

Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques sur le site du lycée de Chirongui (Mayotte)

BRGM/RP 53832-FR
Juin 2005

A. Roullé, J.-C. Audru, S. Bernardie et J.-L. Nédellec.

Vérificateur :

Nom : P. DOMINIQUE

Date : 13 juin 2005

Signature :

(Ou Original signé par)

Approbateur :

Nom : Th. WINTER

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, Chirongui, Mayotte, Comores.

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

Roullé A., Audru J.-C., Bernardie S. et Nédellec J.-L. (2005) – Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques sur le site du lycée de Chirongui (Mayotte). Rapport BRGM/RP-53832-FR, 61 p., 14 fig., 16 tabl., 2 annexes.

Synthèse

Ce présent rapport a été réalisé 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 du lycée de Chirongui (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). Les intensités de référence du séisme de référence sont de VII-VIII MSK sur le site du lycée de Chirongui.

Une configuration du type de sols correspondant au modèle géotechnique à l'aplomb du projet a été définie afin de tenir compte des conditions particulières du site du lycée de Chirongui. Les spectres spécifiques qui en résultent sont fournis en Figure 9 et Tableau 12.

L'accélération horizontale maximale tenant compte 1) des conditions de site du lycée et 2) de la classe C des installations, est de 0.30 g (valeur de l'accélération pour $T = 0$ s sur le spectre de réponse spécifique représenté Figure 9).

Par ailleurs, le risque de liquéfaction sur le site étant très faible à nul, nous ne recommandons aucune mesure de protection spécifique. On soulignera que ces recommandations ne doivent pas conduire à s'affranchir du respect des règles générales de construction en vigueur (normes, règlements et règles de l'art). En particulier, on veillera à adapter le projet aux règles de construction sur sols compressibles.

Sommaire

Synthèse	5
1. Introduction.....	11
2. Synthèse sismotectonique.....	13
2.1. LE RIFT EST-AFRICAINE	13
2.2. LA RIDE DE DAVIE	13
2.3. LA ZONE DE FRACTURES DU BASSIN DU MOZAMBIQUE.....	14
2.4. LE BLOC CONTINENTAL DE MADAGASCAR.....	15
2.5. L'ARCHIPEL DES COMORES.....	15
3. État de la réglementation à Mayotte	17
4. Détermination des mouvements sismiques de référence.....	19
4.1. MÉTHODES D'ESTIMATION DU MOUVEMENT SISMIQUE.....	19
4.1.1. Approche empirico-statistique.....	19
4.1.2. Approche théorique.....	23
4.2. CARACTÉRISTIQUES DU SÉISME DE RÉFÉRENCE.....	23
4.2.1. Source retenue	23
4.2.2. Synthèse.....	24
4.3. CALCUL DES MOUVEMENTS SISMIQUES DE RÉFÉRENCE A MAYOTTE..	25
4.3.1. Hypothèses pour l'application des lois d'atténuation	25
4.3.2. Hypothèses pour l'application de SASSOM	25
4.3.3. Détermination du spectre spécifique associé au séisme de référence	26
5. Synthèse géologique et géotechnique.....	31
5.1. PRÉAMBULE.....	31
5.2. DONNÉES	31
5.2.1. Contexte géologique	31
5.2.2. Contexte géotechnique	31
5.3. CARACTÉRISATION DES UNITÉS GÉOMÉCANIQUES	33
5.3.1. Caractéristiques.....	33
4.3.3 Récapitulatif	35
5.4. HYDROGÉOLOGIE	35

5.5. ÉTABLISSEMENT DE COLONNES DE SOLS.....	35
6. Spectres de réponse compte tenu des conditions de site	37
6.1. PRÉSENTATION DU PROBLÈME	37
6.1.1. Méthodes empirico-statistiques	37
6.1.2. Méthodes numériques.....	37
6.2. CHOIX DU SPECTRE SPÉCIFIQUE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE 38	
6.3. COMPARAISON DU SPECTRE SPÉCIFIQUE RETENU ET DU SPECTRE FORFAITAIRE PS92	41
6.3.1. Rappel de la réglementation PS92	41
6.3.2. Comparaison PS92 vs. spectre spécifique	44
7. Appréciation des potentialités de liquéfaction	45
7.1. DÉFINITION ET MÉTHODE.....	45
7.1.1. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction.....	46
7.1.2. Susceptibilité quantitative à la liquéfaction	47
7.2. APPRÉCIATION DES POTENTIALITÉS DE LIQUÉFACTION DU SITE DU LYCÉE DE CHIRONGUI.....	49
7.2.1. Formations à analyser	49
7.2.2. Contexte hydrogéologique.....	49
7.2.3. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction.....	49
7.2.4. Susceptibilité quantitative et opportunité à la liquéfaction	51
7.2.5. Préconisations en terme de dispositions constructives	51
8. Conclusions.....	52
9. Références bibliographiques	53
ANNEXE 1.....	57
Détail de la méthode SASW	57
ANNEXE 2.....	59
Résultats des mesures H/V in situ.....	59

Liste des figures

Figure 1 – Localisation du projet de construction du lycée de Chirongui (zone en jaune).	11
Figure 2 – Cadre sismotectonique des Comores et de Mayotte (d'après Terrier et al., 2000).....	14
Figure 3 – Cadre géodynamique des Comores.	15
Figure 4 - Spectres calculés pour le séisme de référence et spectre spécifique proposé (en noir). Rocher « horizontal affleurant ». Amortissement 5 %.....	27
Figure 5 - Spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant. Amortissements 2, 5, 10 et 20 %.	28
Figure 6 – Contexte géologique local de Chirongui (Mayotte).	31
Figure 7 - Implantation des essais pressiométriques et des points de mesures H/V.	32
Figure 8 – Comparaison du spectre spécifique au rocher horizontal affleurant avec ceux tenant compte des effets de site et spectre proposé pour un amortissement de 5%.	39
Figure 9 – Spectre de réponse élastique horizontal tenant compte des conditions de site et de la classe d'ouvrages (classe C) du lycée de Chirongui . Amortissements 2, 5, 10 et 20% ...	40
Figure 10 – spectre élastique au rocher horizontal affleurant pour un sol de type S0 (règles PS92) et définition des points de repères utilisés ci-dessous.	42
Figure 11 – Spectres tenant compte des effets de site lithologiques sur le site du lycée de Chirongui.	44
Figure 12 – Courbes granulométriques des vases limono-sableuses	50
Figure 13 – Modèle de vitesse des ondes de cisaillement obtenu par inversion à proximité du site du projet de Chirongui	58
Figure 14 - résultats des mesures H/V réalisées sur le site du lycée de Chirongui.....	61

Liste des tableaux

Tableau 1 - Lois d'atténuation retenues pour la détermination des mouvements du sol induits par les sources sismiques sur Mayotte.....	21
Tableau 2 – Caractéristiques du séisme de référence le plus défavorable pour Mayotte	23
Tableau 3 – Séisme de référence retenu pour l'étude de l'aléa sismique sur le site du lycée de Chirongui sur l'île de Mayotte	24
Tableau 6 - Valeurs de PGA susceptibles d'être engendrées à Mayotte par le séisme de référence.....	26
Tableau 7 - Valeurs de A, V et D du spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant.....	29
Tableau 8 – Essais en laboratoire	33
Tableau 9 – Caractéristiques moyennes des formations géologiques.	35
Tableau 10 – Colonne de sol retenue. Vs : vitesse des ondes de cisaillement en m/s; Vp : vitesse des ondes longitudinales ; Dr = densité relative ; Ip = Indice de plasticité.	36
Tableau 11 : caractéristiques des accélérogrammes réels utilisés pour la modélisation numérique.....	38
Tableau 12 – Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site et de la classe d'ouvrages à considérer. Valeurs de A, V et D.	41

Tableau 13 – Valeurs des accélérations de calage (m/s^2) en fonction de la sismicité et de la classe de bâtiment considérée.	42
Tableau 14 – paramètres normés des spectres forfaitaires de type PS92 en fonction du type de sol.	43
Tableau 15 – Paramètres du spectre forfaitaire retenu selon les règles parasismiques PS92 pour un bâtiment de classe C sur un sol de type S2 dans une zone de sismicité 1b.	43
Tableau 16 – Examen des critères de susceptibilité qualitative (règles PS 92)	51

Liste des annexes

ANNEXE 1	57
ANNEXE 2	59

1. Introduction

Ce présent rapport a été réalisé à la demande de la Direction de l'Équipement de Mayotte (DE) pour son projet de lycée dans la ville de Chirongui (Mayotte). La DE a souhaité obtenir un spectre de réponse élastique utilisable pour l'ensemble de son projet, localisé en jaune sur la Figure 1. Ce spectre permettra de dimensionner le projet en intégrant la prise en compte de l'aléa sismique régional et local. La susceptibilité à la liquéfaction est également traitée dans le cadre de la présente étude.

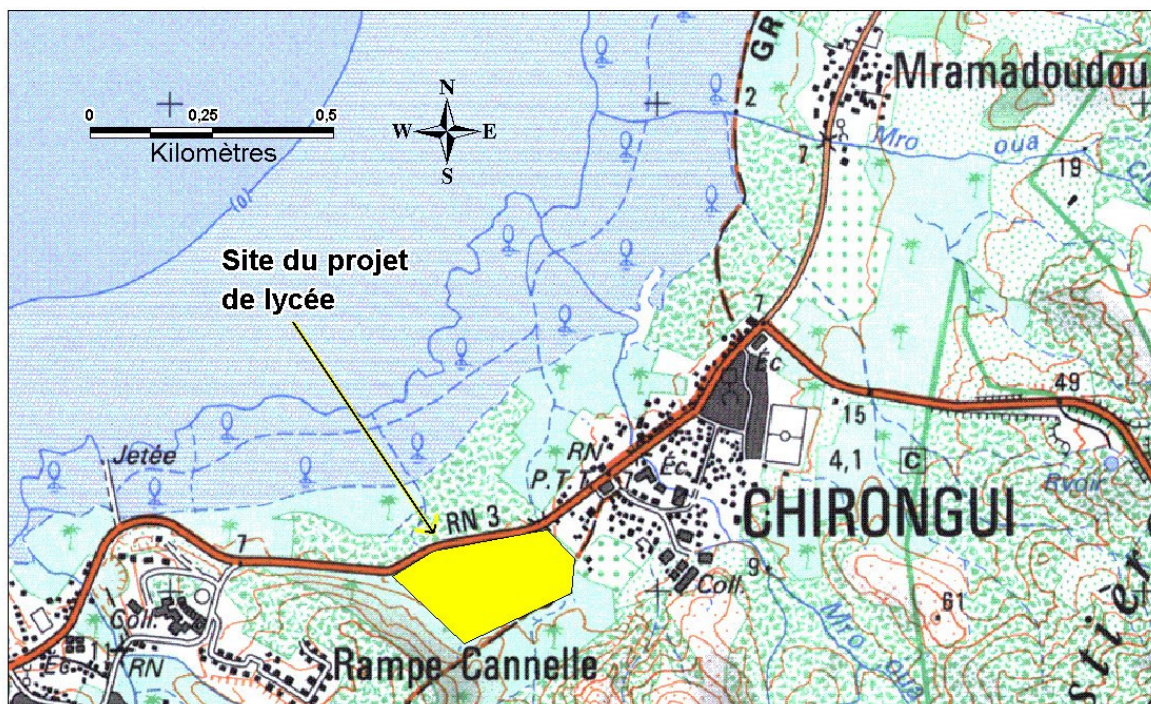


Figure 1 – Localisation du projet de construction du lycée de Chirongui (zone en jaune).

Notre étude comprend successivement :

- Un rappel du contexte sismotectonique de l'île de Mayotte,
- Un rappel des caractéristiques du séisme de scénario 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,
- Une comparaison des spectres forfaitaires PS92 avec le spectre spécifique tenant compte des effets de site obtenu auparavant
- L'étude de la potentialité de liquéfaction du site.

Ce type d'approche déterministe et spécifique du contexte sismotectonique de l'île de Mayotte et des conditions locales des sols au droit du site du lycée de Chirongui est mieux adaptée que les termes actuels de la réglementation française. Celle-ci est régie par l'arrêté du 29 mai 1997 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la catégorie dite « à risque normal », telle que définie par le décret n°91-461 du 14 mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique.

L'évaluation déterministe de l'aléa sismique s'appuie sur une analyse sismotectonique régionale, dans un rayon d'environ 500 km autour du site, sur la base d'une synthèse des données sismologiques (macrosismiques et instrumentales) et des connaissances géologiques (structurales, néotectoniques, champ de contraintes actuel). L'analyse sismotectonique permet d'identifier deux types d'unités sismotectoniques : soit des domaines sismotectoniques, soit des structures ou systèmes de structures sismogènes.

Une précédente analyse sismotectonique réalisée par le BRGM (Terrier *et al.*, 2000), a permis d'identifier des domaines sismotectoniques, des structures ou systèmes de structures sismogènes, à chacune desquelles est associé un séisme de référence. A partir de cette analyse, le spectre spécifique à considérer « au rocher » sur le site a été défini par Bour et Sedan (2002).

Le calcul des spectres de réponse élastique du séisme de référence est entrepris au « rocher horizontal », c'est-à-dire pour des conditions standard de sols, en utilisant les méthodes empirico-statistiques élaborées à partir de la compilation d'accélérogrammes réels obtenus pour des hypothèses magnitude-distance représentatives du séisme de référence. Les spectres de réponse tenant compte des conditions de site, s'obtiennent par le calcul de la réponse dynamique d'un modèle de sol multicouches, défini par les reconnaissances géotechniques, et soumis à sa base à un accélérogramme représentatif du mouvement au rocher. Le code de calcul utilisé, « Cyberquake version 2000 » (Modaressi *et al.*, 1997), permet de travailler dans le domaine linéaire-équivalent, en tenant compte des variations du module de cisaillement et de l'amortissement, en fonction des déformations.

2. Synthèse sismotectonique

L'évaluation de l'aléa sismique régional de l'île de Mayotte (Terrier *et al.*, 2000), s'est effectuée suivant une approche déterministe telle que préconisée pour les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Elle s'appuie sur un découpage du territoire en unités ou zones sismotectoniques, auxquelles on associe un séisme de référence correspondant au séisme le plus fort connu et que l'on considère pouvoir se reproduire en tout point de l'unité considérée.

La synthèse des données géologiques, géodynamiques et sismologiques permet d'individualiser et de délimiter les différentes unités sismotectoniques qui correspondent soit à des structures tectoniques (failles ou systèmes de failles en général) soit à des ensembles géologiques et structuraux présentant une sismicité homogène.

