

Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Futur lycée de Dembény, site de Tsararano (Mayotte)

Rapport final

BRGM/RP-56431-FR

Juin 2008

Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Futur lycée de Dembéni, site de Tsararano (Mayotte) Rapport final

BRGM/RP-56431-FR
Juin 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets de
service public du BRGM 07RISG82

F. Vermeersch, S. Auclair, E. Vanoudheusden, J. Rey, A. Roullé et A. Bitri
Avec la collaboration de
C. Cluzet

Vérificateur :

Nom : P. Dominique

Date : 12/06/2008

Signature :

(Ou Original signé par)

Approbateur :

Nom : P. Puvilland

Date : 25/06/2008

Signature :

(Ou Original signé par)

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

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 :

F. Vermeersch, S. Auclair, E. Vanoudheusden, J. Rey, A. Roullé, A. Bitri et C. Cluzet (2008) – Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Futur lycée de Dembéni, site de Tsararano (Mayotte). Rapport BRGM/RP-56431-FR, 52 p., 13 fig., 6 tabl., 3 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). Un premier site a déjà fait l'objet d'une étude d'aléa sismique par le BRGM en 2006 ("*Etude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Futur lycée de Dombéni (Mayotte).*" Rey et al., 2006). La présente étude concerne un deuxième site proposé pour le projet de lycée à proximité de Dombéni.

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.

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. Le spectre spécifique qui en résulte est représenté sur la Figure 7 et sur la Figure 8, et ses valeurs sont reportées dans le Tableau 5.

L'accélération horizontale maximale tenant compte (1) des conditions de site du lycée et (2) de la classe C des installations, est de **0.34 g (soit 3.3 m/s²)** (valeur de l'accélération pour T=0 s sur le spectre de réponse spécifique représenté la Figure 7).

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.

Il conviendrait enfin de vérifier la possibilité d'un effet de site topographique au niveau du site. En effet, la possibilité d'effets de site topographiques, de ruptures en surface de faille active, de liquéfaction, de mouvements de terrain induits par le séisme n'a pas été traitée dans la présente étude.

Sommaire

1. Introduction	9
2. État de la réglementation à Mayotte	13
3. Détermination des mouvements sismiques de référence au rocher	15
3.1. CARACTERISTIQUES DU SEISME DE REFERENCE	15
3.2. CALCUL DES MOUVEMENTS SISMiques DE RÉFÉRENCE A MAYOTTE ..	15
4. Synthèse géologique et géotechnique	19
4.1. PREAMBULE	19
4.2. DOCUMENTS DE REFERENCES	19
4.3. DONNEES	19
4.3.1. Contexte géologique	19
4.3.2. Contexte géotechnique et géophysique	20
4.4. CARACTERISATION DES UNITES GEOMECHANIQUES	20
4.5. HYDROGEOLOGIE	21
4.6. ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS	21
5. Détermination du spectre tenant compte des conditions de site	23
5.1. MÉTHODOLOGIE	23
5.2. MÉTHODES NUMÉRIQUES	23
5.3. CHOIX DES MOUVEMENTS SISMiques AU ROCHER POUR L'ANALYSE DES EFFETS DE SITE	24
5.3.1. Choix des accélérogrammes	24
5.3.2. Comparaison avec le spectre au rocher horizontal affleurant	26
5.4. ESTIMATION DU SPECTRE DE REPOSE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE	28
6. Conclusion	33
7. Références bibliographiques	35

Liste des illustrations

Figure 1 – Localisation du projet de construction du lycée de Dembéli (polygone rouge) : nouveau site prévu à Tsararano. Extrait de la carte IGN 4410 Sud au 1/25000 ^{ème}	11
Figure 2 – Spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant. Amortissements : 2, 5, 10 et 20 %	17
Figure 3 – Accélérogrammes naturels sélectionnés et normalisés par rapport au PGA « cible »	25
Figure 4 – Accélérogrammes naturels modifiés correspondant au spectre au rocher.....	26
Figure 5 – Comparaison des spectres en vitesse des accélérogrammes réels et synthétiques avec le spectre au rocher.....	27
Figure 6 – Spectres de réponse à 5 % des accélérogrammes synthétiques et réels tenant compte des effets de site.....	29
Figure 7 – Spectre retenu - Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site. Amortissements : 2, 5, 10 et 20 %	30
Figure 8 – Spectre retenu - Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site en accélération en fonction de la période, amortissement 5%.	31
Figure 9 – Profil de vitesse des ondes de cisaillement obtenu le long du profil 1.....	39
Figure 10 – Profil de vitesse des ondes de cisaillement obtenu le long du profil 2.....	39
Figure 11 – résultats des mesures H/V réalisées sur le site du futur lycée de Dembéli.....	45
Figure 12 – Valeurs des fréquences de résonance f_0 mesurées par H/V sur le site.....	46
Figure 13 – Emplacement des reconnaissances	49

Liste des tableaux

Tableau 1 – Séisme de référence retenu pour l'étude de l'aléa sismique sur le 2 ^{ème} site envisagé pour l'implantation du lycée de Dembéli sur l'île de Mayotte.....	15
Tableau 2 – Valeurs de A, V et D du spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant.....	16
Tableau 3 – Propriétés de la colonne de sol retenue.....	22
Tableau 4 – Caractéristiques des séismes correspondant aux accélérogrammes réels choisis pour le calcul des spectres tenant compte des effets de site.....	25
Tableau 5 – Spectre retenu (source lointaine) - Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site. Valeurs de A, V et D.	31
Tableau 6 – Interprétation des mesures H/V.....	46

Liste des annexes

Annexe 1 Détail de la méthode SASW	37
Annexe 2 Résultats des mesures H/V in situ	41
Annexe 3 Emplacement et résultat des essais pressiométriques	47

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). Un premier site a déjà fait l'objet d'une étude d'aléa sismique par le BRGM en 2006 (*Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Futur lycée de Dombéni (Mayotte). Rey et al., 2006*). La présente étude concerne un deuxième site proposé pour le projet de lycée à proximité de Dombéni. La DE a souhaité obtenir un spectre de réponse élastique utilisable pour l'ensemble de son projet, localisé par un rectangle rouge sur la Figure 1. Ce spectre permettra de dimensionner le projet en intégrant la prise en compte de l'aléa sismique régional et local.

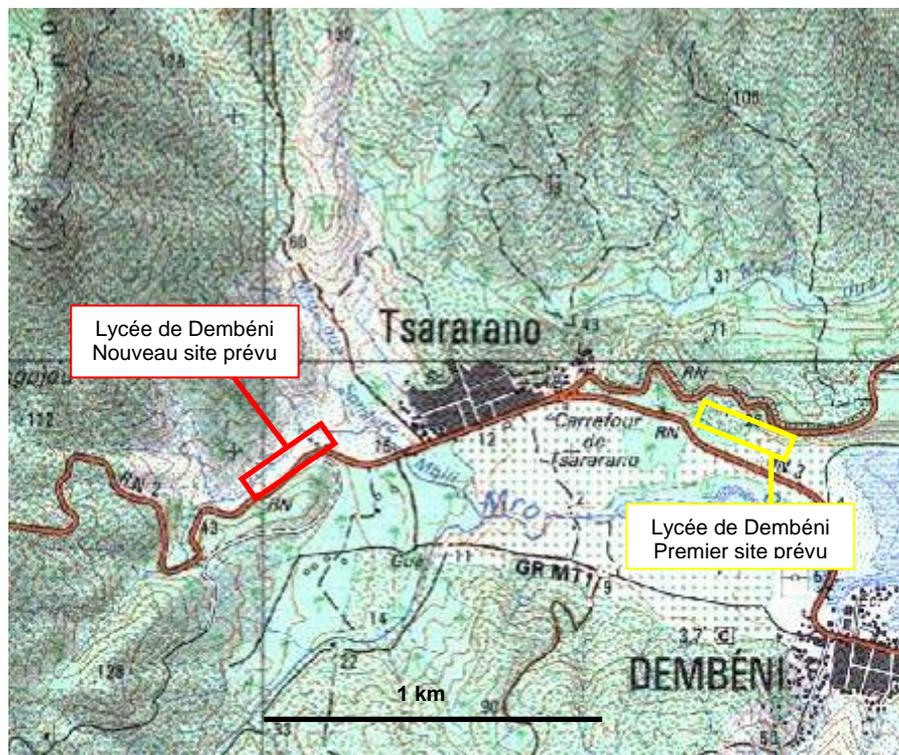


Figure 1 – Localisation du projet de construction du lycée de Dombéni (polygone rouge) : nouveau site prévu à Tsararano. Extrait de la carte IGN 4410 Sud au 1/25000^{ème}.

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.

Au vu des courbes de niveaux présentées sur les figures Figure 1 et Figure 13, et des observations menées sur le terrain à l'occasion des mesures géophysiques, on note la présence d'une butte dans la partie Nord du site (emplacement du sondage SP3). Il conviendrait ainsi de vérifier la possibilité d'un effet de site topographique au niveau du site. En effet, les possibilités d'effets de site topographiques, de ruptures en surface de faille active, de liquéfaction, de mouvements de terrain induits par le séisme n'ont pas été étudiés dans la présente étude.

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 l'annexe de l'article R563-4 du code de l'environnement). Toutefois, Mayotte se trouve en zone d'aléa sismique modéré selon la carte d'aléa sismique du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du territoire (MEEDDAT). De plus, elle 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 ;
- en 2006, par Rey J., Roullé A., De Martin F., Audru J.-C., Miehé J.-M., Nédellec J.-L., Eucher G., Bitri A. - Etude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Futur lycée de Dombéni (Mayotte). Rapport BRGM/RP-544767-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 2^{ème} site envisagé pour l'implantation du lycée de Dombéni sur l'île de Mayotte.

3.2. CALCUL DES MOUVEMENTS SISMQUES 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.

Les spectres de référence finalement retenus sont présentés, pour les amortissements 2, 5, 10 et 20 %, sur la Figure 2 et dans le Tableau 2.

Pour les amortissements différents de 5 %, nous avons pris en compte les préconisations de la réglementation européenne Eurocode 8 (NF-En-1998-1, 2005).

Pour les fréquences inférieures à celle marquant la fin du plateau en accélération :

$$v(\xi) = v(5\%) \cdot \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}}$$

avec $v(\xi)$ la valeur de la pseudo-vitesse pour un amortissement de ξ %.

Au-delà, on procède à une interpolation logarithmique entre la valeur obtenue en fin de plateau et la valeur de l'accélération horizontale maximale du sol (PGA : Peak Ground Acceleration) qui reste inchangée quel que soit l'amortissement.

Enfin, conformément aux règles de construction parasismique PS 92 (AFNOR, 1995), on adopte pour les spectres verticaux un coefficient multiplicateur égal à 0,7 par rapport aux spectres horizontaux.

