



Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Futur lycée de Dembéni (Mayotte)

BRGM/RP-54467-FR

Étude réalisée dans le cadre des projets de service
public du BRGM 05RISC09
Mars 2006

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

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, Dembéni, Mayotte, Comores.

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

J. Rey, A. Roullé, F. De Martin, J.-C. Audru, J.-M. Miehe, J.-L. Nédellec, G. Euchet et A. Bitri (2006) – Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Futur lycée de Dembéni (Mayotte). Rapport BRGM/RP-54467-FR, 45 p., 9 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 de construction du lycée de Dombéni (Mayotte). Le spectre de réponse élastique permettra de dimensionner le projet en intégrant la prise en compte de l'aléa sismique régional et local.

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

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 futur lycée de Dombéni. Les spectres spécifiques qui en résultent sont fournis en Illustration 6 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 **0.28 g (soit 2.8 m/s²)** (valeur de l'accélération pour T=0 s sur le spectre de réponse spécifique représenté Illustration 6).

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 »**.

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

Sommaire

Synthèse	5
1. Introduction	9
2. État de la réglementation à Mayotte	11
3. Détermination des mouvements sismiques de référence au rocher	13
3.1. CARACTERISTIQUES DU SEISME DE REFERENCE.....	13
3.2. CALCUL DES MOUVEMENTS SISMQUES DE RÉFÉRENCE A MAYOTTE.....	13
4. Synthèse géologique et géotechnique	17
4.1. PREAMBULE.....	17
4.2. DONNEES.....	17
4.2.1. Contexte géologique.....	17
4.2.2. Contexte géotechnique et géophysique.....	17
4.3. CARACTERISATION DES UNITES GEOMECHANQUES.....	19
4.3.1. Caractéristiques.....	19
4.3.2 Récapitulatif.....	22
4.4. HYDROGEOLOGIE.....	22
4.5. ÉTABLISSEMENT DE COLONNES DE SOLS.....	23
5. Spectres de réponse compte tenu des conditions de site	24
5.1. PRÉSENTATION DU PROBLÈME.....	24
5.1.1. Méthodes empirico-statistiques.....	24
5.1.2. Méthodes numériques.....	24
5.2. CHOIX DU SPECTRE SPÉCIFIQUE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE.....	25
6. Appréciation des potentialités de liquéfaction	29
6.1. DEFINITION ET METHODE.....	29
6.1.1. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction.....	29
6.1.2. Susceptibilité quantitative à la liquéfaction.....	30
6.2. APPRECIATION DES POTENTIALITES DE LIQUEFACTION DU SITE DE DEMBENI.....	32
6.2.1. Formations à analyser.....	32
6.2.2. Contexte hydrogéologique.....	33
6.2.3. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction des limons sablo-argileux.....	33
6.2.4. Susceptibilité quantitative et opportunité à la liquéfaction.....	35
6.2.5. Préconisations en terme de dispositions constructives.....	36
7. Conclusions	38

8. Références bibliographiques	39
ANNEXE 1	41
ANNEXE 2	43

Liste des illustrations

Illustration 1 – Localisation du projet de construction du lycée de Dembeni (polygone rouge). Extrait de la carte IGN 4410 Sud 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 – Sondages Pénétrométriques (SP) et Tarières (ST) du Lycée de Dembeni	18
Illustration 4 – Emplacements des mesures SASW, H/V et sondages pressiométriques sur le site du Lycée de Dembeni	18
Illustration 5 - Comparaison du spectre spécifique au rocher horizontal affleurant avec ceux tenant compte des effets de site et du spectre retenu pour un amortissement de 5%.	26
Illustration 6 – Spectre de réponse élastique horizontal tenant compte des conditions de site et de la classe d'ouvrage (classe C) du lycée de Dembeni. Amortissements : 2, 5, 10 et 20%	27
Illustration 7 – Courbes granulométriques des limons sablo-argileux.....	33
Illustration 8 – Modèles de vitesse des ondes de cisaillement obtenus par inversion sur le site du futur lycée de Dembeni.....	41
Illustration 9 - résultats des mesures H/V réalisées sur le site du futur lycée de Dembeni.	44

Liste des tableaux

Tableau 1 – Séisme de référence retenu pour l'étude de l'aléa sismique sur le site du lycée de Dembeni 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 ; Wn : teneur en eau naturelle ; WI : limite de liquidité ; IP : Indice de plasticité ; IC : Indice de consistance	20
Tableau 4 – Caractéristiques mesurées moyennes des formations géologiques.	22
Tableau 5 – Colonnes de sol 1 et 2. Vs : vitesse des ondes de cisaillement en m/s; Vp : vitesse des ondes longitudinales ; Ip = Indice de plasticité.....	23
Tableau 6 - caractéristiques des accélérogrammes réels utilisés pour la modélisation numérique.....	25
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.	28
Tableau 8 – Examen des critères de susceptibilité qualitative (règles PS 92)	34
Tableau 9 – Calcul de l'intensité de liquéfaction	37

Liste des annexes

ANNEXE 1	41
ANNEXE 2.....	43

1. Introduction

Cette étude a été réalisée à la demande de la Direction de l'Équipement (DE) de Mayotte pour son projet de construction d'un lycée à Dombéni (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.

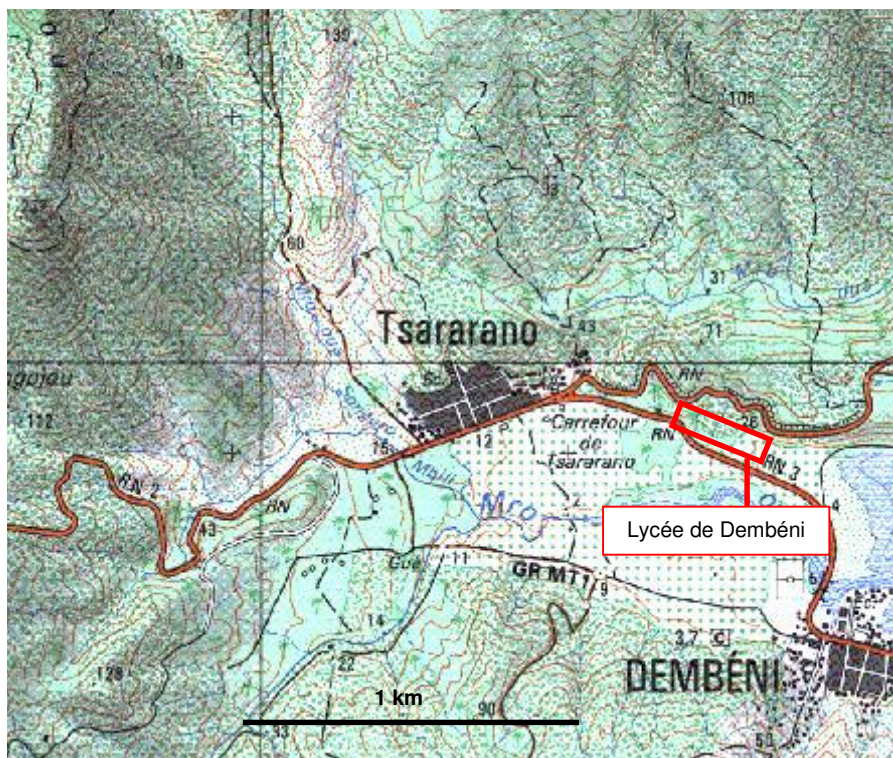


Illustration 1 – Localisation du projet de construction du lycée de Dombéni (polygone rouge). Extrait de la carte IGN 4410 Sud au 1/25000^{ème}

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 Dombéni.

