

Document public



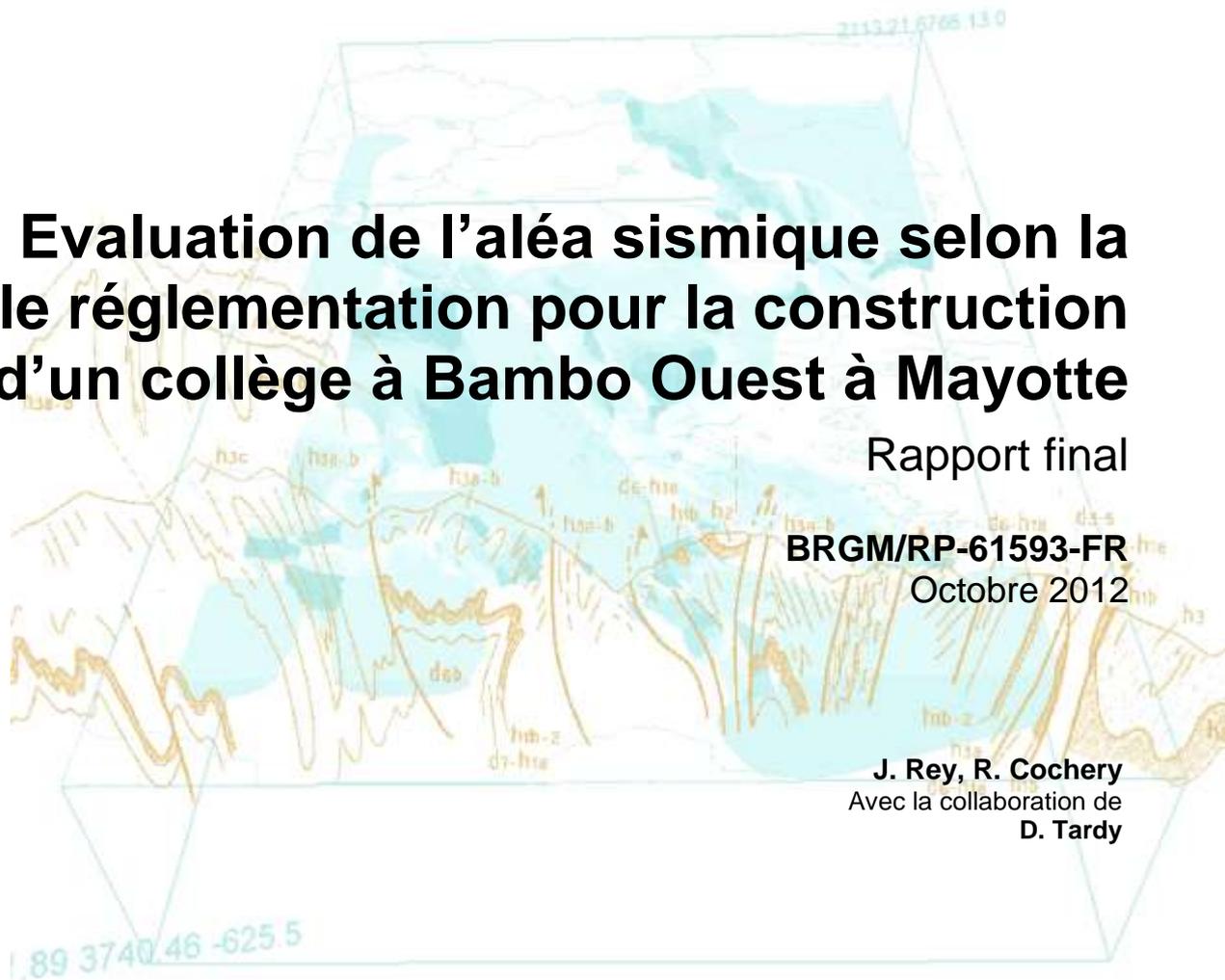
# Evaluation de l'aléa sismique selon la nouvelle réglementation pour la construction d'un collège à Bambo Ouest à Mayotte

Rapport final

BRGM/RP-61593-FR

Octobre 2012

J. Rey, R. Cochery  
Avec la collaboration de  
D. Tardy



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM

Ce document a été vérifié par : E. Vanoudlheusden      date : 17/10/2012

**Approbateur :**

Nom : P. Puvilland

Date : 22/10/2012

Signature :

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

**Mots clés :** aléa – sismique – réglementation – Bambo Ouest – Bouéni – Mayotte

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

**Rey J., R. Cochery** (2012) – Evaluation de l'aléa sismique selon la nouvelle réglementation pour la construction d'un collège à Bambo Ouest à Mayotte. Rapport BRGM/RP-61593-FR, 32 p., 10 fig., 4 tabl..

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Cette étude a été réalisée à la demande du Vice-Rectorat de Mayotte, et par l'intermédiaire de la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL) de Mayotte, afin de définir l'aléa sismique selon la nouvelle réglementation sur un site prévu pour la construction d'un établissement scolaire.

Le site d'étude est localisé au Sud-Ouest de Mayotte, à l'Ouest du village de Bambo Ouest sur la commune de Bouéni. Ce site avait fait l'objet d'une étude BRGM en 2009 (BRGM/RP-57715-FR) concernant l'évaluation de l'aléa sismique. Depuis cette étude, une nouvelle réglementation sismique est à appliquer à Mayotte. En effet, l'île est située en zone de sismicité 3 (sismicité modérée) au regard du nouveau zonage sismique de la France (zonage sismique donné par l'article R563-4 du Code de l'Environnement modifié par les décrets n°2010-1254 et n°2010-1255 du 22 octobre 2010).

L'analyse des données géologiques, géotechniques, géophysiques et hydrogéologiques disponibles permet de conclure que le site du futur collège de Bambo Ouest est modélisé par une unique colonne de sol correspondant à une classe de sol B.

Les spectres de réponse proposés pour le dimensionnement de cet établissement scolaire sont les **spectres définis dans la réglementation pour la classe de sol B** (voir Figure 4).

Les fichiers définissant les spectres horizontaux et verticaux pourront être utilisés (fichiers 'Ouvrage\_III\_sismicité modérée\_classe de sol B.xls' pour les spectres horizontaux et 'Ouvrage\_III\_sismicité modérée\_vertical.xls' pour le spectre vertical). Ils sont accessibles sur le CD-Rom fourni en annexe de ce rapport.

## Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Contexte réglementaire.....</b>	<b>7</b>
2.1. LA NOUVELLE REGLEMENTATION .....	7
2.2. CONSEQUENCES DE LA NOUVELLE REGLEMENTATION VIS-A-VIS DE L'APPLICATION DU DROIT DES SOLS : LA PRISE EN COMPTE DE LA SISMICITE PAR LE CONTROLE TECHNIQUE.....	7
<b>3. Evaluation réglementaire de l'aléa sismique – spectres de réponse .....</b>	<b>11</b>
3.1. EVALUATION REGLEMENTAIRE DE L'ALEA SISMIQUE REGIONAL – SPECTRES DE REPOSE POUR UN SOL DE TYPE ROCHEUX .....	11
3.2. EVALUATION REGLEMENTAIRE DE L'ALEA SISMIQUE LOCAL – SPECTRES DE REPOSE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE .....	13
<b>4. Synthèse géologique et géotechnique du site du collège de Bouéni, lieu-dit     Bambo Ouest.....</b>	<b>17</b>
4.1. PREAMBULE .....	17
4.2. DOCUMENTS DE REFERENCE.....	17
4.3. DONNEES DISPONIBLES .....	18
4.4. ANALYSE DES DONNEES .....	21
4.4.1. Géologie.....	21
4.4.2. Géotechnique.....	25
4.4.3. Géophysique .....	26
4.4.4. Hydrogéologie .....	26
4.5. ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS.....	27
4.6. SPECTRES DE REPOSE POUR LE DIMENSIONNEMENT .....	27
<b>5. Conclusion.....</b>	<b>29</b>
<b>6. Bibliographie .....</b>	<b>31</b>