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

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

F (Hz)	Amortissement (%)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
0.1	2	0.0007	1.03	1.64
	5	0.0006	0.86	1.37
	10	0.0004	0.70	1.12
	20	0.0003	0.54	0.87
1.57	2	0.16	16.14	1.64
	5	0.14	13.50	1.37
	10	0.11	11.02	1.12
	20	0.09	8.54	0.87
4.5	2	0.47	16.14	0.57
	5	0.39	13.50	0.48
	10	0.32	11.02	0.39
	20	0.25	8.54	0.30
10.1	2	0.46	7.17	0.11
	5	0.39	6.00	0.09
	10	0.32	4.90	0.08
	20	0.25	3.79	0.06
38	tous amortissements	0.15	0.62	0.003
100	tous amortissements	0.15	0.23	0.0004

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

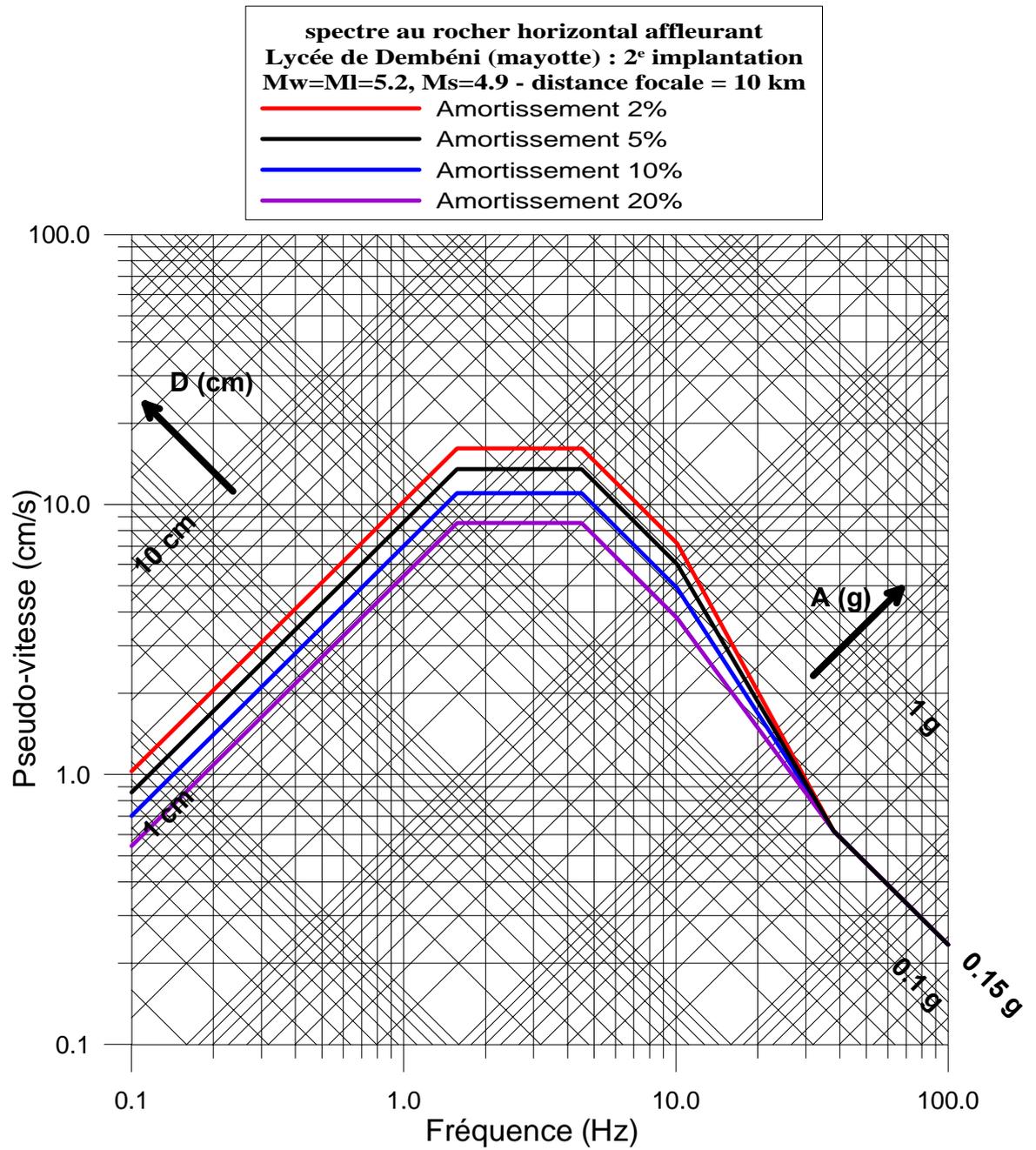


Figure 2 – Spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant. Amortissements : 2, 5, 10 et 20 %.

4. Synthèse géologique et géotechnique

4.1. PREAMBULE

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

4.2. DOCUMENTS DE REFERENCES

Pour mener à bien notre étude, nous avons eu à notre disposition :

- les rapports d'essais de 5 sondages pressiométriques réalisés au mois d'août 2007 ;
- les rapports de mesures en laboratoire réalisées en avril 2008 ;
- les résultats des mesures H/V et SASW réalisées par le BRGM sur site au cours du mois de janvier 2008 ;
- la carte géologique de Mayotte au 1/50 000 ;
- le rapport établi dans le cadre de l'étude de l'aléa sismique sur le premier site retenu pour ce lycée (Rey *et al.*, 2006), ainsi que les résultats des essais in situ et en laboratoire réalisés sur ce premier site.

4.3. DONNEES

4.3.1. Contexte géologique

Le nouveau projet se situe au bord de la RN2, en amont du carrefour de Tsararano et en aval d'Ongojou. Le site est situé en fond d'estuaire, sur les rives de la rivière Mro Oua Dombéni.

D'après la carte géologique, le sous-sol du site est constitué principalement de formations de rivières.

D'après la carte géologique et le rapport BRGM de Rey *et al.* (2006), le sous-sol de ce nouveau site diffère de celui de l'ancien site retenu (installé sur des alluvions fines de la plaine alluviale).

4.3.2. Contexte géotechnique et géophysique

Les données disponibles pour ce site sont :

- Une campagne de 5 sondages avec essais pressiométriques tous les mètres, arrêtés entre 18 et 20 m ou avant si refus sur compacité ;
- Des essais de laboratoire (analyse granulométrique, limites d'Atterberg, teneur en eau et poids volumiques) sur 10 échantillons (tranches de 1,5 m à 3 m) ;
- 2 profils de SASW réalisés par le BRGM, fournissant des mesures de vitesses d'ondes de cisaillement V_s ;
- 14 mesures H/V réalisées par le BRGM sur le site.

La position de ces données sur le site ainsi que les résultats des essais pressiométriques sont présentés en Annexe 3.

4.4. CARACTERISATION DES UNITES GEOMECHANQUES

Les données révèlent trois zones :

- l'extrémité nord du site se trouve sur une colline. Les profils SASW montrent que cette colline est constituée d'une surépaisseur de terrains à faible vitesse de cisaillement V_s (150 m/s). Cette surépaisseur étant localisée dans une pente et sur une faible surface, elle ne fera pas l'objet d'une colonne de sol particulière,
- dans la partie est du site, le sondage SP1 indique un refus sur bloc à 2,5 m de profondeur, indiquant une présence localisée de blocs de roche saine. Cependant, les mesures H/V et SASW réalisées à proximité ne montrent pas de changement notable de lithologie et/ou de vitesses des ondes de cisaillement à cette profondeur. Par conséquent, on attribue ce refus à un état très local de compactage des argiles : il ne sera pas fait de colonne de sol particulière dans ce cas.
- enfin, le reste du site peut être considéré dans sa majorité comme homogène du point de vue géologique et géotechnique. Les caractéristiques de ces terrains sont détaillées ci-après.

Les logs des sondages pressiométriques font état d'une seule formation lithologique d'argiles compactes sur les 20 m que comptent les forages les plus profonds. Néanmoins, les 2 forages supplémentaires, réalisés à des fins de prélèvements d'échantillons, affinent ces logs en précisant la présence de boues entre 9 et 10,5 m de profondeur, ainsi qu'un changement de lithologie entre 10,5 et 12 m.

Les essais pressiométriques donnent des valeurs de modules pressiométriques E_m variant de 5,2 à 187,5 MPa, et des pressions limites p_l comprise entre 0,25 et 1,7 MPa.

Seule une unique mesure donne une valeur de p_i supérieure à 2 MPa à 18 m de profondeur : valeur associée à une faible valeur de $E_m = 11,6$ MPa. Ces sols correspondent donc, suivant les règles PS92, à des sols de résistance mécanique moyenne à bonne. Les mesures ne montrent pas d'augmentation nette des caractéristiques mécaniques avec la profondeur. Le changement de lithologie observé sur certains sondages n'entraîne pas de variation nette des caractéristiques pressiométriques.

Les essais en laboratoire montrent des valeurs proches pour les terrains jusqu'à 10,5 m de profondeur. Le changement de lithologie observé entre 10,5 et 12 m de profondeur se traduit par une diminution des valeurs de limites de liquidité et de plasticité, ainsi que par une augmentation de l'indice de plasticité.

Les 2 profils de mesures SASW montrent une répartition quasi-horizontale des terrains de même vitesse de cisaillement V_s . Le substratum sismique ($V_s = 800$ m/s) n'est que rarement observé, vers 50 m de profondeur.

Les résultats des mesures H/V donnent une fréquence de résonance comprise entre 2,4 et 3,8 Hz, sans répartition géographique claire (voir Figure 12 en Annexe 2).

4.5. HYDROGEOLOGIE

Les forages ont mis en évidence des niveaux d'eau variant entre 1,8 et 5,3 m de profondeur dans les sondages au niveau de la partie plane du site, et une profondeur de 9,1 m (6,35 m après le forage) sur le forage SP3 situé plus en hauteur.

4.6. ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS

Afin de calculer le spectre de réponse tenant compte des conditions de site, il convient de définir la colonne de sol représentative du terrain en place. Cette colonne de sol doit intégrer plusieurs types de paramètres :

- la lithologie des horizons (sols cohérents, sols frottants ou rocher) ;
- la stratigraphie (séquence, épaisseur) ;
- la présence d'une nappe ;
- 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 $G(\gamma)/G_{max}$ et $D(\gamma)$ sont des caractéristiques dynamiques des sols, nécessaires à la simulation du comportement d'une colonne de sol sous une sollicitation sismique. Les courbes $G(\gamma)/G_{max}$ et $D(\gamma)$ 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 $G(\gamma)/G_{max}$ et $D(\gamma)$ utilisées sont issues de la littérature (Darendeli, 2001).

Compte tenu de l'analyse des données disponibles au niveau du site, les points suivants ont pu être établis :

- les argiles proches de la surface, compactes et sèches, s'étendent jusqu'à 11 m de profondeur ;
- sous cette couche, on trouve des argiles très compactes, mélangées à de la boue ; par manque d'information, on considère que cette couche s'étend jusqu'au substratum, avec les mêmes valeurs de limite d'Atterberg, mais avec des valeurs croissantes de vitesses V_s ;
- au vu de l'évolution des vitesses V_s avec la profondeur, le substratum sismique ($V_s=800\text{m/s}$) est établi à 60 m de profondeur.

La colonne de sol décrite ci-dessous a ainsi été définie.

Profondeur	Formation	Epaisseur colonne (m)	V_s (m/s)	ρ (kg/m³)
0 - 11 m	Argiles sèches	11	200	1700
11 - 20 m	Argiles + boue	9	350	1700
20 - 30 m	Argiles + boue	10	450	1800
30 - 40 m	Argiles + boue	10	600	1800
40 - 60 m	Argiles + boue	10	700	1800
> 60 m	Substratum	infini	800	2100

Tableau 3 – Propriétés de la colonne de sol retenue.

5. Détermination du spectre tenant compte des conditions de site

5.1. MÉTHODOLOGIE

Lorsque les conditions de site sont différentes des conditions au rocher, il convient de les prendre en compte dans le calcul du mouvement sismique en surface afin d'estimer les modifications possibles du signal sismique par rapport à celui au rocher considéré comme référence. Pour cela, il convient tout d'abord de choisir des signaux sismiques représentatifs du spectre retenu au rocher puis, après une étude géotechnique du site, de définir la (ou les) colonne(s) de sol représentant les conditions de site. Une fois la colonne de sol établie, nous pouvons calculer numériquement le mouvement tenant compte des conditions de site à partir du signal au rocher et des caractéristiques géologiques et géotechniques de cette colonne de sol.

5.2. MÉTHODES NUMÉRIQUES

Elles dépendent du type de comportement pris en compte pour le sol : linéaire, linéaire équivalent, non linéaire.

Pour la présente étude, nous avons utilisé un modèle de sol linéaire équivalent.

Concernant ce modèle linéaire équivalent, 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), avec le modèle linéaire équivalent, pour calculer sa réponse à une sollicitation sismique au rocher.

On applique comme mouvement au substratum différents accélérogrammes (réels ou réels modifiés) ayant une réponse spectrale proche du spectre spécifique au rocher retenu dans le cadre de l'étude pour calculer les accélérogrammes résultant de l'amplification du signal par la colonne de sol.