Les unités sismotectoniques présentant une sismicité notable autour de Mayotte sont : le rift Est-Africain, la ride de Davie, le bassin du Mozambique, le bloc de Madagascar et l'archipel des Comores (voir la carte sismotectonique de la Figure 2)

2.1. LE RIFT EST-AFRICAIN

Le rift Est-Africain est une rupture lithosphérique qui recoupe la marge orientale de l'Afrique selon trois zones de fractures. La déformation liée au rift se propage vers le SE en utilisant préférentiellement d'anciennes zones de cisaillement (Chorowicz, 1992).

La sismicité instrumentale est abondante avec des mécanismes au foyer caractérisant des mouvements purement distensifs E-W. Concernant les séismes du rift est-africain, un des plus forts séismes connus est celui du 13 décembre 1910 de magnitude $M_s=7,3$.

2.2. LA RIDE DE DAVIE

La ride de Davie est une ancienne faille transformante. Le segment nord de la ride est réactivé par la migration de la déformation du rift Est-Africain vers le SE ce qui se traduit par l'ouverture des bassins de Kerimbass et Lacerda en mer (Mougenot *et al.*, 1986).

Le segment de la ride compris entre 9°S et 13°S présente une sismicité importante, malgré sa faible extension. La profondeur focale moyenne reste superficielle (10 et 20 km). Le séisme le plus fort enregistré est celui du 14 mai 1985 de magnitude $M_w=6,3$, avec une profondeur comprise entre 10 et 40 km ; l'épicentre était localisé à environ 450 km à l'WNW de l'île de Mayotte.

Le segment de la ride compris entre 13°S et 19°S est caractérisé par des séismes de magnitude supérieure ou égale à 5,0 relativement fréquents (un tous les dix ans), parmi lesquels on distingue le séisme du 23 octobre 1938 de magnitude $M_s=6,0$ et de profondeur indéterminée. Les mécanismes au foyer calculés par l'Université d'Harvard présentent tous une composante normale NS compatible avec les structures observées et avec une extension E-W.

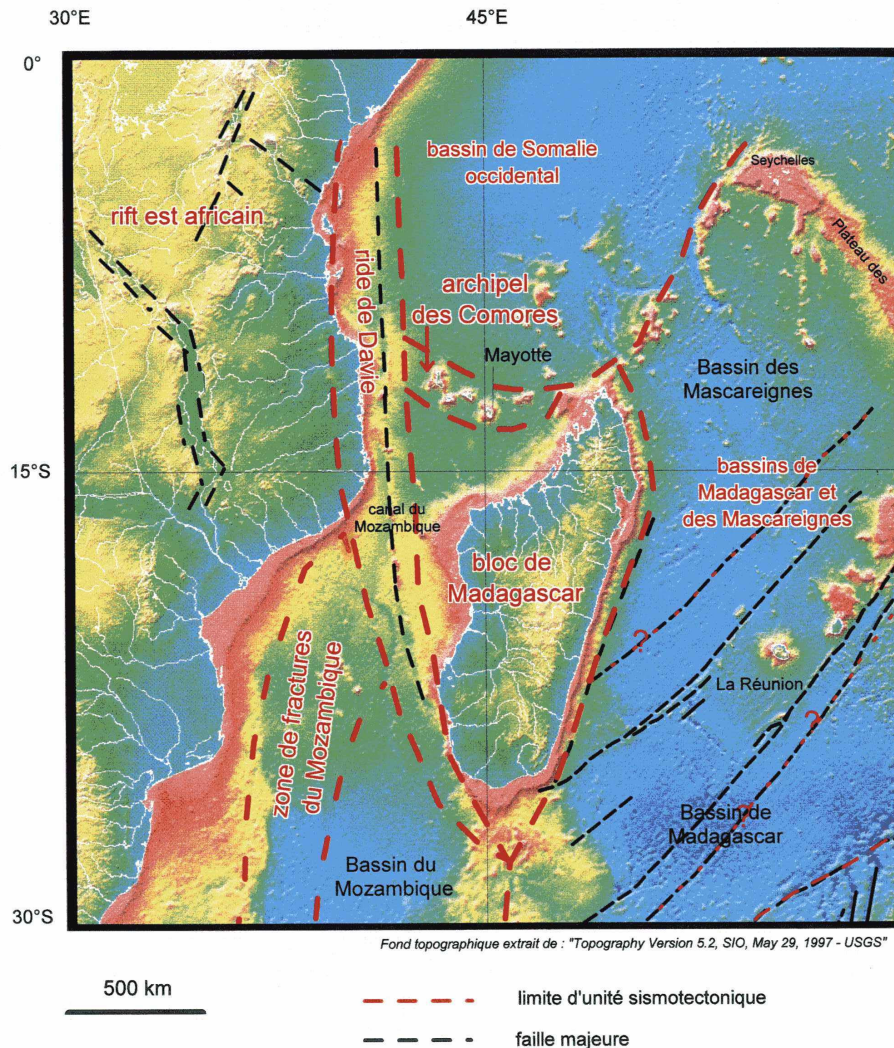


Figure 2 – Cadre sismotectonique des Comores et de Mayotte (d'après Terrier et al., 2000).

2.3. LA ZONE DE FRACTURES DU BASSIN DU MOZAMBIQUE

Les fractures du bassin du Mozambique prolongent vers le nord les zones de fractures transformantes de la Dorsale Sud-ouest Indienne (Lyakovsky et al., 1994).

La partie septentrionale de la zone de fractures est caractérisée par une sismicité instrumentale abondante. La profondeur focale moyenne des séismes reste comprise dans les 30 premiers kilomètres. Le séisme le plus fort est celui du 8 mai 1915 de magnitude $M_s=6.8$ (détermination du début du siècle). Plus récemment, le séisme du 17 février 1981 a atteint la magnitude $M_s=5,7$ (NEIC, National Earthquake Information Center) et $M_b=5,2$ (ISC, International Seismological Center) sans qu'il soit possible d'en évaluer l'intensité.

Comme l'indiquent les résultats des mécanismes au foyer des séismes, les fractures septentrionales du bassin du Mozambique sont réactivées dans le cadre d'un régime extensif E-W. Ces déformations pourraient traduire les premiers termes de la migration vers le SE de la déformation extensive du Rift Est-Africain sur les fractures préexistantes.

2.4. LE BLOC CONTINENTAL DE MADAGASCAR

Le bloc continental de Madagascar est le siège d'une faible activité volcanique résiduelle (solfatares et sources chaudes) et quelques indices néotectoniques (Arthaud *et al*, 1989). Les grandes failles de Madagascar sont héritées de l'orogénèse panafricaine (fin du Précambrien) ou bien de phases tectoniques ultérieures.

C'est une région de sismicité modérée et diffuse. Les plus forts séismes enregistrés ne dépassent pas la magnitude 6,0 : séisme du 29 mars 1943 de magnitude $M_s=6,0$ et séisme du 9 novembre 1955 d'intensité VII MM (profondeurs indéterminées).

À l'exception du séisme du 4 avril 1975, corrélé semble t'il au jeu décrochant-inverse d'une faille sub-équatoriale, les mécanismes au foyer calculés par l'Université d'Harvard présentent tous une composante normale sub-méridienne compatible avec une extension E-W. Leur profondeur est superficielle (<30 km).

Le bloc de Madagascar est déformé en régime extensif d'orientation E-W ; cette extension est comparable à celle qui est observée dans le Rift Est-Africain, la ride de Davie et le bassin du Mozambique. La réactivation des failles anciennes de Madagascar correspondrait aussi aux premiers termes de la migration vers le sud-est de la déformation extensive du Rift Est-Africain.

2.5. L'ARCHIPEL DES COMORES

La croûte océanique du bassin des Comores supporte les quatre îles volcaniques de Grande Comore, Mohéli, Anjouan et Mayotte (Fig. 3). L'île volcanique la plus récente est celle de Grande Comore (volcan actif du Karthala culminant à 2 263 m) et la plus ancienne celle de Mayotte.

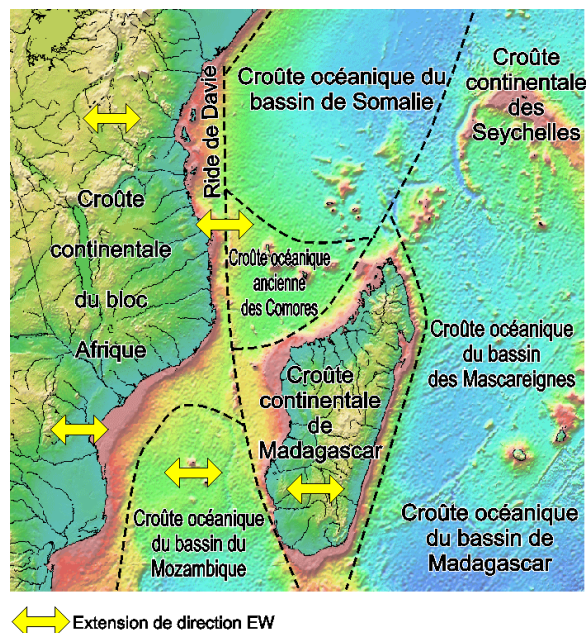


Figure 3 – Cadre géodynamique des Comores.

Un modèle récent (Späth *et al.*, 1996) confirme que ces îles résultent d'une activité de type « point chaud » avec des laves subissant des cristallisations fractionnées pendant leur ascension à travers un plancher océanique fracturé et en mouvement.

Les failles et les volcans des Comores se sont installés il y a environ 15 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).

De nos jours, l'activité volcanique est restreinte au volcan du Karthala à la Grande Comore. 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) et semble progresser vers le sud-est, c'est à dire vers les Comores et Madagascar. Il est probable que ce phénomène remette en activité les anciennes failles de ces deux secteurs, et en particulier les failles sub-méridiennes parallèles au rift Est-Africain et à la ride de Davie.

La sismicité est diffuse et régulière avec une fréquence d'**environ un séisme de magnitude proche de 5,0 tous les cinq ans**. Les séismes des Comores ont probablement une double origine qui traduit 1) leur position géodynamique sur un point chaud actif et 2) leur position probable au front de la déformation du rift Est-Africain.

Le séisme du 1^{er} décembre 1993 (magnitude $M_s=4.9$ et $M_b=5.2$) a atteint une intensité proche de VI-VII MSK à Mayotte. Les dégâts les plus importants ont été relevés dans le nord et le sud de l'île, mais aucun décès n'a été à déplorer. Pour les habitations privées qui étaient touchées, la moitié des maisons en dur était à reconstruire (fissures trop importantes) et toutes les cases traditionnelles en torchis étaient à reconstruire. Pour les bâtiments publics, la Préfecture a noté que les dégâts ont été plus rares et aucun dégât n'a été observé sur les ouvrages d'art (Audru *et al.*, 2002). Au total, le séisme a généré 11 MF de dégâts (1,7 M€) sur le territoire de Mayotte, à 90% pour les habitations privées et 10% pour les bâtiments publics.

Sachant que son épicentre était localisé à une quarantaine de kilomètres à l'ouest de l'île de Mayotte, les calculs réalisés dans le cadre de l'évaluation des mouvements sismiques de référence donnent une estimation de l'intensité épiscopentrale proche de VII-VIII pour ce séisme de 1993.

3. 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 encourager afin de protéger la population y résidant. Selon le « *Nouveau zonage sismique de la France* » (1985), l'île de Mayotte peut être classée, par analogie scientifique avec la réglementation française, en zone de sismicité 1b. Ce classement non officiel – l'application des règles PS92 n'est pas obligatoire à Mayotte - est conforté par l'étude récente de Bour et Sedan (2002).

Par ailleurs, compte tenu des résultats préliminaires obtenus par le BRGM en mai 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 Lebrun B. (2002) - Microzonage sismique de Mamoudzou-centre. Rapport BRGM/RP-51839-FR.
- en 2003 par Sabourault P., Nédellec J.L. et Lebrun B. et Audru J.C. (2003) – Aménagement du remblai de Mtsapéré, commune de Mamoudzou, Mayotte. Évaluation de l'aléa sismique local. Rapport BRGM/RC-51142-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 scénario. 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 géotechniques particulières du site.

4. Détermination des mouvements sismiques de référence

4.1. MÉTHODES D'ESTIMATION DU MOUVEMENT SISMIQUE

L'évaluation déterministe de l'aléa sismique d'une région nécessite une évaluation fiable des vibrations sismiques susceptibles d'être émises par les différents séismes de référence identifiés au cours de l'analyse sismotectonique. Pour cela, l'idéal serait de posséder des mouvements sismiques enregistrés sur une station sismologique proche du site d'étude, mais cela n'est possible que dans des zones à sismicité très importante. Pour une région à sismicité modérée comme Mayotte, il est nécessaire d'utiliser des méthodes permettant de déterminer le mouvement sismique au rocher à partir de la connaissance des sources retenues.

4.1.1. Approche empirico-statistique

a) Principe

Parmi les méthodes destinées à simuler des enregistrements de mouvements forts du sol en un site donné, une approche couramment employée est basée sur l'exploitation de données accélérométriques pour l'établissement de lois empirico-statistiques. Des paramètres caractérisant le mouvement du sol (comme le pic d'accélération, le pic de vitesse ou les ordonnées spectrales) sont exprimés en fonction de la magnitude et de la distance à la source.

Les données accélérométriques, d'origines géographiques et de qualités variées, sont obtenues pour des séismes de magnitude, de profondeur et de mécanismes différents, enregistrés à des distances variables et sur des sites géologiques divers. Récemment, d'autres paramètres que la magnitude et la distance, comme la catégorie de sols ou le type de faille, ont été introduits dans les lois d'atténuation.

De nombreux auteurs proposent ainsi des lois d'atténuation de l'accélération du sol avec la distance, établies à partir d'analyses de régression effectuées sur une population d'enregistrements de mouvements forts. Ces lois d'atténuation sont en constante évolution, en raison de l'installation de nouvelles stations d'enregistrements modifiant en permanence les jeux de données disponibles pour effectuer les analyses de régression.

La forme générale des relations permettant la détermination des spectres de réponse est la suivante :

$$\log(Y) = \log \beta_1 + \log [f_1(M)] + \log [f_2(R)] + \log [f_3(M, R)] + \log [f_4(P_i)] + \sigma$$

avec Y, la valeur spectrale recherchée : le pic d'accélération du sol (PGA), la pseudo-vitesse (PSV) ou l'accélération absolue (SA) ;

M, la magnitude du séisme. Différentes échelles de magnitude peuvent être considérées suivant les auteurs : la magnitude locale M_L , la magnitude

d'ondes de surface M_S , la magnitude de moment M_W ou la magnitude de la Japan Meteorological Agency M_{JMA} ;

R , la distance entre le point de mesure et la faille sismique. Là encore, différentes mesures de distances peuvent être utilisées : la distance épacentrale R_e , la distance hypocentrale R_h , la plus courte distance à la projection en surface de la zone de rupture R_S ou la plus courte distance à la zone de rupture R_Z ;

P_i , correspond aux paramètres additionnels que peut utiliser la loi, comme la catégorie de sol (rocher dur, rocher altéré, sol mou) ou le type de faille (décrochante, inverse, normale) ;

σ , l'écart-type associé au logarithme de Y .

