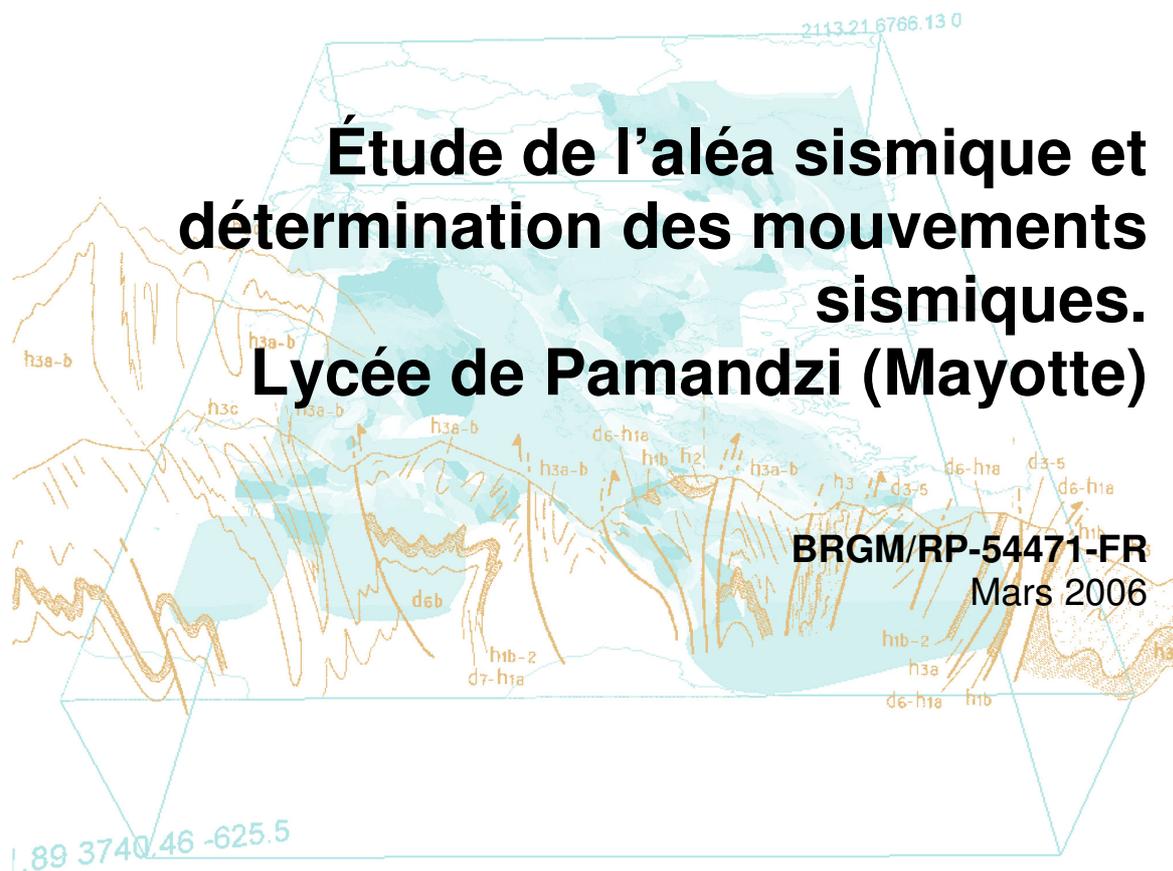


Document public



Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Lycée de Pamandzi (Mayotte)

BRGM/RP-54471-FR

Étude réalisée dans le cadre des projets de service
public du BRGM 06RISG61
Mars 2006

J. Rey, A. Roullé, F. De Martin, J.-C. Audru et G. Eucher

Vérificateur :

Nom : P. Dominique

Date :

Signature :

(Ou Original signé par)

Approbateur :

Nom : P. Roubichou

Date :

Signature :

(Ou Original signé par)

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : Aléa sismique, effet de site, Pamandzi, Mayotte, Comores.

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

Rey J., Roullé A., De Martin F., Audru J.-C. et Eucher G. (2006) – Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Lycée de Pamandzi (Mayotte). Rapport BRGM/RP-54471-FR, 31 p., 7 Illust., 6 tabl., 1 annexe.

Synthèse

Cette étude a été réalisée à la demande de la Direction de l'Équipement (DE) de Mayotte dans le cadre de la vérification de la tenue sous sollicitation sismique du projet d'extension du lycée de Pamandzi (Mayotte). Le spectre de réponse élastique permettra de dimensionner le projet en intégrant la prise en compte de l'aléa sismique régional et local.

La source sismique retenue est une source proche (distance focale à 10 km). L'intensité du séisme de référence est de VII-VIII MSK sur le site du lycée de Pamandzi.

Une configuration du type de sols correspondant au modèle géomécanique à l'aplomb du projet a été définie afin de tenir compte des conditions particulières du site du lycée de Pamandzi. Les spectres spécifiques qui en résultent sont fournis en Illustration 6 et Tableau 6.

L'accélération horizontale maximale tenant compte 1) des conditions de site du lycée et 2) de la classe C des installations, est de **0.24 g (soit 2.4 m/s²)** (valeur de l'accélération pour T=0 s sur le spectre de réponse spécifique représenté Illustration 6).

Ces conclusions ne valent que pour les hypothèses retenues pour la présente étude. Ces hypothèses sont fondées sur l'exploitation des reconnaissances disponibles à ce jour. Si en cours de travaux, des conditions de sols sensiblement différentes venaient à être rencontrées, il conviendrait de réexaminer si les résultats de la présente étude sont encore valables.

Sommaire

Synthèse	5
1. Introduction	9
2. État de la réglementation à Mayotte	11
3. Détermination des mouvements sismiques de référence au rocher	13
3.1. CARACTERISTIQUES DU SEISME DE REFERENCE.....	13
3.2. CALCUL DES MOUVEMENTS SISMQUES DE RÉFÉRENCE A MAYOTTE.....	13
4. Synthèse géologique et géotechnique	17
4.1. PREAMBULE.....	17
4.2. DONNEES.....	17
4.2.1. Contexte géologique.....	17
4.2.2. Contexte géotechnique et géophysique.....	17
4.3. CARACTERISATION DES UNITES GEOMECHANQUES.....	18
4.3.1. Caractéristiques.....	18
4.3.2 Récapitulatif.....	19
4.4. HYDROGEOLOGIE.....	19
4.5. ÉTABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS.....	19
5. Spectres de réponse compte tenu des conditions de site	21
5.1. PRÉSENTATION DU PROBLÈME.....	21
5.1.1. Méthodes empirico-statistiques.....	21
5.1.2. Méthodes numériques.....	21
5.2. CHOIX DU SPECTRE SPÉCIFIQUE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE.....	22
6. Conclusions	26
7. Références bibliographiques	27
ANNEXE 1	29

