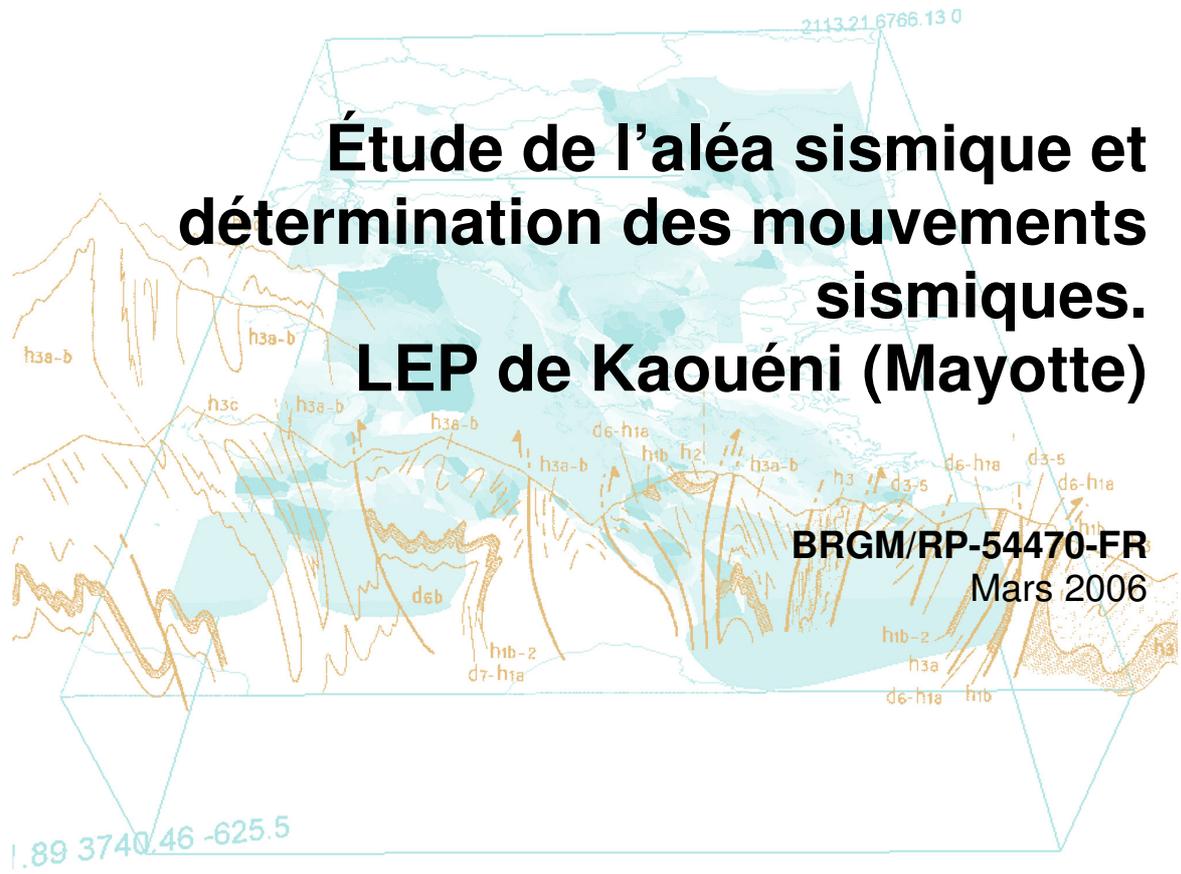


Document public



Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. LEP de Kaouéni (Mayotte)

BRGM/RP-54470-FR
Mars 2006



Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. LEP de Kaouéni (Mayotte)

BRGM/RP-54470-FR

Étude réalisée dans le cadre des projets de service
public du BRGM 05RISG19
Mars 2006

J. Rey, A. Roullé, F. De Martin, J.-C. Audru, J.-M. Miehe, A. Bitri et J.-L. Nédellec

Vérificateur :

Nom : P. Dominique

Date :

Signature :

(Ou Original signé par)

Approbateur :

Nom : P. Roubichou

Date :

Signature :

(Ou Original signé par)

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

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

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

J. Rey, A. Roullé, F. De Martin, J.-C. Audru, J.-M. Miehé, A. Bitri et J.-L. Nédellec (2006) – Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. LEP de Kaouéni (Mayotte). Rapport BRGM/RP-54470-FR, 49 p., 11 illust., 9 tabl., 2 annexes.

Synthèse

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

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

Une configuration du type de sols correspondant au modèle géomécanique à l'aplomb du projet a été définie afin de tenir compte des conditions particulières du site du LEP de Kaouéni. Les spectres spécifiques qui en résultent sont fournis en Illustration 8 et Tableau 7.

L'accélération horizontale maximale tenant compte 1) des conditions de site du lycée et 2) de la classe C des installations, est de **0.35 g (soit 3.5 m/s²)** (valeur de l'accélération pour T=0 s sur le spectre de réponse spécifique représenté Illustration 8).

Conformément à la classification établie dans le guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique (AFPS), la liquéfaction au droit du site est « **peu probable** ».

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

Sommaire

Synthèse	5
1. Introduction	9
2. État de la réglementation à Mayotte	11
3. Détermination des mouvements sismiques de référence au rocher	13
3.1. CARACTERISTIQUES DU SEISME DE REFERENCE.....	13
3.2. CALCUL DES MOUVEMENTS SISMQUES DE RÉFÉRENCE A MAYOTTE.....	13
4. Synthèse géologique et géotechnique	17
4.1. PREAMBULE.....	17
4.2. DONNEES.....	17
4.2.1. Contexte géologique.....	17
4.2.2. Contexte géotechnique et géophysique.....	18
4.3. CARACTERISATION DES UNITES GEOMECHANQUES.....	20
4.3.1. Caractéristiques.....	20
4.3.2 Récapitulatif.....	24
4.4. HYDROGEOLOGIE.....	25
4.5. ÉTABLISSEMENT DE COLONNES DE SOLS.....	25
5. Spectres de réponse compte tenu des conditions de site	27
5.1. PRÉSENTATION DU PROBLÈME.....	27
5.1.1. Méthodes empirico-statistiques.....	27
5.1.2. Méthodes numériques.....	27
5.2. CHOIX DU SPECTRE SPÉCIFIQUE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE.....	28
6. Appréciation des potentialités de liquéfaction	32
6.1. DEFINITION ET METHODE.....	32
6.1.1. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction.....	33
6.1.2. Susceptibilité quantitative à la liquéfaction.....	33
6.2. APPRECIATION DES POTENTIALITES DE LIQUEFACTION DU SITE DE KAOUENI.....	36
6.2.1. Formations à analyser.....	36
6.2.2. Contexte hydrogéologique.....	36
6.2.3. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction des limons argilo-sableux.....	37
6.2.4. Susceptibilité quantitative et opportunité à la liquéfaction.....	39
6.2.5. Préconisations en terme de dispositions constructives.....	39
7. Conclusions	42

8. Références bibliographiques	43
ANNEXE 1	45
ANNEXE 2	47

Liste des illustrations

Illustration 1 – Localisation du projet d'extension du LEP de Kaouéni (carré rouge). Extrait de la carte IGN 4410 Nord au 1/25000 ^{ème}	9
Illustration 2 - Spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant. Amortissements : 2, 5, 10 et 20 %.....	14
Illustration 3 – Contexte géologique local de Kaouéni (Mayotte) d'après Debeuf et Bachélery (2002).	17
Illustration 4 - Carte lithologique interprétative de la dépression de Kaouéni, trace de la coupe –trait noir- et emplacement du forage 0012 (Wuilleumier et al., 2004).	18
Illustration 5 – Sondages Pressiométriques (SP) et Pénétrométriques (STP) du LEP de Kaouéni (Echelle 1/500).....	19
Illustration 6 – Emplacements des mesures H/V (points verts) sur le site du LEP de Kaouéni	20
Illustration 7 - 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%.	29
Illustration 8 – Spectre de réponse élastique horizontal tenant compte des conditions de site et de la classe d'ouvrage (classe C) du LEP de Kaouéni. Amortissements : 2, 5, 10 et 20%	30
Illustration 9 – Courbes granulométriques des limons argilo-sableux.....	37
Illustration 10 – Modèle de vitesse des ondes de cisaillement obtenu par inversion sur le site du LEP de Kaouéni.....	45
Illustration 11 - résultats des mesures H/V réalisées sur le site du LEP de Kaouéni.	48

Liste des tableaux

Tableau 1 – Séisme de référence retenu pour l'étude de l'aléa sismique sur le site du LEP de Kaouéni sur l'île de Mayotte.....	13
Tableau 2 - Valeurs de A, V et D du spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant.....	15
Tableau 3 – Essais en laboratoire. Dmax : Diamètre maximal ; W : teneur en eau naturelle ; WI : limite de liquidité ; IP : Indice de plasticité ; IC : Indice de consistance	21
Tableau 4 – Caractéristiques mesurées moyennes des formations géologiques.	24
Tableau 5 – Colonne de sol. Vs : vitesse des ondes de cisaillement en m/s; Vp : vitesse des ondes longitudinales ; Ip = Indice de plasticité.....	26
Tableau 6 - caractéristiques des accélérogrammes réels utilisés pour la modélisation numérique.....	28
Tableau 7 – 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.	31
Tableau 8 – Examen des critères de susceptibilité qualitative (règles PS 92)	38
Tableau 9 – Calcul de l'intensité de liquéfaction	41

1. Introduction

Ce rapport a été réalisé à la demande de la Direction de l'Équipement (DE) de Mayotte pour son projet d'extension du LEP de Kaouéni (Mayotte). La DE a souhaité obtenir un spectre de réponse élastique utilisable pour l'ensemble de son projet, localisé par un rectangle rouge en Illustration 1. Ce spectre permettra de dimensionner le projet en intégrant la prise en compte de l'aléa sismique régional et local.