2. État de la réglementation à Mayotte

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

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

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

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

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

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

3. Détermination des mouvements sismiques de référence au rocher

3.1. CARACTERISTIQUES DU SEISME DE REFERENCE

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

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

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

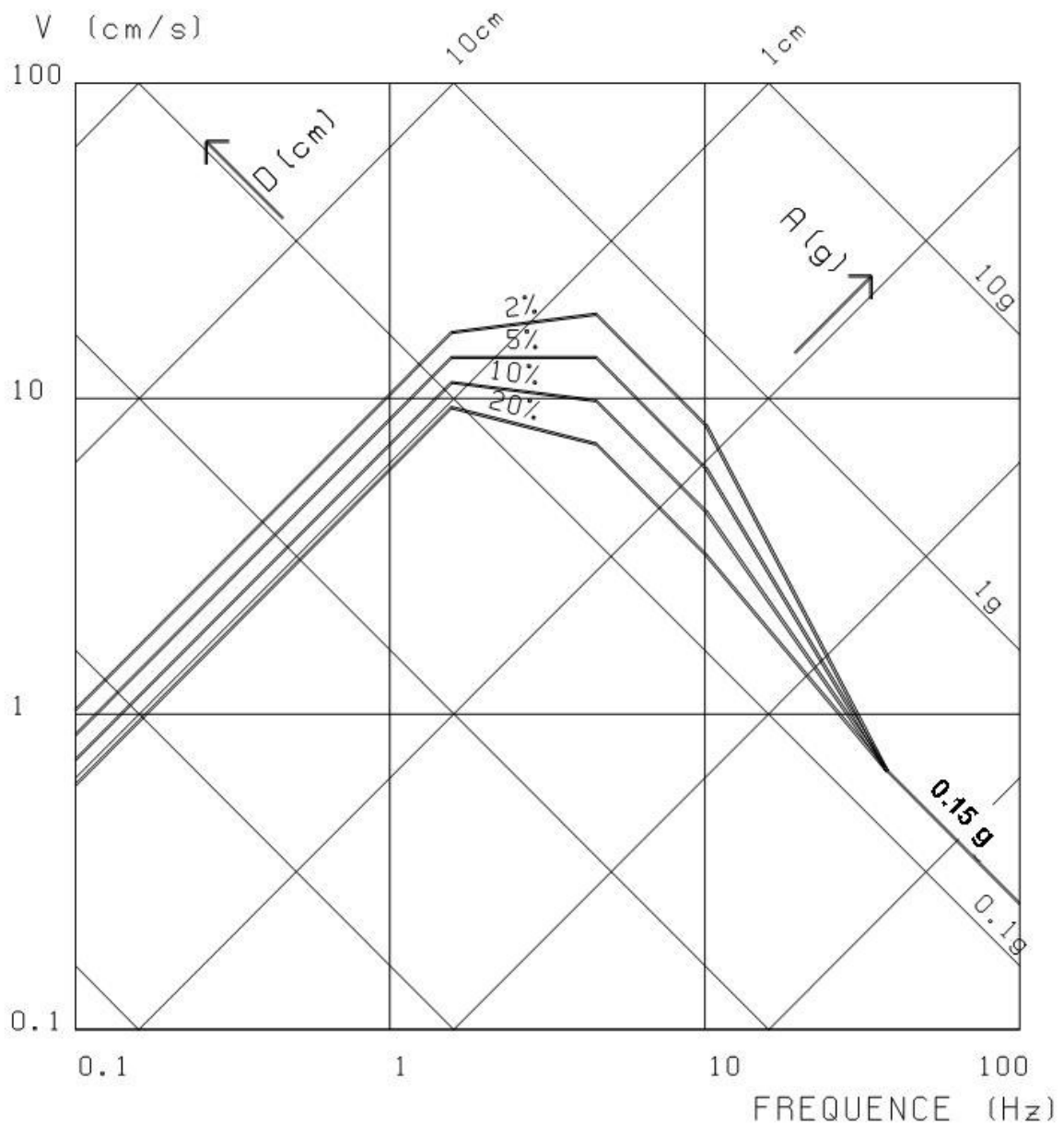


Illustration 2 - Spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant.
Amortissements : 2, 5, 10 et 20 %.

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, une ou plusieurs colonnes de « sol » (formations géologiques) représentatives du site sont caractérisées 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, l'existence de formations liquéfiables en cas de séismes est recherchée, et si le cas se présente, l'intensité de la liquéfaction est déterminée.

4.2. DONNEES

4.2.1. Contexte géologique

Les observations de terrain suggèrent que le site du lycée de Dombéni est installé sur des alluvions fines provenant surtout des altérites ferrallitiques déposées en plusieurs phases. Ces alluvions reposent un rocher altéré puis sur des basaltes et basaltes à néphéline formant la base de la série méridionale du bouclier ancien méridional d'âge mio-pliocène (4 à 8 Ma).

4.2.2. Contexte géotechnique et géophysique

De nombreuses données sont disponibles pour ce site, issues de différentes mesures réalisées pour cette étude :

1. Une campagne de sondages a été réalisée pour la DE de Mayotte : 13 sondages tarières et 18 sondages avec essai pénétrométrique tous les 2 mètres, arrêtés généralement à 5 m ou avant si refus sur compacité.
2. Une campagne d'essai réalisé par la DE
 - 2 sondages pressiométriques avec essais tous les 2 mètres jusqu'à 20 m.
 - Des échantillons remaniés prélevés entre 11 et 15 m de profondeur et entre 15 et 22 m de profondeur. (SP1 : Ech. 2005-G-0070, 2005-G-0071 – SP2 : Ech. 2005-G-0072, 2005-G-0073) ; sur ces échantillons, les essais suivants ont été pratiqués : analyse granulométrique ; limites d'Atterberg ; teneur en eau naturelle.
3. 3 profils de SASW ont été réalisés par le BRGM, fournissant des mesures de vitesses d'ondes de cisaillement Vs. Le détail de la méthode du dispositif SASW, et le profil issu de l'analyse des résultats sont fournis en Annexe 1.
4. 5 mesures H/V ont également été réalisées par le BRGM sur le site: le détail de la méthode H/V et une analyse des résultats obtenus se trouvent en Annexe 2.

