



Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques sur le site de l'IFM de Dembéni (Mayotte)

Rapport final

BRGM/RP-54960-FR

Octobre 2006

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2006 - 06RISG34

J. Rey, A. Roullé, E. Vanoudheusden, J.-C. Audru.

Vérificateur :

Nom : DOMINIQUE Pascal

Date : 03/10/2006

Signature :

(Ou Original signé par)

Approbateur :

Nom : ROUBICHOU Philippe

Date : 13/10/2006

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, Dombéni, Mayotte, Comores.

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

Rey J., Roullé A., Vanoudheusden E., Audru J.-C. (2006) – Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques sur le site de l'IFM de Dombéni (Mayotte). Rapport BRGM/RP-54960-FR, 31 p., 13 ill., 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 de l'IFM de Dembéni (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 de l'IFM de Dembéni.

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 de l'IFM de Dembéni. Les spectres spécifiques qui en résultent sont fournis dans le rapport.

L'accélération horizontale maximale tenant compte 1) des conditions de site de l'IFM et 2) de la classe C des installations, est de **0.32 g (soit 3.2 m/s²)** (valeur de l'accélération pour T=0 s sur le spectre de réponse spécifique).

Étant donné que sur les sondages réalisés, aucun n'a mis en évidence l'existence d'une nappe **la liquéfaction au droit du site est négligeable.**

Sommaire

Synthèse	3
1. Introduction.....	7
2. État de la réglementation à Mayotte	9
3. Détermination des mouvements sismiques de référence au rocher.....	11
3.1. CARACTERISTIQUES DU SEISME DE REFERENCE.....	11
3.2. CALCUL DES MOUVEMENTS SISMIQUES DE RÉFÉRENCE A MAYOTTE..	11
4. Synthèse géologique et géotechnique.....	15
4.1. PREAMBULE.....	15
4.2. DONNEES	15
4.3. CARACTERISATION DES UNITES GEOMECANIQUES	16
4.3.1. Argile compacte	16
4.3.2. Substratum	17
4.4. RECAPITULATIF	17
4.5. HYDROGEOLOGIE	17
4.6. ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS	17
5. Spectres de réponse compte tenu des conditions de site.....	19
5.1. PRÉSENTATION DU PROBLÈME	19
5.1.1. Méthodes empirico-statistiques.....	19
5.1.2. Méthodes numériques	19
5.2. CHOIX DU SPECTRE SPÉCIFIQUE TENANT COMPTE DES CONDITIONS..... DE SITE.....	20
6. Conclusions	25
7. Références bibliographiques.....	27
ANNEXE 1	29

Liste des illustrations

Illustration 1 – Localisation du projet d'extension de l'IFM de Dembéné (polygone bleu).	7
Illustration 2 – Séisme de référence retenu pour l'étude de l'aléa sismique sur le site de l'IFM de Dembéné sur l'île de Mayotte.	11
Illustration 3 – Spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant. Amortissements 2, 5, 10 et 20 %.	12
Illustration 4 – Valeurs de A, V et D du spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant.	13
Illustration 5 – Emplacement approximatif des points de mesures H/V (ronds bleus) et des sondages (triangles jaunes)	15
Illustration 6 – Essais en laboratoire. Wn : teneur en eau naturelle ; WI : limite de liquidité ; IP : Indice de plasticité	16
Illustration 7 – Caractéristiques retenues pour les différentes formations	17
Illustration 8 – Colonnes de sol retenues pour l'étude.	18
Illustration 9 – Caractéristiques des accélérogrammes réels utilisés pour la modélisation numérique.	20
Illustration 10 – 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%.	22
Illustration 11 – Spectre de réponse élastique horizontal tenant compte des conditions de site et de la classe d'ouvrages (classe C) de l'IFM de Dembéné. Amortissements 2, 5, 10 et 20 %	23
Illustration 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.	24
Illustration 13 - Résultats des mesures H/V réalisées sur le site de l'IFM de Dembéné.	31

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'extension de l'Institut de Formation des Maîtres (IFM) de Dombéni (Mayotte). La DE a souhaité obtenir un spectre de réponse élastique utilisable pour l'ensemble de son projet, localisé par un polygone bleu sur l'illustration 1. Ce spectre permettra de dimensionner le projet en intégrant la prise en compte de l'aléa sismique régional et local.

