



# Evaluation de l'aléa sismique sur les sites de l'extension du collège de Labattoir, de la construction du collège de Bouéni, et du lycée de Chirongui (Mayotte)



Rapport final

BRGM/RP-57715-FR

Octobre 2009



# Evaluation de l'aléa sismique sur les sites de l'extension du collège de Labattoir, de la construction du collège de Bouéni, et du lycée de Chirongui (Mayotte)

Rapport final

**BRGM/RP-57715-FR**

Octobre 2009

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM - 2009 RIS G 25 – PSP09MAY35

**A. Oppermann, S. Auclair, A. Bitri, JL. Nédellec, J. Rey, A. Roullé, E. Vanoudheusden**

**Vérificateur :**

Nom : P. Dominique

Date : 15/10/2009

Signature :

**Approbateur :**

Nom : P. Puvilland

Date : 16/10/2009

Signature :

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 :** Mayotte, Aléa sismique, Liquéfaction, Labattoir, Bouéni, Chirongui

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

A. Oppermann, S. Auclair, A. Bitri, JL. Nédellec, J. Rey, A. Roullé, E. Vanoudheusden (Octobre 2009) - "Evaluation de l'aléa sismique sur les sites de l'extension du collège de Labattoir, de la construction du collège de Bouéni, et du lycée de Chirongui (Mayotte)" - Rapport BRGM/RP-57715-FR – 126 p. , 40 illustrations , 19 tableaux , 4 annexes.

## Synthèse

Ce rapport a été réalisé à la demande du vice-rectorat de Mayotte sous la supervision de la Direction de l'Équipement (DE) de Mayotte dans le cadre de la vérification de la tenue sous sollicitation sismique de l'extension du collège de Labattoir, de la construction du collège de Bouéni, et du lycée de Chirongui (Mayotte). Le spectre de réponse élastique permettra de dimensionner le projet en intégrant la prise en compte de l'aléa sismique régional et local.

La source sismique retenue est une source proche (distance focale à 10 km). Les intensités de référence du séisme de référence sont de VII-VIII MSK sur le site du collège de Labattoir, du collège de Bouéni et du lycée de Chirongui.

Une configuration du type de sols correspondant au modèle géotechnique à l'aplomb des trois sites considérés a été définie afin de tenir compte des conditions particulières des sites du lycée de Chirongui et des deux collèges de Labattoir et Bouéni.

Les spectres spécifiques qui en résultent sont respectivement fournis en Illustration 13 et Illustration 16 et en Tableau 10 et Tableau 11 pour les deux colonnes de sol définies pour le lycée de Chirongui, en Illustration 27 et Tableau 16 pour le collège de Labattoir et enfin en Illustration 36 et Tableau 20 pour le collège de Bouéni.

L'accélération horizontale maximale tenant compte des conditions de site est respectivement de 0,28 g (valeur de l'accélération pour  $T = 0$  s sur le spectre de réponse spécifique) et 0,30 g pour les deux colonnes de sol définies pour le lycée de Chirongui, de 0,27 g pour le collège de Labattoir et de 0,31 g pour le collège de Bouéni. Il convient de noter **qu'il n'apparaît pas nécessaire** d'appliquer aux spectres spécifiques définis dans cette étude **de coefficient multiplicatif. En effet, le spectre spécifique au rocher avec un coefficient de 1.2 est proche des formes réglementaires envisagées à terme.**

Concernant la liquéfaction des sols sur le site du futur lycée de Chirongui, il convient en premier lieu de distinguer deux zones :

- les versants et crêtes (Est et Sud du Site) où aucun sol liquéfiable n'est présent ;
- la plaine alluviale (Ouest et Nord du site) où, en cas de susceptibilité qualitative avérée à la liquéfaction, un risque important de liquéfaction jusqu'à environ 11 m de profondeur serait à craindre. Ceci nécessiterait alors un renforcement important pour implanter toute construction lourde et peu déformable dans cette zone.

Néanmoins, faute de données de laboratoires suffisantes sur les alluvions, il n'a pas été permis de vérifier rigoureusement le potentiel de liquéfaction des alluvions présentes sur le site. Seule une granulométrie dans l'horizon supérieur est exploitable, semblant mettre en avant des terrains trop fins pour être liquéfiables.

**Donc, dans la plaine alluviale, même si certains indices conduisent à penser que les terrains sont trop fins pour être liquéfiables, il est impossible en l'état d'écarter ce risque sans disposer d'éléments complémentaires.** En conséquence, pour lever cette incertitude, nous recommandons de réaliser un forage complémentaire.

Dans la mesure où la susceptibilité qualitative des alluvions à la liquéfaction nécessite d'être vérifiée, dans un contexte où a priori les sols présents se révèlent probablement trop fins, il apparaît prématuré de définir précisément des solutions de renforcement du site au niveau de la plaine alluviale. Néanmoins, les principales solutions traditionnelles permettant de construire sur sol liquéfiable sont rappelées dans le présent rapport.

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

## Sommaire

<b>1. Objet de l'étude .....</b>	<b>13</b>
<b>2. Etat de la réglementation en vigueur à Mayotte .....</b>	<b>15</b>
<b>3. Détermination des mouvements sismiques de référence au rocher .....</b>	<b>17</b>
3.1. CARACTERISTIQUES DU SEISME DE REFERENCE .....	17
3.2. CALCUL DES MOUVEMENTS SISMQUES DE RÉFÉRENCE A MAYOTTE..	17
<b>4. Détermination des spectres de réponse élastiques tenant compte des conditions de site .....</b>	<b>21</b>
4.1. MÉTHODOLOGIE.....	21
4.2. MÉTHODES NUMÉRIQUES .....	21
4.3. CHOIX DES MOUVEMENTS SISMQUES AU ROCHER POUR L'ANALYSE DES EFFETS DE SITE .....	21
4.3.1.Choix des accélérogrammes .....	21
4.3.2.Comparaison avec le spectre au rocher horizontal affleurant .....	24
4.4. DETERMINATION DES SPECTRES DE REPONSE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE .....	25
<b>5. Détermination des spectres de réponse tenant compte des conditions de site pour le site du Lycée de Chirongui .....</b>	<b>27</b>
5.1. LOCALISATION DU PROJET ET CADRE GEOLOGIQUE .....	27
5.2. SYNTHÈSE GEOTECHNIQUE .....	28
5.2.1.Préambule .....	28
5.2.2.Données .....	28
5.2.3.Caractérisation des unités géomécaniques.....	32
5.2.4.Hydrogéologie .....	37
5.2.5.Etablissement de colonnes de sols .....	37
5.3. ESTIMATION DU SPECTRE DE REPONSE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE POUR LE SITE DU LYCEE DE CHIRONGUI .....	42
5.3.1.Colonne n°1 : Plaine alluviale.....	42
5.3.2.Colonne n°2 : Crêtes et versants.....	46

5.4. ANALYSE DES POTENTIALITÉS DE LIQUEFACTION .....	50
5.4.1. Définition et méthode .....	50
5.4.2. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction .....	51
5.4.3. Susceptibilité quantitative à la liquéfaction .....	52
5.4.4. Appréciation des potentialités de liquéfaction du site du lycée de Chirongui .....	54
5.5. CONCLUSIONS RELATIVES AU POTENTIEL DE LIQUEFACTION SUR LE SITE DE CHIRONGUI .....	63
<b>6. Détermination des spectres de réponse tenant compte des conditions de site pour le site de l'extension du collège de Labattoir .....</b>	<b>65</b>
6.1. LOCALISATION DU PROJET ET CADRE GEOLOGIQUE .....	65
6.2. SYNTHÈSE GEOTECHNIQUE .....	66
6.2.1. Préambule .....	66
6.2.2. Données .....	66
6.2.3. Caractérisation des unités géomécaniques .....	69
6.2.4. Hydrogéologie .....	72
6.2.5. Etablissement de colonnes de sols .....	72
6.3. ESTIMATION DU SPECTRE DE RÉPONSE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE POUR LE SITE DE L'EXTENSION DU COLLÈGE DE LABATTOIR .....	75
6.4. ANALYSE DES POTENTIALITÉS DE LIQUEFACTION .....	79
6.4.1. Définition et méthode .....	79
6.4.2. Appréciation des potentialités de liquéfaction du site de l'extension du collège de Labattoir .....	79
6.5. CONCLUSIONS RELATIVES AU POTENTIEL DE LIQUEFACTION SUR LE SITE DE LABATTOIR .....	81
<b>7. Détermination des spectres de réponse tenant compte des conditions de site pour le site du collège de Bouéni .....</b>	<b>83</b>
7.1. LOCALISATION DU PROJET ET CADRE GEOLOGIQUE .....	83
7.2. SYNTHÈSE GEOTECHNIQUE .....	84
7.2.1. Préambule .....	84
7.2.2. Données .....	84
7.2.3. Caractérisation des unités géomécaniques .....	87
7.2.4. Hydrogéologie .....	90
7.2.5. Etablissement de colonnes de sols .....	90

7.3. ESTIMATION DU SPECTRE DE REPONSE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE POUR LE SITE DU LYCEE DE BOUENI.....	92
7.4. ANALYSE DES POTENTIALITÉS DE LIQUEFACTION .....	96
7.4.1. Définition et méthode.....	96
7.4.2. Appréciation des potentialités de liquéfaction du site de Bouéni.....	96
7.5. CONCLUSIONS RELATIVES AU POTENTIEL DE LIQUEFACTION SUR LE SITE DE BOUENI .....	97
<b>8. Conclusion .....</b>	<b>99</b>
<b>9. Bibliographie.....</b>	<b>102</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 - Spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant. Amortissements : 2, 5, 10 et 20 % .....	19
Illustration 2 - Accélérogrammes naturels sélectionnés et normalisés par rapport au PGA « cible ». .....	23
Illustration 3 - Accélérogrammes naturels modifiés correspondant au spectre au rocher.....	24
Illustration 4 - Comparaison des spectres en vitesse des accélérogrammes réels et synthétiques avec le spectre au rocher. ....	25
Illustration 5 - Vue aérienne de la zone d'étude (orthophoto IGN 2008) .....	27
Illustration 6 - Extrait de la carte géologique de Mayotte(BRGM 1988) .....	28
Illustration 7 - Localisation des sondages réalisés par SEGC .....	30
Illustration 8 - Localisation des investigations géophysiques réalisées par le BRGM.....	31
Illustration 9 - Coupes géologiques interprétatives réalisées par SEGC.....	32
Illustration 10 - Carte géologique interprétative du site de Chirongui (doc. SEGC) .....	41
Illustration 11 - Spectres de réponse à 5 % des accélérogrammes synthétiques et réels tenant compte des effets de site pour la colonne de sol n°1 du site du lycée de Chirongui.....	43
Illustration 12 - Spectre retenu pour la colonne de sol n°1 du site du lycée de Chirongui - Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site. Amortissements : 2, 5, 10 et 20 % .....	44
Illustration 13 - Spectre retenu pour la colonne de sol n°1 du site du lycée de Chirongui - Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site en accélération en fonction de la période, amortissement 5%. ....	45

Illustration 14 - Spectres de réponse à 5 % des accélérogrammes synthétiques et réels tenant compte des effets de site pour la colonne de sol n°2 du site du lycée de Chirongui. ....	47
Illustration 15 - Spectre retenu pour la colonne de sol n°2 du site du lycée de Chirongui - Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site. Amortissements : 2, 5, 10 et 20 %.....	48
Illustration 16 - Spectre retenu pour la colonne de sol n°2 du site du lycée de Chirongui - Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site en accélération en fonction de la période, amortissement 5%.....	49
Illustration 17 - Carte d'aléa liquéfaction issue des atlas des aléas pour le site de Chirongui .....	55
Illustration 18 - Courbes granulométriques des alluvions limono-sableuses .....	56
Illustration 19 - Abaque( $\frac{a}{\sigma'_{v,0}}$ ) en fonction de $N_1$ (Seed).....	60
Illustration 20 - Vue aérienne de la zone d'étude (orthophoto IGN 2008).....	65
Illustration 21 - Extrait de la carte géologique de Mayotte (BRGM 1988).....	66
Illustration 22 - Localisation des sondages réalisés par SEGC (doc. SEGC).....	67
Illustration 23 - Localisation des investigations géophysiques réalisées par le BRGM .....	68
Illustration 24 - Coupe géologique interprétative réalisée par SEGC (doc. SEGC) .....	69
Illustration 25 - Spectres de réponse à 5 % des accélérogrammes synthétiques et réels tenant compte des effets de site pour le site de l'extension du collège de Labattoir. ....	76
Illustration 26 - Spectre retenu pour le site de l'extension du collège de Labattoir - Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site. Amortissements : 2, 5, 10 et 20 %.....	77
Illustration 27 - Spectre retenu pour le site de l'extension du collège de Labattoir - Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site en accélération en fonction de la période, amortissement 5%.....	78
Illustration 28 - Carte d'aléa liquéfaction issue des atlas des aléas pour le site de Labattoir (commune de Dzaoudzi – Pamandzi) .....	80
Illustration 29 - Vue aérienne de la zone d'étude (orthophoto IGN 2008).....	83
Illustration 30 - Extrait de la carte géologique de Mayotte (BRGM 1988).....	84
Illustration 31 - Site de Bouéni - Localisation des sondages réalisés par SEGC et des prélèvements d'échantillons réalisés par le Laboratoire de l'Equipement (SEGC, 2007).....	85
Illustration 32 - Localisation des investigations géophysiques réalisées par le BRGM .....	86
Illustration 33 - Coupe géologique interprétative réalisée par SEGC (SEGC, 2007).....	87
Illustration 34 - Spectres de réponse à 5 % des accélérogrammes synthétiques et réels tenant compte des effets de site pour le site du lycée de Bouéni. ....	93
Illustration 35 - Spectre retenu pour le site du lycée de Bouéni - Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site. Amortissements : 2, 5, 10 et 20 %.....	94

Illustration 36 - Spectre retenu pour le site du lycée de Bouéni - Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site en accélération en fonction de la période, amortissement 5%. .....	95
Illustration 37 - Carte d'aléa liquéfaction issue des atlas des aléas pour le site de Bouéni .....	97
Illustration 38 - Principe de la méthode SASW .....	108
Illustration 39 - Diagramme de dispersion associé aux tirs enregistrés sur le site .....	110
Illustration 40 - Dispositif H/V utilisé à Mayotte (à gauche : la station d'acquisition et à droite : le sismomètre tridimensionnel Lennartz 5 secondes).....	112

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Séisme de référence retenu pour l'étude de l'aléa sismique sur les sites du collège de Bouéni, de l'extension du collège de Labattoir et du lycée de Chirongui sur l'île de Mayotte. ....	17
Tableau 2 - Valeurs de A, V et D du spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant. ....	18
Tableau 3 - Caractéristiques des séismes correspondant aux accélérogrammes réels choisis pour le calcul des spectres tenant compte des effets de site. ....	22
Tableau 4 - Caractéristiques des séismes correspondant aux accélérogrammes réels choisis pour le calcul des spectres tenant compte des effets de site. ....	23
Tableau 5 - Essais en laboratoire sur les alluvions limono-sableuses .....	33
Tableau 6 - Essai en laboratoire sur les glacis d'érosion.....	35
Tableau 7 - Essais en laboratoire sur les altérites en place .....	36
Tableau 8 - Caractéristiques géotechniques moyennes des formations géologiques sur le site de Chirongui .....	37
Tableau 9 - Colonnes de sol retenues pour le site de Chirongui.....	39
Tableau 10 - Spectre retenu pour la colonne de sol n°1 du site du lycée de Chirongui - Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site. Valeurs de A, V et D.....	45
Tableau 11 - Spectre retenu pour la colonne de sol n°2 du site du lycée de Chirongui - Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site. Valeurs de A, V et D.....	49
Tableau 12 - Examen des critères de susceptibilité qualitative (règles PS 92).....	57
Tableau 13 - Site de Chirongui - Calcul de la susceptibilité et de l'intensité de liquéfaction.....	61
Tableau 14 - Caractéristiques géotechniques moyennes des formations géologiques sur le site de Labattoir.....	72
Tableau 15 - Colonne de sol retenue pour le site de Labattoir.....	74

Tableau 16 - Spectre retenu pour le site de l'extension du collège de Labattoir - Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site. Valeurs de A, V et D. ....	78
Tableau 17 - Essais en laboratoire sur les colluvions .....	88
Tableau 18 - Caractéristiques géotechniques moyennes des formations géologiques sur le site de Bouéni .....	90
Tableau 19 - Colonne de sol retenue pour le site de Bouéni .....	91
Tableau 20 - Spectre retenu pour le site du lycée de Bouéni - Spectre de réponse élastique horizontal avec prise en compte des effets de site. Valeurs de A, V et D. ....	95

## Liste des annexes

Annexe 1 Présentation des mesures géophysiques réalisées.....	105
Annexe 2 Résultats des mesures géophysiques pour le site de Chirongui .....	115
Annexe 3 Résultats des mesures géophysiques pour le site de l'extension du collège de Labattoir.....	119
Annexe 4 Résultats des mesures géophysiques pour le site du collège de Bouéni.....	123

# 1. Objet de l'étude

Dans le cadre de l'extension du collège de Labattoir (Petite Terre) et de la construction du collège de Bouéni et du Lycée de Chirongui (Grande Terre), la Direction de l'Equipement de Mayotte a sollicité le BRGM afin d'une part de disposer de spectres de réponse élastiques représentatifs de chaque site, intégrant l'aléa sismique régional et local, et d'autre part d'évaluer le potentiel de liquéfaction de chaque site et si besoin de préconiser des mesures adaptées de renforcement.

Le présent rapport d'étude comprend successivement :

- un rappel du contexte sismotectonique de Mayotte ;
- un rappel de la réglementation à Mayotte ;
- la détermination des mouvements sismiques de référence au rocher ;
- pour chaque site d'étude :
  - o une synthèse géologique et géotechnique avec établissement de colonnes de sols représentatives ;
  - o le calcul des spectres de réponse sismique tenant compte des effets de site ;
  - o l'évaluation du potentiel de liquéfaction, et si nécessaire des recommandations en matière de renforcement.



## 2. Etat de la réglementation en vigueur 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 peut être soumise à des séismes potentiellement destructeurs, une démarche de prise en compte du risque sismique dans cette île semble donc à être encourager afin de protéger la population y résidant.

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.

Les installations visées par la présente étude 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) ou à la catégorie d'importance III, selon l'EN1998-1. En suivant les dispositions proposées dans le cadre des futures EuroCode 8, il convient donc d'appliquer théoriquement aux spectres spécifiques définis dans ce rapport un coefficient multiplicateur de 1,2. Cependant, une étude comparative montre que le spectre au rocher spécifique retenu au chapitre 3 (Illustration 1 et Tableau 2) et le spectre au rocher issu des EC8 (pour une zone d'aléa modéré et un bâtiment de catégorie d'importance III) sont comparables. Aussi, et afin d'assurer la cohérence avec les futurs spectres réglementaires pour des ouvrages de

catégorie d'importance III basés sur les règles EC8, **il n'apparaît pas nécessaire d'appliquer aux spectres spécifiques définis dans cette étude de coefficient multiplicatif. En effet, le spectre spécifique au rocher avec un coefficient de 1.2 est proche des formes réglementaires envisagées à terme.**

### 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<sup>er</sup> décembre 1993, d'intensité épicentrale estimée à VII-VIII, qui correspond à une source sismique proche (Terrier *et al.*, 2000). Le séisme du 1<sup>er</sup> 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 épicentrale, 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 <sup>er</sup> décembre 1993
Intensité épicentrale (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 les sites du collège de Bouéni, de l'extension du collège de Labattoir et du lycée de Chirongui 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.

Les spectres de référence finalement retenus sont présentés, pour les amortissements 2, 5, 10 et 20 %, sur l'illustration 1 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  $\xi$  %.

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.

<b>F (Hz)</b>	<b>Amortissement (%)</b>	<b>A (g)</b>	<b>V (cm/s)</b>	<b>D (cm)</b>
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.*

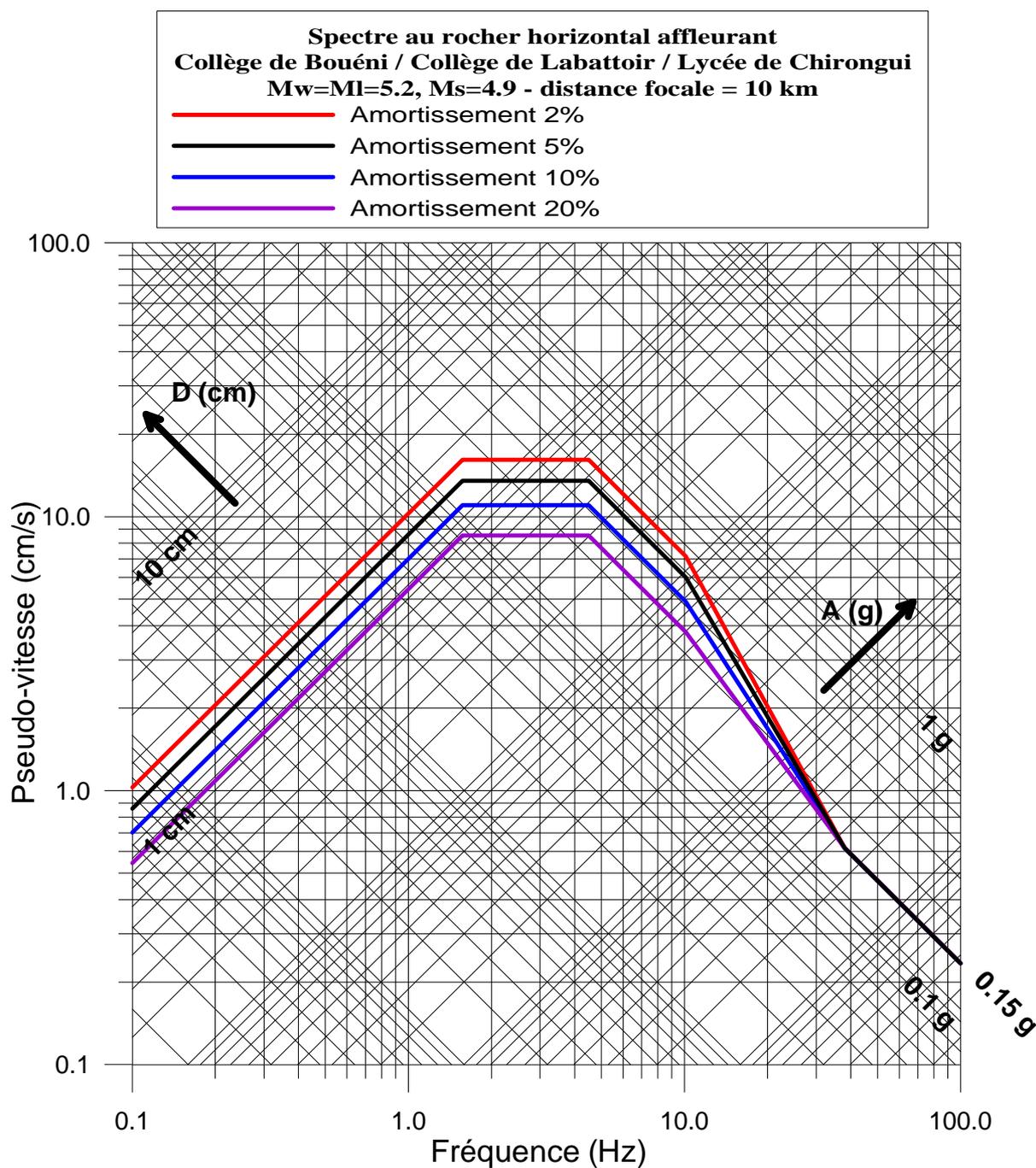


Illustration 1 - Spectre de réponse élastique du séisme de référence au rocher horizontal affleurant.  
 Amortissements : 2, 5, 10 et 20 %.



## 4. Détermination des spectres de réponse élastiques tenant compte des conditions de site

### 4.1. 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.

### 4.2. 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.

### 4.3. CHOIX DES MOUVEMENTS SISMIQUES AU ROCHER POUR L'ANALYSE DES EFFETS DE SITE

#### 4.3.1. 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 3.

**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 ( $M=M_s$ ,  $M_w$  ;  $d= d_{\text{ focale}}, d_{\text{ épiscopentrale}}$ ) :

- 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 (Tableau 4). 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 l'illustration 3.

	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 3 - Caractéristiques des séismes correspondant aux accélérogrammes réels choisis pour le calcul des spectres tenant compte des effets de site.

	Date	Heure	Séisme	Mw	df (km)	Station	PGA (g)	Durée (s)
1	16/01/1981	00 : 38	Friuli (réplique) Italie	5.3	9	Cairano 4	0.06	4
2	11/09/1976	16 : 31	Friuli (réplique) Italie	5.3	9	Buia	0.04	12

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 l'illustration 2.

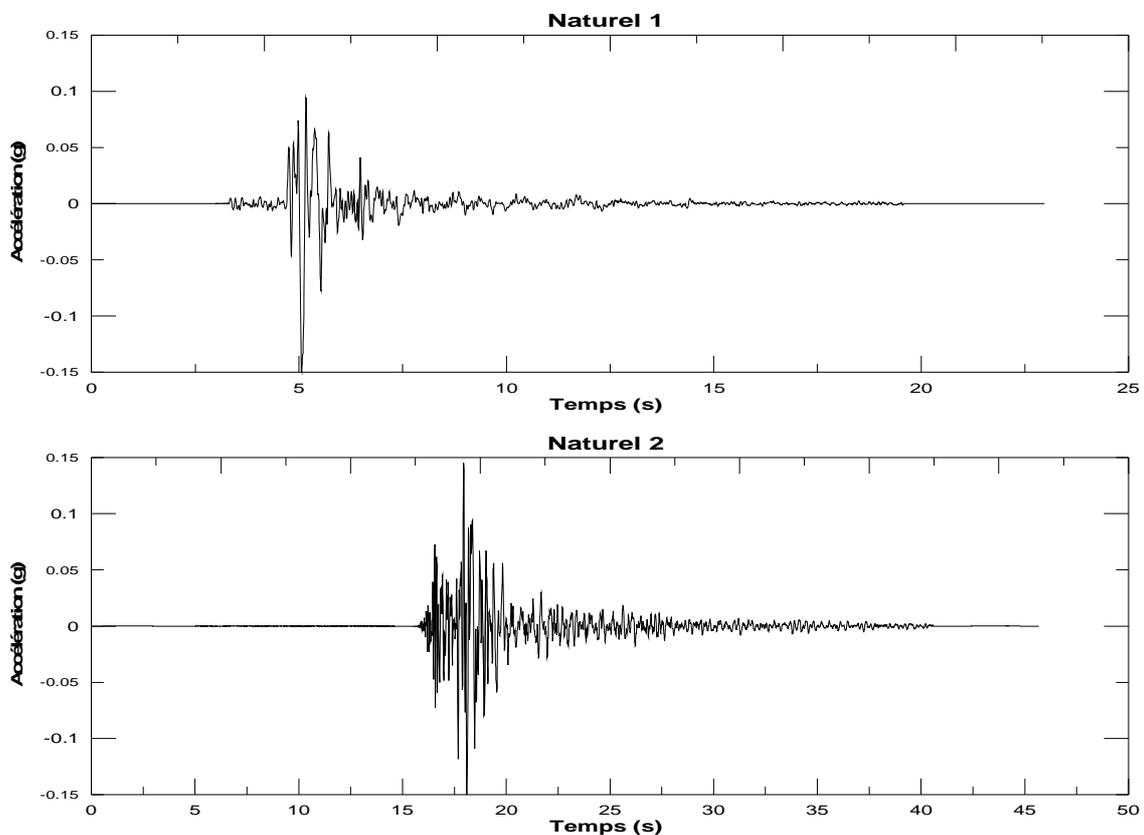


Illustration 2 - Accélérogrammes naturels sélectionnés et normalisés par rapport au PGA « cible ».

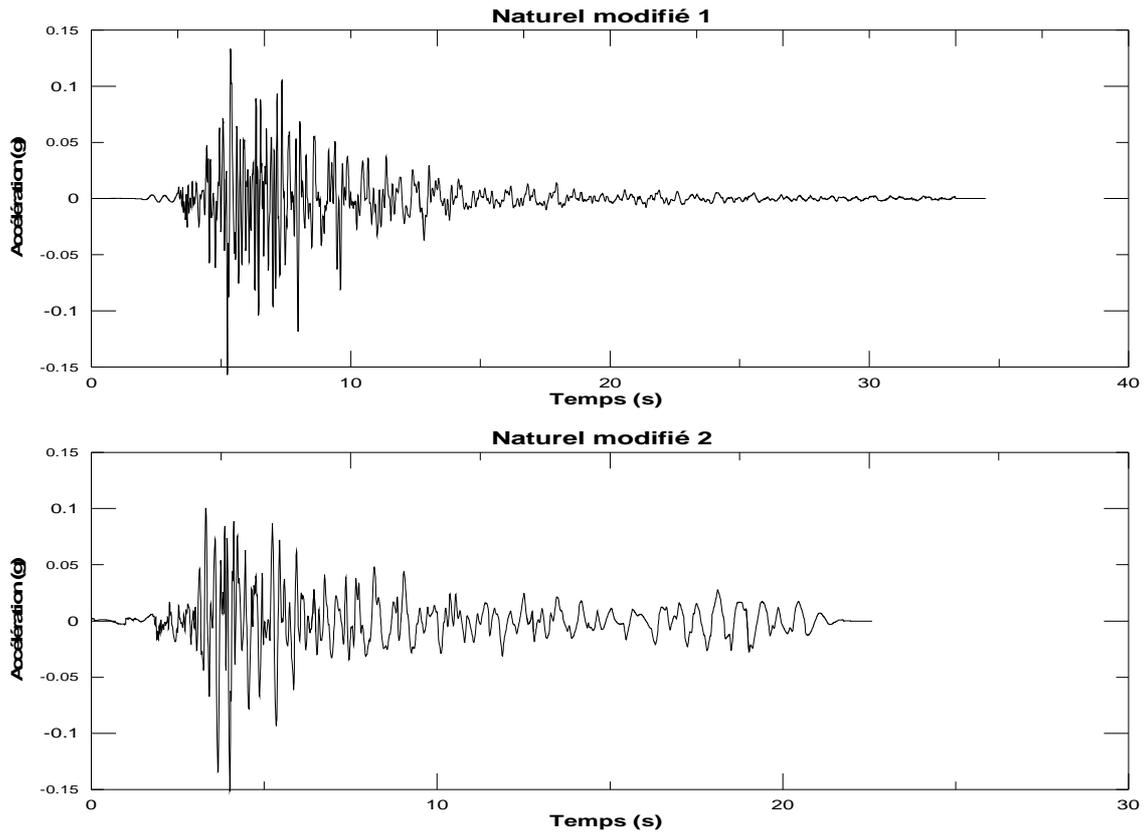


Illustration 3 - Accélérogrammes naturels modifiés correspondant au spectre au rocher.

#### 4.3.2. 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 l'illustration 4 avec le spectre de réponse « cible », spectre de réponse au rocher horizontal affleurant.