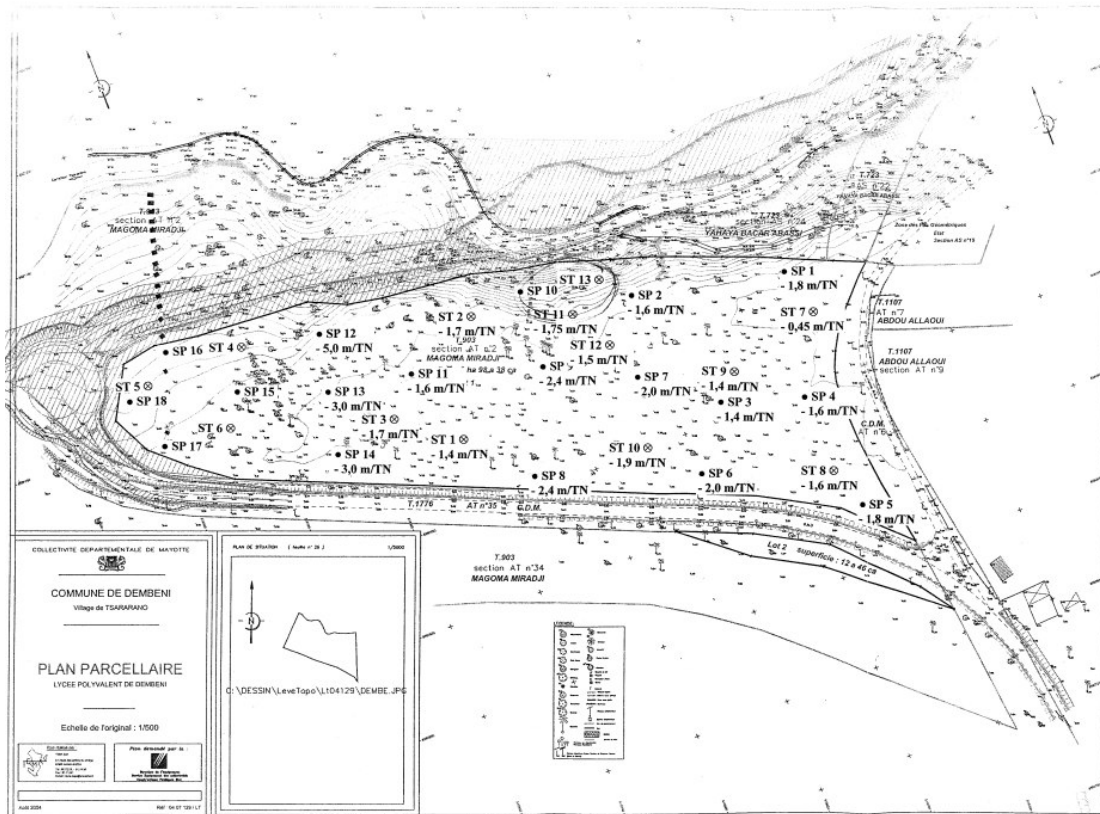


Illustration 3 – Sondages Pénétrométriques (SP) et Tarières (ST) du Lycée de Dembéné

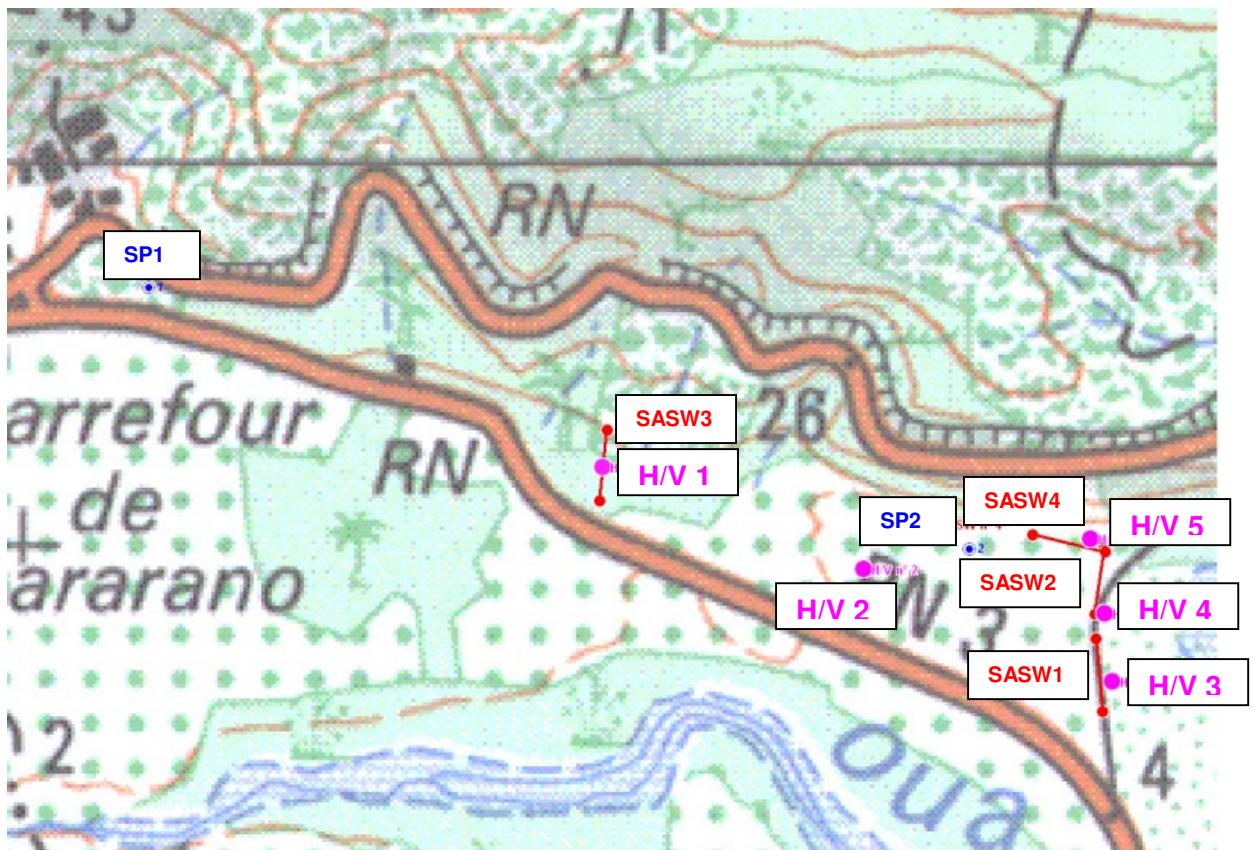


Illustration 4 – Emplacements des mesures SASW, H/V et sondages pressiométriques sur le site du Lycée de Dembéné

4.3. CARACTERISATION DES UNITES GEOMECHANQUES

4.3.1. Caractéristiques

Les sondages révèlent deux zones avec des colonnes de sol différentes : une zone de plaine alluviale et une zone du versant de colline. Cette dernière n'étant révélée que par un seul sondage pénétrométrique à un endroit très local, elle ne fera pas l'objet d'une colonne de sol.

En revanche, la zone de plaine alluviale fera l'objet de 2 colonnes de sol puisque l'épaisseur des formations rencontrées est variable.

ZONE DE PLAINE ALLUVIALE

a. Niveau superficiel : Terre végétale

- *Lithologie :*

La synthèse de certains des résultats des sondages montre la présence de terre végétale.

- *Epaisseur :*

La présence de terre végétale varie entre les cotes 0.10 et 0.40 m/TN.

b. Limons argilo-sableux

- *Lithologie :*

Les sondages ST1 à ST12 mettent en évidence des limons argilo-sableux brun à éléments basaltiques sains et altérés de taille millimétrique à pluri-millimétriques. Dans l'ensemble, cette formation est faiblement à moyennement compactée et localement fortement compactée (refus à 1.4 m de profondeur / TN). Ces limons caractérisent les alluvions fines.

- *Epaisseur :*

L'épaisseur de ces limons varie entre 0.7 m et au moins 1.85 m. Cette formation a une épaisseur proche de 1.85 m (ST8 – 9 – 10 – 11) à l'est de la zone étudiée et qui diminue légèrement au nord (ST7) et à l'ouest (ST4 – 5 : refus sur compacité)

- *Essais pénétrométriques :*

La résistance dynamique apparente du sol a été évaluée grâce à la réalisation de 18 sondages pénétrométriques légers. Les résistances à la pénétration sont variables (0.6 à 10.1 MPa). Les pics correspondent soit au passage de blocs, soit à l'hétérogénéité des teneurs en argiles dans les matériaux rencontrés.

Dans l'ensemble, les résistances à la pénétration sont supérieures à 0.6 MPa à partir de 0.4 m/TN.

Les alluvions fines présentent donc dans l'ensemble une résistance dynamique supérieure ou égale à 0.6 MPa à partir de 0.4m/TN.

- *Essais pressiométriques*

Les premières mesures commencent à 2 m/TN et ne concernent donc pas cette formation.

- SASW

Selon le profil 2 et en faisant une moyenne pondérée sur 20 cm, une vitesse de 125 m/s pour les ondes de cisaillement Vs est évaluée.