5.3. CHOIX DES MOUVEMENTS SISMQUES AU ROCHER POUR L'ANALYSE DES EFFETS DE SITE

5.3.1. Choix des accélérogrammes

Nous avons recherché, dans les bases de données mondiales, deux accélérogrammes réels issus de séismes ayant des caractéristiques proches du séisme de référence retenu dans le cadre de la présente étude. Les caractéristiques des séismes réels ainsi retenus sont décrites dans le Tableau 4.

Remarque : la recherche de signaux réels consiste à sélectionner des signaux dans une base de données européenne de mouvements forts. Les accélérogrammes sont choisis selon les critères suivants ($M=M_s, M_w$; $d= d_{\text{focale}}, d_{\text{épicentrale}}$) :

- magnitude telle que $M_{\text{séisme cible}} - 0.5 < M < M_{\text{séisme cible}} + 0.5$;
- distance telle que $d_{\text{séisme cible}} / 2 < d < d_{\text{séisme cible}} * 2$;
- PGA le plus proche possible du PGA du « séisme cible » ;
- spectre de réponse le plus proche possible du spectre du « séisme cible ».

Dans le cas présent du séisme de référence retenu ($M = 5,2$, $d_{\text{focale}} = 10$ km, $\text{PGA} = 0.15$ g), les critères retenus étaient ainsi :

- $4,7 < M < 5,7$;
- $5 \text{ km} < d_{\text{focale}} < 20 \text{ km}$.

En complément de ces accélérogrammes, deux accélérogrammes naturels ont été modifiés à l'aide du logiciel RspMatch 2005 (Hancock *et al.*, 2006).

Pour cela, nous avons tout d'abord réitéré la recherche précédente de manière à extraire deux nouveaux accélérogrammes naturels. Le logiciel RspMatch 2005 procède ensuite à leur modification pour que leurs spectres de réponse soient compatibles avec le spectre cible obtenu au rocher horizontal affleurant.

Cette méthode basée sur les travaux de Lilhanand et Tseng (1988) permet, dans la plupart des cas, de préserver le caractère non-stationnaire de l'accélérogramme de référence. Elle consiste à ajuster l'accélérogramme dans le domaine temporel en lui ajoutant des ondelettes de manière à ce que le spectre ainsi calculé respecte le spectre cible pour toute la gamme de fréquence considérée en maintenant des séries temporelles réalistes en vitesse et en déplacement.

Les accélérogrammes naturels modifiés déterminés grâce à RspMatch 2005 sont présentés sur la Figure 4.

	Date	Heure	Séisme	Mw	df (km)	Station	PGA (g)	Durée (s)
1	16/09/1977	23 : 48	Friuli (réplique) Italie	5.4	12	Somplago Centrale – Uscita Galleria	0.12	2
2	07/11/1999	16 : 55	Izmit Turquie	5.0	10	LDEO Station NOC1061	0.05	5

Tableau 4 – Caractéristiques des séismes correspondant aux accélérogrammes réels choisis pour le calcul des spectres tenant compte des effets de site.

Les accélérogrammes naturels sont ensuite normalisés par rapport au PGA « cible » donné par le spectre de réponse au rocher et pour le séisme (0.15 g). Ces accélérogrammes sont représentés sur la Figure 3.

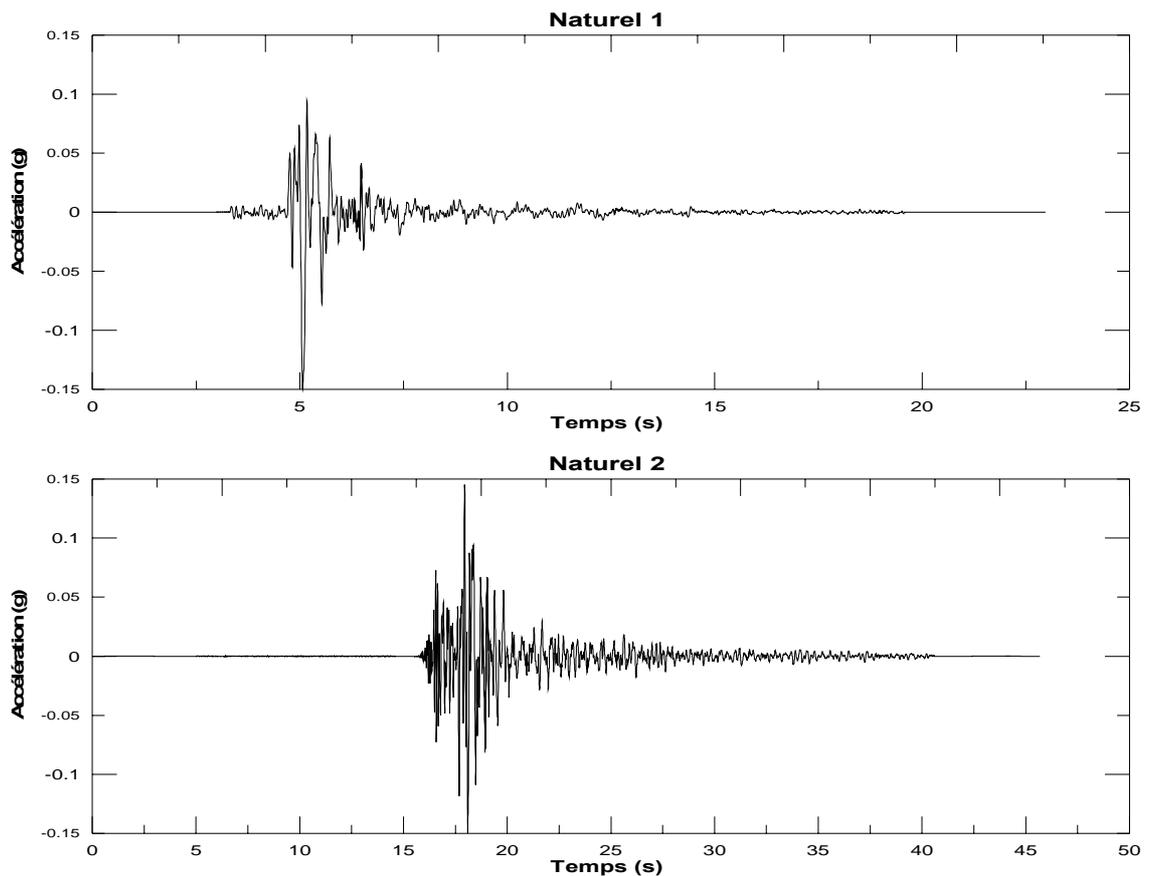


Figure 3 – Accélérogrammes naturels sélectionnés et normalisés par rapport au PGA « cible ».

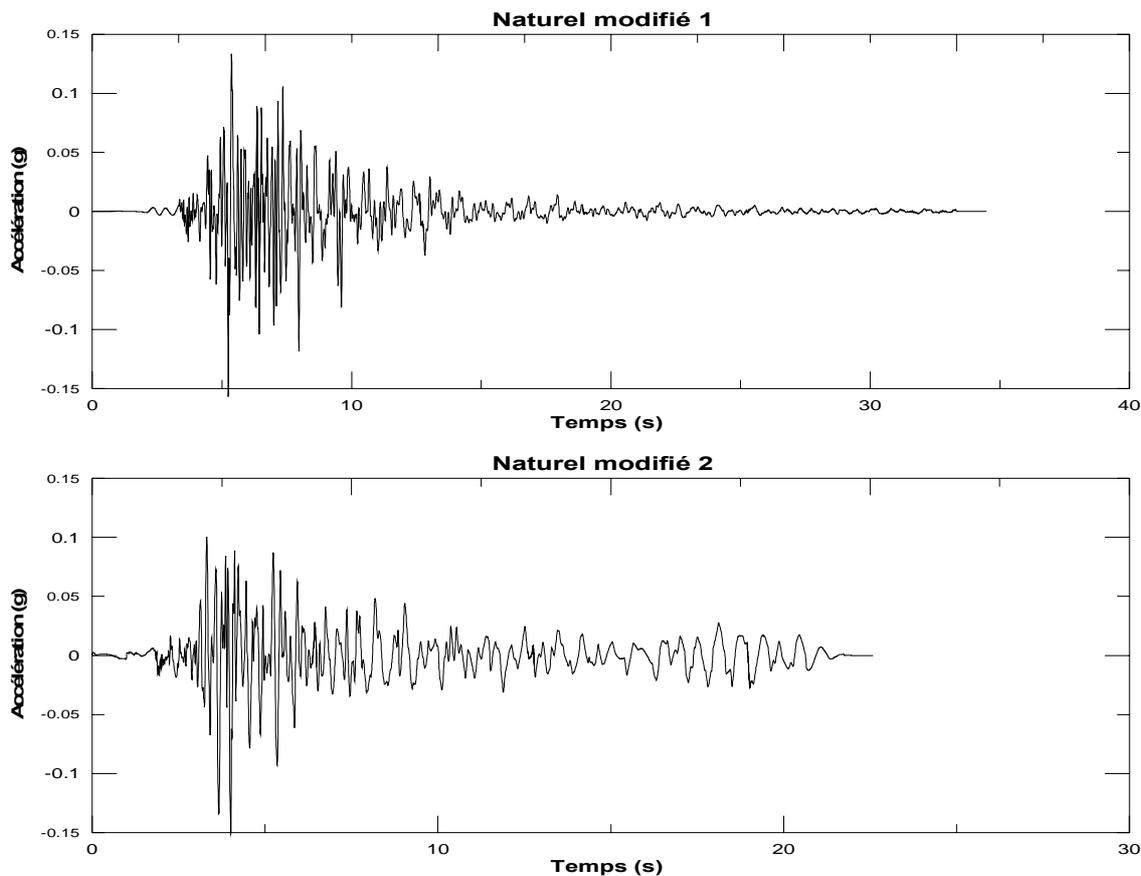


Figure 4 – Accélérogrammes naturels modifiés correspondant au spectre au rocher.

5.3.2. Comparaison avec le spectre au rocher horizontal affleurant

Les spectres de réponse des deux accélérogrammes réels et des deux accélérogrammes réels modifiés sont comparés sur la Figure 5, avec le spectre de réponse « cible », spectre de réponse au rocher horizontal affleurant.