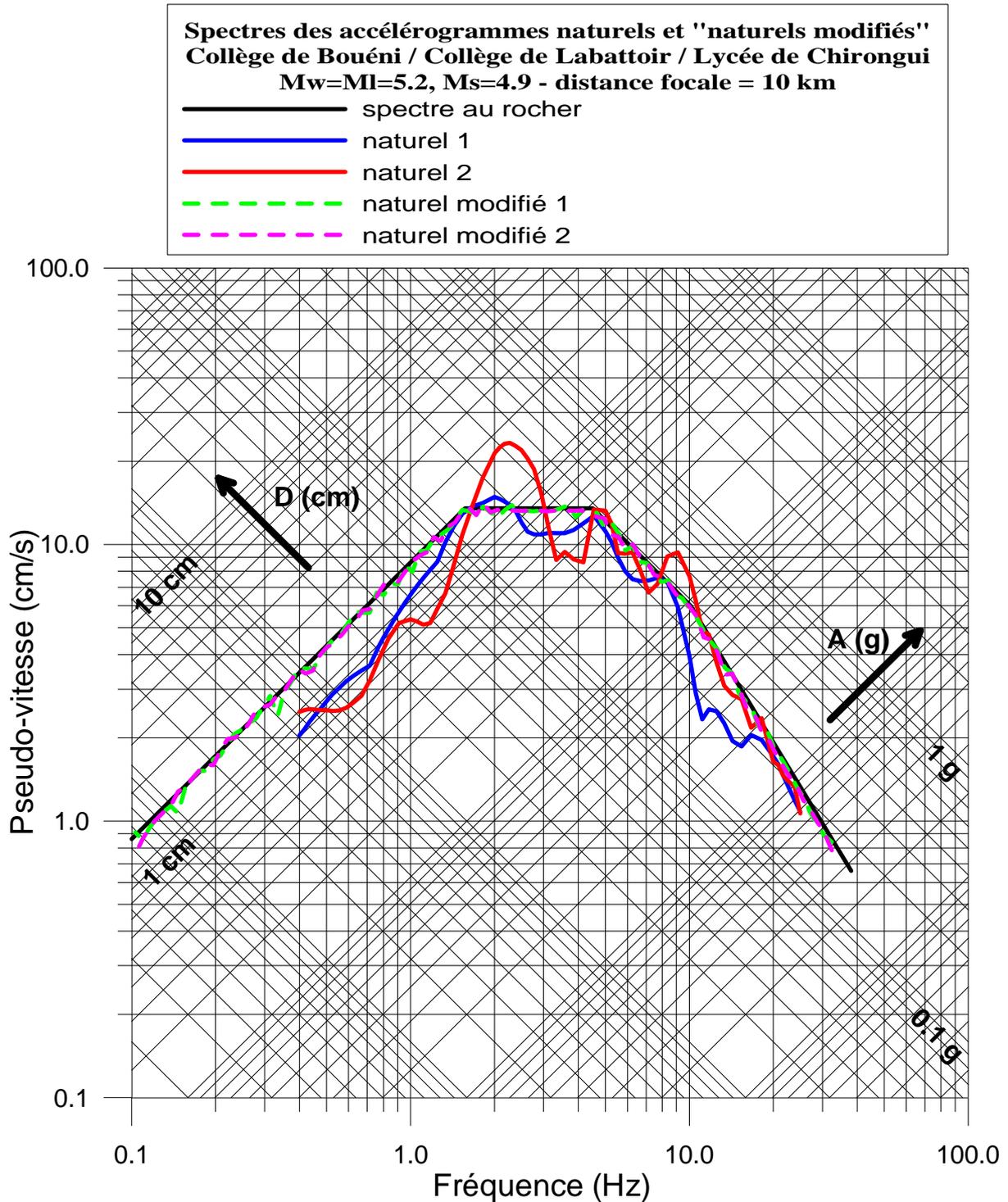


Illustration 4 - Comparaison des spectres en vitesse des accélérogrammes réels et synthétiques avec le spectre au rocher.

#### 4.4. DETERMINATION DES SPECTRES DE REPONSE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE

Pour les trois sites considérés, la détermination des spectres de réponse tenant compte des conditions de site est respectivement présentée ci-dessous dans les §5, §6 et §7 pour le site du lycée de Chirongui, le site de l'extension du collège de Labattoir et le site du collège de Bouéni.



## 5. Détermination des spectres de réponse tenant compte des conditions de site pour le site du Lycée de Chirongui

### 5.1. LOCALISATION DU PROJET ET CADRE GEOLOGIQUE

Le futur lycée polyvalent de Chirongui, initialement programmé en périphérie Sud-Ouest de l'agglomération, est désormais envisagé à l'Est de la ville à cheval entre l'extrémité de la plaine alluviale et les premiers contreforts du relief central de Grande Terre (cf. Illustration 5).

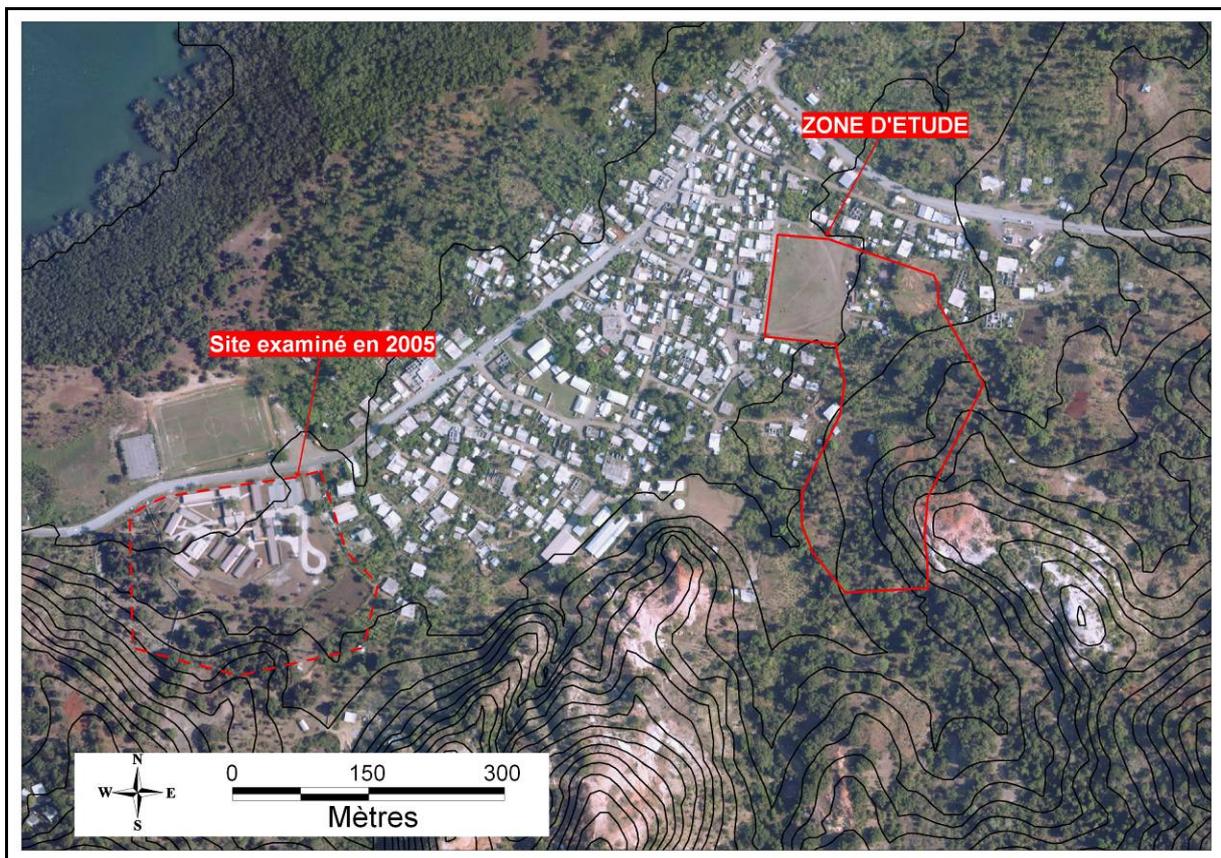


Illustration 5 - Vue aérienne de la zone d'étude (orthophoto IGN 2008)

D'après la carte géologique de Mayotte (BRGM 1988) (cf. Illustration 6), la zone de projet recoupe de vastes types de formations à l'affleurement :

- Au Nord et à l'Ouest, dans la plaine : les dépôts fins alluvionnaires et littoraux ;
- Au Sud et à l'Est, au niveau du relief : les altérites ferrallitiques issus de la dégradation plus ou moins en place du substratum volcanique.

Compte-tenu du relief très marqué du site, il est possible que la topographie puisse amplifier les ondes en cas de séisme. Ces effets de site topographiques n'ont pas été étudiés dans le présent rapport.

Le site initialement envisagé était intégralement positionné au niveau de la plaine sédimentaire, ce qui posait de nombreux problèmes en matière de qualité des sols de fondation (Roullé et al. 2005).

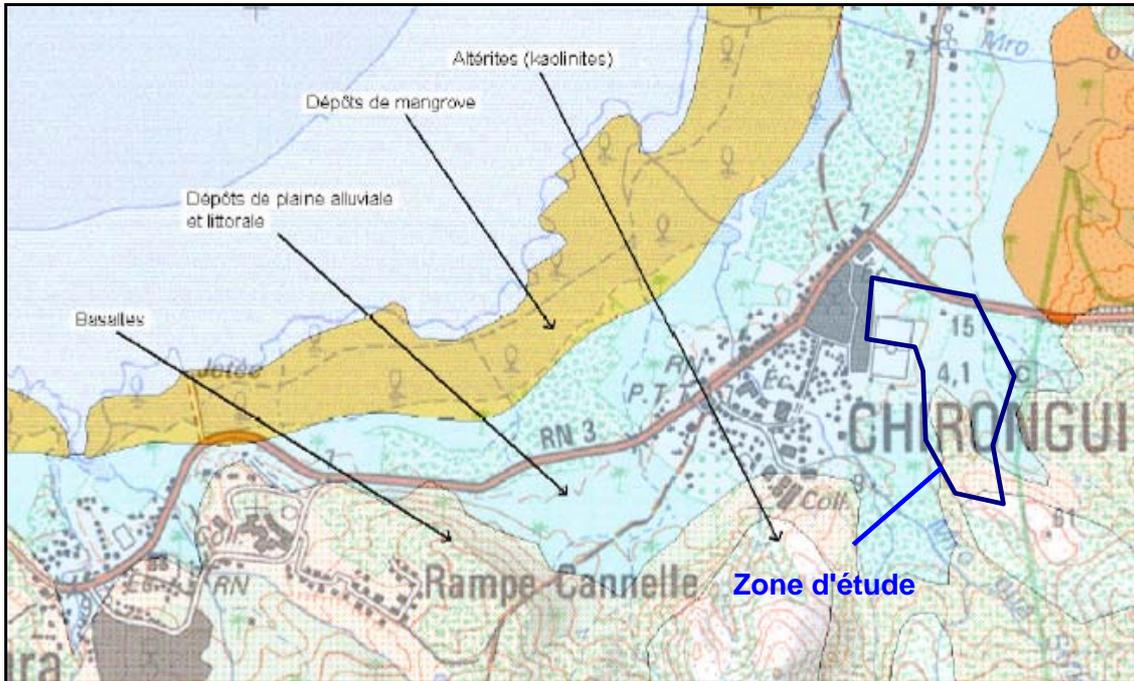


Illustration 6 - Extrait de la carte géologique de Mayotte (BRGM 1988)

## 5.2. SYNTHÈSE GÉOTECHNIQUE

### 5.2.1. Préambule

L'objectif de cette analyse géotechnique spécifique au site de Chirongui est multiple :

- a) identifier et caractériser une ou plusieurs colonnes de « sol » (formations géologiques) représentatives du site en dehors des zones où le rocher est affleurant ou sub-affleurant, afin de calculer le spectre de réponse tenant compte des conditions de site ;
- b) identifier l'existence de formations liquéfiables, et si c'est le cas déterminer l'intensité de la liquéfaction, et si besoin proposer des solutions de renforcement.

### 5.2.2. Données

Une campagne de reconnaissance spécifique a été réalisée début 2008 par le bureau d'études SEGC (rapport SEGC n°1229 de mars 2008).

Ces reconnaissances sont basées sur les forages et les essais suivants :

- 5 sondages à la tarière descendus entre 6,5 m et 10,5 m avec réalisation d'un essai pressiométrique tous les mètres (sondages SP1 à SP5) ;
- 6 sondages à la pelle mécanique descendus entre 1,85 m et 4 m de profondeur (SM1 à SM6) ;
- 4 sondages à la tarière descendus entre 0,6 m et 1,0 m de profondeur (ST1 à ST4) afin de réaliser des essais de perméabilité par infiltration (K1 à K4) ;

- des prélèvements d'échantillons réalisés dans divers horizons rencontrés à des fins d'essais en laboratoire. Les essais suivants ont été pratiqués :
  - . analyse granulométrique ;
  - . teneur en eau naturelle ;
  - . valeurs au bleu ;
  - . essais proctor ;
  - . essais de cisaillement directs consolidés drainés.

L'implantation des forages réalisés lors de cette campagne spécifique est indiquée sur l'illustration 7.

De plus, nous avons exploité les résultats des sondages H/V et SASW réalisés par le BRGM dans le cadre de la présente opération. L'implantation de ces investigations géophysiques est présentée sur l'illustration 8. Il est à noter que ces investigations sont situées uniquement au niveau de la plaine alluviale.

Enfin, il nous a paru opportun de comparer les résultats obtenus sur le site projeté pour le futur lycée de Chirongui avec celui initialement examiné en 2005 (650 m plus à l'Ouest), et depuis abandonné en raison de la médiocrité des sols de fondation (cf. Roullé et al., 2005 : *Rapport BRGM RP-53832-FR – Etude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques sur le lycée de Chirongui*).

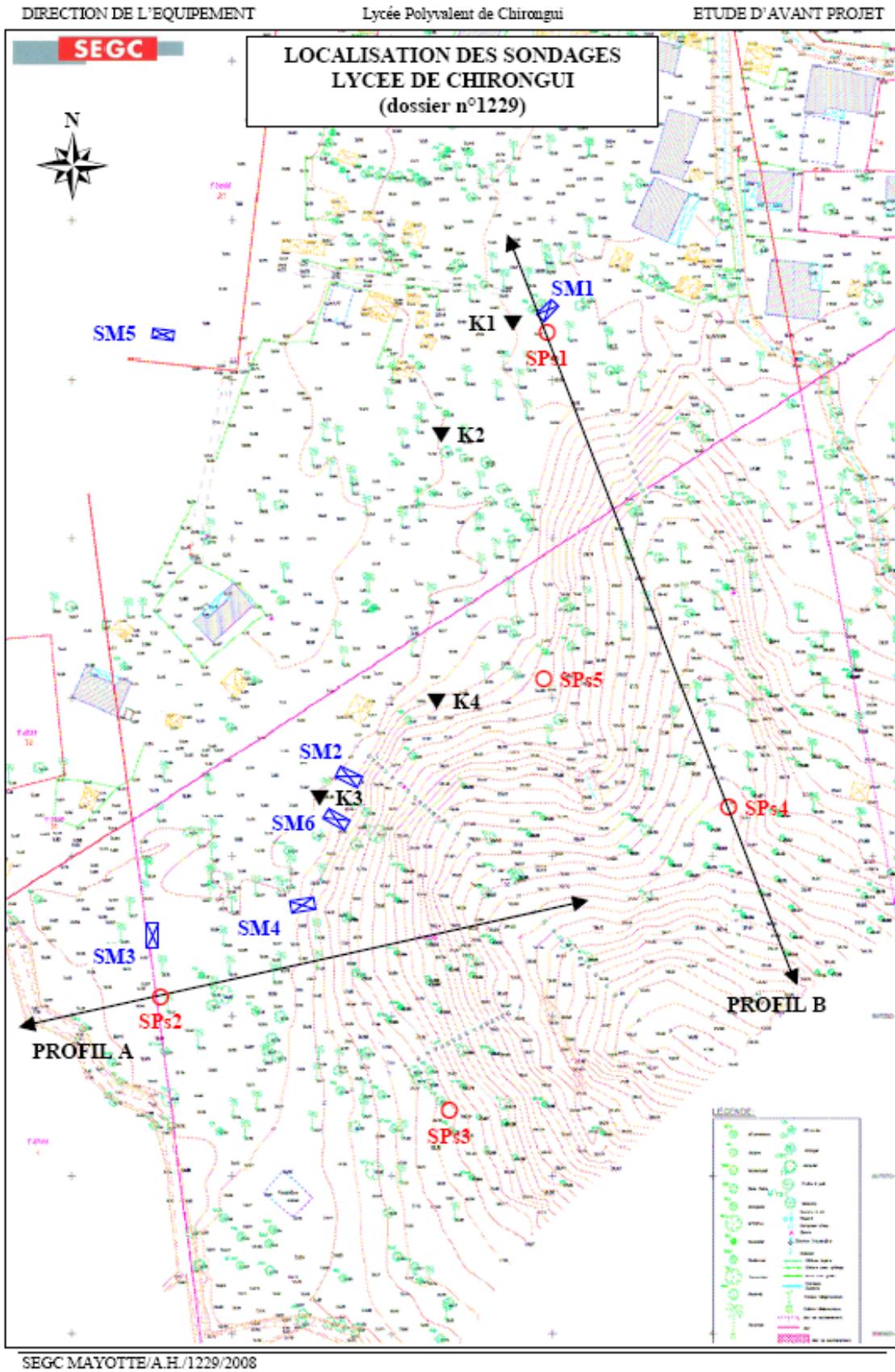


Illustration 7 - Localisation des sondages réalisés par SEGC

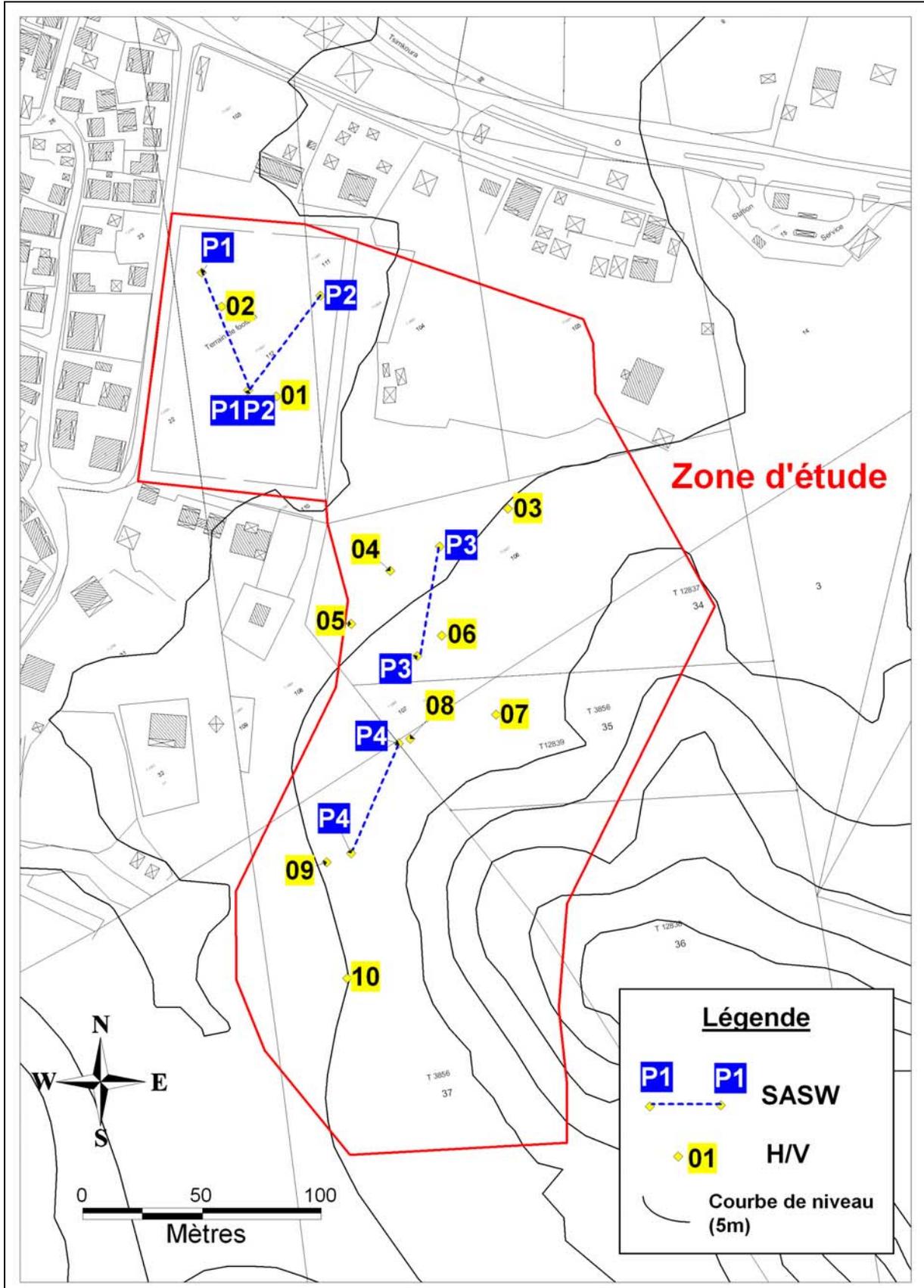


Illustration 8 - Localisation des investigations géophysiques réalisées par le BRGM.

### 5.2.3. Caractérisation des unités géomécaniques

#### a) Généralités

D'après les reconnaissances faites par SEGC en 2008, il est possible de distinguer deux configurations géologiques distinctes (cf. Illustration 9 – les dénominations établies par SEGC ont été reprises), conformément aux hypothèses de la carte géologique générale :

- "la plaine alluviale" au Nord et à l'Ouest ;
- "les crêtes et versants" au Sud et à l'Est.

En conséquence en matière de profils géologiques ou de colonnes de sols représentatives, ces deux domaines seront distingués.

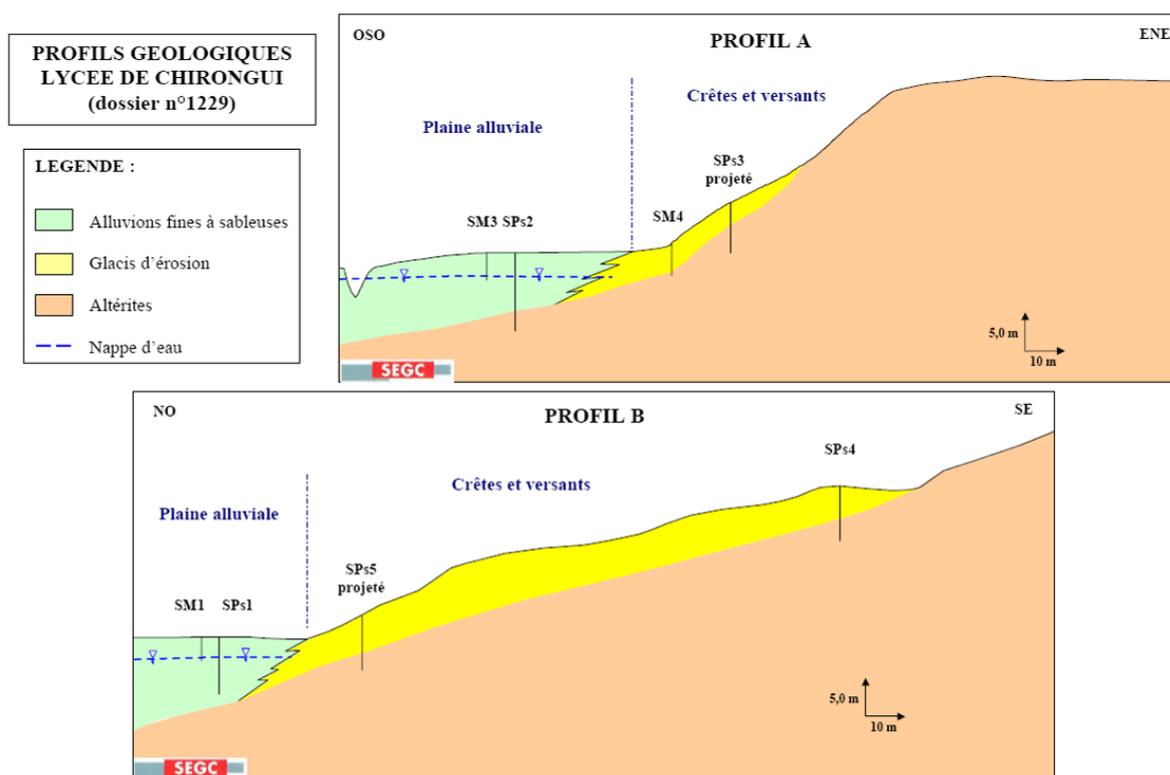


Illustration 9 - Coupes géologiques interprétatives réalisées par SEGC

On notera que la base des formations alluviales n'a été atteinte que dans un seul sondage (SP2), d'où l'intérêt des reconnaissances par SASW permettant de préciser la puissance des formations sédimentaires et la profondeur de la roche saine.

Ainsi, les 4 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 jamais observé sur les profils dont la profondeur maximale atteint 25 m.

Les résultats des mesures H/V indiquent un effet de site notoire pour une fréquence de résonance comprise entre 2.5 et 3.5 Hz pour les points 1 à 6 situés sur la moitié nord du site, et autour de 4.5-5 Hz pour les points 7 à 10 situés au sud du site (voir Illustration 8 et Annexe 2).

## b) Caractéristiques

### i) Terre végétale

Sur moins de 1,8 mètre d'épaisseur hors nappe depuis la surface, a été rencontré un niveau de terre végétale. La puissance moyenne de cet horizon est de 0,2 m avec une singularité au niveau du sondage SM1 où près de 2 m de ce matériau ont été rencontrés. Néanmoins, il est possible de considérer que ce dernier cas n'est pas représentatif du site. En conséquence, eu égard au fait que cet horizon sera systématiquement décapé avant d'asseoir les fondations des constructions, il n'a pas été pris en considération dans les coupes représentatives de sol.

### ii) Alluvions limono-sableuses

#### - Lithologie :

Cet horizon rencontré sous la terre végétale dans la plaine alluviale est essentiellement constitué de limon argilo-sableux, et de limon sableux. Localement, des sables limoneux sont décrits.

#### - Epaisseur :

Dans la plaine alluviale, la puissance de cette formation peut localement atteindre 7,5 m, sans que sa base n'ait été systématiquement rencontrée (SP1). A noter que dans le sondage ST3, en limite Est de la plaine alluviale, ce niveau est retrouvé sous les glacis d'épandage.

#### - Essais en laboratoire :

Le Tableau 5 récapitule les résultats des principaux essais réalisés en laboratoire.

	passant à 80 µm	w <sub>n</sub>	VBS	Opt. Proctor	cat. NFP11- 300
SM3 – Ech. 2	89,5 %	40 %	0,95	30,6 %	A1th

Tableau 5 - Essais en laboratoire sur les alluvions limono-sableuses

#### - Essais pressiométriques :

La pression limite mesurée varie entre 0,11 MPa et 0,61 MPa avec une valeur moyenne de 0,28 MPa. Le module pressiométrique est dans une frange située entre 1,0 MPa et 12,3 MPa, la moyenne étant de 3,58 MPa. Le rapport EM/PI varie entre 4,8 et 25,1 avec une moyenne à 12,3.

Il s'agit donc de limons plutôt mous, en moyenne normalement consolidés.

Ces valeurs sont plus ou moins en accord avec la consistance "moyenne" appréciée par les sondeurs dans les sondages mécaniques.

Par corrélation (règles PS92), les valeurs pressiométriques permettent d'estimer les vitesses des ondes de cisaillement Vs. Ainsi, dans ces terrains, on estime Vs proches de 150 m/s. Ceci est en accord avec les mesures SASW.

- *Comparaison avec l'ancien site abandonné :*

Un premier horizon de sables argileux avait été rencontré sur ce site, son épaisseur étant toutefois réduite à moins de 1,5 m. Aucun essai en laboratoire ni essai mécanique n'était disponible. Par extrapolation, nous avons retenu une pression limite moyenne de 0,5 MPa.

Il est donc possible d'assimiler ce premier niveau rencontré sur le site d'étude actuel à l'horizon superficiel situé 300 m plus à l'Ouest. Néanmoins, la similitude est délicate à confirmer faute de données plus précises acquises lors de la campagne de 2005 (Roullé et al., 2005).

**iii) Alluvions vasardes**

- *Lithologie :*

Sur la base du log de forage SP2, seul sondage recoupant cette formation, il semblerait que l'on soit en présence de limons sableux vasards. On regrettera de ne disposer d'aucun essai d'identification sur ce matériau.

- *Epaisseur :*

Sous l'horizon superficiel (alluvions limono-sableuses), cette formation se développe sur 2,70 m de puissance entre 7,5 m et 10,2 m de profondeur.

- *Essais en laboratoire :*

Aucun essai en laboratoire n'est disponible pour caractériser cette formation.

- *Essais pressiométriques :*

La pression limite mesurée varie entre 0,09 MPa et 0,19 MPa avec une valeur moyenne de 0,13 MPa. Le module pressiométrique est dans une frange située entre 0,6 MPa et 1,2 MPa, la moyenne étant de 0,8 MPa. Le rapport EM/PI varie entre 5,8 et 6,7 avec une moyenne à 6,3.

Il s'agit donc de limons très mous, sous-consolidés.

Ces valeurs sont en accord avec des matériaux fins vasards.

Par corrélation (règles PS92), les valeurs pressiométriques permettent d'estimer les vitesses des ondes de cisaillement Vs. Ainsi, dans ces terrains, on estime Vs inférieure à 150 m/s. Ceci est en accord avec les mesures SASW.

- *Comparaison avec l'ancien site abandonné :*

Un horizon de sables argilo-silteux vasards avait été rencontré sur l'ancien site d'étude. L'épaisseur reconnue était de 6 à 10 m. Les essais pressiométriques avaient mis en évidence des valeurs assez comparables, voire légèrement supérieures, à celles obtenue sur le nouveau site de projet :  $p_l = 0,1$  à  $0,3$  MPa,  $E_M = 0,6$  à  $2,3$  MPa.

Les essais en laboratoire avaient mis en évidence un matériau assez plastique de type A2th qui ne s'était pas révélé liquéfiable (Roullé et al., 2005).

Il serait possible d'assimiler les deux niveaux vasards rencontrés à 300 m de distance. Néanmoins, la similitude est délicate à confirmer faute d'analyses en laboratoire lors de la campagne de reconnaissance 2008.

#### iv) Glacis d'érosion

- *Lithologie :*

Cette formation, issue du démantèlement des niveaux altéritiques en place, avec déplacement dans les pentes, a été rencontrée principalement en partie basse des versants dominant la plaine alluviale.

Il s'agit de limons argileux légèrement sableux.

- *Epaisseur :*

Lorsqu'il est présent, ce niveau superficiel placé sous la couche végétale, a été rencontré sur une épaisseur variant entre 1,0 m et plus de 4,4 m.

- *Essais en laboratoire :*

Le Tableau 6 indique les résultats du seul essai en laboratoire pratiqué sur cette formation.

	<b>C'</b>	<b><math>\phi'</math></b>
SM4 – CD1	11 kPa	36,4°

Tableau 6 - Essai en laboratoire sur les glacis d'érosion

- *Essais pressiométriques :*

La pression limite mesurée varie entre 0,21 MPa et 0,94 MPa avec une valeur moyenne de 0,63 MPa. Le module pressiométrique est dans une frange située entre 3,1 MPa et 17,7 MPa, la moyenne étant de 8,6 MPa. Le rapport EM/PI varie entre 9,3 et 25,8 avec une moyenne à 14,1.

Il s'agit donc de limons plutôt fermes, en moyenne légèrement sur-consolidés.

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

Ces valeurs sont en accord avec la consistance "moyenne" appréciée par les sondeurs dans les sondages mécaniques.

Par corrélation (règles PS92), les vitesses des ondes de cisaillement Vs dans ces terrains sont légèrement supérieures à 150 m/s. Ceci est en accord avec les mesures SASW.

#### v) Altérites en place

- *Lithologie :*

Les niveaux altéritiques en place s'apparentent à une formation mixte de roches très friables et de limon argileux de couleur brun clair à rouge. Localement des passées blanches de kaolinite fumerolienne sont visibles.

- *Epaisseur :*

Cet horizon n'a jamais été entièrement recoupé pour atteindre le substratum sain. On notera que lorsqu'il a été rencontré sa puissance minimale variait entre 0,3 m et 4 m.

Pour l'établissement des colonnes de sol, l'épaisseur de cette formation est estimée à partir des résultats des profils de SASW. Ceux-ci montrent une puissance d'environ 20 mètres.

- *Essais en laboratoire :*

Le Tableau 7 récapitule les résultats des principaux essais réalisés en laboratoire.

	passant à 80 $\mu\text{m}$	$w_n$	VBS	Opt. Proctor	cat. NFP11-300	C'	$\phi'$
SM2 – Ech. 1	96,7 %	44,5 %	0,61	35,6 %	A1th		
SM6 – CD2						1 kPa	38,1°

Tableau 7 - Essais en laboratoire sur les altérites en place

- *Essais pressiométriques :*

La pression limite mesurée varie entre 0,91 MPa et 1,32 MPa avec une valeur moyenne de 1,14 MPa. Le module pressiométrique est dans une frange située entre 9,5 MPa et 17,8 MPa, la moyenne étant de 13,8 MPa. Le rapport EM/PI varie entre 9,4 et 14,8 avec une moyenne à 12,3.

Ces valeurs mettent en évidence des matériaux plutôt compacts. On remarquera que cela n'est pas vraiment en accord avec la très faible cohésion mesurée en laboratoire traduisant des matériaux plutôt médiocres.

Par corrélation (règles PS92), les vitesses des ondes de cisaillement Vs dans ces terrains sont comprises entre 150 et 400 m/s. Ceci est en accord avec les mesures SASW.

**vi) Substratum sain**

- *Lithologie :*

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

- *Epaisseur :*

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

- *Essais en laboratoire :*

Aucun essai en laboratoire n'est disponible.

- *Essais pressiométriques :*

Sur ce site, nous ne disposons pas de résultats pressiométriques, néanmoins dans les basaltes sains, la valeur de pression limite peut largement excéder 5 MPa.

### c) Récapitulatif

Le Tableau 7 synthétise les données géotechniques exploitées.