- H/V

Les résultats montrés en Annexe 2 donnent une fréquence de résonance comprise entre 1.7 Hz à l'est et 3.4 Hz à l'ouest. En considérant la couche sous jacente à cette formation qui s'avère aussi être des limons avec une vitesse Vs moyenne environ égale à 150 m/s, l'épaisseur totale des deux couches serait comprise entre 11 et 22 mètres. Il existe donc un épaissement de ces couches en direction de la mer compatible avec la morphologie locale et la définition des épaisseurs indiquées ci avant.

c. Limons sablo-argileux

- Lithologie :

Selon les logs de forages, des limons sablo-argileux, brun clairs, faiblement compacts, à éléments basaltiques sains de taille millimétrique à pluri-millimétrique, légèrement vasards sont observés. Ces limons caractérisent les alluvions fines légèrement vasardes.

- Epaisseur :

L'épaisseur moyenne de ces limons est d'au moins 16 mètres. Cette formation présente globalement la même forme que la formation précédente (i.e. épaissement d'ouest en est comme cela a été observé pour la formation précédente).

- Essais en laboratoire :

Le Tableau 3 ci-dessous récapitule les résultats des principaux essais réalisés en laboratoire sur les échantillons prélevés dans cette formation.

Echantillon	Profondeur	passant à 80 µm	D max	Wn	WI	IP	IC	cat. NFP11-300
SP1 2005-G-0070	11 – 15 m	97.2 %	< 50 mm	111.2 %	55.6 %	17.9 %	3.1	A _{2ts}
SP1 2005-G-0071	15 – 22 m	84.1 %	< 50 mm	91.3 %	30.7 %	30.7 %	-1.9	A _{3th}
SP2 2005-G-0072	11 – 15 m	85.4 %	< 50 mm	104 %	47.4 %	15.1 %	3.1	A _{2ts}
SP2 2005-G-0073	15 – 22 m	83.4 %	< 50 mm	106.4 %	42.6 %	12.2 %	3.4	A _{2ts}

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

- Essais pénétrométriques :

La résistance dynamique apparente du sol a été évaluée grâce à la réalisation de 18 sondages pénétrométriques légers. Les résistances à la pénétration sont variables (0.6 à

10.1 MPa). Les pics correspondent soit aux passages de blocs, soit à l'hétérogénéité des teneurs en argiles dans les matériaux rencontrés.

Dans l'ensemble, les résistances à la pénétration sont supérieures à 0.6 MPa à partir de 0.4 m/TN.

Les alluvions fines présentent donc dans l'ensemble une résistance dynamique supérieure ou égale à 0.6 MPa à partir de 0.4m/TN.

- *Essais pressiométriques*

Le sondage SP1 fourni sort de la zone d'étude. Il révèle néanmoins la présence d'un sol de résistance mécanique moyenne (Type b selon les PS92).

D'après le SP2 et pour une profondeur variant entre 2 et 10 m/TN, la pression limite PI^* mesurée varie entre 0.11 MPa et 0.31 MPa. Le module pressiométrique E_m est dans une frange située entre 0.9 MPa et 3.9 MPa. Le rapport EM/PI^* varie entre 3.5 et 8.3. D'après les règles PS92, ce sol est un sol cohérent mou de faible résistance mécanique (Type c).

D'après le SP2 et pour une profondeur variant entre 12 et 20 m/TN, la pression limite PI^* mesurée varie entre 1.32 MPa et 2.4 MPa. Le module pressiométrique E_m est dans une frange située entre 33.2 MPa et 60.6 MPa. Le rapport EM/PI^* varie entre 20 et 30. D'après les règles PS92, ce sol est un sol cohérent moyennement consistant de résistance mécanique moyenne (Type b).

- *SASW*

En réalisant une moyenne pondérée des vitesses V_s entre 3 et 27 m/TN pour les profils 1 et 2, une vitesse entre 140 et 200 $m.s^{-1}$ est obtenue. Ce qui est cohérent avec les résultats des essais pressiométriques SP2.

- *H/V*

Les résultats montrés en Annexe 2 donnent une fréquence de résonance comprise entre 1.7 Hz à l'est et 3.4 Hz à l'ouest. En considérant la couche sus jacente à cette formation qui s'avère aussi être des limons avec une vitesse V_s égale à 150 m/s, l'épaisseur totale des deux couches est comprise entre 11 et 22 mètres. Il y a donc un épaissement de ces couches en direction de la mer. Ces résultats sont en accord avec les sondages tarières.

d. Rocher fracturé / Substratum

D'après les profils SASW 1 et 2 le substratum n'est pas encore atteint à une profondeur de 25 mètres. Il s'agit probablement d'un rocher altéré ou fracturé.

D'après le profil 3 et dans la mesure où le sondage ST4 atteint la limite de refus sur compacité pour ce même emplacement, le profil SASW 3 met en évidence des vitesses V_s supérieures à 400 m/s et la nature du sol peut être déduite localement. En se référant à la classification des sols selon les règles PS92, de telles vitesses des ondes de cisaillement correspondent à un rocher altéré ou fracturé ou à des sols cohérents (argiles dures).

Le profil 3 a été coupé en deux car il y avait une discontinuité des vitesses de cisaillement.

Le profil 3 (1-4 situé au nord) adjacent à la colline est en accord avec le sondage ST4 dont le refus sur compacité a été atteint à 1.5 m/TN. La vitesse des ondes de cisaillement vaut environ 395 m/s entre 2.5 et 5m/TN. Ensuite, pour une profondeur de 5 à 10m/TN, la vitesse Vs diminue. Enfin, la vitesse Vs retrouve une valeur proche de celle d'un rocher altéré pour les profondeurs de 10 à 30 m/TN. (Vs ~ 500 m/s)

Le profil 3 (15-24 situé au sud) est cohérent avec le sondage ST6 qui montre l'existence d'un sol de résistance mécanique moyenne (Vs = 200 m/s entre 2.5 et 10m/TN). Le sol compacté se retrouve en accord avec le profil 3 (1-4) et des vitesses Vs de l'ordre de 500 m/s.

En conclusion, il existe ici un rocher altéré surmontant un substratum qui n'a été atteint ni par les sondages, ni par les profils SASW. Les caractéristiques choisies pour établir les colonnes de sol seront par conséquent celle du rocher altéré ou fracturé.

4.3.2 Récapitulatif

ZONE DE PLAINE ALLUVIALE

Le Tableau 4 ci-dessous synthétise les données géotechniques et géophysiques exploitées.

Formation	Nature	Épaisseur	Caractéristiques pressiométriques	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Niveau superficiel	Terre végétale	0.3 m	-	-	-	-
Alluvions fines	Limons argilo-sableux	1.25 à 1.85 m	-	125	-	Sols cohérents mous (Type c)
Alluvions fines	Limons sablo-argileux	5 à 10 m	0.11 à 0.31 MPa	140	-	Sols cohérents mous (Type c)
Alluvions fines	Limons sablo-argileux	5 à 10 m	1.32 à 2.4 MPa	200	-	Sols cohérents moyennement consistant (Type b)
Rocher altéré	Sols cohérents (argile dure)	-	-	500	-	Sols cohérents durs (Type a)

Tableau 4 – Caractéristiques mesurées moyennes des formations géologiques.

4.4. HYDROGEOLOGIE

A l'exception des sondages ST4 et ST6 situé en amont de la zone d'étude (Ouest), les sondages tarières ont mis en évidence une nappe d'eau dont la profondeur varie entre 0.45 et 1.90 m/TN. (Sondages datant d'Avril 2005)

A l'exception des sondages SP15 et SP18 situés en amont de la zone d'étude (Ouest), les sondages pénétrométriques réalisés dans les alluvions ont mis en évidence une nappe d'eau dont la profondeur varie entre 1.40 et 5.00 mètres/TN. (Sondages datant d'Avril 2005)

Les sondages SP1 et SP2 révèlent la présence d'une nappe à 11 m et à 6 mètres de profondeur/TN respectivement. (Sondages datant de Novembre 2005). 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. L'existence

d'une nappe sub-affleurante représentative de conditions extrêmes en saison humide est prise en compte.

