre les valeurs 1 et le long des tronçons AB et CD de longueur :

- a=AB=H/3 - c=CD=H/4

Enfin, τ prend la valeur 1 à l'aval du point A et à l'amont du point D.

la Figure 40 montre, pour un point de calcul, les différents profils sur lesquels il est possible de calculer le coefficient τ . On voit que selon le profil pris en compte, la valeur de τ va pouvoir varier sensiblement. C'est le profil le plus défavorable qui doit être utilisé pour le calcul.



Le profil à considérer est le plus défavorable des profils composites Y_i P Y_j.

Figure 40 - Choix des profils pour le calcul du coefficient τ

9.2.2. Cartographie

Un développement informatique spécifique pour rechercher, à partir du modèle numérique de terrain (MNT), éventuellement à l'aide du modèle de drainage, les profils les plus pénalisant en tous points du zonage à été envisagé, puis rejeté en raison des difficultés prévisibles de sa mise au point. Une application manuelle des règles s'avérait en outre très fastidieuse.

Nous avons donc opté pour une solution intermédiaire qui a consisté à utiliser un programme qui permet de :

- dessiner les profils a priori les plus pénalisants sur un fond topographique ;
- numériser ces profils ;
- calculer chaque profil en long en lisant les altitudes sur le MNT ;
- pour chaque point du profil, calculer l'ensemble des combinaisons possibles avec deux autres points du profil ;
- pour chaque combinaison, calculer, à partir des valeurs H, I, i le coefficient τ ;
- pour chaque point, ne conserver que la valeur la plus forte résultant de la combinaison la plus défavorable ;
- reporter ces valeurs sur un fond topographique avec un code de couleur (5 classes) ;
- interpoler les classes de τ manuellement entre les profils, en fonction de la topographie ;
- numériser les zones ainsi obtenues.

Pour Mamoudzou, le parti a été pris de ne délimiter que les zones où la méthode précédemment décrite conduit à des valeurs de τ supérieures à 1, c'est à dire les zones où des amplifications dues à la topographie peuvent, d'après les règles PS 92, se produire.

En effet, compte tenu de :

- la formulation très empirique du calcul du coefficient, qui ne correspond pas à une réalité physique ;
- la précision du Modèle Numérique de terrain disponible (pas de 50 m rééchantillonné à 25 m) ;
- l'obligation de refaire ce calcul élémentaire au cas par cas, pour chaque projet, si l'on veut appliquer les règles PS 92 (et ce avec une topographie plus fine) ;

la carte obtenue, contrairement à celle présentée pour les effets de sites lithologiques, n'a pas vocation à imposer une valeur numérique pour le calcul de la structure. Elle constitue un **document à vocation de sensibilisation** et d'aménagement.



Figure 41 - Carte des effets de site topographiques
10. Susceptibilité à la liquéfaction

« On appelle liquéfaction d'un sol un processus conduisant à la perte totale de résistance au cisaillement du sol par augmentation de la pression interstitielle. Elle est accompagnée de déformations dont l'amplitude peut être limitée ou quasi illimitée » (Définition issue des règles PS 92).

Ce phénomène, qui se produit uniquement sous sollicitation sismique forte, peut provoquer des affaissements différentiels sous les fondations des ouvrages, pouvant entraîner leur rupture ou leur basculement, et également des glissements de terrain sur des pentes très faibles (« lateral spreading »).

10.1. METHODES D'ETUDE

Les PS 92 précisent les caractéristiques des sols *a priori* suspects de liquéfaction. Elles peuvent être résumées comme suit :

- sables, sables vasards et silts, lorsqu'ils sont saturés en eau, présentant une granulométrie assez uniforme, un diamètre moyen compris entre 0.05 et 1.5 mm, et soumis en l'état final du projet à des contraintes verticales relativement faibles.
- sols argileux présentant des valeurs spécifiques concernant notamment le diamètre à 15%, la limite de liquidité, la teneur en eau...

Seuls des essais spécifiques *in situ* ou sur des échantillons intacts pourront véritablement **quantifier** cette susceptibilité, en précisant notamment les caractéristiques minimales de l'agression sismique (intensité, durée) nécessaire à l'apparition du phénomène.

Des analyses granulométriques (Haas et Hugues, 2002) ont été réalisées sur des niveaux sableux prélevés sous forme de *cuttings* en 1999 dans les sondages destructifs de Kaouéni (1230-7X-0019 et 1230-7X-0020), au nord de la zone d'étude.

Ces sables (cuttings) ayant été remaniés et lavés lors de leur prélèvement, le résultat de l'analyse granulometrique pourrait être biaisé et deux cas de figures sont envisageables concernant leur susceptibilité à la liquéfaction :

- soit les critères granulométriques exclusifs de susceptibilité à la liquéfaction ne sont pas remplis, auquel cas on est en droit d'avoir une forte présomption de non-susceptibilité à la liquéfaction de ces formations,
- soit ces critères granulométriques satisfont aux conditions de susceptibilité à la liquéfaction, auquel cas on ne peut conclure.