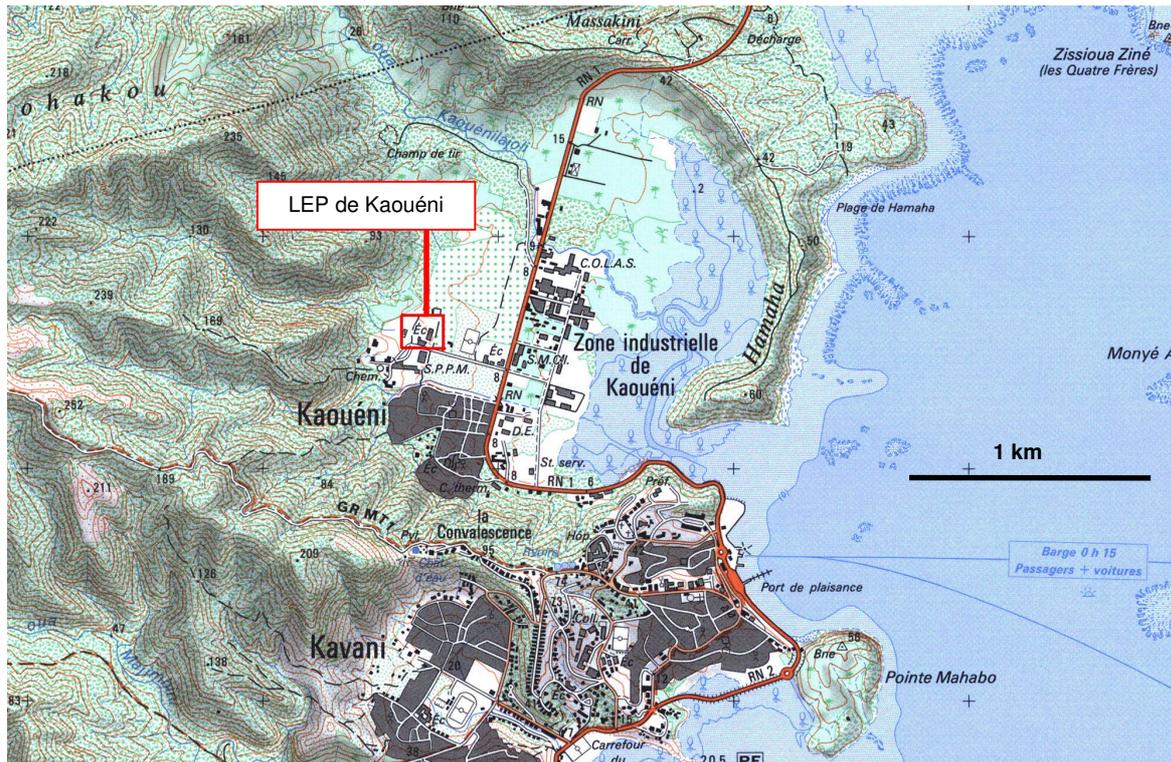


Illustration 1 – Localisation du projet d'extension du LEP de Kaouéni (carré rouge). Extrait de la carte IGN 4410 Nord au 1/25000^{ème}.

Cette étude comprend successivement :

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

2. État de la réglementation à Mayotte

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

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

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

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

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

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

3. Détermination des mouvements sismiques de référence au rocher

3.1. CARACTERISTIQUES DU SEISME DE REFERENCE

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

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

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

3.2. CALCUL DES MOUVEMENTS SISMIQUES DE RÉFÉRENCE A MAYOTTE

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

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

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

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

Ce spectre est défini « au rocher horizontal affleurant », autrement dit pour des conditions standard de sol ferme à rocheux. Selon les terrains (épaisseur et résistance mécanique des formations en place) sur lesquels reposent les installations de l'île de Mayotte, les mouvements sismiques de référence doivent tenir compte des conditions locales de site.

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

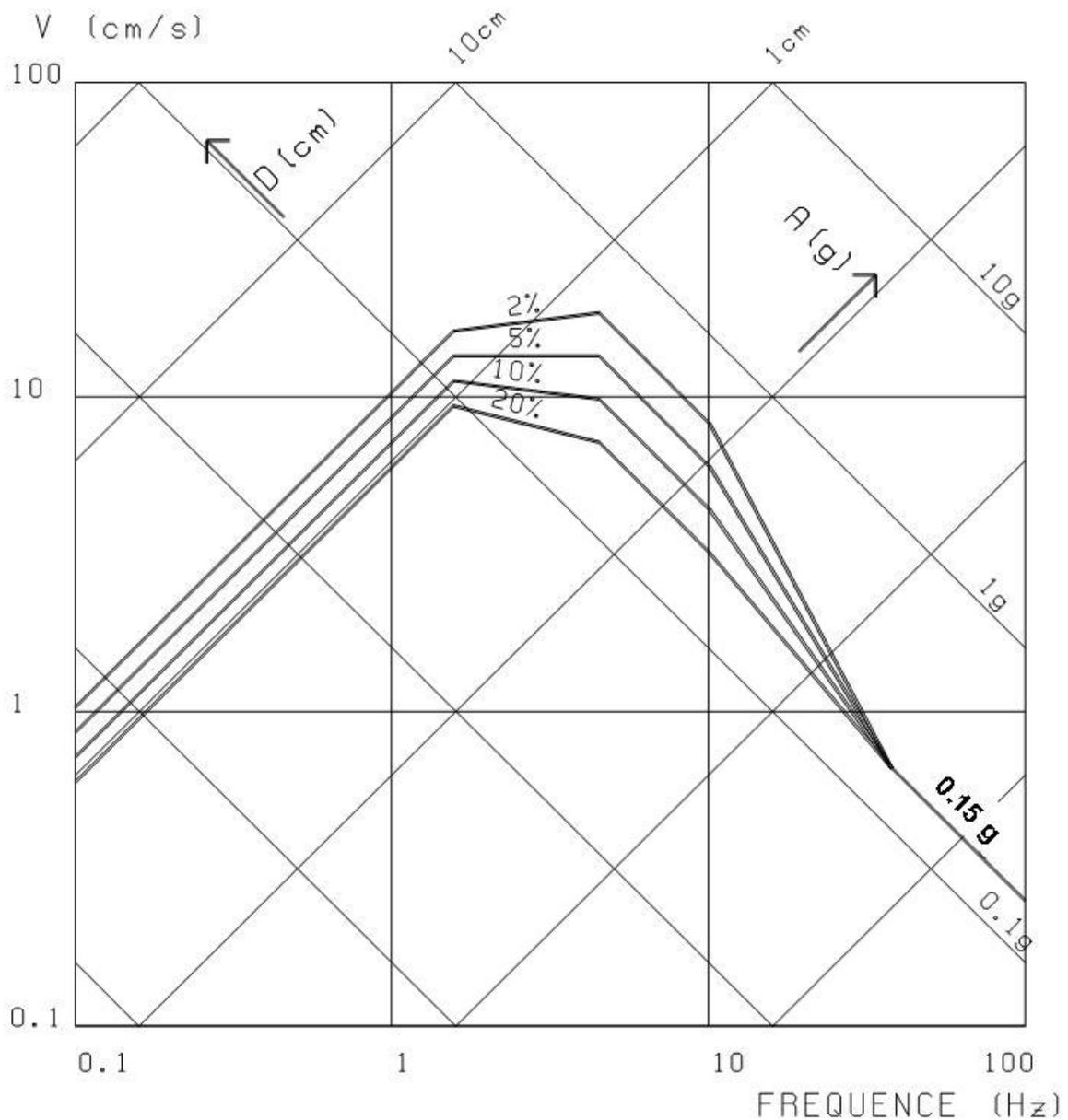


Illustration 2 - Spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant.
Amortissements : 2, 5, 10 et 20 %.

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

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

4. Synthèse géologique et géotechnique

4.1. PREAMBULE

L'objectif de cette analyse géotechnique est double :

- Premièrement, sont caractérisées 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 ;
- Deuxièmement, sont déterminées les formations liquéfiables en cas de séismes et si le cas se présente, l'intensité de la liquéfaction.

4.2. DONNEES

4.2.1. Contexte géologique

La géologie superficielle autour de la la ZI de Kaouéni est représentée ci-dessous : ce sont principalement des alluvions et des colluvions argileuses issues des versants environnants.

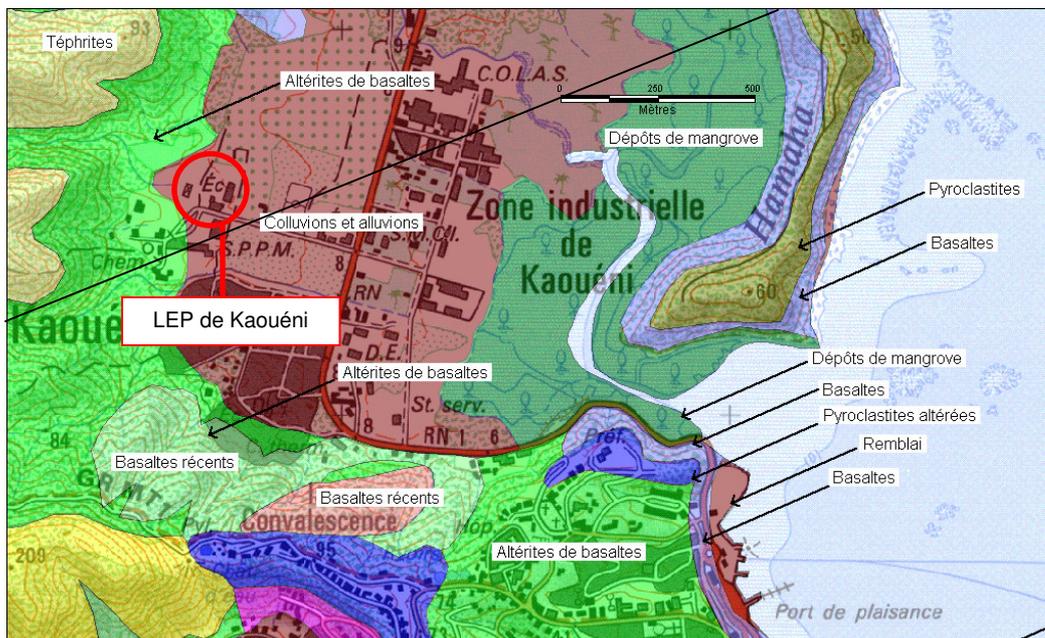


Illustration 3 – Contexte géologique local de Kaouéni (Mayotte) d'après Debeuf et Bachélery (2002).