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). Pour cela, deux colonnes de sol ont été analysées et tiennent compte des épaisseurs minimum et maximum des couches.
- 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), et ont été appliquées pour les couches de limon sablo-argileux en tenant compte de la connaissance de son indice de plasticité IP.

Les Tableau 5 ci-dessous récapitulent les caractéristiques de la colonne de sol retenue pour l'étude :

- La nappe est prise en compte selon la dernière mesure effectuée.
- 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 sont utilisées;
- Les vitesses de cisaillement des colonnes de sol sont représentatives de la moyenne des V_s issues des mesures de SASW.

ZONE DE PLAINE ALLUVIALE

Formation	Modèle de comportement	γ_h (kN/m ³)	Caractéristiques géomécaniques de base	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Épaisseur	
						Col. 1	Col. 2
Terre végétale	Non linéaire	18,0	-	-	-	0.3 m	0.3 m
Limons argilo-sableux	Non linéaire	17,0	-	125	240	1.25 m	1.85 m
Limons sablo-argileux	Non linéaire	18,0	$I_p \sim 13\%$	140	270	5 m	10 m
Limons sablo-argileux	Non linéaire	18,0	$I_p \sim 13\%$	200	380	5 m	10 m
Rocher altéré	Élastique	20,0	-	500	800	-	-

Tableau 5 – Colonnes de sol 1 et 2. V_s : vitesse des ondes de cisaillement en m/s; V_p : vitesse des ondes longitudinales ; I_p = Indice de plasticité.

5. Spectres de réponse compte tenu des conditions de site

5.1. PRÉSENTATION DU PROBLÈME

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

5.1.1. Méthodes empirico-statistiques

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

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

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

5.1.2. Méthodes numériques

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

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

Pour 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. Sont appliqués comme mouvement au substratum différents accélérogrammes (réels ou synthétiques) ayant une réponse spectrale proche du spectre spécifique retenu dans le cadre de l'étude pour calculer les accélérogrammes en surface résultant de l'amplification du signal par la colonne de sol.

La méthode employée est la suivante :

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

- Les accélérogrammes synthétiques sont générés à l'aide du logiciel SIMQKE (Gasparini et Vanmarcke, 1976). Par itérations, ce code génère des histoires temporelles en accélération, artificielles et statistiquement indépendantes, dont les spectres de réponse et la durée du mouvement sismique sont en concordance avec les caractéristiques du mouvement de référence donné en entrée. La durée du mouvement sismique utilisé dans SIMQKE est définie à partir du couple magnitude-distance défini pour le séisme de référence en utilisant la relation d'atténuation de Abrahamson et Silva (1996)
- Les accélérogrammes réels sont recherchés dans des bases de données mondiales de mouvements forts du sol. Les accélérogrammes sélectionnés ont des caractéristiques proches du séisme de référence retenu dans le cadre de la présente étude (Tableau 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 deux colonnes de sol correspondant à la configuration type rencontrée à l'aplomb du projet. Les spectres spécifiques montrés en Illustration 5 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 5), il apparaît que les deux colonnes de sol semblent représentatives puisqu'elles donnent des amplifications du mouvement sismique pour des fréquences autour de 2 Hz (pour la colonne 2) et autour de 4 Hz (colonne 1) comme cela a été constaté sur les résultats des mesures de bruit de fond (voir Annexe 2). Les résultats obtenus pour les deux colonnes de sol pour la définition du spectre de réponse tenant compte des effets de site (courbe grise en Illustration 5) sont pris en compte.

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 5 (courbe verte) un coefficient multiplicateur de 1,2 (courbe orange en Illustration 5).

Le spectre spécifique résultant, tenant compte à la fois de l'aléa sismique régional, des effets de site lithologiques et de la classe d'ouvrage à considérer, est représenté en Illustration 6 pour les amortissements 2, 5, 10 et 20 %. C'est le spectre à considérer pour le dimensionnement des futures installations du lycée de Dombéni. 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.

L'accélération horizontale maximale tenant compte des conditions de site à retenir pour le lycée de Dombéni (installation de classe C) est de 0.28 g.

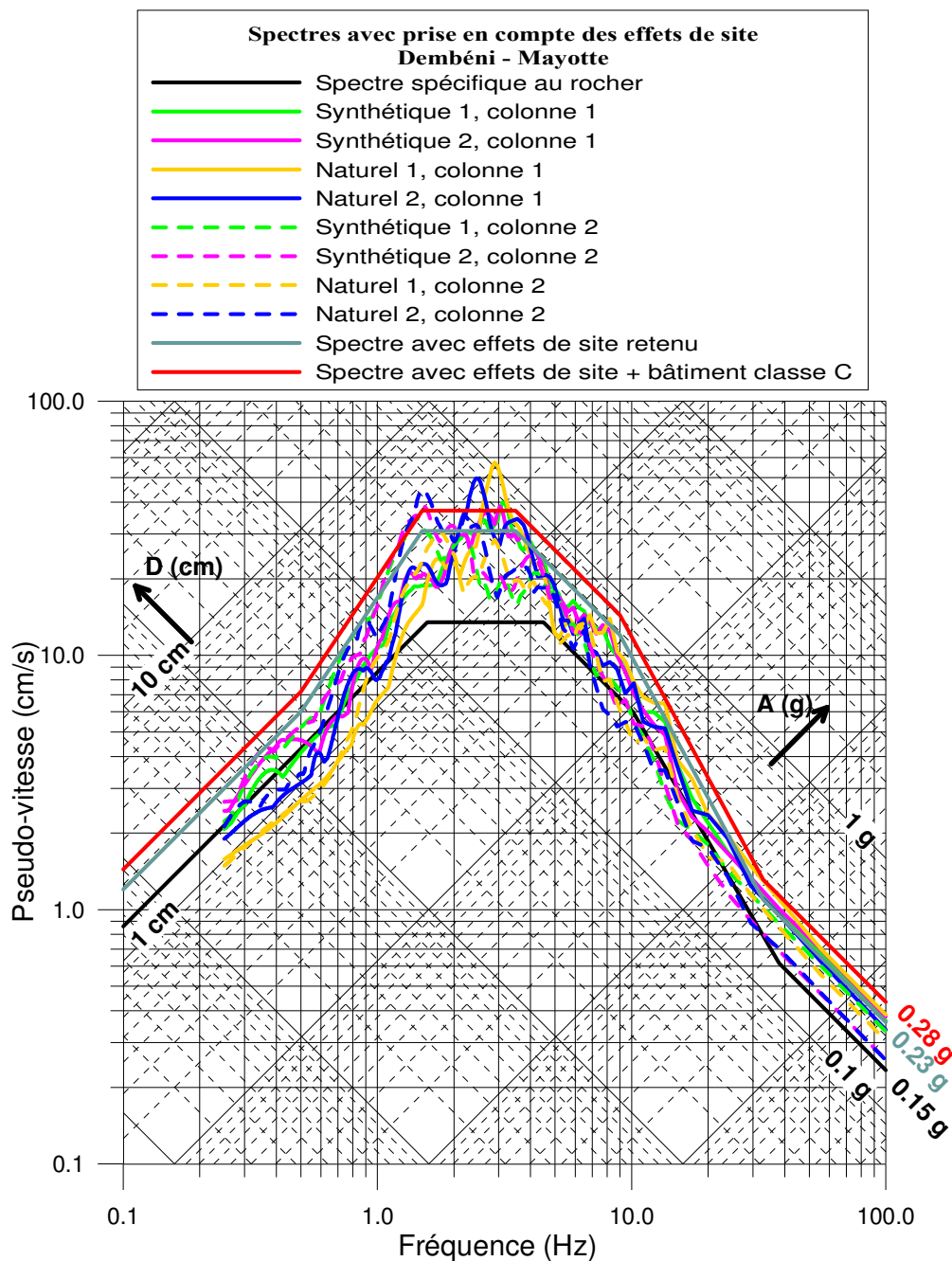


Illustration 5 - Comparaison du spectre spécifique au rocher horizontal affleurant avec ceux tenant compte des effets de site et du spectre retenu pour un amortissement de 5%.