Les courbes granulométriques placent ces sables dans le second cas : on ne peut donc quantifier la susceptibilité à la liquéfaction de ces sables.

Ainsi, la démarche adoptée pour évaluer l'aléa liquéfaction à Mamoudzou correspond à celle imposée pour un microzonage de Type A, c'est à dire basé sur une étude **qualitative** de la sensibilité à la liquéfaction, résultant de l'exploitation des données géologiques, hydrogéologiques et géomorphologiques.

Ce zonage se traduit par une carte de susceptibilité à la liquéfaction, qui comporte :

- les zones pour lesquelles la susceptibilité est très faible ou nulle,
- les zones pour lesquelles la susceptibilité est faible à modérée,
- les zones pour lesquelles la susceptibilité est élevée à très élevée.

Pour déterminer cette susceptibilité, on se réfère aux tableaux suivants.

Nature du dépôt	Possibilité d'occurrence de liquéfaction de sols pulvérulents saturés							
	< 500 ans	Holocène < 10000 ans	Pléistocène < 1650000 ans	Prépléistocène > 1650000 ans				
DEPOTS CONTINENTAUX								
Rivière	Très élevée	Elevée	Faible	Très faible				
Plaine alluviale	Elevée	Modérée	Faible	Très faible				
Dépôts éoliens	Modérée	Faible	Faible	Très faible				
Terrasses marines	-	Faible	Très faible	Très faible				
Deltas	Elevée	Modérée	Faible	Très faible				
Dépôts lacustres	Elevée	Modérée	Faible	Très faible				
Colluvions	Elevée	Modérée	Faible	Très faible				
Dunes	Elevée	Modérée	Faible	Très faible				
Löess	Elevée	Elevée	Elevée	Inconnue				
Moraine glaciaire	Faible	Faible	Très faible	Très faible				
ZONES COTIERES								
Deltas	Très élevée	Elevée	Faible	Très faible				
Estuaires	Elevée	Modérée	Faible	Très faible				
Plages	Modérée à élevée	Modérée à faible	Faible à très faible	Très faible				
Lagons	Elevée	Modérée	Faible	Très faible				
REMBLAIS ARTIFICIELS								
Non compacté Compacté	Très élevée Faible	-	-	-				

Tableau 11 – Susceptibilité des dépôts sédimentaires à la liquéfaction en fonction de la nature et de l'âge du dépôt (Youds et Perkins, 1978 in AFPS, 1993)

Age du dépôt	Profondeur nappe (m)					
Age un depot	0 - 3	3 - 10	10 - 15	> 15		
Holocène récent	Elevée à très élevée	Modérée	Faible	Très faible		
Holocène	Elevée	Modérée	Faible	Très faible		
Pléistocène récent	Faible	Faible	Très faible	Très faible		
Prepléistocène	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible		

Tableau 12 – Susceptibilité des dépôts sédimentaires à la liquéfaction en fonction deleur âge et de la position de la nappe phréatique (AFPS, 1993)

Le Tableau 11 est construit :

- d'une part, sur une estimation de la probabilité de rencontrer des niveaux sableux ou argileux *a priori* suspects dans des formations géologiques types ;
- d'autre part, sur l'âge de ces formations, d'autant moins susceptibles qu'elles seront anciennes (compaction et diagenèse).

Le Tableau 12 prend en compte la saturation potentielle de ces terrains.

Par ailleurs, la prise en compte du phénomène de liquéfaction dans un microzonage dépend du niveau d'agression sismique attendu. Pour une accélération de référence (PGA) au rocher de 0,15 g, telle qu'elle a été déterminée pour Mayotte (Terrier *et al.*, 2000), ce phénomène n'est pas à prendre en compte d'après les EC8 sauf dans les zones où des effets de site seraient significatifs, ce qui est le cas pour la plus grande partie de la zone d'étude.

Sur la base de ces tableaux, l'analyse des susceptibilités à la liquéfaction portera donc, à Mamoudzou, sur les zones F1, F2, X et M de la carte des type de sols (Figure 17 Chapitre 5.1).

La zone F1 correspond au remplissage de la dépression volcanique de Kavani. Celle-ci s'est formée il y a environ 500 000 ans (Cf. paragraphe 2.2) puis a été comblé par des sédiments détritiques « continentaux » (alluvions, colluvions, dépôts lacustres). On ne peut exclure des incursions marines via le pertuis qui le relie au littoral, fonctions des variations du niveau marin liées aux glaciations et des mouvements verticaux propre à l'île. Le comblement du cratère est certainement précoce, et seuls les derniers mètres du remplissage peuvent être récents.