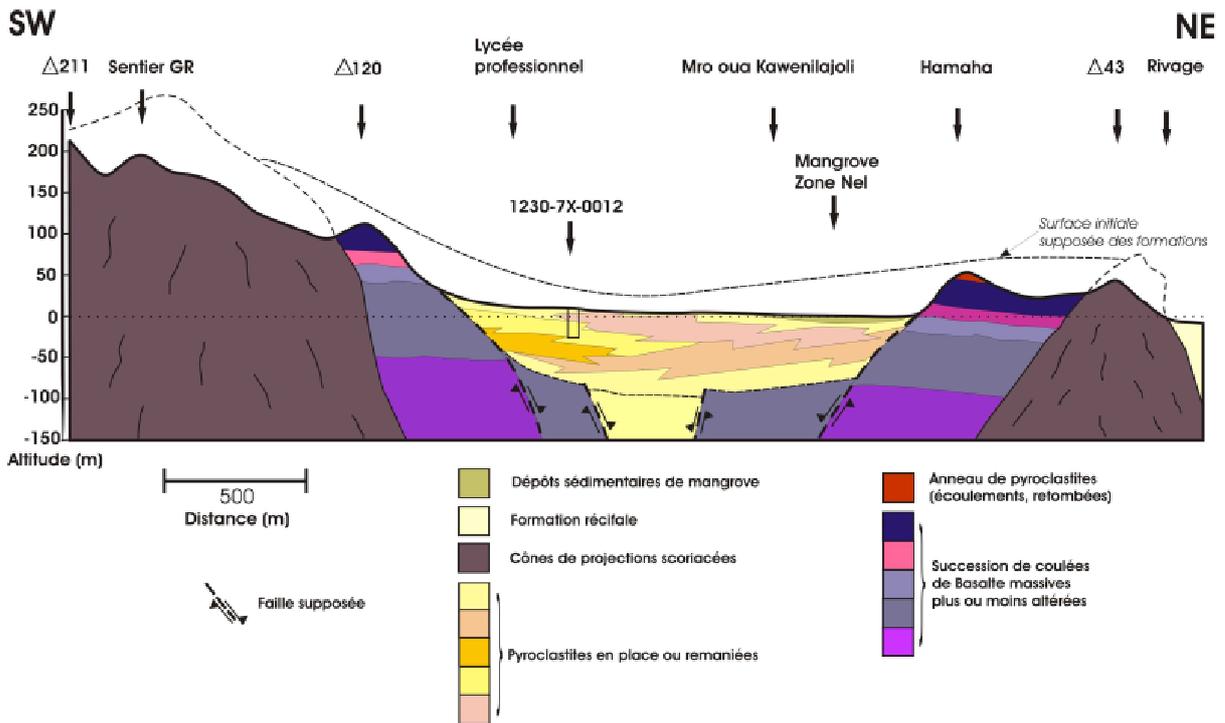


Illustration 4 - Carte lithologique interprétative (trait de coupe sur la figure 3) de la dépression de Kaouéni, et emplacement du forage 7X- 0012 (Wuilleumier et al., 2004).

4.2.2. Contexte géotechnique et géophysique

Les sondages disponibles pour ce site ont été effectués par 3 sociétés à 4 dates différentes :

1. En 2003, l'entreprise SEGC a réalisé des sondages jusqu'à 6.00 m de profondeur. Les feuilles d'essai n'ont pas été communiquées. Les sondages étaient les suivants :
 - a. 4 sondages tarière manuelle,
 - b. 4 profils sismiques (sismique réfraction),
 - c. 8 essais pénétrométriques.

Ces sondages mettaient en évidence une séquence lithologique composée de :

- i. Remblai limoneux de 0.00 à 1.00 m/TN
 - ii. Limons argilo-sableux d'origine alluvionnaire de 1.0 à 3.6 – 4.7 m/TN
 - iii. Altérites de 3.6 – 4.7 à 6.0 m/TN
2. En 2003 toujours, la même entreprise a effectué un complément d'étude comportant 4 sondages pénétrométriques et 2 profils sismiques (emplacements non communiqués).

3. En 2004, l'entreprise Géotechnique et Contrôles effectua 3 sondages à la tarière mécanique (STP1 jusqu'à 6.00 m, STP2 jusqu'à 4.00 m, STP3 jusqu'à 5.00 m/TN) suivis d'essais pressiométriques.
4. Enfin, en 2005, une campagne de sondages spécifiques réalisée par la Direction de l'Équipement de Mayotte a eu lieu. Ces reconnaissances basées sur des forages sont les suivantes :
 - a. Un sondage pressiométrique tous les 2 mètres (SP1), arrêté à 20 m et un sondage pressiométrique tous les mètres (SP2), arrêté à 6 m. Ces sondages donnent les pressions de fluage, les pressions limite et les modules pressiométriques aux cotes de sondage.
 - b. un échantillon remanié prélevé (éch. 2005-G-0074) sur lequel les essais suivants ont été pratiqués :
 - Analyse granulométrique ;
 - Limites d'Atterberg ;
 - Teneur en eau naturelle.

Ces données étant peu profondes et n'atteignant jamais le substratum, elles ont été complétées par des données concernant un sondage de 50 m de profondeur proche du lycée et effectué en 1991.

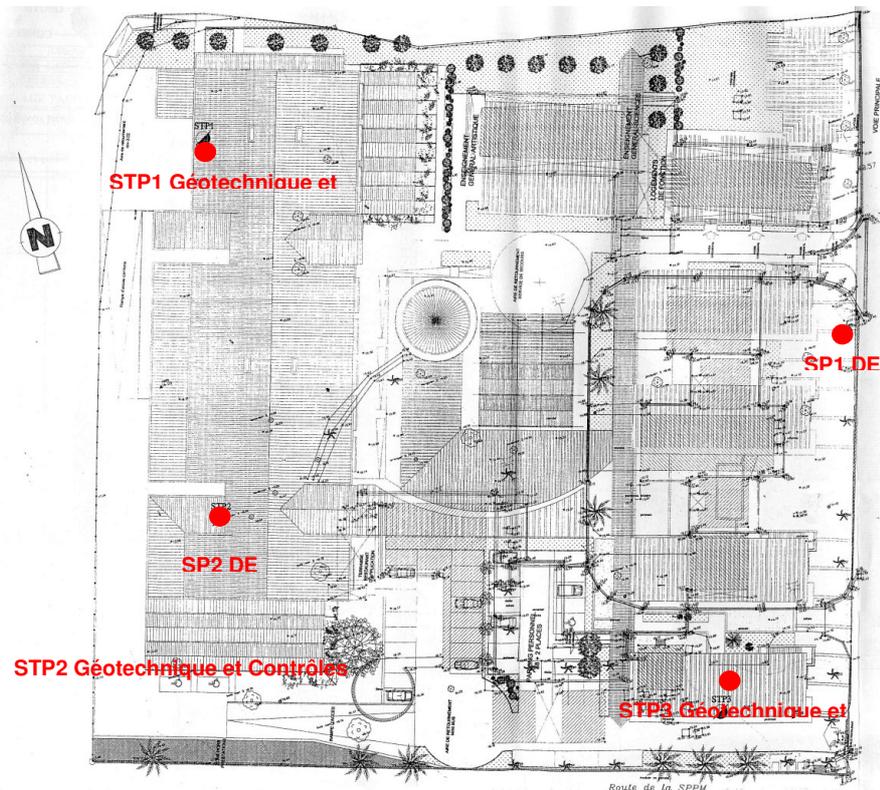


Illustration 5 – Sondages Pressiométriques (SP) et Pénétrométriques (STP) du LEP de Kaouéni
(Echelle 1/500)

Outre les sondages, un profil de type SASW et six mesures H/V ont été réalisés sur ce site, fournissant des mesures de vitesses d'ondes de cisaillement V_s et les fréquences de

résonance. Le détail des méthodes du dispositif SASW et H/V ainsi que l'analyse des résultats sont fournis en Annexe 1 et 2. Les emplacements des mesures H/V sont indiqués en Illustration 6.

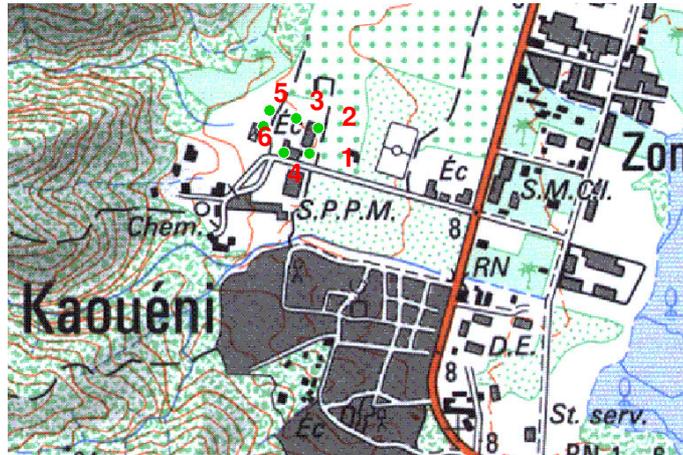


Illustration 6 – Emplacements des mesures H/V (points verts) sur le site du LEP de Kaouéni

4.3. CARACTERISATION DES UNITES GEOMECHANIQUES

4.3.1. Caractéristiques

a. Niveau superficiel : Remblai limoneux

- Lithologie :

La synthèse de certains des résultats des sondages cités ci-dessus montre la présence de terre végétale marron à racines éparses et de remblai limoneux (limon marron foncé légèrement argileux).