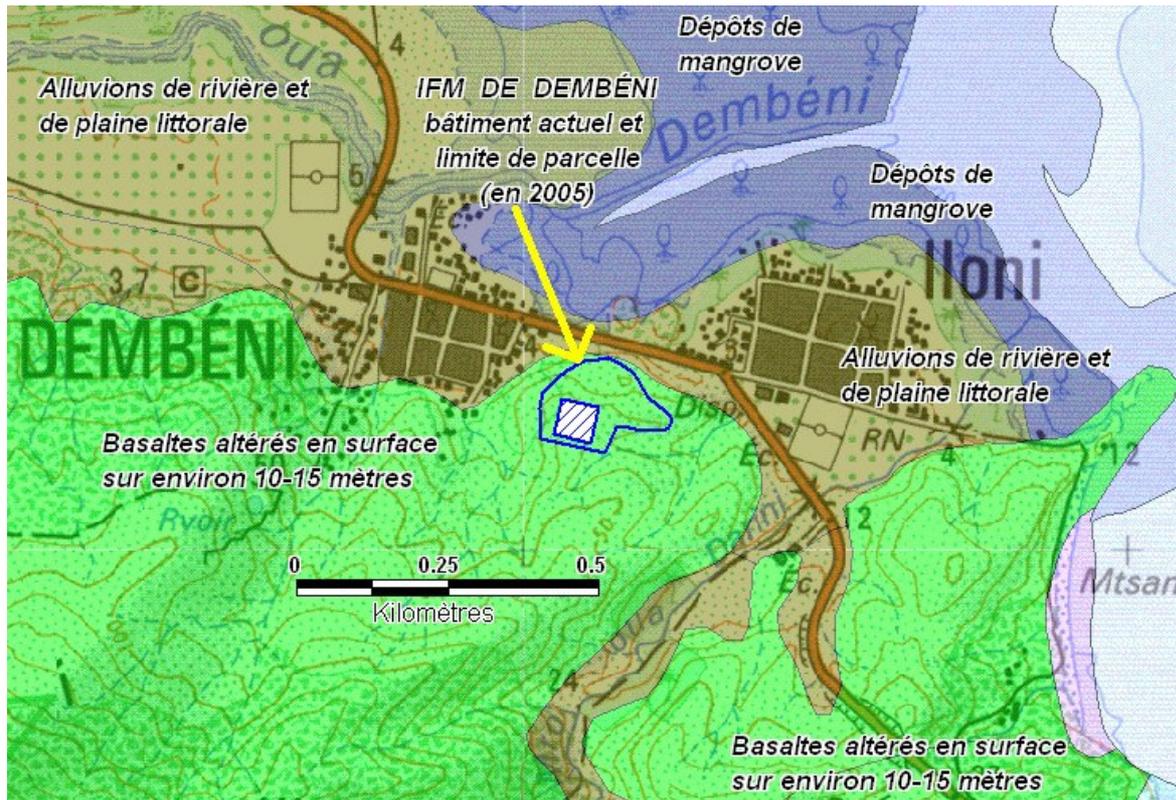


Illustration 1 – Localisation du projet d'extension de l'IFM de Dombéni (polygone bleu).

Notre 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. 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.

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 géotechniques 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 épiscopentrale 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 épiscopentrale, profondeur focale, magnitude) sont données dans l'illustration 2. 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 épiscopentrale (MSK)	VII-VIII
Profondeur focale (km)	10
Magnitude	5,2
Distance focale minimale au site (km)	10

Illustration 2 – Séisme de référence retenu pour l'étude de l'aléa sismique sur le site de l'IFM de Dombéni sur l'île de Mayotte.

3.2. CALCUL DES MOUVEMENTS SISMQUES 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 3.1.

Le spectre spécifique pour l'île de Mayotte est présenté pour des amortissements de 2, 5, 10 et 20 % sur l'illustration 3. 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 l'illustration 4 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 ouvrages 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.