## Liste des figures

Figure 1 - Zonage sismique réglementaire de la France en vigueur depuis le 1 <sup>er</sup> mai 2011.....	10
Figure 2 - Spectre de réponse réglementaire horizontal en accélération au rocher pour un bâtiment de catégorie d'importance III en zone de sismicité 3 .....	12
Figure 3 - Spectre de réponse réglementaire vertical en accélération au rocher pour un bâtiment de catégorie d'importance III en zone de sismicité 3 .....	12
Figure 4 - Spectres de réponse réglementaires horizontaux en accélération pour un bâtiment de catégorie d'importance III en zone de sismicité 3 et pour les classes de sol B, C, D et E .....	15
Figure 5 – Localisation du site d'étude à Bambo Ouest. Extrait du Scan25 de l'IGN.....	17
Figure 6 - Site de Bouéni - Localisation des échantillons pour essais de cisaillement réalisés par SEGC (SEGC dossier n° 1317, 2008c) .....	19
Figure 7 - Site de Bouéni - Localisation des sondages réalisés par SEGC et des prélèvements d'échantillons réalisés par le Laboratoire de la Direction de l'Équipement (SEGC dossier n° 1201, 2007) .....	20
Figure 8 - Localisation des investigations géophysiques réalisées par le BRGM (2009).....	21
Figure 9 - Extrait de la carte géologique de Mayotte (BRGM 1988).....	22
Figure 10 - Coupe géologique interprétative réalisée par SEGC (SEGC, 2007).....	23

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Classification des classes de sol selon les EC8. ....	14
Tableau 2 - Essais en laboratoire sur les colluvions.....	25
Tableau 3 - Essais en laboratoire sur les altérites .....	25
Tableau 4 - Colonne de sols retenue pour le site .....	27

# 1. Introduction

L'île de Mayotte est soumise à la réglementation parasismique française depuis le 1<sup>er</sup> mai 2011, date d'entrée en application d'un nouveau corpus réglementaire relatif à la prévention du risque sismique et notamment de l'arrêté du 22 octobre 2010. Ainsi, la totalité de l'île de Mayotte est désormais située en zone de sismicité 3 (sismicité modérée) au regard du nouveau zonage sismique de la France (zonage sismique donné par l'article R563-4 du Code de l'Environnement modifié par les décrets n°2010-1254 et n°2010-1255 du 22 octobre 2010).

Dans la mesure où les demandes de permis de construire pour la construction de ce collège ont été déposées officiellement après le 1<sup>er</sup> mai 2011, une seule approche peut être adoptée pour l'évaluation du risque sismique des bâtiments dits à « risque normal » sur l'île de Mayotte.

Celle-ci consiste à utiliser l'approche forfaitaire définie dans la réglementation, laquelle est applicable de manière obligatoire à Mayotte pour les bâtiments courants dont la demande de permis de construire est déposée à partir du 1<sup>er</sup> mai 2011. Cette approche consiste à définir un spectre de réponse à retenir pour le dimensionnement des structures à partir de :

- La zone de sismicité ;
- La catégorie d'importance du bâtiment ;
- La classe de sol au droit du site.

**Seule l'approche forfaitaire réglementaire est menée dans le cadre de cette étude.**

Par ailleurs cette nouvelle réglementation impose également que **des études évaluant les potentialités de liquéfaction** des formations sédimentaires au droit des sites soient menées. Cependant l'étude réalisée en 2009 sur le site de Bouéni (Oppermann et al., 2009) indique que l'aléa liquéfaction est très faible à nul. **Ainsi aucune analyse spécifique relative à la liquéfaction des sols n'est réalisée dans la cadre de la présente étude.**

## 2. Contexte réglementaire

### 2.1. LA NOUVELLE REGLEMENTATION

Une nouvelle réglementation relative à la prévention du risque sismique datée du 22 octobre 2010 a été publiée au Journal Officiel du 24 octobre 2010. Cette réglementation est constituée de deux décrets : le décret n°2010-1254 relatif à la prévention du risque sismique et le décret n°2010-1255 délimitant le nouveau zonage sismique de la France. Ces décrets fixent ainsi le nouveau zonage sismique et les normes parasismiques qui s'y rapportent. Ces normes, appelées Eurocode 8 (EC8), sont d'application obligatoire depuis l'entrée en vigueur de ce nouveau corpus réglementaire le 1<sup>er</sup> mai 2011. Les deux décrets précités s'accompagnent d'un arrêté publié également le 24 octobre 2010, relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal ». Cet arrêté fixe les mouvements de référence pour les constructions courantes qui ne sont pas classées « à risque spécial ».

Ce nouveau zonage apporte quelques changements notoires par rapport à l'ancien en vigueur depuis 1991 :

- nouvelle dénomination des zones de sismicité et des classes de bâtiment ;
- zonage sismique communal et non plus cantonal ;
- modification de l'étendue des différentes zones et de la réglementation associée ;
- modification des paramètres du spectre de réponse du sol ...

L'intégralité du département de Mayotte, qui ne rentrait pas dans le champ de l'ancien zonage, est maintenant située en zone de sismicité 3 ou zone de sismicité « modérée » (voir Figure 1). Ainsi la commune de Bouéni dans laquelle cet établissement scolaire est en projet est située dans cette zone de sismicité.

En zone de sismicité 3, toutes les constructions nouvelles ou apportant des modifications à des constructions existantes sont concernées par cette nouvelle réglementation. Ainsi, au titre de ces textes, tout le département de Mayotte est concerné par la prise en compte du risque sismique par l'application des règles de constructions parasismique.

### 2.2. CONSEQUENCES DE LA NOUVELLE REGLEMENTATION VIS-A-VIS DE L'APPLICATION DU DROIT DES SOLS : LA PRISE EN COMPTE DE LA SISMICITE PAR LE CONTROLE TECHNIQUE.

- Le contrôle technique

Le contrôle technique est rendu obligatoire pour les bâtiments présentant un enjeu important vis-à-vis du risque sismique (article R.111-38 du code de la construction et de l'habitation) : bâtiments de plus de 8 mètres en zones de sismicité 4 et 5 et

bâtiments de catégories III et IV en zones de sismicité 2, 3, 4 et 5. Dans ces cas, la mission parasismique (PS) doit accompagner les missions de base solidité (L) et sécurité (S).

Pour Mayotte cela concerne ainsi uniquement les bâtiments de catégories d'importance III et IV (voir ci-dessous).

➤ Les attestations de prise en compte des règles parasismiques

Ces attestations sont au nombre de deux et sont fournies respectivement avant et après les travaux pour les bâtiments où la mission PS est obligatoire.

En effet, le Code de l'Urbanisme (articles R.431-16, A.431-10 et 11) impose, pour le maître d'ouvrage soumis à l'obligation de contrôle technique de joindre au dossier de dépôt de permis de construire une attestation établie par le contrôleur technique stipulant que ce dernier a fait connaître au maître d'ouvrage son avis sur la prise en compte des règles parasismiques dans le projet concerné.

A l'issue de l'achèvement des travaux, lors du dépôt de la Déclaration Attestant l'Achèvement et la Conformité des Travaux (DAACT), le maître d'ouvrage doit fournir une nouvelle attestation stipulant qu'il a tenu compte des avis formulés par le contrôleur technique sur le respect des règles parasismiques (articles R.462-4 et articles A.462-2 à 4 du Code de l'Urbanisme).

Les deux dispositions précédentes (contrôle technique et attestations de prise en compte des règles parasismiques) concernent à Mayotte les bâtiments, équipements et installations relevant des catégories d'importance III et IV :

- Catégorie d'importance III : ouvrages dont la défaillance présente un risque élevé pour les personnes et ceux présentant le même risque en raison de leur importance socio-économique : **établissements scolaires**, établissements recevant du public (ERP) de la 1<sup>ère</sup> à la 3<sup>ème</sup> catégorie (soit une capacité d'accueil supérieure à 300 personnes), bâtiments d'habitation collective ou à usage de bureaux dont la hauteur dépasse 28m, bâtiments à usage commercial ou de bureaux ou destinés à l'exercice d'une activité industrielle recevant plus de 300 personnes, établissements sanitaires et sociaux, centres de production collective d'énergie.