- Epaisseur :

La présence de terre végétale varie entre les cotes 0.10 et 0.20 m/TN (Sondages Tarière STP2, STP3 de Géotechnique et Contrôles). Vient ensuite un remblai limoneux atteignant des profondeurs de 1.00 m à 1.30 m/TN (Sondages Tarière STP2, STP3 de Géotechnique et Contrôles et sondage de SEGC).

- Essais pressiométriques :

Selon l'essai STP3 de Géotechnique et Contrôles réalisé à 1.00 m/TN (Cf. Illustration 5) : la pression limite nette PI^* mesurée est de 0.59 Mpa. Le module pressiométrique E_m est de 13.6 MPa. Le rapport EM/PI vaut 22.9. Ce niveau superficiel peut être considéré comme un limon surconsolidé caractéristique d'un remblai bien compacté. D'après les règles PS92, ce sol a une résistance mécanique moyenne (type b).

Selon l'essai SP2 de la DE réalisé à 1.00 m/TN (Cf. Illustration 5) : la pression limite nette PI^* mesurée est de 1.28 MPa. Le module pressiométrique E_m est de 17 MPa. Le rapport EM/PI vaut 13.3. D'après les règles PS92, ce sol a une résistance mécanique moyenne (type b).

b. Horizons limons argilo-sableux d'origine alluvionnaire

- *Lithologie :*

Sur la base des logs de forages SEGC et Géotechnique et Contrôle, complétés par les granulométries effectuées par la DE sur la matrice, il est supposé qu'il s'agisse de limons argileux marron ocre, légèrement sableux. Ces limons sont des alluvions fines provenant de l'érosion des reliefs altéritiques alentours.

- *Épaisseur :*

Sous le niveau superficiel, il a été estimé que cette formation pouvait atteindre plus de 3.00 m d'épaisseur dans le sondage STP2 sans que la base de la formation n'ait pu être reconnue du fait de l'arrêt du sondage (Présence de ce limon à partir de 1 m/TN jusqu'à plus de 4 m/TN pour le sondage STP2).

En ce qui concerne le sondage STP1 et STP3, la couche de limon argileux s'étend respectivement de 0.7 m à 2.90 m/TN et de 1.50 m à 4.10 m/TN. Les épaisseurs sont donc de 2.2 m pour STP1 et de 2.60m pour STP2.

- *Essais en laboratoire :*

Le Tableau 3 récapitule les résultats des principaux essais réalisés en laboratoire sur l'échantillon prélevé dans cette formation.

	passant à 80 µm	D max	W	WI	IP	IC	cat. NFP11-300
2005-G-0074	77.4 %	< 50 mm	93.6%	42.5%	20.7%	-2.4	A ₂ th

Tableau 3 – Essais en laboratoire. Dmax : Diamètre maximal ; W : teneur en eau naturelle ; WI : limite de liquidité ; IP : Indice de plasticité ; IC : Indice de consistance

Les valeurs de WI et de IP placent ce sol dans les limons ou les argiles organiques très plastiques.

- *Essais pénétrométriques :*

La résistance dynamique apparente du sol a été évaluée grâce à la réalisation de quatre sondages pénétrométriques légers. Dans l'ensemble, les résistances à la pénétration sont supérieures ou égales à 2.0 MPa de 1.0 m à 4.5 m/TN.

- *Essais pressiométriques :*

Selon les sondages de Géotechnique et Contrôle :

La pression limite Pl mesurée pour STP1 vaut 0.51 MPa. Le module pressiométrique Em est de 2.60 MPa. Le rapport EM/Pl vaut 5.08. Selon les règles PS92, ce sol correspond à un sol de faible résistance mécanique (type c).

La pression limite Pl mesurée pour STP2 varie entre 0.27 et 0.10 MPa. Le module pressiométrique Em se situe dans la frange 3.40 à 0.90 MPa. Le rapport EM/Pl fluctue entre 12.55 et 8.68. Selon les PS92, ce sol correspond à un sol de faible résistance mécanique (type c).

La pression limite PI mesurée pour STP3 varie entre 0.24 et 2.42 MPa. Le module pressiométrique Em se situe dans la frange 5.60 à 36 MPa. Le rapport EM/PI fluctue entre 23.43 et 14.89. Selon les règles PS92, ce sol correspond à un sol de faible ou de moyenne résistance mécanique (type c ou b).

En global et selon les sondages STP, la pression limite PI varie donc entre 0.24 et 2.42 MPa. Le module pressiométrique varie entre 0.90 et 36 MPa. En conclusion et en dépit d'une seule mesure donnant un sol de type b, ces résultats mettent en évidence un sol de faible résistance mécanique (type c selon les PS92).

Selon les sondages de la DE (SP1 et 2), la conclusion pour cette couche de sol s'avère cohérente puisque le sondage SP1 révèle un sol de type c (PI variant de 0.7 à 0.24 MPa et Em variant de 5.1 à 6.1 MPa). Le sondage SP2 correspondant au sondage STP2 révèle un sol de type b (PI variant de 1.28 à 0.98 MPa et Em variant de 9 à 17 MPa).

Au final, il s'agit d'un sol de faible résistance mécanique (type c) entre 1 m et 4 m/TN.

- *Sismique réfraction*

Les profils de sismique réfraction montrent une vitesse Vp faible variant entre 375 et 380 m/s sur une profondeur allant jusqu'à 4.3 – 4.5 m/TN.

- *SASW*

Les profils de SASW sont montrés en Annexe 1. En réalisant une moyenne pondérée des vitesses Vs, une vitesse faible de 188 m/s sur une épaisseur de 3 m est obtenue.

- *H/V*

Les résultats montrés en Annexe 2 donnent une fréquence de résonance comprise entre 9 et 15 Hz sur l'ensemble des 6 mesures, ce qui correspond, pour une épaisseur de 3 m à une vitesse Vs comprise entre 108 et 180 m/s.

c. Horizon argile limoneuse - Altérites

- *Lithologie :*

Selon les logs de forages, ce sont des argiles limoneuses marron claire très compactes qui correspondent au premier niveau d'altération intense des formations en places. Ce sont des altérites.

- *Épaisseur :*

Située sous les limons argilo-sableux d'origine alluvionnaire, cette formation est présente jusqu'à la fin du sondage STP3, soit une épaisseur minimum de 0.9 m pour STP3. Le sondage STP2 n'est pas assez profond pour en déterminer l'apparition. Quant au sondage STP1, cette formation est présente de 2.9 m à 5.3 m/TN, soit une épaisseur de 2.4 m au niveau de STP1.

- *Essais en laboratoire :* Pas d'essai en laboratoire disponible.

- *Essais pénétrométriques :*

La résistance dynamique apparente du sol a été évaluée grâce à la réalisation de quatre sondages pénétrométriques légers. Dans l'ensemble, les résistances à la pénétration sont

supérieures ou égales à 4.0 MPa à partir de 3 m/TN. A partir de 4.5 m/TN, les résistances de pénétration sont supérieures à 6.0 MPa.

- *Essais pressiométriques :*

D'après le sondage STP1, la pression limite PI^* mesurée varie entre 0.71 MPa et 2.20 MPa. Le module pressiométrique E_m est dans une frange située entre 5.80 MPa et 25.50 MPa. Le rapport EM/PI^* varie entre 8.18 et 11.59. Ces valeurs mettent en évidence un sol cohérent de résistance mécanique moyenne (type b).

D'après le sondage SP1, entre 4.00 m et 6.00m/TN, la pression limite PI^* vaut 0.24 MPa. Le module pressiométrique E_m varie entre 6.1 MPa et 8.5 MPa. Le rapport Em/PI^* varie donc entre 25 et 35. Ces valeurs mettent en évidence un sol cohérent de résistance mécanique faible à moyenne (type c et b).

D'après le sondage SP2, entre 4.00 m et 6.00m/TN, la pression limite PI^* fluctue entre 0.91 MPa et 2.47 MPa. Le module pressiométrique E_m varie entre 11.3 MPa et 49.1 MPa. Le rapport Em/PI^* varie donc entre 12 et 20. Ces valeurs mettent en évidence un sol cohérent de résistance mécanique moyenne (type b).

En conclusion, cette formation d'Altérites est un matériau à résistance mécanique moyenne, somme toute assez médiocre.

- *SASW*

En réalisant une moyenne pondérée des vitesses V_s entre 4 et 6 m/TN, une vitesse de 352 m.s^{-1} est obtenue.

d. Horizon argile sableuse

- *Lithologie :*

Selon les logs de forages, ce sont des argiles sableuses marron à graviers millimétriques gris blanc, très humides et compactes correspondant à un niveau d'altération moins poussé que pour les formations sus-jacentes. Ce sont toujours des Altérites.

- *Épaisseur :*

Le sondage STP1 révèle l'apparition de cette formation vers 5.20 m/TN. La limite inférieure n'a pas été déterminée avec STP1. Selon le sondage SP1 de la DE, ces argiles atteignent 18 m/TN et laissent place ensuite à de la vase, soit une épaisseur d'environ 16 m.

- *Essais pressiométriques :*

D'après le sondage SP1, la pression limite PI mesurée varie entre 0.24 MPa et 2.09 MPa. Le module pressiométrique E_m fluctue entre 4.4 MPa et 36.5 MPa. Le rapport EM/PI varie entre 6.6 et 35.4. Ces valeurs mettent globalement en évidence un sol cohérent de résistance mécanique moyenne (type b).

- *SASW*

En réalisant une moyenne pondérée des vitesses V_s entre 6 et 18 m/TN, une vitesse de 395 m.s^{-1} est obtenue.

e. Sable

- *Lithologie :*

Selon le forage de 1991, il s'agit de sable parsemé de graviers et de blocs basaltiques.