Les lois d'atténuation peuvent être établies pour un ensemble de données enregistrées dans le monde entier ou pour une sélection correspondant à une région spécifique, comme par exemple l'Ouest des Etats-Unis ou les zones de subduction. On choisit, autant que possible, des relations établies pour un domaine géographique similaire à celui caractérisant la région où le calcul doit être effectué. Cependant, il est important de garder à l'esprit que ces relations se caractérisent par une forte dispersion, de l'ordre d'un facteur 2 sur la valeur calculée. Ceci traduit simplement la grande disparité des accélérogrammes naturels correspondant à un même couple magnitude-distance.

b) Sélection des lois d'atténuation pour Mayotte

Dans la région de Mayotte, nous devons tenir compte des spécificités du type de source sismique retenue par l'étude de Bour et Sedan (2002), c'est à dire proche de l'île et de magnitude intermédiaire. Il est primordial de s'assurer que le couple magnitude-distance de ce séisme de référence se situe bien dans le domaine de validité des lois retenues.

Par ailleurs, étant donné le contexte tectonique à caractère extensif de la région de Mayotte, nous avons exclu les lois caractérisant des régions en régime compressif.

Le Tableau 1 présente l'ensemble des lois d'atténuation retenues pour l'étude.

Malgré l'introduction récente d'autres paramètres que la magnitude et la distance, comme la catégorie de sols ou le type de faille, toutes les relations utilisées dans le cadre de cette étude ont été considérées pour un sol rocheux horizontal et aucune spécification particulière du mouvement sur la faille n'a été introduite.

Auteurs	Année	Région(s)	Quantités calculées	Magnitude	Validité en magnitude	Distance	Validité en distance (km)	Nb. de données	Type de faille
Petrovski	1986	Yougoslavie Italie du Nord	PSV, PGA	M _L	3.0 à 6.8	R _h	10 à 200	240	
Theodulidis & Papazachos	1992	Grèce	PGA	M _S	4.5 à 7.0	R _e	1 à 150	105	
Tento, Franceschina & Marcellini	1992	Italie	PSV, PGA	M _L	4.0 à 6.6	R _e	8 à 100	128	
Ambraseys, Simpson & Bommer	1996	Europe	PSV, PGA	M _S	4.0 à 7.5	R _s	1 à 200	422	
Cotton, Berge-Thierry, Maistre & Fukushima	1999	Europe	PSV	M _S	4.0 à 7.3	R _h	3 à 200	965	
Sadigh, Chang, Egan, Makdisi & Youngs	1997	Californie (superficiels)	PSV, PGA	M _w	3.8 à 7.4	R _z	3 à 200	964	décrochant / normal inverse
Munson & Thurber	1997	Hawaï	PGA	M _L si M<5,5 M _S sinon	4.0 à 7.2	R _s	1 à 80	51	
Dahle, Bungum & Kvamme	1990	Monde (intraplaque)	PSV, PGA	M _S	3.0 à 7.0	R _h	10 à 400	87	
Abrahamson & Silva	1997	Monde (superficiels)	PSV	M _w	4.4 à 7.4	R _z	1 à 200	655	inverse autre

Tableau 1 - Lois d'atténuation retenues pour la détermination des mouvements du sol induits par les sources sismiques sur Mayotte.

4.1.2. Approche théorique

L'analyse récente des enregistrements de séismes à faible distance (< 100 km) des sources sismiques a permis aux sismologues de mieux connaître les détails des mécanismes de rupture. Elle a donné lieu à de nombreux modèles déterministes faisant intervenir la propagation d'un front de rupture et la répartition des chutes de contraintes et des dislocations sur le plan de faille. Les méthodes théoriques sont fondées sur une approche physique de la génération et de la propagation des ondes sismiques depuis le foyer jusqu'au rocher affleurant.

Le BRGM et l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris) ont développé un modèle numérique de faille étendue : SASSOM (Synthetic Accelerograms from Spectral SOURCE Model), où la complexité de la rupture est décrite par une distribution spécifique du glissement sismique le long d'une faille (Herrero, 1994). Les accélérogrammes synthétiques sont déterminés grâce à une paramétrisation complète de la source sismique (géométrie de la zone fracturée, glissement moyen sur la faille, vitesse de rupture), ainsi que de la structure géologique le long du chemin de propagation des ondes (Bour, 1996).

Parmi ces paramètres, les plus importants sont les suivants :

- magnitude de moment M_w ;
- mécanisme au foyer, caractérisé par trois angles : l'azimut, le pendage de la faille, et l'angle du vecteur glissement dans le plan de faille ;
- chute de contrainte sur la faille pendant le séisme ;
- profondeur et distance, définies par rapport au centre de la faille ;
- angle entre la direction de la faille et la direction source-site (paramètre non influent lorsque la source est située au droit du site).

4.2. CARACTÉRISTIQUES DU SÉISME DE RÉFÉRENCE

Étant donné les caractéristiques des séismes de référence des unités sismotectoniques les plus proches de Mayotte, il n'a été retenu par Bour et Sedan (2002) que le séisme susceptible d'induire les mouvements sismiques les plus forts sur l'île, c'est-à-dire le séisme du 1^{er} Décembre 1993, associé à l'unité sismotectonique de l'Archipel des Comores. Les paramètres de ce séisme de référence sont rappelés dans le Tableau 2.

Date	Unité sismotectonique	Magnitude	Failles actives les plus probables : mouvement et direction
01/12/1993	Archipel des Comores	$M_b=5.2$ $M_S=4.9$	Jeu normal, direction subméridienne ?

Tableau 2 – Caractéristiques du séisme de référence le plus défavorable pour Mayotte

4.2.1. Source retenue

Tout séisme susceptible de se produire à une distance focale inférieure ou égale à 10 kilomètres du site étudié (ici l'ensemble de l'île de Mayotte), est considéré comme source proche. Dans l'approche déterministe, on admet que des séismes analogues aux séismes historiquement connus sont susceptibles de se produire dans l'avenir avec une position d'épicentre qui soit la plus pénalisante quant à ses effets en termes d'intensité sur le site étudié.

Dans le cas d'une source dite proche, le séisme de référence est interne à l'unité sismotectonique contenant le site. Il est donc supposé pouvoir se produire en tout point de cette même unité, et en particulier au droit du site étudié. Le séisme de référence de l'unité sismotectonique de l'archipel des Comores, à laquelle appartient l'île de Mayotte, est le séisme du 1^{er} décembre 1993.

Comme ce séisme appartient à la période instrumentale très récente, une localisation spatiale précise et plusieurs calculs de magnitude ont été effectués. Il a été localisé à 40 kilomètres à l'ouest de Mayotte et à une dizaine de kilomètres de profondeur. Du fait de sa faible profondeur, le séisme de référence du 1^{er} décembre 1993 est considéré comme source proche. Ses caractéristiques, déterminées par plusieurs agences sismologiques internationales, sont rappelées dans le Tableau 2.

Rappelons que les dommages répertoriés pour certaines constructions dans le sud de Mayotte, en particulier à Kani-Kéli, sont représentatifs d'une intensité VI-VII MSK (Lambert, 1997). L'épicentre étant situé en mer, il est normal de ne pas disposer d'une intensité épiscopentrale pour ce séisme. Cette valeur peut être néanmoins estimée à l'aide d'un modèle d'atténuation de l'intensité avec la distance. Etant donné la difficulté de trouver des relations conçues à partir de données provenant de l'océan Indien, nous proposons une loi établie à partir de 66 séismes de l'Est et du centre des Etats-Unis pour des distances épiscopentrals pouvant aller jusqu'à 1000 kilomètres (Anderson, 1978). A partir de l'intensité I ressentie en un point situé à une distance épiscopentrale R_e , cette loi permet de calculer l'intensité épiscopentrale I_0 du séisme :

$$I_0 = I + 0,00117 R_e + 2,7 \log_{10} R_e - 3,2$$

Pour le séisme du 1^{er} décembre 1993 localisé à 40 kilomètres à l'Ouest de Mayotte, on obtient ainsi une intensité épiscopentrale de l'ordre de VII-VIII MSK.

4.2.2. Synthèse

L'intensité la plus forte obtenue sur l'île de Mayotte est induite par le séisme du 1^{er} décembre 1993, d'intensité épiscopentrale estimée à VII-VIII, qui correspond à une source sismique proche. 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 épiscopentrale, profondeur focale, magnitude) sont données dans le Tableau 3. 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.

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

Tableau 3 – Séisme de référence retenu pour l'étude de l'aléa sismique sur le site du lycée de Chirongui sur l'île de Mayotte

4.3. CALCUL DES MOUVEMENTS SISMIQUES DE RÉFÉRENCE A MAYOTTE

Nous estimons les mouvements sismiques de référence susceptibles d'être induits au rocher horizontal affleurant sur l'île de Mayotte, par le séisme de référence identifié au paragraphe 3. D'après Bour et Sedan (2002), la source sismique envisageable pour l'île de Mayotte est la source proche déduite du séisme du 1^{er} décembre 1993, d'intensité épicentrale VII-VIII.

4.3.1. Hypothèses pour l'application des lois d'atténuation

Pour le séisme de référence, les valeurs de magnitude et de distance utilisées dans les différentes lois d'atténuation sont présentées dans le Tableau 4.

Pour la source proche du 1^{er} décembre 1993, le passage d'un type de distance à l'autre est effectué en plaçant le séisme dans la configuration la plus pénalisante pour le site, tout en restant dans les domaines de validité des différentes lois d'atténuation. Le calcul de ces distances nécessite de connaître la géométrie du plan de faille. C'est pourquoi une valeur approximative de surface de faille associée, déduite des relations empiriques de Wells & Coppersmith (1994), est également indiquée dans le Tableau 4.

M_L	5,2
M_S	4,9
M_w	5,2
R_h (km)	10,2
R_z (km)	8
R_e (km)	2
R_s (km)	1
surface (km²)	25

Tableau 4 - Paramètres du séisme de référence, requis par les lois d'atténuation. *M_L* : magnitude locale, *M_S* : magnitude d'ondes de surface, *M_w* : magnitude de moment, *R_h* : distance hypocentrale, *R_z* : plus courte distance à la zone de rupture, *R_e* : distance épicentrale, *R_s* : plus courte distance la projection en surface de la zone de rupture.

4.3.2. Hypothèses pour l'application de SASSOM

Les jeux de paramètres retenus pour le séisme de référence sont présentés dans le Tableau 5. En accord avec les mécanismes au foyer des autres séismes qui se sont produits dans l'archipel des Comores, les plans de faille retenus possèdent une orientation NNW-SSE et un pendage de 60° vers l'Est. Par ailleurs, l'angle de glissement sur la faille est fixé à -90°, correspondant à un mouvement de type normal, caractéristique d'un contexte tectonique en extension.

magnitude	5,2
profondeur (km)	10
distance (km)	10
chute de contrainte (MPa)	1,5
azimut (°Est)	350
pendage (°)	60
angle de glissement (°)	-90

Tableau 5 - Paramètres du séisme de référence requis par le modèle SASSOM.

Les résultats d'un calcul par le biais du modèle SASSOM peuvent être sensibles à certains paramètres d'entrée, soit purement numériques, soit difficiles à fixer car mal connus. Plutôt que de se baser sur les résultats d'un calcul unique, pas forcément représentatif du problème posé, nous avons effectué un traitement statistique en jouant sur la variabilité de ces paramètres. De plus, ce mode de calcul a l'avantage de représenter la variabilité naturelle des accélérogrammes réels.

4.3.3. Détermination du spectre spécifique associé au séisme de référence

Le Tableau 6 présente les accélérations horizontales maximales susceptibles d'être produites par le séisme de référence à Mayotte. Elles ont été déterminées à partir des relations d'atténuation retenues dans le Tableau 1 et de la modélisation par SASSOM.

L'accélération horizontale maximale susceptible d'être produite sur Mayotte par le séisme de référence retenu vaut en moyenne 0,16 g.

Région	Loi d'atténuation	PGA M=5,2 à 10 km
Europe	Petrovski (1989)	0,12 g
	Theodulidis <i>et al.</i> (1992)	0,17 g
	Tento <i>et al.</i> (1992)	0,17 g
	Ambraseys <i>et al.</i> (1996)	0,16 g
	Cotton <i>et al.</i> (1999)	0,14 g
Californie	Sadigh <i>et al.</i> (1997)	0,19 g
Hawaï	Munson & Thurber (1997)	0,13 g
Monde	Abrahamson & Silva (1997)	0,13 g
Modèle SASSOM (1996)		0,18 g
Valeur retenue		0,15 g

Tableau 6 - Valeurs de PGA susceptibles d'être engendrées à Mayotte par le séisme de référence.

Le Tableau 1 donne les relations d'atténuation qui permettent de déterminer l'ensemble des ordonnées spectrales constituant le spectre de réponse spécifique. Nous avons reporté ce spectre à 5 % d'amortissement sur la Figure 4. Le spectre simplifié proposé est indiqué sur cette figure par la courbe noire.

Le spectre spécifique pour l'île de Mayotte est présenté pour des amortissements de 2, 5, 10 et 20 % sur la Figure 5. 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 7 pour chacun des spectres à 2, 5, 10 et 20 % d'amortissement. Pour les valeurs intermédiaires, on interpolera 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.