- Catégorie d'importance IV : ouvrages dont le fonctionnement est primordial pour la sécurité civile, la défense nationale ou le maintien de l'ordre public : casernes, gendarmeries, commissariats, constructions contribuant aux moyens de communications (centraux, tours hertziennes...), constructions aéroportuaires (tour de contrôle...), établissements de santé (clinique, hôpital..), production et stockage d'eau potable, centre de distribution d'énergie électrique et centres météorologiques.

Les bâtiments scolaires concernés dans la présente étude sont donc considérés en **catégorie d'importance III**.

➤ Les contrôles et sanctions opérés par l'administration

En vertu des articles L.151-1 et L.152-1 du Code de la Construction et de l'Habitation, toute construction de bâtiment peut faire l'objet d'un contrôle de l'application des règles

de construction pendant les travaux et dans un délai de trois ans après l'achèvement de ceux-ci. En cas d'infraction aux règles de construction et notamment aux règles de construction parasismique, un procès-verbal mettant en jeu la responsabilité pénale du maître d'ouvrage et des acteurs de la construction peut ainsi être dressé par un agent assermenté et commissionné à cet effet. Des sanctions pénales définies par l'article L.152-4 du Code de la Construction et de l'Habitation peuvent alors être prononcées sur décision du juge à l'encontre des responsables de ces non conformités. Outre ces sanctions, l'article L.152-2 du Code de la Construction et de l'Habitation prévoit la possibilité d'ordonner l'interruption des travaux.

En pratique ce Contrôle du respect des Règles de Construction (CRC), étendu à la rubrique parasismique depuis 2006, concerne uniquement le secteur de la maison individuelle, et donc le respect des règles PSMI, et est réalisé par les agents de l'Etat, assermentés par le ministre en charge de la construction. Les vérifications se font sur dossier mais également à l'occasion de visites de chantier. Le choix des opérations contrôlées est fait selon une stratégie régionale constituée de contrôles réalisés de manière aléatoire d'une part et ciblée d'autre part.

Pour plus de détails sur l'application de cette nouvelle réglementation parasismique :

- **Décret no 2010-1254 du 22 octobre 2010** relatif à la prévention du risque sismique : <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=?cidTexte=JORFTEXT000022941706&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id>
- **Décret no 2010-1255 du 22 octobre 2010** portant sur la délimitation des zones de sismicité du territoire français [http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=3F46EFBB859559DB9DDB308ADCAA00A3.tpdjo04v\\_3?cidTexte=JORFTEXT000022941731&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id](http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=3F46EFBB859559DB9DDB308ADCAA00A3.tpdjo04v_3?cidTexte=JORFTEXT000022941731&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id)
- **Arrêté du 22 octobre 2010** relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal ». [http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=37C0052CBE1232A62F4B50A7868AE36D.tpdjo04v\\_3?cidTexte=JORFTEXT000022941755&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id](http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=37C0052CBE1232A62F4B50A7868AE36D.tpdjo04v_3?cidTexte=JORFTEXT000022941755&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id)

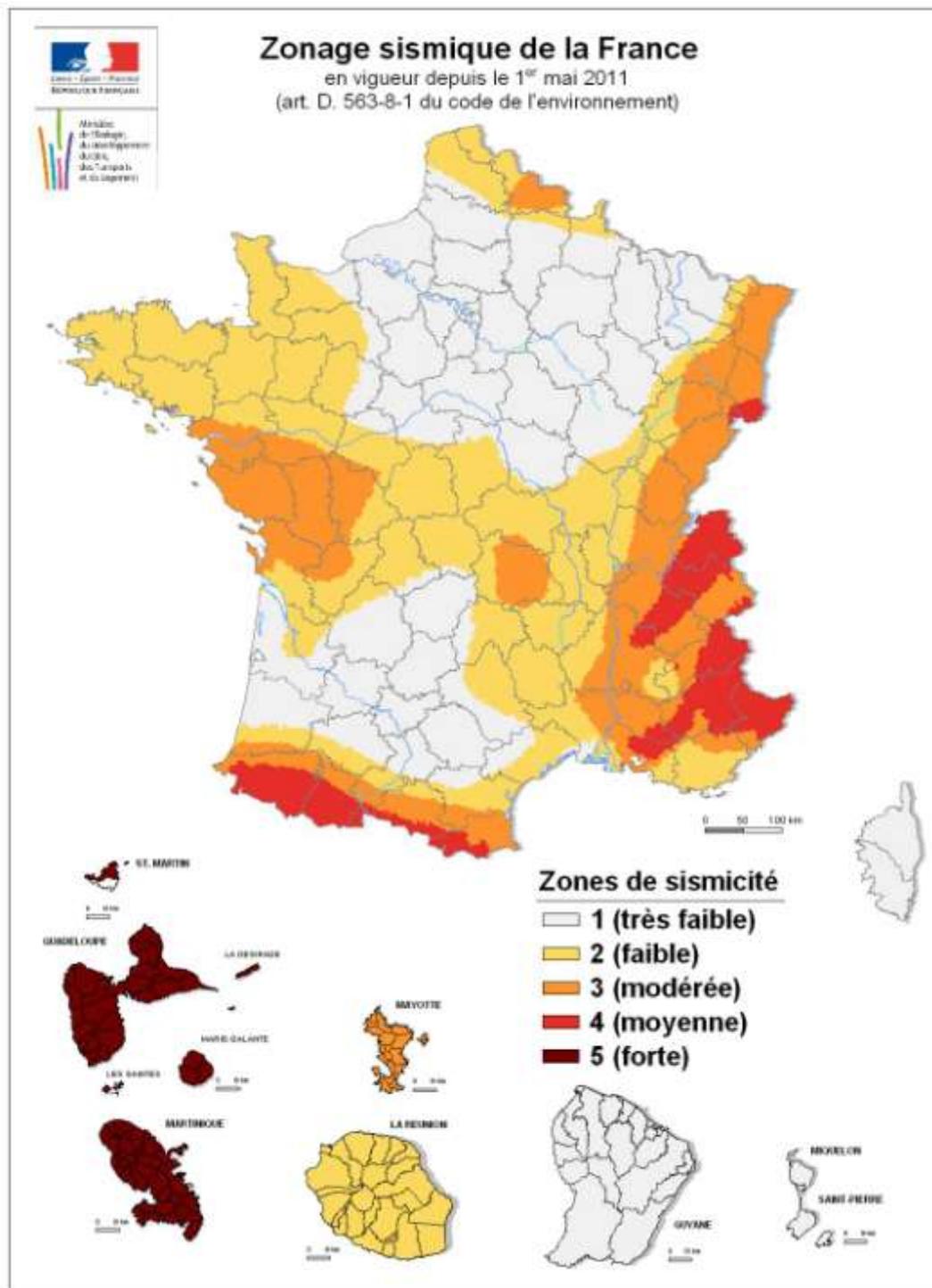


Figure 1 - Zonage sismique réglementaire de la France en vigueur depuis le 1<sup>er</sup> mai 2011

### **3. Evaluation réglementaire de l'aléa sismique – spectres de réponse**

#### **3.1. EVALUATION REGLEMENTAIRE DE L'ALEA SISMIQUE REGIONAL – SPECTRES DE REPONSE POUR UN SOL DE TYPE ROCHEUX**

L'arrêté du 22 octobre 2010 fixe les mouvements sismiques forfaitaires à appliquer aux bâtiments courants. Ces mouvements sont présentés sous la forme de spectres de réponse élastiques en accélération avec une forme conforme à celle spécifiée dans les EC8 - partie 1 (NF En 1998-1, 2005). Ainsi la forme de ces spectres dépend de l'accélération du sol pour une période nulle (PGA) ainsi que pour trois autres périodes que sont  $T_B$ ,  $T_C$  et  $T_D$ . Ces quatre paramètres sont explicités dans le texte de l'arrêté du 22 octobre 2010 en fonction de la zone de sismicité (5 zones de sismicité sont définies pour la France) et de la classe de sol (classes de sol selon les EC8 parmi les classes suivantes : A, B, C, D, E,  $S_1$  ou  $S_2$ , voir ci-dessous).