- *Épaisseur :*

L'épaisseur mise en évidence lors de ce sondage est d'environ 15 mètres, tout en sachant que le substratum n'a pas été atteint. D'après l' Illustration 4 représentant la carte lithologique interprétative de la dépression de Kaouéni, l'ensemble de la colonne de sol représente plus de 80 m, soit une épaisseur de 60 m pour cette seule couche de sable. Plusieurs colonnes ont ainsi été envisagées avec des épaisseurs variables pour cette dernière couche de sédimentation. Une épaisseur de 37 m, soit une valeur moyenne entre les 15 m minimum et les 60 m maximum envisagés, a été choisie pour cette couche car c'est la colonne qui permettait de reproduire au mieux les mesures H/V avec une fréquence fondamentale de l'ordre de 2Hz, du même ordre que ce qui est observé sur les mesures H/V (voir Annexe 2).

- *SASW*

En réalisant une moyenne pondérée des vitesses Vs entre 24 et 33 m/TN, une vitesse de 430 m.s⁻¹ est obtenue.

f. Substratum

D'après la carte géologique au 1/10 000 de Mayotte (Debeuf et Bachélery, 2002), le substratum de cette zone de Kaouéni serait constitué de basaltes mio-pliocènes.

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

4.3.2 Récapitulatif

Le Tableau 4 synthétise les données géotechniques et géophysiques exploitées.

Formation	Nature	Épaisseur	Caractéristiques pressiométriques (MPa)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Niveau superficiel	Terre végétale et Remblai limoneux	1 m à 1.5 m	13.6 <Em< 17 0.59 <PI< 1.28	-	-	Sols cohérents moyennement consistants (Type b)
Horizon Limon argileux	Limons argilo-sableux d'origine alluvionnaire	2.2 m à plus de 3 m	0.90 <Em< 36 0.24 <PI< 2.42	188	-	Sols cohérents mous (Type c)
Altérites	Argile limoneuse	0.9 à 2.4 m	28 <Em< 118 0.24 <PI< 2.7	352	-	Sols cohérents moyennement consistants (Type b)
Altérites	Argile sableuse	# 16 m	4.4 <Em< 36.5 0.24 <PI< 2.09	395	-	Sols cohérents moyennement consistants (Type b)
Sable	Sable basaltique	# 37 m	-	430	-	-
Substratum	Basalte sain	-	-	-	-	-

Tableau 4 – Caractéristiques mesurées moyennes des formations géologiques.

4.4. HYDROGEOLOGIE

Une nappe fut mise en évidence le 09/03/04 à 12h00. Le niveau d'eau atteignait 5.90 m/TN. Cette nappe fut remesurée le 22/11/05 avec un niveau d'eau atteignant 19 m/TN. Les battements importants de cette nappe montrent qu'elle doit être prise en compte pour le calcul des spectres de réponse et pour l'appréciation des potentialités de liquéfaction. Il n'est donc pas exclu qu'une nappe perchée (peut-être temporaire) se développe dans les limons vasards entre 1 et 5 m de profondeur. (Cf. partie 6.2.2 du chapitre sur la liquéfaction).

4.5. 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 (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_e . Dans cette étude, les courbes $G(\gamma)/G_{max}$ & $D(\gamma)$ utilisées sont issues de la littérature (Kokusho, 1980, et Darendeli, 2001), et ont été appliquées pour la couche de limon argileux en tenant compte de la connaissance de son indice de plasticité IP.

Le Tableau 5 récapitule les caractéristiques de la colonne de sol retenue pour l'étude.

On notera les points suivants :

- La nappe est prise en compte selon la dernière mesure effectuée (19 m/TN).
- Les courbes $G(\gamma)/G_{max}$ & $D(\gamma)$ issues de la littérature les plus proches des caractéristiques réelles de la formation des Limons argilo-sableux caractérisés par l'indice de plasticité (IP) sont utilisées ;
- Les vitesses de cisaillement des colonnes de sol sont représentatives de la moyenne des V_s issues des mesures de SASW.
- Les épaisseurs des formations ne variant pas significativement, la moyenne entre le minimum et le maximum est reporté dans le tableau ci-dessous.

Formation	Modèle de comportement	Épaisseur	γ_h (kN/m ³)	Caractéristiques géomécaniques de base	Vs (m/s)	Vp (m/s)
Niveau sup.	Non linéaire	1.25 m	18,0	Dr ~ 45 %	200	375
Limon argileux	Non linéaire	3.3 m	18,0	Ip = 20.7%	170	320
Altérites	Élastique	1.65 m	20,0	-	352	660
Altérites	Élastique	16 m	20,0	-	395	740
Sable	Élastique	37 m	21,0	-	430	830
Substratum	Élastique	infini	21,0	-	800	1500

Tableau 5 – Colonne de sol. Vs : vitesse des ondes de cisaillement en m/s; Vp : vitesse des ondes longitudinales ; Ip = Indice de plasticité.

5. Spectres de réponse compte tenu des conditions de site

5.1. PRÉSENTATION DU PROBLÈME

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

5.1.1. Méthodes empirico-statistiques

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

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

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

5.1.2. Méthodes numériques

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

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

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

La colonne de sol qui a été déterminée est utilisée avec le logiciel CyberQuake (Modaressi *et al*, 1997.) pour calculer sa réponse à une sollicitation sismique au rocher. 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 en surface résultant de l'amplification du signal par la colonne de sol.

La méthode employée est la suivante :

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

- Les accélérogrammes synthétiques sont générés à l'aide du logiciel SIMQKE (Gasparini et Vanmarcke, 1976). Par itérations, ce code génère des histoires temporelles en accélération, artificielles et statistiquement indépendantes, dont les spectres de réponse et la durée du mouvement sismique sont en concordance avec les caractéristiques du mouvement de référence donné en entrée. La durée du mouvement sismique utilisé dans SIMQKE est définie à partir du couple magnitude-distance défini pour le séisme de référence en utilisant la relation d'atténuation de Abrahamson et Silva (1996)
- Les accélérogrammes réels sont recherchés dans des bases de données mondiales de mouvements forts du sol. Les accélérogrammes sélectionnés ont des caractéristiques proches du séisme de référence retenu dans le cadre de la présente étude (Tableau 6).

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

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

Tableau 6 - 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 une colonne de sol correspondant à la configuration type rencontrée à l'aplomb du projet. Les spectres spécifiques montrés en Illustration 7 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 en Illustration 7 (courbe grise) un coefficient multiplicateur de 1,2 (courbe orange en Illustration 7).

Le spectre spécifique résultant, tenant compte à la fois de l'aléa sismique régional, des effets de site lithologiques et de la classe d'ouvrage à considérer, est représenté en Illustration 8 pour les amortissements 2, 5, 10 et 20 %. C'est le spectre à considérer pour le dimensionnement des futures installations du lycée de Kaouéni. Selon la méthode donnée au paragraphe 3.2 pour le spectre au rocher, les valeurs du déplacement (D), de la vitesse (V) et de l'accélération (A) sont précisées en fonction de la fréquence (F), dans le Tableau 7 pour chacun des spectres à 2, 5, 10 et 20% d'amortissement.

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

L'accélération horizontale maximale tenant compte des conditions de site à retenir pour le lycée de Kaouéni (ouvrage de classe C) est de 0.35 g.

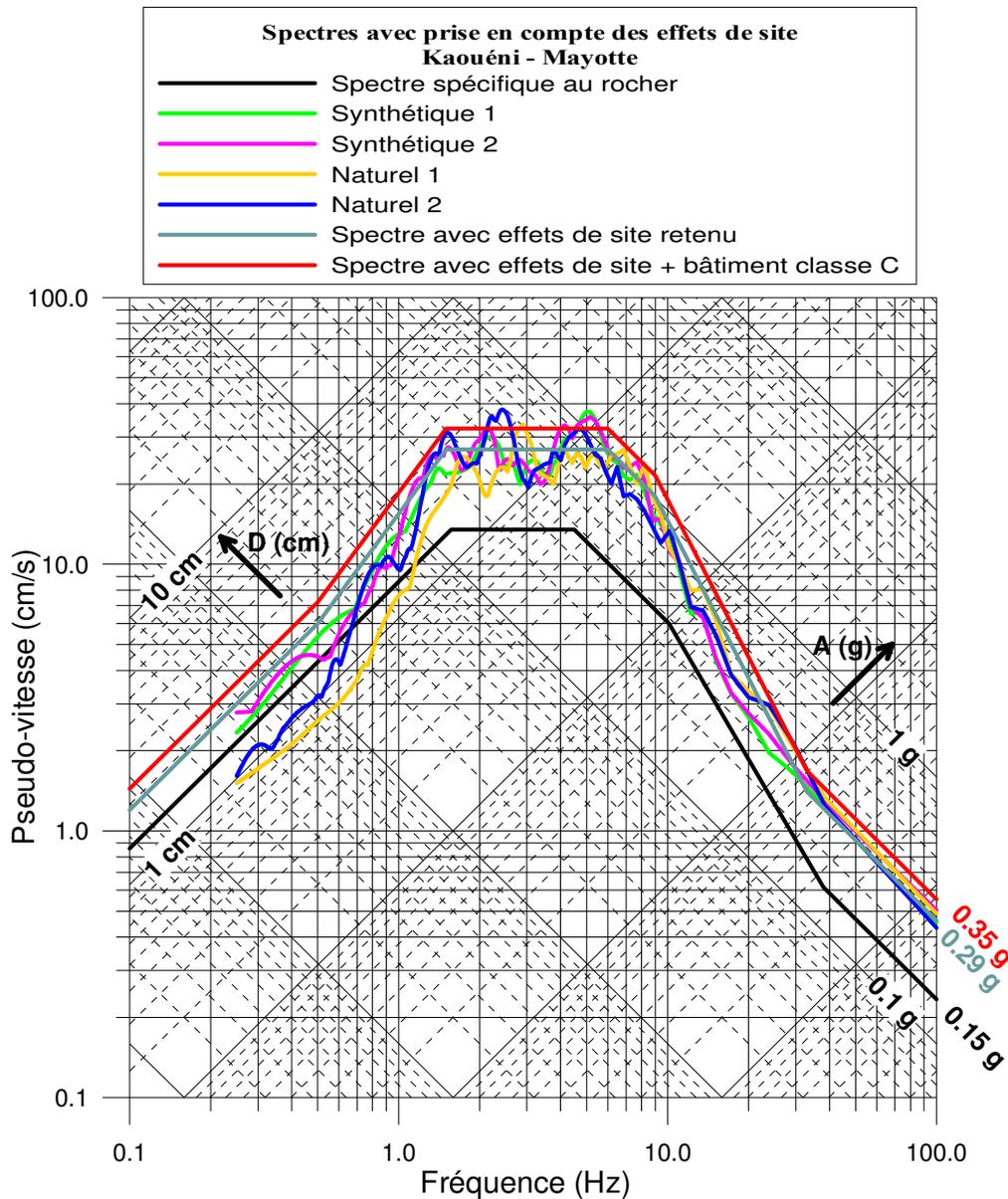


Illustration 7 - Comparaison du spectre spécifique au rocher horizontal affleurant avec ceux tenant compte des effets de site et du spectre retenu pour un amortissement de 5%.