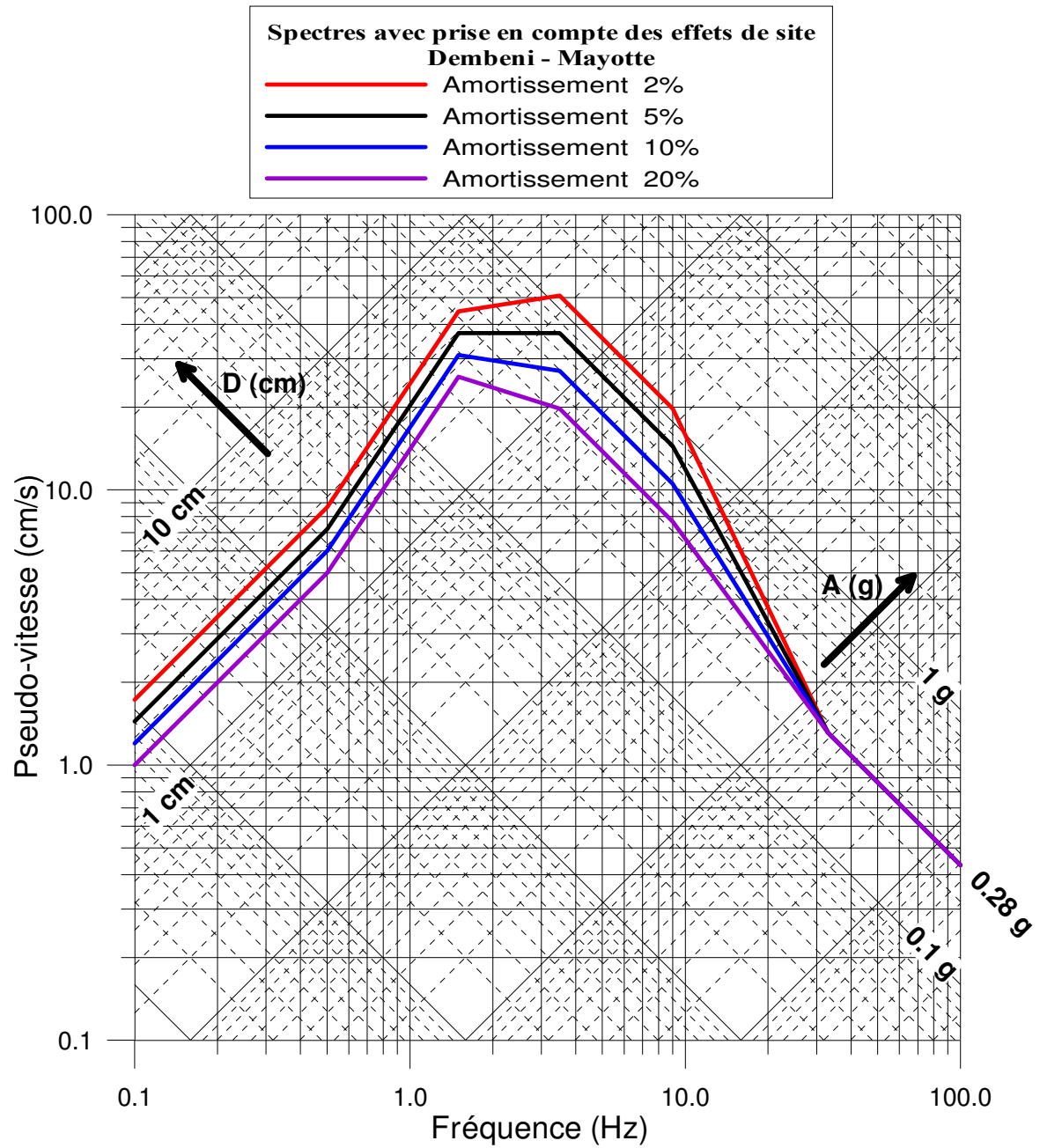


Illustration 6 – Spectre de réponse élastique horizontale tenant compte des conditions de site et de la classe d'ouvrage (classe C) du lycée de Dombéni. Amortissements : 2, 5, 10 et 20%

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	0.43	44.52	4.72
1.5	5	0.36	37.10	3.94
1.5	10	0.30	30.91	3.28
1.5	20	0.25	25.76	2.73
3.5	2	1.14	50.82	2.31
3.5	5	0.83	37.10	1.69
3.5	10	0.61	27.08	1.23
3.5	20	0.44	19.76	0.90
9.0	2	1.14	19.76	0.35
9.0	5	0.83	14.43	0.26
9.0	10	0.61	10.53	0.19
9.0	20	0.44	7.69	0.14
33	Tous amortissements	0.28	1.31	0.006
100	Tous amortissements	0.28	0.43	0.001

Tableau 7 – 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. 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.

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. Les valeurs du paramètre N sont obtenues par des corrélations usuelles (cf. Cassan – Essais *in situ* en mécanique des sols) :

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

	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 des corrélations soient utilisées pour se ramener au N SPT, un coefficient de sécurité plus élevé, de l'ordre de 1,6 permet de tenir compte des incertitudes supplémentaires.

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. Plusieurs classes sont distinguées :

- 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 DEMBENI

6.2.1. Formations à analyser

Les reconnaissances de terrain ont permis d'identifier 4 horizons distincts :

- niveau superficiel (terre végétale)
- limons argilo sableux
- limons sablo-argileux (médiocres en partie haute et moyennement consistants en profondeur)
- substratum

Parmi les 5 horizons identifiés dans l'étude, seuls 2 sont à écarter vis à vis d'une éventuelle potentialité à la liquéfaction :

- le niveau superficiel, qui sera décapé lors du projet ;
- le substratum consistant.
- Les trois autres formations, constituées de sables plus ou moins argileux, et le plus souvent assez peu compactes, doivent faire l'objet d'une analyse plus fine, dans la mesure où leur susceptibilité à la liquéfaction ne peut être définie *a priori*.

6.2.2. Contexte hydrogéologique

Plusieurs sondages ont rencontré la nappe. Celle-ci se situe entre 0,45 m et 11 m de profondeur à l'Est de la zone d'étude (pas d'indication sur le fait que les niveaux d'eau étaient stabilisés ou non). En tout état de cause, il semble qu'il existe une nappe peu profonde, tout au moins dans la partie aval de la plaine alluviale.

En conséquence, pour l'étude de liquéfaction, l'existence d'une nappe subaffleurante, représentative de conditions extrêmes en saison humide est prise en compte.

6.2.3. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction des limons sablo-argileux

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).

Les 4 mesures granulométriques effectuées par la Direction de l'Équipement ont été exploitées. Les échantillons ont été prélevés entre 11 et 22 m de profondeur, c'est-à-dire en partie basse et plus compacte de la formation. Ces courbes ont été superposées aux fuseaux granulométriques délimitant le domaine de la plupart des sols liquéfiables (Illustration 7).