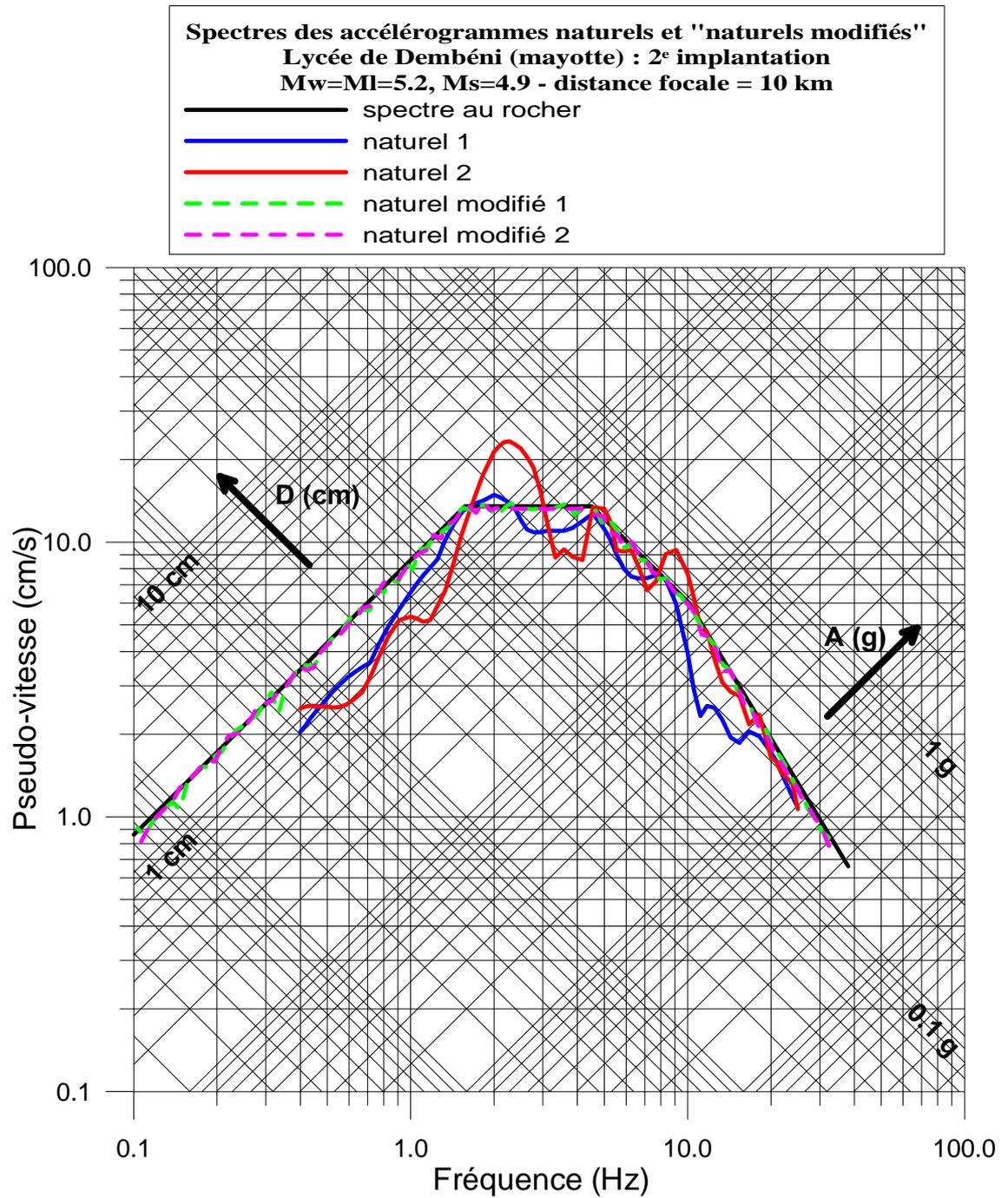


Figure 5 – Comparaison des spectres en vitesse des accélérogrammes réels et synthétiques avec le spectre au rocher.

5.4. ESTIMATION DU SPECTRE DE REPONSE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE

L'ensemble des calculs de la réponse spectrale de la colonne considérée ont été réalisés selon la méthodologie linéaire-équivalent avec le logiciel CyberQuake.

Ainsi, un spectre de réponse est calculé pour chaque accélérogramme réel et réel modifié (Figure 6). On peut alors définir, à partir des spectres de réponse des différents accélérogrammes, un spectre de réponse prenant en compte l'amplification du mouvement sismique au rocher due aux effets de site lithologiques.

Une fois obtenu le spectre de réponse élastique tenant compte des effets de site pour un amortissement de 5 %, on peut estimer les spectres de réponse correspondant aux amortissements 2, 10 et 20 % en utilisant la même méthode que pour les spectres de référence au rocher. Ces spectres sont représentés sur la Figure 7.

Les valeurs du spectre tenant compte des effets de site lithologiques sont données dans le Tableau 5.

Le spectre final retenu est représenté sur la Figure 7 sous forme de la pseudo-vitesse (en cm/s) en fonction de la fréquence (en Hz). Il peut également être représenté comme l'accélération spectrale (en g) en fonction de la période T (en s), sur la Figure 8.

La forme analytique des différents domaines du spectre en accélération est indiquée ci-dessous :

$$a_1 = 0,241 \qquad a_2 = 0,060$$
$$g_1(T) = \frac{10^{(2,89+1,77 \cdot \log_{10} T)}}{156,13 \cdot T} \qquad g_2(T) = \frac{10^{(1,10-1,58 \cdot \log_{10} T)}}{156,13 \cdot T}$$

avec : T , la période (en secondes).

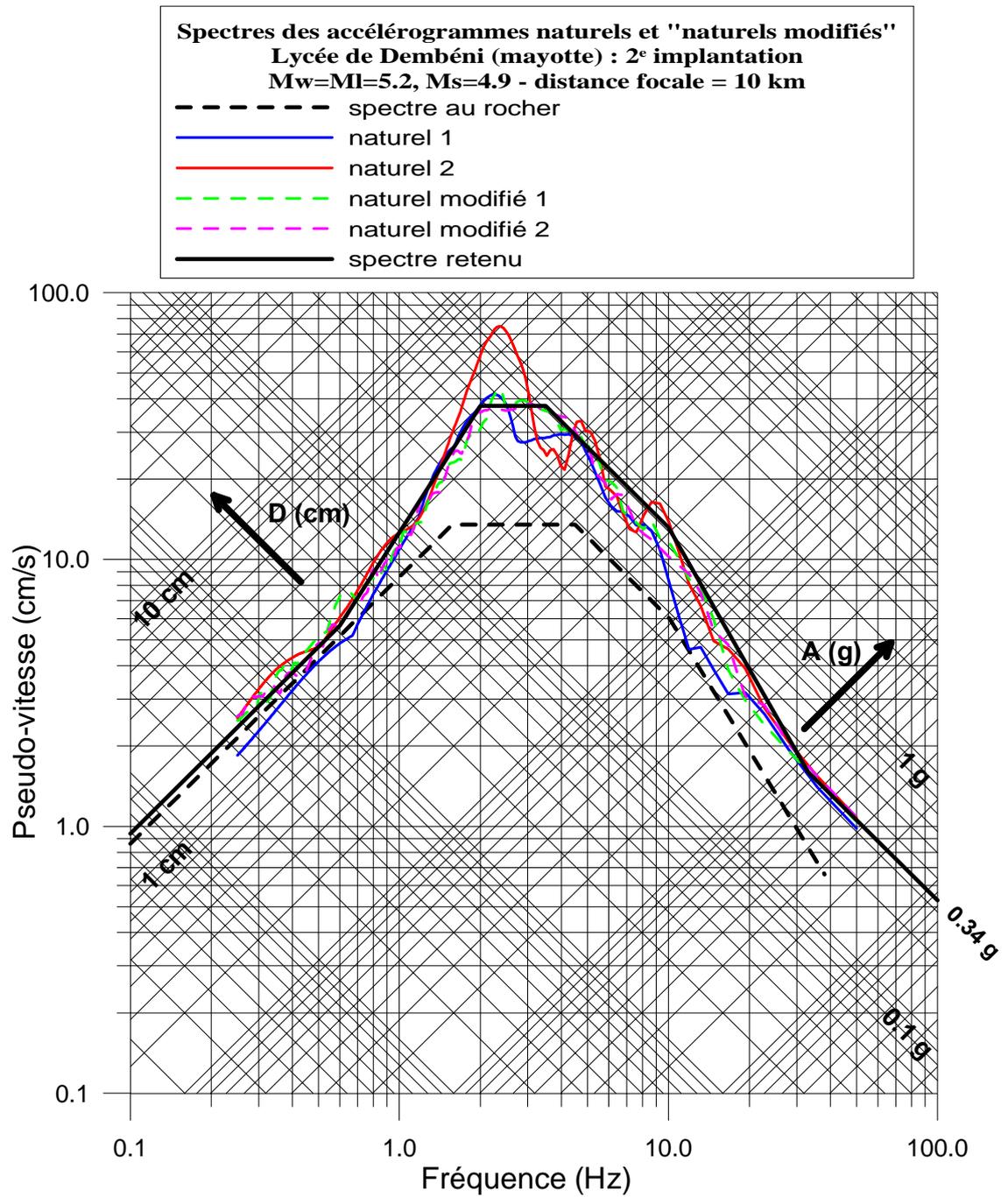


Figure 6 – Spectres de réponse à 5 % des accélérogrammes synthétiques et réels tenant compte des effets de site.

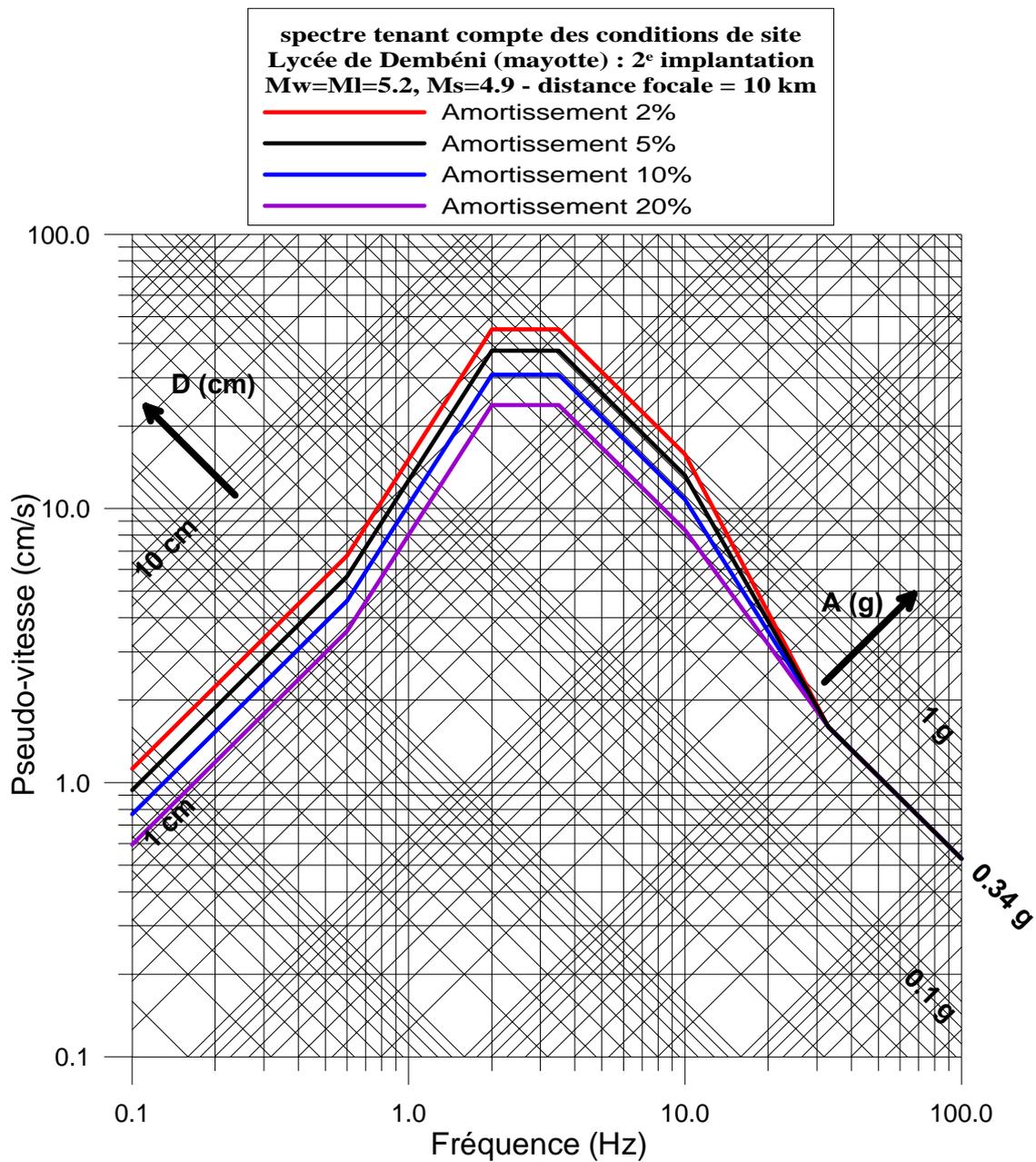


Figure 7 – Spectre retenu - Spectre de réponse élastique horizontale avec prise en compte des effets de site. Amortissements : 2, 5, 10 et 20 %.