Formation	Nature	Épaisseur	Caractéristiques pressiométriques	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
<b>Alluvions limono-sableuses</b>	Limon argilo-sableux, limon sableux	≤ 8 m	$PI_{moy} = 0,3 \text{ MPa}$ $E_{M-moy} = 3,6 \text{ MPa}$	Sols cohérents mous (groupe c)
<b>Alluvions vasardes</b>	Limons sableux	3 m	$PI_{moy} = 0,1 \text{ MPa}$ $E_{M-moy} = 0,8 \text{ MPa}$	Sols cohérents mous (groupe c)
<b>Glacis d'érosion</b>	Limons argileux	0 à 14 m	$PI_{moy} = 0,6 \text{ MPa}$ $E_{M-moy} = 8,6 \text{ MPa}$	Sols moyennement compacts (groupe b)
<b>Altérites en place</b>	Basalte très altéré et de limon argileux	20 m	$PI_{moy} = 1,1 \text{ MPa}$ $E_{M-moy} = 14 \text{ MPa}$	Sols cohérents moyennement consistants et roche très altérée (groupe b)
<b>Substratum sain</b>	Roche volcanique	> 10 m	$PI_{moy} > 5 \text{ MPa}$ $E_{M-moy} = 100 \text{ MPa}$	Rocher sain

Tableau 8 - Caractéristiques géotechniques moyennes des formations géologiques sur le site de Chirongui

#### 5.2.4. Hydrogéologie

Les sondages dans la plaine alluviale ont permis de mettre en évidence une nappe située entre 1,25 m et 2,90 m de profondeur (en février mars –saison des pluies). Ceci est en accord avec les observations sur le site abandonné où la nappe avait été repérée vers 3 m de profondeur (Roullé et al., 2005).

Par ailleurs les mesures de perméabilité dans les alluvions par essais d'infiltration ont montré des valeurs entre  $1,9 \cdot 10^{-6}$  m/s et  $1,3 \cdot 10^{-6}$  m/s tout à fait compatibles avec des limons sableux.

#### 5.2.5. Etablissement de colonnes de sols

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

- la lithologie des horizons : (sols cohérents, sols frottants ou rocher)
- la stratigraphie (séquence, épaisseur)
- les caractéristiques géomécaniques des horizons. Les formations lithologiques sont caractérisées par des valeurs moyennes telles que leur poids volumique ( $\gamma_h$ ). 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  $\gamma_c$ . A défaut d'essais de laboratoire spécifiques, les courbes  $G(\gamma)/G_{\max}$  &  $D(\gamma)$  utilisées sont issues de la littérature (Kokusho, 1980, et Darendeli, 2001), en tenant compte de la connaissance des différentes unités géomécaniques.

Le Tableau 9 récapitule les caractéristiques des deux colonnes de sols retenues pour l'étude.

On notera les points suivants :

- la nappe sera prise en compte environ 1 m sous la surface (hypothèse conservatrice reflétant des épisodes pluvieux intenses) ;
  - la colonne de sols n°1 est représentative pour le secteur de la plaine alluviale ;
  - la colonne de sols n°2 est représentative du reste de la zone d'étude (versants et crêtes).
- Concernant les vases limono-sableuses, dans la mesure où l'on se situe ni dans le cas d'un sable pur ni dans la configuration d'une argile, on adoptera le cas le plus conservateur entre une courbe  $G(\gamma)/G_{\max}$  &  $D(\gamma)$  avec une densité relative  $DR = 30 \%$  et une courbe avec un indice de plasticité  $IP = 15$ .

L'illustration 10 indique la répartition des zones représentées par chaque colonne de sols :

- en vert : la plaine alluviale (colonne 1)
- en jaune et rouge : les crêtes et versants (colonne 2).

Formation	Nature	Catégorie PS 92 <sup>(1)</sup>	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> ) <sub>(2)</sub>	Caractéristiques géomécaniques de base <sup>(3)</sup>	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Epaisseur	
							col. 1 Plaine alluviale	col. 2 Crêtes et versants
Alluvions limono- sableuses	Limons plus ou moins sableux	Sols lâches (groupe c)	18,0	Dr = 30 % ou Ip = 20	150	280	8 m	-
Vases limono- sableuses	Limons sableux	Sols lâches (groupe c)	16,0	Dr = 30 % ou Ip = 20	150	300	3 m	-
Glacis d'érosion	Limons argileux	Sols cohérents moyennement consistants (groupe b)	19,0	Dr = 30 % ou Ip = 20	250	400	-	5 m
Argiles d'altération	Limons argileux plastique	Sols cohérents moyennement consistants (groupe b)	19,0	Ip = 50	300	450	20 m	20 m
Roche saine	Roche volcanique	Rocher sain	23,0	-	800	1200	> 10 m	> 10 m

(1) Norme NF P 06-013 - (2) Dédit des Recommandations pour le calcul aux états limites des ouvrages maritimes et fluviaux (STCPMVN) - (3) Valeurs issues des reconnaissances d'archives ; Vs : vitesse des ondes de cisaillement en m/s; Vp : vitesse des ondes longitudinales ; Dr = densité relative ; Ip = Indice de plasticité

Tableau 9 - Colonnes de sol retenues pour le site de Chirongui



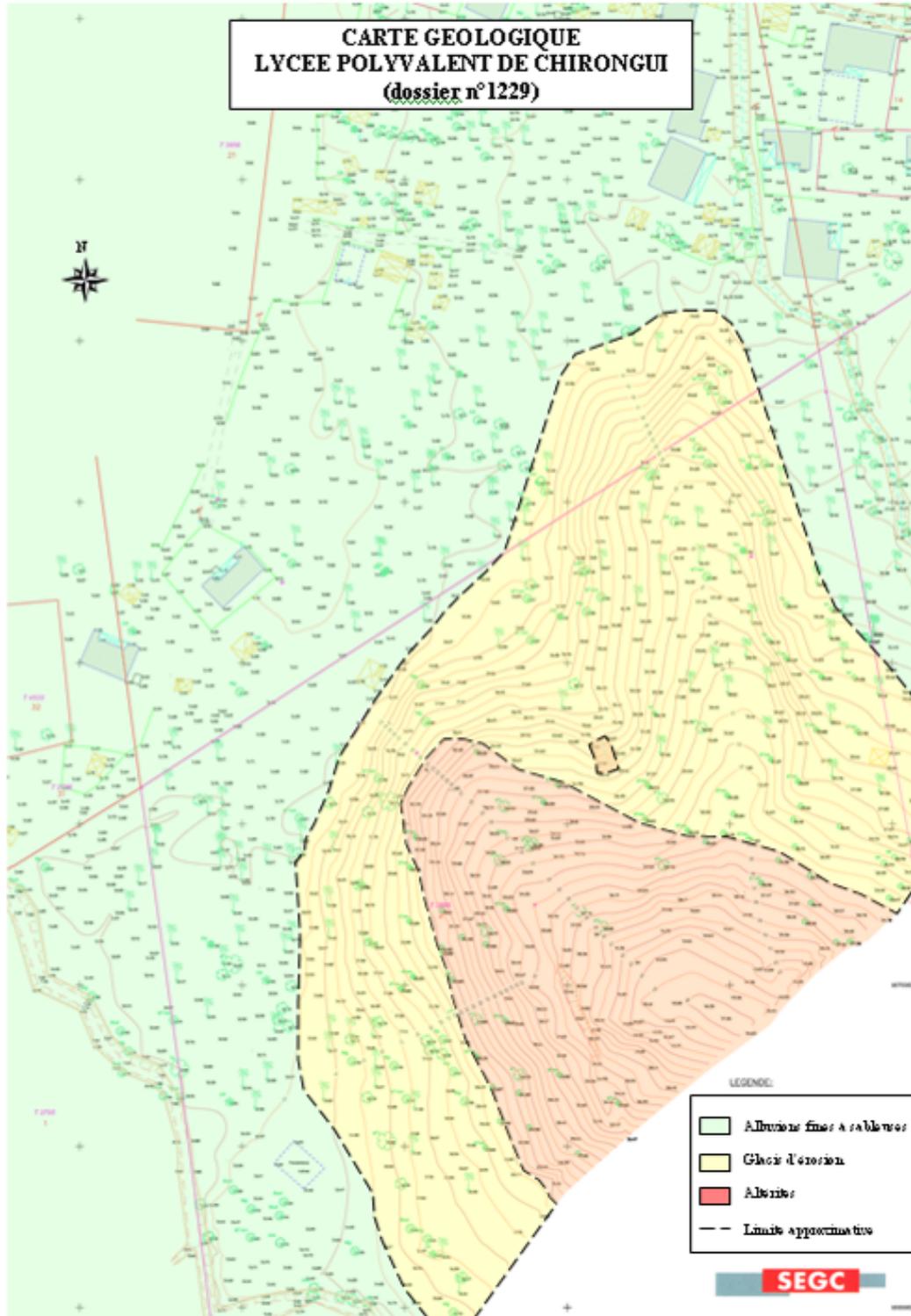


Illustration 10 - Carte géologique interprétative du site de Chirongui (doc. SEGC)

### 5.3. ESTIMATION DU SPECTRE DE REPONSE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE POUR LE SITE DU LYCEE DE CHIRONGUI

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

Ainsi, pour chacune des deux colonnes de sol identifiées, un spectre de réponse est calculé pour chaque accélérogramme réel et réel modifié (Illustration 11 et Illustration 14). 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 l'illustration 12 et l'illustration 15, respectivement pour les colonnes 1 et 2.

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 10 et le Tableau 11 pour chacun des spectres à 2, 5, 10 et 20 % d'amortissement. On interpolera sur les diagrammes logarithmiques, pour les valeurs intermédiaires de déplacement, de vitesse et d'accélération.

Ils peuvent également être représentés comme l'accélération spectrale (en g) en fonction de la période T (en s), sur l'illustration 13 et l'illustration 16.

#### 5.3.1. Colonne n°1 : Plaine alluviale

**L'accélération horizontale maximale du sol tenant compte des conditions de site au niveau de la colonne de sol n°1 du site du futur lycée de Chirongui est de 0.28 g (soit 2.7 m/s<sup>2</sup>).**

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

$$a_1 = 0,190 \qquad a_2 = 0,122$$
$$g_1(T) = \frac{10^{(3,16+2,08 \cdot \log_{10} T)}}{156,13 \cdot T}$$

avec : T, la période (en secondes).

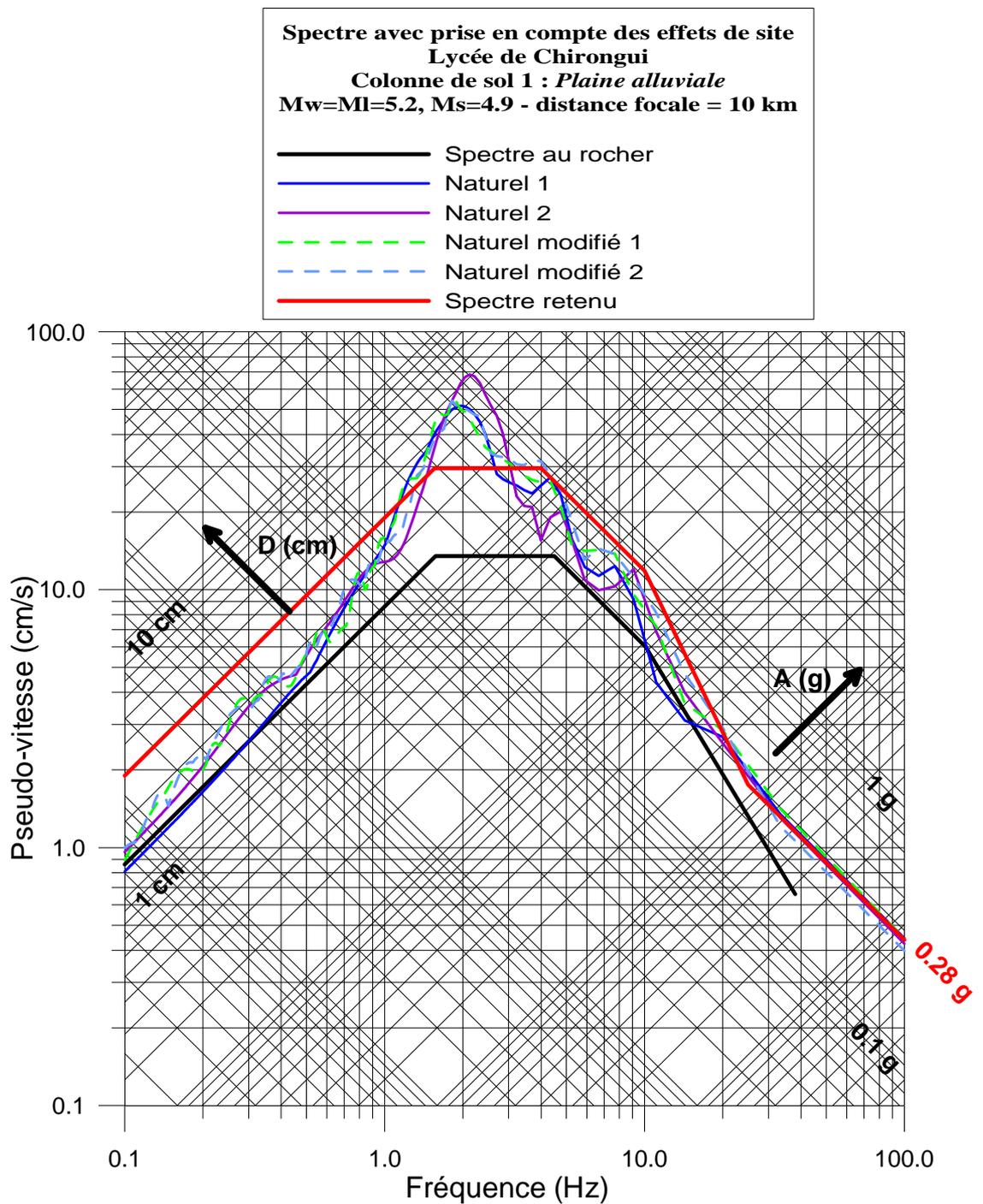
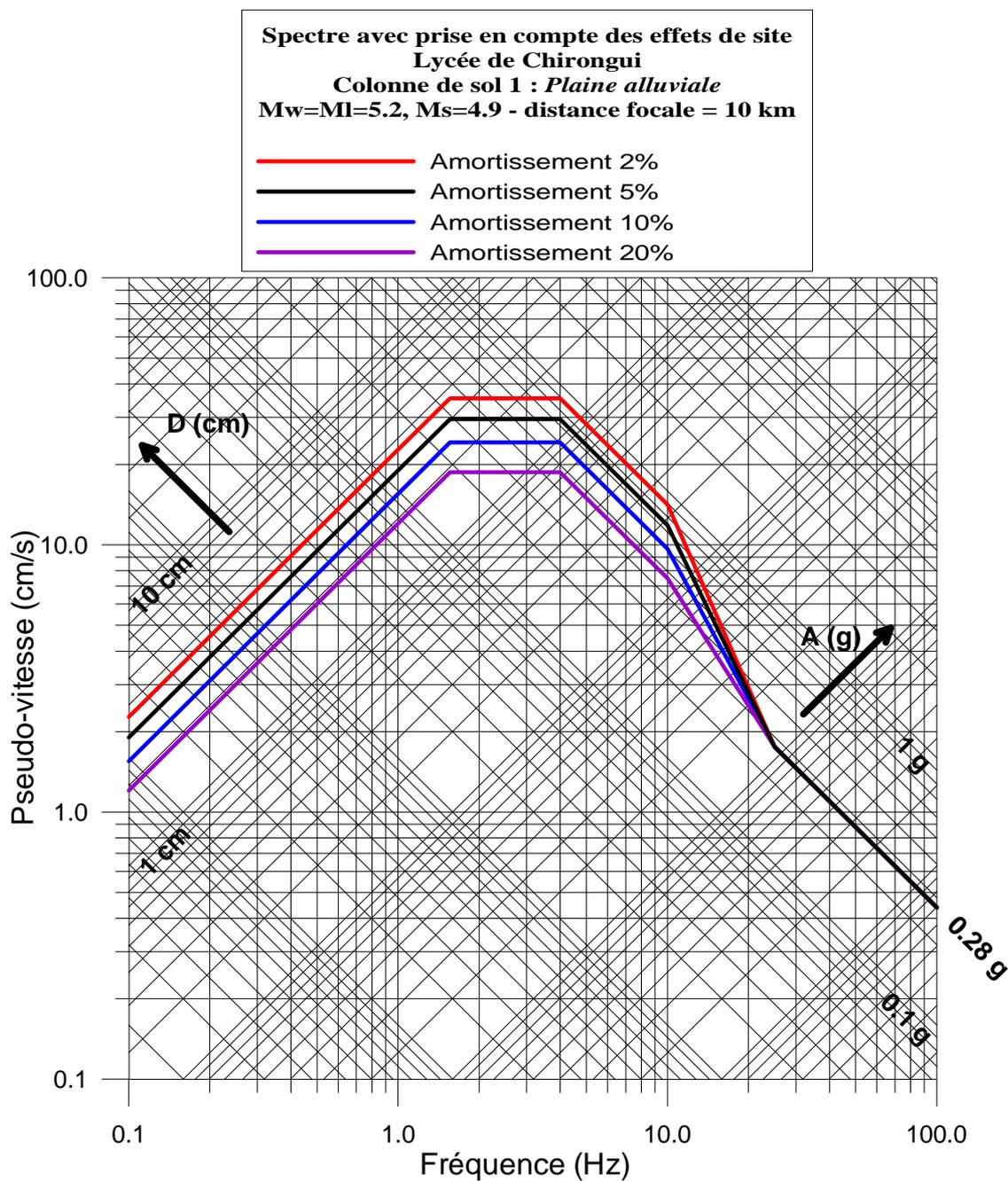


Illustration 11 - Spectres de réponse à 5 % des accélérogrammes synthétiques et réels tenant compte des effets de site pour la colonne de sol n°1 du site du lycée de Chirongui.



*Illustration 12 - Spectre retenu pour la colonne de sol n°1 du site du lycée de Chirongui - 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	2.27	3.61
	5	0.001	1.90	3.02
	10	0.001	1.55	2.47
	20	0.001	1.20	1.91
1.56	2	0.35	35.37	3.61
	5	0.30	29.59	3.02
	10	0.24	24.16	2.47
	20	0.19	18.72	1.91
4	2	0.91	35.37	1.41
	5	0.76	29.59	1.18
	10	0.62	24.16	0.96
	20	0.48	18.72	0.74
10	2	0.91	14.15	0.23
	5	0.76	11.84	0.19
	10	0.62	9.67	0.15
	20	0.48	7.49	0.12
25	tous amortissements	0.28	1.75	0.01
100	tous amortissements	0.28	0.44	0.0007

Tableau 10 - Spectre retenu pour la colonne de sol n°1 du site du lycée de Chirongui - Spectre de réponse élastique horizontale avec prise en compte des effets de site. Valeurs de A, V et D.

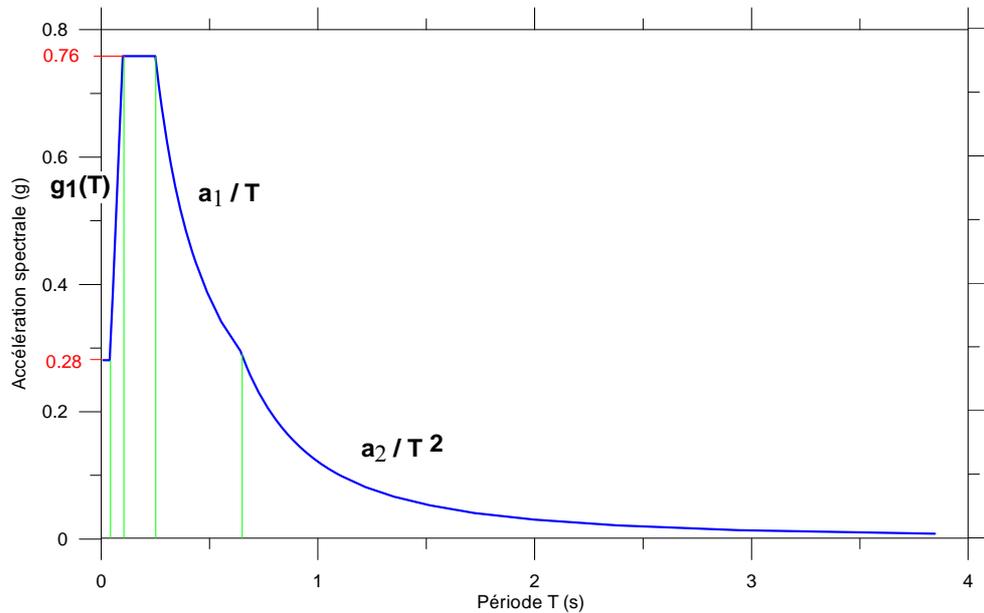


Illustration 13 - Spectre retenu pour la colonne de sol n°1 du site du lycée de Chirongui - Spectre de réponse élastique horizontale avec prise en compte des effets de site en accélération en fonction de la période, amortissement 5%.

### 5.3.2. Colonne n°2 : Crêtes et versants

**L'accélération horizontale maximale du sol tenant compte des conditions de site au niveau de la colonne de sol n°2 du site du futur lycée de Chirongui est de 0.30 g (soit 2.9 m/s<sup>2</sup>).**

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

$$a_1 = 0,174$$

$$a_2 = 0,090$$

$$g_1(T) = \frac{10^{(2,89+1,80 \cdot \log_{10} T)}}{156,13 \cdot T}$$

avec :  $T$ , la période (en secondes).

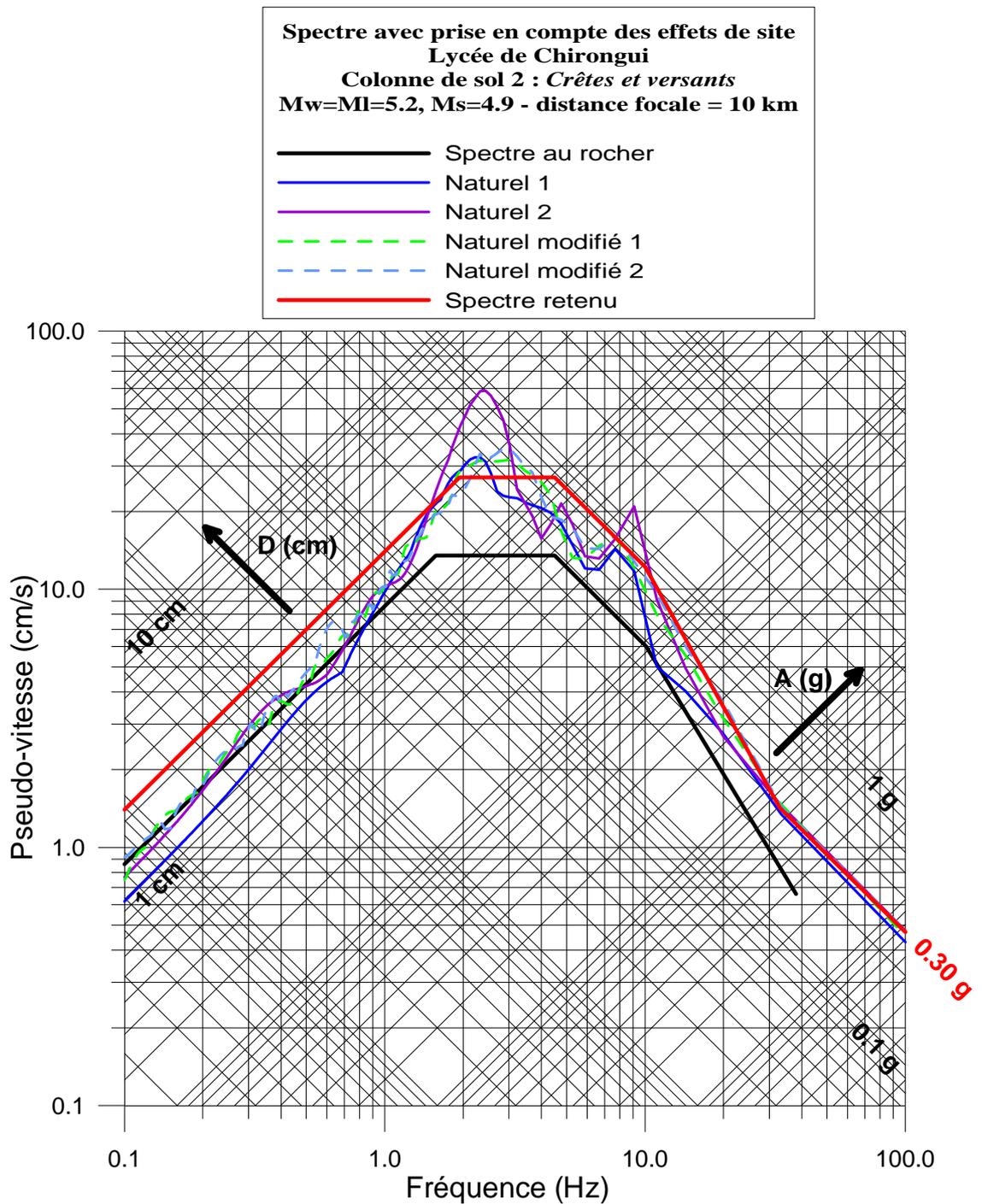


Illustration 14 - Spectres de réponse à 5 % des accélérogrammes synthétiques et réels tenant compte des effets de site pour la colonne de sol n°2 du site du lycée de Chirongui.

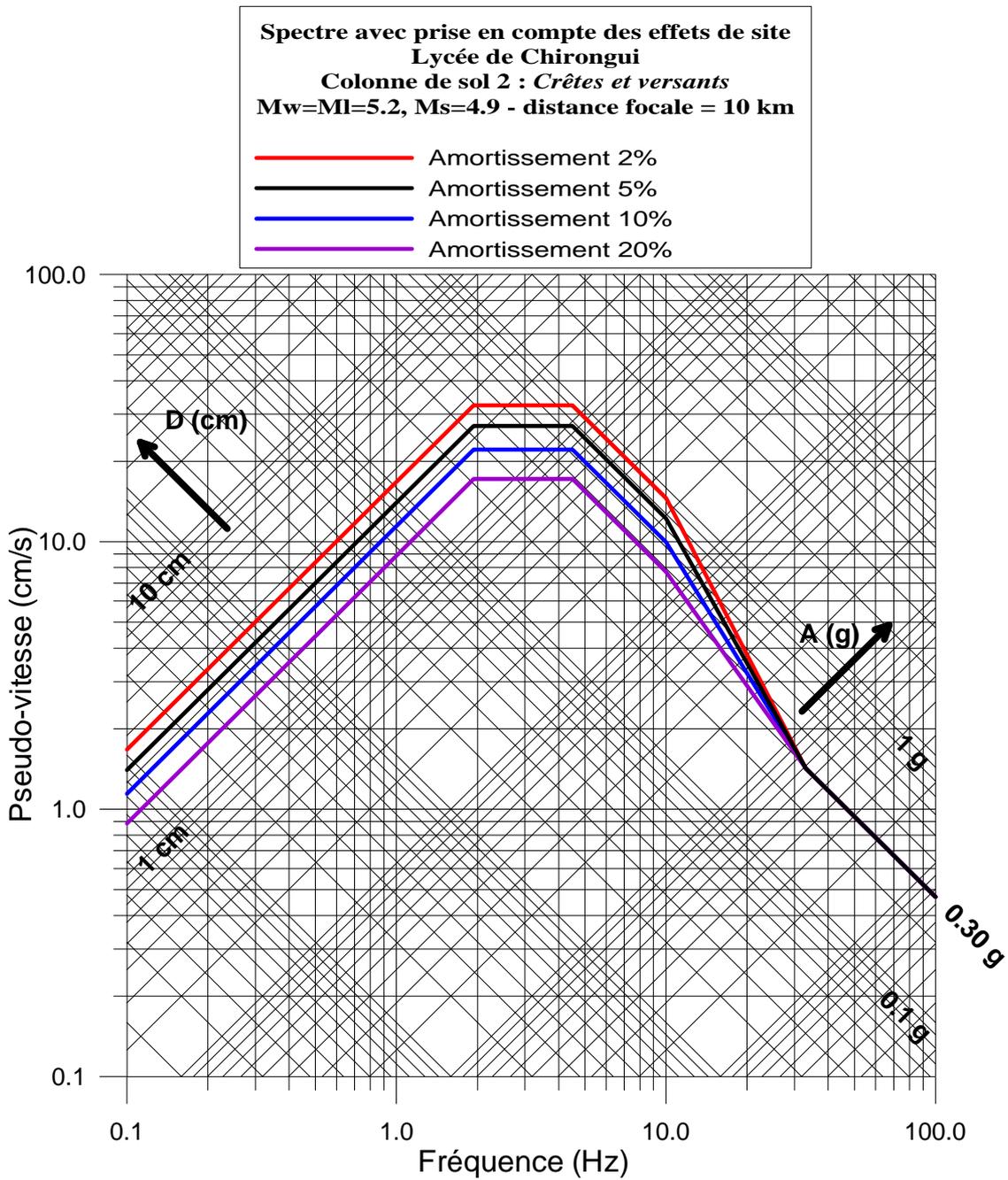


Illustration 15 - Spectre retenu pour la colonne de sol n°2 du site du lycée de Chirongui - Spectre de réponse élastique horizontale avec prise en compte des effets de site. Amortissements : 2, 5, 10 et 20 %.

F (Hz)	Amortissement (%)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
0.1	2	0.001	1.67	2.66
	5	0.001	1.40	2.23
	10	0.001	1.14	1.82
	20	0.001	0.89	1.41
1.94	2	0.40	32.41	2.66
	5	0.34	27.12	2.23
	10	0.27	22.14	1.82
	20	0.21	17.15	1.41
4.5	2	0.93	32.41	1.15
	5	0.78	27.12	0.96
	10	0.64	22.14	0.78
	20	0.49	17.15	0.61
10	2	0.93	14.59	0.23
	5	0.78	12.20	0.19
	10	0.64	9.96	0.16
	20	0.49	7.72	0.12
33	tous amortissements	0.30	1.42	0.01
100	tous amortissements	0.30	0.47	0.0007

Tableau 11 - Spectre retenu pour la colonne de sol n°2 du site du lycée de Chirongui - Spectre de réponse élastique horizontale avec prise en compte des effets de site. Valeurs de A, V et D.

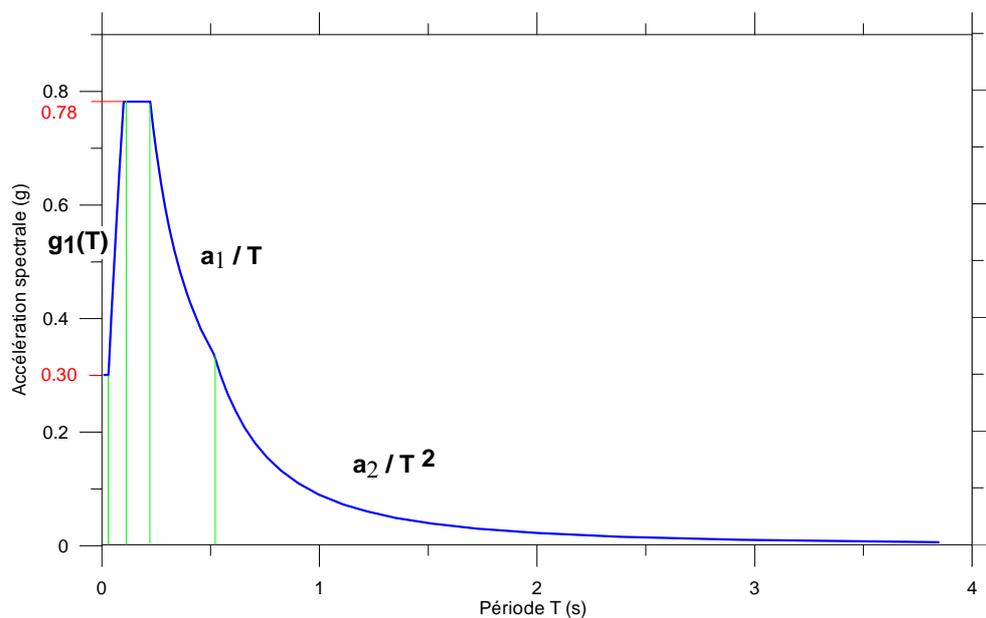


Illustration 16 - Spectre retenu pour la colonne de sol n°2 du site du lycée de Chirongui - Spectre de réponse élastique horizontale avec prise en compte des effets de site en accélération en fonction de la période, amortissement 5%.

## 5.4. ANALYSE DES POTENTIALITÉS DE LIQUEFACTION

### 5.4.1. Définition et méthode

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

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

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

- qu'il y ait susceptibilité du sol à la liquéfaction, c'est-à-dire qu'il soit plutôt granulaire, dans un état peu compact, peu contraint et situé sous la nappe (exemple des sables fins 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.