Liste des illustrations

Illustration 1 – Localisation du projet de construction du lycée de Pamandzi (polygone rouge). Extrait de la carte IGN 4410 Nord au 1/25000 ^{ème}	9
Illustration 2 - Spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant. Amortissements 2, 5, 10 et 20 %	14
Illustration 3 – Coupe schématique ouest-est de Grande Terre (à gauche) à Petite Terre (à droite).	17
Illustration 4 : Localisation des mesures H/V pour le lycée de Pamandzi.....	18
Illustration 5 - Comparaison du spectre spécifique au rocher horizontal affleurant avec ceux tenant compte des effets de site et du spectre retenu pour un amortissement de 5%.	23
Illustration 6 – Spectre de réponse élastique horizontal tenant compte des conditions de site et de la classe d'ouvrage (classe C) du lycée de Pamandzi. Amortissements 2, 5, 10 et 20%	24
Illustration 7 - Résultats des mesures H/V réalisées sur le site du lycée de Pamandzi.	30

Liste des tableaux

Tableau 1 – Séisme de référence retenu pour l'étude de l'aléa sismique sur le site du lycée de Pamandzi sur l'île de Mayotte.	13
Tableau 2 - Valeurs de A, V et D du spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant.....	15
Tableau 3 – Caractéristiques mesurées moyennes des formations géologiques.	19
Tableau 4 – Colonnes de sol. Vs : vitesse des ondes de cisaillement en m/s; Vp : vitesse des ondes longitudinales ; Ip = Indice de plasticité.....	19
Tableau 5 - caractéristiques des accélérogrammes réels utilisés pour la modélisation numérique.....	22
Tableau 6 – Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site et de la classe d'ouvrages à considérer pour le lycée de Pamandzi. Valeurs de A, V et D.	25

Liste des annexes

ANNEXE 1	29
----------------	----

1. Introduction

Cette étude a été réalisée à la demande de la Direction de l'Équipement (DE) de Mayotte pour son projet d'agrandissement pour le lycée de Pamandzi (Petite Terre, Mayotte). La DE a souhaité obtenir un spectre de réponse élastique utilisable pour l'ensemble de son projet, localisé par un rectangle rouge en Illustration 1. Ce spectre permettra de dimensionner le projet en intégrant la prise en compte de l'aléa sismique régional et local.

Par ailleurs, le microzonage sismique de l'aéroport de Pamandzi réalisé en 2002 (Sabourault *et al.*, 2002) par le BRGM avait établi qu'il y avait peu d'effet de site topographique sur le secteur de Pamandzi et que la susceptibilité à la liquéfaction y était faible à nulle. Au vu de ces résultats, l'analyse de la liquéfaction n'a pas été effectuée dans cette étude.

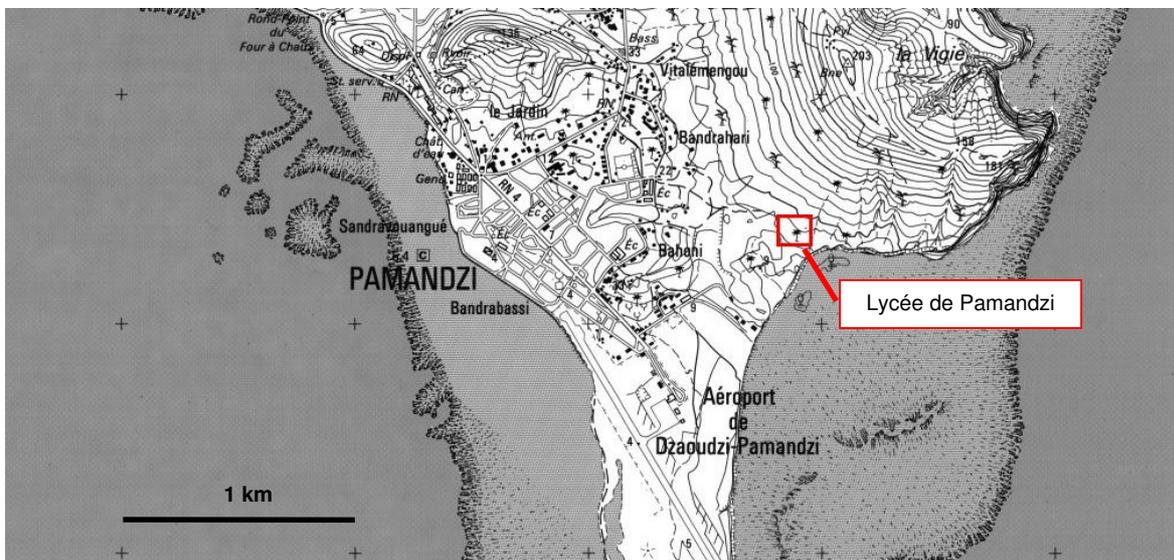


Illustration 1 – Localisation du projet de construction du lycée de Pamandzi (polygone rouge).
Extrait de la carte IGN 4410 Nord au 1/25000^{ème}

Cette étude comprend successivement :

- Un rappel de la réglementation en vigueur,
- Un rappel du contexte sismotectonique de l'île de Mayotte,
- Un rappel des caractéristiques du séisme de référence sur le site adapté au contexte sismotectonique,
- Une synthèse géotechnique à partir des différents essais réalisés sur le site permettant de déterminer le modèle de sol multicouche à l'aplomb du site,
- La détermination des mouvements sismiques de référence sous la forme de spectres spécifiques, d'une part au rocher et, d'autre part, en tenant compte des conditions de site.

2. État de la réglementation à Mayotte

Mayotte n'est pas soumise pour l'instant à la réglementation parasismique nationale française (zonage sismique national présenté dans le décret n°91-461 du 14 mai 1991). Toutefois, Mayotte peut être soumise à des séismes potentiellement destructeurs, une démarche de prise en compte du risque sismique dans cette île semble donc à être encouragée afin de protéger la population y résidant.

Par ailleurs, compte tenu des résultats préliminaires obtenus par le BRGM (Bour et Sedan, 2002) et de façon à proposer une définition des mouvements sismiques plus adaptée aux conditions locales que l'approche forfaitaire (PS92, EC8), il sera procédé à un calcul se basant sur la démarche préconisée par l'arrêté ministériel du 10 mai 1993 fixant les règles parasismiques applicables aux installations soumises à la législation sur les installations classées, ainsi que par sa circulaire d'application du 27 mai 1994. Toutefois, la majoration des spectres proposés d'un degré d'intensité pour un calcul au Séisme Majoré de Sécurité (SMS) ne sera pas appliquée.