F (Hz)	Amortissement (%)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
0.1	2	0.001	1.12	1.79
	5	0.001	0.94	1.50
	10	0.0005	0.77	1.22
	20	0.0004	0.59	0.95
0.6	2	0.03	6.74	1.79
	5	0.02	5.64	1.50
	10	0.02	4.61	1.22
	20	0.01	3.57	0.95
2	2	0.58	45.05	3.59
	5	0.48	37.69	3.00
	10	0.39	30.78	2.45
	20	0.31	23.84	1.90
3.5	2	1.01	45.05	2.05
	5	0.85	37.69	1.71
	10	0.69	30.78	1.40
	20	0.53	23.84	1.08
10	2	1.01	15.77	0.25
	5	0.85	13.19	0.21
	10	0.69	10.77	0.17
	20	0.53	8.34	0.13
33	tous amortissements	0.34	1.60	0.008
100	tous amortissements	0.34	0.53	0.0008

Tableau 5 – Spectre retenu (source lointaine) - Spectre de réponse élastique horizontale avec prise en compte des effets de site. Valeurs de A, V et D.

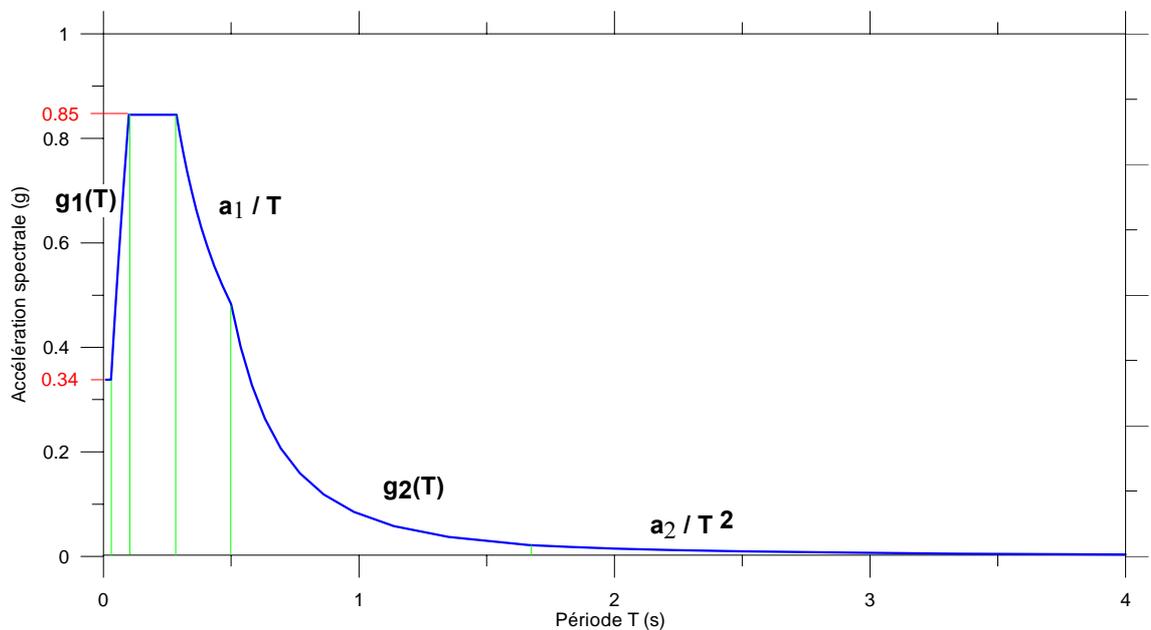


Figure 8 – Spectre retenu - Spectre de réponse élastique horizontale avec prise en compte des effets de site en accélération en fonction de la période, amortissement 5%.

6. Conclusion

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 Figure 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 une colonne de sol caractéristique 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). Il est représenté sur la Figure 7 et sur la Figure 8, et ses valeurs sont reportées dans le Tableau 5.

L'accélération horizontale maximale du sol tenant compte des conditions de site pour le futur lycée de Dombéni est de 0.34 g (soit 3.3 m/s²).

Il conviendrait enfin de vérifier la possibilité d'un effet de site topographique au niveau du site. En effet, la possibilité **d'effets de site topographiques**, de **ruptures en surface de faille active**, de **liquéfaction**, de **mouvements de terrain induits** par le séisme **n'a pas été traitée** dans la présente étude.

7. Références bibliographiques

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"

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.

Hancock J., Watson-Lamprey J., Abrahamson N.A., Bommer J.J., Markatis A., McCoy E., Rishmilla M. (2006) – An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets. *Journal of Earthquake Engineering*, 10, Special Issue 1, 67-89.

Kokusho T. (1980) – Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range, *Soils and Foundations*, Vol. 20 (4), p. 45-60.

Lilhanand, K. and W. S. Tseng (1988) - Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple damping response spectra, Ninth World Conf. Earth. Engin., Tokyo, Japan, Vol II, 819-824.

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.

NF En 1998-1 (2005) - Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments (P06-030-1), AFNOR.

Nogoshi M., and T. Igarashi (1971). On the propagation characteristics of microtremors. Jour. Seism. Soc. Japan, Vol 23, p. 264-280.

Rey J., Roullé A., De Martin F., Audru J.C., Miehe J.M., Nédellec J.L., Euchet G. et Bitri A. (2006) Etude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Futur lycée de Dombéni (Mayotte). Rapport BRGM/RP-54467-FR, 45 p., 9 illust., 9 tabl., 2 annexes.

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. Rançon (2002) – Microzonage sismique de Mamoudzou-Centre, île de Mayotte. Rapport BRGM/RP-51839-FR – 2002 Mayotte 05.

Terrier M., Audru J.C., Bour M., Dominique P. (2000). Etude de l'aléa sismique régional de l'île de Mayotte ; détermination des mouvements sismiques de référence. Rapport BRGM RP-50250-FR.

Annexe 1

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 à priori dans le but de retrouver le profil vertical de vitesse des ondes S.

La méthode expérimentale SASW, permet ainsi de mesurer des profils de vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le sol et par conséquent de déterminer le type de sol. Les résultats obtenus pour les deux profils sont représentés sur la Figure 9 et sur la Figure 10.

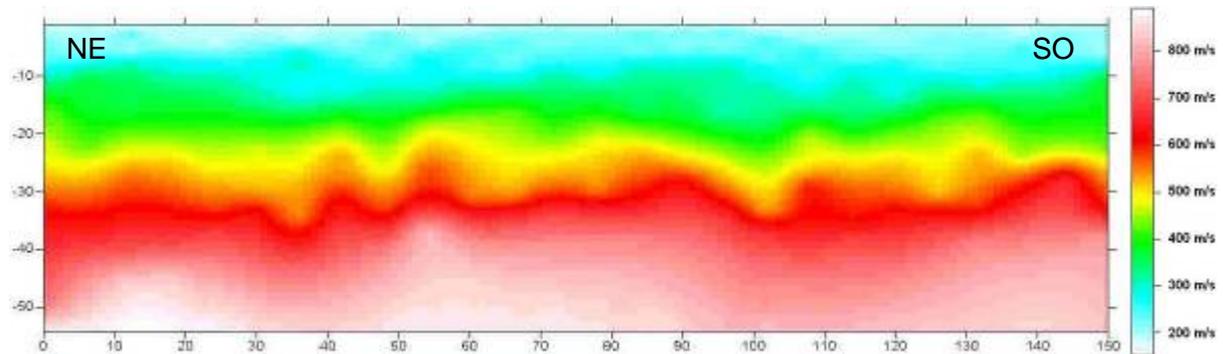


Figure 9 – Profil de vitesse des ondes de cisaillement obtenu le long du profil 1.

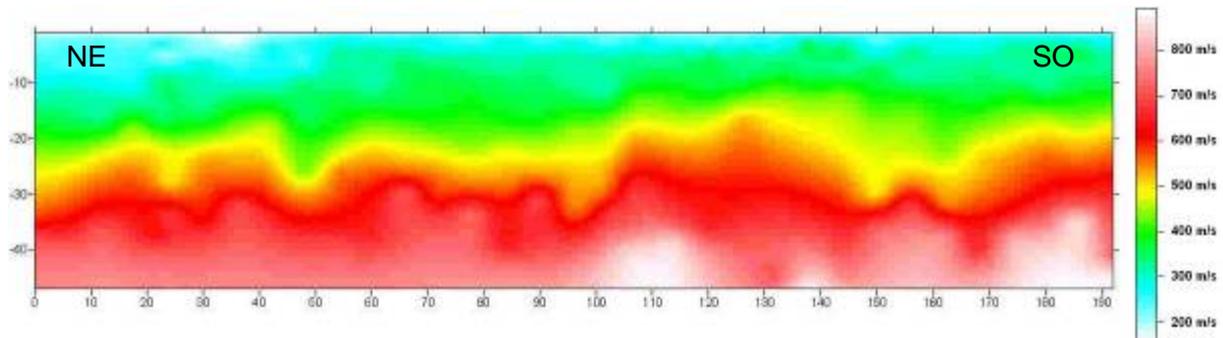


Figure 10 – Profil de vitesse des ondes de cisaillement obtenu le long du profil 2.

Annexe 2

Résultats des mesures H/V in situ

De nombreuses techniques théoriques, numériques ou instrumentales ont été développées pour estimer les effets de site lithologiques (Sabourault, 1999). Les techniques expérimentales font généralement appel à un site de référence, c'est-à-dire un site rocheux n'amplifiant pas le mouvement sismique. Ce site rocheux n'est pas toujours présent sur les zones d'études, ce qui peut engendrer des erreurs dans les estimations des effets de site. C'est pourquoi, des techniques plus récentes, ne faisant pas intervenir de site de référence, ont été mises au point. L'une de ces techniques consiste, à partir de l'enregistrement du bruit de fond ambiant, à calculer le rapport spectral entre les composantes horizontales et la composante verticale : c'est la méthode appelée couramment H/V (Nogoshi, 1971, Nakamura, 1989 et 1996). Le dispositif expérimental est constitué d'un sismomètre trois composantes et d'une station d'acquisition. Les principes physiques sous tendus par cette méthode ne sont actuellement pas tous bien cernés. Cependant, de nombreuses expériences ont comparé cette méthode avec des méthodes classiques et ont montré sa capacité à évaluer les effets de site. L'explication la plus communément admise est la suivante : soit un modèle très simple constitué d'une couche meuble (souvent sédimentaire) surmontant un demi-espace homogène. Le bruit de fond est engendré par des sources proches comme le trafic urbain et donc composé d'ondes de surface. Seules les composantes horizontales sont amplifiées par les réflexions sur les interfaces des couches sous-jacentes. La composante verticale du bruit de fond contient, elle, la signature des sources de bruit. On suppose également que la base de la couche sédimentaire n'est pas affectée par les ondes de surface.