### 5.4.2. 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 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 <sup>1</sup>.

#### b) Critères d'exclusion :

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

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

---

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

### 5.4.3. 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 :

- $\tau_L$ , contrainte de cisaillement cyclique moyenne horizontale (résistance du sol);
- $\sigma'_v$ , contrainte verticale effective.

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

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

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

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

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.

$$C_N = 1 - (1,25 \cdot \log \sigma'_v) \text{ avec } \sigma'_v \text{ en bars}$$

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

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

Le taux de contrainte cyclique moyen nécessaire pour avoir la liquéfaction est alors obtenu grâce à l'abaque de Seed pour une magnitude et une valeur  $N_1$  données. On notera que cette valeur doit être corrigée pour tenir compte du séisme réel de calcul.

### 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,

$\tau_a$  = 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  $FS_\ell$  doit être supérieur à 1,33 s'il est calculé directement selon la méthode Seed, c'est-à-dire à partir d'essais SPT (critère des PS92). Dans le cas où, on est amené à utiliser des corrélations pour se ramener au N SPT, on tient parfois compte des incertitudes supplémentaires, en requérant un coefficient de sécurité plus élevé, de l'ordre de 1,6.

Selon les directives de la norme NF P 06-013 (PS92), dès que ce critère n'est pas respecté, le site est jugé liquéfiable et nécessite un renforcement. Néanmoins, cette approche nous paraît très conservatrice pour des installations à risque normal de classe B ou C. Il nous semble plus réaliste d'intégrer à la démarche la potentialité de liquéfaction sur l'ensemble de la colonne de sol représentative en utilisant l'approche consistant à évaluer l'intensité de liquéfaction.

### 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, 1993), l'intensité de liquéfaction est définie par l'indice global de liquéfaction (Iwasaki & al., 1982) à partir du facteur  $F_L$ .

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

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

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

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

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

$z$  profondeur (en m)

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

- pas de liquéfaction : zones non liquéfiables ou  $I_L = 0$  ;
- liquéfaction peu probable :  $0 < I_L \leq 5$  ;
- liquéfaction probable :  $5 < I_L \leq 15$  ;
- liquéfaction quasi certaine :  $I_L > 15$  .

#### **5.4.4. Appréciation des potentialités de liquéfaction du site du lycée de Chirongui**

##### **a) Carte d'aléa issue des atlas des risques**

La carte issue des atlas des risques met en évidence, a priori, une susceptibilité moyenne à la liquéfaction dans la plaine alluviale recoupant une partie du projet.

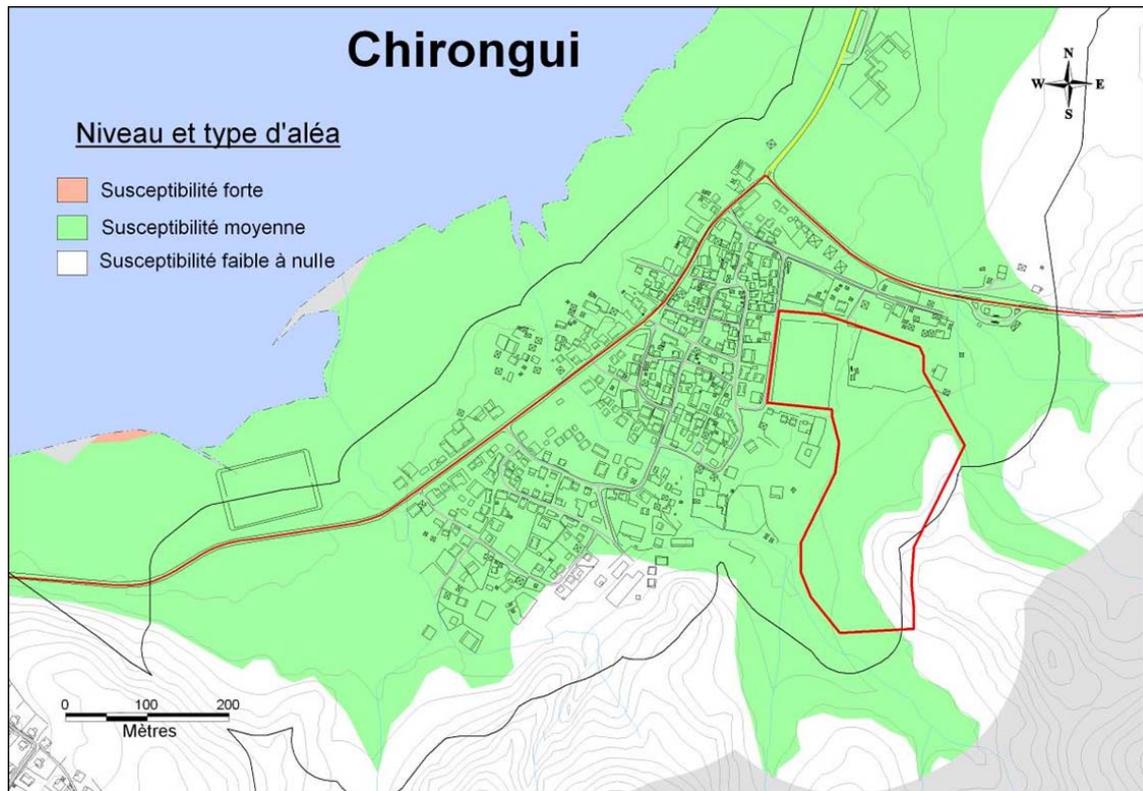


Illustration 17 - Carte d'aléa liquéfaction issue des atlas des aléas<sup>2</sup> pour le site de Chirongui

### **b) Formations à analyser**

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

- les glacis d'érosion ;
- les altérites en place ;
- le substratum sain.

À l'opposé, les horizons constitués de limons sableux plus ou moins vasard doivent faire l'objet d'une analyse plus fine, dans la mesure où leur susceptibilité à la liquéfaction ne peut être définie *a priori*.

---

<sup>2</sup> C. Cluzet, A. Oppermann, A. Malard, L. Françoise. (2009) : Mise à jour des atlas des aléas naturels sur 12 communes de Mayotte, commune de Chirongui. Rapport BRGM/RP-57568-FR, 30 p., 25 figures.

### c) Contexte hydrogéologique

Les alluvions limono-sableuses sont en partie sous nappe (nappe de projet vers 1 m de profondeur).

L'horizon vasard est supposé être intégralement sous nappe.

### d) Susceptibilité qualitative à la liquéfaction

- Alluvions limono-sableuses :

Seules les alluvions limono-sableuses ont fait l'objet de l'étude détaillée suivante, dans la mesure où des essais en laboratoire sont disponibles sur le site de projet.

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).

Une des deux granulométries disponibles dans les rapports d'essais a été faite dans les alluvions limono-sableuses superficielles. Cette courbe a été superposée aux fuseaux granulométriques délimitant le domaine de la plupart des sols liquéfiables (Illustration 18).

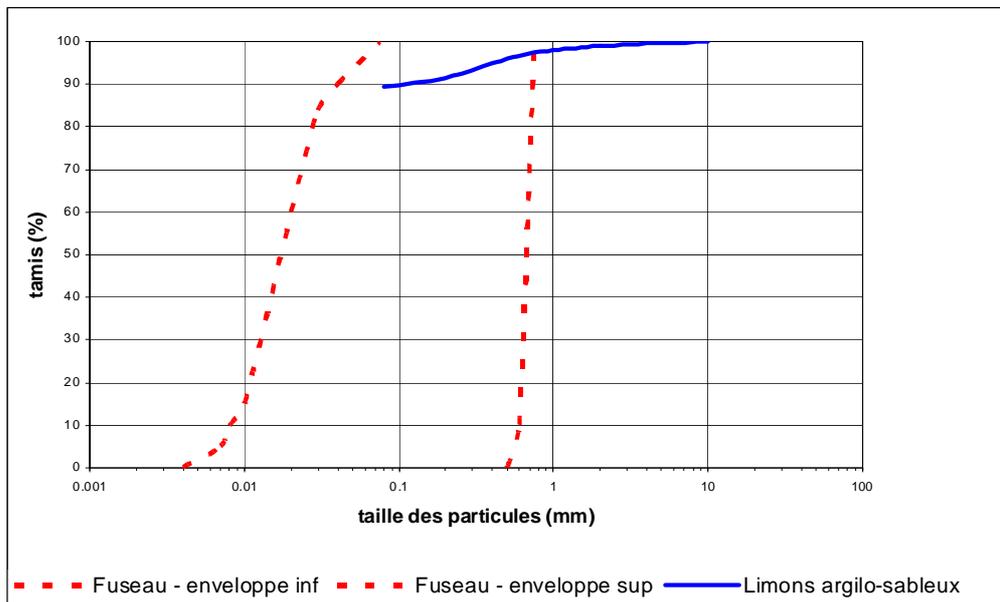


Illustration 18 - Courbes granulométriques des alluvions limono-sableuses

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

- granulométrie trop étalée
- matériaux trop fins.

Vis à vis des critères de suspicion et d'exclusion spécifiés dans les PS 92, le Tableau 12 récapitule les résultats obtenus.

<b>Nature</b>	<b>Critères de suspicion</b>	<b>horizon vasard</b>
Sables	$S_r$ voisin de 100 %	non adapté
	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$	non adapté
	$0,05 < D_{50} < 1,5mm$	non adapté
	$\sigma'_v < 200kPa$ en zones de sismicité Ia et Ib ;	non adapté
Argiles	$D_{15} > 5\mu$	<b>NON</b> (a priori par extrapolation de la courbe)
	$w_L < 35\%$	Pas de données suffisantes pour utiliser le critère
	$w > 0,9 \cdot w_L$	Pas de données suffisantes pour utiliser le critère
	Sol au-dessus de la droite « A » du diagramme de plasticité	Pas de données suffisantes pour utiliser le critère
<b>Nature</b>	<b>Critères d'exclusions</b>	<b>horizon vasard</b>
Sables	$D_{10} > 2mm$	non adapté
Argiles	$\begin{cases} D_{70} < 74\mu m \\ I_p > 10\% \end{cases}$	Pas de données suffisantes pour utiliser le critère

Tableau 12 - Examen des critères de susceptibilité qualitative (règles PS 92)

Les critères de suspicion ne peuvent être utilisés faute de résultats d'essais d'Atterberg faits sur les échantillons prélevés (manquent la limite de liquidité et l'indice de plasticité).

Néanmoins, concernant l'indice de plasticité IP, il est possible de l'estimer approximativement à partir des corrélations entre IP et la valeur au bleu (même si ces corrélations sont moins fiables pour des limons que pour des argiles). Ainsi pour une valeur au bleu de 0,95, l'indice de plasticité est proche de 10 %. Cependant cela ne permet pas de trancher clairement dans l'utilisation des critères d'exclusion pour lequel le seuil d'IP est de 10 également.

En conséquence, seules les granulométries semblent démontrer que ce matériau est trop fin pour ne pas être liquéfiable, mais cela ne suffit pas au sens de la norme PS92.

**Par conséquent, à défaut d'éléments plus précis, et dans l'attente de données complémentaires, le potentiel de liquéfaction de cette formation n'a pas été écarté. L'analyse a donc été poursuivie afin d'évaluer le potentiel quantitatif.**

- Alluvions vasardes :

A défaut d'essais en laboratoire sur cette formation, il est impossible de préciser le potentiel de liquéfaction. Par similitude, il serait envisageable d'associer cette formation à l'horizon vasard rencontré sur l'ancien site d'étude. L'étude de l'époque avait démontré que les matériaux étaient trop fins et trop plastiques pour être liquéfiables (Roullé et al., 2005).

**Par conséquent, à défaut d'éléments plus précis, et dans l'attente de données complémentaires, le potentiel de liquéfaction de cette formation n'a pas été écarté. L'analyse a donc été poursuivie afin d'évaluer le potentiel quantitatif.**

**e) Susceptibilité quantitative et opportunité à la liquéfaction**

Le calcul a été réalisé pour la colonne de sol 1 présentée dans le Tableau 9 :

- (terre végétale négligée)
- entre 0 et 8 m de profondeur : alluvions limono-sableuses
- entre 8 et 11 m de profondeur : alluvions vasardes
- au-delà de 11 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 alluvions limono-sableuses, nous avons retenu les valeurs suivantes relativement conservatrices :

- $p_l = 0,3 \text{ MPa} \rightarrow N = 9$
- $\sigma_h = 18 \text{ kN/m}^3$

Pour les alluvions vasardes :

- $p_l = 0,1 \text{ MPa} \rightarrow N = 3$
- $\sigma_h = 16 \text{ kN/m}^3$

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 % (cf. Illustration 19)

La magnitude du séisme de référence est de 5,2. L'accélération maximale sur site considérée pour le calcul est de  $2,7 \text{ m/s}^2$ , conformément aux résultats acquis dans les chapitres précédents (voir 5.3).

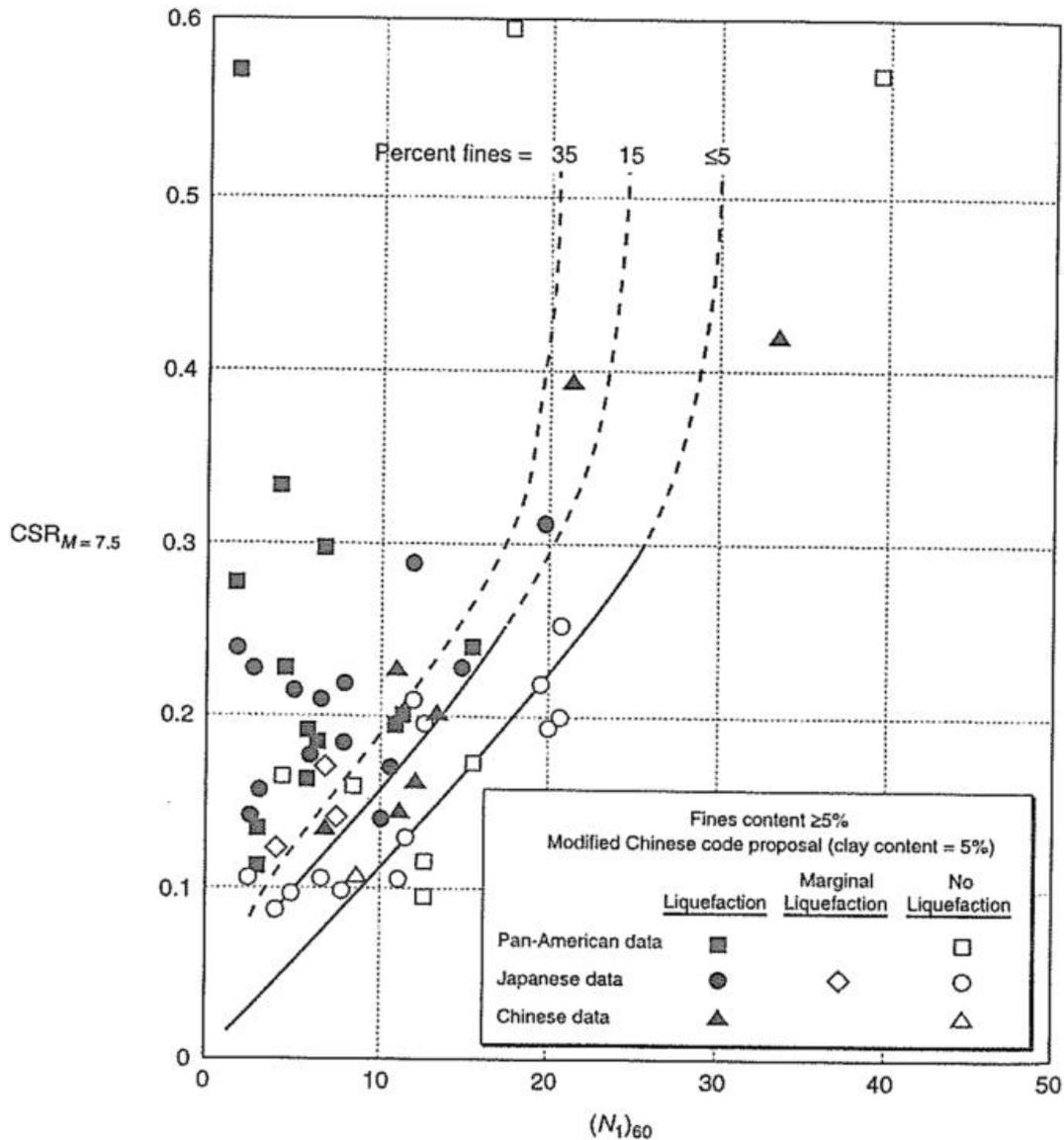


Illustration 19 - Abaque ( $\tau_L / \sigma'_{v,}$ ) $_z$  en fonction de  $N_1$  (Seed)

Coefficient de sécurité, potentialités et intensité de la liquéfaction :

Les facteurs de sécurité ont été calculés pour la colonne de sol n°1 précédemment décrite, dans l'hypothèse d'une nappe placée à 1 m de profondeur (hypothèse conservatrice illustrant les périodes de pluie extrême). Il ressort du calcul (cf. Tableau 13) que le facteur de sécurité est insuffisant à la base des alluvions limono-sableuses et sur toute l'épaisseur des alluvions vasardes –  $F < 1,33$  entre 2 m et 11 m de profondeur (sous réserve que ces formations présentent une lithologie propice à la liquéfaction).

**CHIRONGUI**

Position de la nappe : z = 1 m

Profondeur (m)		Horizon	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_v$ (kPa)	$\sigma'_v$ (kPa)	calcul de $(\tau/\sigma')_{vs}$			calcul de $(\tau/\sigma')_l$						Facteur de sécurité FS <sub>i</sub>	Intensité liquéfaction		
ht et bas	moy.						$a_{max}$ (m/s <sup>2</sup> )	$r_d$	$(\tau/\sigma')_{vs}$	pl (MPa)	N <sub>équ.</sub>	C <sub>N</sub>	N <sub>1</sub>	$(\tau/\sigma')_l$ (brut)	$(\tau/\sigma')_l$ (corrigé)		F <sub>L</sub>	I <sub>Li</sub>	I <sub>L</sub>
0 - 1 m	0.5	Alluvions limono-sableuses	18	8	9	9	2.7	0.9998	0,175	0.3	9	2.3072	21	0.450	0.675	3,8469	0,0000	0,0000	13.1
1 - 2 m	1.5	Alluvions limono-sableuses	18	8	27	22	2.7	0.9983	0,215	0.3	9	1.8220	16	0.260	0.390	1,8138	0,0000	0,0000	
2 - 3 m	2.5	Alluvions limono-sableuses	18	8	45	30	2.7	0.9953	0,262	0.3	9	1.6536	15	0.250	0.375	1,4312	0,0000	0,0000	
3 - 4 m	3.5	Alluvions limono-sableuses	18	8	63	38	2.7	0.9908	0,288	0.3	9	1.5253	14	0.240	0.360	1,2488	0,0000	0,0000	
4 - 5 m	4.5	Alluvions limono-sableuses	18	8	81	46	2.7	0.9848	0,304	0.3	9	1.4216	13	0.220	0.330	1,0843	0,0000	0,0000	
5 - 6 m	5.5	Alluvions limono-sableuses	18	8	99	54	2.7	0.9773	0,314	0.3	9	1.3345	12	0.210	0.315	1,0017	0,0000	0,0000	
6 - 7 m	6.5	Alluvions limono-sableuses	18	8	117	62	2.7	0.9683	0,321	0.3	9	1.2595	11	0.200	0.300	0,9355	0,0645	0,4355	
7 - 8 m	7.5	Alluvions limono-sableuses	18	8	135	70	2.7	0.9578	0,324	0.3	9	1.1936	11	0.200	0.300	0,9254	0,0746	0,4663	
8 - 9 m	8.5	alluvions vasardes	16	6	152	77	2.7	0.9458	0,328	0.1	3	1.1419	3	0.050	0.075	0,2289	0,7711	4,4339	
9 - 10 m	9.5	alluvions vasardes	16	6	168	83	2.7	0.9323	0,331	0.1	3	1.1012	3	0.050	0.075	0,2265	0,7735	4,0611	
10 - 11 m	10.5	alluvions vasardes	16	6	184	89	2.7	0.9173	0,333	0.1	3	1.0633	3	0.050	0.075	0,2253	0,7747	3,6796	
11 - 20 m	12	Niveau non liquéfiables														> 2	0	0	

Tableau 13 - Site de Chirongui - Calcul de la susceptibilité et de l'intensité de liquéfaction

Par ailleurs, les potentialités de liquéfaction supposées conduisent à une valeur d'intensité de la liquéfaction (indice d'Iwasaki) légèrement inférieure à 15, ce qui est relativement important. En effet, conformément à la classification établie dans le guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique (AFPS), **la liquéfaction au droit du site en cas d'occurrence du séisme de référence serait probable, voire « quasi-certaine »** (la valeur limite de  $I_L$  entre ces deux catégories de zones étant de 15).

Cela signifie qu'en cas de susceptibilité qualitative avérée des alluvions présentes sur le site de Chirongui, les terrains devraient être considérés comme liquéfiables lors d'un séisme important. Cela conduirait donc à imposer des mesures de renforcement des terrains et/ou du bâti pour toutes les structures lourdes et peu déformables qui seraient prévues dans la plaine alluviale.

#### **f) Préconisations en terme de dispositions constructives**

Dans la mesure où la susceptibilité qualitative des alluvions à la liquéfaction nécessite d'être vérifiée, dans un contexte où a priori les sols présents se révèlent probablement trop fins, il apparaît prématuré de définir précisément des solutions de renforcement du site au niveau de la plaine alluviale. Néanmoins, il est possible de rappeler les principales solutions traditionnelles permettant de construire sur sol liquéfiable :

- *Traitement des sols :*
  - Vibroflottation ;
  - Compactage dynamique ;
- *Confortement du bâti :*
  - Fondations profondes (en négligeant le frottement latéral dans les sols liquéfiables et en vérifiant la stabilité au flambement) ;
  - Construction sur radier renforcé et renforcement du chaînage ;
  - Absence ou renforcement des éléments très élancés (cheminées, mâts, etc.) ;
- *Maitrise des facteurs aggravants :*
  - Joints souples sur les réseaux de fluide à la sortie des bâtiments ;
  - Absence de fouilles non soutenues ou de talus raides.

## 5.5. CONCLUSIONS RELATIVES AU POTENTIEL DE LIQUEFACTION SUR LE SITE DE CHIRONGUI

Concernant la liquéfaction des sols sur le site du futur Lycée de Chirongui, il convient en premier lieu de distinguer deux zones :

- les versants et crêtes (Est et Sud du Site) où aucun sol liquéfiable n'est présent ;
- la plaine alluviale (Ouest et Nord du site) où, en cas de susceptibilité qualitative avérée à la liquéfaction, un risque important de liquéfaction jusqu'à environ 11 m de profondeur serait à craindre. Ceci nécessiterait alors un renforcement important pour implanter toute construction lourde et peu déformable dans cette zone.

Néanmoins, faute de données de laboratoire suffisantes sur les alluvions, il n'a pas été possible de vérifier rigoureusement le potentiel de liquéfaction des alluvions présentes sur le site. Seule une granulométrie dans l'horizon supérieur est exploitable, semblant mettre en avant des terrains trop fins pour être liquéfiables. Par ailleurs, l'étude de 2005, faite sur l'ancien site de projet situé à quelques centaines de mètres de là avait permis d'écarter tout potentiel de liquéfaction (Roullé et al., 2005).

**Donc, dans la plaine alluviale, même si certains indices conduisent à penser que les terrains sont trop fins pour être liquéfiables, il est impossible en l'état d'écarter ce risque sans disposer d'éléments complémentaires.**

En conséquence, **pour lever cette incertitude, nous recommandons de réaliser un forage complémentaire de 15 m à la tarière au cœur de la zone alluviale du projet** (non loin du sondage SP1). Deux échantillons remaniés seront prélevés par horizon alluvial (2 dans l'horizon supérieur et 2 dans l'horizon inférieur vasard). Les essais suivants en laboratoire seront pratiqués sur chaque échantillon :

- Poids volumique humide ;
- Teneur en eau naturelle ;
- Limites d'Atterberg ;
- Granulométrie et sédimentométrie.



## 6. Détermination des spectres de réponse tenant compte des conditions de site pour le site de l'extension du collège de Labattoir

### 6.1. LOCALISATION DU PROJET ET CADRE GEOLOGIQUE

Le collège de Labattoir, situé sur Petite Terre, est destiné à être agrandi par la création de nouvelles infrastructures au Sud Est des bâtiments principaux existants, dans l'emprise même de l'établissement actuel (cf. Illustration 20). Le collège est situé dans une zone légèrement pentée (5 à 10 % en direction de l'Ouest).

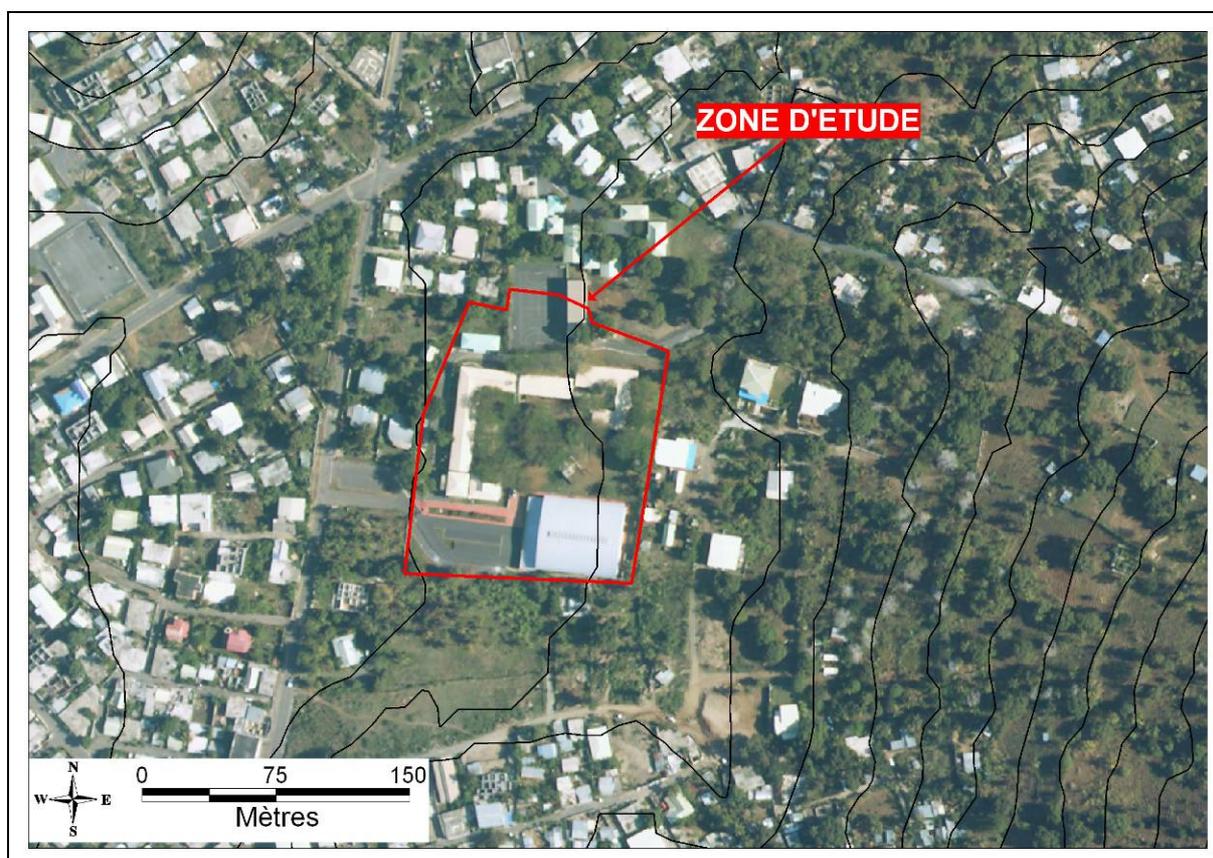


Illustration 20 - Vue aérienne de la zone d'étude (orthophoto IGN 2008)

D'après la carte géologique de Mayotte (BRGM 1988) (cf. Illustration 21), la zone de projet est située sur des formations pyroclastiques (cendres et ponces) appartenant aux formations volcaniques Holocène et Pléistocène.

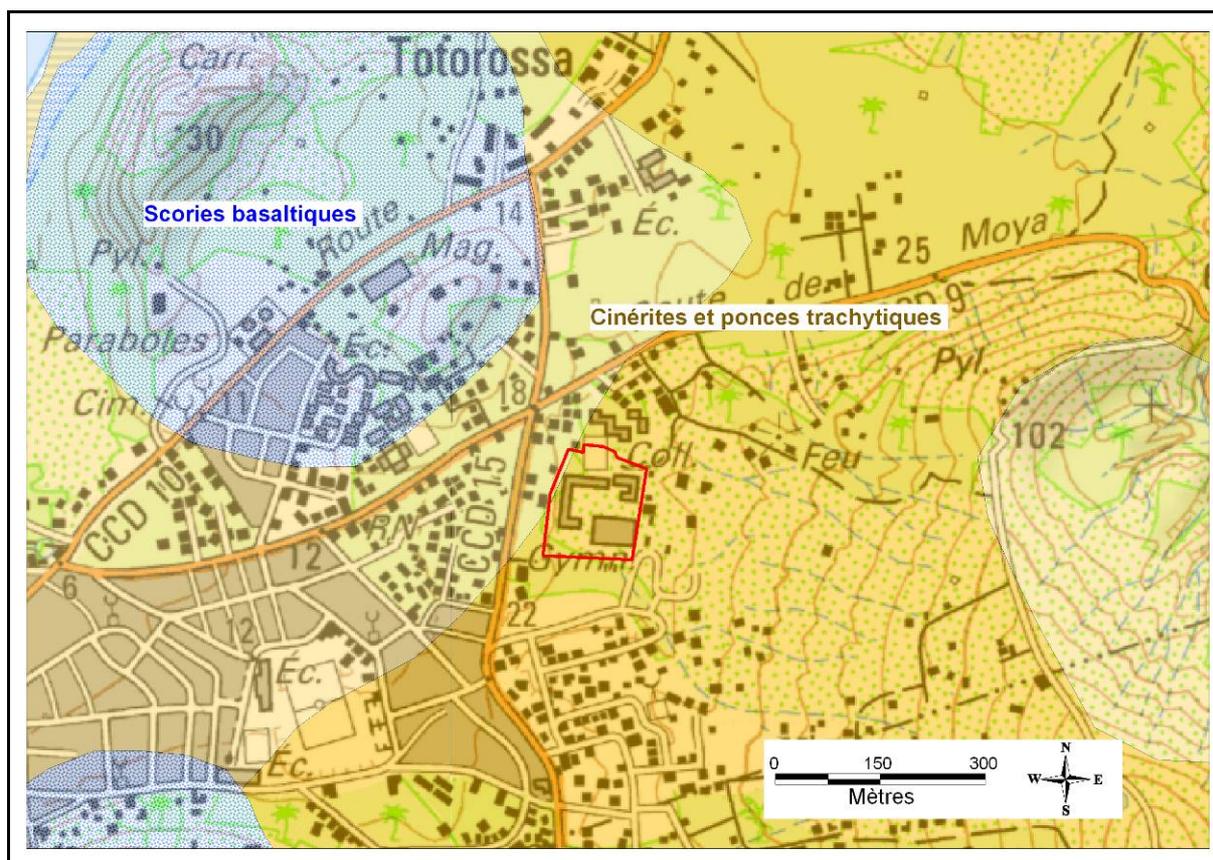


Illustration 21 - Extrait de la carte géologique de Mayotte (BRGM 1988)

## 6.2. SYNTHÈSE GEOTECHNIQUE

### 6.2.1. Préambule

L'objectif de cette analyse géotechnique spécifique au site de Labattoir est multiple :

- a) identifier et caractériser une ou plusieurs colonnes de « sol » (formations géologiques) représentatives du site en dehors des zones où le rocher est affleurant ou sub-affleurant, afin de calculer le spectre de réponse tenant compte des conditions de site ;
- b) identifier l'existence de formations liquéfiables en cas de séismes, et si c'est le cas déterminer l'intensité de la liquéfaction, et si besoin proposer des solutions de renforcement.

### 6.2.2. Données

Une campagne de reconnaissance spécifique a été réalisée fin 2008 par le bureau d'études SEGC (rapport SEGC n°1369 de décembre 2008). Ces reconnaissances sont basées sur les forages et les essais suivants :

- 3 sondages à la tarière descendus à 7,5 m de profondeur avec réalisation d'un essai pressiométrique tous les mètres (sondages SPs1 à SPs3) ;

- 6 sondages au pénétromètre dynamique (SP1 à SP6) menés entre 1,2 et 3,8 m de profondeur ;
- 4 fouilles manuelles descendues entre 0,4 m et 1,3 m de profondeur (FM1 à FM4).