L'étude sera donc basée sur une évaluation déterministe de l'aléa sismique régional qui bénéficiera en particulier des résultats des travaux réalisés par le BRGM :

- en 2000, par Terrier M., Audru J.C, Bour M., Dominique P. – Étude de l'aléa sismique régional de l'île de Mayotte ; détermination du mouvement sismique de référence. Rapport BRGM RP-50250-FR ;
- en 2002 par Sabourault P., Sedan O., Audru J.C., Mathon C., Nédellec J.L, Bitri A., Bour M. et Le Brun B. (2002) - Microzonage sismique de Mamoudzou-centre. Rapport BRGM/RP-51839-FR.

L'approche déterministe spécifique (arrêté du 10 mai 1993) consiste à :

- procéder à l'évaluation déterministe de l'aléa sismique régional, à partir d'une analyse sismotectonique.
- définir l'intensité du séisme de référence. Cette définition conduira à fixer les hypothèses de sollicitations sismiques (caractéristiques de la source, distance focale) à retenir pour le calcul du spectre de réponse élastique horizontal au rocher horizontal affleurant ;
- calculer le spectre de réponse élastique horizontal pour une condition standard de sol (rocher horizontal affleurant) ;
- calculer les spectres de réponse élastique horizontaux tenant compte des conditions particulières du site.

3. Détermination des mouvements sismiques de référence au rocher

3.1. CARACTERISTIQUES DU SEISME DE REFERENCE

L'intensité la plus forte obtenue sur l'île de Mayotte est induite par le séisme du 1^{er} décembre 1993, d'intensité épacentrale estimée à VII-VIII, qui correspond à une source sismique proche (Terrier *et al.*, 2000). Le séisme du 1^{er} décembre 1993 est le séisme de référence de l'unité sismotectonique de l'archipel des Comores contenant Mayotte. Les caractéristiques focales de ce séisme (intensité épacentrale, profondeur focale, magnitude) sont données dans le Tableau 1. En l'état actuel des connaissances, aucun autre séisme de référence n'est susceptible de conduire à des mouvements plus pénalisants sur l'île de Mayotte. Pour les besoins de l'étude, ce séisme est ramené sous le site, en position la plus défavorable, c'est-à-dire à une distance focale de 10 km.

	Séisme de référence
Date	1 ^{er} décembre 1993
Intensité épacentrale (MSK)	VII-VIII
Profondeur focale (km)	10
Magnitude	5,2
Distance focale minimale au site (km)	10

Tableau 1 – Séisme de référence retenu pour l'étude de l'aléa sismique sur le site du lycée de Pamandzi sur l'île de Mayotte.

3.2. CALCUL DES MOUVEMENTS SISMIQUES DE RÉFÉRENCE A MAYOTTE

Les mouvements sismiques de référence susceptibles d'être induits au rocher horizontal affleurant sur l'île de Mayotte, sont estimés à partir du séisme de référence identifié au paragraphe 3.1.

Le spectre spécifique pour l'île de Mayotte est présenté pour des amortissements de 2, 5, 10 et 20 % en Illustration 2. Pour les amortissements différents de 5 %, les coefficients de passage sont adaptés de ceux proposés par Newmark *et al.* (1976) ou par les règles parasismiques françaises :

pour des fréquences inférieures à 3 Hz :	pour des fréquences supérieures à 3 Hz :
- passage de 2 à 5 % : 1,20 ;	- passage de 2 à 5 % : 1,37 ;
- passage de 5 à 10 % : 1,20 ;	- passage de 5 à 10 % : 1,37 ;
- passage de 10 à 20 % : 1,20.	- passage de 10 à 20 % : 1,37.

Les valeurs correspondantes de déplacement D, de vitesse V et d'accélération A en fonction de la fréquence F sont précisées sur le Tableau 2 pour chacun des spectres à 2, 5, 10 et 20 % d'amortissement. Les valeurs intermédiaires seront interpolées linéairement sur les diagrammes logarithmiques.

Rappelons que ce spectre est défini « au rocher horizontal affleurant », autrement dit pour des conditions standard de sol ferme à rocheux. Selon les terrains (épaisseur et

résistance mécanique des formations en place) sur lesquels reposent les installations de l'île de Mayotte, les mouvements sismiques de référence doivent tenir compte des conditions locales de site.

L'accélération horizontale maximale susceptible d'être produite sur Mayotte par le séisme de référence retenu « au rocher horizontal affleurant » vaut 0,15 g.