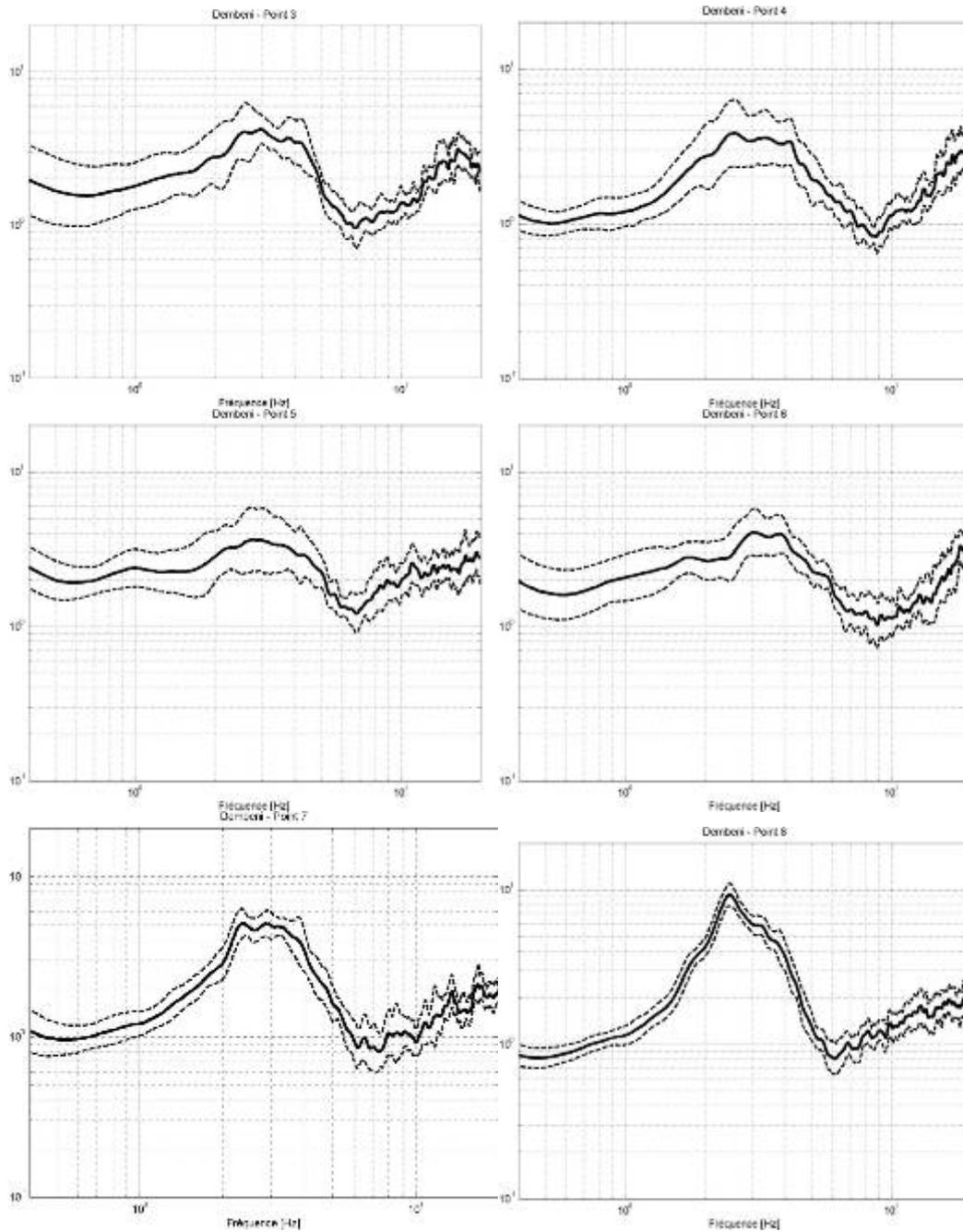
Pour obtenir une pseudo-fonction de transfert à l'aide du bruit de fond, en s'affranchissant de l'effet de source, on divise donc le spectre d'une composante horizontale par le spectre de la composante verticale (d'où l'appellation H/V). Ce rapport donne avec une bonne précision la fréquence de résonance fondamentale du site, mais également une amplification spectrale relative qui dépend notamment du mode de traitement du signal. Les différentes amplifications relatives peuvent être comparées entre elles à condition d'avoir été établies avec les mêmes traitements.

En définitive, la réalisation d'une campagne de mesures ponctuelles H/V permet en première approche de déterminer en chaque point de mesure la fréquence propre du sol.

Lorsque la géométrie du site peut être assimilée à un milieu mono dimensionnel, on peut relier l'épaisseur d'une couche sédimentaire meuble (ayant un fort contraste d'impédance avec le substratum rocheux) à sa fréquence de résonance fondamentale f_0 par l'expression : $f_0 = V_s / 4 H$ (H : épaisseur moyenne de la couche meuble, V_s vitesse moyenne de propagation des ondes S dans la couche meuble, f_0 : fréquence de résonance fondamentale de la couche meuble).

La connaissance de deux paramètres permet donc d'estimer le troisième (V_s et f_0 connues donnent H par exemple) (Sabourault et Bitri, 2001).

Interprétation des mesures



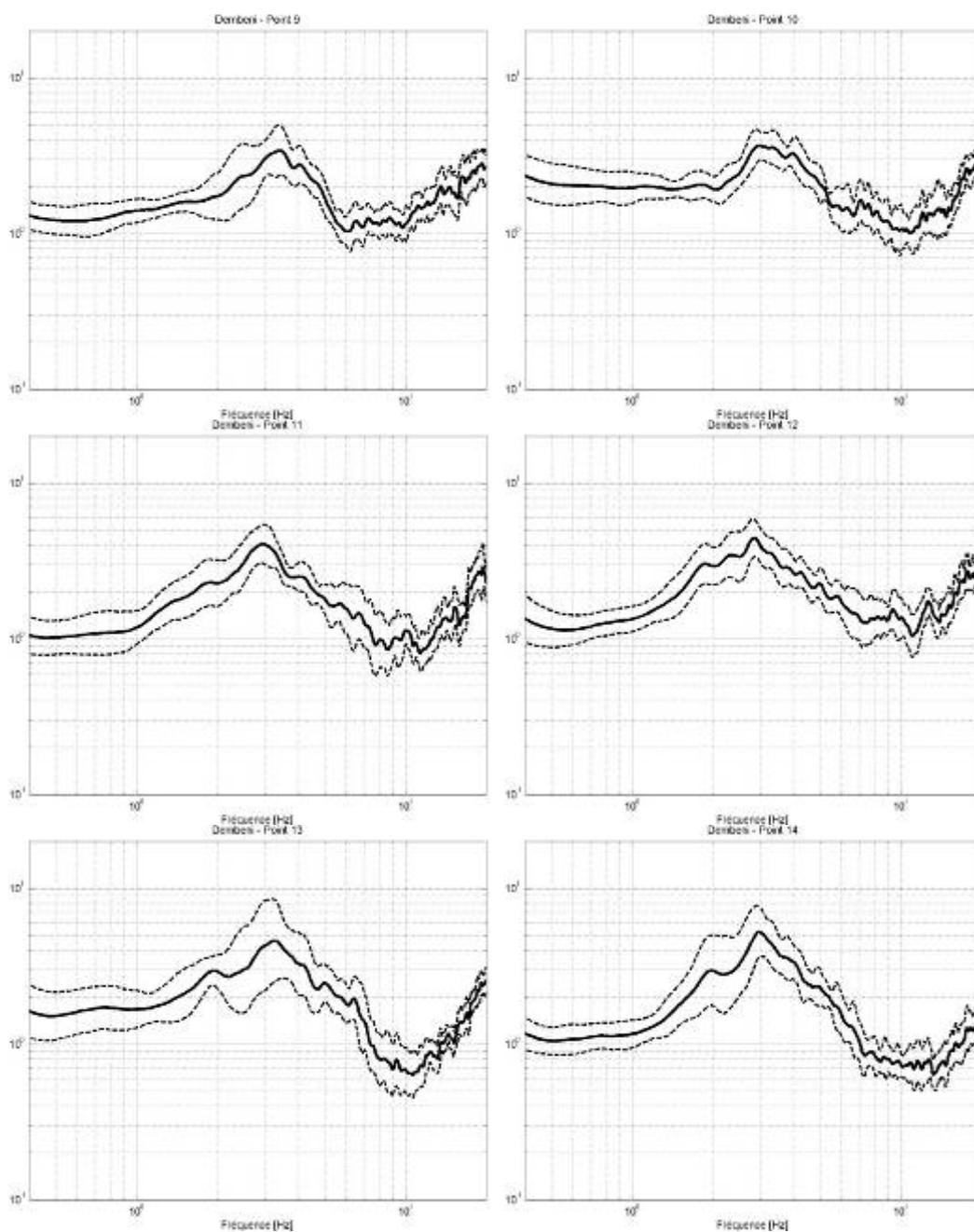


Figure 11 – résultats des mesures H/V réalisées sur le site du futur lycée de Dombéni.

N° du point de mesure	Qualité	Fréquence de résonance
1	Saturé	Non interprétable
2	Bruité	Non interprétable
3	Bruité	2.6 à 2.9 Hz ?
4	OK	2.6 Hz
5	Saturé et bruité	Non interprétable
6	Bruité	3 à 3.8 Hz ?
7	OK	2.4 à 2.8 Hz
8	OK (très bon)	2.5 Hz
9	OK	3.4 Hz
10	OK	3.0 Hz
11	OK	2.9 Hz
12	OK	2.8 Hz
13	Assez bruité	3.2 Hz ?
14	OK	3.0 Hz

Tableau 6 – Interprétation des mesures H/V.

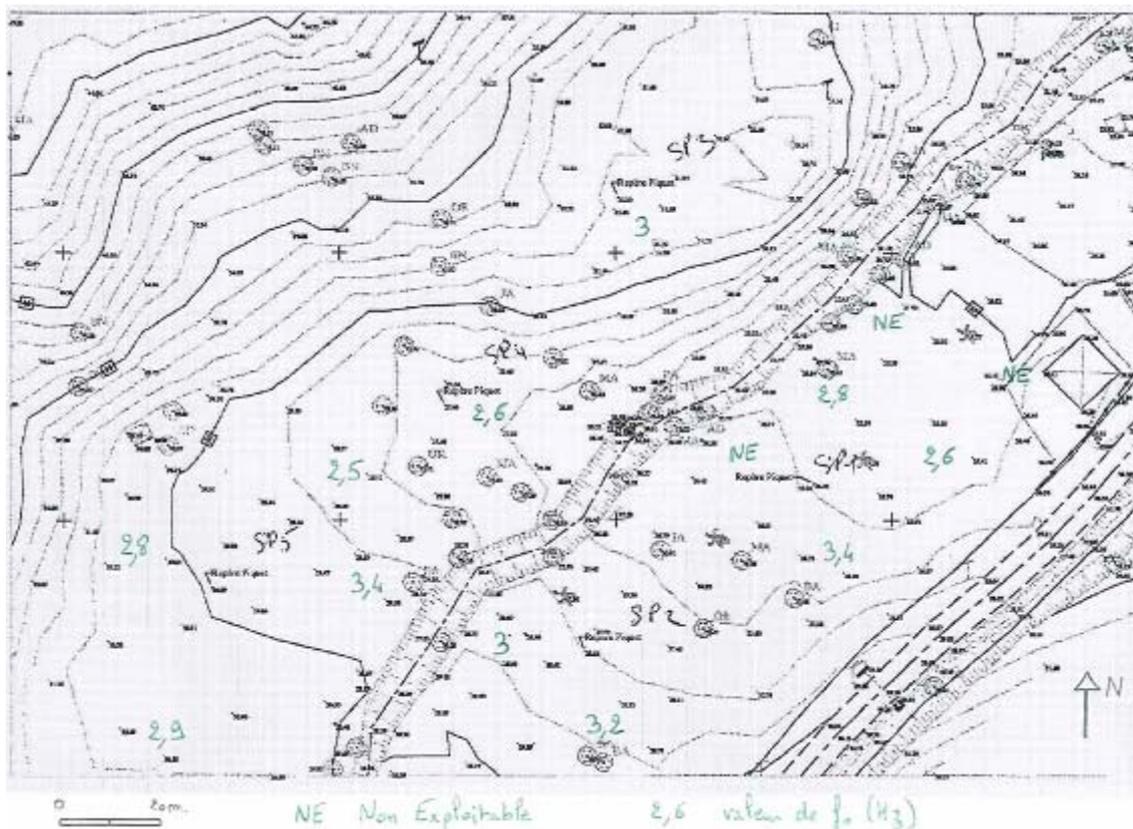


Figure 12 – Valeurs des fréquences de résonance f_0 mesurées par H/V sur le site

Les résultats ne sont pas très homogènes d'un site de mesure à l'autre (Figure 11, Figure 12 et Tableau 6). Cependant, on observe de manière générale une fréquence de résonance autour de 3 Hz.