Aucun essai en laboratoire n'a été pratiqué lors de cette campagne.

L'implantation des forages réalisés lors de cette campagne spécifique est indiquée sur l'illustration 22.

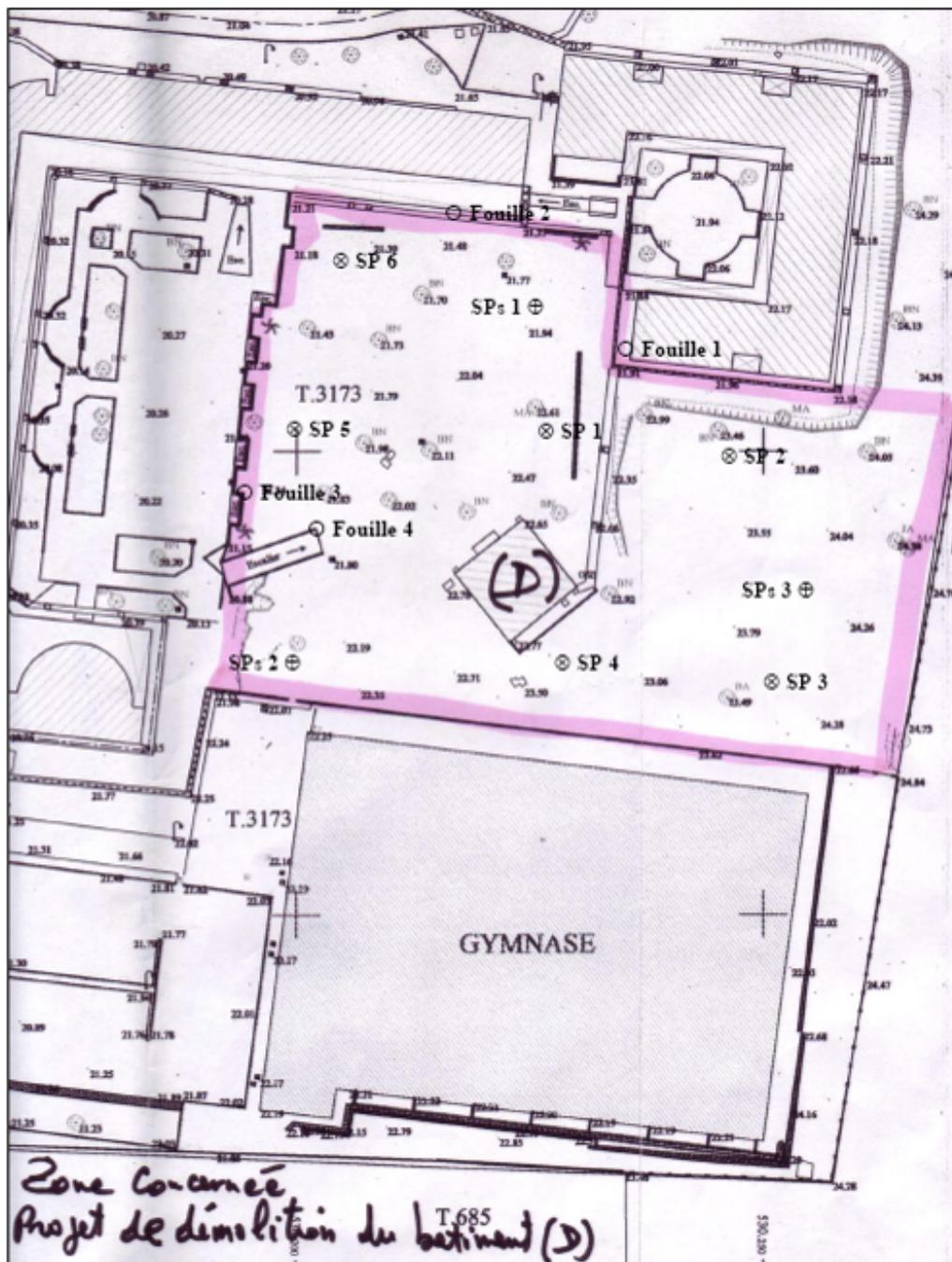


Illustration 22 - Localisation des sondages réalisés par SEGC (doc. SEGC)

Par ailleurs une série d'investigations géophysiques a été menée par le BRGM (cf. Illustration 23). Il s'agit de 4 profils SASW et de 11 mesures H/V

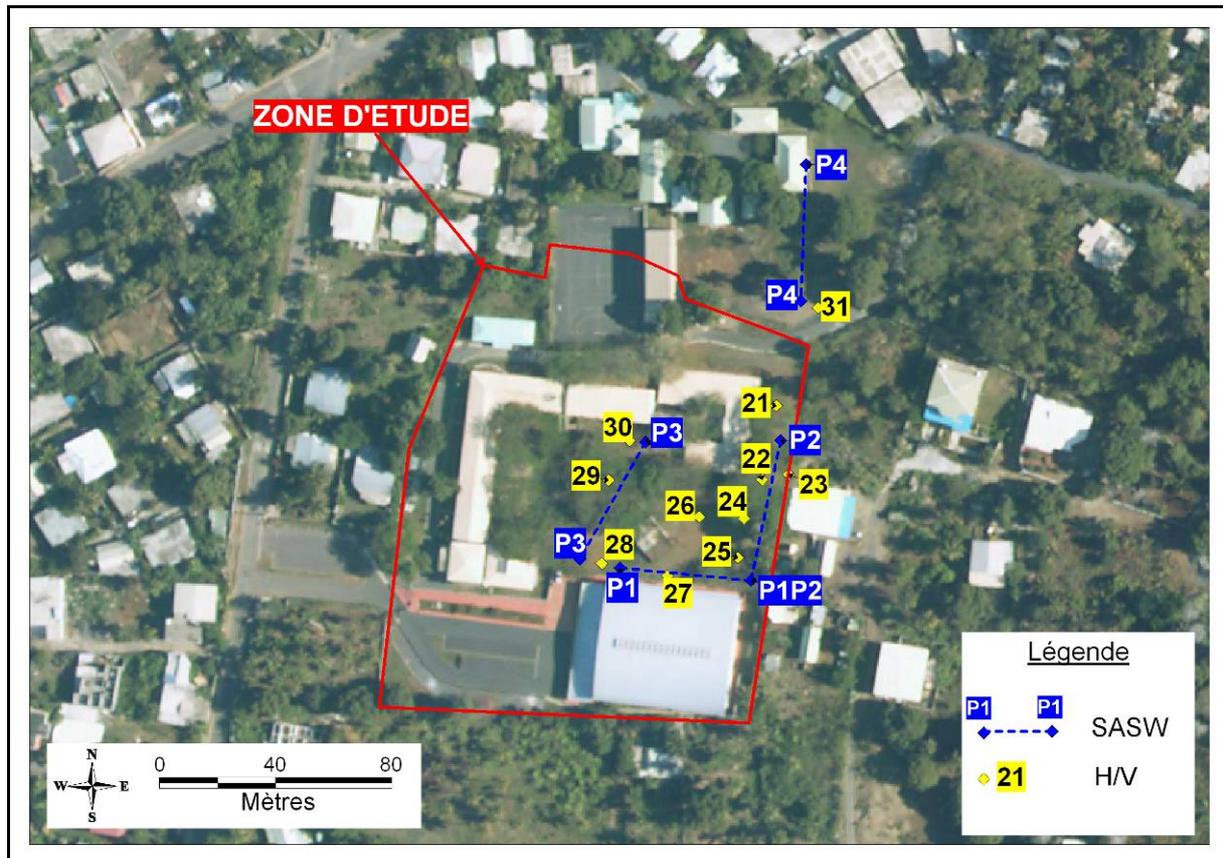


Illustration 23 - Localisation des investigations géophysiques réalisées par le BRGM

### 6.2.3. Caractérisation des unités géomécaniques

#### d) Généralités

D'après les reconnaissances faites par SEGC en 2008, la géologie du site se révèle plutôt homogène avec des variations assez limitées d'un point de sondage à l'autre (cf. Illustration 24).

En conséquence en matière de profils géologiques ou de colonnes de sols représentatives, une coupe moyenne a été retenue.

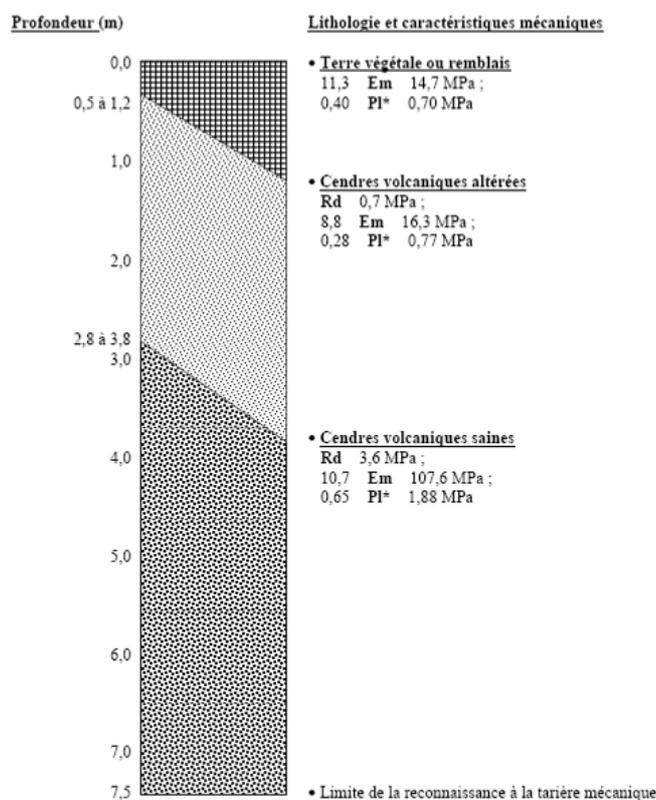


Illustration 24 - Coupe géologique interprétative réalisée par SEGC (doc. SEGC)

On notera que la base des pyroclastites n'a pas été atteinte lors de la campagne SEGC, d'où l'intérêt des reconnaissances par SASW permettant de préciser la puissance des formations volcaniques superficielles.

Ainsi, les 4 profils de mesures SASW montrent une répartition quasi-horizontale des terrains de même vitesse de cisaillement  $V_s$ , ainsi qu'un substratum sismique ( $V_s = 800$  m/s) observé vers 30 m de profondeur.

Les résultats des mesures H/V indiquent pour leur part une très faible amplification du signal liée à la géologie, avec deux fréquences possibles à 1.5 Hz et autour de 5.5 Hz.

## **Caractéristiques**

### **i) Remblais (et terre végétale)**

- *Lithologie :*

Il s'agit de remblais cendreaux, voire localement graveleux, bruns à gris clair, provenant probablement d'un réemploi local de matériaux.

- *Epaisseur :*

L'épaisseur de cette formation varie entre 0,4 m et 1,2 m.

- *Essais en laboratoire :*

Aucun essai en laboratoire n'est disponible pour caractériser cette formation.

- *Essais pressiométriques :*

La pression limite mesurée varie entre 0,4 MPa et 0,7 MPa (2 essais uniquement) avec une valeur moyenne de 0,55 MPa. Le module pressiométrique est dans une frange située entre 11,3 MPa et 14,7 MPa, la moyenne étant de 13,0 MPa. Le rapport EM/PI varie entre 21,0 et 28,3 avec une moyenne à 24,6.

Il s'agit donc de matériaux silteux moyennement consistants à tendance assez médiocre.

Par corrélation (règles PS92), les valeurs pressiométriques permettent d'estimer les vitesses des ondes de cisaillement Vs. Ainsi, dans ces terrains, on estime Vs entre 150 et 400 m/s. Ceci est en accord avec les mesures SASW.

- *Essais de pénétration dynamique :*

Dans le premier mètre reconnu par sondage, les valeurs de résistance dynamique à la pénétration varient entre 0,8 et 5 MPa, avec une valeur moyenne de l'ordre de 2 MPa.

### **ii) Cendres volcaniques altérées**

- *Lithologie :*

Cet horizon rencontré sous les remblais et la terre végétale est essentiellement constitué de silts fins cendreaux bruns à ocres à éléments millimétriques à centimétriques.

- *Epaisseur :*

Cet horizon a été rencontré sur une épaisseur variant approximativement entre 1,8 m et 3,0 m. A noter que le passage à l'horizon situé immédiatement dessous n'est pas franc, cette transition résultant d'une altération progressive.

- *Essais en laboratoire :*

Aucun essai en laboratoire n'est disponible pour caractériser cette formation.

- *Essais pressiométriques :*

La pression limite mesurée varie entre 0,28 MPa et 0,77 MPa (6 essais) avec une valeur moyenne de 0,42 MPa. Le module pressiométrique est dans une frange

située entre 8,8 MPa et 16,3 MPa, la moyenne étant de 12,3 MPa. Le rapport EM/PI varie entre 18,7 et 40,8 avec une moyenne à 31.

Il s'agit donc de matériaux silteux assez médiocres, légèrement moins consistant que les remblais.

Par corrélation (règles PS92), les vitesses des ondes de cisaillement Vs dans ces terrains sont comprises entre 150 et 400 m/s. Ceci est en accord avec les mesures SASW.

- *Essais de pénétration dynamique :*

Il est assez délicat de distinguer nettement au pénétromètre la limite entre les cendres altérées et les cendres saines.

Néanmoins, il est possible de distinguer une frange de valeurs faibles variant entre 0,4 et 3,7 MPa. La valeur moyenne de 1 MPa pourra être retenue dans cette formation.

Le Ratio Rd/pl de l'ordre de 2,4 témoigne d'un matériau plus médiocre que pour le précédent horizon ou ce rapport est de 3,6.

### iii) Cendres volcaniques saines

- *Lithologie :*

Ce matériau est proche du précédent mais la phase d'altération y est nettement moins développé : silts fins cendreuse beige à grisâtre à éléments millimétriques à centimétriques.

- *Epaisseur :*

D'après le rapport de SEGC, cet horizon mesure au minimum 4 m d'épaisseur. Sa base n'a pas été reconnue par sondages. Son épaisseur est par conséquent estimée à partir des profils SASW ; on retient une valeur de 20 mètres.

- *Essais en laboratoire :*

Aucun essai en laboratoire n'est disponible pour caractériser cette formation.

- *Essais pressiométriques :*

La pression limite mesurée varie entre 0,65 MPa et 1,88 MPa avec une valeur moyenne de 0,77 MPa si l'on exclut les 2 valeurs anormalement élevées entre 5 et 6 m dans SP1s. Le module pressiométrique est dans une frange située entre 10,7 MPa et 107 MPa, la moyenne après correction étant de 14,1 MPa. Le rapport EM/PI varie entre 13,8 et 57,2 avec une moyenne à 18,6 après correction.

Il s'agit donc de matériaux silteux moyennement compacts.

Par corrélation (règles PS92), les vitesses des ondes de cisaillement Vs dans ces terrains sont comprises entre 150 et 400 m/s. Ceci est en accord avec les mesures SASW.

- *Essais de pénétration dynamique :*

En première approximation, il est possible de considérer que la valeur minimale de résistance à la pénétration dynamique est de l'ordre de 5 MPa.

#### iv) Substratum sain

- *Lithologie :*

Dans la mesure où aucun forage n'a pénétré dans le substratum franchement rocheux, il est délicat d'en apprécier la nature exacte et la profondeur. Néanmoins, sur Petite Terre, il n'est pas rare de rencontrer des dépôts cendreaux de plusieurs dizaines de mètres. Les mesures SASW réalisées sur le site indiquent une profondeur de 25 à 30 m.

- *Épaisseur :*

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

- *Essais en laboratoire :*

Aucun essai en laboratoire n'est disponible pour caractériser cette formation.

- *Essais pressiométriques :*

Sur ce site, nous ne disposons pas de résultats pressiométriques, néanmoins par défaut on pourra adopter une pression limite minimale  $p_l = 5 \text{ MPa}$ .

#### e) Récapitulatif

Le Tableau 14 synthétise les données géotechniques exploitées.

Formation	Nature	Épaisseur	Caractéristiques pressiométriques	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
Remblais	Silts cendreaux	1 m	$PI_{\text{moy}} = 0,6 \text{ MPa}$ $E_{M-\text{moy}} = 13 \text{ MPa}$	Sols moyennement compacts (groupe b)
Cendres altérées	Silts cendreaux	2,5 m	$PI_{\text{moy}} = 0,4 \text{ MPa}$ $E_{M-\text{moy}} = 12 \text{ MPa}$	Sols moyennement compacts (groupe b)
Cendres saines	Silts cendreaux	20 m ?	$PI_{\text{moy}} = 0,8 \text{ MPa}$ $E_{M-\text{moy}} = 14 \text{ MPa}$	Sols moyennement compacts (groupe b)
Substratum sain	Roche volcanique	> 10 m	$PI_{\text{moy}} > 5 \text{ MPa}$ $E_{M-\text{moy}} = 100 \text{ MPa}$	Rocher sain

Tableau 14 - Caractéristiques géotechniques moyennes des formations géologiques sur le site de Labattoir

#### 6.2.4. Hydrogéologie

Aucun sondage descendu jusqu'à 7,5 m de profondeur n'a rencontré de nappe sur le site.

#### 6.2.5. Etablissement 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.

Le Tableau 15 récapitule les caractéristiques de la colonne de sols retenue pour l'étude.

On notera les points suivants :

- eu égard au profil homogène des terrains, une seule colonne de sol a été retenue ;
- la nappe sera prise en compte à plus de 10 m de profondeur (hypothèse somme toute conservatrice) ;
- concernant les cendres, dans la mesure où l'on se situe ni dans le cas d'un sable pur ni dans la configuration d'une argile, on adoptera le cas le plus conservateur entre une courbe  $G(\gamma)/G_{\max}$  &  $D(\gamma)$  avec  $DR = 30 \%$  et une courbe avec  $IP = 15$ .

Formation	Nature	Catégorie PS 92 <sup>(1)</sup>	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> ) <sub>(2)</sub>	Caractéristiques géomécaniques de base <sup>(3)</sup>	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Epaisseur
							col. 1
Remblais	Silts cendreux	Sols cohérents moyennement consistants (groupe b)	19,0	Dr = 30 % ou Ip = 20	300	450	1 m
Cendres altérées	Silts cendreux	Sols cohérents moyennement consistants (groupe b)	19,0	Dr = 30 % ou Ip = 20	250	400	2,5 m
Cendres saines	Silts cendreux	Sols cohérents moyennement consistants (groupe b)	19,0	Dr = 30 % ou Ip = 20	400	700	20 m
Roche saine	Roche volcanique	Rocher sain	23,0	-	800	1200	> 10 m

(1) Norme NF P 06-013 - (2) Dédit des Recommandations pour le calcul aux états limites des ouvrages maritimes et fluviaux (STCPMVN) - (3) Valeurs issues des reconnaissances d'archive ; Vs : vitesse des ondes de cisaillement en m/s ; Vp : vitesse des ondes longitudinales ; Dr = densité relative ; Ip = Indice de plasticité

Tableau 15 - Colonne de sol retenue pour le site de Labattoir

### 6.3. ESTIMATION DU SPECTRE DE REPONSE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE POUR LE SITE DE L'EXTENSION DU COLLEGE DE LABATTOIR

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 (Illustration 25). 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 l'illustration 26.

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 16 pour chacun des spectres à 2, 5, 10 et 20 % d'amortissement. On interpolera sur les diagrammes logarithmiques, pour les valeurs intermédiaires de déplacement, de vitesse et d'accélération.

Le spectre final retenu est représenté sur l'illustration 25 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 l'illustration 27.

**L'accélération horizontale maximale du sol tenant compte des conditions de site pour le site de l'extension du collège de Labattoir est de 0.27 g (soit 2.6 m/s<sup>2</sup>).**

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

$$a_1 = 0,136 \qquad a_2 = 0,064$$

$$g_1(T) = \frac{10^{(2,79+1,77 \cdot \log_{10} T)}}{156,13 \cdot T}$$

avec :  $T$ , la période (en secondes).

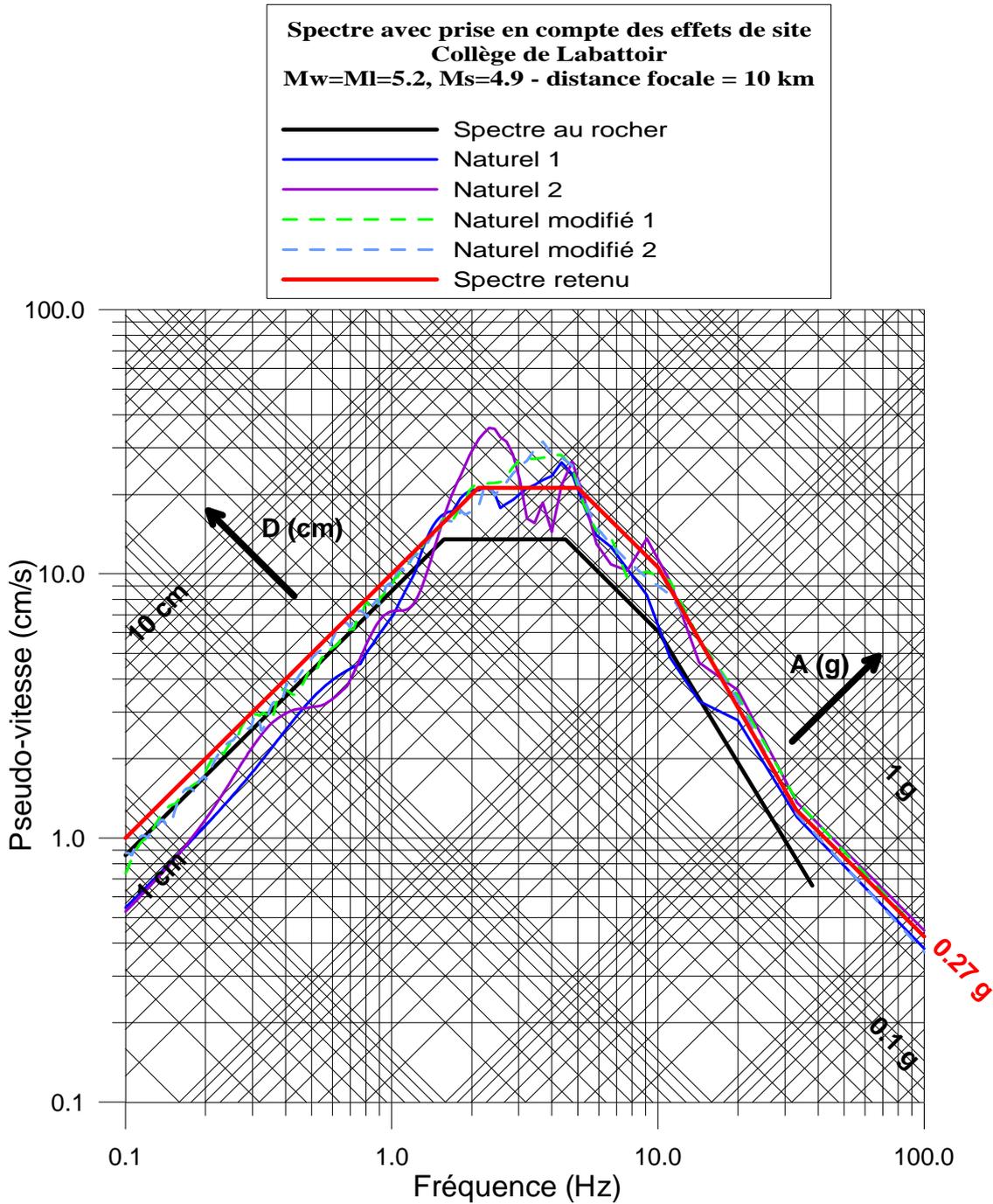


Illustration 25 - Spectres de réponse à 5 % des accélérogrammes synthétiques et réels tenant compte des effets de site pour le site de l'extension du collège de Labattoir.

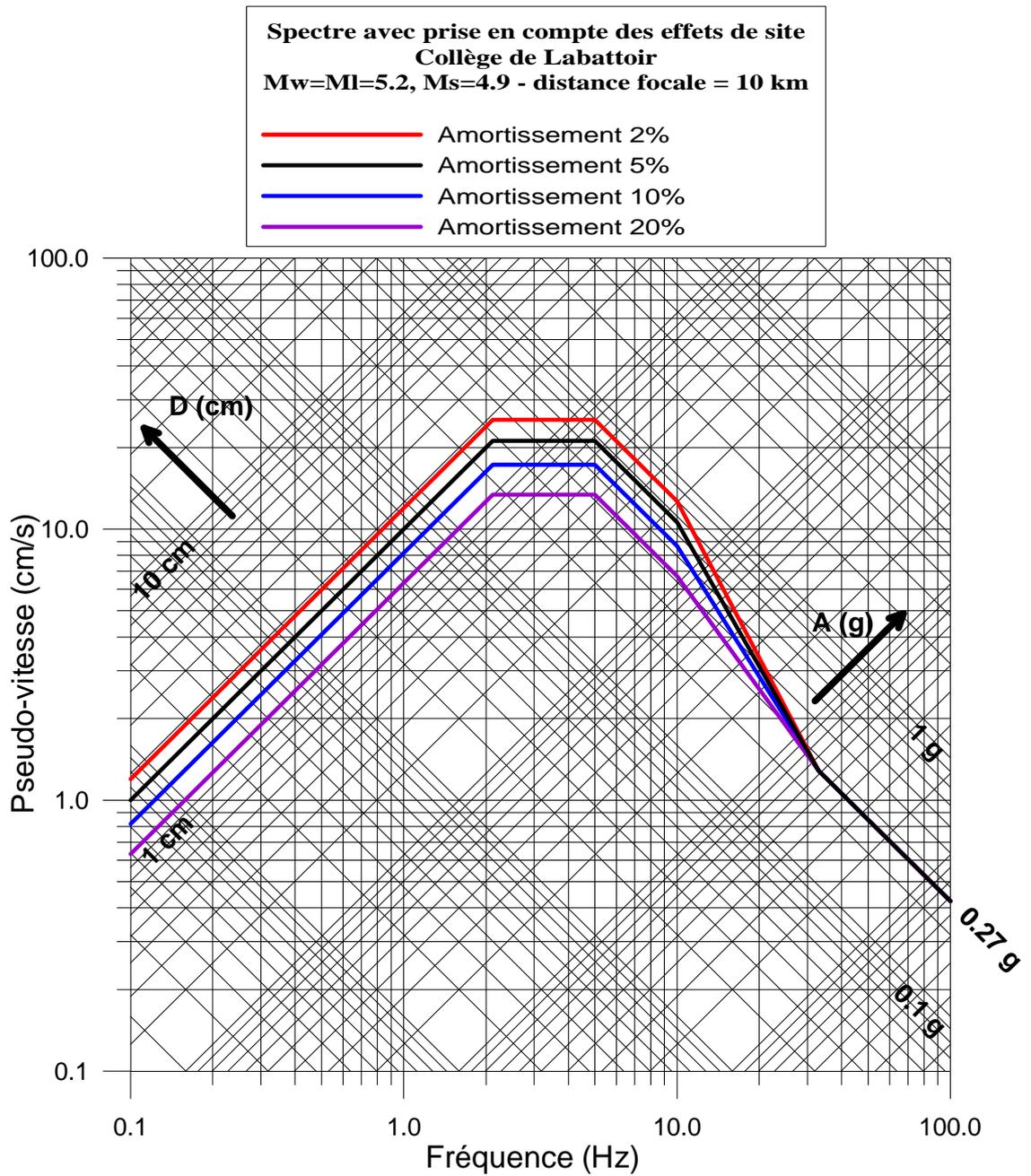


Illustration 26 - Spectre retenu pour le site de l'extension du collège de Labattoir - Spectre de réponse élastique horizontale avec prise en compte des effets de site. Amortissements : 2, 5, 10 et 20 %.

F (Hz)	Amortissement (%)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
0.1	2	0.001	1.20	1.90
	5	0.001	1.00	1.59
	10	0.001	0.82	1.30
	20	0.000	0.63	1.01
2.12	2	0.34	25.32	1.90
	5	0.29	21.19	1.59
	10	0.23	17.30	1.30
	20	0.18	13.40	1.01
5	2	0.81	25.32	0.81
	5	0.68	21.19	0.67
	10	0.55	17.30	0.55
	20	0.43	13.40	0.43
10	2	0.81	12.66	0.20
	5	0.68	10.59	0.17
	10	0.55	8.65	0.14
	20	0.43	6.70	0.11
33	tous amortissements	0.27	1.28	0.01
100	tous amortissements	0.27	0.42	0.0007

Tableau 16 - Spectre retenu pour le site de l'extension du collège de Labattoir - Spectre de réponse élastique horizontale avec prise en compte des effets de site. Valeurs de A, V et D.

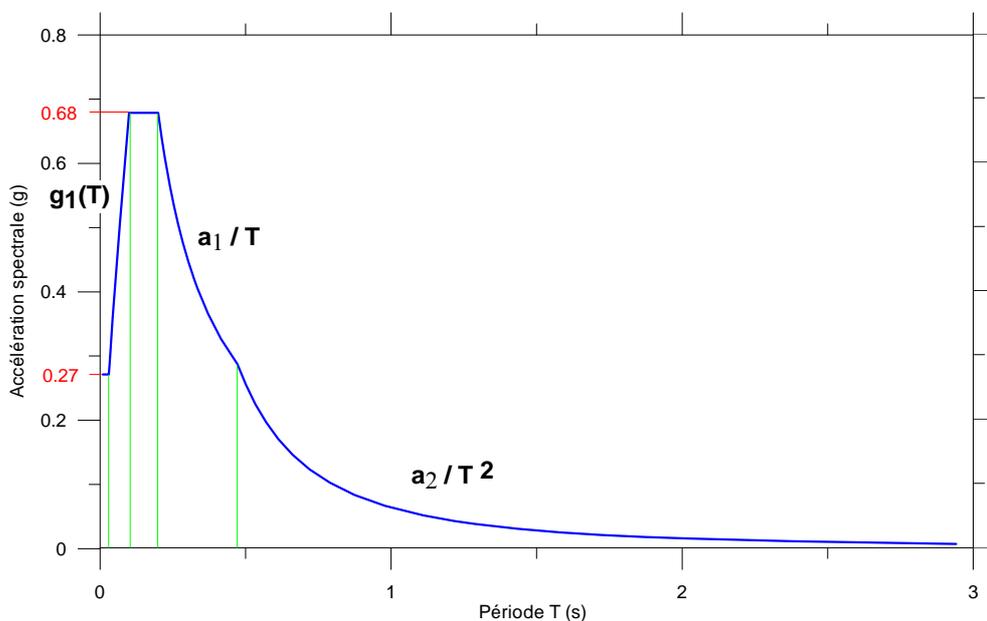


Illustration 27 - Spectre retenu pour le site de l'extension du collège de Labattoir - Spectre de réponse élastique horizontale avec prise en compte des effets de site en accélération en fonction de la période, amortissement 5%.

## **6.4. ANALYSE DES POTENTIALITÉS DE LIQUEFACTION**

### **6.4.1. Définition et méthode**

La méthode retenue pour l'évaluation des potentialités de liquéfaction est présentée au chapitre 5.3.

### **6.4.2. Appréciation des potentialités de liquéfaction du site de l'extension du collège de Labattoir**

#### **a) Carte d'aléa issue des atlas des risques**

La carte issue des atlas des risques<sup>3</sup> met en évidence, a priori, une susceptibilité faible à nulle à la liquéfaction dans la zone de projet (Illustration 28).

#### **b) Contexte hydrogéologique**

Le site de projet est a priori dépourvu de nappe significative ce qui va dans le sens de ne pas envisager de liquéfaction possible des terrains.

#### **c) Susceptibilité qualitative à la liquéfaction**

**Les silts cendreaux, plutôt fins, et présentant une cohésion naturelle liée à leur mode de dépôt à chaud, ne sont a priori pas des matériaux liquéfiables.**

Il n'y a donc pas lieu de poursuivre l'étude de liquéfaction plus dans le détail.

#### **d) Préconisations en terme de dispositions constructives**

Aucune disposition constructive liée à la liquéfaction des sols n'est à prévoir dans le projet d'extension du collège de Labattoir.

---

<sup>3</sup> J.-C. Audru, A. Bitri, J.-F. Desprats, C. Mathon, N. Maurillon, J.-L. Nédellec, O. Jossot, J.-P. Rançon, P. Sabourault, O. Sedan, M. Terrier-Sedan et N. Zornette, avec la collaboration de P. Stollsteiner (Antéa), de S. Guillobez (Cirad), de P. Daniel et de B. Haie (Météo-France) : Atlas des aléas naturels à Mayotte, Communes de Mamoudzou, Koungou, Dzaoudzi et Pamandzi.