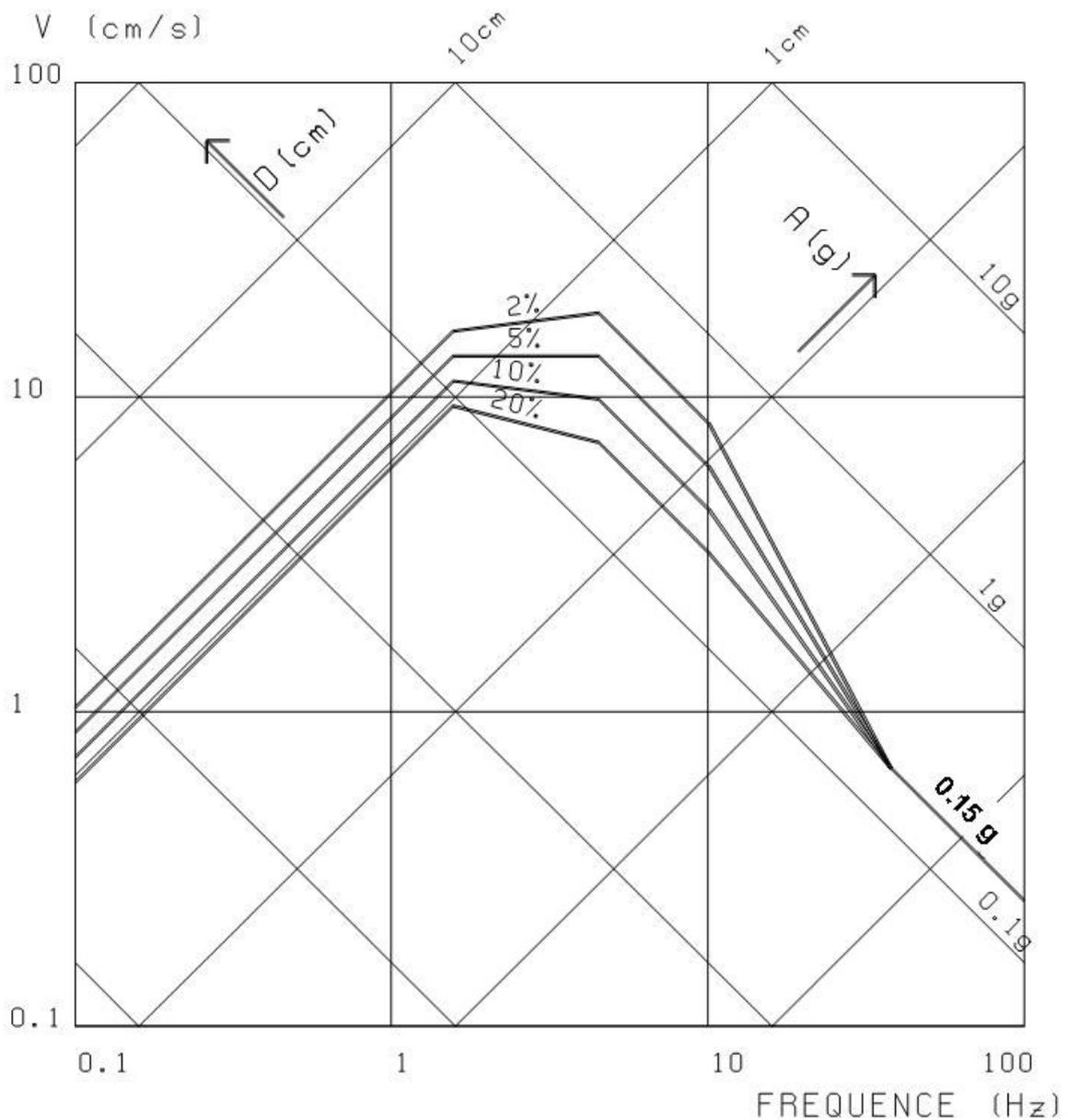


Illustration 2 - Spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant.
Amortissements : 2, 5, 10 et 20 %.

F (Hz)	amortissement (%)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
0,1	2	0,00065	1,03	1,64
0,1	5	0,00054	0,86	1,37
0,1	10	0,00045	0,72	1,14
0,1	20	0,00038	0,60	0,95
1,57	2	0,160	16,20	1,64
1,57	5	0,133	13,50	1,37
1,57	10	0,111	11,25	1,14
1,57	20	0,092	9,38	0,95
4,5	2	0,523	18,50	0,65
4,5	5	0,382	13,50	0,48
4,5	10	0,279	9,85	0,35
4,5	20	0,203	7,19	0,25
10,1	2	0,523	8,22	0,13
10,1	5	0,382	6,00	0,09
10,1	10	0,279	4,38	0,07
10,1	20	0,203	3,20	0,05
38	tous	0,15	0,66	0

Tableau 2 - Valeurs de A, V et D du spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant.

4. Synthèse géologique et géotechnique

4.1. PREAMBULE

L'objectif de cette analyse géotechnique est d'identifier et de caractériser une ou plusieurs colonnes de « sol » (formations géologiques) représentatives du site en dehors des zones où le rocher est affleurant ou sub-affleurant, afin de calculer le spectre de réponse tenant compte des conditions de site.

4.2. DONNEES

4.2.1. Contexte géologique

L'île volcanique de Petite Terre a la particularité d'être incorporée à la barrière récifale. En effet, Petite Terre a été construite par des éruptions volcaniques récentes et postérieures à la formation de la barrière récifale. Les matériaux ont été émis par des cheminées ayant percé le récif. Après les éruptions volcaniques, la croissance du récif s'est poursuivie de sorte que le volcan a été bien intégré à la barrière (Guilcher, 1965).

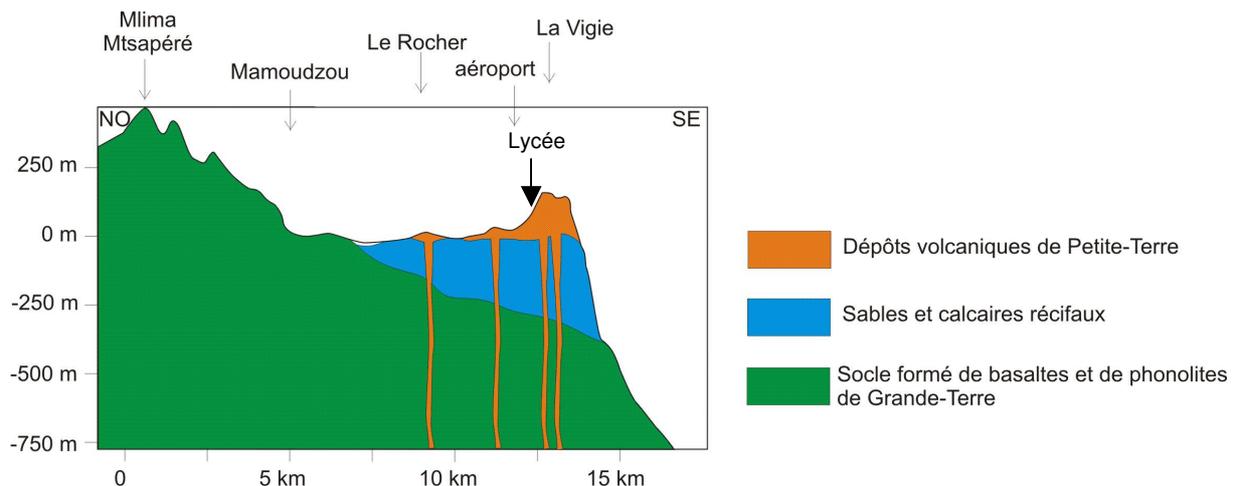


Illustration 3 – Coupe schématique ouest-est de Grande Terre (à gauche) à Petite Terre (à droite).

4.2.2. Contexte géotechnique et géophysique

Les données disponibles pour ce site sont les suivantes :

1. Le rapport concernant l'évaluation de l'aléa sismique local pour le projet d'extension de l'aéroport de Pamandzi
2. Une campagne d'essai réalisé par la DE (2 sondages pressiométriques avec essais tous les 2 mètres jusqu'à 8 et 14 m).
3. 6 mesures H/V sur le site du lycée ont également été réalisés par le BRGM : le détail de la méthode H/V et une analyse des résultats obtenus se trouvent en Annexe 1. La localisation des mesures est présentée en Illustration 4 ci-dessous :



Illustration 4 : Localisation des mesures H/V pour le lycée de Pamandzi

4.3. CARACTERISATION DES UNITES GEOMECHANIQUES

4.3.1. Caractéristiques

a. Cendres volcaniques

- *Lithologie :*

Il s'agit de cendres volcaniques avec quelques petits blocs de corail issus du démantèlement des récifs coralliens lorsque le volcan a émis ces cendres il y a environ 150 000 ans.

- *Épaisseur :*

Le sondage pressiométrique SP1 met en évidence une épaisseur de 14 mètres et le SP2 une épaisseur de 8 mètres.

- *Essais pressiométriques :*

Selon l'essai SP1 de la DE de Mayotte :

- la pression limite nette PI^* varie entre 1.23 et 9.36 Mpa. Le module pressiométrique E_m est dans une frange située entre 35.7 et 213.3 MPa. Le rapport E_m/PI^* varie entre 5.6 et 118. Ces valeurs correspondent à un sol de résistance mécanique moyenne (type b selon les règles PS92 – Sols granulaires moyennement compacts ou rocher fracturé).