La nappe est proche de la surface du sol, elle se situe à environ 3 m de profondeur d'après la SASW.

L'âge du remplissage sédimentaire est donc estimé au Pléistocène récent (<1 650 000 ans), ce qui, compte tenu de la nature du remplissage, conduit à une susceptibilité **faible**.

S'il se trouve que ces dépôts sont recouverts par une formation côtière (de type dépôt de plages ou de lagon) d'épaisseur significative et plus récente (Holocène, 10 300 ans), ces niveaux présenteront une susceptibilité **modérée à faible.** La qualification de « faible » de la susceptibilité à la liquéfaction se trouve confortée, pour le centre du cratère, par les faibles niveaux d'amplification induits par les effets de sites.

La zone F2 correspond au remplissage du pertuis reliant le cratère de Kavani au littoral. Bien que vraisemblablement peu épaisse, ces dépôts de comblement peuvent être de nature variée et résulter de l'inter-stratification de plusieurs types de formations sédimentaires : colluvions, alluvions, dépôts de plage et de lagon. Elle est également relativement récente (Holocène, voire < 500 ans pour ses termes les plus superficiels). Le niveau de la nappe phréatique est inférieur à 3 mètres ; la susceptibilité à la liquéfaction y est donc estimée comme **élevée**.

Les zones M et X correspondent aux zones qui ont été ou qui sont occupées par la mangrove (zone M), localement remblayée (zone X). Les dépôts sont marins (de type plages et lagons), ils sont saturés car la nappe phréatique est niveau de la mer et récents (Holocène, voire < 500 ans pour ses termes les plus superficiels). Les remblais X semblent peu compacts (mesures SASW). Pour ces deux formations, la susceptibilité à la liquéfaction est estimée comme **élevée à très élevée**.

10.2. CARTE DE SUSCEPTIBILITE A LA LIQUEFACTION

Ce zonage se traduit par une carte de susceptibilité à la liquéfaction (Figure 42), comportant :

- des zones de susceptibilité élevée à très élevée (zones M,X et F2);
- des zones de susceptibilité faible à modérée (zone F1) ;
- des zones de susceptibilité très faible à nulle (les autres zones).

10.3. RAPPEL CONCERNANT L'EVALUATION DES EFFETS DE SITES :

Les effets de site seront fondamentalement différents selon que, en fonction de la susceptibilité effective à la liquéfaction des terrains et de la nature de l'agression sismique, les terrains se liquéfient ou non.

Les spectres proposés dans les secteurs ne sont représentatifs que des effets attendus **hors liquéfaction**. En cas de liquéfaction, les effets vibratoires seraient *a priori* atténués, mais les ouvrages subiraient des mouvements différentiels importants.

Il est donc recommandé, dans les secteurs susceptibles de liquéfier, d'une part, de dimensionner les ouvrages avec le spectre proposé, d'autre part de tenir compte de l'éventualité de la liquéfaction des sols (reconnaissances complémentaires, essais pour préciser la susceptibilité, fondations spéciales, géométrie de la structure, voire réduction de la susceptibilité).



Figure 42 - Carte de la susceptiblité des dépôts au phénomène de liquéfaction

Microzonage sismique de Mamoudzou-centre

11. Aléa mouvements de terrain

11.1. METHODE D'ETUDE

La cartographie de l'aléa « mouvements de terrain » en conditions dynamiques procède de la prise en compte :

- des événements historiques ;
- des facteurs permanents déterminant la susceptibilité des matériaux sollicités vis-àvis du phénomène : géologie, lithologie, altération, fracturation, géomorphologie, pente ...;
- des facteurs de déclenchement ou de conditions d'apparition : anthropique, pluviométrique et dans le cas présent, sismique.

11.1.1 La cartographie des événements historiques

La connaissance des phénomènes historiques ou actifs constitue une étape essentielle de la démarche. Elle permet :

- de dresser un historique des événements et par la même, leur typologie ce qui donne une idée de la sensibilité du secteur concerné vis à vis de ces phénomènes ;
- d'identifier les conditions d'environnement ayant favorisé leur apparition. Elle est donc propice à la détermination des facteurs de prédisposition vis-à-vis de ces phénomènes.

La cartographie a débuté pendant la saison des pluies 2001-2002, les périodes de fortes précipitations étant en général propices à l'apparition des mouvements de terrain. Pour une bonne compréhension des phénomènes avérés ou potentiels, nous avons étendu leur recherche et leur analyse hors des limites de la zone d'étude.

Nous avons cartographié l'emprise linéaire et/ou surfacique des phénomènes de manière à apprécier leur évolution depuis l'étude des mouvements de terrain par le Brgm de 1999/2000 (Cruchet et Rossi, 2000). En cas de difficulté dans leur repérage sur les fonds topographiques ou sur les photos aériennes disponibles, nous les avons positionnés à l'aide d'un récepteur GPS.