<sup>5</sup> C. Cluzet, A. Oppermann, A. Malard, L. Françoise. (2009) : Mise à jour des atlas des aléas naturels sur 12 communes de Mayotte, commune de Bouéni. Rapport BRGM/RP-57569-FR, 25 p., 20 figures.

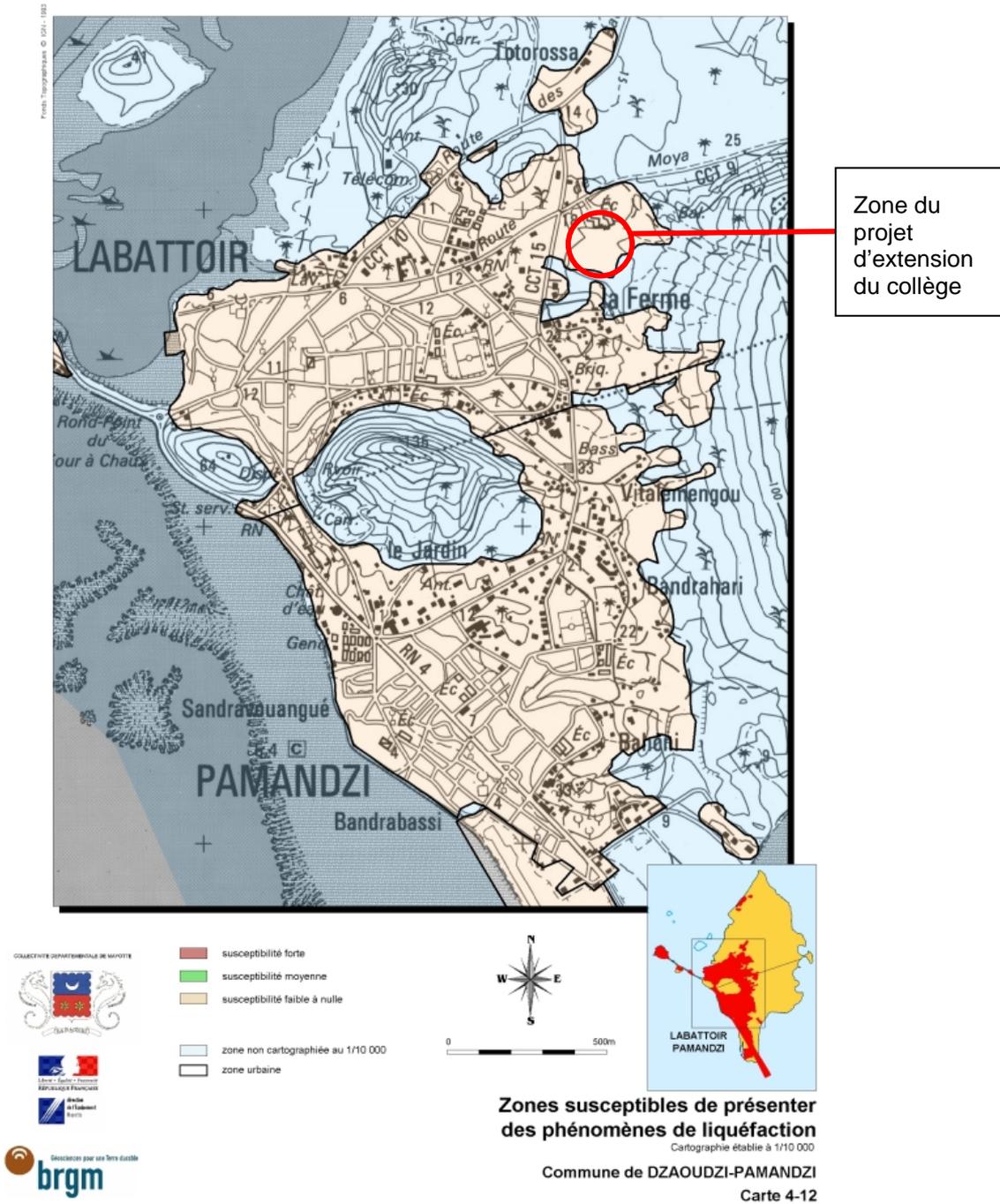


Illustration 28 - Carte d'aléa liquéfaction issue des atlas des aléas pour le site de Labattoir (commune de Dzaoudzi – Pamandzi)

## **6.5. CONCLUSIONS RELATIVES AU POTENTIEL DE LIQUEFACTION SUR LE SITE DE LABATTOIR**

Dans la mesure où les terrains au droit du projet d'extension de collège sont constitués de silts cendreux volcaniques, a priori non liquéfiables, et de surcroît hors d'eau, l'aléa liquéfaction dans la zone doit être considéré comme négligeable.

Aucune mesure constructive liée à la liquéfaction des sols n'est à prévoir.



## 7. Détermination des spectres de réponse tenant compte des conditions de site pour le site du collège de Bouéni

### 7.1. LOCALISATION DU PROJET ET CADRE GEOLOGIQUE

La construction du collège de Bouéni, est projetée à la sortie Nord du village de Bambo Ouest (cf. Illustration 29). Le futur collège est situé dans une zone à pente moyenne (5 à 25 % en direction de l'Ouest) configurée en gradins successifs.

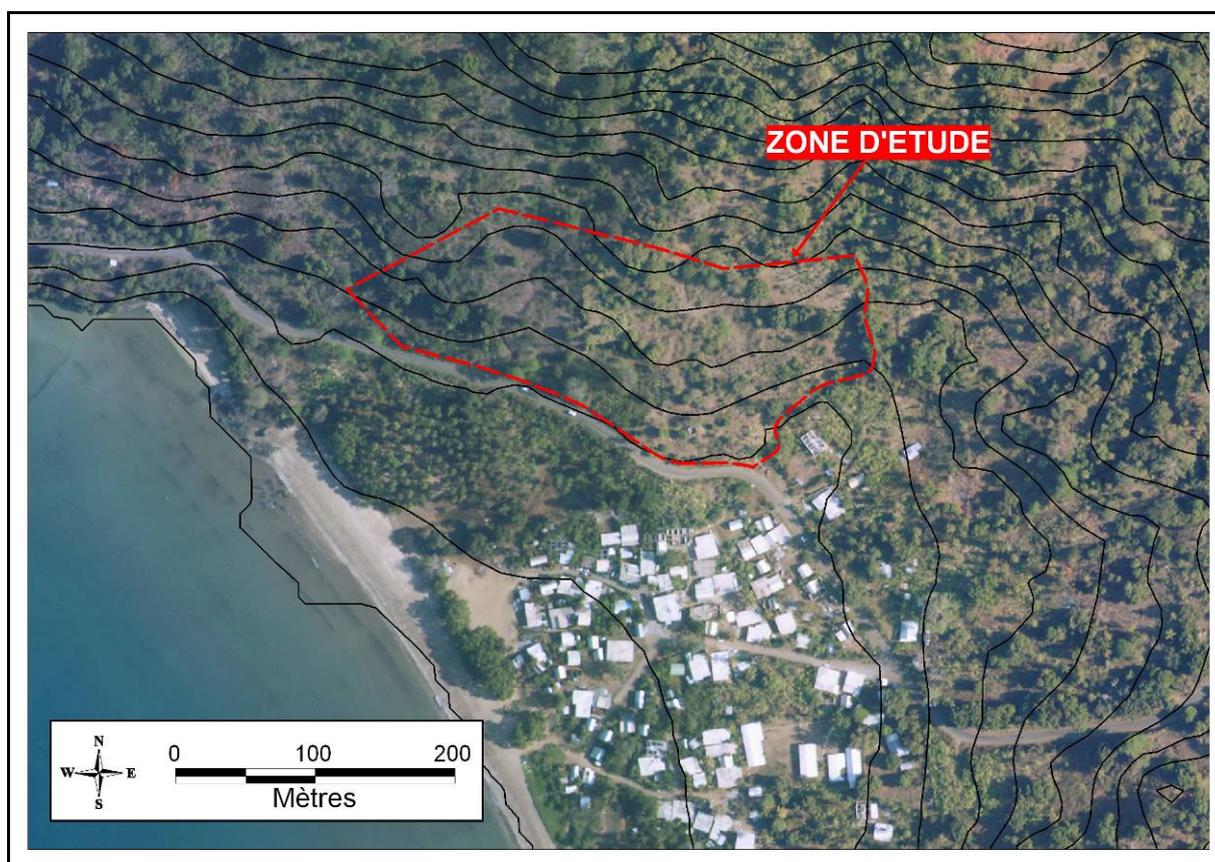


Illustration 29 - Vue aérienne de la zone d'étude (orthophoto IGN 2008)

D'après la carte géologique de Mayotte (BRGM 1988) (cf. Illustration 30), la zone de projet est située sur des formations basaltiques formant la base du bouclier ancien méridional du Mio-Pliocène. En surface, des chaos de blocs basaltiques sains apparaissent au sein de niveaux altéritiques ocres à rougeâtres.

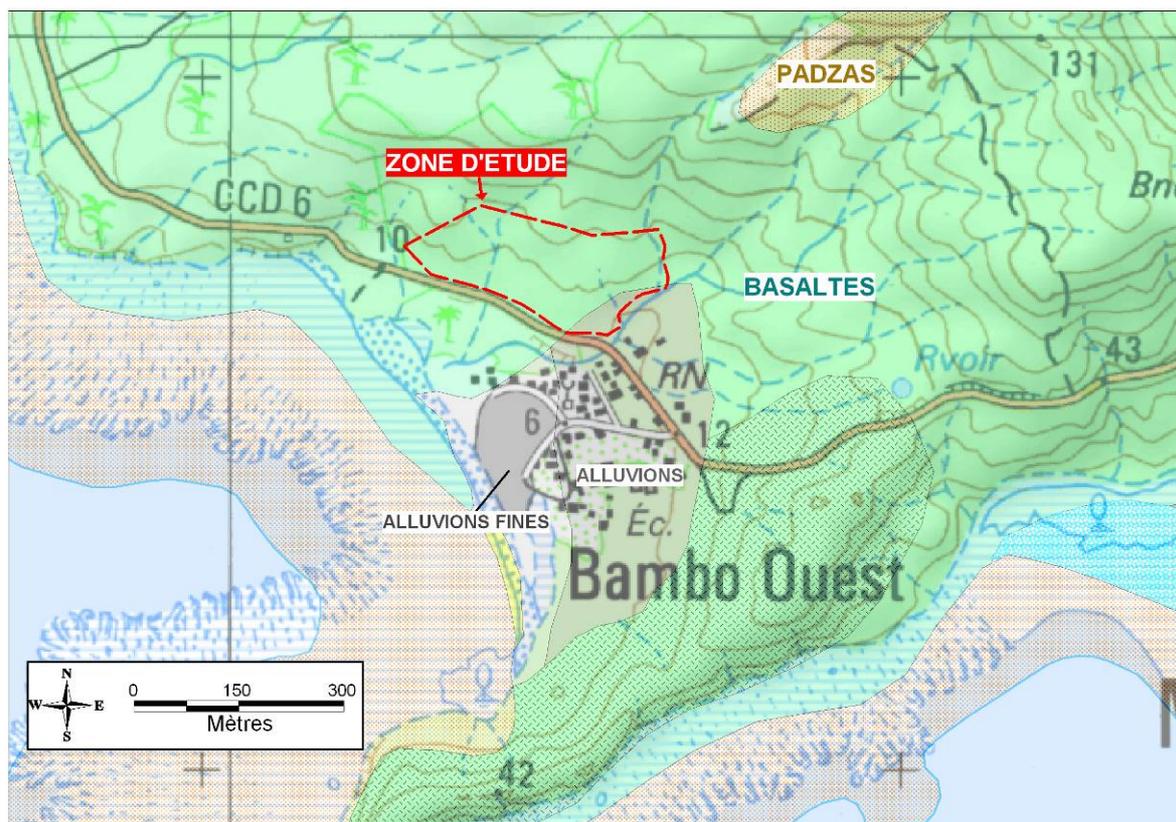


Illustration 30 - Extrait de la carte géologique de Mayotte (BRGM 1988)

## 7.2. SYNTHÈSE GÉOTECHNIQUE

### 7.2.1. Préambule

L'objectif de cette analyse géotechnique spécifique au site de Bouéni est multiple :

- a) identifier et caractériser une ou plusieurs colonnes de « sol » (formations géologiques) représentatives du site en dehors des zones où le rocher est affleurant ou sub-affleurant, afin de calculer le spectre de réponse tenant compte des conditions de site ;
- b) identifier l'existence de formations liquéfiables en cas de séismes, et si c'est le cas déterminer l'intensité de la liquéfaction, et si besoin proposer des solutions de renforcement.

### 7.2.2. Données

En 2002, une première campagne de reconnaissances géotechnique a été menée par le bureau d'études Géotechnique et Contrôle (Rapport MY02272/3/a), sans que nous ne disposions d'une copie. D'après les indications du rapport SEGC de 2007 (rapport n° 1201 de décembre 2007) qui reprenait les conclusions de l'étude Géotechnique et Contrôles, 3 puits à la pelle mécanique ont été réalisés.

Une seconde campagne spécifique de reconnaissance géotechnique avait été conduite par le Laboratoire de l'Équipement de Mayotte. Seize sondages à la tarière avec essais pressiométriques et quatre puits à la pelle mécanique avaient été réalisés.

Malheureusement, nous ne disposons pas de l'implantation de ces sondages ni des résultats obtenus. En conséquence, ces données n'ont pu être exploitées.

Néanmoins, SEGC a pu récupérer l'implantation des échantillons prélevés et les résultats des essais en laboratoires menés par le Laboratoire de l'Equipement :

- 4 essais d'identification (granulométries, limites d'Atterberg, teneur en eau naturelle, valeur au bleu)
- 3 essais proctor, CBR, et Indice de portance Immédiat (IPI)
- 3 essais de cisaillement à la boîte (Consolidés drainés)

Enfin, une campagne de reconnaissance spécifique a été réalisée fin 2007 par le bureau d'études SEGC (rapport SEGC n°1201 de décembre 2007).

Ces reconnaissances sont basées sur les forages et les essais suivants :

- 5 sondages à la tarière descendus à 9,5 m de profondeur avec réalisation d'un essai pressiométrique tous les mètres (sondages SP1 à SP5) ;
- 1 sondage à la tarière descendu jusqu'à 5,5 m (ST1).

Aucun essai en laboratoire n'a été pratiqué lors de cette campagne.

L'implantation des forages réalisés lors de cette campagne spécifique est indiquée sur l'illustration 31.

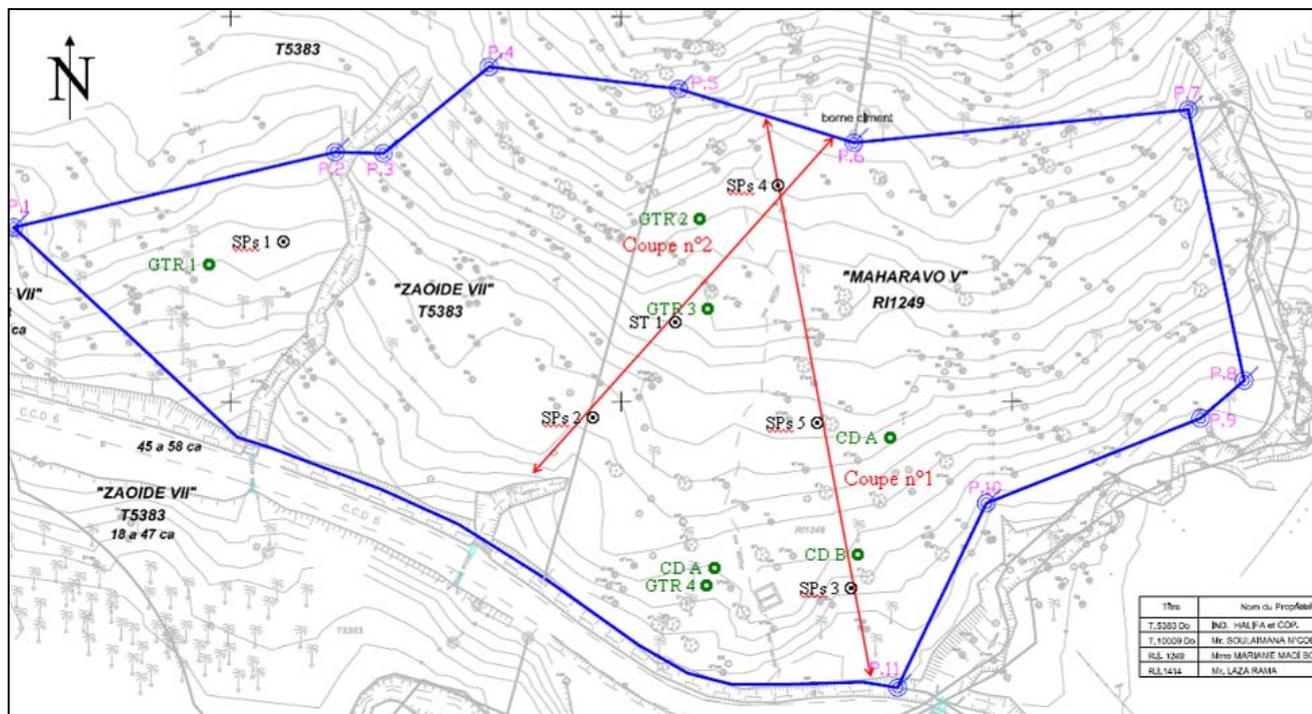


Illustration 31 - Site de Bouéni - Localisation des sondages réalisés par SEGC et des prélèvements d'échantillons réalisés par le Laboratoire de l'Equipement (SEGC, 2007)

Par ailleurs une série d'investigations géophysiques a été menée par le BRGM dans le cadre de cette étude (cf. Illustration 32). Il s'agit de 4 profils SASW et de 9 mesures SASW.

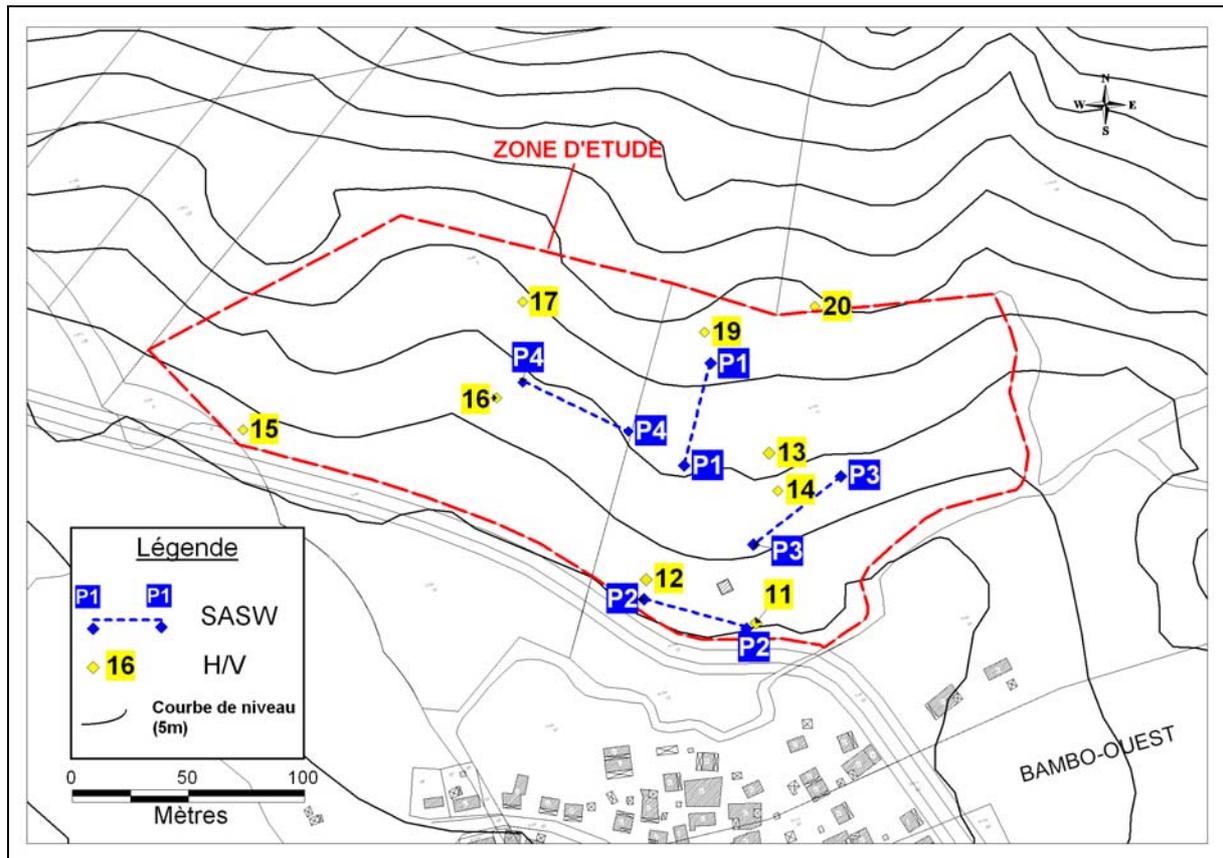


Illustration 32 - Localisation des investigations géophysiques réalisées par le BRGM

### 7.2.3. Caractérisation des unités géomécaniques

#### a) Généralités

D'après les reconnaissances lors des différentes campagnes, la géologie du site se révèle plutôt homogène avec des variations assez limitées d'un point de sondage à l'autre (cf. Illustration 33).

En conséquence, en matière de profils géologiques ou de colonnes de sols représentatives, une coupe moyenne a été retenue.

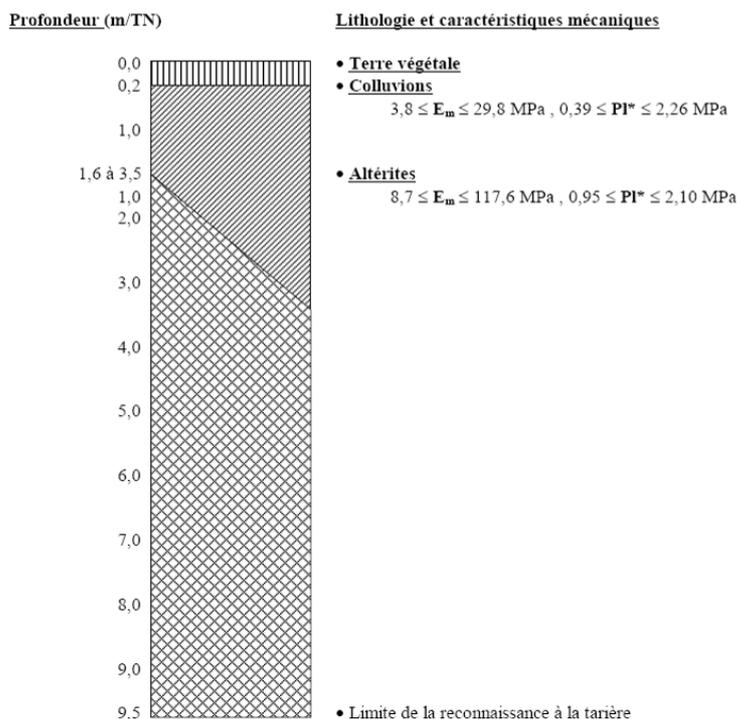


Illustration 33 - Coupe géologique interprétative réalisée par SEGC (SEGC, 2007)

On notera que la base des pyroclastites n'a pas été atteinte lors de la campagne SEGC, d'où l'intérêt des reconnaissances par SASW permettant de préciser la puissance des formations superficielles.

Ainsi, les 4 profils de mesures SASW montrent une répartition quasi-horizontale des terrains de même vitesse de cisaillement  $V_S$ . Le substratum sismique ( $V_S = 800 \text{ m/s}$ ) est observé entre 20 et 30 m de profondeur.

Les résultats des mesures H/V indiquent un effet de site bien marqué avec une fréquence de résonance comprise entre 4 et 5 Hz (Annexe 4).

## b) Caractéristiques

### i) Terre végétale

Sur 0,2 m d'épaisseur en surface a été rencontré un niveau de terre végétale. Néanmoins, eu égard au fait que cet horizon sera systématiquement décapé avant d'asseoir les fondations des constructions, il n'a pas été pris en considération dans les coupes représentatives de sol.

### ii) Colluvions

#### - Lithologie :

Cet horizon rencontré sous la terre végétale est constitué de limons argileux, légèrement sableux, à blocs décimétriques à métriques, brun, ocre ou rougeâtre.

#### - Epaisseur :

Cet horizon a été rencontré sur une épaisseur variant approximativement entre 1,4 m et 3,8 m (minimum dans la campagne Géotechnique et Contrôles). Son épaisseur moyenne est de l'ordre de 3 m.

#### - Essais en laboratoire :

	passant à 80 µm	w <sub>n</sub>	Opt. Proctor	VBS	IP	WL	cat. NFP11-300	C'	φ'
GTR n°1	94,2 %	29,5 %	29,5 %	1,21	17,5	49 %	A1m		
GTR n°2	98,8 %	35,3 %	42,3 %	1,20	22	65 %	A1s		
GTR n°3	97,2 %	34,5 %	32,0 %	1,22	26,9	62 %	A1s		
GTR n°4	87,4 %	32,5 %	32,0 %	1,19	19	55 %	A1m		
CD A								4,0 kPa	29°
CD B								3,2 kPa	21,3°
CD C								1,5 kPa	18,6°

Tableau 17 - Essais en laboratoire sur les colluvions

#### - Essais pressiométriques :

Seuls les essais SEGC (2007) ont été exploités.

La pression limite mesurée varie entre 0,39 MPa et 2,26 MPa (13 essais) avec une valeur moyenne de 1,13 MPa. Le module pressiométrique est dans une frange située entre 3,8 MPa et 29,8 MPa, la moyenne étant de 14,8 MPa. Le rapport EM/Pl varie entre 4,9 et 26,2 avec une moyenne à 13.

Il s'agit donc de limons plastiques moyennement consistants.

Par corrélation (règles PS92), les vitesses des ondes de cisaillement Vs dans ces terrains sont comprises entre 150 et 400 m/s. Ceci est en accord avec les mesures SASW.

### iii) Altérites

- *Lithologie :*

Il s'agit de limons argileux beige, ocre, gris ou brun à blocs basaltiques.

- *Epaisseur :*

D'après le rapport SEGC (2007), cet horizon mesure au minimum 7,9 m d'épaisseur. Sa base n'a pas été reconnue. Son épaisseur est par conséquent estimée à partir des profils SASW ; on retient une valeur de 20 mètres.

- *Essais en laboratoire :*

Aucun essai en laboratoire n'est disponible pour caractériser cette formation.

- *Essais pressiométriques :*

La pression limite mesurée varie entre 0,95 MPa et 2,10 MPa (27 essais) avec une valeur moyenne de 1,24 MPa. Le module pressiométrique est dans une frange située entre 10,7 MPa et 107 MPa, la moyenne étant de 21,2 MPa. Le rapport EM/PI varie entre 8,7 et 64,6 avec une moyenne à 15,7.

Il s'agit donc de matériaux silteux moyennement compacts plus fermes que les colluvions les surmontant.

Par corrélation (règles PS92), les vitesses des ondes de cisaillement Vs dans ces terrains sont estimées proches de 400 m/s. Ceci est en accord avec les mesures SASW.

### iv) Substratum sain

- *Lithologie :*

Le substratum sain est probablement constitué de coulées basaltiques massives.

Dans la mesure où aucun forage n'a pénétré dans le substratum franchement rocheux, il est délicat d'en apprécier la profondeur exacte. Néanmoins, il n'est pas rare de rencontrer des niveaux altéritiques excédant la dizaine de mètres d'épaisseur. Les mesures SASW réalisées sur le site indiquent une profondeur de l'ordre de 30 m.

- *Epaisseur :*

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

- *Essais en laboratoire :*

Aucun essai en laboratoire n'est disponible pour caractériser cette formation.

- *Essais pressiométriques :*

Sur ce site, nous ne disposons pas de résultats pressiométriques (néanmoins par défaut on pourra adopter une pression limite minimale PI = 5 MPa).

### c) **Récapitulatif**

Le Tableau 18 synthétise les données géotechniques exploitées.

Formation	Nature	Épaisseur	Caractéristiques pressiométriques	Consistance du terrain (cf. classement PS 92)
<b>Colluvions</b>	<b>Limons argileux à blocs</b>	<b>3 m</b>	$PI_{moy} = 1,1 \text{ MPa}$ $E_{M-moy} = 15 \text{ MPa}$	<b>Sols moyennement compacts (groupe b)</b>
<b>Altérites en place</b>	<b>Limons argileux</b>	<b>10 m</b>	$PI_{moy} = 1,2 \text{ MPa}$ $E_{M-moy} = 21 \text{ MPa}$	<b>Sols cohérents moyennement consistants et roche très altérée (groupe b)</b>
<b>Substratum sain</b>	<b>Roche volcanique</b>	<b>&gt; 10 m</b>	$PI_{moy} > 5 \text{ MPa}$ $E_{M-moy} = 100 \text{ MPa}$	<b>Rocher sain</b>

Tableau 18 - Caractéristiques géotechniques moyennes des formations géologiques sur le site de Bouéni

#### 7.2.4. Hydrogéologie

Aucun sondage descendu jusqu'à 9,5 m de profondeur n'a rencontré de nappe sur le site. Néanmoins, on ne peut exclure que des écoulements localisés ne se développent dans l'horizon colluvial.

#### 7.2.5. Etablissement 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.

Le Tableau 19 récapitule les caractéristiques de la colonne de sols retenues pour l'étude.

On notera les points suivants :

- l'étude de faisabilité SEGC prévoyait initialement la réalisation de plateformes remblayées par-dessus les colluvions (remblais jusqu'à 8 m d'épaisseur). Il s'avère que SEGC a rédigé une note complémentaire en janvier 2008 afin de vérifier la stabilité au glissement des zones remblayées. Cette étude complémentaire a conclu en la nécessité de fonder systématiquement tous les bâtiments directement dans les altérites en place. Pour cette raison, nous avons négligé l'horizon colluvial et les remblais dans les colonnes de sols ;
- la couche d'altérite, reconnue sur environ 20 mètres par la SASW, est scindée en 2 couches, de 10 m chacune, et présentant des vitesses Vs de 250 m/s pour la couche la plus superficielle, et 400 m/s pour la couche profonde ;
- eu égard au profil homogène des terrains, une seule colonne de sol a été retenue ;
- la nappe sera négligée ;

Formation	Nature	Catégorie PS 92 <sup>(1)</sup>	$\gamma_h$ ( $\text{kN/m}^3$ ) <sub>(2)</sub>	Caractéristiques géomécaniques de base <sup>(3)</sup>	$V_s$ ( $\text{m/s}$ ) <sup>(4)</sup>	$V_p$ ( $\text{m/s}$ )	Epaisseur
							col. 1 Encastrement dans altérites
Altérites en place	Limens argileux plastique	Sols cohérents moyennement consistants (groupe b)	19,0	$I_p = 50$	250	375	10 m
					400	700	10 m
Roche saine	Roche volcanique	Rocher sain	23,0	-	800	1200	> 10 m

(1) Norme NF P 06-013 - (2) Dédit des Recommandations pour le calcul aux états limites des ouvrages maritimes et fluviaux (STCPMVN) - (3) Valeurs issues des reconnaissances d'archives ;  $V_s$  : vitesse des ondes de cisaillement en m/s;  $V_p$  : vitesse des ondes longitudinales ;  $D_r$  = densité relative ;  $I_p$  = Indice de plasticité

Tableau 19 - Colonne de sol retenue pour le site de Bouéni

### 7.3. ESTIMATION DU SPECTRE DE REPONSE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE POUR LE SITE DU LYCEE DE BOUENI

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 (Illustration 34). 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 l'illustration 35.

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 20 pour chacun des spectres à 2, 5, 10 et 20 % d'amortissement. On interpolera sur les diagrammes logarithmiques, pour les valeurs intermédiaires de déplacement, de vitesse et d'accélération.

Le spectre final retenu est représenté sur l'illustration 34 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 l'illustration 36.

**L'accélération horizontale maximale du sol tenant compte des conditions de site pour le site du lycée de Bouéni est de 0.31 g (soit 3.0 m/s<sup>2</sup>).**

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

$$a_1 = 0,182 \qquad a_2 = 0,064$$
$$g_1(T) = \frac{10^{(2,91+1,80 \cdot \log_{10} T)}}{156,13 \cdot T}$$

avec : T, la période (en secondes).