Selon l'essai SP2 de la DE de Mayotte :

- la pression limite nette PI^* varie entre 1.05 et 2.76 Mpa. Le module pressiométrique E_m est dans une frange située entre 15.8 et 73.3 MPa. Le rapport E_m/PI^* varie entre 15.1 et 26.6. Ces valeurs correspondent à un sol de résistance mécanique moyenne (type b selon les règles PS92 – Sols granulaires moyennement compacts).

- *Essais H/V :*

Sur les mesures H/V présentées en Annexe 1 concernant le lycée de Petite Terre, de légers pics sont visibles aux alentours de 2Hz pour l'ensemble des essais, mais leur amplitude est trop faible pour être exploitable.

- *Essais SASW :*

Aucun essai SASW n'a été réalisé sur ce site. D'après le rapport BRGM/RC-52438-FR (Sabourault et al., 2003), les cendres sur le site de l'aéroport ont une vitesse d'onde de cisaillement d'environ 550 m/s.

b. Corail vacuolaire plus ou moins fracturé (récif)

Cet horizon a été rencontré à 8 mètres et à 14 mètres/TN et a cisailé les sondes. Les essais ont été arrêtés à l'issue de 4 échecs pour passer au-delà de cette formation. Pas d'éléments mécaniques sur cet horizon. Toutefois, dans la mesure où en sondant cette formation, des sables issus de son érosion ont été distingués, le complexe corallien est supposé relativement massif (épaisseur ~ 250 m). D'après le rapport du BRGM/RC-52438-FR (Sabourault et al., 2003), les vitesses d'ondes de cisaillement dans cet horizon sont supérieures à 600 m/s. Selon la classification établie dans les Règles PS92, il s'agit de « rocher fracturé » (type b).

4.3.2 Récapitulatif

Le Tableau 3 ci-dessous synthétise les données géotechniques et géophysiques exploitées.

Formation	Nature	Épaisseur	Caractéristiques pressiométriques	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Cendres	Cendres et ponces	8 à 14 m	1.05 à 9.36 MPa	550	-	Sols granulaires moyennement compacts (Type b)
Calcaires	Récif corallien vacuolaire	250 m	-	630	-	Rocher fracturé (Type b)
Calcaires	Récif corallien	-	-	1000	-	Sols cohérents durs (Type a)

Tableau 3 – Caractéristiques mesurées moyennes des formations géologiques.

4.4. HYDROGEOLOGIE

Sur l'ensemble des sondages réalisés, aucun n'a mis en évidence l'existence d'une nappe.

4.5. ÉTABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS

Le Tableau 4 ci-dessous récapitule les caractéristiques des deux colonnes de sol retenues pour l'étude.

Nature	Modèle de comportement	γ_h (kN/m ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Épaisseur	
					Colonne 1	Colonne 2
Cendres	Élastique	19,0	550	1030	14 m	8 m
Récif vacuolaire	Élastique	21,0	630	1200	250 m	250 m
Récif	Élastique	20,0	1000	1870	-	-

Tableau 4 – Colonnes de sol. Vs : vitesse des ondes de cisaillement en m/s; Vp : vitesse des ondes longitudinales ; I_p = Indice de plasticité.

5. Spectres de réponse compte tenu des conditions de site

5.1. PRÉSENTATION DU PROBLÈME

Lorsque les conditions de site sont différentes des conditions au rocher, il faut utiliser d'autres méthodes que celles déjà décrites au §3, permettant de prendre en compte les conditions de site.

5.1.1. Méthodes empirico-statistiques

Les descriptions des formations géologiques formant le sous-sol sont généralement très succinctes. Les paramètres de site sont donc classés en deux, voire trois catégories de sols décrites qualitativement.

Mais il existe également certaines descriptions quantitatives basées sur la vitesse des ondes de cisaillement (prospection SASW). Leur intérêt est de distinguer le rocher sain, caractérisé par une vitesse d'ondes S supérieure à 750 ou 800 m/s, d'un rocher altéré, fissuré ou recouvert de quelques mètres d'alluvions. Cette nuance est importante, car le rattachement de sols peu épais dans la catégorie des sites rocheux, est susceptible d'augmenter significativement le contenu hautes fréquences du mouvement du sol pour cette catégorie.

Les relations d'atténuation distinguant plusieurs classifications de sols doivent être utilisées avec prudence, car la diversité des sols rencontrés ne peut pas être traduite en deux ou trois catégories seulement. C'est pourquoi la méthode numérique est privilégiée.

5.1.2. Méthodes numériques

Elles dépendent du type de comportement pris en compte pour le sol :

- linéaire (élastique ou visco-élastique) ;
- non linéaire (linéaire équivalent, élasto-plastique).

Pour cette étude, un modèle de sol linéaire équivalent, viscoélastique est utilisé. Les modules de cisaillement G ($G=\rho V_S^2$) et les amortissements D ont été calculés à partir des vitesses d'ondes de cisaillement et des masses spécifiques de chaque couche. Ce modèle permet d'obtenir numériquement une fonction de transfert multicouche $T(f)$ de la colonne de sol, permettant le passage des conditions « rocher horizontal affleurant » aux conditions « site ».

La colonne de sol qui a été déterminée est utilisée avec le logiciel CyberQuake (Modaressi *et al*, 1997.) pour calculer sa réponse à une sollicitation sismique au rocher. Sont appliqués comme mouvement au substratum différents accélérogrammes (réels ou synthétiques) ayant une réponse spectrale proche du spectre spécifique retenu dans le cadre de l'étude pour calculer les accélérogrammes en surface résultant de l'amplification du signal par la colonne de sol.

La méthode employée est la suivante :

1. Utilisation de 4 accélérogrammes (2 synthétiques et 2 réels) caractéristiques du spectre spécifique de réponse au rocher horizontal et dont les caractéristiques en magnitude, distance et PGA sont similaires au séisme de référence;

- Les accélérogrammes synthétiques sont générés à l'aide du logiciel SIMQKE (Gasparini et Vanmarcke, 1976). Par itérations, ce code génère des histoires temporelles en accélération, artificielles et statistiquement indépendantes, dont les spectres de réponse et la durée du mouvement sismique sont en concordance avec les caractéristiques du mouvement de référence donné en entrée. La durée du mouvement sismique utilisé dans SIMQKE est définie à partir du couple magnitude-distance défini pour le séisme de référence en utilisant la relation d'atténuation de Abrahamson et Silva (1996)
- Les accélérogrammes réels sont recherchés dans des bases de données mondiales de mouvements forts du sol. Les accélérogrammes sélectionnés ont des caractéristiques proches du séisme de référence retenu dans le cadre de la présente étude (Tableau 5).