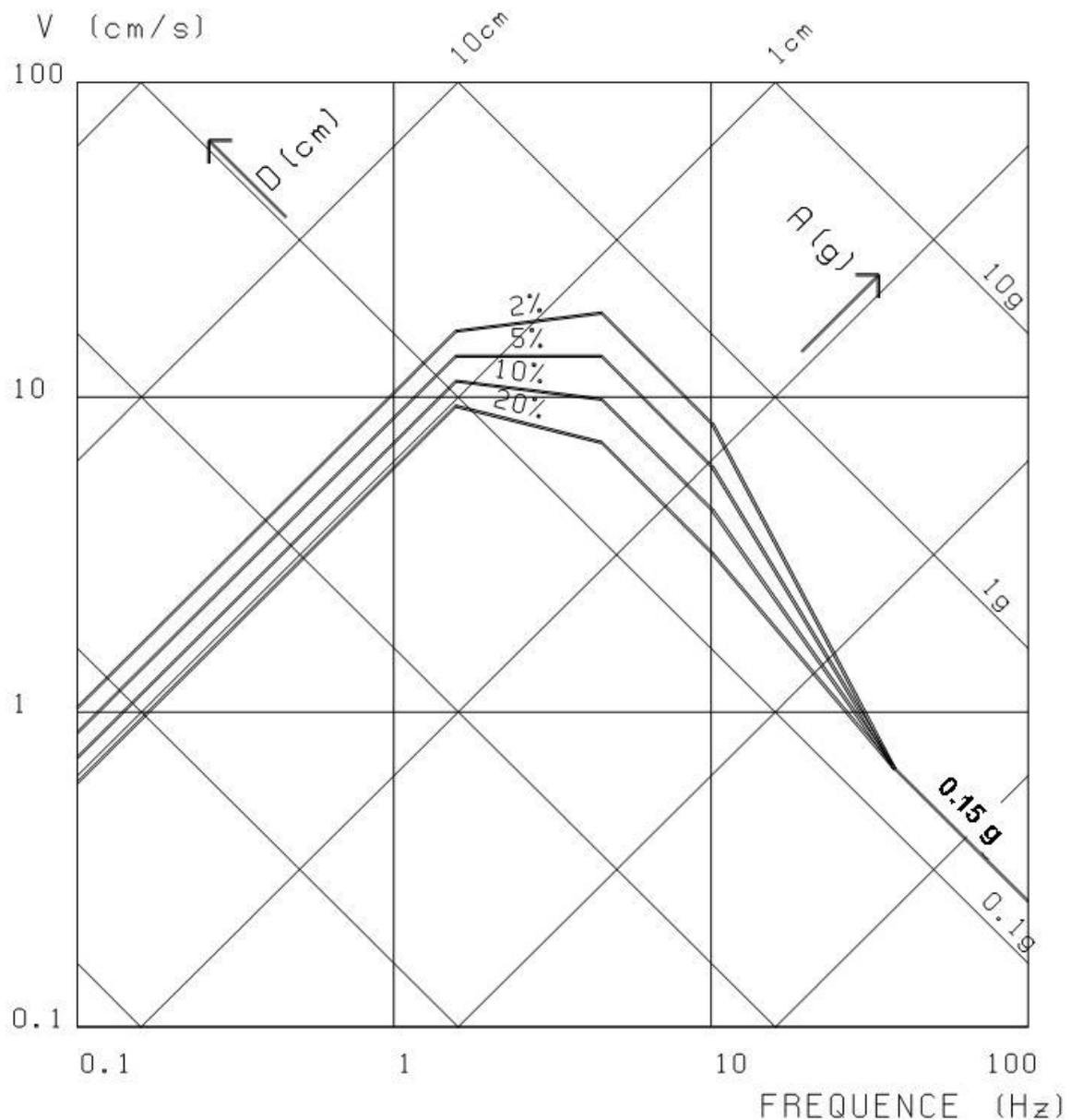


Illustration 3 – Spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant. Amortissements 2, 5, 10 et 20 %.

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

Illustration 4 – 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

Les campagnes d'investigations réalisées sur le site ont consisté en :

- les résultats des reconnaissances et des essais de laboratoires réalisés par le Parc de l'Équipement de Mayotte pour l'IFM de Dombéni,
- une étude géophysique réalisée par le BRGM, constituée de 7 points de mesures H/V.

Les positions des mesures H/V (Pt1 à Pt7) et des sondages SP1 et SP2 sont indiquées sur l'illustration 5 :



Illustration 5 – Emplacement approximatif des points de mesures H/V (ronds bleus) et des sondages (triangles jaunes)

4.3. CARACTERISATION DES UNITES GEOMECHANIQUES

4.3.1. Argile compacte

Sur la base des logs de sondage et de notre expérience de la zone, nous pouvons supposer que ces terrains d'argile correspondent à des horizons de basalte altéré et argilisé. Dans les logs des sondages ils sont nommés compacts ; nous revenons ci-dessous sur cette dénomination.

- *Épaisseur*

Ces terrains sont les seuls traversés par les sondages ; leur épaisseur est donc supérieure à 20 m.

- *Essais pressiométriques*

Les essais pressiométriques donnent des résultats différents dans les 2 sondages.

Au niveau de SP1, sur les 10 premiers mètres, la pression limite pl^* varie entre 0,9 et 2,2 MPa et le module pressiométrique E_M reste faible (entre 3,6 et 24,6 MPa). Sous 10 m de profondeur, les pressions limites sont plus fortes (entre 2 et 2,5) et les modules pressiométriques augmentent avec la profondeur (de 30 à 100 MPa), ce qui révèle un sol de meilleures caractéristiques mécaniques.

Au niveau du sondage SP2, on ne retrouve pas cette augmentation des caractéristiques mécaniques avec la profondeur : le module pressiométrique reste faible sur les 20 m de forage (entre 5 et 32 MPa) et la pression limite varie de 0,8 à 1,8.