Deux grands types de mouvements sont mis en évidence à Mamoudzou :

- les chutes de blocs dans leur sens strict, c'est à dire les éboulements en milieu *rocheux*. Ils sont observés en bord de mer (Pointe Mahabo) et en contrebas de coulées massives de basalte (montagne de Kavani, la Convalescence) ;
- les glissements de terrain, impliquant *ou non* des blocs rocheux. Ces glissements concernent les altérites. En centre-ville ils sont principalement observés dans les talus des routes et les décaissements des habitations (Kavani, centre-ville, Mtsapéré et quelques sites de la montagne de Kavani). Ils s'accompagnent fréquemment d'érosion, de fluage (= reptation) et de coulées de débris ou de boue avec une propagation pouvant être importante.

Dans les deux cas des blocs peuvent être remobilisés, soit par impact dans le cas des chutes de blocs *s.s.*, soit par entraînement ou libération dans les cas, respectivement, de glissements ou de coulées en milieu d'altérites.

11.1.2. Les facteurs permanents

Les facteurs permanents de prédisposition aux instabilités sont :

- la pente des terrains d'une manière générale, et celui du substratum rocheux sous recouvrement (pendage aval défavorable) ;
- la nature, l'épaisseur et les caractéristiques mécaniques des terrains. Les chutes de blocs apparaissent en contrebas des falaises ou des escarpements de roches saines mais fracturées. Les glissements et phénomènes associés affectent les altérites ;
- la présence d'une nappe d'eau pérenne, affectant une pente ou son pied, dans des formations meubles ou rocheuses fracturées est néfaste à la stabilité de cette pente ;
- le couvert végétal ou son absence. Le poids, et les mouvements sous l'action du vent, d'arbres faiblement enracinés sur versant peuvent favoriser les glissements superficiels. L'absence de protection végétale favorise le ravinement et l'altération.

11.1.3. Les facteurs variables

Il s'agit des facteurs variables dans le temps ou facteurs déclenchants :

- les précipitations abondantes sur une longue période (saison des pluies), les cyclones. D'une manière générale, les eaux qui s'infiltrent dans les formations meubles en réduisent les caractéristiques mécaniques et favorisent l'apparition de glissements dans les pentes en équilibre limite. Aux éventuels points d'émergence, des phénomènes d'érosion régressive peuvent se manifester. Les eaux de ruissellement ont une action érosive directe qui peut se traduire par du ravinement, mais également par des coulées de boue. Dans certains cas elles peuvent réactiver un glissement ancien et/ou le transformer en coulée de boue ou de débris ;
- l'action de l'homme : elle est clairement identifiée dans le déclenchement de nombreux événements. Ce sont les talus routiers, les décaissements en zone urbaine, les déblais (souvent instables) déposés sur les pentes et enfin les phénomènes issus de la non-maîtrise des eaux de ruissellement, principalement en site urbain.
- les secousses sismiques qui ont déjà, semble-t-il, entraîné des glissements de terrain à Mayotte (Gevrey 1870), mais dont nous n'avons pas encore trouvé les sites précis (séismes de 1829? et de 1993). Elles engendrent des forces –horizontales ou inclinées- dont le sens est périodiquement (fréquence élevée) défavorable à la stabilité des pentes ou des masses rocheuses.

11.2. CARTE DE L'ALEA MOUVEMENT DE TERRAIN

L'analyse de la nature et éventuellement des épaisseurs des formations superficielles, des phénomènes avérés ou supposés, des pentes et des ruptures de pente, a permis d'actualiser le zonage de l'aléa déjà réalisé par le Brgm en 2000, à l'échelle du 1/25 000 (Cruchet et Rossi, 2000), du fait de l'anthropisation qui a modifié les facteurs permanents et de la prise en compte du déclencheur sismique.

On observe ainsi une augmentation des superficies des zones d'aléa modéré et fort, ainsi que localement une élévation du niveau d'aléa, en liaison directe avec l'urbanisation et l'activité sismique potentielle.

La cartographie distingue des zones d'aléa faible ou supposé nul (laissées en blanc), des zones d'aléa modéré (en vert) et des zones d'aléa fort (en rouge). Dans ces dernières, qui en général intègrent tous les secteurs dont la pente est supérieure à 20°, sont incluses les zones de propagation, c'est à dire de départ (en tête de talus) et de réception (en pied de talus). Hors secteurs urbanisés la largeur de ces zones a été uniformément fixée à 25 m ; en secteur « légalement » urbanisé, la zone de départ a été réduite à 10 m lorsque sa pente est très faible. La carte de l'aléa mouvement de terrain est présentée Figure 43.