Pour un bâtiment de catégorie d'importance III tel un établissement scolaire, et dans une zone de sismicité 3 le spectre de réponse horizontal en accélération « au rocher », soit pour un sol de type A, est défini par l'arrêté du 22 octobre 2010 et présenté respectivement sur la Figure 2 et la Figure 3 pour les composantes horizontales et verticales.

Pour ce type de bâtiment (catégorie d'importance III) en zone de sismicité 3 l'accélération nominale (à période nulle) est de  $1,32 \text{ m/s}^2$  et les périodes de coupures définissant le spectre de réponse horizontal en accélération sont respectivement  $T_B=0,03\text{s}$ ,  $T_C=0,2\text{s}$  et  $T_D=2,5\text{s}$ .

Pour le spectre de réponse vertical en accélération, l'accélération nominale (à période nulle) est de 0,9 fois l'accélération horizontale soit  $1,188 \text{ m/s}^2$  et les périodes de coupures sont respectivement  $T_B=0,03\text{s}$ ,  $T_C=0,2\text{s}$  et  $T_D=2,5\text{s}$ .

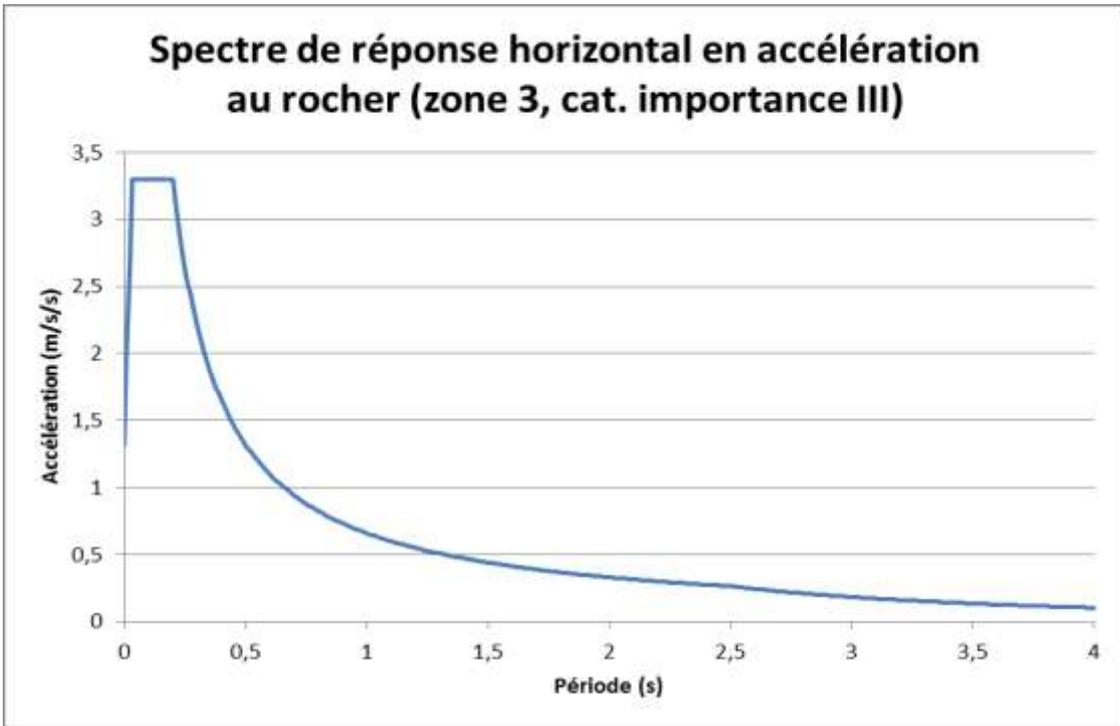


Figure 2 - Spectre de réponse réglementaire horizontale en accélération au rocher pour un bâtiment de catégorie d'importance III en zone de sismicité 3

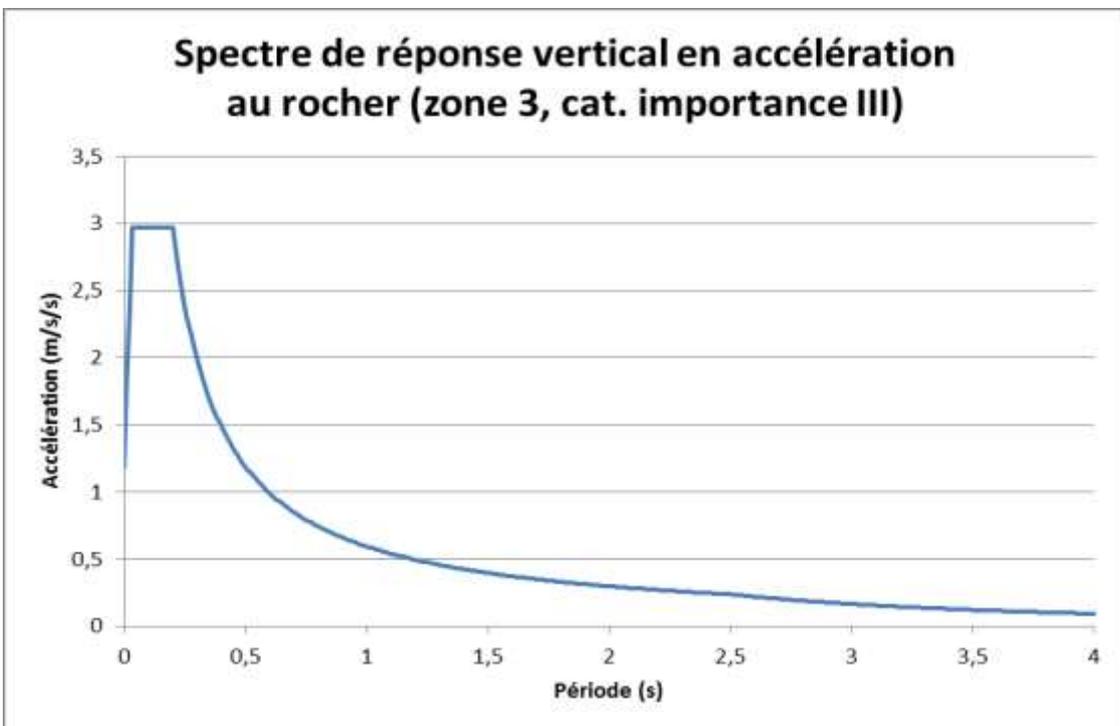


Figure 3 - Spectre de réponse réglementaire verticale en accélération au rocher pour un bâtiment de catégorie d'importance III en zone de sismicité 3

### 3.2. EVALUATION REGLEMENTAIRE DE L'ALEA SISMIQUE LOCAL – SPECTRES DE REPONSE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE

Un effet de site lithologique (aussi appelé effet de site géologique) résulte de la modification locale du signal sismique par les formations géologiques superficielles. Il est dû au piégeage des ondes dans une couche superficielle à fort contraste de vitesses avec la couche sous-jacente que constitue le substratum sismique. Idéalement, il est défini par la fonction de transfert de la colonne de sol qui modifie le signal.

En pratique, on caractérise le plus souvent les effets de site par la fréquence de résonance du sol (qui varie avec l'épaisseur de la couche superficielle et sa vitesse d'ondes de cisaillement) et par l'amplitude de la fonction de transfert à cette fréquence de résonance (qui est fonction du contraste d'impédance entre les deux couches). Schématiquement, un sol mou peu épais (épaisseur inférieure à 10 m) va présenter une résonance haute fréquence et un sol mou épais une résonance basse fréquence.