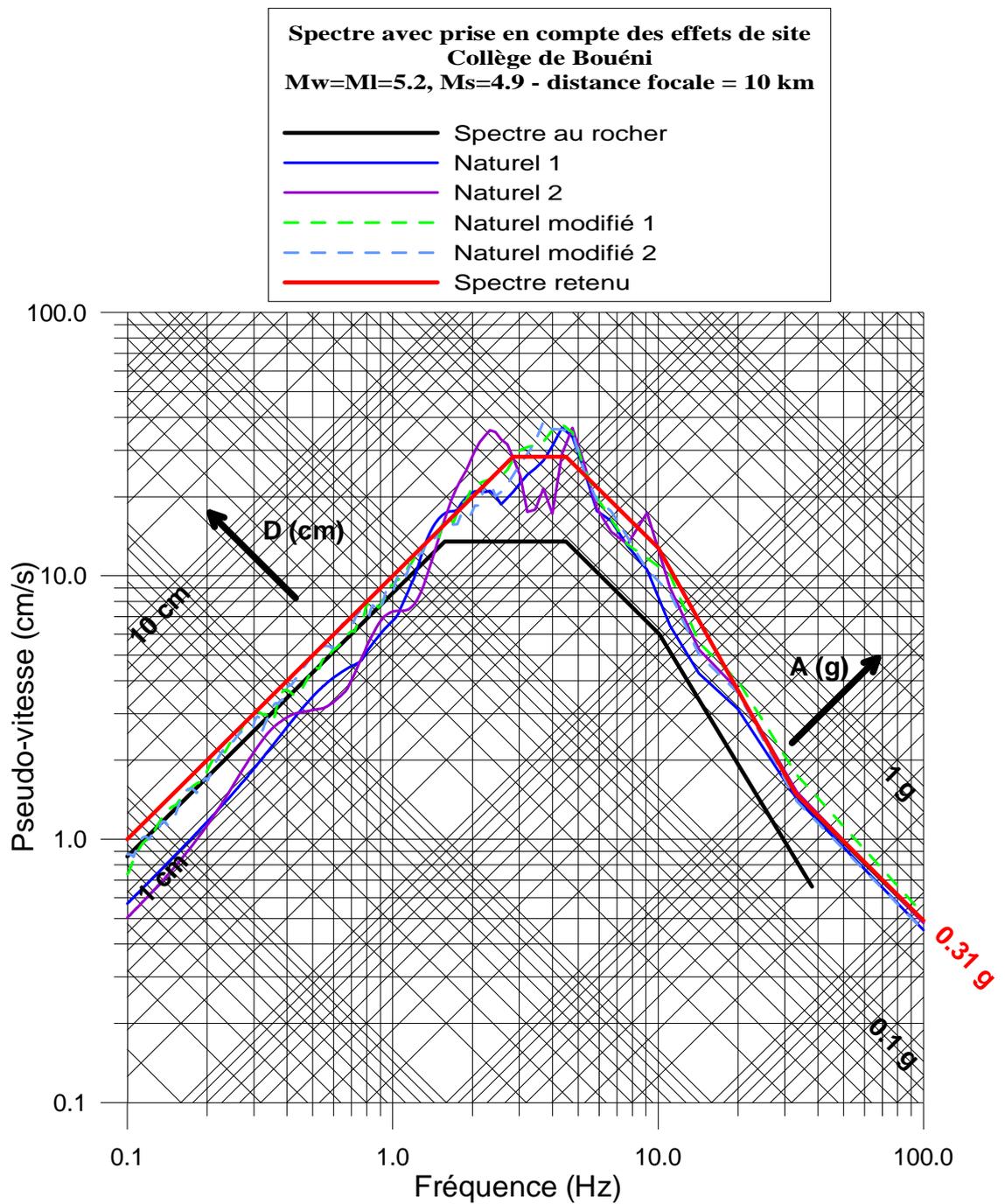


Illustration 34 - Spectres de réponse à 5 % des accélérogrammes synthétiques et réels tenant compte des effets de site pour le site du lycée de Bouéni.

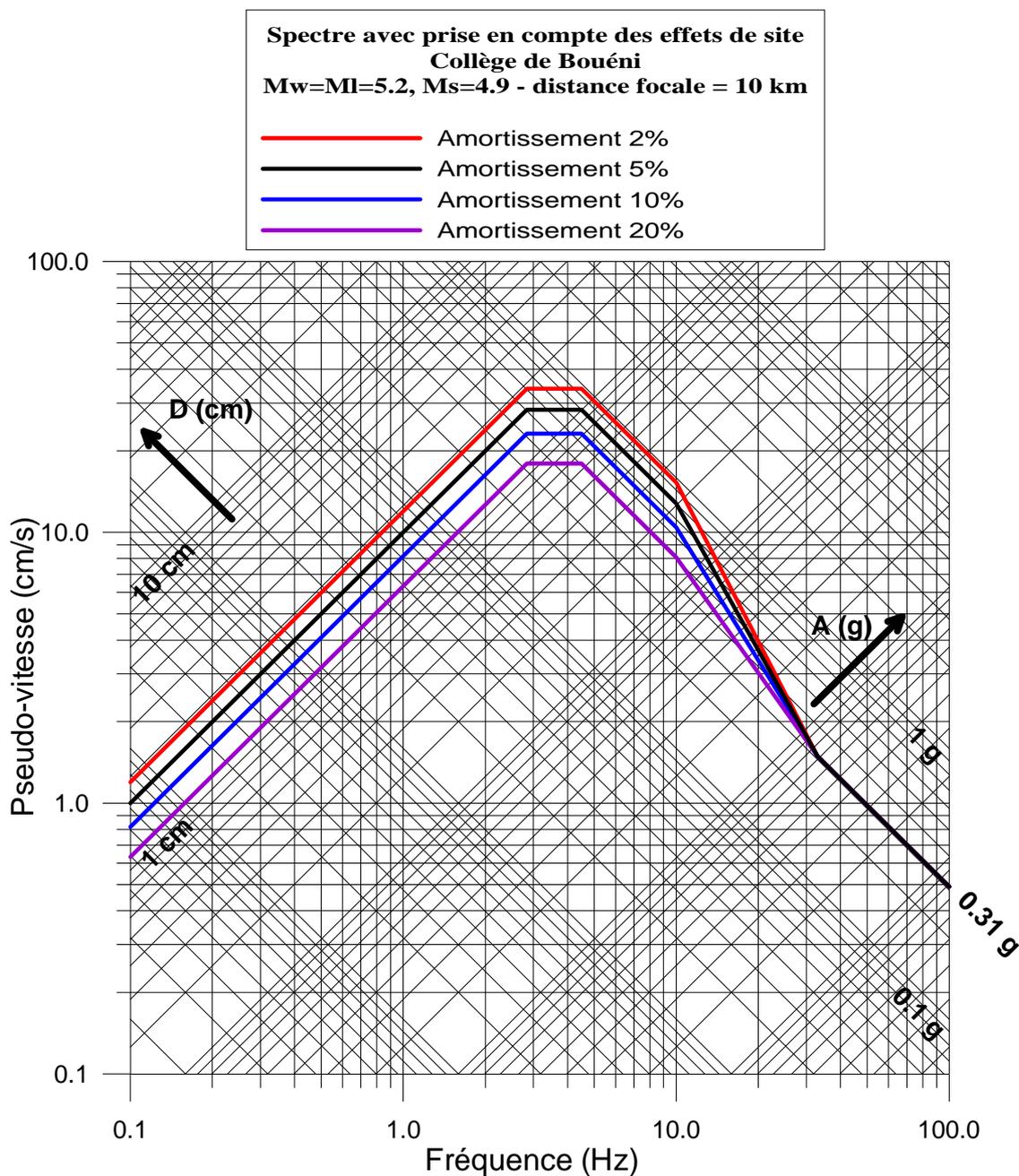


Illustration 35 - Spectre retenu pour le site du lycée de Bouéni - Spectre de réponse élastique horizontale avec prise en compte des effets de site. Amortissements : 2, 5, 10 et 20 %.

F (Hz)	Amortissement (%)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
0.1	2	0.001	1.20	1.90
	5	0.001	1.00	1.59
	10	0.001	0.82	1.30
	20	0.000	0.63	1.01
2.84	2	0.62	33.92	1.90
	5	0.52	28.38	1.59
	10	0.42	23.17	1.30
	20	0.33	17.95	1.01
4.5	2	0.98	33.92	1.20
	5	0.82	28.38	1.00
	10	0.67	23.17	0.82
	20	0.52	17.95	0.63
10	2	0.98	15.27	0.24
	5	0.82	12.77	0.20
	10	0.67	10.43	0.17
	20	0.52	8.08	0.13
33	tous amortissements	0.31	1.49	0.01
100	tous amortissements	0.31	0.49	0.0008

Tableau 20 - Spectre retenu pour le site du lycée de Bouéni - Spectre de réponse élastique horizontale avec prise en compte des effets de site. Valeurs de A, V et D.

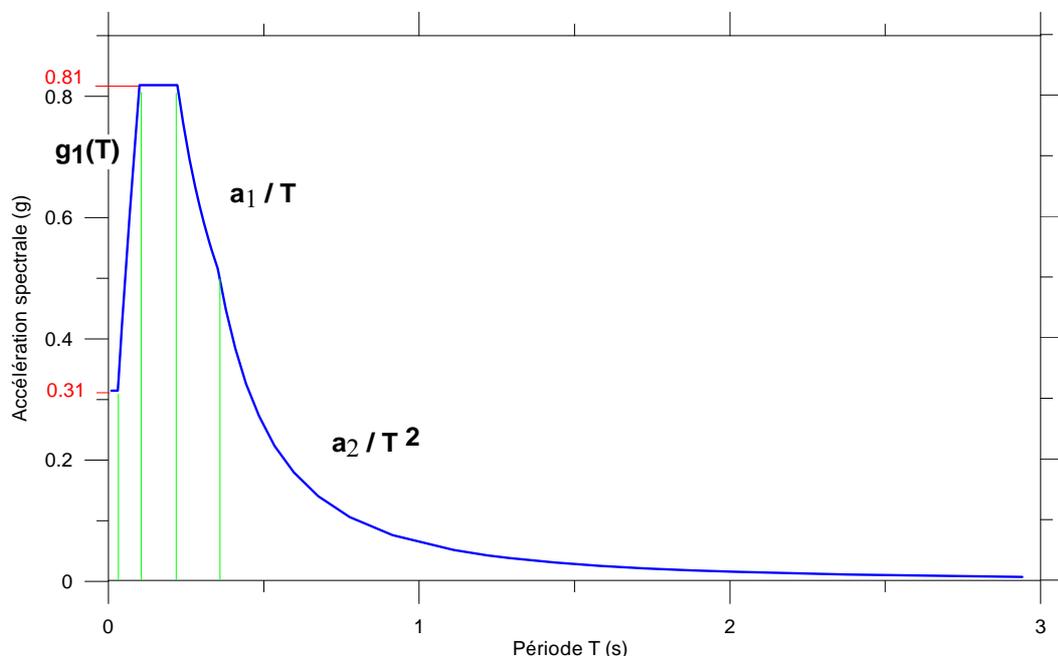


Illustration 36 - Spectre retenu pour le site du lycée de Bouéni - Spectre de réponse élastique horizontale avec prise en compte des effets de site en accélération en fonction de la période, amortissement 5%.

## 7.4. ANALYSE DES POTENTIALITÉS DE LIQUEFACTION

### 7.4.1. Définition et méthode

La méthode retenue pour l'évaluation des potentialités de liquéfaction est présentée au chapitre 5.3.

### 7.4.2. Appréciation des potentialités de liquéfaction du site de Bouéni

#### a) *Carte d'aléa issue des atlas des risques*

La carte issue des atlas des risques<sup>5</sup> met en évidence, a priori, une susceptibilité faible à nulle à la liquéfaction dans zone de projet (Illustration 37).

#### b) *Contexte hydrogéologique*

Le site de projet est a priori dépourvu de nappe significative ce qui va dans le sens de ne pas envisager de liquéfaction possible dans les terrains.

#### c) *Susceptibilité qualitative à la liquéfaction*

**Les colluvions et les altérites, constituées de matériaux fins assez plastiques, ne sont pas des matériaux liquéfiables.** Les critères d'exclusion des argiles sont d'ailleurs vérifiés ( $D_{70} < 74 \mu\text{m}$  et  $IP > 10$ ).

Il n'y a donc pas lieu de poursuivre l'étude de liquéfaction plus dans le détail.

#### d) *Préconisations en terme de dispositions constructives*

Aucune disposition constructive liée à la liquéfaction des sols n'est à prévoir dans le projet de construction du collège de Bouéni.

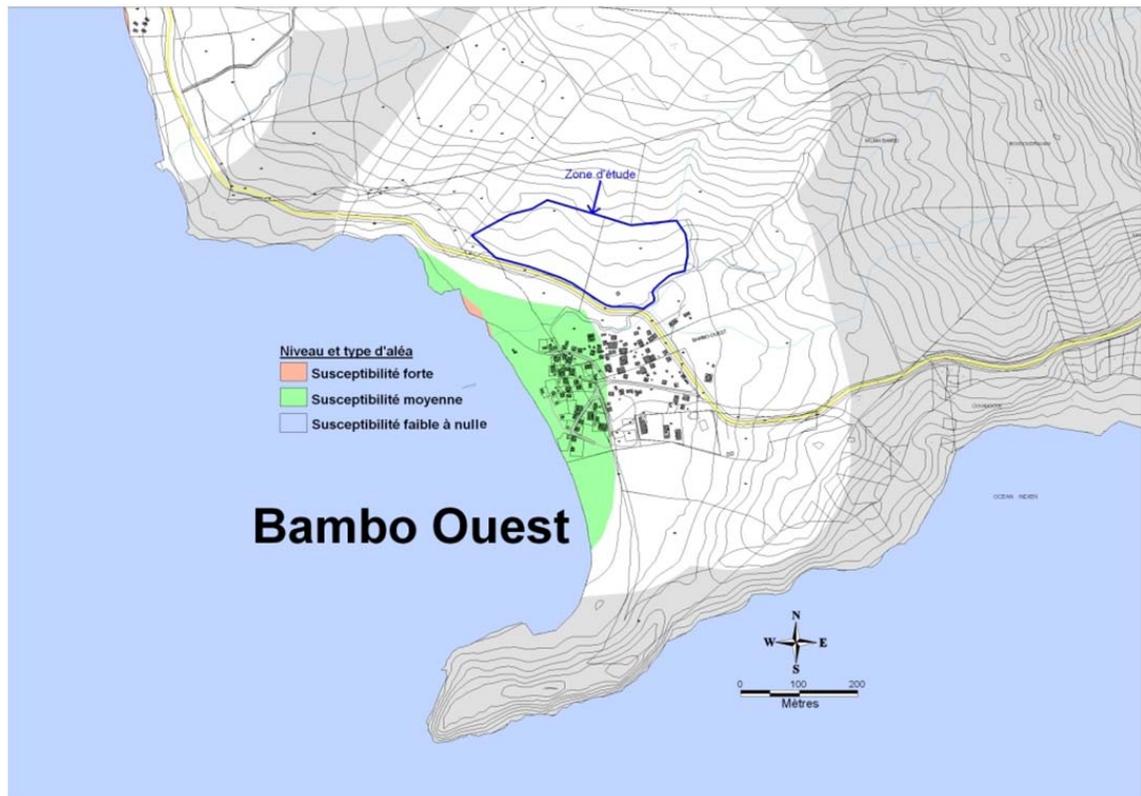


Illustration 37 - Carte d'aléa liquéfaction issue des atlas des aléas pour le site de Bouéni

## 7.5. CONCLUSIONS RELATIVES AU POTENTIEL DE LIQUEFACTION SUR LE SITE DE BOUENI

Dans la mesure où les terrains au droit du projet de construction du collège sont constitués colluvions et d'altérites silteuses plutôt plastiques, non liquéfiables, l'aléa liquéfaction dans la zone doit être considéré comme négligeable.

Aucune mesure constructive liée à la liquéfaction des sols n'est à prévoir.



## 8. Conclusion

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

Le séisme de référence retenu pour cette étude est le séisme du 1<sup>er</sup> décembre 1993, de magnitude locale 5.2, ramené à une distance focale de 10 km des sites.

Dans un premier temps, le spectre spécifique a été défini « au rocher horizontal affleurant ». Ce spectre est représenté sur l'illustration 1 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 les sites a permis de définir des colonnes de sols caractéristiques du site. Ceci a permis de calculer un spectre spécifique tenant compte des effets de site lithologiques à l'aide d'un modèle numérique linéaire-équivalent (code de calcul CyberQuake, version 2000).

Les spectres spécifiques qui en résultent sont respectivement fournis en Illustration 13 et Illustration 16 et en Tableau 10 et Tableau 11 pour les deux colonnes de sol définies pour le lycée de Chirongui, en Illustration 27 et Tableau 16 pour le collège de Labattoir et enfin en Illustration 36 et Tableau 20 pour le collège de Bouéni.

L'accélération horizontale maximale tenant compte des conditions de site est respectivement de 0,28 g (valeur de l'accélération pour  $T = 0$  s sur le spectre de réponse spécifique) et 0,30 g pour les deux colonnes de sol définies pour le lycée de Chirongui, de 0,27 g pour le collège de Labattoir et de 0,31 g pour le collège de Bouéni. Il convient de noter **qu'il n'apparaît pas nécessaire** d'appliquer aux spectres spécifiques définis dans cette étude **de coefficient multiplicatif. En effet, le spectre spécifique au rocher avec un coefficient de 1.2 est proche des formes réglementaires envisagées à terme.**

Concernant la liquéfaction des sols sur le site du futur lycée de Chirongui, dans la plaine alluviale (Ouest et Nord du site) où, en cas de susceptibilité qualitative avérée à la liquéfaction, un risque important de liquéfaction jusqu'à environ 11 m de profondeur serait à craindre. Ceci nécessiterait alors un renforcement important pour implanter toute construction lourde et peu déformable dans cette zone. Néanmoins, faute de données de laboratoires suffisantes sur les alluvions, il n'a pas été permis de vérifier rigoureusement le potentiel de liquéfaction des alluvions présentes sur le site. Seule une granulométrie dans l'horizon supérieur est exploitable, semblant mettre en avant des terrains trop fins pour être liquéfiables.

**Donc, dans la plaine alluviale, même si certains indices conduisent à penser que les terrains sont trop fins pour être liquéfiables, il est impossible en l'état**

**d'écarter ce risque sans disposer d'éléments complémentaires.** En conséquence, **pour lever cette incertitude, nous recommandons de réaliser un forage complémentaire.**

Dans la mesure où la susceptibilité qualitative des alluvions à la liquéfaction nécessite d'être vérifiée, dans un contexte où a priori les sols présents se révèlent probablement trop fins, il apparaît prématuré de définir précisément des solutions de renforcement du site au niveau de la plaine alluviale.

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



## 9. Bibliographie

**AFNOR (1995)** - Règles de construction parasismique : règles PS applicables aux bâtiments, dites règles PS92. AFNOR, Paris, norme française NF P 06-013.

**Association Française du Génie Parasismique (1993)** - Guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique. AFPS, St-Rémy-lès-Chevreuse.

**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.

**Cassan M. (1988)** - Les essais in situ en mécanique des sols, 2e édition, Eyrolles, Paris.

**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.

**Faccioli E. and Resendiz D. (1976)** - Soil dynamics behaviour including liquefaction. p.98-109. *In* C.Lomnitz (ed.) Seismic risk and engineering decision. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

**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.

**Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S. and Sato, H. (1982)** - Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. 3<sup>rd</sup> International Earthquake Microzonation Conference, Seattle, 1319-1330.

**Kokusho T. (1980)** – Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range. *Soils and foundations*, 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 6<sup>th</sup> Int. Symp. On Numerical models in Geomechanics, NUMOG VI, Montréal, Québec, Ccanada 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.
- 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.
- Roullé A., Audru J.-C., Bernardie S. et Nédellec J.-L. (2005)** – Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques sur le site du lycée de Chirongui (Mayotte). Rapport BRGM/RP-53832-FR, 61 p., 14 fig., 16 tabl., 2 annexes.
- 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.
- Seed H.B., Idriss I.M (1970)** – Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis of horizontally layered sites. Report UCB/EERC 70-10, Earthquake Eng. Res. Center, Univ. California, Berkeley, Ca.
- Seed H.B., Idriss I.M., Arango J. (1983)** - Evaluation of liquefaction potential using field performance data, *J. of Geotechnical Engineering, ASCE*, vol. 109, n°3.
- SEGC (2007)** - Construction du collège de Bouéni. Reconnaissance géologique et géotechnique, dossier n°1201, décembre 2007.
- SEGC (2008)** - Construction du lycée polyvalent de Chirongui. Etude géotechnique d'avant projet, dossier n°1229, mars 2008
- SEGC (2008)** - Extension du collège de Labattoir. Reconnaissance géologique et géotechnique et diagnostic géotechnique, dossier n°1369, décembre 2008.
- Stieltjes L. (1988)** – Carte géologique de Mayotte à 1/50 000 et sa notice. Éd. BRGM.
- Terrier M., Audru J.C., Bour M., Dominique P. (2000)** - Etude de l'aléa sismique régional de l'île de Mayotte ; détermination des mouvements sismiques de référence. Rapport BRGM RP-50250-FR.
- Vucetic, Dobry R. (1991)** – Effect of soil plasticity on cyclic response. *J. Geotech.Eng, ASCE*, 117(1), p. 89-107.



## **Annexe 1**

# **Présentation des mesures géophysiques réalisées**



## Méthode d'analyse spectrale des ondes de surface (SASW)

### ***Principe de la méthode des ondes de surface***

Les ondes de surface, se propagent parallèlement à la surface du sol, dans sa partie superficielle. C'est l'aspect énergétique de ces ondes qui est a priori le plus marquant. Environ deux tiers de l'énergie transmise par une source sismique se propage sous forme d'ondes de surface. De plus, l'atténuation par expansion géométrique de ces ondes est proportionnelle à  $1/\sqrt{r}$ ,  $r$  étant la distance à la source (au contraire d'autres types d'onde dont l'atténuation est en  $1/r$ ). Par conséquent, à partir d'une certaine distance de la source, le champ d'onde est essentiellement constitué d'ondes de surface (voir Bitri *et al.*, 1997).

Dans les milieux stratifiés où chaque couche de sous-sol est caractérisée par des propriétés mécaniques différentes, l'onde de surface est dispersive : la vitesse de propagation varie avec la fréquence. Chaque composante fréquentielle de l'onde se propage dans une épaisseur de terrain différente. Les plus hautes fréquences se retrouvent dans les parties les plus superficielles. C'est cette propriété qui va être exploitée dans la méthode des ondes de surface. Cette méthode s'appelle Analyse Spectrale des Ondes de Surface ou Spectral Analysis of Surface Wave (SASW). Dans le cas d'une analyse multi-capteurs on parle alors de méthode MASW pour Multichannel Analysis of Surface Wave.

Les principales étapes de la méthode sont les suivantes (Illustration 38):

- acquisition d'un tir sismique, la source et la série de capteurs étant alignées sur une partie du profil,
- calcul des diagrammes de dispersion et extraction des courbes de dispersion. Celles-ci représentent les variations de la vitesse de phase en fonction de la fréquence,
- inversion mathématique de la courbe de dispersion afin d'obtenir un modèle de vitesse de cisaillement  $V_s(z)$ .

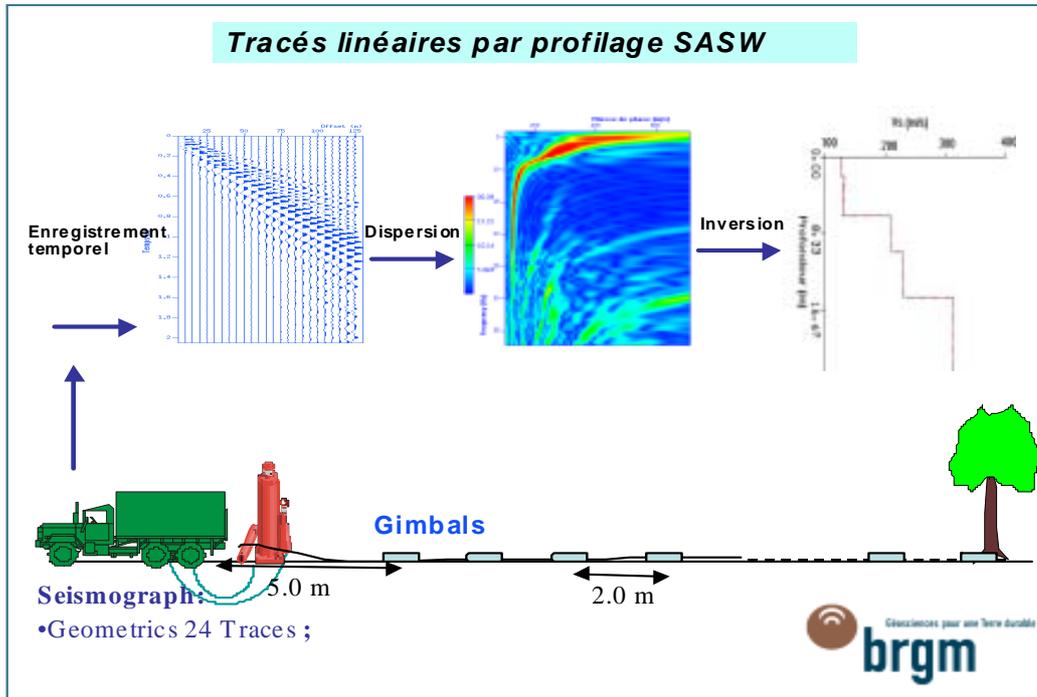


Illustration 38 - Principe de la méthode SASW

## Méthode d'analyse des données

### • Introduction

Les méthodes basées sur la dispersion des ondes de surface pour la détermination des vitesses des ondes de cisaillement représentent une alternative intéressante par rapport aux méthodes comme les forages fréquemment utilisées en géotechnique (type cross-hole).

La méthode d'analyse spectrale des ondes de surface (SASW) a été utilisée sur les sites des 3 sites afin de déterminer le profil vertical de vitesse des ondes de cisaillement.

### • Mise en œuvre

Le matériel nécessaire pour effectuer des mesures sismiques des ondes de surface est composé de :

- une centrale d'acquisition sismique
- des géophones,
- une source impulsionnelle ou vibratoire

Nous avons utilisé pour cette étude une centrale d'acquisition STRATAVIZOR de 48 traces, et 24 géophones de fréquence de résonance 10Hz. Pour la source, nous avons utilisé un marteau de 10kg. Le déport entre la source et le premier géophone était de 2 m. Le choix de l'espacement des géophones est un compromis entre la résolution spatiale et l'incertitude sur la vitesse de phase. Un petit espacement entre géophones augmente la résolution mais diminue la précision de calcul de vitesse de phase. Pour cette étude, l'espacement entre géophones est fixé à 2 m. Quatorze tirs espacés de 4 m ont été réalisés pour chaque profil. La distance source-géophone maximale est de 50 m. Un tir sismique enregistré sur le site est présenté sur l'Erreur ! Source du renvoi introuvable., mettant en évidence un train d'onde de surface (Rayleigh) marqué.

#### • Dispersion des ondes de surface

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 surfaces contiennent alors de l'information sur les milieux traversés entre la surface et la profondeur maximale de pénétration des différentes modes. En analysant la dispersion de ces ondes, il est donc possible d'obtenir des informations sur les valeurs de paramètres physiques à différentes profondeurs. A titre d'exemple, un diagramme de dispersion est présenté sur l'illustration 39. Le maximum d'énergie (en rouge) dans le diagramme de dispersion donne les courbes de dispersion. La courbe de dispersion, ainsi que ses barres d'erreurs, sont ensuite extraites du diagramme pour être inversées.

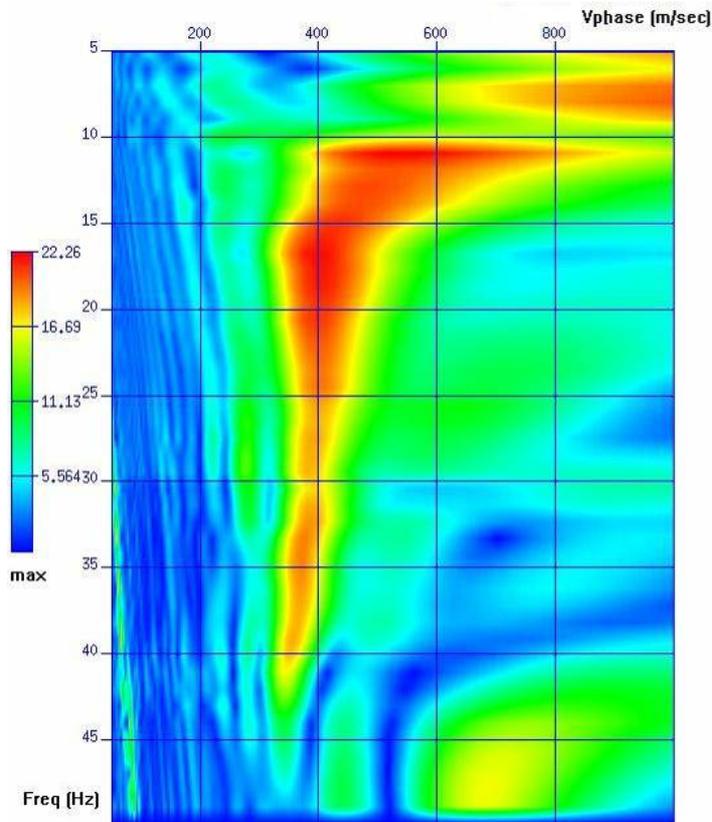


Illustration 39 - Diagramme de dispersion associé aux tirs enregistrés sur le site

#### • Inversion des courbes de dispersion

L'inversion des courbes de dispersion a pour but de retrouver le profil vertical de vitesse des ondes S. Les courbes de dispersion réelles, comparées aux courbes de dispersion synthétiques calculées, à partir d'un modèle *a priori* conduisent à des résidus de vitesse de phase. Le modèle de départ est défini par quatre paramètres : les épaisseurs des couches, leur densité et leur vitesse des ondes P et S. Les vitesses des ondes S et les épaisseurs des couches peuvent être obtenues par inversion de courbes de dispersion. Les vitesses des ondes P peuvent être déterminées par analyse des ondes réfractées et la densité peut être estimée à partir des données géologiques disponibles dans la zone d'étude. Les courbes de dispersion dépendent essentiellement des vitesses des ondes S et des épaisseurs. Par conséquent, une estimation approximative des vitesses des ondes P ou de la densité aura une influence minimale sur la courbe de dispersion. Dans notre étude, les paramètres du modèle initial sont calculés à partir des valeurs de la vitesse de phase. Dans l'hypothèse d'un milieu élastique et un coefficient de Poisson de 0,38, les relations suivantes ont été utilisées :

$$V_s = V_{ph} * 1.1$$

$$V_p = 2.4 * V_s$$

$$\text{Rho} = 2.5 - 0.0002 * (4000 - V_p)$$

Pour la profondeur de pénétration des ondes de surface une relation empirique trouvée dans la littérature spécialisée a été utilisée :

$$Z = 0.53 V_{ph}/f$$

avec  $f$  la fréquence des ondes de surface.

L'information apportée par les ondes de surface ne permet pas d'inverser simultanément au cours d'une même itération les vitesses et les épaisseurs de couche.

Une méthode inverse linéarisée est utilisée pour obtenir les vitesses des ondes S et les épaisseurs des couches. Au cours des itérations, les vitesses et l'épaisseur des couches sont inversées successivement de façon à ajuster une courbe synthétique de dispersion aux données réelles. Les résultats obtenus montrent un bon accord entre les données et les valeurs calculées.

L'interpolation des courbes  $V_s(z)$  pour chacun des tirs du profil permet d'obtenir une section  $V_s(x,z)$  représentant les variations de  $V_s$  en fonction de la profondeur le long du tracé.

**Les profils de vitesse déterminés à l'aide de ces mesures SASW sont présentés respectivement pour les 3 sites dans les annexes suivantes : Annexe 2, Annexe 3 et Annexe 4.**

## Méthode de détermination de la fréquence de résonance du site (H/V sur bruit de fond)

### **Méthodologie**

De nombreuses techniques théoriques, numériques ou instrumentales ont été développées pour estimer les effets de site lithologiques. 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 (Nakamura, 1989). Le dispositif expérimental est constitué d'un sismomètre trois composantes et d'une station d'acquisition (Illustration 40).



*Illustration 40 - Dispositif H/V utilisé à Mayotte (à gauche : la station d'acquisition et à droite : le sismomètre tridimensionnel Lennartz 5 secondes)*

De nombreuses expériences ont comparé cette méthode avec des méthodes classiques et ont montré sa capacité à évaluer la fréquence propre du site puis, en conjonction avec d'autres éléments, les effets de site proprement dits. 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 meuble 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 (ou fréquence propre).

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 :

$$H = \frac{V_s}{4f_0}$$

avec  $H$  : 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.