2. Calcul de la réponse de la colonne de sol soumise à ces 4 accélérogrammes à sa base.

Date heure TU	Lieu	Magnitude de moment (Mw)	Distance épicentrale (km)	Station	Accélération maximale du sol (PGA) (g)
12/10/1997 11 :08	Umbria-Marche (réplique), Italie	5.3	14	Colfiorito- Casermette	0.03
03/04/1998 07 :26	Umbria-Marche (réplique), Italie	5.2	38	Sellano Ouest	0.02

Tableau 5 - caractéristiques des accélérogrammes réels utilisés pour la modélisation numérique.

5.2. CHOIX DU SPECTRE SPÉCIFIQUE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE

L'étude géotechnique du chapitre 4 a permis de déterminer deux colonnes de sol correspondant à la configuration type rencontrée à l'aplomb du projet. Les spectres spécifiques montrés en Illustration 6 ont été obtenus directement à partir de la prise en compte des conditions de site avec le code *CyberQuake* à partir du spectre spécifique au rocher.

Après étude des résultats des simulations (Illustration 6), il apparaît que les deux colonnes de sol semblent représentatives des résultats issus de la méthode H/V puisqu'elles donnent des amplifications du mouvement sismique pour des fréquences entre 1.5 et 3 Hz (voir Annexe 1). Nous avons donc considéré les résultats obtenus pour les deux colonnes de sol pour la définition du spectre de réponse tenant compte des effets de site (courbe grise en Illustration 5).

Les installations présentes ou futures du site correspondent à la classe C des ouvrages dits « à risque normal » de la réglementation française, selon l'article 2 de l'arrêté du 29 mai 1997 (Journal Officiel du 3 juin 1997). En suivant les dispositions proposées dans le cadre des futures EuroCode 8, il convient donc d'appliquer au spectre spécifique en Illustration 5 (courbe verte) un coefficient multiplicateur de 1,2 (courbe orange en Illustration 5).

Le spectre spécifique résultant, tenant compte à la fois de l'aléa sismique régional, des effets de site lithologiques et de la classe d'ouvrage à considérer, est représenté en Illustration 6 pour les amortissements 2, 5, 10 et 20 %. C'est le spectre à considérer pour le dimensionnement des futures installations du lycée de Pamandzi. Selon la méthode donnée au paragraphe 3.2 pour le spectre au rocher, les valeurs du déplacement (D), de la vitesse (V) et de l'accélération (A) sont précisées en fonction de la fréquence (F), dans le Tableau 6 pour chacun des spectres à 2, 5, 10 et 20% d'amortissement.

On interpolera sur les diagrammes logarithmiques, pour les valeurs intermédiaires de déplacement, de vitesse et d'accélération.

L'accélération horizontale maximale tenant compte des conditions de site à retenir pour le lycée de Pamandzi (ouvrage de classe C) est de 0.24 g.

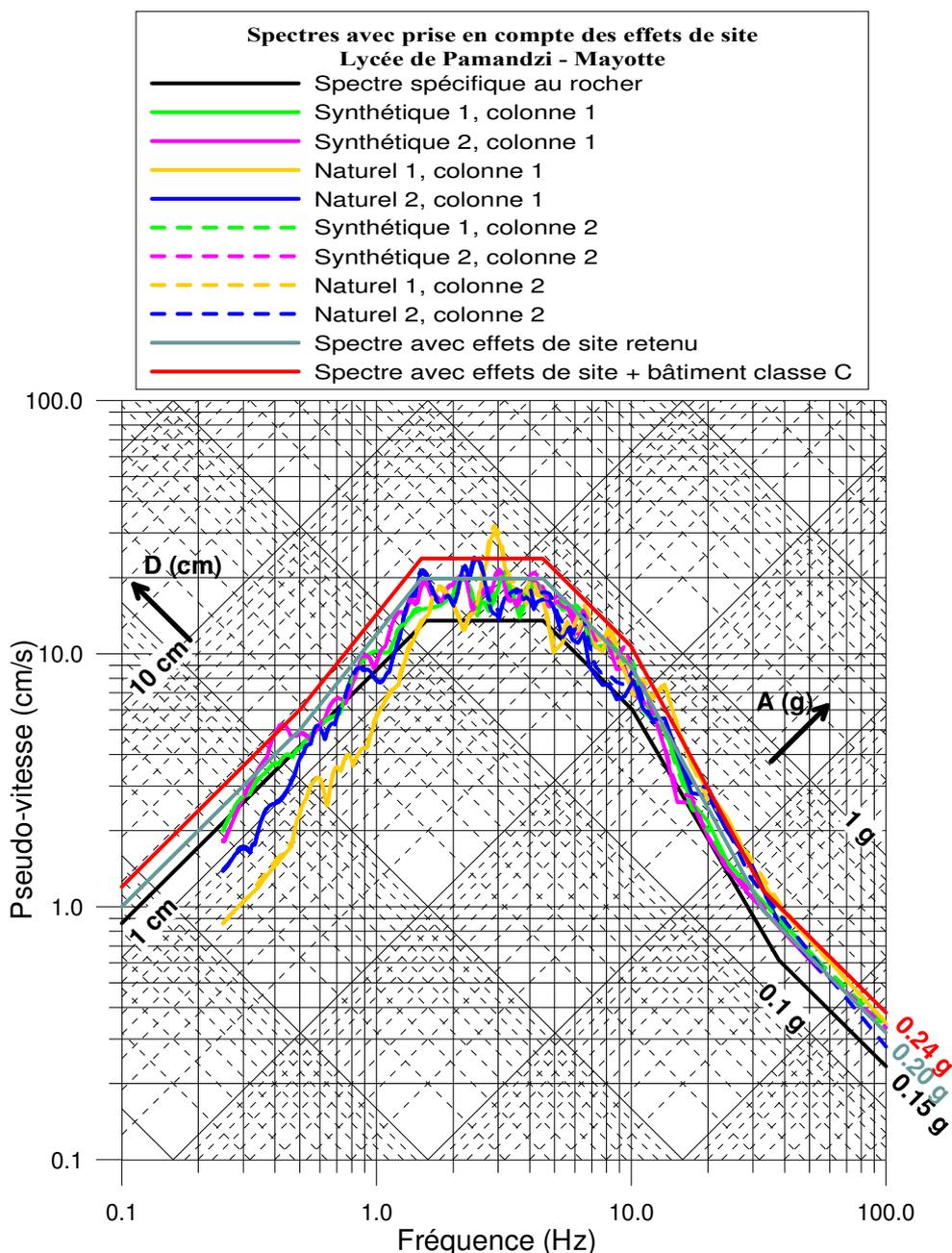


Illustration 5 - Comparaison du spectre spécifique au rocher horizontal affleurant avec ceux tenant compte des effets de site et du spectre retenu pour un amortissement de 5%.