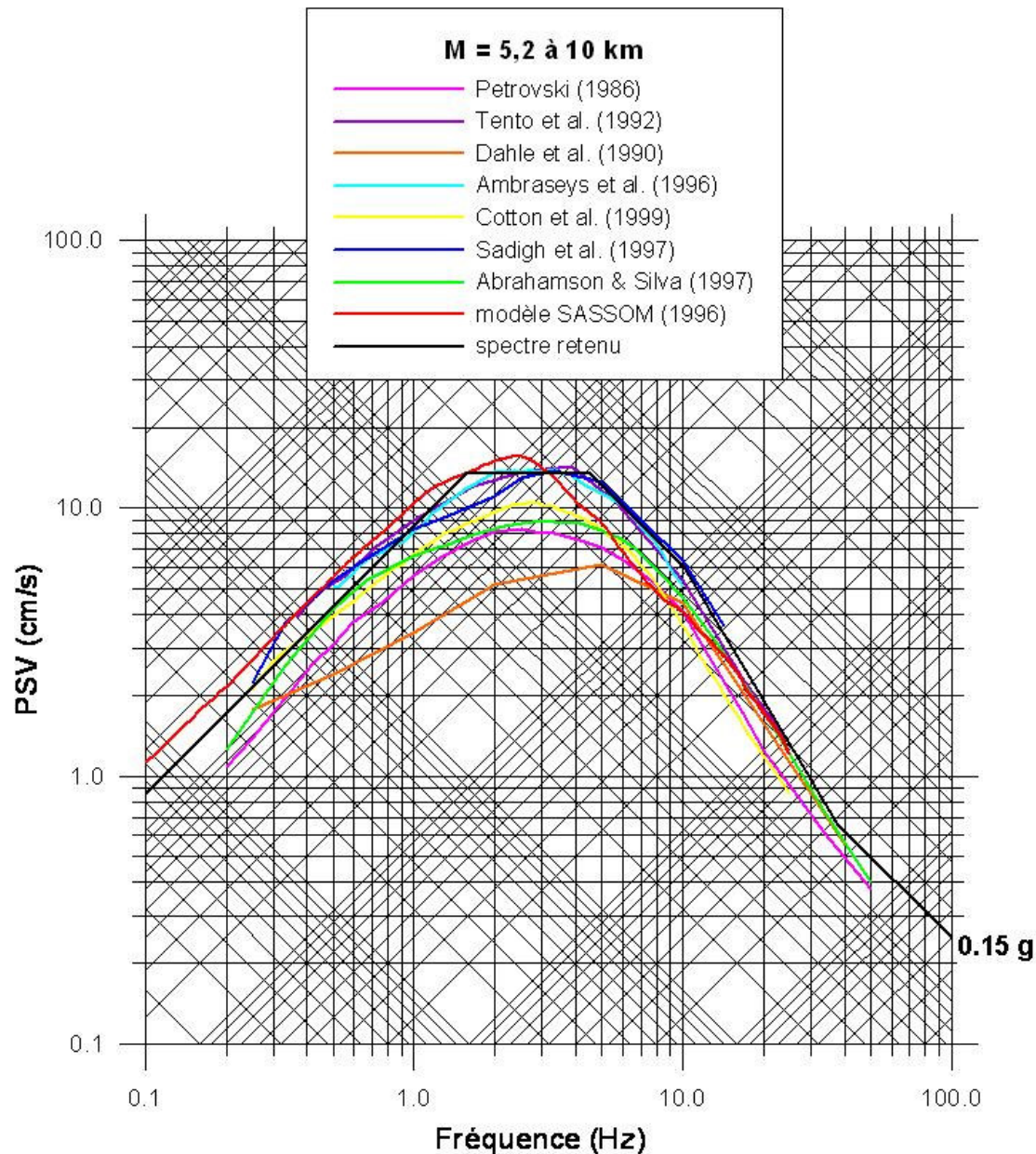


Figure 4 - Spectres calculés pour le séisme de référence et spectre spécifique proposé (en noir).
Rocher « horizontal affleurant ». Amortissement 5 %.

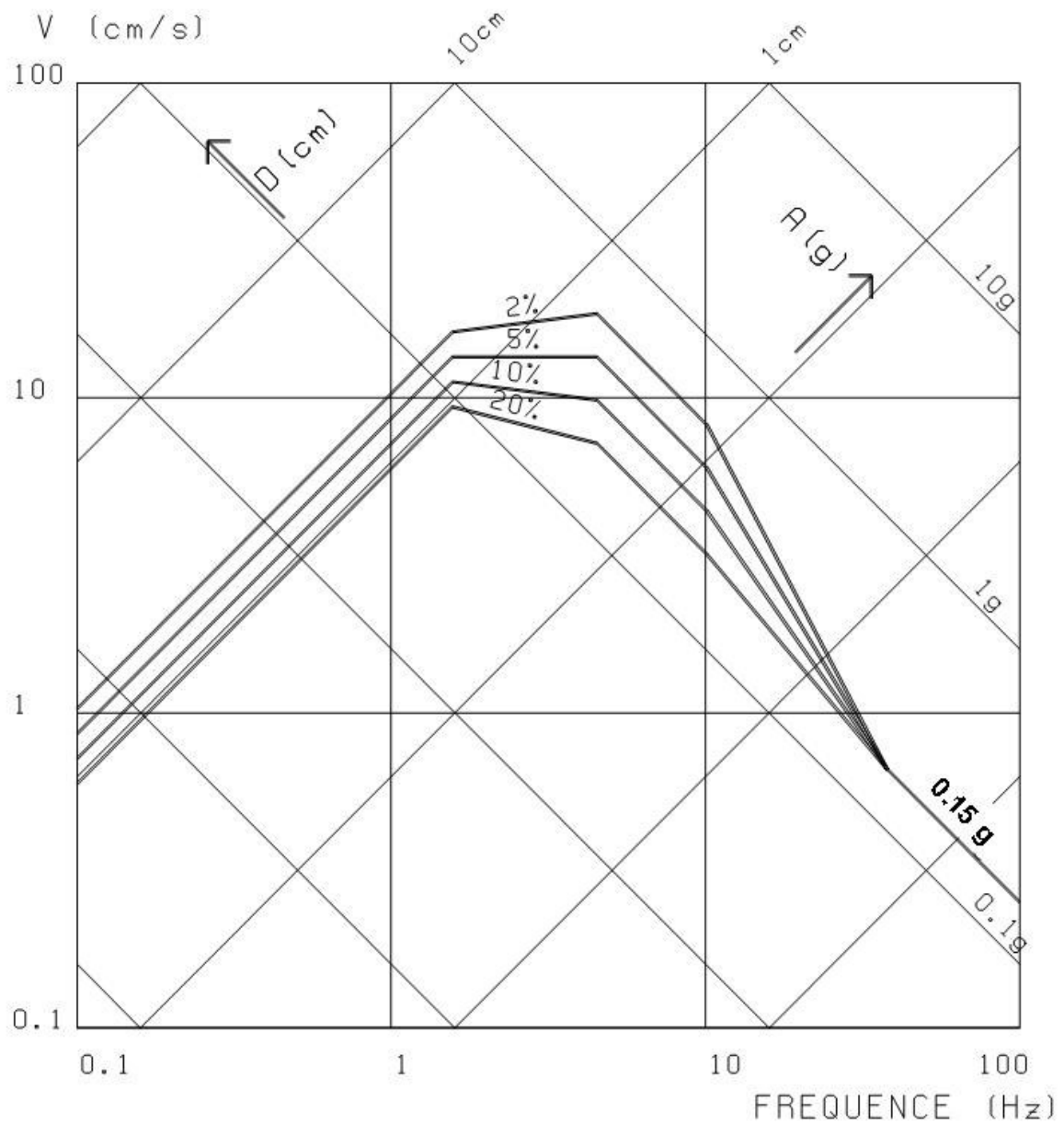


Figure 5 - Spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant.
Amortissements 2, 5, 10 et 20 %.

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

5. Synthèse géologique et géotechnique

5.1. PRÉAMBULE

L'objectif de cette analyse géotechnique est multiple :

- identifier et 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
- identifier l'existence de formations liquéfiables en cas de séismes, et si c'est le cas déterminer l'intensité de la liquéfaction.

5.2. DONNÉES

5.2.1. Contexte géologique

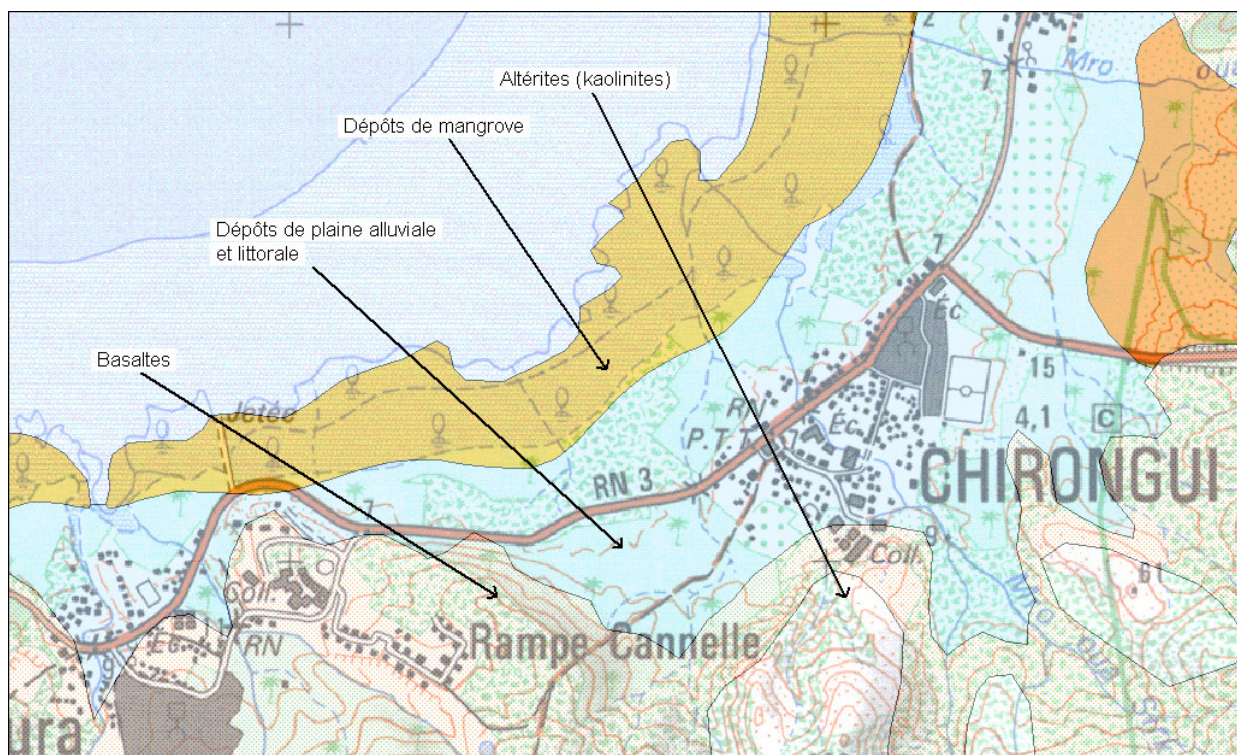


Figure 6 – Contexte géologique local de Chirongui (Mayotte).

5.2.2. Contexte géotechnique

De nombreuses données sont disponibles pour ce site, issues de différentes campagnes de reconnaissance in situ des sols, ainsi que d'essais de laboratoire :

Une campagne de sondages spécifique a été réalisée pour le compte de la Direction de l'équipement de Mayotte. Ces reconnaissances basées sur forages sont les suivantes :

- deux sondages à la tarière SP1 et SP2, respectivement arrêtés à 22,50 m et à 11 m ;
- des échantillons remaniés prélevés dans les niveaux vasards dans chaque sondage (éch. 2005-G-0030 dans SP1 ; et éch. 2005-G-0031 dans SP2). Sur chaque échantillon, les essais suivants ont été pratiqués :
 - Analyse granulométrique ;
 - Limites d'Atterberg ;
 - Teneur en eau naturelle ;
 - Valeurs de bleu ;
 - Essai Proctor.
- des essais pressiométriques tous les 2 mètres.

Six profils de sismique réfraction ont été réalisés par SEGC Mayotte (rapport SEGC MAYOTTE/E.M./357/2003), fournissant des mesures de vitesses d'ondes longitudinales V_p .

Un profil de SASW a été réalisé à proximité du site sur la colline du collège de Chirongui dans le cadre du projet de zonage sismique (rapport Projet « Risques naturels et érosion » à Mayotte : résultats d'année 1, juillet 2002, BRGM/RP-51738-FR), fournissant des mesures de vitesses d'ondes de cisaillement V_s . Le détail de la méthode, du dispositif SASW, ainsi que le profil issu de l'analyse des résultats sont fournis en Annexe 1.

Des mesures H/V ont également été spécifiquement réalisées dans le cadre de cette étude : des explications sur cette méthode et une analyse des résultats obtenus se trouvent en Annexe 2.

L'emplacement de ces essais géotechniques et géophysiques est indiqué sur la Figure 7.

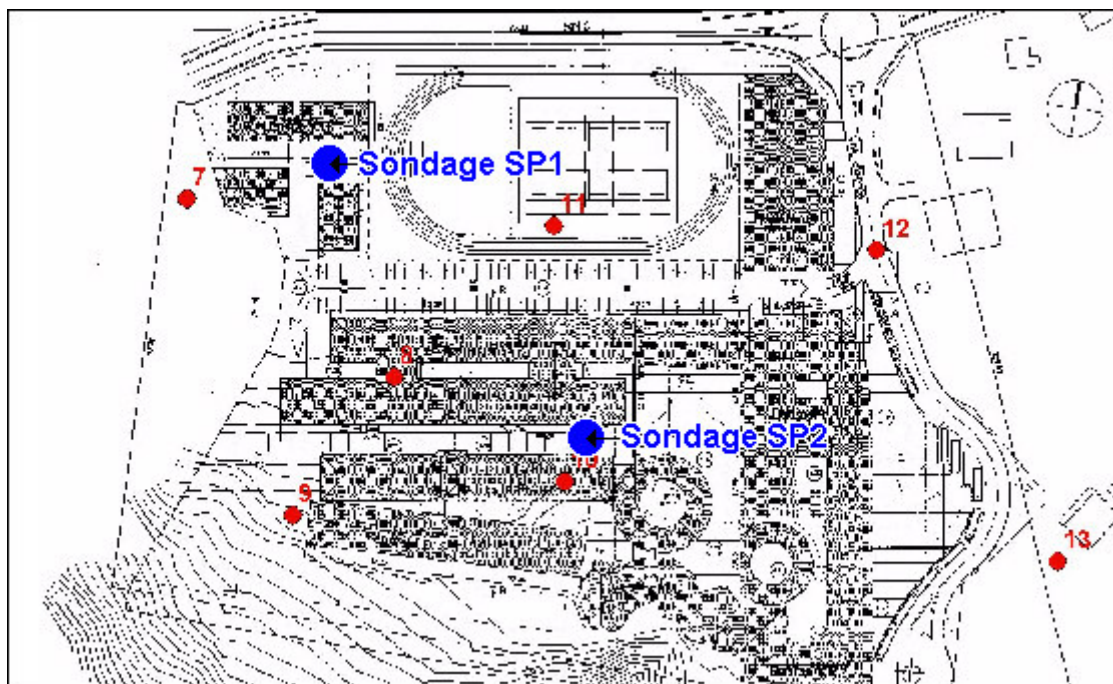


Figure 7 - Implantation des essais pressiométriques et des points de mesures H/V.