- *Essais en laboratoire*

L'illustration 6 récapitule les résultats des essais réalisés en laboratoire sur les échantillons prélevés dans cette formation.

	Profondeur	Wn (%)	WI	IP
SP1	10 à 15 m	44,5	53,5	20,6
	15 à 18 m	45	56,4	18,1
	18 à 21 m	62,9	61,5	17,2
SP2	0 à 5 m	31,2	49,9	19,9
	5 à 10 m	40,9	44,4	15
	10 à 15 m	51,3	59,3	23,1
	15 à 20 m	49,7	72,3	22,9

Illustration 6 – Essais en laboratoire. Wn : teneur en eau naturelle ; WI : limite de liquidité ; IP : Indice de plasticité

Les mesures de teneur en eau données par ces essais sont en désaccord avec les résultats des limites d'Atterberg et la dénomination de compacité des argiles. La mesure d'une teneur en eau sur le prélèvement entre 18 et 21 m de SP1 supérieure à la limite de liquidité est à considérer avec précaution.

- *Caractéristiques dynamiques*

Compte tenu des résultats exposés précédemment, des mesures H/V (voir Annexe 1), et de notre expérience de la zone, on estime les vitesses des ondes S à 250 m/s dans les zones de caractéristiques mécaniques faibles et à 420 m/s dans les zones de caractéristiques meilleures.

4.3.2. Substratum

Dans la mesure où les sondages n'ont pas pénétré dans le substratum, il est délicat d'en apprécier la nature. Cependant, d'après la carte géologique au 1/10 000 de Mayotte (Debeuf et Bachélery, 2002), le substratum de cette zone de Dombéni serait constitué de basaltes mio-pliocènes.

Une vitesse de cisaillement de 800 m/s a été choisie pour caractériser le substratum.

4.4. RECAPITULATIF

L'illustration 7 résume les caractéristiques retenues pour chaque couche de sols compte-tenu des informations disponibles.

Formation	Epaisseur	Vs (m/s)	γ (kN/m ³)
Argile	20 m	250 à 420	18
Substratum	-	800	21

Illustration 7 – Caractéristiques retenues pour les différentes formations

4.5. HYDROGEOLOGIE

Sur les sondages réalisés, aucun n'a mis en évidence l'existence d'une nappe. Ainsi la nappe d'eau a au moins une profondeur de 20 m. Ceci indique par ailleurs que le **potentiel de liquéfaction au droit du site d'études est négligeable.**

4.6. ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS

Afin de calculer le spectre de réponse tenant compte des conditions de site, il convient de définir la colonne de sol représentative du terrain en place. Cette colonne de sol doit 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 (V_s) 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, les courbes $G(\gamma)/G_{max}$ & $D(\gamma)$ utilisées sont issues de la littérature (Kokusho, 1980, et Darendeli, 2001).

Compte tenu des importantes variations des caractéristiques mécaniques des terrains d'argile compacte, 2 colonnes de sol sont établies. L'illustration 8 récapitule les caractéristiques de ces colonnes.

Formation	Épaisseur colonne 1 (m)	Épaisseur colonne 2 (m)	Modèle de comportement	Vs (m/s)	γ (kN/m³)
Argile compacte	10	20	Inélastique	250	18
Argile compacte	10	-	Inélastique	420	18
Substratum	infini	infini	Elastique	800	21

Illustration 8 – Colonnes de sol retenues pour l'étude.

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. On peut utiliser les méthodes suivantes.

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 nous privilégions la méthode numérique.

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 la présente étude, nous avons utilisé un modèle de sol linéaire équivalent, viscoélastique. 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. On applique 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 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 (Illustration 9).
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

Illustration 9 – 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 sur l'illustration 10 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 10), il apparaît que les deux colonnes de sol semblent représentatives puisqu'elles donnent des amplifications du mouvement sismique pour des fréquences autour de 2.5 à 3 Hz (pour la colonne 1) ou autour de 3 à 3.5 Hz (colonne 2) ainsi qu'une seconde gamme d'amplification autour de 6-7 Hz (uniquement pour la colonne 1), comme cela a été constaté sur les résultats des mesures de bruit de fond (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 sur l'illustration 10).

D'autre part, les ouvrages présents ou futurs du site correspondent à la classe C (classe III, selon l'Eurocode 8) 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 l'illustration 10 (courbe grise) un coefficient multiplicateur de 1,2 (courbe rouge sur l'illustration 10).

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 l'illustration 11 pour les amortissements 2, 5, 10 et 20 %. C'est le spectre à considérer pour le dimensionnement des futures installations de l'IFM de Dembéni. 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 l'illustration 12 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 l'IFM de Dembéni (installation de classe C) est de 0.32 g.