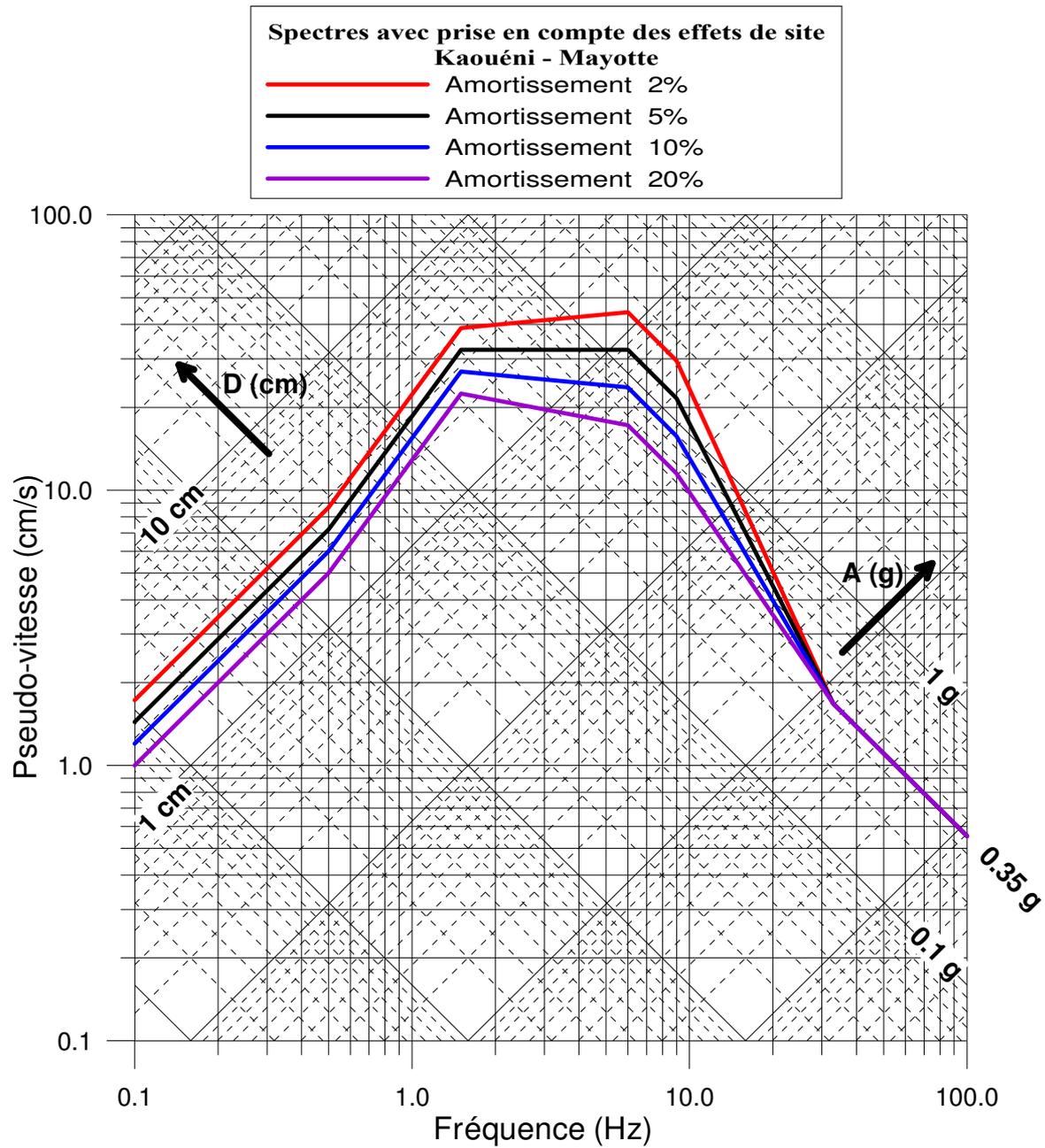


Illustration 8 – Spectre de réponse élastique horizontale tenant compte des conditions de site et de la classe d'ouvrage (classe C) du LEP de Kaouéni. Amortissements : 2, 5, 10 et 20%

F (Hz)	Amortissement (%)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
0.1	2	0.001	1.73	2.75
0.1	5	0.001	1.44	2.29
0.1	10	0.001	1.20	1.91
0.1	20	0.001	1.00	1.59
0.5	2	0.03	8.64	2.75
0.5	5	0.02	7.20	2.29
0.5	10	0.02	6.00	1.91
0.5	20	0.02	5.00	1.59
1.5	2	0.37	38.79	4.12
1.5	5	0.31	32.32	3.43
1.5	10	0.26	26.94	2.86
1.5	20	0.22	22.45	2.38
6.0	2	1.70	44.28	1.17
6.0	5	1.24	32.32	0.86
6.0	10	0.91	23.59	0.63
6.0	20	0.66	17.22	0.46
9.0	2	1.70	29.52	0.52
9.0	5	1.24	21.55	0.38
9.0	10	0.91	15.73	0.28
9.0	20	0.66	11.48	0.20
33	Tous amortissements	0.35	1.68	0.008
100	Tous amortissements	0.35	0.55	0.001

Tableau 7 – 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. Appréciation des potentialités de liquéfaction

6.1. DEFINITION ET METHODE

En géotechnique, la liquéfaction est 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.

6.1.1. 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 : S_r voisin de 100 % ;
- critère Sa2 : $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$, C_u 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 Ar 3 : $w > 0,9 \cdot w_L$;
- critère Ar 4 : 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 $\left\{ \begin{array}{l} \text{critère Ex11: } D_{70} < 74\mu m \\ \text{critère Ex22: } I_p > 10\% \end{array} \right.$

6.1.2. 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.

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

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). Il faut se ramener 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. Des valeurs du paramètre N sont évaluées par des corrélations usuelles (cf. Cassan – Essais *in situ* en mécanique des sols) :

	Pressiomètre	Pénétromètre
. argiles :	$N = 15 \text{ à } 20 \times p_l$;	$N = 5 \text{ à } 10 \times q$
. limons :	$N = 30 \times p_l$;	$N = 3,5 \text{ à } 5 \times q$
. argiles sableuses ou sables argileux :	$N = 20 \times p_l$;	$N = 2,5 \text{ à } 3,5 \times q$
. sables :	$N = 20 \times p_l$.	$N = 1,5 \text{ à } 3,5 \times q$

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 : $N_1 = C_N \times N$

avec $C_N = 1 - (1,25 \text{ Log } \sigma'_v)$ où σ'_v est en bars

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 $rd = 1 - 0,015 \times z$, 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 généralement 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 :

- 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 : $I_L > 15$.

6.2. APPRECIATION DES POTENTIALITES DE LIQUEFACTION DU SITE DE KAOUENI

6.2.1. Formations à analyser

Parmi les 5 horizons identifiés dans l'étude, plusieurs sont à écarter vis à vis d'une éventuelle potentialité à la liquéfaction :

- les remblais : il s'agit de matériaux limoneux trop consistants pour être liquéfiables dans un contexte où la sismicité régionale reste moyenne ;
- les argiles limoneuses ou sableuses d'altération : se sont des argiles plastiques moyennement compactes qui n'entrent pas dans les catégories de matériaux liquéfiables ;
- les sables basaltiques : ils sont trop profonds pour être liquéfiables ;
- le substratum volcanique rocheux ;

À l'opposé, tous les autres horizons constitués de limons et de sables assez peu compacts doivent faire l'objet d'une analyse plus fine, dans la mesure où leur susceptibilité à la liquéfaction ne peut être définie *a priori*. Il s'agit de la formation suivante :

- limons argilo-sableux vasards d'origine alluvionnaire.

6.2.2. Contexte hydrogéologique

Deux mesures du niveau de la nappe ont été réalisées sur le site :

- Mars 2004 : -5,9 m/TN
- Novembre 2005 : -19 m/TN

Les autres forages de SEGC et de Géotechnique et Contrôles se sont révélés secs jusqu'à 10 m de profondeur (au minimum).

Il faut rester prudent vis-à-vis de l'exploitation de ces deux valeurs. En effet, la première valeur met en évidence la présence d'une nappe relativement proche de la surface, qui n'a pas été confirmée dans les autres forages. Cependant, Géotechnique et Contrôles indique que la mesure a été faite juste après un épisode cyclonique et donc il n'est pas exclu qu'elle corresponde tout de même à une nappe localement en position haute.