Annexe 3

Emplacement et résultat des essais pressiométriques

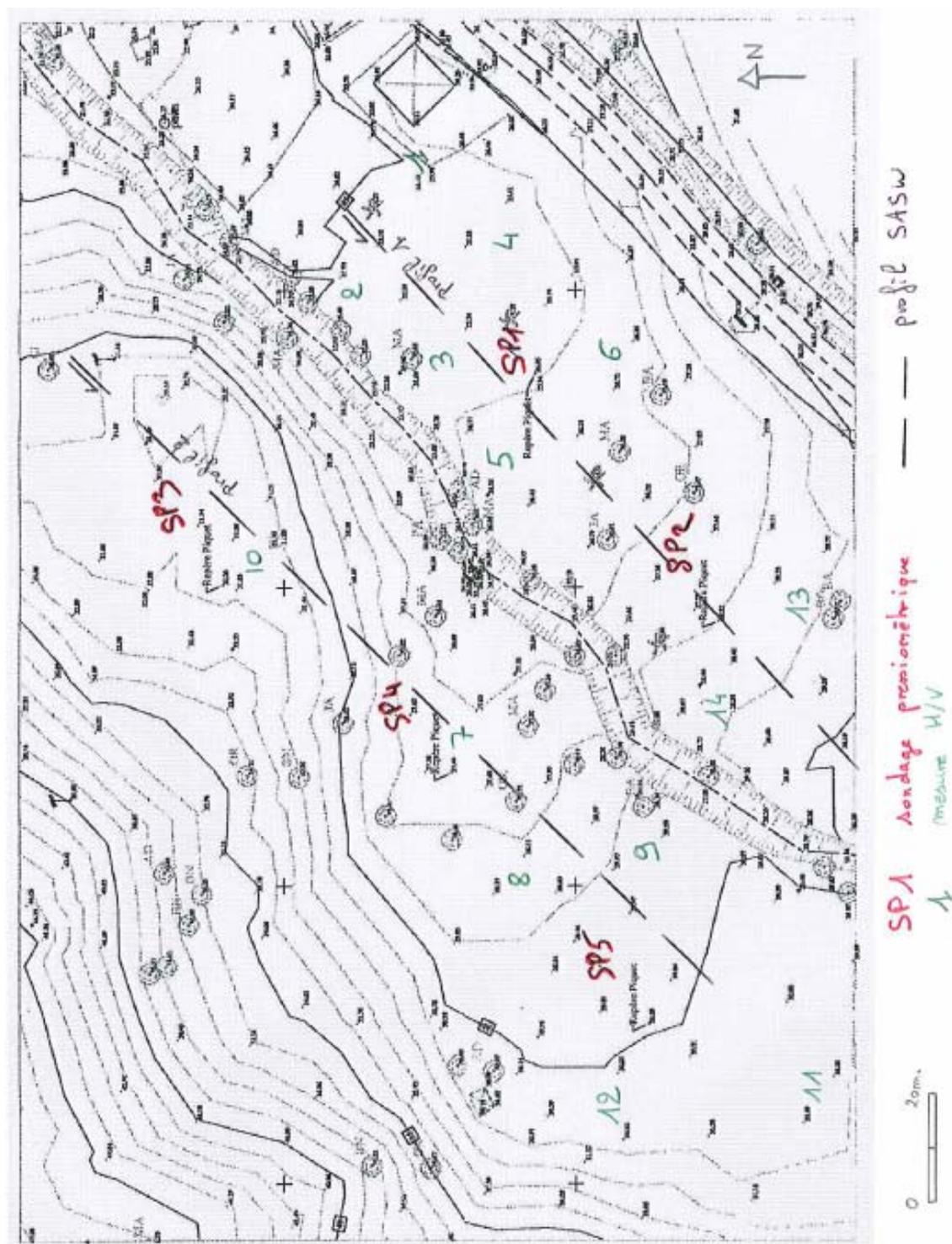
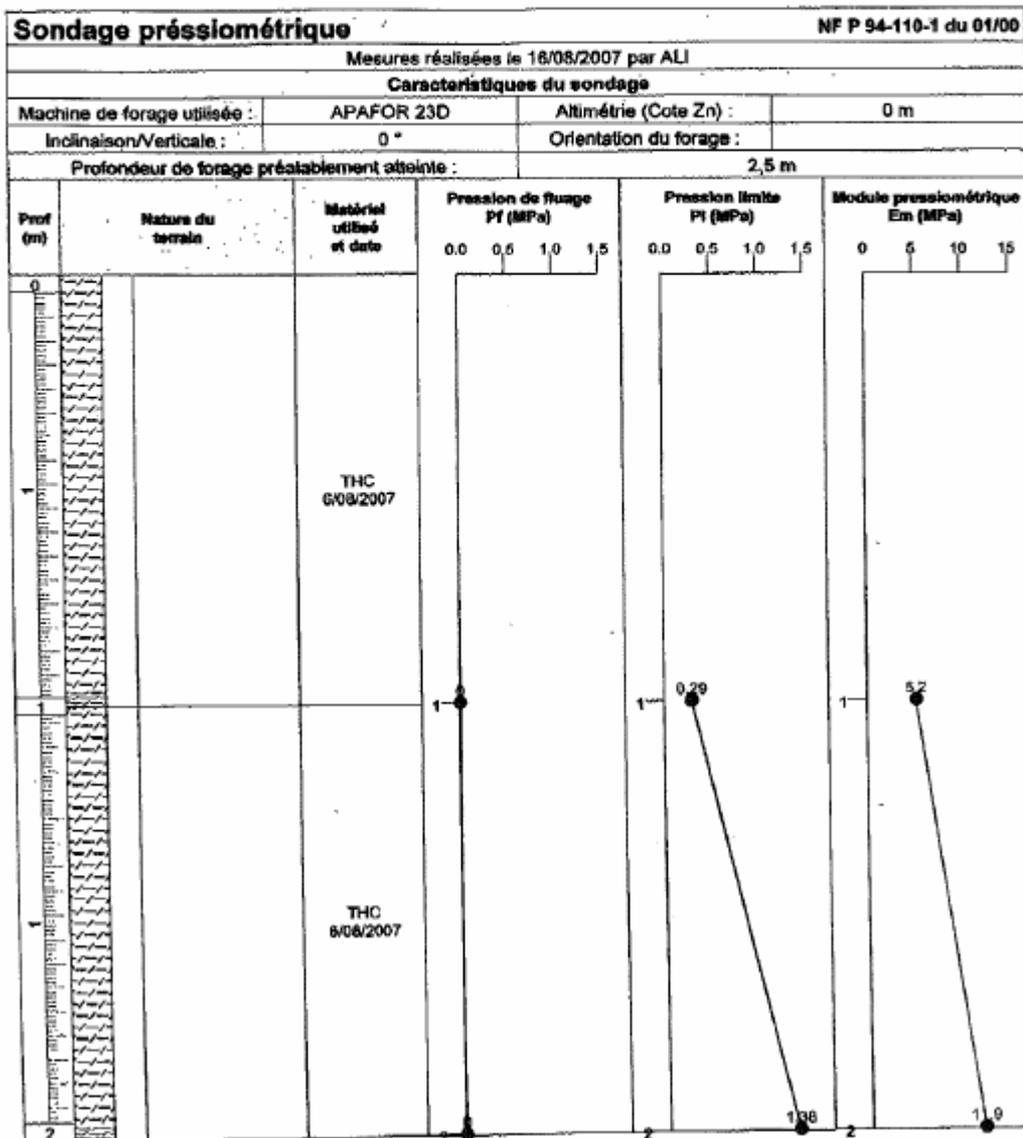
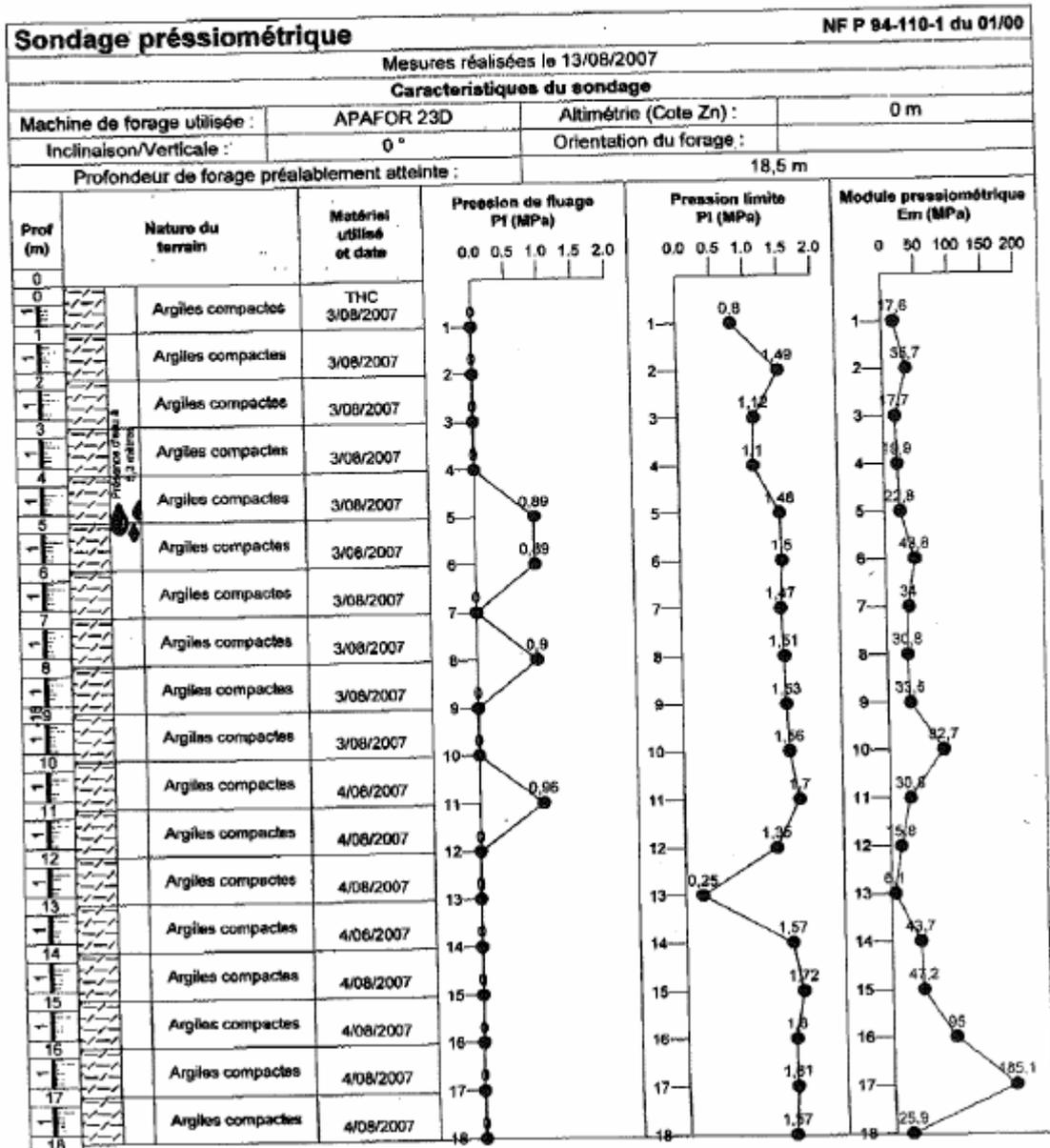