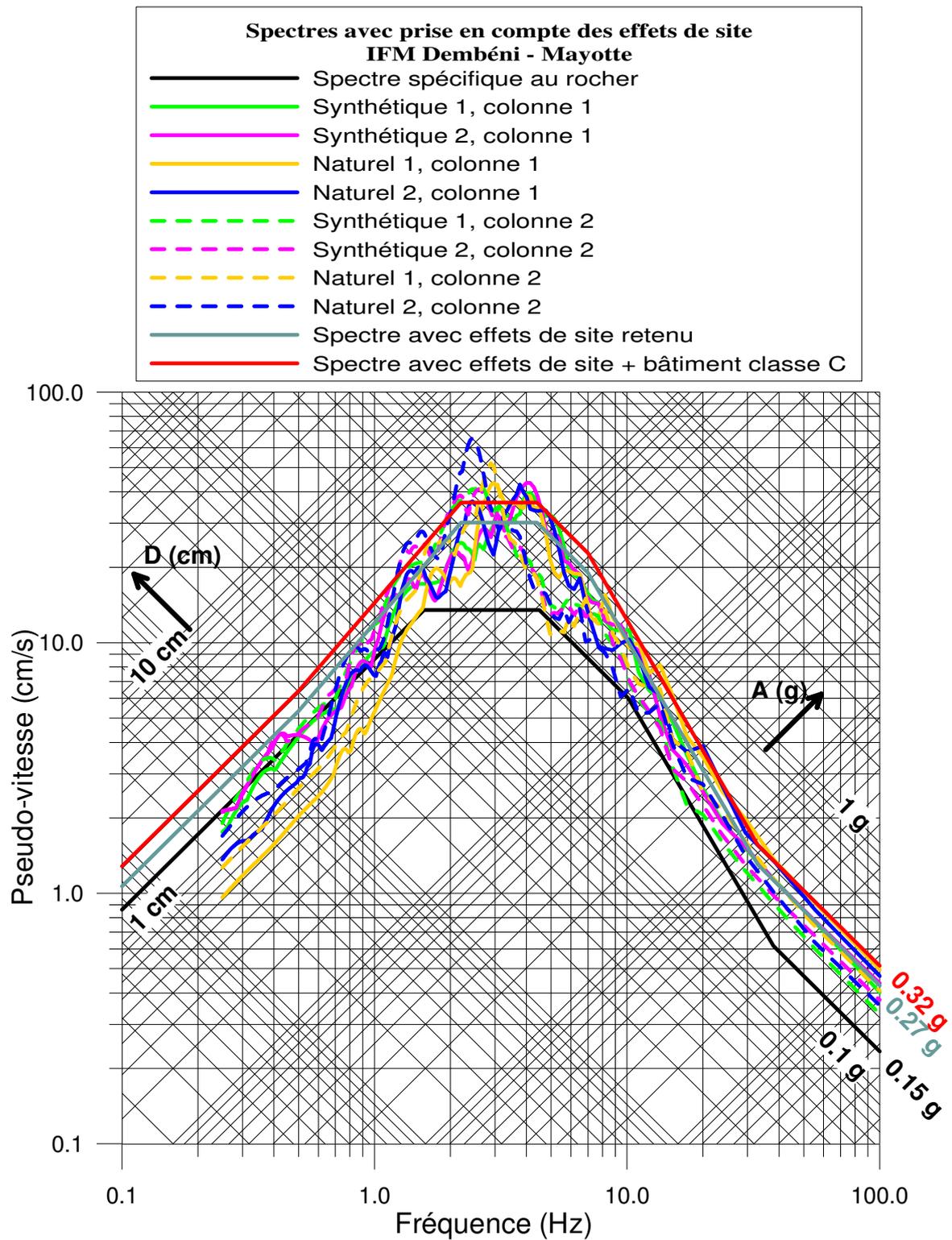


Illustration 10 – Comparaison du spectre spécifique au rocher horizontal affleurant avec ceux tenant compte des effets de site et du spectre retenu pour un amortissement de 5%.