La seconde valeur indique que la nappe (en situation normale) est située aux environs du niveau de la mer (valeurs de basses eaux), ce qui indiquerait que le terrain est très drainant, mais ce que ne confirme pas la nature fine des sols.

Enfin, les valeurs de teneurs en eaux mesurées sur l'échantillon prélevé dans les limons argilo-sableux vasards sont très élevées 94 %, ce qui est assez surprenant pour un matériau placé à plus de 15 m au dessus de la nappe.

En conséquence, il n'est pas exclu qu'une nappe perchée (peut-être temporaire) se développe dans les limons vasards entre 1 et 5 m de profondeur. C'est l'hypothèse qui a été retenue pour l'étude de liquéfaction.

6.2.3. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction des limons argilo-sableux

Ajustement dans les fuseaux de Faccioli & Resendiz

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).

La mesure granulométrique effectuée par la Direction de l'Équipement a été exploitée (rapport n° 2005-0244 du 5/12/05). Cette courbe a été superposée aux fuseaux granulométriques délimitant le domaine de la plupart des sols liquéfiables (Illustration 9)

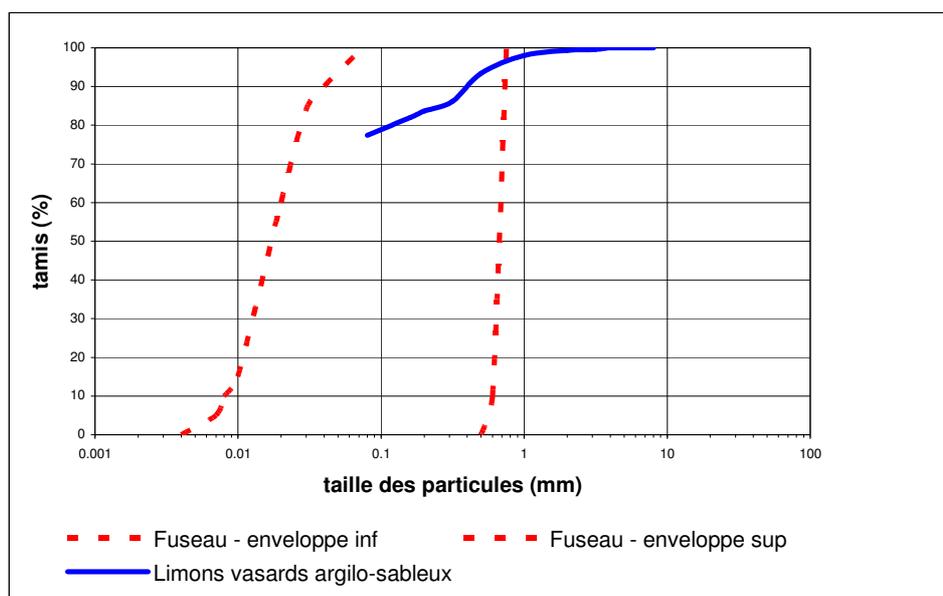


Illustration 9 – Courbes granulométriques des limons argilo-sableux

La répartition granulométrique pour la fraction la plus fine ($< 80 \mu\text{m}$) n'est pas disponible, mais les limons ne s'ajustent pas bien dans le fuseau des sols liquéfiables du fait principalement d'une fraction fine trop élevée.

Cependant, pour l'étude menée en 2003 sur le remblai de M'Tsapéré, des mesures de sédimentométrie avaient été pratiquées sur la fraction fine dans des terrains similaires. Ils avaient montré une teneur assez faible en particules très fines (argiles) n'ayant pas permis d'exclure ces terrains en termes de potentiel de liquéfaction.

Critères des PS 92

Vis à vis des critères de suspicion et d'exclusion spécifiés dans les PS 92, le Tableau 8 récapitule les résultats obtenus. Etant donnée la nature argilo-sableuse des limons, sont vérifiés à la fois les critères pour les sables et pour les argiles.

Nature	Critères de suspicion	vases limono-sableuses
Sables	S_r voisin de 100 %	Oui (si nappe perchée temporaire)
	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$	Non exploitable
	$0,05 < D_{50} < 1,5mm$	Non exploitable
	$\sigma'_v < 200kPa$ en zones de sismicité la et lb ;	Oui
Argiles	$D_{15} > 5\mu$	Non exploitable
	$w_L < 35\%$	Non ($w_L = 42,5\%$)
	$w > 0,9 \cdot w_L$	Oui
	Sol au-dessus de la droite « A » du diagramme de plasticité	Oui
Nature	Critères d'exclusions	Argiles lacustres
Sables	$D_{10} > 2mm$	Non ($D_{10} < 80 \mu m$)
Argiles	$\left\{ \begin{array}{l} D_{70} < 74\mu m \\ I_p > 10\% \end{array} \right.$	Délicat de trancher : $D_{70} < 80\mu m$ et IP > 10 % (20,7 %)

Tableau 8 – Examen des critères de susceptibilité qualitative (règles PS 92)

Au vu de ces résultats il est délicat de se prononcer, si ce n'est que cette formation semble peu propice à se liquéfier.

Par conséquent, les limons vasards, semblent peu liquéfiables, sans toutefois que l'on ne puisse totalement l'exclure. C'est pour cette raison que l'étude de susceptibilité quantitative à la liquéfaction a été menée.

6.2.4. Susceptibilité quantitative et opportunité à la liquéfaction

Le calcul a été réalisé pour la colonne de sol représentative du site de Kaouéni (arrondi au mètre près de la colonne de sol retenue pour l'étude d'effet de site) :

- entre 0 et 1 m de profondeur : Remblai non liquéfiable
- entre 1 m et 4 m : Horizon limono-argileux
- au-delà de 4 m : altérites non liquéfiables

L'essai SPT étant peu courant en France, il faut procéder par corrélation avec les essais géotechniques plus traditionnels tels que le pressiomètre ou le pénétromètre pour lequel des résultats sont disponibles sur le site d'étude.

Pour l'horizon limono-argileux, les valeurs suivantes relativement conservatrices sont retenues :

- $p_l = 0,3$ MPa
- $q = 2$ MPa
- $\sigma_h = 18$ kN/m³

La valeur de $\left(\frac{\tau_L}{\sigma'_v}\right)_\ell$ a été déduite de l'abaque de Seed établi pour une teneur en fines de l'ordre de 35 %.

La magnitude du séisme de référence est de 5,2. L'accélération maximale sur site considérée pour le calcul est de 3,5 m/s², conformément aux résultats acquis par ailleurs.

Coefficient de sécurité, potentialités et intensité de la liquéfaction :

Les facteurs de sécurité ont été calculés pour la colonne de sol précédemment décrite, dans l'hypothèse d'une nappe perchée temporaire baignant la totalité de l'horizon limono-argileux médiocre (cf. Tableau 9). Il ressort de ce calcul que le facteur de sécurité est insuffisant dans l'horizon limono-argileux entre 3 et 4 m de profondeur (ceci est essentiellement lié à la valeur d'accélération relativement importante retenue).

Cependant, les potentialités de liquéfaction alors supposées induisent une intensité de la liquéfaction (indice d'Iwasaki) de l'ordre de 3, ce qui est une valeur faible.

Ainsi, conformément à la classification établie dans le guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique (AFPS), la liquéfaction au droit du site est « **peu probable** ».

En conséquence, dans la mesure où la lithologie de l'horizon limono-argileux se révèle intrinsèquement peu propice à la liquéfaction, et considérant que la valeur d'intensité de liquéfaction calculée se révèle très faible, il est possible de conclure que **le potentiel de liquéfaction au droit du site d'études de Kaouéni est négligeable**.

6.2.5. Préconisations en terme de dispositions constructives

Dans la mesure où le risque de liquéfaction est négligeable au droit du site de Kaouéni, aucune mesure spécifique relative à prévention contre la liquéfaction des sols n'est

recommandée. Cela se justifie d'autant plus que le mode de fondation des bâtiments les plus lourds et que renforcement parasismique des structures devrait sensiblement réduire la vulnérabilité de ces édifices.

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

KAOUENI - Colonne n° 1

Position de la nappe : z = 1 m

Profondeur (m)		Horizon	γ (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)	σ_v (kPa)	σ'_v (kPa)	calcul de $(\tau/\sigma')_{vs}$			calcul de $(\tau/\sigma')_l$					Facteur de sécurité FS _l	Intensité liquéfaction			
ht et bas	moy.						a_{max} (m/s ²)	r_d	$(\tau/\sigma')_{vs}$	q (MPa)	N _{équ.}	C _N	N ₁	$(\tau/\sigma')_l$ (brut)		$(\tau/\sigma')_l$ (corrigé)	F _L	I _{Li}	I _L
0 - 1 m	0.5	Remblais	18	9											> 2	0	0	3.0	
1 - 2 m	1.5	Horizon limoneux	18	8	27	22	3.5	0.9983	0.2787	2	6.7	1.8220	12	0.220	0.330	1.184	0.0000		0.0000
2 - 3 m	2.5	Horizon limoneux	18	8	45	30	3.5	0.9953	0.3397	2	6.7	1.6536	11	0.200	0.300	0.883	0.1167		1.0215
3 - 4 m	3.5	Horizon limoneux	18	8	63	38	3.5	0.9908	0.3737	2	6.7	1.5253	10	0.190	0.285	0.763	0.2374		1.9583
4 - 20 m	12	Altérites non liquéfiables														> 2	0		0

Tableau 9 – Calcul de l'intensité de liquéfaction

7. Conclusions

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

Dans un premier temps, le spectre spécifique a été défini « au rocher horizontal affleurant ». Ce spectre est représenté en Illustration 2 et dans le Tableau 2. L'accélération horizontale maximale 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 dans le cadre de cette étude sur le site a permis de définir une colonne de sols caractéristiques du site. Les mesures H/V ont également permis de préciser cette colonne de sol. Un spectre spécifique tenant compte des effets de site lithologiques a ainsi été calculé à l'aide d'un modèle numérique non linéaire (code de calcul CyberQuake, version 2000). Ce spectre tient aussi compte de la classe du bâtiment (classe C). Il est représenté en Illustration 8 et dans le Tableau 7.