Figure 43 - Carte de l'aléa mouvements de terrain

12. Conclusions et recommandations

12.1. CONCLUSIONS DE L'ETUDE

Le microzonage sismique du centre-ville de Mamoudzou comporte la cartographie :

- des zones homogènes en terme de réponse sismique du sol vis à vis des effets de site lithologiques ;
- des effets de site topographiques ;
- de la susceptibilité des sols au phénomène de liquéfaction ;
- de l'aléa mouvements de terrain.

L'approche utilisée est conforme aux recommandations du guide méthodologique de l'AFPS (1993) et consiste en un microzonage de niveau intermédiaire A-B.

Des données géophysiques complémentaires ont été acquises pour palier au manque de données géotechniques et ont été utilisées pour la classification des sols.

Les spectres de réponses des Eurocodes EC8, plus adaptés aux connaissances scientifiques actuelles que les spectres des règles PS 92, ont été utilisées pour la cartographie des effets de site. Pour le dimensionnement des ouvrages, les règles PS 92 seront utilisées, avec les spectres ainsi obtenus.

12.2. RECOMMANDATIONS POUR LA PRISE EN COMPTE DES RESULTATS DU MICROZONAGE DANS LES DOCUMENTS D'URBANISME ET D'AMENAGEMENT

Les résultats sont fournis sous la forme de cartes à $1/10\ 000$. Leur lecture permet de connaître, en tout point de la zone d'étude :

- la zone de réponse sismique homogène vis à vis des effets de site lithologiques et par suite, le spectre de réponse à utiliser pour l'application des règles de construction parasismique PS 92 (Figure 38);
- la possibilité de phénomènes d'amplification topographique (Figure 41) ;
- la potentialité de liquéfaction (Figure 42) ;
- le type et l'intensité de l'aléa mouvement de terrain (Figure 43).

Les différentes composantes de l'aléa sismique local peuvent désormais être prises en compte dans les documents d'urbanisme, afin que les aménageurs et les décideurs intègrent les différentes contraintes liées à cet aléa, **dès la conception d'un projet**, au même titre que les contraintes liées au fonctionnement actuel de l'agglomération de Mamoudzou.

Il est donc primordial d'intégrer les résultats de cette étude de microzonage, le plus rapidement possible, aussi bien dans le plan d'occupation des sols (P.O.S.) de la commune que dans le schéma régional d'aménagement et de développement du Territoire (SRDAT) ou tout autre document officiel présent ou futur, assortis de prescriptions définissant le type d'aménagement envisageable et régissant l'autorisation de construire, avec ou sans conditions.

Cela constitue la phase dite technico-administrative de prise en compte des résultats purement techniques de l'étude et d'approbation de mesures préventives, au sens de l'élaboration des Plans de Prévention des Risques. Cette phase peut être réalisée très rapidement, dès lors que la volonté est exprimée par les représentants de l'Etat ou les élus locaux.

Les derniers séismes destructeurs à Mayotte ont eu lieu à des époques où l'agglomération était peu urbanisée. Les conséquences économiques et sociales d'un séisme pourraient être particulièrement graves aujourd'hui, en raison de la répartition de la population et des biens exposés dans cette zone :

- concentration excessive d'habitations vulnérables dans l'agglomération ;
- fragilité du capital économique lié aux infrastructures, à quelques industries, et à un réseau de voies de communication souvent très exposé, et en conséquence, fragilité de l'équilibre social qu'il préserve.

Le problème réside en fait aujourd'hui principalement dans la vulnérabilité du milieu construit existant. En revanche, pour le milieu construit futur, on peut penser que l'arsenal réglementaire concernant la prise en compte des risques est la garantie d'une construction parasismique, assurant la protection des biens et des personnes. La problématique n'est cependant pas aussi simple :

- en termes de protection parasismique il reste encore à convaincre tous les acteurs, notamment les particuliers, mais aussi les professionnels, d'abandonner des habitudes souvent néfastes en matière de construction, et de se conformer aux règles de l'art ;
- en termes d'occupation des sols et d'aménagement, il reste à prendre en compte les contraintes liées à l'aléa sismique dans les pratiques d'aménagement, au même titre que celles associées au fonctionnement propre de la société, si l'on ne veut pas répéter les erreurs du passé et aggraver la situation actuelle.

La prise en compte du risque sismique à Mamoudzou et des effets induits dans les projets de construction apparaît comme un enjeu majeur pour la sécurité des générations futures.

Pour appliquer ces dispositions élémentaires, encore faut-il qu'elles soient connues, et qu'un cadre réglementaire astreigne les constructeurs, aménageurs et urbanistes à les suivre. Une des priorités serait donc de transposer les constats techniques des études de microzonage en documents opposables aux tiers. C'est précisément l'objet des plans de prévention des risques (PPR) dont la réalisation doit être une priorité pour la commune de Mamoudzou.