5.3. CARACTÉRISATION DES UNITÉS GÉOMÉCANIQUES

5.3.1. Caractéristiques

a. Niveau superficiel

Sur 1 à 1,5 mètres d'épaisseur hors nappe depuis la surface, on trouve probablement des sables argileux moyennement compacts dont la frange supérieure est constituée de terre végétale. Nous ne possédons pas d'indication mécanique sur cet horizon, si ce n'est qu'il semble circulaire pour un véhicule de chantier hors conditions d'intempérie particulières. L'indice CBR immédiat (NFP 94-078, 1997) de ces matériaux doit se situer entre 3 et 6, ce qui est médiocre.

b. Horizons vasards

- Lithologie :

Sur la base des logs de forages, complétés par les granulométries effectuées sur la matrice, nous avons supposé que nous sommes en présence de sables argilo-silteux vasards.

- Epaisseur :

Sous l'horizon superficiel, cette formation se développe jusqu'à 6 / 7 m de profondeur dans SP1, et jusqu'à 10 / 11 m de profondeur dans SP2. On notera la présence d'un niveau mou vers 18 m de profondeur dans SP1.

- Essais en laboratoire :

Le Tableau 8 récapitule les résultats des principaux essais réalisés en laboratoire sur des échantillons prélevés dans cette formation, dans les forages SP1 et SP2.

	passant à 80 µm	Wn	WL	IP	IC	VBS	cat. NFP11-300
2005-G-0030 / SP1	85,3 %	90,6%	72,5%	21,7%	-0,8	4,35%	A2th
2005-G-0031 / SP2	72,6 %	90,9%	46,8%	19,8%	-2,2	4,52%	A2th

Tableau 8 – Essais en laboratoire

Les valeurs d'indice de consistance confirment le caractère vasard de cet horizon.

Les valeurs de WL et de IP placent ces matériaux dans les limons ou les argiles organiques très plastiques.

- Essais pressiométriques :

La pression limite PI mesurée varie entre 0,08 MPa et 0,34 MPa. Le module pressiométrique Em est dans une frange située entre 0,6 MPa et 2,3 MPa. Le rapport EM/PI varie entre 1 et 8.

Ces valeurs sont en accord avec des matériaux fins vasards.

- *Sismique réfraction*

Les profils de sismique réfraction montrent une vitesse V_p variant entre 305 m/s et 330 m/s sur une profondeur allant de 1.2 m à 4.8 m.

- *SASW*

Le profil de SASW est montré en Annexe 1. En réalisant une moyenne pondérée des vitesses V_s , nous obtenons une vitesse de 170 m/s sur une épaisseur de 9 m.

- *H/V*

Les résultats montrés en Annexe 2 donnent une fréquence de résonance entre 3 et 3.5 Hz, ce qui correspond, pour une épaisseur de 10m à une vitesse située entre 120 et 140 m/s.

c. Horizon Altérites

- *Lithologie :*

En l'absence de distinctions dans les logs de forages et de prélèvements de sols dans ces formations, nous avons supposé que nous sommes en présence d'altérites.

- *Épaisseur :*

Située sous le niveau vasard, cette formation présente environ 14 m de puissance dans SP1 et semble absente de SP2.

- *Essais en laboratoire :*

Pas d'essais en laboratoire disponibles.

- *Essais pressiométriques :*

La pression limite PI mesurée varie entre 0,76 MPa et 1,79 MPa. Le module pressiométrique E_m est dans une frange située entre 2,5 MPa et 12,6 MPa. Le rapport EM/PI varie entre 3,2 et 16,2.

Ces valeurs mettent en évidence des matériaux moyennement compacts, somme toute assez médiocres.

d. Substratum

- *Lithologie :*

Dans la mesure où la tarière n'a pas pénétré dans le substratum, il est délicat d'en apprécier la nature. Cependant, d'après la carte géologique au 1/50 000 de Mayotte, le substratum de cette zone de Chirongui serait constitué de basaltes mio-pliocènes, probablement altérés en partie supérieure.

- *Épaisseur :*

Nous avons arbitrairement considéré que le substratum est atteint avec le refus de pénétration à la tarière : 22,5 m de profondeur dans SP1 et 11 m dans SP2. Cependant,

faute d'identification à cette profondeur, on ne peut exclure que la tarière se soit arrêtée dans des horizons sédimentaires compacts.

Cette formation volcanique est probablement puissante (plusieurs dizaines de mètres).

- *Essais en laboratoire :*

Pas d'essais en laboratoire disponibles.

- *Essais pressiométriques :*

La tarière ayant pu pénétrer dans des niveaux ayant une pression limite PI maximale de 1,79 MPa, on supposera que le substratum (altéré) présente $p_l > 2$ MPa. Dans des basaltes sains, cette valeur peut largement excéder 5 MPa.

4.3.3 Récapitulatif

Le Tableau 9 synthétise les données géotechniques et géophysiques exploitées.

Formation	Nature	Épaisseur (m)	Caractéristiques Pressiométriques (Mpa)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Niveau superficiel	Sables argilo-silteux	1 à 1,5	$p_l \approx 0,5$	-	-	Sols cohérents mous à moy. mous (groupe c à b)
Horizon vasard	Sables argilo-silteux	6 à 10 m	$p_{lmoy} = 0,1 \text{ à } 0,3$ $0.6 < E_m < 2.3$	120-170	305-330	Sols cohérents mous (groupe c)
Altérites	Argiles compactes	0 à 14 m	$p_{lmoy} = 0,8 \text{ à } 1,8$ $2.5 < E_m < 12.6$	-	-	Sols moyennement compacts (groupe b)
Substratum	Basalte plus ou moins altéré et fracturé	-	$PI > 2$	-	-	Rocher fracturé ou altéré (groupe b)

Tableau 9 – Caractéristiques moyennes des formations géologiques.

5.4. HYDROGÉOLOGIE

Seul le sondage SP2 fait état de venues d'eau à partir de 3 m de profondeur. On peut supposer qu'en période très pluvieuse, la nappe soit plus proche de la surface.

5.5. ÉTABLISSEMENT DE COLONNES DE SOLS

Afin de calculer le spectre de réponse tenant compte des conditions de site, il convient de définir des colonnes de sols représentatives du terrain en place. Ces colonnes de sols doivent intégrer plusieurs types de paramètres :

- la lithologie des horizons : (sols cohérents, sols frottants ou rocher)
- la stratigraphie (séquence, épaisseur)
- les caractéristiques géomécaniques des horizons. Les formations lithologiques sont caractérisées par des valeurs moyennes telles que leur poids volumique (γ_h). La vitesse des ondes de cisaillement (VS) et les courbes $G(\gamma)/G_{max}$ & $D(\gamma)$ sont des caractéristiques dynamiques des sols, nécessaires à la simulation du comportement d'une colonne de sol sous une sollicitation sismique. Les courbes $G(\gamma)/G_{max}$ & $D(\gamma)$ 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 . Dans cette étude, elles sont utilisées pour caler les paramètres du comportement non linéaire de la loi de comportement non linéaire utilisée dans CyberQuake. A défaut d'essais de laboratoire spécifiques, les courbes $G(\gamma)/G_{max}$ & $D(\gamma)$ utilisées sont issues de la littérature (Kokusho, 1980, et Darendeli, 2001), en tenant compte de la connaissance des différentes unités géomécaniques.

Le Tableau 10 récapitule les caractéristiques de la colonne de sol retenue pour l'étude.

On notera les points suivants :

- la nappe est prise en compte, située à 3 m ;
- nous avons utilisé les courbes $G(\gamma)/G_{max}$ & $D(\gamma)$ issues de la littérature les plus proches des caractéristiques réelles des formations;
- la colonne de sol est représentative de la zone située au niveau du sondage pressiométrique SP2.

Formation	Modèle de comportement	Épaisseur	γ_h (kN/m ³)	Caractéristiques géomécaniques de base	Vs (m/s)	Vp (m/s)
Niveau superficiel	Non linéaire	1	18,0	Dr = 30 %	200	375
Vasard	Non linéaire	10	17,0	Ip = 20	170	320
Altérite	Elastique	5	20,0	-	500	935
Bedrock	Elastique	infini	21,0	-	800	1500

Tableau 10 – Colonne de sol retenue. Vs : vitesse des ondes de cisaillement en m/s; Vp : vitesse des ondes longitudinales ; Dr = densité relative ; Ip = Indice de plasticité.

6. Spectres de réponse compte tenu des conditions de site

6.1. 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 §4, permettant de prendre en compte les conditions de site. On peut utiliser les méthodes suivantes.

6.1.1. 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 1000 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 lois 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 nous privilégions la méthode numérique.

6.1.2. 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 la présente étude, nous avons utilisé un modèle de comportement élastoplastique.

La méthode numérique utilisée est le code de calcul « CyberQuake version 2000 » de Modaressi *et al.* (1997), en analyse transitoire non linéaire. Le modèle de comportement utilisé dans CyberQuake est un modèle élastoplastique cyclique à un mécanisme dérivé du modèle d'interface développé par Aubry *et al.* (1990), lui-même basé sur le modèle original de Hujeux (1985) développé par Aubry *et al.* (1982)].

La méthode employée est la suivante :

1. Utilisation de 4 accélérogrammes (2 synthétiques et 2 réels) correspondant aux caractéristiques du spectre spécifique de réponse au rocher horizontal ;
 - Les accélérogrammes synthétiques sont générés à l'aide du logiciel SIMQKE (Gasparini et Vanmarcke, 1976). Par itérations, ce code génère des signaux

temporels en accélération, artificielles et statistiquement indépendantes, dont les spectres de réponse sont en concordance avec les spectres simplifiés donnés en entrée.

- Les accélérogrammes réels sont recherchés dans des bases de données mondiales de mouvements forts du sol. Les accélérogrammes sélectionnés ont des caractéristiques proches du spectre spécifique retenu dans le cadre de la présente étude.

2. Calcul de la réponse de la colonne de sol soumise à ces 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 11 : caractéristiques des accélérogrammes réels utilisés pour la modélisation numérique.

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

L'étude géotechnique du chapitre 5 a permis de déterminer une colonne de sol correspondant à la configuration type rencontrée à l'aplomb du projet. Les spectres spécifiques montrés sur la Figure 8 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.

D'autre part, 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). Si l'on suit les dispositions proposées dans le cadre des futures EuroCode 8, il convient donc d'appliquer au spectre spécifique de la Figure 8 un coefficient multiplicateur de 1,2.

Le spectre spécifique résultant, tenant compte à la fois de l'aléa sismique régional, des effets de site lithologiques et de la classe d'ouvrages à considérer, est représenté sur la Figure 9 pour les amortissements 2, 5, 10 et 20 %. C'est le spectre à considérer pour le dimensionnement du lycée de Chirongui. Selon la méthode donnée au paragraphe 4.3 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 12 pour chacun des spectres à 2, 5, 10 et 20% d'amortissement (le calcul a été fait selon la méthode donnée au paragraphe 4.3.3 pour le spectre au rocher).

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 Chirongui (installation de classe C) est de 0.30 g.

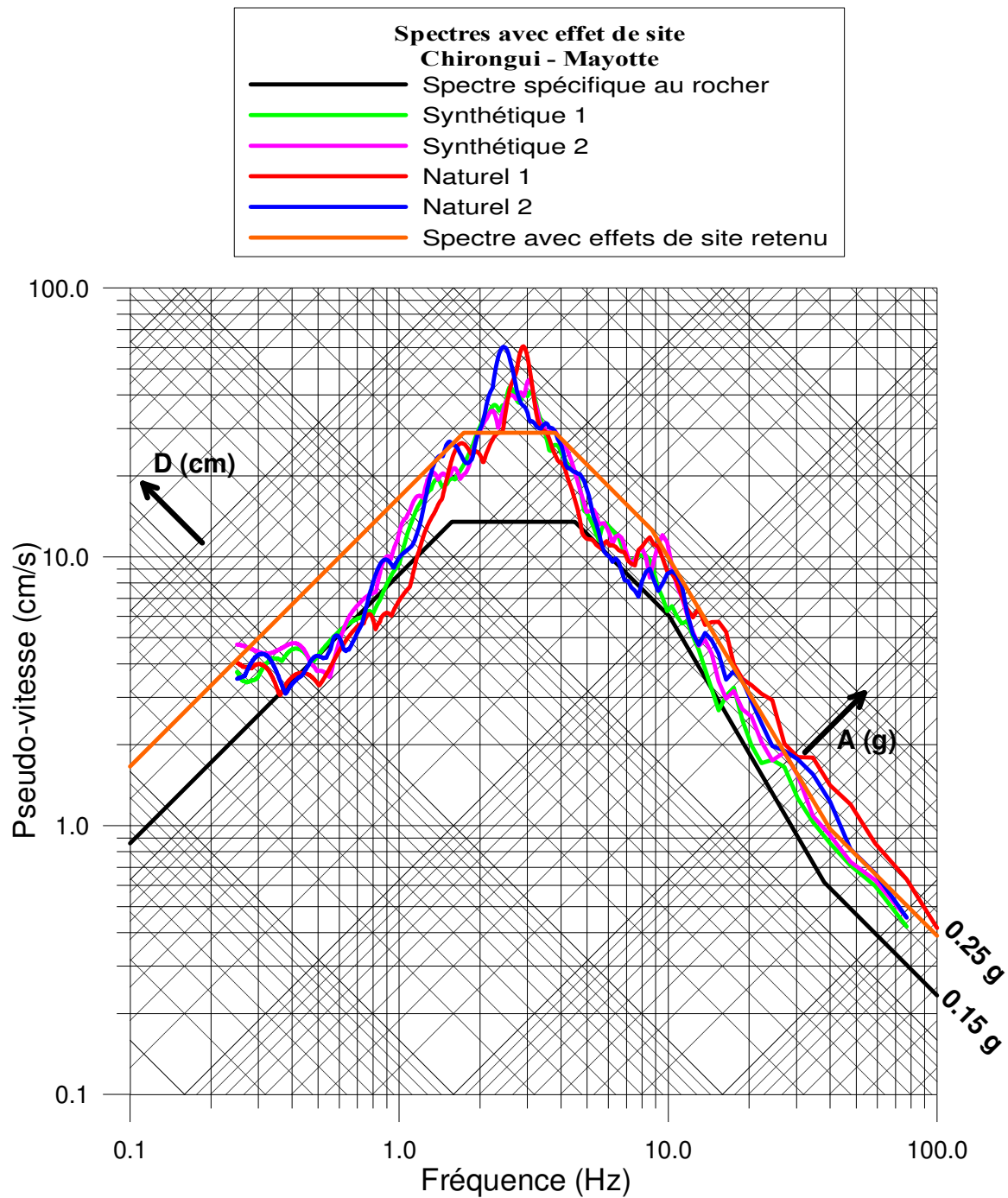


Figure 8 – Comparaison du spectre spécifique au rocher horizontal affleurant avec ceux tenant compte des effets de site et spectre proposé pour un amortissement de 5%.