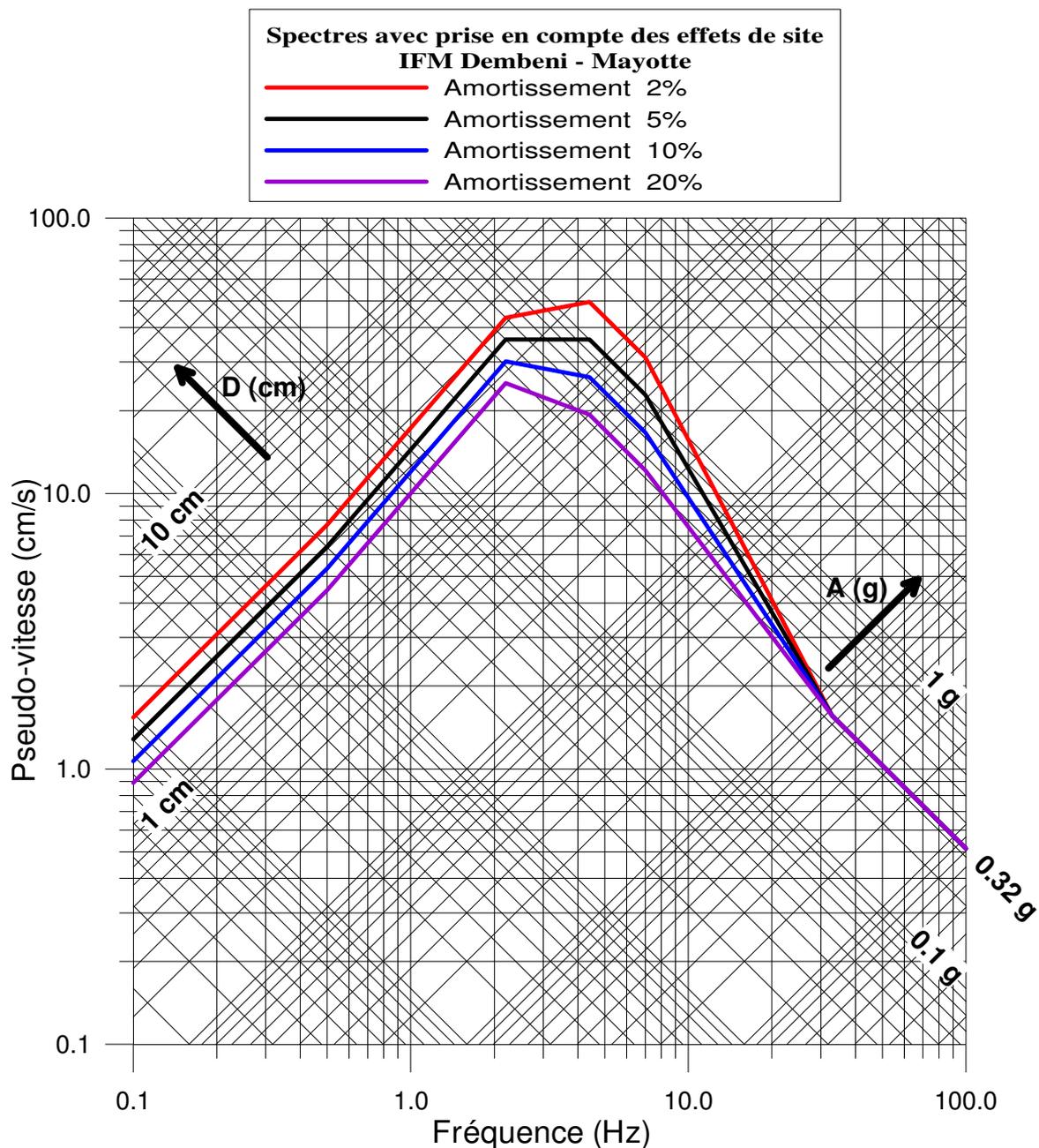


Illustration 11 – Spectre de réponse élastique horizontale tenant compte des conditions de site et de la classe d'ouvrages (classe C) de l'IFM de Dombéni. Amortissements 2, 5, 10 et 20 %

F (Hz)	Amortissement (%)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
0.1	2	0.0010	1.54	2.45
0.1	5	0.0008	1.28	2.04
0.1	10	0.0007	1.07	1.70
0.1	20	0.0006	0.89	1.42
0.5	2	0.025	7.69	2.45
0.5	5	0.021	6.41	2.04
0.5	10	0.017	5.34	1.70
0.5	20	0.014	4.45	1.42
2.2	2	0.61	43.47	3.14
2.2	5	0.51	36.22	2.62
2.2	10	0.43	30.19	2.18
2.2	20	0.35	25.15	1.82
4.4	2	1.40	49.63	1.80
4.4	5	1.02	36.22	1.31
4.4	10	0.75	26.44	0.96
4.4	20	0.54	19.30	0.70
7.0	2	1.40	31.19	0.71
7.0	5	1.02	22.77	0.52
7.0	10	0.75	16.62	0.38
7.0	20	0.54	12.13	0.28
33	Tous amortissements	0.32	1.56	0.008
100	Tous amortissements	0.32	0.51	0.0008

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

6. Conclusions

Le spectre de réponse spécifique sur le site de l'IFM de Dombéni 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 l'illustration 3 et dans l'illustration 4. L'accélération horizontale maximale du sol « au rocher horizontal affleurant » est de 0.15 g.