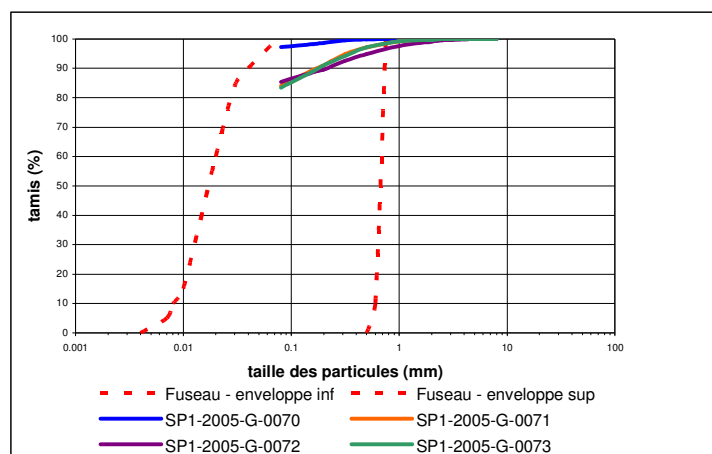


Illustration 7 – Courbes granulométriques des limons sablo-argileux

Bien que la répartition granulométrique pour la fraction la plus fine (< 80 µm) ne soit pas disponible, les limons sablo-argileux s'ajustent très mal dans le fuseau des sols liquéfiables du fait principalement d'une fraction fine trop élevée. Ces terrains tendraient donc à ne pas être liquéfiables.

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, les critères pour les sables et pour les argiles ont été vérifiés.

Nature	Critères de suspicion	Limons sablo-argileux
Sables	S_r voisin de 100 %	Oui (matériaux sous nappe)
	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$	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 ($w_L = 42,5\%$)
	$w > 0,9 \cdot w_L$	Non exploitable
	Sol au-dessus de la droite « A » du diagramme de plasticité	Non dans 3 cas sur 4
Nature	Critères d'exclusions	Argiles lacustres
Sables	$D_{10} > 2mm$	Non ($D_{10} < 80 \mu m$)
Argiles	$\left\{ \begin{array}{l} D_{70} < 74\mu m \\ I_p > 10\% \end{array} \right.$	OUI dans 4 cas sur 4.

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

Même si certains critères ne peuvent être exploités, le critère d'exclusion est vérifié pour les argiles (et le critère de suspicion n'est pas vérifié).

Par conséquent, les limons sablo-argileux ne semblent pas susceptibles d'être liquéfiables.

6.2.4. Susceptibilité quantitative et opportunité à la liquéfaction

Faute de pouvoir totalement trancher sur la susceptibilité à la liquéfaction des limons argilo-sableux présents sous la terre végétale, une étude de susceptibilité quantitative a été menée.

Le calcul a été réalisé pour la colonne de sol la plus conservatrice du site de Dombéni retenue pour l'étude de l'effet de site sismique (profondeurs arrondies au mètre près) :

- (terre végétale négligée)
- entre 0 et 2,0 m de profondeur : limons argilo-sableux
- au-delà de 2,0 m pas de matériaux 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 les limons argilo-sableux, sont retenues les valeurs suivantes relativement conservatrices :

- $p_l = 0,25 \text{ MPa}$
- $q = 1,5 \text{ MPa}$
- $\sigma_h = 17 \text{ kN/m}^3$

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 $2,8 \text{ m/s}^2$, 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 subaffleurante baignant la totalité de l'horizon limoneux (cf. Tableau 2). Il ressort de ce calcul que le facteur de sécurité est insuffisant dans les limons argilo-sableux (sous réserve que cette formation ait une lithologie propice à la liquéfaction).

Cependant, les potentialités de liquéfaction supposées conduisent à une valeur d'intensité de la liquéfaction (indice d'Iwasaki) de l'ordre de 4, ce qui reste 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 »**.

Cela signifie que :

- la liquéfaction reste possible sur le site de Dombéni, (en effet, dans la méthode d'Iwasaki utilisée pour évaluer l'intensité de liquéfaction, le site est considéré comme non liquéfiable exclusivement lorsque $I_L = 0$) ;
- en tenant compte des méthodes employées qui sont plutôt conservatrices, le site de Dombéni se trouve statistiquement dans un contexte où le séisme de référence a plus de

chance de n'induire aucun effet en terme de liquéfaction, que de générer une liquéfaction généralisée de la zone ;

- si la zone liquéfiée effectivement, l'incidence en surface devrait rester très modérée. En effet :
 - les bâtiments auront probablement un mode de fondation répartissant très largement les descentes de charges (terrains peu porteurs), et verront leur monolithisme renforcé par les dispositions constructives parasismiques générales ;
 - la couche potentiellement liquéfiable est d'épaisseur modérée (moins de 2 m) ;

Cette formation doit probablement présenter des caractéristiques lithologiques moyennes plus proches d'un sol non liquéfiable que celles d'un terrain liquéfiable.

6.2.5. Préconisations en terme de dispositions constructives

Dans la mesure où :

- le risque de liquéfaction est **peu probable** dans les limons argilo-sableux du site de Dombéni (en supposant toutefois, faute de données d'identifications précises, que cette formation présente un potentiel de liquéfaction réel),
- le mode de fondation des bâtiments les plus lourds et le renforcement parasismique des structures devrait sensiblement réduire la vulnérabilité des édifices ;
- les effets d'une éventuelle liquéfaction devraient être très limités ;

aucune mesure spécifique relative à prévention contre la liquéfaction des sols n'est recommandée.

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.

DEMBÉNI

Position de la nappe : z = 0 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 _{éq.}	C _N	N ₁		$(\tau/\sigma')_l$ (brut)	$(\tau/\sigma')_l$ (corrigé)	F _L	I _{Li}	I _L
0 - 1 m	0.5	Horizon limoneux	17	7	8.5	3.5	2.8	0.9998	0.4419	1.5	5	2.8199	14	0.245	0.368	0.832	0.1684	1.6419	
1 - 2 m	1.5	Horizon limoneux	17	7	25.5	10.5	2.8	0.9983	0.4413	1.5	5	2.2235	11	0.210	0.315	0.714	0.2861	2.6467	
2 - 20 m	12	Niveau non liquéfiables														> 2	0	0	
																			4.3

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 et géotechniques disponibles sur le site a permis de définir deux colonnes de sols caractéristiques du site. Un spectre spécifique tenant compte des effets de site lithologiques a ainsi été calculé à l'aide d'un modèle numérique non linéaire (code de calcul CyberQuake, version 2000). Ce spectre tient aussi compte de la classe du bâtiment (classe C). Il est représenté en Illustration 6 et dans le Tableau 7.

L'accélération horizontale maximale du sol tenant compte des conditions de site pour le futur lycée de Dembéné est de 0.28 g (soit 2.8 m/s²).

L'étude de liquéfaction montre que le potentiel de liquéfaction au droit du site d'études est « **peu probable** ».

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.
- 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 Lebrun B., avec la collaboration de J.P. Raçon – Microzonage sismique de Mamoudzou-Centre, île de Mayotte. Rapport BRGM/RP-51839-FR – 2002 Mayotte 05.

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.