Dès à présent, Bour (2002) propose d'assimiler **Mayotte à une zone Ib** par analogie avec la réglementation parasismique française.

Il est possible d'utiliser pour les maisons individuelles à Mayotte les recommandations préconisées par l'AFPS sous forme d'un guide intitulé : **Guide CP-MI Antilles**. Bien que cet ouvrage ai été initialement rédigé à des fins d'application aux Antilles, les mesures qui y sont proposées sont tout à fait applicables à Mayotte.

« Ce guide de la construction parasismique des maisons individuelles est destiné à tous les acteurs impliqués dans la construction et se veut pédagogique autant qu'ouvrage de référence. Il couvre différents aspects de la construction parasismique, depuis le choix du site et la prise en compte de la nature du sol jusqu'à l'indispensable bonne qualité de l'exécution. Son utilisation implique par ailleurs des actions d'information et de formation des maîtres d'ouvrages, concepteurs, réalisateurs, entrepreneurs, contrôleurs, fabricants et fournisseurs des matériaux et de composants et … la volonté d'abandonner les mauvaises habitudes pour protéger les personnes et les biens ». Cet ouvrage est un recueil de recommandations pour les maisons individuelles et doit être utilisé comme tel, il ne fait pas office de règlement.

Suivant la classe (A, B, C ou D de type de futures installations à risque normal au sens des PS92) à laquelle appartiendra la future installation, il conviendra d'utiliser les spectres proposés dans la présente étude ou de conduire des études spécifiques suivant l'enjeu de l'installation concernée pour la prise en compte des effets de site.

En ce qui concerne la liquéfaction, l'étude de niveau A ayant abouti à l'établissement d'une carte de susceptibilité à la liquéfaction basée sur des critères qualitatifs, les recommandations établies ont pour but d'une part de confirmer la susceptibilité à la liquéfaction sur la base de critères quantifiables, et d'autre part d'évaluer le potentiel et l'intensité de liquéfaction (études de niveau B et C). En aucun cas il ne s'agit de déterminer un règlement d'aménagement au sens d'un PPR.

En conséquence selon la zone homogène considérée, nous recommandons en terme d'études de liquéfaction :

- zones à susceptibilité très faible à nulle : aucune disposition particulière ;
- zones à susceptibilités faible à modérée : réalisation de sondages descendus à 20 m avec établissement de granulométries et de sédimentométries, réalisation d'essais in situ (type SPT, pénétromètre statique ou pressiomètre), et mesure de la profondeur de nappe. Ces reconnaissances sont recommandées pour des constructions de type C et D (cf. classification PS 92) et les installations classées ;
- <u>zones à susceptibilités élevée à très élevée</u> : réalisation de sondages descendus à 20m avec établissement de granulométries et de sédimentométries, réalisation d'essais in situ (type SPT, pénétromètre statique ou pressiomètre), et mesure de la profondeur de nappe. Ces reconnaissances sont recommandées pour des constructions de type B, C D et les installations classées.

Un bureau d'étude spécialisé devra conduire ces études complémentaires et en analyser les résultats.

Par assimilation avec les recommandations de l'AFPS, si le potentiel de liquéfaction calculé montre un facteur de sécurité inférieur à 1,5, il est recommandé de construire en ayant pris soin au préalable de traiter les sols ou de renforcer les fondations de l'ouvrage.

12.3. UNE ATTENTION PARTICULIERE A APPORTER AU CHOIX DU SITE DE CONSTRUCTION

Les effets des séismes sont de deux types :

Les effets directs : ils sont liés à un déplacement sur un plan de faille, lorsque celle ci atteint la surface. Ils sont aussi liés à la propagation des ondes sismiques dans le sol et dans les structures construites : il s'agit de l'ébranlement du sol, lui-même fortement dépendant du contexte géotechnique et de la géométrie du sous-sol (effets de site).

Les effets induits : il s'agit des phénomènes associés à une cause indirecte de l'ébranlement du sol, entraînant une rupture de la cohésion des sols. Ce sont les mouvements de terrain, la liquéfaction des sols, l'affaissement ou le tassement des terrains (effets induits). Les tsunamis (raz de marée dus à la propagation d'une onde marine) constituent également un phénomène indirect.

Si les dispositions constructives permettent désormais de se prémunir contre les actions sismiques, le choix du site de construction n'en demeure pas moins une phase primordiale dans la conception d'un projet. Les terrains où des effets de site/ des effets induits importants sont diagnostiqués, ne devraient être retenus qu'en dernier choix pour la construction courante : en effet, les dispositions constructives parasismiques peuvent conduire sur ces sites à un surcoût significatif, par rapport à celles recommandées pour des conditions standards de sols. Ceci est vrai en particulier pour les systèmes de fondation. Le **Guide CP-MI Antilles**, cité au paragraphe précédent, contient également des recommandations vis à vis du choix du site de construction pour les maisons individuelles. Le contexte de Mayotte est adapté à l'application des recommandations faites dans ce guide.