On peut, par une modélisation à une dimension du sous-sol, et en supposant un milieu monocouche, relier l'épaisseur d'une couche sédimentaire meuble (surmontant un substratum rocheux) à sa fréquence de résonance par la formule :

$$H = V_s / (4 \cdot f)$$

avec H : épaisseur de la couche meuble en **m**  
V<sub>s</sub> : vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans la couche meuble en **m/s**  
f : fréquence de résonance de la couche meuble en **Hz**

#### Classification des sols selon les EC8

La réglementation prévoit la prise en compte de ces effets de site de manière forfaitaire en caractérisant la réponse du site en fonction de la catégorie de sol selon la classification établie dans les EC8 (NF-En-1998-1, 2005).

Dans la classification des sols EC8, le paramètre principal permettant de classer les sols est la vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres (paramètre V<sub>s,30</sub>). Le Tableau 1 résume cette classification.

Classe de sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres		
		$V_{s,30}$ (m/s)	$N_{SPT}$ (Nb/30cm)	$c_u$ (kPa)
A	Rocher ou tout autre formation géologique de ce type comportant une couche superficielle d'au plus 5 m de matériau moins résistant.	> 800	–	–
B	Dépôts raides de sable, de gravier ou d'argile sur-consolidée, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation progressive des propriétés mécaniques avec la profondeur.	360 – 800	> 50	> 250
C	Dépôts profonds de sable de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement raide, ayant des épaisseurs de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres.	180 – 360	15 - 50	70 - 250
D	Dépôts de sol sans cohésion de densité faible à moyenne (avec ou sans couches cohérentes molles) ou comprenant une majorité des sols cohérents mous à fermes.	< 180	< 15	< 70
E	Profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions avec des valeurs de $V_s$ de classes C ou D et une épaisseur comprise entre 5 m environ et 20 m, reposant sur un matériau plus raide avec $V_s > 800$ m/s			
S <sub>1</sub>	Dépôts composés, ou contenant, une couche d'au moins 10 m d'épaisseur d'argiles molles/vases avec un indice de plasticité élevé ( $PI > 40$ ) et une teneur en eau importante.	< 100 (indicative)	–	10 - 20
S <sub>2</sub>	Dépôts de sols liquéfiables d'argiles sensibles ou tout autre profil de sol non compris dans les classes A à E ou S <sub>1</sub>			

Tableau 1 - Classification des classes de sol selon les EC8.

$V_{s,30}$  est la vitesse moyenne des ondes de cisaillement, elle est calculée selon l'expression suivante :

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

où  $h_i$  et  $V_i$  représentent l'épaisseur et la vitesse des ondes S de la formation ou couche  $i$ , sur un total de  $N$ , existant dans les 30 premiers mètres. Le site est classé suivant la valeur de  $V_{s,30}$  si celle-ci est disponible, sinon, la valeur de  $N_{SPT}$  sera utilisée.

$N_{SPT}$  est le nombre de coups au pénétromètre dynamique SPT (Standard Penetration Test) ;

$C_u$  est la cohésion non drainée.

Comme souligné précédemment, le facteur clé pour la classification des sols selon les EC8 est la vitesse des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres. Il est donc primordial d'être en mesure d'évaluer la vitesse de ces ondes dans les différentes couches géologiques présentes au droit du site considéré.

Les spectres horizontaux de réponse en accélération définis par l'arrêté du 22 octobre 2010 pour des sols non rocheux (sols de type B, C, D ou E) sont présentés sur la Figure 4 ci-dessous.

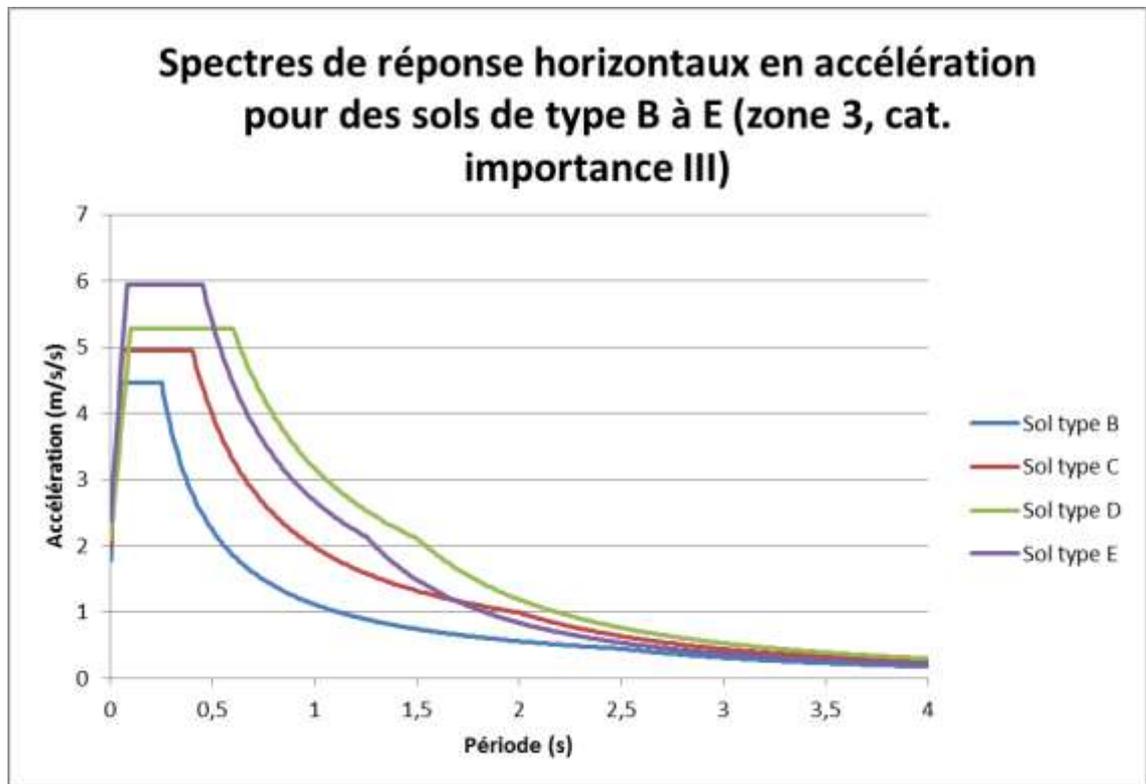


Figure 4 - Spectres de réponse réglementaires horizontaux en accélération pour un bâtiment de catégorie d'importance III en zone de sismicité 3 et pour les classes de sol B, C, D et E

Pour les bâtiments de catégorie d'importance III, en zone de sismicité 3, les accélérations nominales (à période nulle) sont estimées à partir de coefficients de sol « S » qui valent respectivement 1,35 ; 1,5 ; 1,6 et 1,8 pour des sols de type B, C, D et E. Ces accélérations nominales valent donc respectivement 1,782 m/s<sup>2</sup>, 1,98 m/s<sup>2</sup>, 2,112 m/s<sup>2</sup> et 2,376 m/s<sup>2</sup>. Les périodes de coupures définissant le spectre sont respectivement ( $T_B=0,05s$ ,  $T_C=0,25s$  et  $T_D=2,5s$ ) ; ( $T_B=0,06s$ ,  $T_C=0,4s$  et  $T_D=2s$ ) ; ( $T_B=0,1s$ ,  $T_C=0,6s$  et  $T_D=1,5s$ ) ; ( $T_B=0,08s$ ,  $T_C=0,45s$  et  $T_D=1,25s$ ) pour des sols de type B, C, D et E.

Les spectres verticaux à utiliser sont les mêmes que celui défini pour un mouvement vertical au rocher (Figure 3).