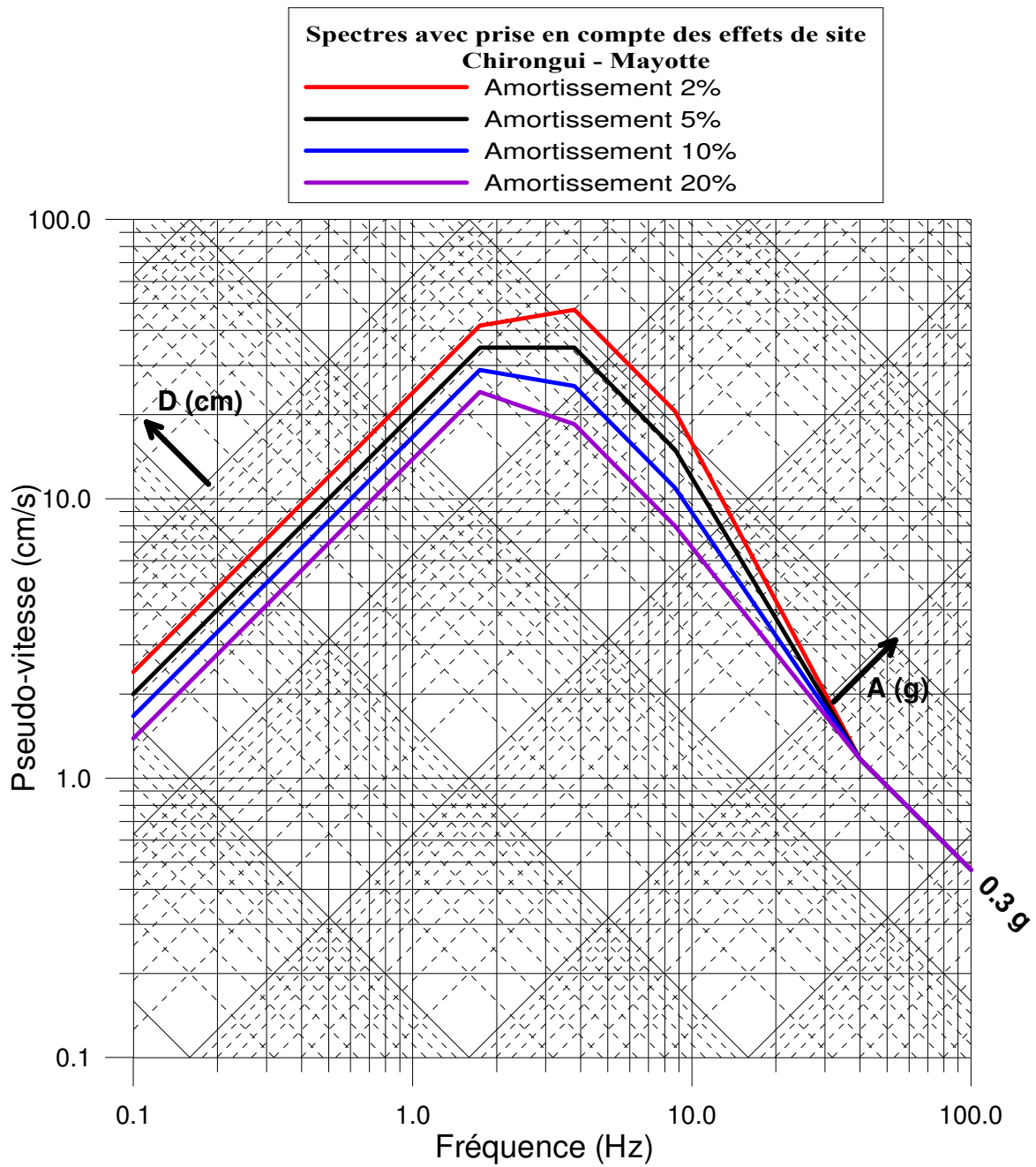


Figure 9 – Spectre de réponse élastique horizontale tenant compte des conditions de site et de la classe d'ouvrages (classe C) du lycée de Chirongui . Amortissements 2, 5, 10 et 20%

F (Hz)	Amortissement (%)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
0.1	2	0.00154	2.40	3.81
0.1	5	0.00128	2.00	3.18
0.1	10	0.00107	1.67	2.65
0.1	20	0.00089	1.39	2.21
1.74	2	0.46	41.6	3.81
1.74	5	0.39	34.7	3.18
1.74	10	0.32	28.9	2.65
1.74	20	0.27	24.1	2.21
3.8	2	1.15	47.5	2.00
3.8	5	0.84	34.7	1.45
3.8	10	0.62	25.3	1.06
3.8	20	0.45	18.5	0.77
8.7	2	1.15	20.5	0.37
8.7	5	0.84	15.0	0.27
8.7	10	0.62	10.9	0.20
8.7	20	0.45	8.00	0.15
40	Tous amortissements	0.30	1.17	0.00467
100	Tous amortissements	0.30	0.47	0.00075

Tableau 12 – Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site et de la classe d'ouvrages à considérer. Valeurs de A, V et D.

6.3. COMPARAISON DU SPECTRE SPÉCIFIQUE RETENU ET DU SPECTRE FORFAITAIRE PS92

6.3.1. Rappel de la réglementation PS92

L'étude proposée suit les termes de l'arrêté ministériel du 29 mai 1997 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la catégorie dite «à risque normal» telle que définie par le décret du 14 mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique.

La classe de bâtiment retenue des futures installations est la classe C. Nous rappelons ici la description de ces ouvrages tels que définis dans l'arrêté du 29 mai 1997 :

« Les bâtiments de classe C sont :

- les établissements recevant du public des 1^{ère}, 2^e et 3^e catégories au sens des articles R.123-2 et R.123-19 du code de la construction et de l'habitation ;
- les bâtiments dont la hauteur dépasse 28 mètres :
 - bâtiments d'habitation collective ;
 - bâtiments à usage de bureaux
- les autres bâtiments pouvant accueillir simultanément plus de 300 personnes appartenant notamment aux types suivants :
 - les bâtiments à usage de bureaux, non classés établissements recevant du public au sens de l'article R123-2 du code de la construction et de l'habitation ;
 - les bâtiments destinés à l'exercice d'une activité industrielle ;
- les bâtiments des établissements sanitaires et sociaux ; à l'exception de ceux des établissements de santé au sens de l'article L. 711-2 du code de la santé publique qui dispensent des soins de courte durée ou concernant des affections graves pendant leur phase aiguë en médecine, chirurgie et obstétrique et qui sont mentionnés à la classe D ;
- les bâtiments des centres de production collective d'énergie quelle que soit leur capacité d'accueil. ».

Selon l'article de 4 de l'arrêté du 29 mai 1997, les règles de construction applicables aux bâtiments mentionnés à l'article 3 du même arrêté sont celles de la norme NF P 06-013, référence DTU, règles PS 92 Règles de construction parasismique, règles applicables aux bâtiments, dites "règles PS 92". Ils sont définis de la façon suivante :

ZONES	CLASSE B	CLASSE C	CLASSE D
Ia	1,0	1,5	2,0
Ib	1,5	2,0	2,5
II	2,5	3,0	3,5
III	3,5	4,0	4,5

Tableau 13 – Valeurs des accélérations de calage (m/s^2) en fonction de la sismicité et de la classe de bâtiment considérée.

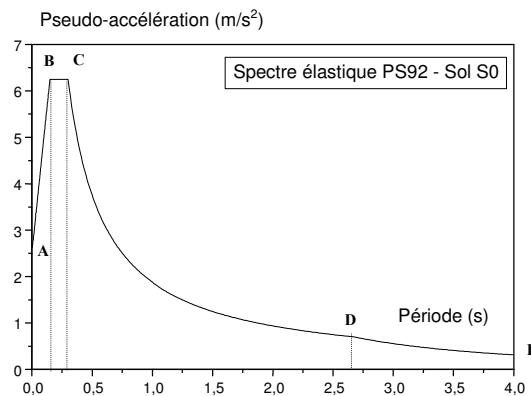


Figure 10 – spectre élastique au rocher horizontal affleurant pour un sol de type S0 (règles PS92) et définition des points de repères utilisés ci-dessous.

Type de sol	TB (s)	TC (s)	TD (s)	RA	RM
S0	0.15	0.30	2.67	1.0	2.5
S1	0.20	0.40	3.20	1.0	2.5
S2	0.30	0.60	3.85	0.9	2.25
S3	0.45	0.90	4.44	0.8	2.0

Branche AB: $Re(T) = RA + (RM-RA)(T/TB)$

Branche BC: $Re(T) = RM$

Branche CD: $Re(T) = RM(TC/T)$

Branche DE: $Re(T) = RM(TC/T)(TD/T)$

Tableau 14 – paramètres normés des spectres forfaitaires de type PS92 en fonction du type de sol.

Selon le « Nouveau zonage sismique de la France » (1985), l'île de Mayotte peut être classée, par analogie avec la réglementation française, en zone de sismicité 1b. Ce classement non officiel est conforté par l'étude récente de Bour et Sedan (2002).

Les structures en projet envisagées correspondent à un bâtiment de **classe C** en zone de sismicité **1b**. Compte tenu des informations géotechniques dont nous disposons (Tableau 10), nous proposons un sol de type **S2** pour le site du lycée de Chirongui.

Les mouvements issus de ces choix conduisent aux paramètres suivants :

$a_N = 2,0 \text{ m/s}^2$; $\xi = 5 \%$; $TB = 0,30 \text{ s}$; $TC = 0,60 \text{ s}$; $TD = 3,85 \text{ s}$; $RM = 2,25$

Points caractéristiques	T (s)	F (Hz)	Acc (g)
A	0.01	100	0.18
A'	0.0303	33	0.18
B	0.30	3.333	0.45
C	0.60	1.666	0.45
D	3.85	0.260	0.07
E	10.00	0.1	0.01

Tableau 15 – Paramètres du spectre forfaitaire retenu selon les règles parasismiques PS92 pour un bâtiment de classe C sur un sol de type S2 dans une zone de sismicité 1b.

En l'état actuel, ce spectre est réglementaire en France métropolitaine. Cependant, il est jugé maintenant inadapté à une prise en compte correcte des effets de site et sera modifié dans le cadre de la future réglementation prévue en 2006.

6.3.2. Comparaison PS92 vs. spectre spécifique

Les spectres de réponse ci-dessous (Figure 11) sont calculés à 5% d'amortissement.

Il apparaît que le spectre spécifique recouvre le spectre PS92 pour des fréquences supérieures à 2 Hz. C'est ce spectre que nous préconisons pour le projet du Lycée de Chirongui car il est le mieux adapté au contexte sismotectonique de l'île de Mayotte et aux formations superficielles présentes sur le site du lycée.

L'accélération horizontale maximale du sol (PGA) tenant compte des effets de site lithologiques à retenir sur le site du lycée de Chirongui est de 0.3 g.

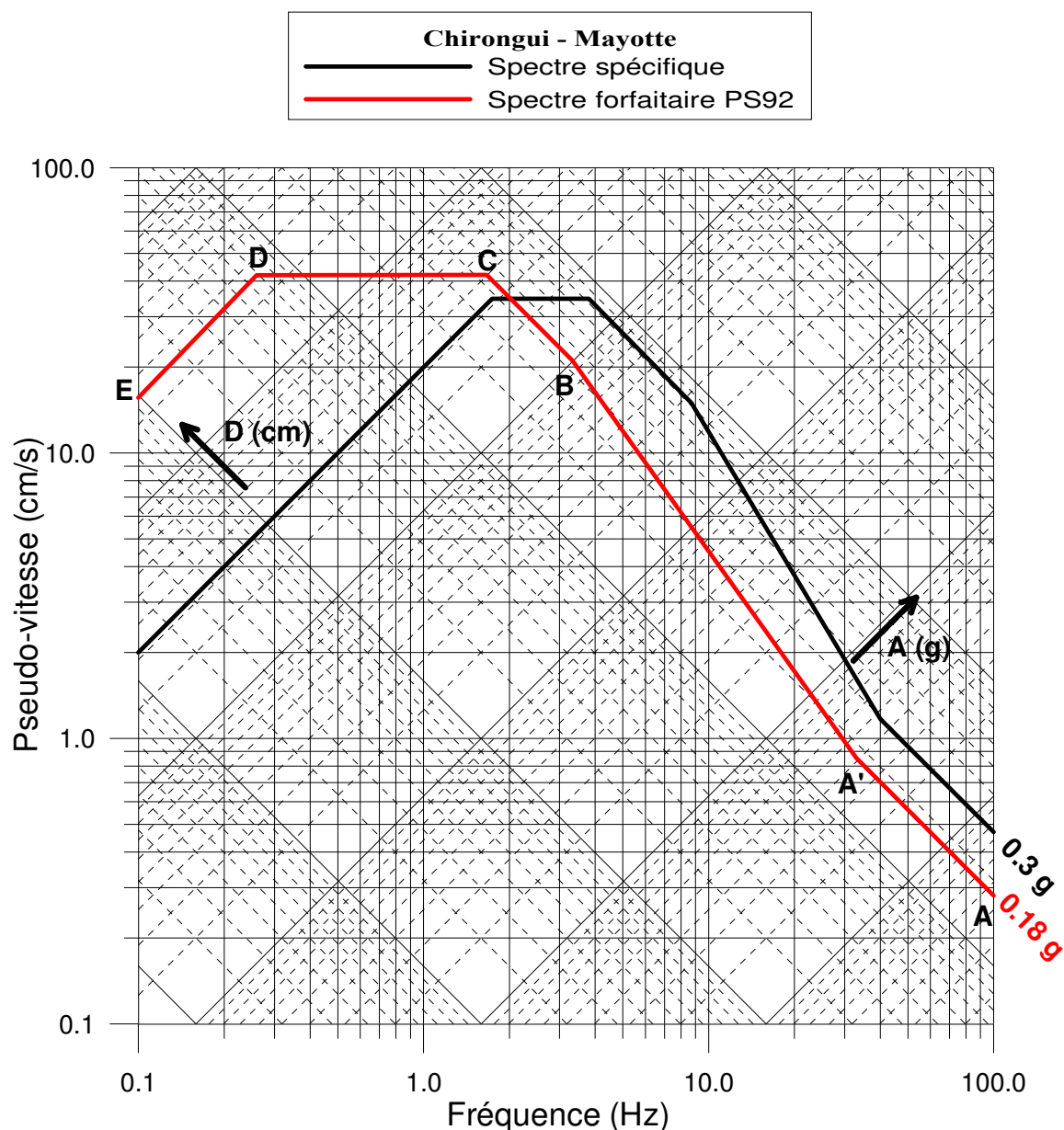


Figure 11 – Spectres tenant compte des effets de site lithologiques sur le site du lycée de Chirongui.