La bonne tenue d'un ouvrage, quel qu'il soit et quel que soit le site, réside dans le respect de la prise en compte des contraintes naturelles, et ce dès la phase de conception du projet.

13. Bibliographie

- AFNOR (1995) Règles de construction parasismique : règles PS applicables aux bâtiments, dites règles PS 92. AFNOR, Paris, norme française NF P 06-013.
- Association Française du Génie Parasismique (1990) Recommandations AFPS 90 pour la rédaction de règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes aux séismes. Presses des Ponts et Chaussées, Paris.
- Association Française du Génie Parasismique (1993) Guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique. AFPS, St-Rémy-lès-Chevreuse.
- Audru J.C., Bitri A., Desprats J.F., Mathon C., Maurillon N., Sabourault P., Sedan M. et Sedan O. (2002) – Projet risques naturels et érosion à Mayotte : résultats d'année 1. Rapport BRGM/RP-51738-FR, 2002 MAYOTTE 03.
- Bachèlery P. et Coudray J. (1993) Carte volcano-tectonique (1/50 000) et notice explicative de la Grande Comore (Ngazidja). *Ed. Ministère français de la Coopération*, 39 p.
- Bitri A., Le Bégat S., Baltassat J. M., Goury J.C. (1997) Détermination des vitesses de cisaillement des sols à partir de la dispersion des ondes de Rayleigh, Rapport BRGM R39877.
- Bour M et Sedan O. (2002) Note sur le positionnement de Mayotte en matière de règles parasismiques. Rapport BRGM/RP-51841-FR.
- Cruchet M. et Rossi F. (2000) Cartographie à 1/10 000 de l'aléa mouvement de terrain du bassin de risques de Koungou, Mamoudzou, Dzaoudzi_Labattoir, Pamandzi, île de Mayotte. Rapport BRGM RP-50730-FR.
- Debeuf D. et Bachèlery P. (2001) Carte lithologique à 1/10 000 des villes de Mamoudzou et Koungou, Mayotte. Rapport d'étude du Laboratoire des Sciences de la Terre de l'Université de la Réunion.
- Desgrolard F. (1996) Pétrologie des laves d'un volcan intraplaque océanique : le Karthala, Île de la Grande Comore (RFI des Comores). Thèse Univ. Grenoble 1.
- EC8 Draft N°4 (2001) EuroCode 8 : Design of structures for earthquake resistance. Part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings. Final Project Team Draft (Stage 34) December 2001.
- Emerick C.M. and Duncan R.A. (1982) Age progressive volcanism in the Comores archipelago, Western Indian Ocean and implications for Somali plate tectonics. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 60, p. 415-428.
- Esson J., Flower M.F.J., Strong D.F., Upton B.G.J., Wadsworth W.J. (1970) Geology of the Comores archipelago, Western Indian Ocean. *Geol. Mag.*, p. 549-557.

Gevrey A., (1870) - Essais sur les Comores. Reédition Éd. du Baobab 1997, Mamoudzou (Mayotte).

- Haas H. et Hugues G (2002) analyse granulométrique de sables de sondages de Kaouéni, Mayotte. Rapport d'essai 02/189 ANA/CMI.
- Lachassagne P., Cruchet M., Daesslé M. et Lebon D. (2000) Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte. Campagne prioritaire d'étude et de forages de reconnaissance et d'exploitation (juin 1999 octobre 2000). Compte-rendu des travaux et principaux résultats géologiques et hydrogéologiques. Rapport BRGM RP-50428-FR.
- Malod J., Mougenot D., Raillard S. et Maillard A. (1991) Nouvelles contraintes sur la cinématique de Madagascar : les structures de la ride de Davie. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, 312, p. 1639-1646.
- Modaressi H., Foerster E. and A. Mellal (1997) Computer-aided seismic analysis of soils, Proc. Of th 6th Int. Symp. On Numerical models in Geomechanics, NUMOG VI, Montréal, Québec, Canada, July 2-4.
- Mouron R. (2002) BSS-ES Mayotte 2001, rapport de fin d'année 1. rapport BRGM/RP-51925-FR, 25p.
- Nakamura Y. (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *QR of RTRI*, 30, 1, p. 25-33.
- Nakamura Y. (1996) Real-Time Information Systems fir Seismic Hazards Mitigation UrEDAS, HERAS and PIC. *QR of RTRI*, 37, 3, p. 112-127.
- NERC (1994) Gebco Digital Atlas General bathymetric chart of the oceans. British Oceanographic Data Center, Merseyside, UK.
- Nogoshi M., and T. Igarashi (1971) On the propagation characteristics of microtremors. *Jour. Seism. Soc. Japan*, Vol 23, p. 264-280.
- Nougier J., Cantagrel J.M. and Karche J.P. (1986) The Comores archipelago in the western Indian Ocean: volcanology, geochronology and geodynamic setting. *Journal of African Earth Sciences* 5, p. 135-145.
- Sabourault P. (1999) Du microzonage à la prédiction de mouvements forts : confrontation de mesures de terrain, de simulations numériques et de modélisations sur modèles réduits centrifugés. Thèse de doctorat de l'université de Marne la Vallée.
- Sabourault P. et Bitri A. (2001) Détermination de la géométrie des formations sédimentaires de la vallée du Grésivaudan, autour du forage Montbonnot (Isère) : utilisation des méthodes H/V et SASW. Rapport BRGM RP 51161 FR.