Les fichiers définissant les spectres sont fournis en annexe de ce rapport (sur CD-Rom). Il s'agit respectivement des fichiers 'Ouvrage\_III\_sismicité modérée\_classe de sol A.xls', 'Ouvrage\_III\_sismicité modérée\_classe de sol B.xls' pour les spectres de réponse horizontaux et du fichier 'Ouvrage\_III\_sismicité modérée\_vertical.xls' pour le spectre de réponse vertical.



## 4. Synthèse géologique et géotechnique du site du collège de Bouéni, lieu-dit Bambo Ouest

### 4.1. PREAMBULE

Le Vice-Rectorat de Mayotte a sollicité le BRGM pour définir l'aléa sismique pour la construction d'un établissement scolaire au Nord-Est du village de Bambo Ouest sur la commune de Bouéni (cf. Figure 5).

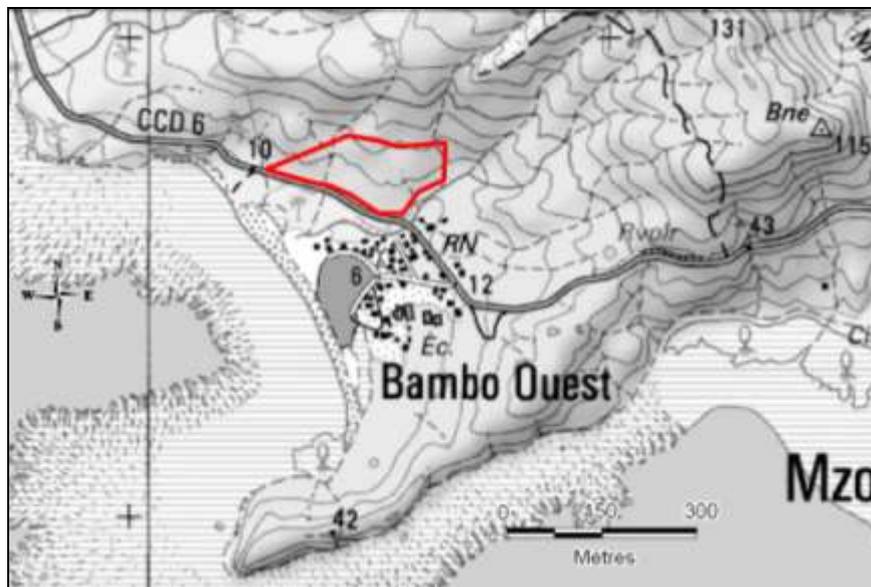


Figure 5 – Localisation du site d'étude à Bambo Ouest. Extrait du Scan25 de l'IGN.

L'objectif de cette analyse géotechnique est d'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.

### 4.2. DOCUMENTS DE REFERENCE

Pour mener à bien cette étude, nous avons eu à notre disposition les documents suivants :

- le rapport SEGC intitulé « Construction du collège de Bouéni – Reconnaissance géologique et géotechnique. Mission de type G12 », datant de décembre 2007, dossier n° 1201,

- le rapport SEGC intitulé « Construction du collège de Bouéni – Note complémentaire », datant de janvier 2008, dossier n° 1201,
- le rapport SEGC intitulé « Construction du collège de Bouéni – Note complémentaire n°2 », datant de mars 2008, dossier n° 1201,
- le rapport SEGC intitulé « Construction du collège de Bouéni – Note complémentaire n°3. Exécution d'essais. Mission de type G0 », datant de juillet 2008, dossier n° 1317,
- le rapport SEGC intitulé « Construction du collège de Bouéni – Note de synthèse », datant d'octobre 2008, dossier n° 1201,
- le rapport BRGM intitulé « 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) », datant d'octobre 2009, rapport BRGM/RP-57715-FR,
- la carte géologique de Mayotte à 1/50 000 (Stieltjes, 1988).

Nous avons également consulté la Banque de données du sous-sol (BSS).

### **4.3. DONNEES DISPONIBLES**

Les données disponibles avaient déjà fait l'objet d'une étude dans le rapport BRGM/RP-57715-FR (octobre 2009). Toutefois, les données du dossier SEGC n° 1317 (juillet 2008) n'avaient pas été intégrées aux données disponibles ; elles sont limitées aux résultats de 4 essais de cisaillement (CD 1 à CD 4 ; voir implantation en Figure 6. Les données déjà présentées dans le rapport BRGM/RP-57715-FR (octobre 2009) sont rappelées ci-dessous.

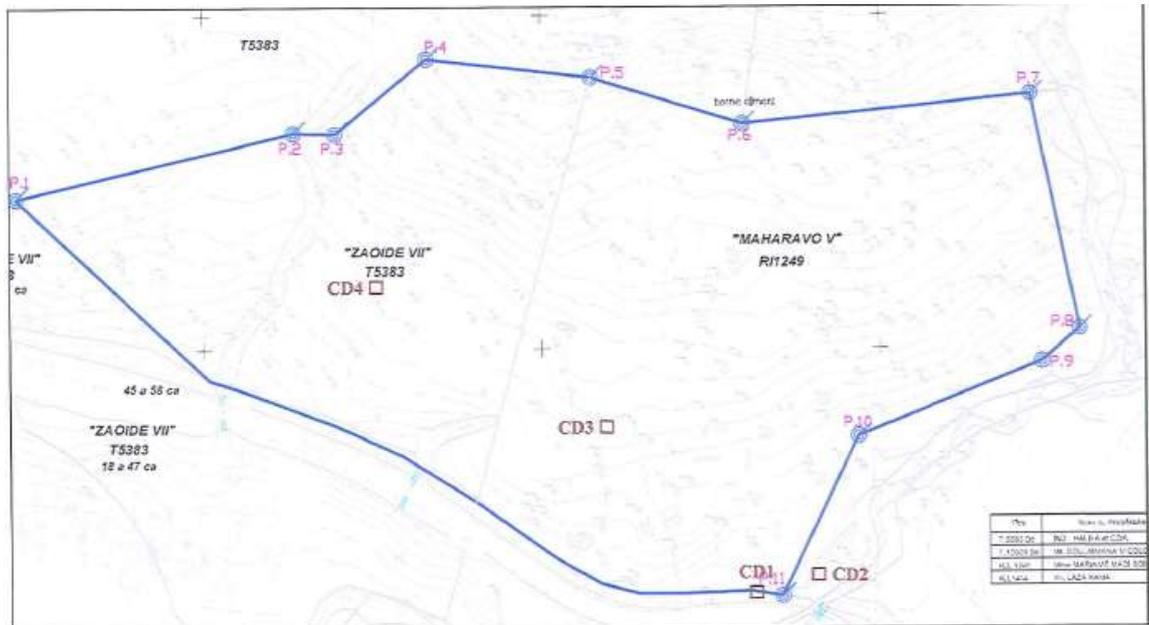


Figure 6 - Site de Bouéni - Localisation des échantillons pour essais de cisaillement réalisés par SEGC (SEGC dossier n° 1317, 2008c)

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 la Direction 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 la Direction de l'Équipement :

- 4 essais d'identification (granulométries, limites d'Atterberg, teneur en eau naturelle, valeur au bleu) (GTR 1 à GTR 4) ;
- 3 essais proctor, CBR, et Indice de portance Immédiat (IPI) ;
- 3 essais de cisaillement à la boîte (consolidés drainés) (CD A à CD C).

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 la Figure 7.