7. Appréciation des potentialités de liquéfaction

7.1. DÉFINITION ET MÉTHODE

En géotechnique, on appelle liquéfaction le processus de modification de l'état d'un sol, le faisant passer d'une consistance solide et stable au repos, à un état liquide et instable lors d'une sollicitation dynamique. De manière plus spécifique, la transformation de l'état solide à l'état liquide étudiée dans le cadre du présent rapport se fait par augmentation de la pression interstitielle, lors d'un chargement cyclique consécutif à un séisme.

L'augmentation de la pression interstitielle a pour conséquence une diminution des contraintes effectives régnant dans le sol et donc une diminution de sa résistance au cisaillement qui, à l'état ultime, peut devenir nulle : le sol passe alors à l'état liquide.

Pour qu'il y ait liquéfaction sous l'action d'un séisme, il faut donc :

- qu'il y ait susceptibilité du sol à la liquéfaction, c'est-à-dire qu'il soit plutôt granulaire, dans un état peu compact, peu contraint et situé sous la nappe (exemple des sables ou des limons lâches saturés) ;
- qu'il y ait opportunité à la liquéfaction, c'est-à-dire que l'énergie des ondes émises pendant un séisme soit suffisante, cette énergie étant par exemple traduite sous forme d'une accélération maximale en surface et d'un nombre de cycles équivalents, ces deux paramètres dépendant de la magnitude du séisme et de la distance du site au foyer.

Méthodologiquement, pour estimer l'occurrence de phénomènes de liquéfaction, il convient d'examiner successivement :

- le contexte hydrogéologique, notamment la présence de sols dans un état proche de la saturation ;
- la susceptibilité qualitative (critères d'identification des règles PS 92, norme NF P 06-013) ;
- la susceptibilité quantitative (méthodes basées sur des essais mécaniques in situ ou au laboratoire, par exemple Seed et al., 1983) ;
- l'opportunité ou la sollicitation (contexte sismique) ;
- le coefficient de sécurité à la liquéfaction, directement issu des deux points précédents ;
- les potentialités de liquéfaction, conjonction du contexte hydrogéologique, de la susceptibilité qualitative et de la valeur du coefficient de sécurité à la liquéfaction ;
- l'intensité de liquéfaction, à partir de l'indice global de liquéfaction permet d'évaluer l'impact de la profondeur et de l'épaisseur des horizons liquéfiables pour une colonne de sol.

7.1.1. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction

Pour des sols courants, les règles PS 92, norme NF P 06-013 précisent les critères d'identification des sols liquéfiables. La susceptibilité à la liquéfaction est avérée quand les critères suivants sont majoritairement vérifiés.

a) Pour les sables, sables vasards et limons :

- critère Sa1 : Sr voisin de 100 % ;
- critère Sa2 : $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$; Cu étant ici le coefficient d'uniformité ;
- critère Sa 3 : $0,05 < D_{50} < 1,5mm$;
- critère Sa 4 : En l'état final du projet :
 - $\sigma'_v < 200kPa$ en zones de sismicité Ia et Ib ;
 - $\sigma'_v < 250kPa$ en zone de sismicité II ;
 - $\sigma'_v < 300kPa$ en zone de sismicité III.

b) Pour les sols argileux :

- critère Ar1 : $D_{15} > 5\mu$;
- critère Ar2 : $w_L < 35\%$;
- critère Ar3 : $w > 0,9 \cdot w_L$;
- critère Ar4 : Sol au-dessus de la droite « A » du diagramme de plasticité 1.

Peuvent *a contrario* être considérés comme exempts de risque, les sols vérifiant :

- critère Ex1 : $D_{10} > 2mm$;
- ou ceux pour lesquels on a simultanément $\left\{ \begin{array}{l} \text{critère Ex11: } D_{70} < 74\mu m \\ \text{critère Ex22: } I_p > 10\% \end{array} \right.$

¹ Dans le diagramme classique limite de liquidité w_L / indice de plasticité I_p , la droite dite " A " a pour équation : $I_p = 0,73(w_L - 20)$

7.1.2. Susceptibilité quantitative à la liquéfaction

Les méthodes, basées sur des essais *in situ* (Seed *et al.*, 1983) ou de laboratoire évaluent quantitativement la susceptibilité à la liquéfaction en définissant le **taux de contrainte cyclique moyen nécessaire pour avoir la liquéfaction** :

$$\left(\frac{\tau_L}{\sigma'_v} \right)_\ell$$

Avec :

- τ_L , contrainte de cisaillement cyclique moyenne horizontale (résistance du sol);
- σ'_v , contrainte verticale effective.

Ce paramètre dépend à la fois d'une valeur mécanique *in situ*, permettant d'évaluer l'état initial de la compacité du sol, et de la magnitude du séisme considéré.

La valeur mécanique utilisée dans les travaux de Seed est le paramètre N (nombre de coups de mouton pour un enfoncement de 30 cm) du Standard Penetration Test (SPT). Les abaques de calculs à partir de l'essai SPT considèrent une énergie de battage de 60% de l'énergie théorique maximale (chute libre). On se ramène toujours à cette valeur, N_{60} , éventuellement en faisant un ratio à partir de l'énergie réelle.

En France, les essais les plus couramment pratiqués sont le pressiomètre et le pénétromètre statique. On se ramène alors à des valeurs du paramètre N par des corrélations usuelles (cf. Cassan – Essais *in situ* en mécanique des sols) :

- argiles : $N = 15 \text{ à } 20 \times pl$;
- limons : $N = 30 \times pl$;
- argiles sableuses ou sables argileux : $N = 20 \times pl$;
- sables : $N = 20 \times pl$.

La valeur brute du paramètre N est ensuite corrigée du coefficient de normalisation C_N pour se ramener à une même contrainte verticale effective de 96 kPa.

La valeur N_1 obtenue est : $N_1 = C_N \times N$.

Par ailleurs, selon la fraction fine des matériaux, il faut augmenter la valeur de N_1 , pour tenir compte des corrélations présentées par Seed pour ces sols.

Le taux de contrainte cyclique moyen nécessaire pour avoir la liquéfaction est alors obtenu grâce à l'abaque de Seed pour une magnitude et une valeur N_1 données.

Opportunité à la liquéfaction

L'évaluation du **taux de contrainte cyclique moyen induit par un séisme** peut être reliée à l'accélération maximale en surface par la relation (Seed *et al.*, 1983) :

$$\left(\frac{\tau_a}{\sigma'_v} \right)_S = 0,65 \times \frac{a_{\max}}{g} \times \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \times rd$$

avec $r_d = 1 - 0,015 \times z$, où z est la profondeur en mètres,

τ_a = contrainte de cisaillement cyclique induite par le séisme.

Coefficient de sécurité à la liquéfaction

Le rapport des taux de contraintes cycliques moyens définit le facteur de sécurité de la façon suivante :

$$FS_{\ell} = \left(\frac{\tau_L}{\sigma'_v} \right)_{\ell} / \left(\frac{\tau_a}{\sigma'_v} \right)_s$$

Pour que la liquéfaction soit peu probable, il est admis que FS_{ℓ} doit être supérieur à 1,33 s'il est calculé directement selon la méthode Seed, c'est-à-dire à partir d'essais SPT. Dans le cas où, on est amené à utiliser des corrélations pour se ramener au N SPT, on tient compte des incertitudes supplémentaires, en requérant un coefficient de sécurité plus élevé, de l'ordre de 1,6.

Potentialités de liquéfaction

Les potentialités de liquéfactions résultent de la conjonction du contexte hydrogéologique, de la susceptibilité qualitative et du coefficient de sécurité.

Intensité de la liquéfaction

Conformément au guide méthodologique pour la réalisation de microzonage sismique (AFPS), l'intensité de liquéfaction est définie par l'indice global de liquéfaction (Iwasaki & al., 1982) à partir du facteur F_L .

L'indice global de liquéfaction, I_L , permet d'évaluer l'impact de la profondeur et de l'épaisseur des horizons liquéfiables pour une colonne de sol :

$$I_L = \int_0^{20} (10 - 0,5z) F_L dz$$

où : $F_L = 0$ si matériaux non susceptibles qualitativement

$$F_L = 0 \quad \text{si } FS_{\ell} \geq 1$$

$$F_L = 1 - FS_{\ell} \quad \text{si } FS_{\ell} \leq 1$$

z profondeur (en m)

La valeur de I_L varie de 0 pour un site non liquéfiable à 100 pour un site très fortement liquéfiable. On distingue plusieurs classes :

- pas de liquéfaction : zones non liquéfiables ou $I_L = 0$;
- liquéfaction peu probable : $0 < I_L \leq 5$;

- liquéfaction probable : $5 < I_L \leq 15$;
- liquéfaction quasi certaine : $I_L > 15$.

7.2. APPRÉCIATION DES POTENTIALITÉS DE LIQUÉFACTION DU SITE DU LYCÉE DE CHIRONGUI

7.2.1. Formations à analyser

Parmi les 4 horizons identifiés dans l'étude, plusieurs sont à écarter vis à vis d'une éventuelle potentialité à la liquéfaction :

- les niveaux superficiels : ces niveaux moyennement compacts sont généralement hors nappe ;
- les horizons altérites : leur squelette très grossier et leur consistance moyenne les écartent du risque de liquéfaction ;
- la roche altérée et la roche saine.

À l'opposé, l'horizon constitué de sable argilo-silteux vasard doit faire l'objet d'une analyse plus fine, dans la mesure où sa susceptibilité à la liquéfaction ne peut être définie *a priori*.

7.2.2. Contexte hydrogéologique

L'horizon vasard est supposé être intégralement sous nappe.

7.2.3. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction

Seul l'horizon de sables argilo-silteux vasard a fait l'objet de l'étude détaillée suivante.

Outre les critères des règles PS 92, des fuseaux granulométriques délimitant le domaine de la plupart des sols liquéfiables sont disponibles dans la littérature (Faccioli & Resendiz 1976).

Les 2 granulométries disponibles dans les rapports d'essais ont été faites dans les vases argilo-silteuses. Ces courbes ont été superposées aux fuseaux granulométriques délimitant le domaine de la plupart des sols liquéfiables (Figure 12).

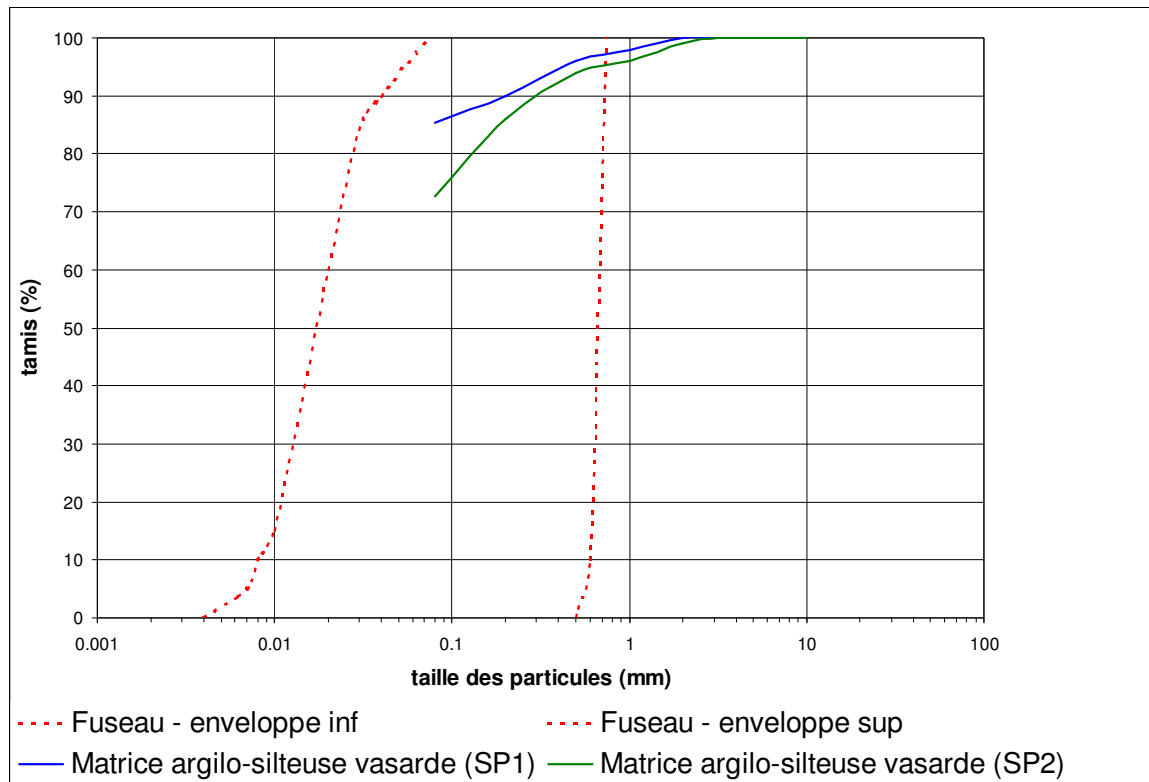


Figure 12 – Courbes granulométriques des vases limono-sableuses

On constate donc que ces vases sont très mal ajustées au fuseau de susceptibilité à la liquéfaction :

- granulométrie trop étalée
- matériaux trop argileux

Vis à vis des critères de suspicion et d'exclusion spécifiés dans les PS 92, le Tableau 16 récapitule les résultats obtenus.

Nature	Critères de suspicion	horizon vasard
Sables	S_r voisin de 100 %	non adapté
	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$	non adapté
	$0,05 < D_{50} < 1,5mm$	non adapté
	$\sigma'_v < 200kPa$ en zones de sismicité la et lb ;	non adapté

Argiles	$D_{15} > 5\mu$	NON (a priori par extrapolation de la courbe)
	$w_L < 35\%$	NON ($w_L = 47$ à 72%)
	$w > 0,9 \cdot w_L$	OUI
	Sol au-dessus de la droite « A » du diagramme de plasticité	NON (limite pour SP2)
Nature	Critères d'exclusions	horizon vasard
Sables	$D_{10} > 2mm$	Non adapté
Argiles	$\begin{cases} D_{70} < 74\mu m \\ I_p > 10\% \end{cases}$	OUI

Tableau 16 – Examen des critères de susceptibilité qualitative (règles PS 92)

Au vu de ces résultats les matériaux testés se révèlent non liquéfiables.

Par conséquent, le potentiel de liquéfaction de l'horizon vasard (sables argilo-silteux) est très faible à nul.