L'accélération horizontale maximale du sol tenant compte des conditions de site pour le lycée de Kaouéni est de 0.35 g (soit 3.5 m/s²).

L'étude de liquéfaction montre que le potentiel de liquéfaction au droit du site d'études de Kaouéni est **négligeable**.

8. Références bibliographiques

- Abrahamson N.A., Silva W.J. (1996) – Empirical ground motion models, *Report to Brookhaven National Laboratory*.
- AFNOR (1995) – Règles de construction parasismique : règles PS applicables aux bâtiments, dites règles PS92. AFNOR, Paris, norme française NF P 06-013.
- AFPS (1993) – "Guide Méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique"
- Audru J.C., Bitri A., Desprats J.F., Mathon C., Maurillon N., Sabourault P., Terrier-Sedan M. et Sedan O. (2002) – Projet risques naturels et érosion à Mayotte : résultats d'année 1. Rapport BRGM/RP-51738-FR, 2002 MAYOTTE 03.
- Bitri A., Le Bégat S., Baltassat J. M., Goury J.C. (1997) – Détermination des vitesses de cisaillement des sols à partir de la dispersion des ondes de Rayleigh, Rapport BRGM R39877, 49 p., 24 fig., 7 tabl.
- Bour M. et Sedan O. (2002) – Note sur le positionnement de Mayotte en matière de règles parasismiques. Rapport BRGM/RP-51841-FR, 12 p., 2 fig., 2 tabl.
- 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.
- Herrero A. (1994) - Paramétrisation spatio-temporelle et spectrale des sources sismiques : applications au risque sismique. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Paris VII.
- Iwasaki T, Tokida K., Tatsuoka F. , Watanabe S., Yasuda S., and Sato H. (1982) - "Microzonation for soil liquefaction using simplified methods" , proceedings 3rd International Earthquake Microzonation Conference , Seattle 1982
- 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.

Sabourault P. (1999) - Du microzonage à la prédiction de mouvements forts : Confrontation de mesures de terrain, de simulations numériques et de modélisations sur modèles réduits centrifugés. Thèse de doctorat de l'université de Marne la Vallée.

Sabourault P., Bitri A. (2001) – Détermination de la géométrie des formations sédimentaires de la vallée du Grésivaudan autour du forage de Montbonnot (Isère) : utilisation des méthodes H/V et SASW. Rapport BRGM RP-51161-FR.

Sabourault P., Sedan O., Audru J.C., Mathon C., Nédellec J.L., Bitri A., Bour M. et Le Brun B., avec la collaboration de J.P. Rançon (2002) – Microzonage sismique de Mamoudzou-Centre, île de Mayotte. Rapport BRGM/RP-51839-FR – 2002 Mayotte 05.

Sabourault P., Zornette N., Bitri A., Nédellec J.L. et Audru J.C. (2003) – Projet d'extension de l'aéroport de Pamandzi, Mayotte. Evaluation de l'aléa sismique local. Rapport BRGM/RC-52438-FR.

Seed H.B., Idriss I.M., Arango J. (1983) – Evaluation of liquefaction potential using field performance data. Journal of the geotechnical engineering , vol 109, n°3, March 83

Seed H.B., Tokimatsu K., Harder L.F., Chung R.M. (1984) – The influence of SPT in soil liquefaction resistance evaluations - University of California Berkeley - Report n°UCB.EERC-84/15

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.

Wuilleumier A., Mathieu F., Jossot O., Euchet G. (2004) – Modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère de Kawéni – Année 1 – BRGM/RP-53161-FR, 168 p., 19 ill., 6 tab., 14 ann.

Youd T.L., Idriss I.M. (1997) - Proceeding of the workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils - Report n° NCEER-97-0022

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 les profils de vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le sol (cf. Illustration 10) et par conséquent de déterminer le type de sol en fonction des paramètres d'identification donnés dans les Règles PS92.

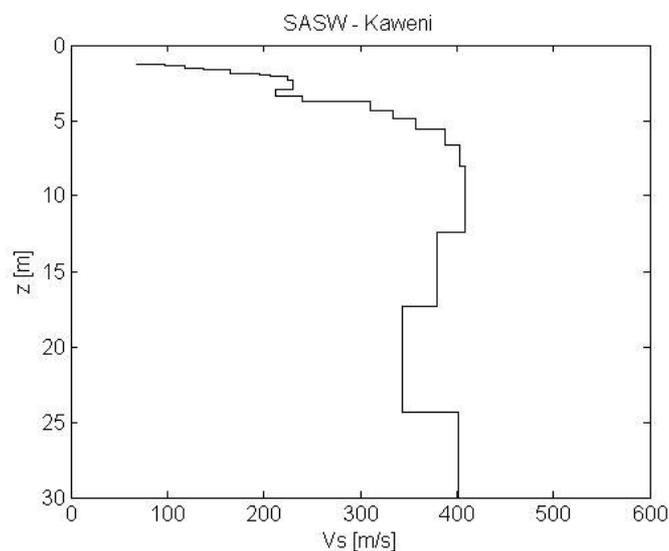


Illustration 10 – Modèle de vitesse des ondes de cisaillement obtenu par inversion sur le site du LEP de Kaouéni.

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 : $f_0 = V_s / 4H$ (H : épaisseur moyenne de la couche meuble, V_s vitesse moyenne de propagation des ondes S dans la couche meuble, f_0 : fréquence de résonance fondamentale de la couche meuble. La connaissance de deux paramètres permet donc d'estimer le troisième (V_s et f_0 connues donnent H par exemple) (Sabourault et Bitri, 2001) .

Interprétation des mesures

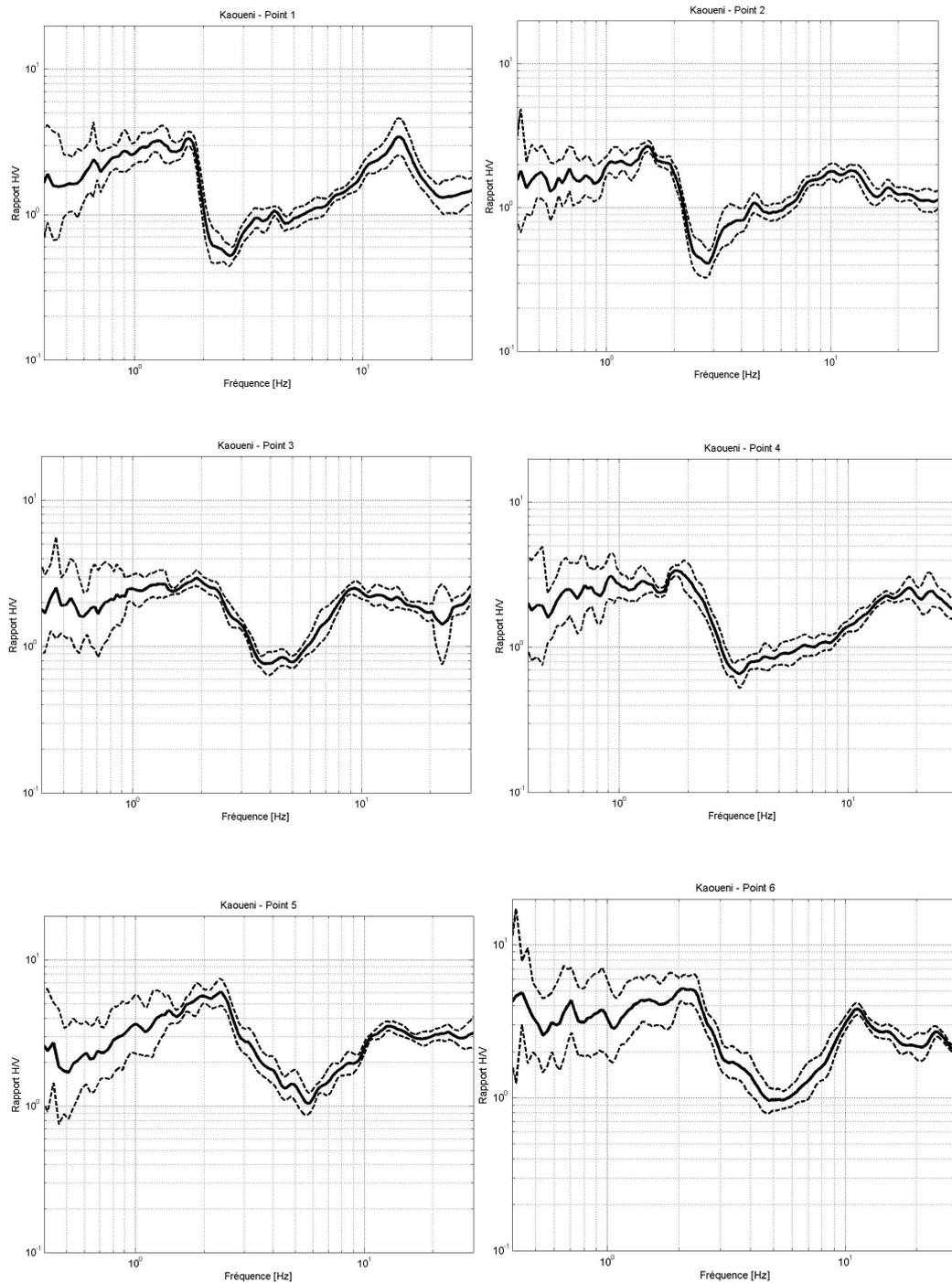


Illustration 11 - résultats des mesures H/V réalisées sur le site du LEP de Kaouéni.

Les résultats ne sont pas très homogènes d'un site de mesure à l'autre. De manière générale, on observe une première fréquence de résonance entre 1.7 et 2.1 Hz et une seconde fréquence entre 9 et 15 Hz.



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