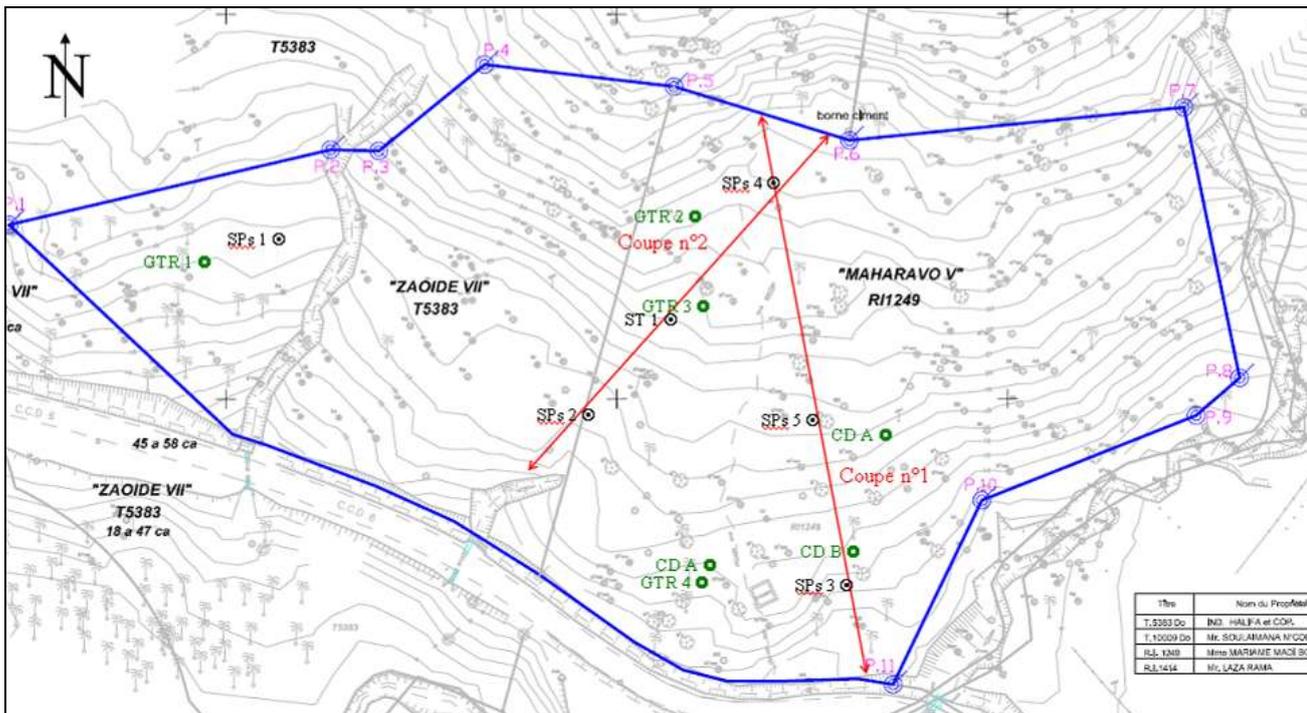


Figure 7 - Site de Bouéni - Localisation des sondages réalisés par SEGC et des prélèvements d'échantillons réalisés par le Laboratoire de la Direction de l'Équipement (SEGC dossier n° 1201, 2007)

Par ailleurs une série d'investigations géophysiques a été menée par le BRGM dans le cadre de l'étude de 2009 (BRGM/RP-57715-FR ; voir implantation en Figure 8). Il s'agit de 4 profils SASW et de 9 mesures H/V.

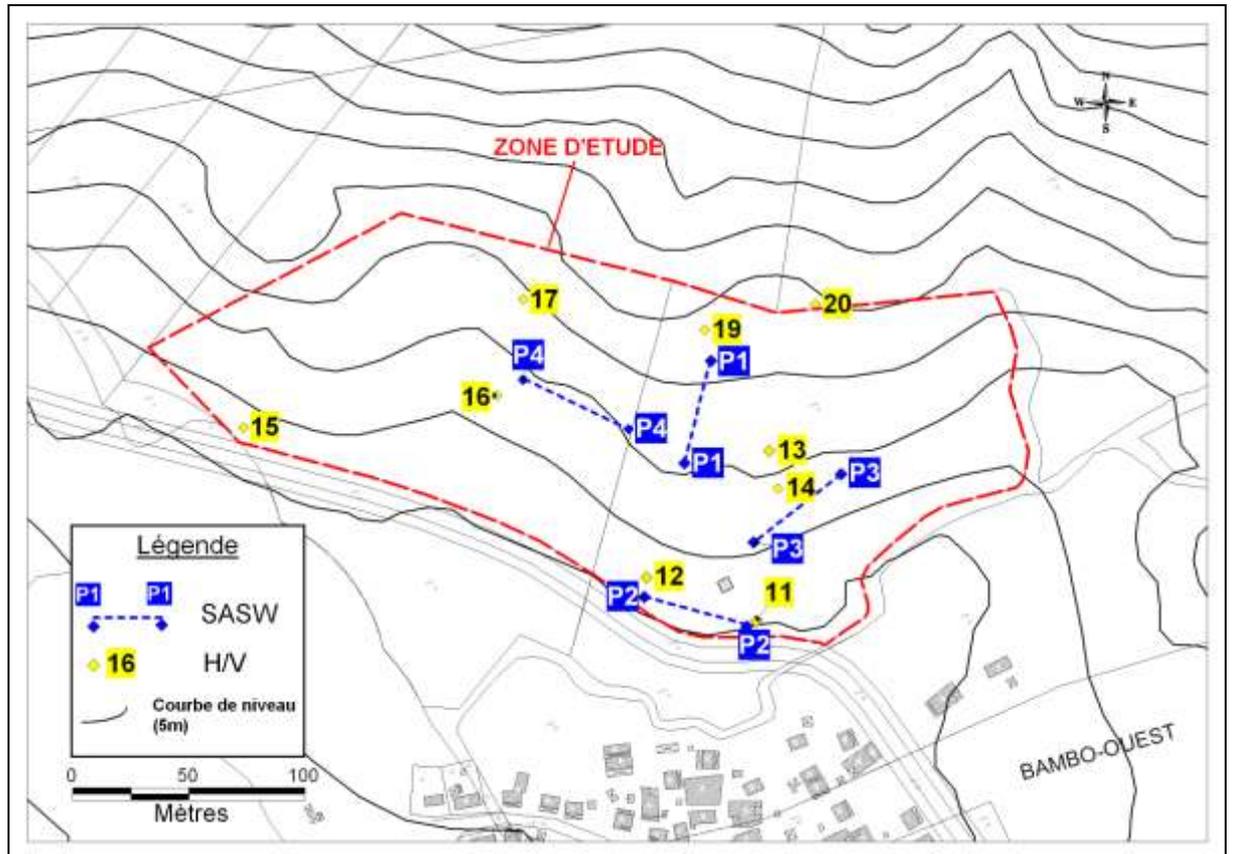


Figure 8 - Localisation des investigations géophysiques réalisées par le BRGM (2009)

#### 4.4. ANALYSE DES DONNEES

##### 4.4.1. Géologie

D'après la carte géologique de Mayotte (BRGM, 1988) (cf. Figure 9), 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.