Dans un deuxième temps, une analyse des données géologiques, géotechniques et géophysiques disponibles et acquises lors 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 linéaire-équivalent (code de calcul CyberQuake, version 2000). Ce spectre tient aussi compte de la classe du bâtiment (classe C). Il est représenté sur l'illustration 11 et dans l'illustration 12.

L'accélération horizontale maximale du sol tenant compte des conditions de site pour le futur lycée de Dombéni est de 0.32 g (soit 3.2 m/s²).

Etant donné que sur les sondages réalisés, aucun n'a mis en évidence l'existence d'une nappe le **potentiel de liquéfaction au droit du site d'études est négligeable.**

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.
- 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.
- Darendeli M.B. (2001) – Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves, Ph. D. dissertation, University of Texas, Austin, USA.
- Debeuf et Bachélery (2002) – Carte géologique de Mayotte à 1/10 000 et sa notice. Éd. BRGM.
- 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.
- Kokusho T. (1980) – Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range, *Soils and Foundations*, Vol. 20 (4), p. 45-60.
- 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.
- 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 sîreté 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., Sedan O., Audru J.C., Mathon C., Nédellec J.L., Bitri A., Bour M. et Lebrun B., avec la collaboration de J.P. Rançon – Microzonage sismique de Mamoudzou-Centre, île de Mayotte. Rapport BRGM/RP-51839-FR – 2002 Mayotte 05.
- 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

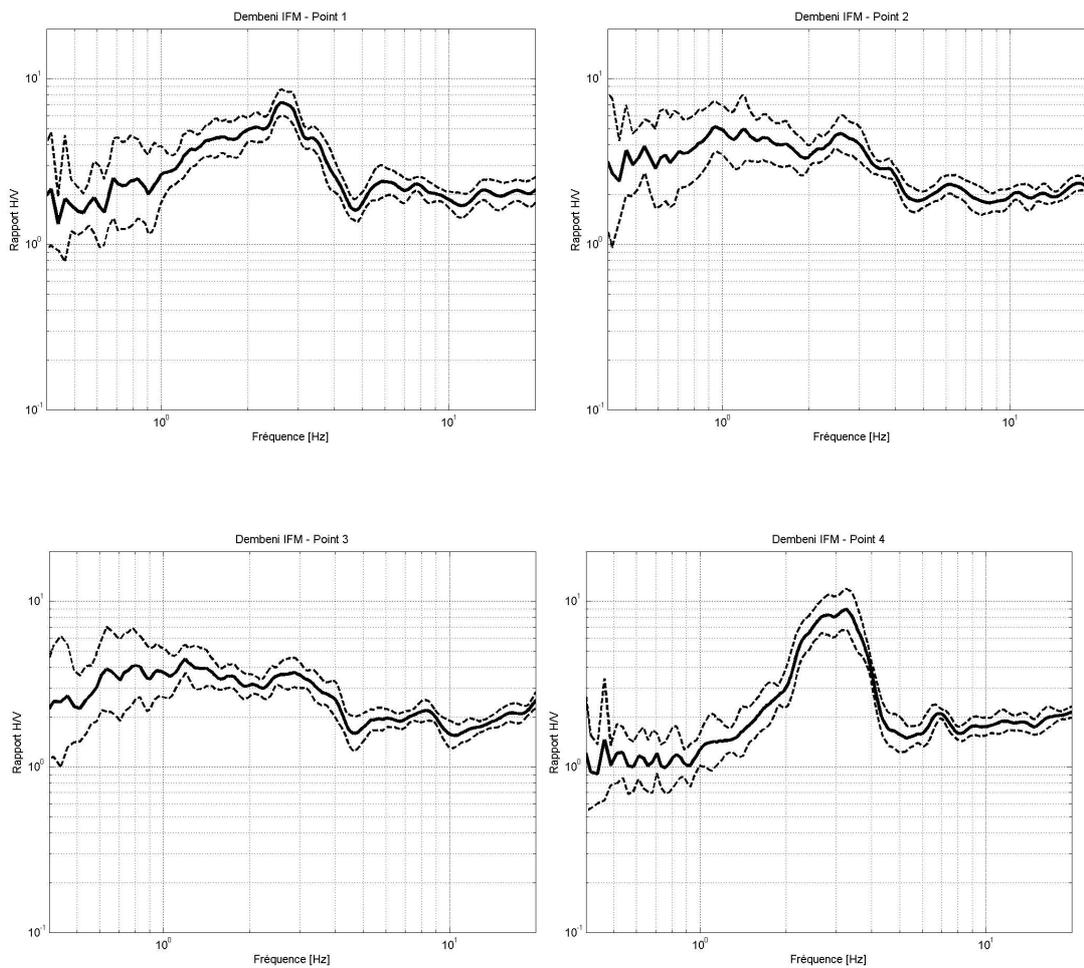
De nombreuses techniques théoriques, numériques ou instrumentales ont été développées pour estimer les effets de site lithologiques (Sabourault, 1999). Les techniques expérimentales font généralement appel à un site de référence, c'est-à-dire un site rocheux n'amplifiant pas le mouvement sismique. Ce 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 : $f_0 = V_s / 4 H$ (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