Figure 13 – Emplacement des reconnaissances

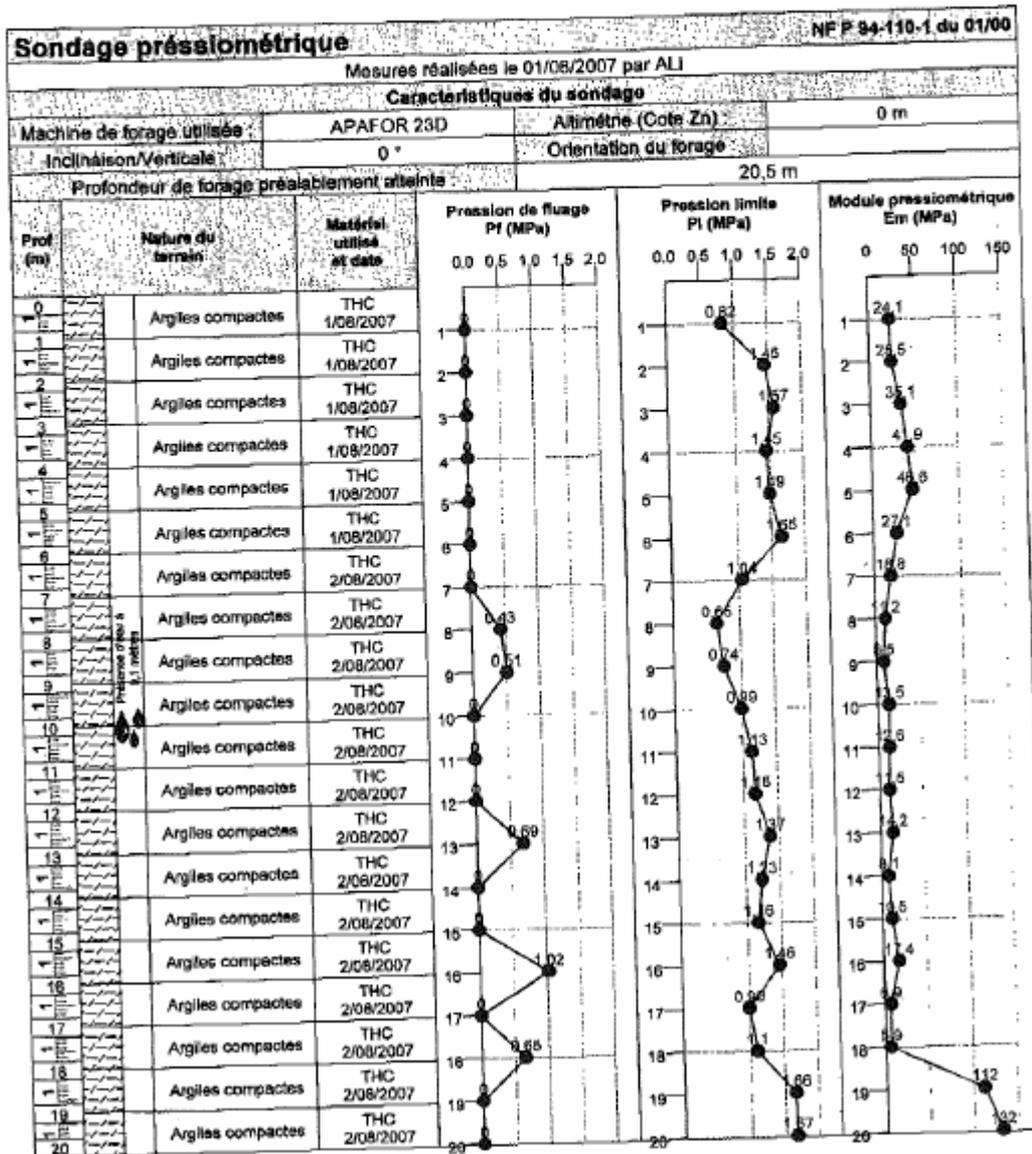
INTERVENTION SUR CHANTIER LP DEMBENI SITE TSARARANO			
Date d'intervention :	16/08/2007 à 08:00	N° d'intervention :	2007-C-0071
Réalisé par :	ALI	Affaire :	DE/SEC/CP
Chantier :	LP DEMBENI SITE TSARARANO	Couche :	SP1
Observations :			



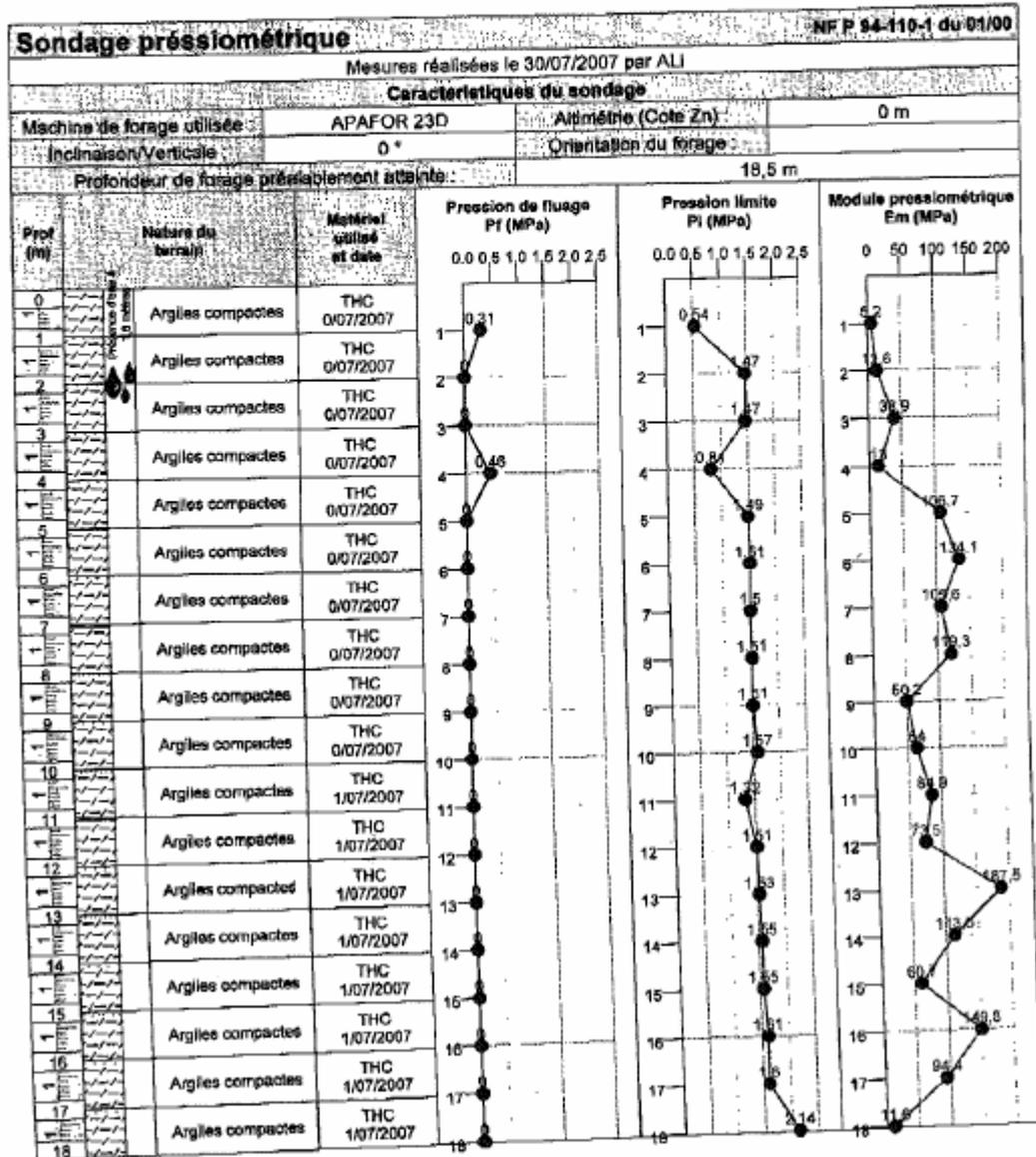
INTERVENTION SUR CHANTIER LP DEMBENI SITE TSARARANO			
Date d'intervention :	13/08/2007 à 08:00	N° d'intervention :	2007-C-0070
Réalisé par :		Affaire :	DE/SEC/CP
Chantier :	LP DEMBENI SITE TSARARANO	Couche :	SP2
Observations :			



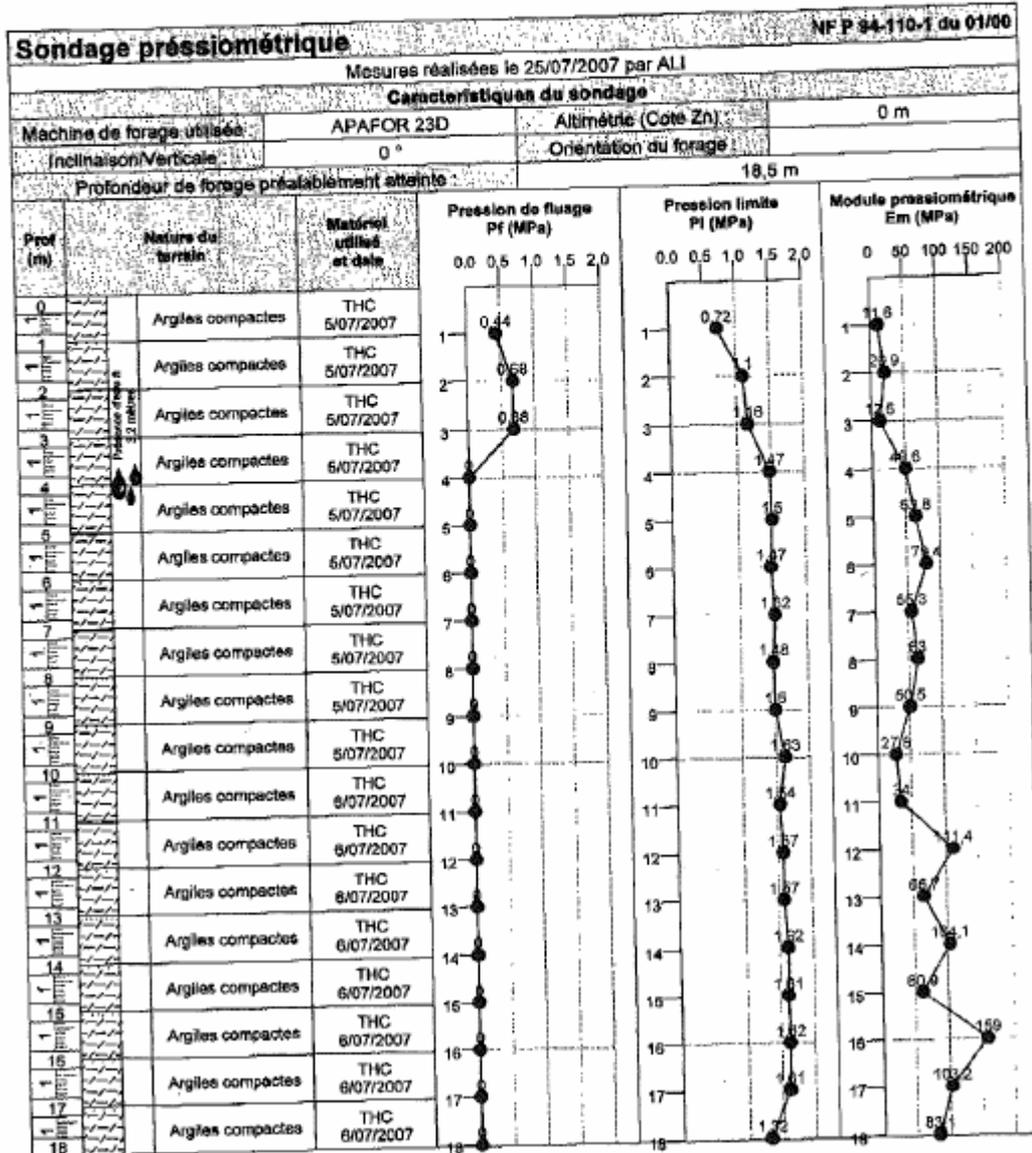
INTERVENTION SUR CHANTIER LP DEMBENI SITE TSARARANO			
Date d'intervention :	01/08/2007 à 08:00	N° d'intervention :	2007-C-0067
Réalisé par :	ALI	Affaire :	DE/SEC/CP
Client :	LP DEMBENI SITE TSARARANO	Couche :	SP3
Observations :			



INTERVENTION SUR CHANTIER LP DEMBENI SITE TSARARANO			
Date d'intervention:	30/07/2007 à 08:00	N° d'intervention:	2007-C-0066
Réalisé par:	ALI	Affaire:	DE/SEC/CP
Chantier:	LP DEMBENI SITE TSARARANO	Couche:	SP4
Observations:			



INTERVENTION SUR CHANTIER LP DEMBENI SITE TSARARANO			
Date d'intervention :	25/07/2007 à 08:00	N° d'intervention :	2007-C-0065
Réalisé par :	ALI	Affaire :	DE/SEC/CP
Chantier :	LP DEMBENI SITE TSARARANO	Couche :	SP5
Observations :			





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