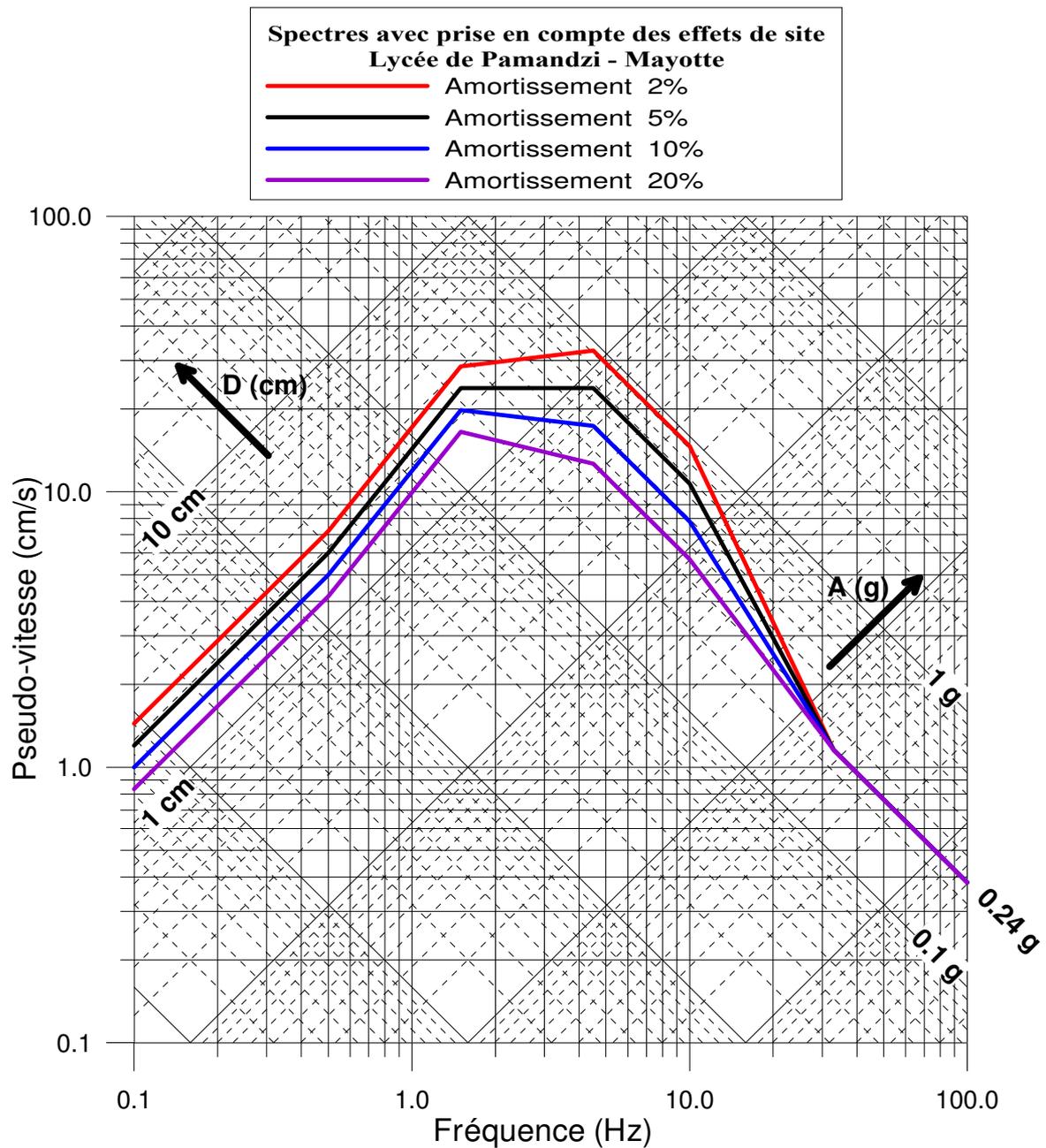


Illustration 6 – Spectre de réponse élastique horizontale tenant compte des conditions de site et de la classe d'ouvrage (classe C) du lycée de Pamandzi. Amortissements : 2, 5, 10 et 20%

F (Hz)	Amortissement (%)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
0.1	2	0.001	1.44	2.29
0.1	5	0.001	1.20	1.91
0.1	10	0.001	1.00	1.59
0.1	20	0.001	0.83	1.33
0.5	2	0.02	7.20	2.29
0.5	5	0.02	6.00	1.91
0.5	10	0.02	5.00	1.59
0.5	20	0.01	4.17	1.33
1.5	2	0.27	28.51	3.02
1.5	5	0.23	23.76	2.52
1.5	10	0.19	19.80	2.10
1.5	20	0.16	16.50	1.75
4.5	2	0.94	32.54	1.15
4.5	5	0.68	23.76	0.84
4.5	10	0.50	17.34	0.61
4.5	20	0.36	12.66	0.45
10	2	0.94	14.64	0.23
10	5	0.68	10.69	0.17
10	10	0.50	7.80	0.12
10	20	0.36	5.70	0.09
33	Tous amortissements	0.24	1.16	0.006
100	Tous amortissements	0.24	0.38	0.001

Tableau 6 – Spectre de réponse élastique horizontale avec prise en compte des effets de site et de la classe d'ouvrages à considérer pour le lycée de Pamandzi. Valeurs de A, V et D.

6. Conclusions

Le séisme de référence retenu pour cette étude est le séisme du 1^{er} décembre 1993, de magnitude locale 5.2, ramené à une distance de 10 km du site.

Dans un premier temps, le spectre spécifique a été défini « au rocher horizontal affleurant ». Ce spectre est représenté en Illustration 2 et dans le Tableau 2. L'accélération horizontale maximale « au rocher horizontal affleurant » est de 0.15 g.

Dans un deuxième temps, une analyse des données géologiques, géotechniques et géophysiques disponibles et acquises dans le cadre de cette étude sur le site a permis de définir deux colonnes de sols caractéristiques du site. Un spectre spécifique tenant compte des effets de site lithologiques a ainsi été calculé à l'aide d'un modèle numérique non linéaire (code de calcul CyberQuake, version 2000). Ce spectre tient aussi compte de la classe du bâtiment (classe C). Il est représenté en Illustration 6 et dans le Tableau 6.

L'accélération horizontale maximale du sol tenant compte des conditions de site pour le lycée de Pamandzi est de 0.24 g (soit 2.4 m/s²).