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

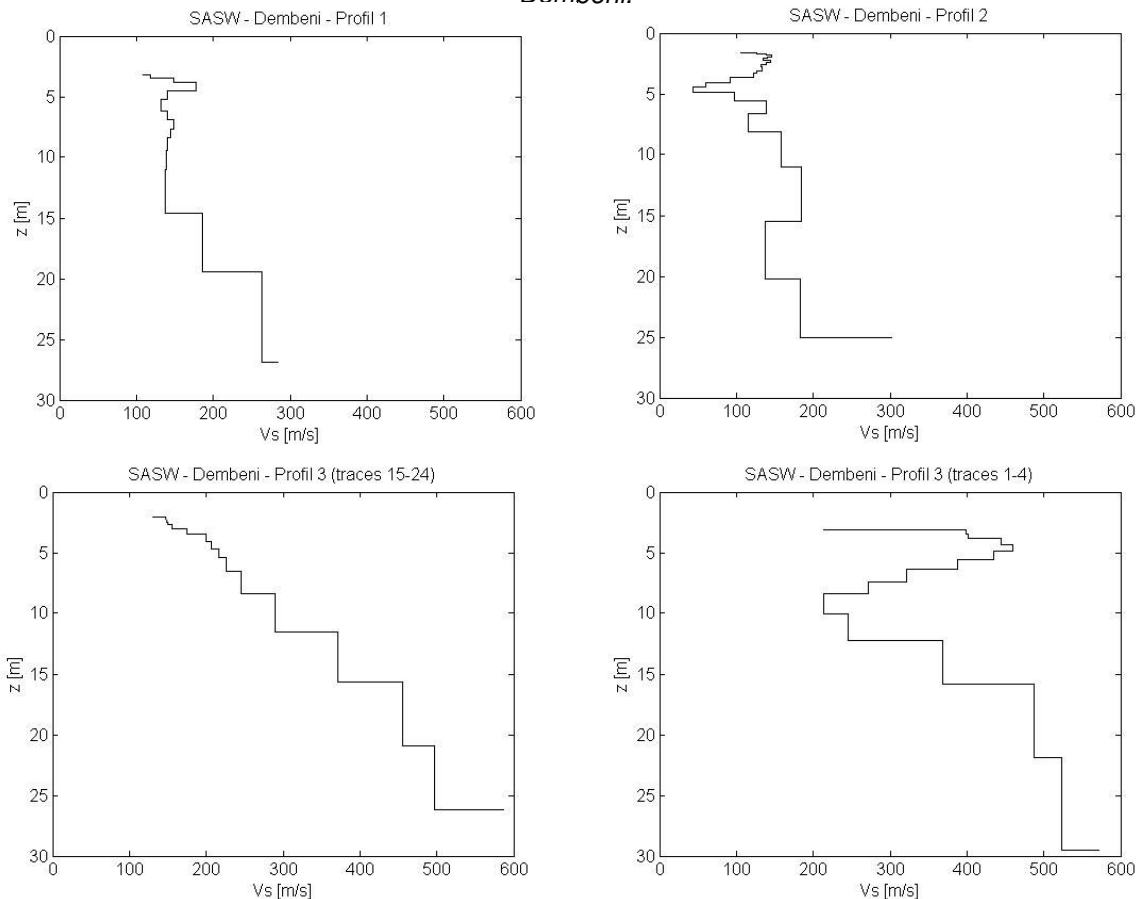
ANNEXE 1

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 8) et par conséquent de déterminer le type de sol en fonction des paramètres d'identification donnés dans les Règles PS92.

Illustration 8 – Modèles de vitesse des ondes de cisaillement obtenus par inversion sur le site du futur lycée de Dombéni.



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.

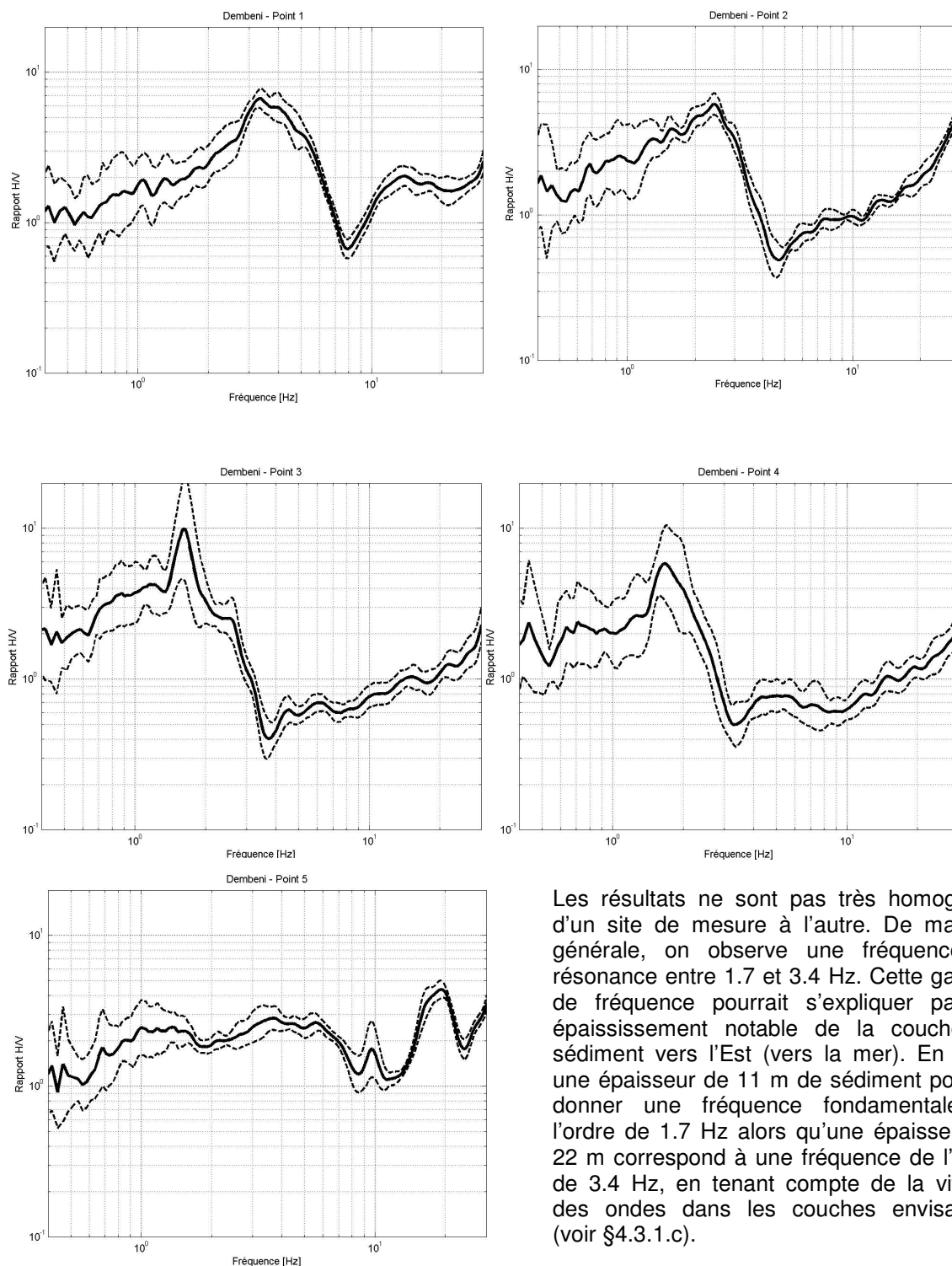
Pour obtenir une pseudo-fonction de transfert à l'aide du bruit de fond, en s'affranchissant de l'effet de source, on divise donc le spectre d'une composante horizontale par le spectre de la composante verticale (d'où l'appellation H/V). Ce rapport donne avec une bonne précision la fréquence de résonance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



Les résultats ne sont pas très homogènes d'un site de mesure à l'autre. De manière générale, on observe une fréquence de résonance entre 1.7 et 3.4 Hz. Cette gamme de fréquence pourrait s'expliquer par un épaissement notable de la couche de sédiment vers l'Est (vers la mer). En effet, une épaisseur de 11 m de sédiment pourrait donner une fréquence fondamentale de l'ordre de 1.7 Hz alors qu'une épaisseur de 22 m correspond à une fréquence de l'ordre de 3.4 Hz, en tenant compte de la vitesse des ondes dans les couches envisagées (voir §4.3.1.c).

Illustration 9 - résultats des mesures H/V réalisées sur le site du futur lycée de Dembèni.



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