### **Mise en œuvre**

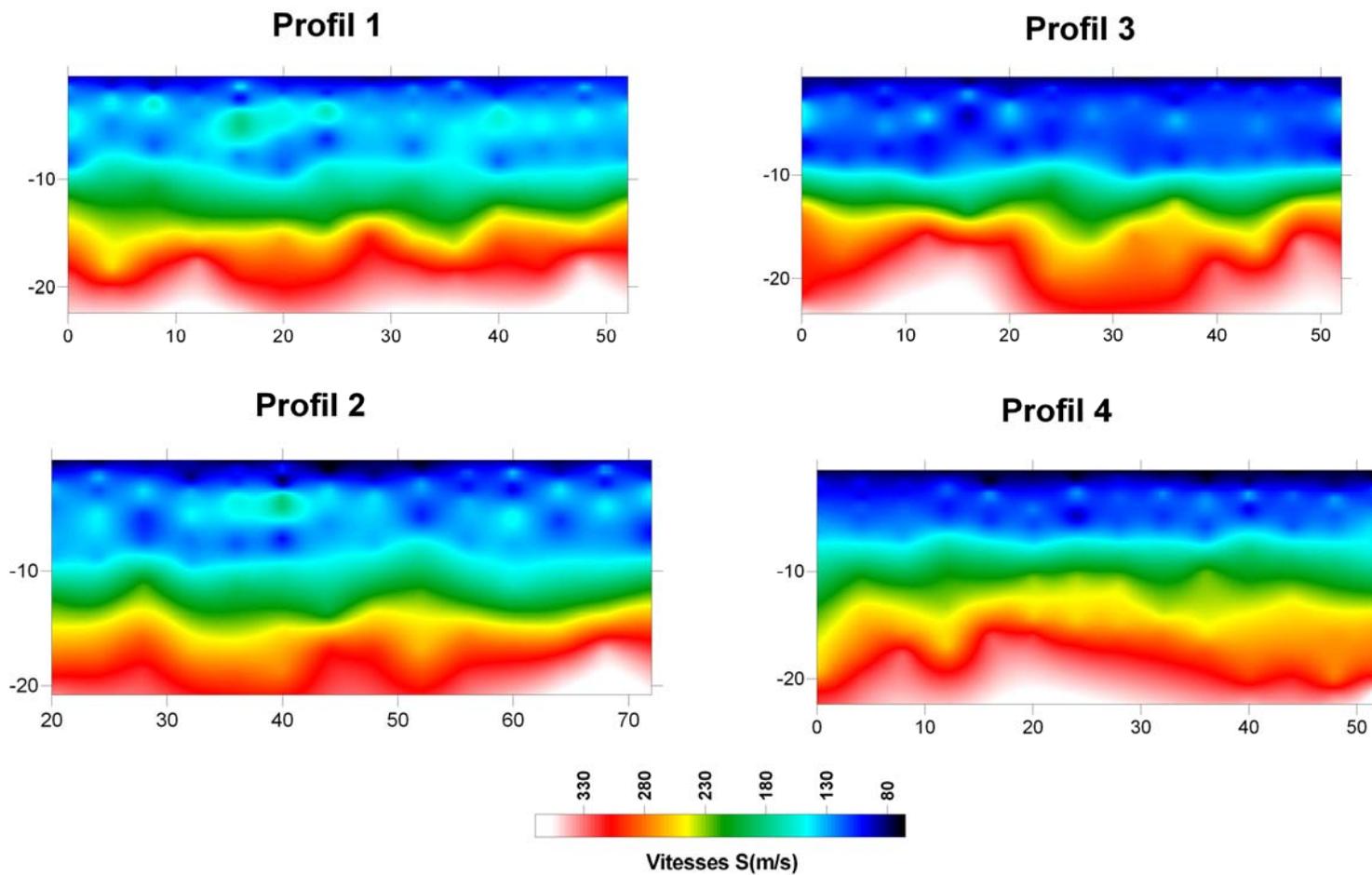
La station d'acquisition utilisée pour les mesures sur les 3 sites de Mayotte est une Leas-CityShark II. Le capteur est un sismomètre Lennartz-5s. Quinze enregistrements de 11 minutes ont été réalisés. Les données ont été traitées à l'aide du logiciel geopsy ([www.geopsy.org](http://www.geopsy.org)) en suivant les recommandations du groupe de recherche Sesame (<http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm>), en particulier pour s'affranchir au mieux des incertitudes liées au bruit ambiant important sur le site de mesures.



## **Annexe 2**

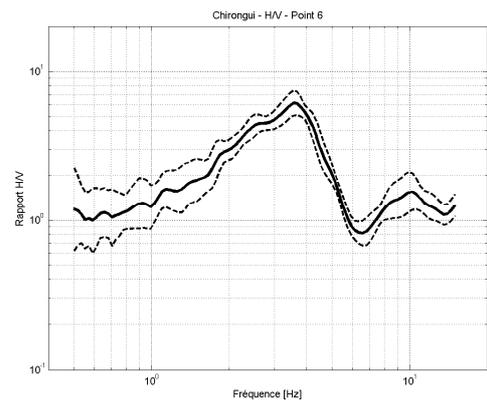
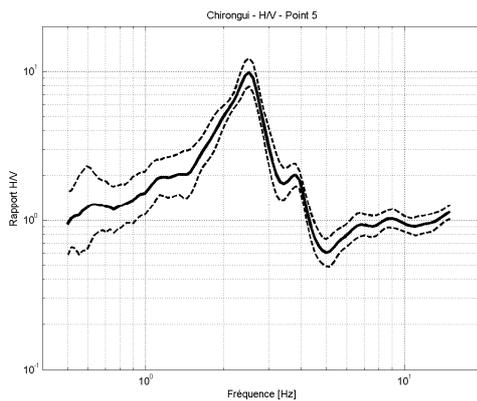
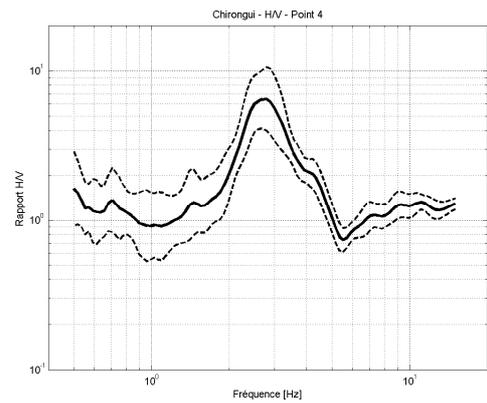
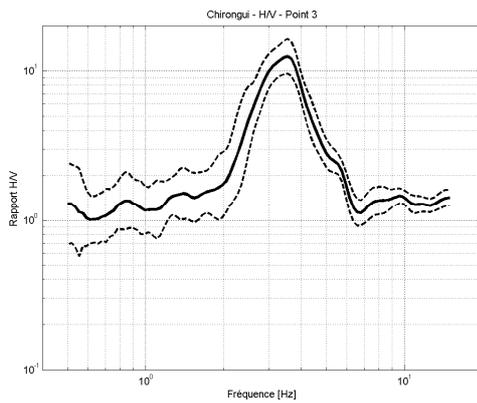
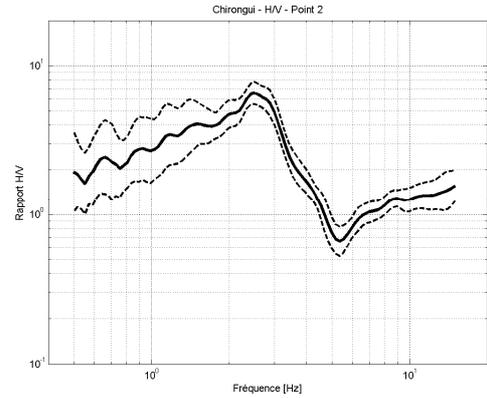
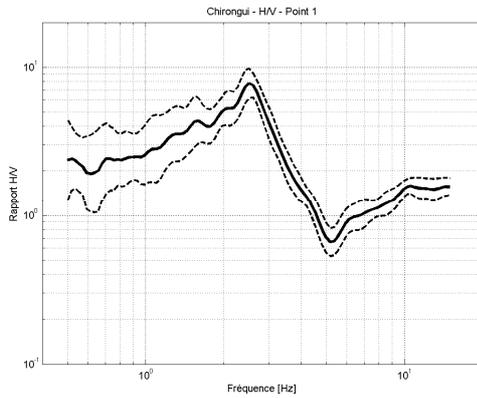
# **Résultats des mesures géophysiques pour le site de Chirongui**

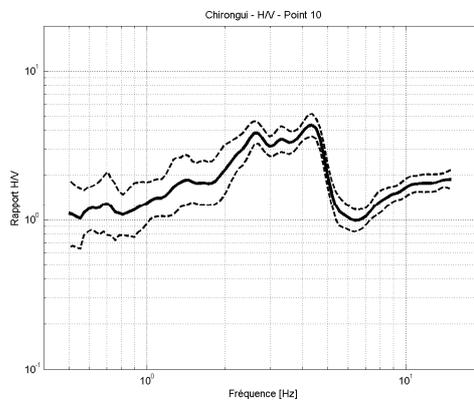
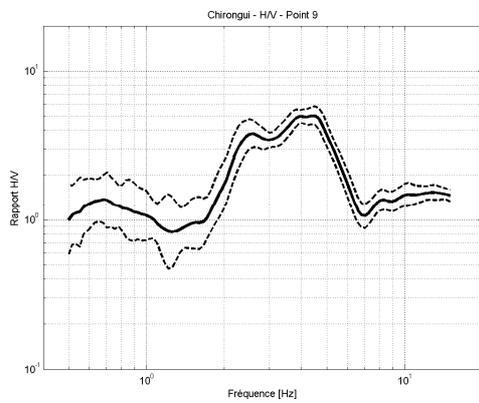
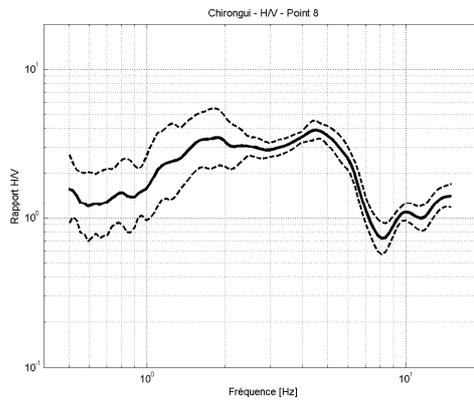
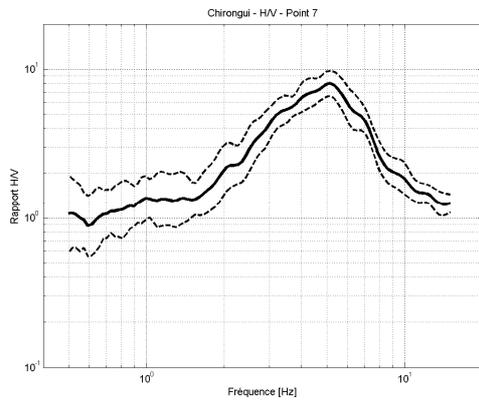
## Mesures SASW



### Site de Chirongui

## Mesures H/V

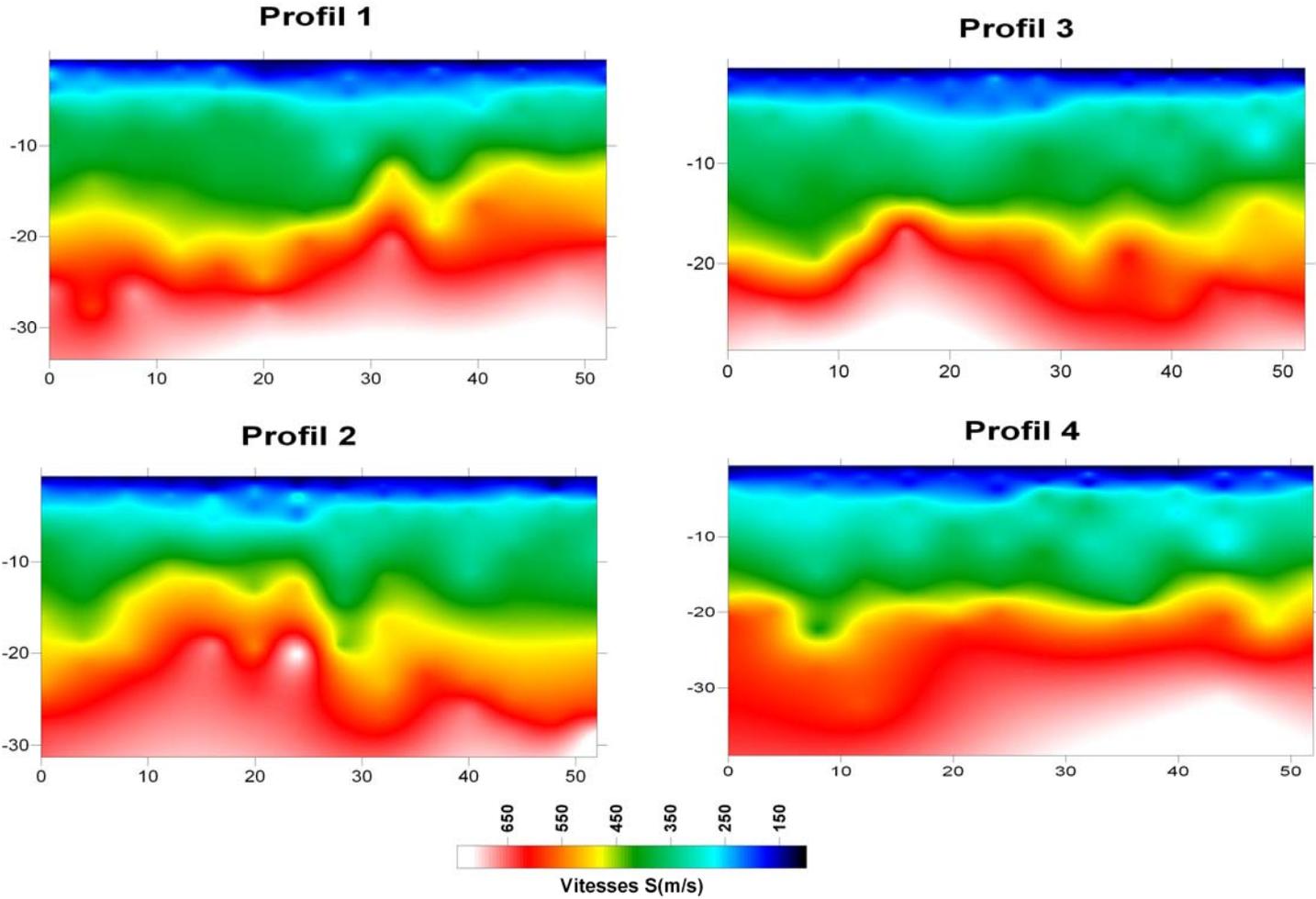




## **Annexe 3**

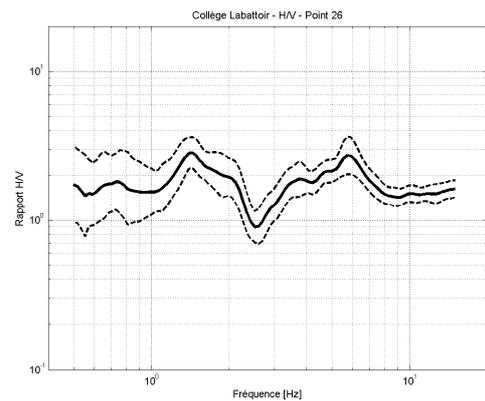
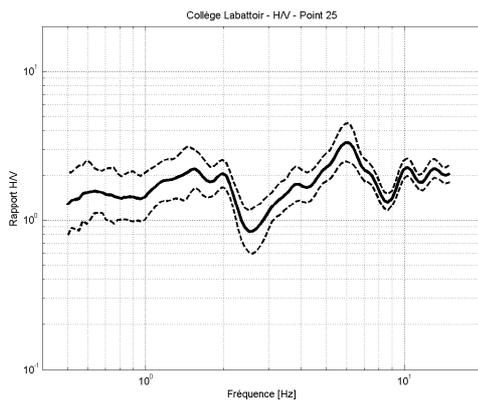
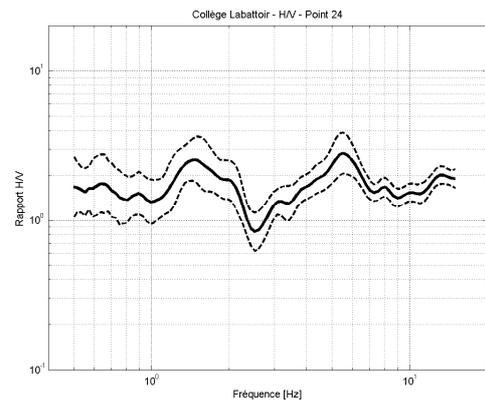
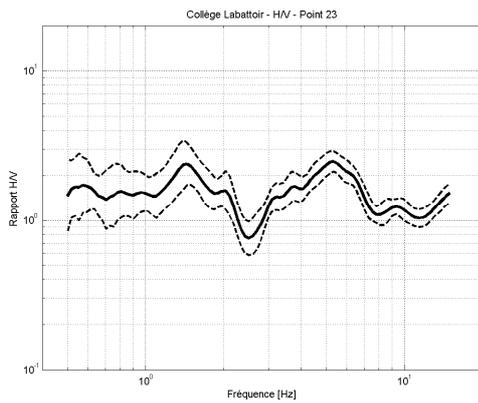
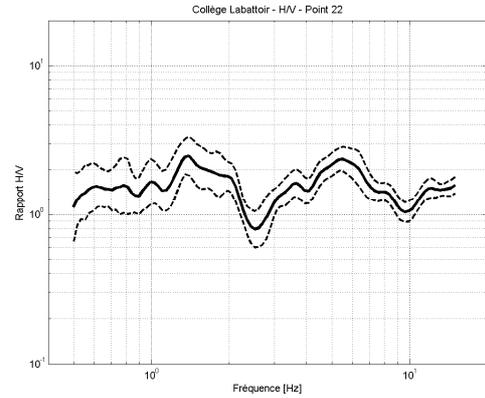
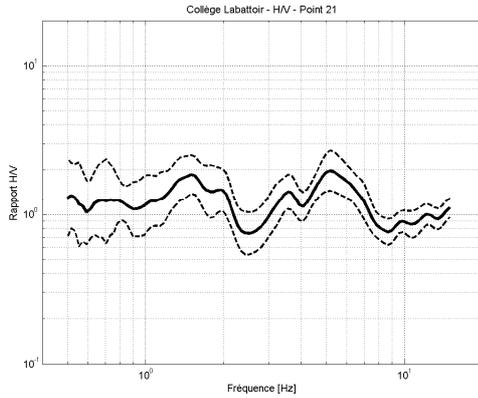
### **Résultats des mesures géophysiques pour le site de l'extension du collège de Labattoir**

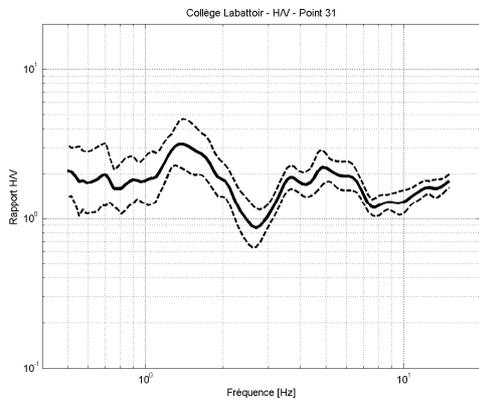
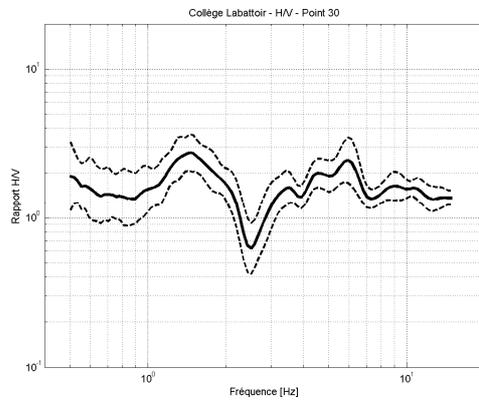
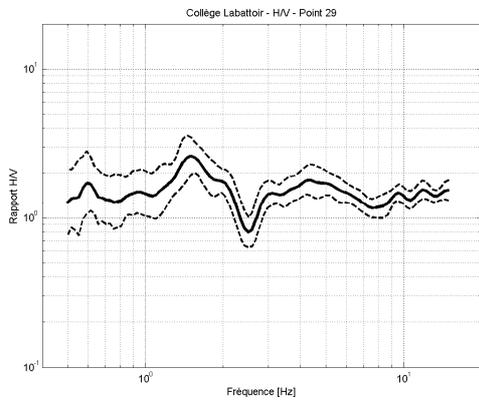
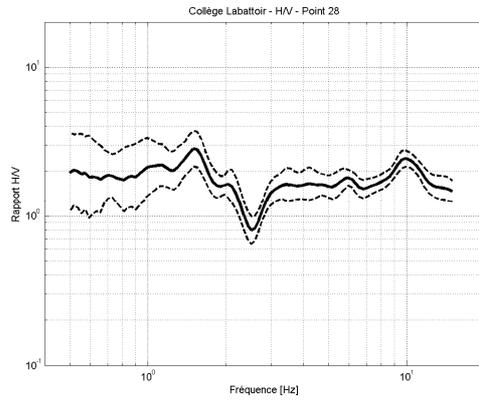
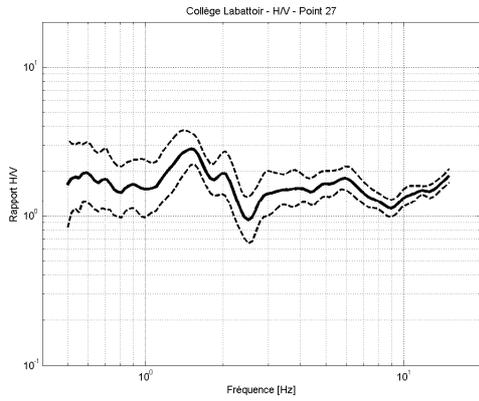
# Mesures SASW



## Collège de Labattoir

## Mesures H/V

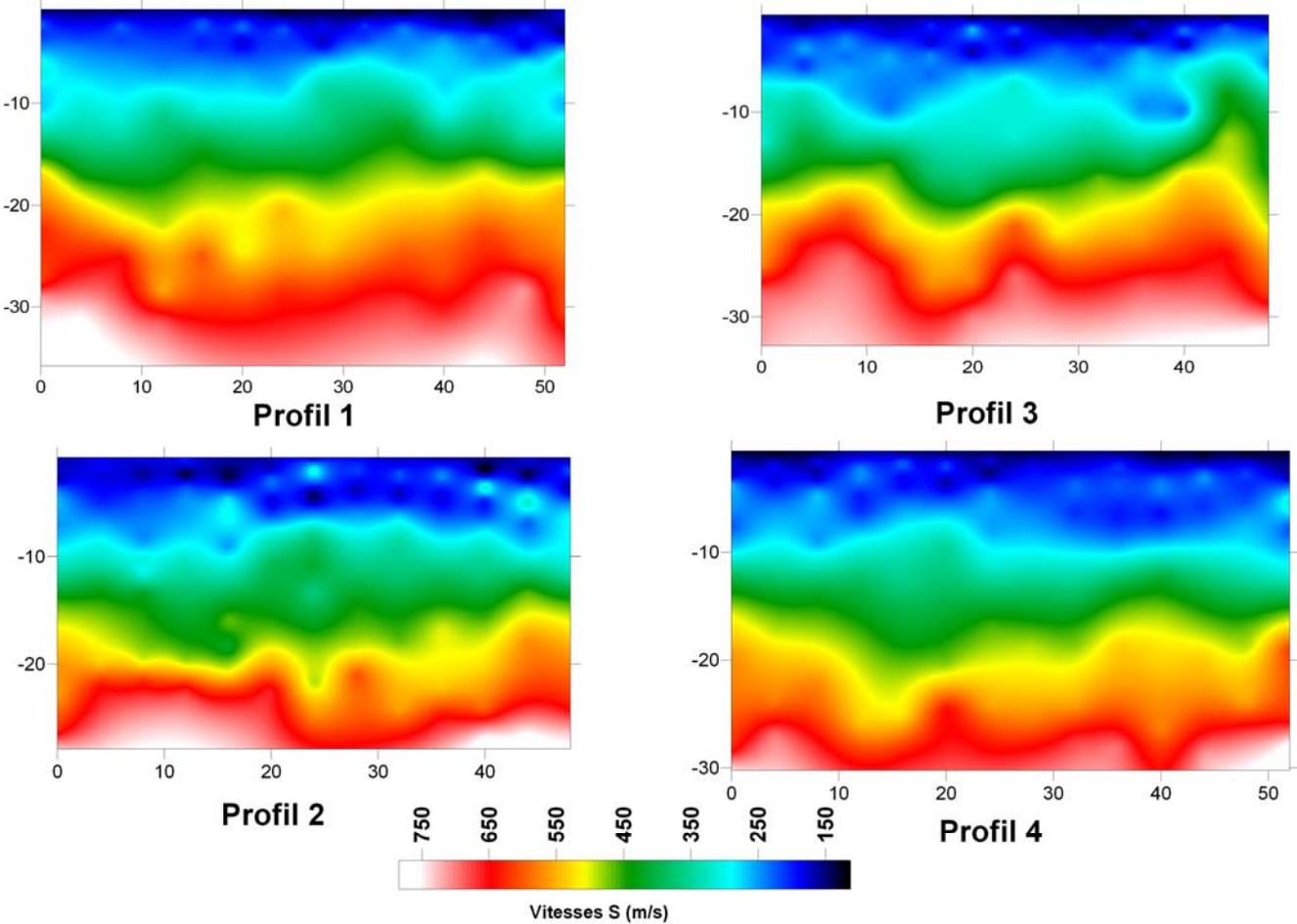




## **Annexe 4**

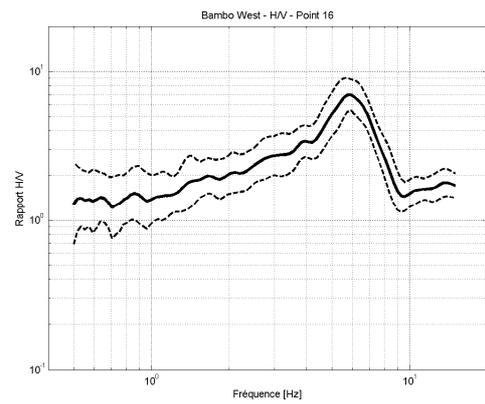
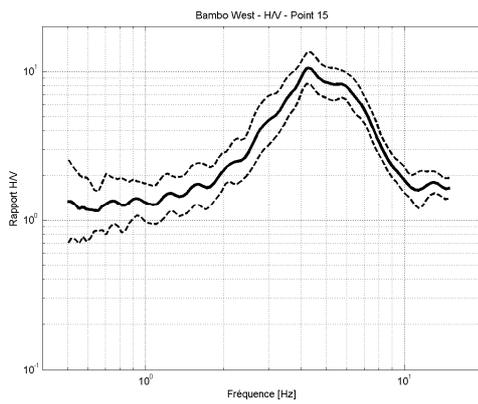
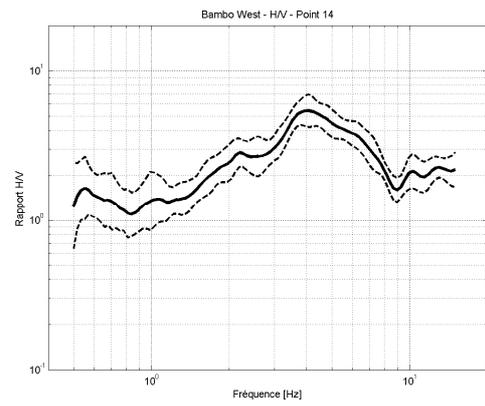
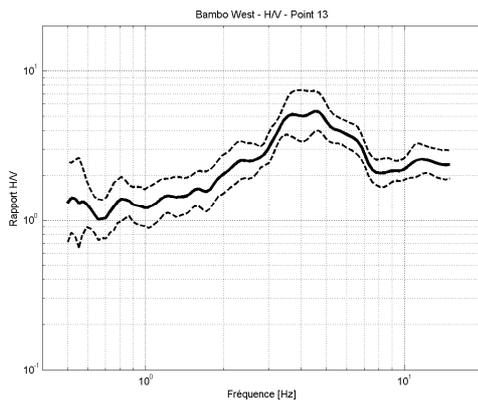
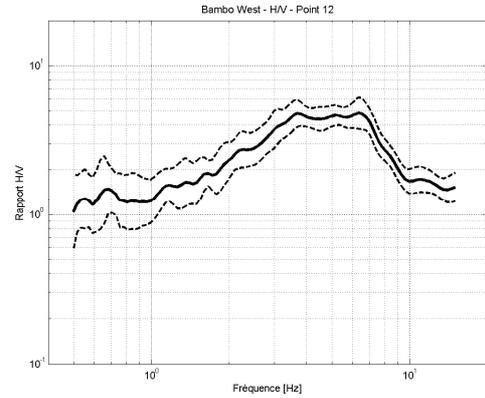
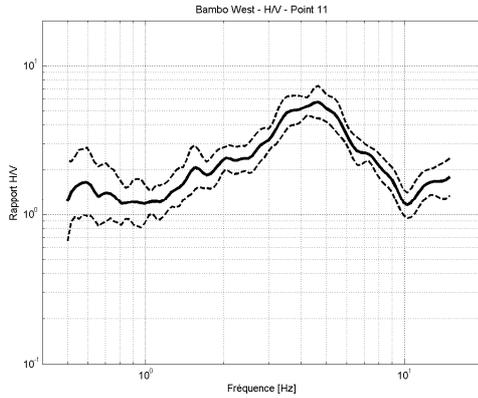
### **Résultats des mesures géophysiques pour le site du collège de Bouéni**

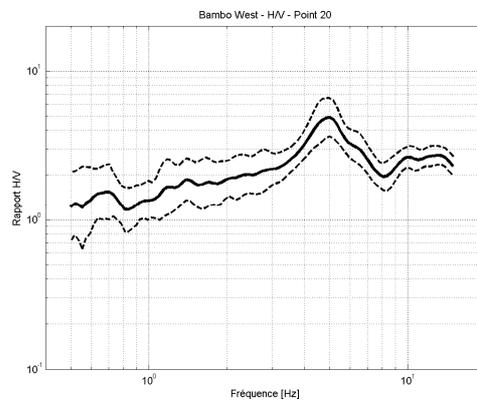
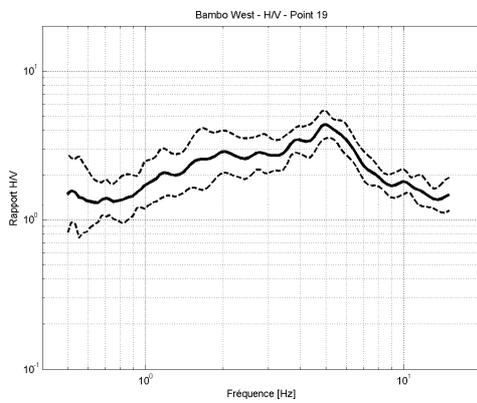
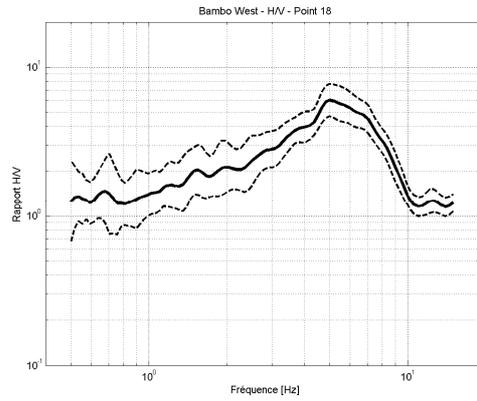
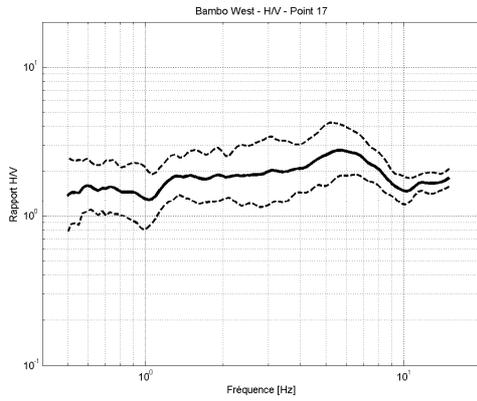
### Mesures SASW



### Site Bambo-west

## Mesures H/V







**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Antenne de Mayotte**  
Centre Amatoula  
Z.I. de Kaweni – BP 363  
97600 – Mamoudzou - Mayotte  
Tél. : 02 69 61 28 13