- SEGC (2001) Étude géotechnique de l'école de Kavani Briquetterie. Rapport Segc Mayotte/IT/156/2001.
- SEGC (2002) Étude géotechnique du complexe sportif de Kavani. Rapport Segc Mayotte/EM/196/2002.
- SHOM (1974) Ile de Mayotte (partie Sud-Ouest) à 1/35 000, carte marine n° 6530.
- SHOM (1974) Ile de Mayotte à 1/156 100, carte marine n° 6237.
- SHOM (2000) Ile de Mayotte (partie Est) à 1/35~000, carte marine n° 7493.
- SHOM (2000) Ile de Mayotte (partie Nord) à 1/35 000, carte marine n° 7492.
- Späth A., Le Roex A. et Duncan R.A. (1996) The Geochemistry of lavas from the Comores Archipelago, Western Indian Ocean: Petrogenesis and Mantle Source Region Characteristics. *Journal of Petrology*, vol. 37-4, p. 961-991.
- Stieltjes L. (1988) Carte géologique de Mayotte à 1/50 000 et sa notice. Éd. BRGM.
- Terrier M., Audru J.C., Bour M. et Dominique P. (2000) Étude de l'aléa sismique régional de l'île de Mayotte ; détermination des mouvements sismiques de référence. Rapport BRGM RP-50250-FR.
- Thomassin B. (1999) Mayotte, île volcanique à large lagon (N. Canal de Mozambique, Océan Indien) : sa construction et celles de ses récifs coralliens. *Bulletin des Naturalistes, Historiens et Géographes de Mayotte*, n° 1, p. 4-18.
- Upton B.G.J. (1982) Oceanic islands. In Nairn E.M. and Stehli F.G. (Eds) *The Ocean Basin and Margins*, 6. New York: Plenum, p. 585-647.
- Vuceti C. and Dobry R. (1991) Effect of soil plasticity on cyclic response. J. Geotech. Eng., ASCE, 117 (1), p. 89-107.
- Youd T.L. and Perkins D.M. (1978) Mapping of liquefaction induced ground failure potential. Journal of the geotechnical Engineering Division, ASCE 104 (GT4), p. 433-446

Annexe 1 : Synthèse des mesures SASW et H/V effectuées en mai 2002 sur Mamoudzou-centre









Rapport BRGM/RP-51839-FR, 2002 MAYOTTE 05

Point 7 : Terrain en friche sur le bord ouest du cratère de Kavani (Long : 45.2198, Lat : -12.78285)









b) Profil en vitesse d'onde de cisaillement Vs et onde de compression Vp issus des mesures SASW

















<u>Point 11: Milieu préfecture</u> (Long : 45.22984, Lat : -12.77644)













Rapport BRGM/RP-51839-FR, 2002 MAYOTTE 05

Point 13 : Sud du stade du carrefour de Baobab (Long : 45.22676, Lat : -12.78643)







b) Profil en vitesse d'onde de cisaillement Vs et onde de compression Vp issus des mesures SASW



Point 33 : Pointe Mahabo

<u>Point 34 : Haut des 100 villas</u> (Long : 45.22474, Lat : -12.78165)



a) Courbe H/V

b) Profil en vitesse d'onde de cisaillement Vs et onde de compression Vp issus des mesures SASW









Point 35 : Bas des 100 villas

<u>Point 36 : Bord nord du cratère de Kavani</u> (Long : 45.22176, Lat : -12.77925)





Point 37 : Bord du stade près du collège (Long : 45.22736, Lat : -12.78189)





Courbe H/V











<u>Point 62 : Hôpital</u> (Long : 45.22764, Lat : -12.77784)



Microzonage sismique de Mamoudzou-centre

BRGM SERVICE SAR/RÉU Antenne de Mavotte

Antenne de Mayotte BP 1398 – 97600 Mamoudzou – France –Tél. : 33 (0)2 69 61 28 13