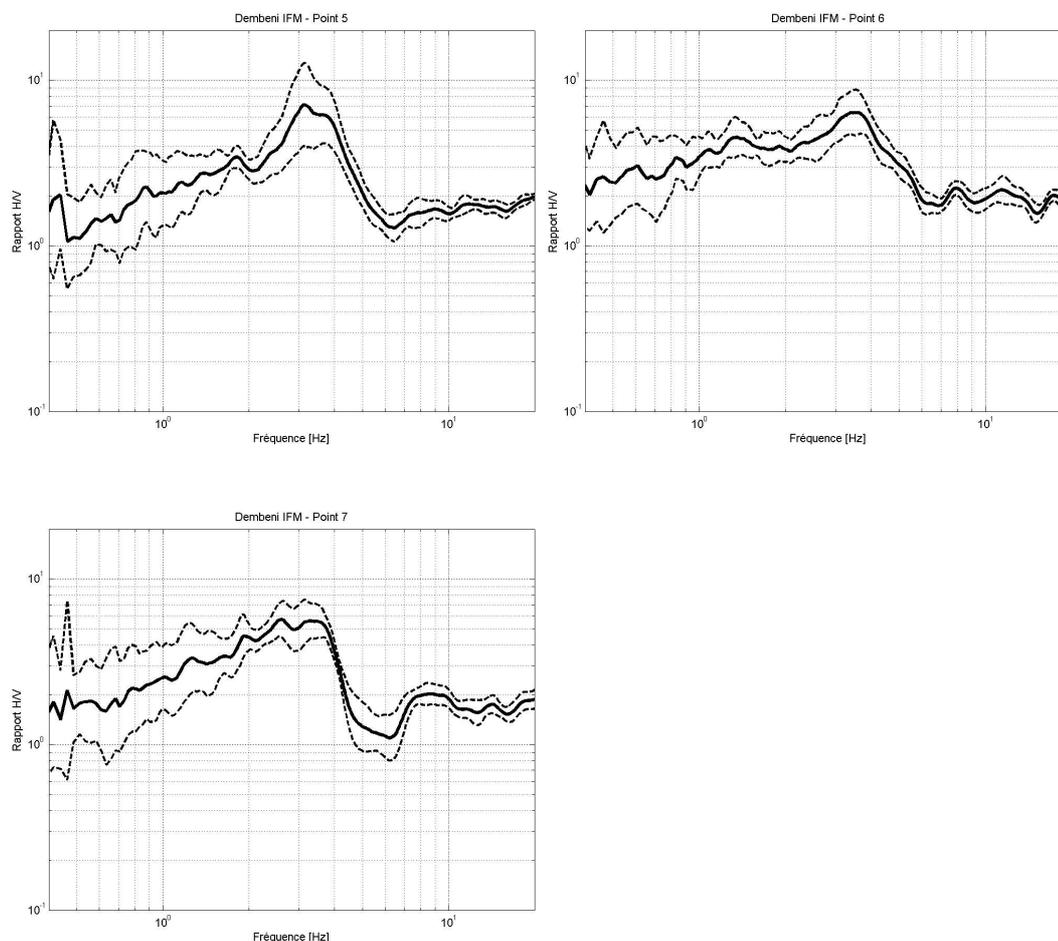


Illustration 13 - Résultats des mesures H/V réalisées sur le site de l'IFM de Dombéni.

Les résultats sont assez homogènes d'un site de mesure à l'autre. De manière générale, on observe une fréquence de résonance assez nette entre 2.5 et 3.5 Hz. Cette résonance est sans doute à associer à une couche d'une vingtaine de mètres d'épaisseur et de vitesse d'onde de l'ordre de 250 m/s (colonne 2 dans le Illustration 8). Une deuxième fréquence de résonance autour de 6-7 Hz moins marquée peut être observée sur plusieurs points de mesure (notamment les points 1, 4 et 6). Cette résonance peut correspondre à une couche de 10 mètres d'épaisseur et de vitesse d'ondes de l'ordre de 250 m/s (colonne 1 dans le Illustration 8).



Centre scientifique et technique
3 avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Antenne de Mayotte
9, centre Amatoula – Z.I. de Kawéni
BP 1398
97600 – Mamoudzou - Mayotte
Tél. : 02.69.61.28.13