7.2.4. Susceptibilité quantitative et opportunité à la liquéfaction

Analyse non effectuée dans la mesure où aucun matériau potentiellement liquéfiable n'a été rencontré sur le site.

7.2.5. Préconisations en terme de dispositions constructives

En conséquence, le risque de liquéfaction sur le site étant très faible à nul, nous ne recommandons aucune mesure de protection spécifique.

On soulignera que cette absence de protection spécifique ne doit pas conduire à s'affranchir du respect des règles générales de construction en vigueur (normes, règlements et règles de l'art). En particulier, on veillera à adapter le projet aux règles de construction sur sols compressibles.

8. Conclusions

Le spectre de réponse spécifique sur le site du lycée de Chirongui à Mayotte a été obtenu à partir de l'analyse sismotectonique régionale.

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 sur la Figure 5 et dans le Tableau 7. L'accélération horizontale maximale du sol « au rocher horizontal affleurant » est de 0.15 g.

Dans un deuxième temps, une analyse des données géologiques et géotechniques disponibles sur le site a permis de définir une colonne de sols caractéristiques du site. Ceci a permis de calculer un spectre spécifique tenant compte des effets de site lithologiques 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 sur la Figure 9 et dans le Tableau 12.

L'accélération horizontale maximale du sol tenant compte des conditions de site pour le lycée de Chirongui est de 0.3 g.

Par ailleurs, une analyse des potentialités de liquéfaction a été effectuée. Cette analyse a conclu à un risque de liquéfaction très faible à nul pour le site du lycée de Chirongui.

On soulignera que cette absence de protection spécifique ne doit pas conduire à s'affranchir du respect des règles générales de construction en vigueur (normes, règlements et règles de l'art). En particulier, on veillera à adapter le projet aux règles de construction sur sols compressibles.

9. Références bibliographiques

- AFNOR (1995) - Règles de construction parasismique : règles PS applicables aux bâtiments, dites règles PS92. AFNOR, Paris, norme française NF P 06-013.
- Association Française du Génie Parasismique (1993) - Guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique. AFPS, St-Rémy-lès-Chevreuse.
- Abrahamson N.A. & W.J. Silva (1997) - Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seism. Res. Lett.*, Vol 68, p. 94-126.
- Ambraseys N.N., Simpson K. and J.J. Bommer (1996) - Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earth. Eng. Struct. Dyn.*, Vol 25, p. 371-400.
- Anderson J.G. (1978) – Attenuation of modified Mercalli intensity with distance in the United States. *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 68, p. 1147-1179.
- Arthaud F., Grillot J.C., Raunet M. (1989) – Mise en évidence d'une néotectonique en distension N-S à Madagascar (Hauts Plateaux). *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 309, p. 125-128.
- Aubry D., Hujeux J.C., Lassoudière F. & Meimon Y. (1982) – A double memory model with multiple mechanisms for cyclic soil behaviour. *Int. Symposium Num. Model. Geomechanics*, Zurich
- Aubry D., Modaressi A. & Modaressi H. (1990) – a Constitutive Model for Cyclic Behaviour of Interfaces with Variable Dilatancy. *Computers and Geotechnics*, 9:47-58
- 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.
- 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, 49 p., 24 fig., 7 tabl.
- Boore D.M., Joyner W.B. and T.E. Fumal (1997) - Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western north american earthquakes : a summary of recent work 1997. *Seism. Res. Lett.*, Vol 68 p. 128-153.
- Bour M. (1996) - SASSOM : modélisation de la source sismique. Manuel scientifique et notice d'utilisation. Rap. BRGM/R39150.
- 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.
- Chorowicz J (1992) – The role of ancient structures in the genesis and evolution of the East African Rift. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 3, p. 217-227.
- Cotton F., Berge-Thierry C., Maistre F., Fukushima Y. (1999) – Méthode de détermination des spectres adaptés au site dans le cadre de la modification de la RFS I.2.c. Rap. IPSN/DPRE, 99-32, sept. 99.
- Dahle A., Bungum H., Kvamme L.F. (1990) - Attenuation models inferred from intraplate earthquake recordings. *Earth. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 19, p. 1125-1141.

- Darendeli M.B. (2001) – Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. Ph.D. dissertation, University of Texas at Austin, USA, 2001
- 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.
- Gasparini D. and 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, January 1976
- Herrero A. (1994) - Paramétrisation spatio-temporelle et spectrale des sources sismiques : applications au risque sismique. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Paris VII.
- Hujeux J.C. (1985) – Une loi de comportement pour le chargement cyclique des sols. Génie Parasismique, 287-302, V. Davidovici (ed), Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
- Iwasaki T., Tokida K., Tatsuoka F., Watanabe S., Yasuda S., Sato H. (1982) – Microzonation for soil liquefaction using simplified methods. *Proc. 3rd Int. Earthquake Microzonation conf., Seattle, 3, pp. 1319-1330.*
- Kokusho T. (1980) – Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range. *Soils and foundations*, 20(4):45-60, 1980
- Lambert J. (1997) – Contribution au relevé de la sismicité historique des îles de la Réunion, de Maurice et des Comores. Rap. BRGM/R 39736, 56 p.
- Lyakhovsky V., Ben Avraham Z., Reznikov M (1994) – Stress distribution over the Mozambique Ridge. *Tectonophysics* 240, p. 21-27.
- 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.
- Mougenot D., Recq M., Virlogeux P., Lepvrier C. (1986) – Seaward extension of the East African Rift. *Nature*, 321, p. 599-603.
- 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.
- Petrovski D. (1986) - Probabilistic approach for evaluation of seismic design parameters. Specialists meeting on Earthquake ground motion and antiseismic evaluation of nuclear power plants, Moscou, URSS, March 1986.
- RFS98 (1999) - Proposition de modification de la Règle Fondamentale de Sûreté I.2c. relative à la détermination des mouvements sismiques à prendre en compte pour la sûreté des tranches nucléaires comportant un réacteur à eau sous pression, applicable à l'ensemble des installations nucléaires de base, IPSN (Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire), Rapp. DES n°348.

- 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 Nédellec J.L. avec la coll. de J.C. Audru (2002) - Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques sur le site emplisseur de gaz, port de Longoni (Mayotte). Rapport BRGM/RC-50052-FR - 2002 Mayotte 10, 52 p., 13 Fig., 13 Tabl.
- Sadigh K., Chang C.-Y., Egan J.A., Makdisi F. and R.R. Youngs (1997) - Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. *Seism. Res. Lett.*, Vol 68, p. 180-189.
- Seed H.B., Idriss I.M (1970) – Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis of horizontally layered sites. Report UCB/EERC 70-10, Earthquake Eng. Res. Center, Univ. California, Berkeley, Ca.
- Seed H.B., Idriss I.M., Arango J., 1983, Evaluation of liquefaction potential using field performance data, *J. of Geotechnical Engineering, ASCE*, vol. 109, n°3.
- 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.
- Tento A., Franceschina L. and A. Marcellini (1992) - Expected ground motion evaluation for Italian sites. Proc. *10th World Conference on Earthquake Engineering*, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol 1, p. 489-494.
- 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.
- Vucetic, Dobry R. (1991) – Effect of soil plasticity on cyclic response. *J. Geotech.Eng*, ASCE, 117(1), p. 89-107.
- Wells D.L., Coppersmith K.J. (1994) – New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 84, p. 974-1002.

ANNEXE 1

Détail de la méthode SASW

Cette méthode est fondée sur le principe de dispersion des ondes de surface (Bitri et al., 1997) pour la détermination des vitesses des ondes de cisaillement V_s dans les premières dizaines de mètres du sous-sol. Elle permet d'obtenir ce 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 V_s 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.

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

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.

La méthode expérimentale SASW, permet ainsi de mesurer le profil de vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le sol (cf. Figure 13) et par conséquent de déterminer le type de sol en fonction des paramètres d'identification donnés dans les Règles PS92.

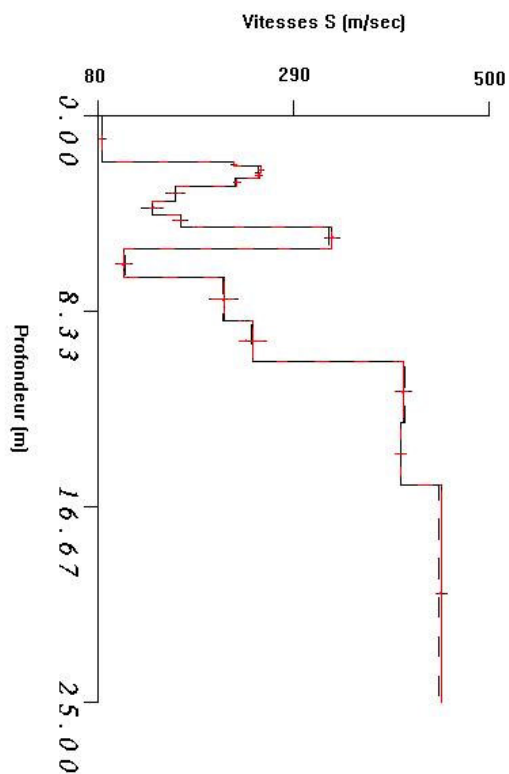


Figure 13 – Modèle de vitesse des ondes de cisaillement obtenu par inversion à proximité du site du projet de Chirongui

ANNEXE 2

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.

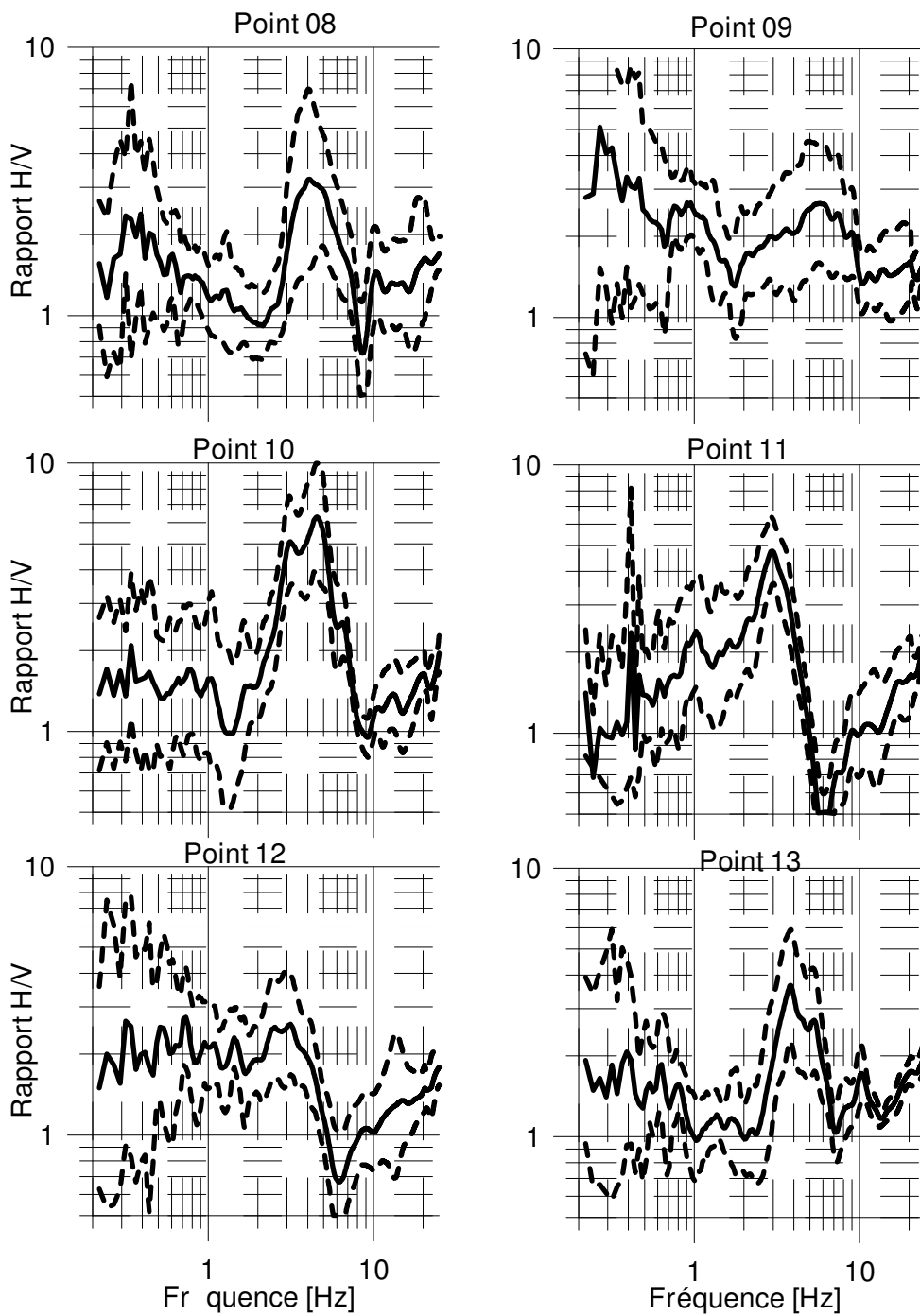
Pour obtenir une pseudo-fonction de transfert à l'aide du bruit de fond, en s'affranchissant de l'effet de source, on divise donc le spectre d'une composante horizontale par le spectre de la composante verticale (d'où l'appellation H/V). Ce rapport donne avec une bonne précision la fréquence de résonance 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 : $f_0 = V_s / 4 H$ (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



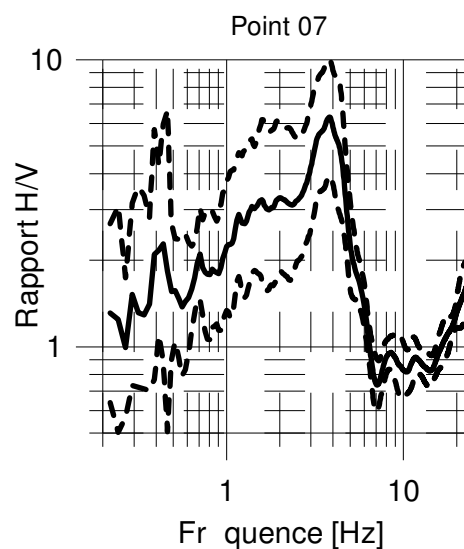


Figure 14 - résultats des mesures H/V réalisées sur le site du lycée de Chirongui.

Les points 9 et 12 sont très bruités et ne peuvent pas vraiment être utilisés. De manière générale, on observe une fréquence de résonance assez nette autour de 3 – 4 Hz, avec une décroissance de la fréquence quand on s'éloigne de la pente.

Cependant, il semble inutile de multiplier les zones et un seul spectre peut être proposé. Pour le calcul de la colonne de sol, une fréquence de résonance de 3 Hz pourra être utilisée.



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