7. Références bibliographiques

- Abrahamson N.A., Silva W.J. (1996) – Empirical ground motion models, *Report to Brookhaven National Laboratory*.
- Audru J.C., Bitri A., Desprats J.F., Mathon C., Maurillon N., Sabourault P., Terrier-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.
- 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, 49 p., 24 fig., 7 tabl.
- Bour M. et Sedan O. (2002) – Note sur le positionnement de Mayotte en matière de règles parasismiques. Rapport BRGM/RP-51841-FR, 12 p., 2 fig., 2 tabl.
- Gasparini D., et Vanmarcke E.H. (1976) – Simulated earthquake motions with prescribed response spectra, M.I.T. Department of Civil Engineering Research Report R76-4, order n° 527.
- Guilcher A. (1965) – Les récifs coralliens et le lagon de l'île de Mayotte. Rapport ORSTOM.
- Modaressi H., Foerster E., 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.
- 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.
- Newmark N.M., Hall W.I., B. Mohraz (1976) - Statistical studies of vertical and horizontal earthquake spectra. Report for the Division of Safety U.S.N.R.C., Washington D.C., 20 555.
- Nogoshi M., and T. Igarashi (1971). On the propagation characteristics of microtremors. *Jour. Seism. Soc. Japan*, Vol 23, p. 264-280.
- 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., Bitri A. (2001) – Détermination de la géométrie des formations sédimentaires de la vallée du Grésivaudan autour du forage de Montbonnot (Isère) : utilisation des méthodes H/V et SASW. Rapport BRGM RP-51161-FR.
- Sabourault P., Sedan O., Audru J.C., Mathon C., Nédellec J.L., Bitri A., Bour M. et Le Brun B., avec la collaboration de J.P. Rançon (2002) – Microzonage sismique de Mamoudzou-Centre, île de Mayotte. Rapport BRGM/RP-51839-FR – 2002 Mayotte 05.
- Sabourault P., Zornette N., Bitri A., Nédellec J.L. et Audru J.C. (2003) – Projet d'extension de l'aéroport de Pamandzi, Mayotte. Evaluation de l'aléa sismique local. Rapport BRGM/RC-52438-FR.
- Terrier M., Audru J.C., Bour M., Dominique P. (2000). Etude de l'aléa sismique régional de l'île de Mayotte ; détermination des mouvements sismiques de référence. Rapport BRGM RP-50250-FR.

ANNEXE 1

Résultats des mesures H/V in situ

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. 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 les effets de site. 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, 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 : $f_0 = V_s / 4H$ (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) .

Interprétation des mesures

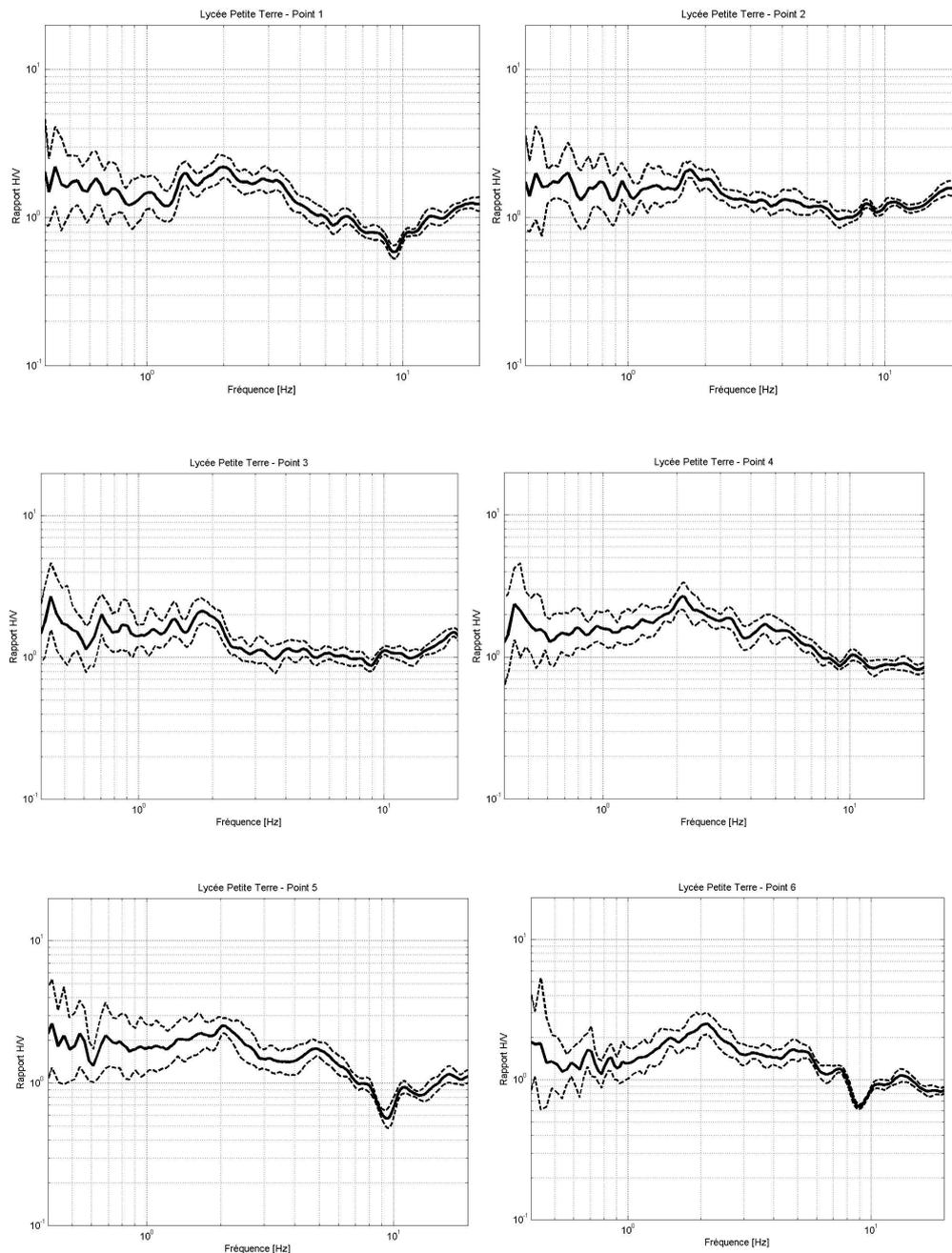


Illustration 7 - Résultats des mesures H/V réalisées sur le site du lycée de Pamandzi.

Les résultats sont assez homogènes d'un site de mesure à l'autre. De manière générale, une fréquence de résonance autour de 2 Hz est observée mais avec des amplifications relativement faibles (inférieures à 3).

Ce cas de figure correspond soit à un site localisé sur du rocher au sens sismique du terme ($V_s > 800$ m/s) soit à une augmentation régulière des propriétés mécaniques des sols avec la profondeur. Ces observations pourraient correspondre à la présence de coraux de vitesse 660 m/s proches des vitesses « rocher ».



BRGM Antenne de Mayotte
BP 1398, 97600 Mamoudzou, Mayotte
Tél. : 02 69 61 28 13 ; fax : 02 69 61 28 15