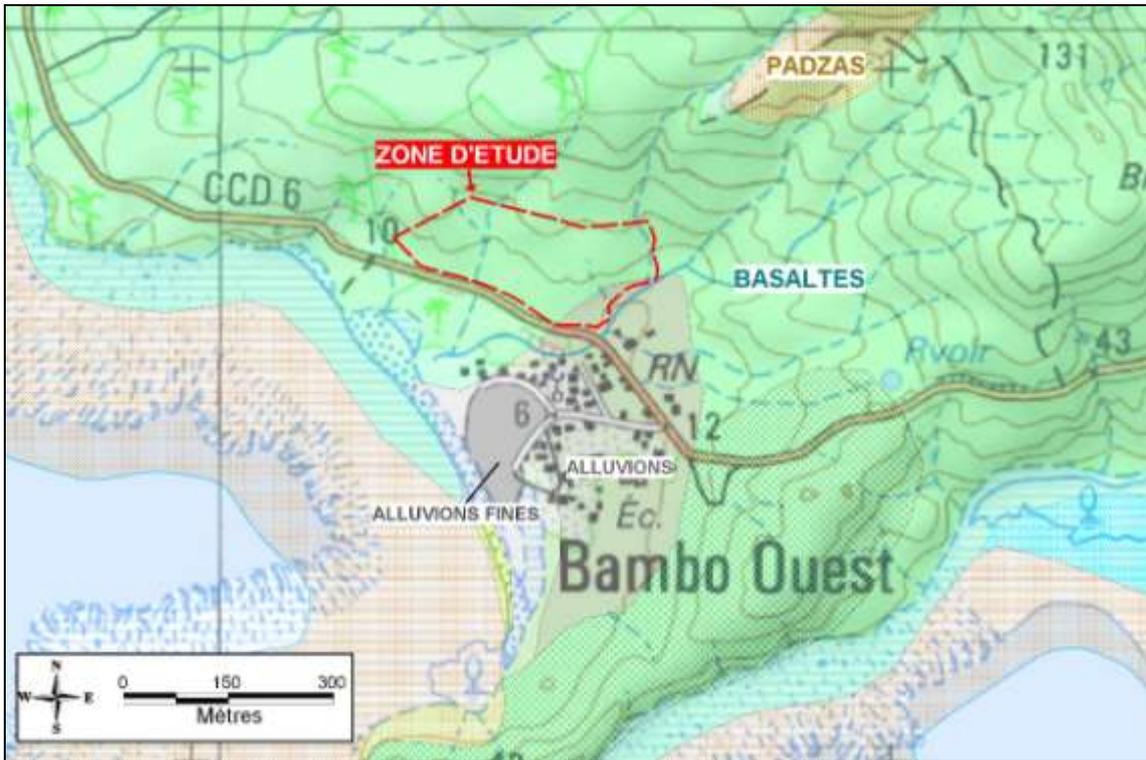


Figure 9 - Extrait de la carte géologique de Mayotte (BRGM 1988)

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. Figure 10).

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

On notera que la base des altérites 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 (voir paragraphe 4.4.3).

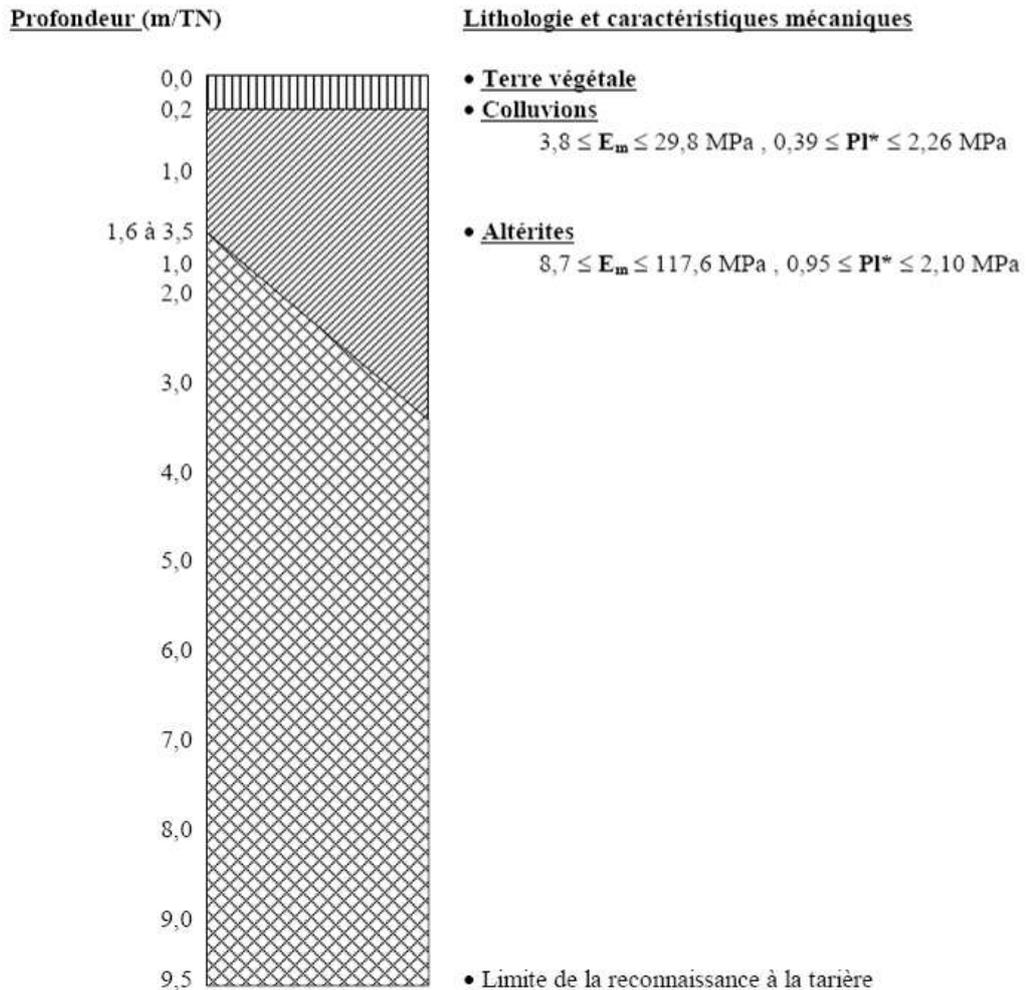


Figure 10 - Coupe géologique interprétative réalisée par SEGC (SEGC, 2007)

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 3,3 m (minimum dans la campagne Géotechnique et Contrôles). Son épaisseur moyenne est de l'ordre de 3 m.

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.

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).

#### 4.4.2. Géotechnique

##### i) Colluvions

##### - Essais en laboratoire :

	passant à 80 $\mu\text{m}$	$w_n$	Opt. Proctor	VBS	IP	WL	cat. NFP11-300	C' (kPa)	$\phi'$
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	29°
CD B								3,2	21,3°
CD C								1,5	18,6°
CD 3								11,1	20,8°
CD 4								27,6	21,6°

Tableau 2 - Essais en laboratoire sur les colluvions

##### - Essais pressiométriques :

Seuls les essais SEGC (dossier n° 1201, 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  $E_M/p_l$  varie entre 4,9 et 26,2 avec une moyenne à 13.

Il s'agit donc de limons plastiques moyennement consistants.

##### ii) Altérites

##### - Essais en laboratoire :

	C'	$\phi'$
CD 1	20,0 kPa	9,0°
CD 2	8,9 kPa	30,0°

Tableau 3 - Essais en laboratoire sur les altérites

Remarque (issue du dossier SEGC n° 1317, 2008c) : les résultats de l'essai réalisé sur l'échantillon CD 1 montrent un angle de frottement interne plutôt faible (9°) ce qui n'est pas très représentatif du matériau analysé. Ceci est probablement dû à un remaniement de l'échantillon lors de sa préparation.

- 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  $E_M/p_l$  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.

iii) Substratum sain

- 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  $p_l = 5$  MPa).

#### 4.4.3. Géophysique

Une série d'investigations géophysiques a été menée par le BRGM dans le cadre de l'étude de 2009 (BRGM/RP-57715-FR). Il s'agit de 4 profils SASW et de 9 mesures de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »).

Les 4 profils de mesures SASW montrent une répartition quasi-horizontale des terrains de même vitesse de cisaillement  $V_s$ . Entre 0 et 10 m de profondeur, la vitesse des ondes de cisaillement  $V_s$  entre 150 et 300 m/s, avec une moyenne autour de 250 m/s. Entre 10 et 20 m de profondeur, la vitesse  $V_s$  est globalement comprise entre 300 et 500 m/s, avec une moyenne autour de 400 m/s. Le substratum sismique ( $V_s = 800$  m/s) est observé entre 20 et 30 m de profondeur.

Ces vitesses sont cohérentes avec les mesures géotechniques (essais pressiométriques) réalisées sur site.

Les résultats des mesures H/V indiquent un effet de site bien marqué avec une fréquence de résonance comprise entre 4 et 5 Hz (on se reportera pour les graphiques des H/V à l'Annexe 4 du rapport RP-57715-FR).

#### 4.4.4. Hydrogéologie

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

Une source (identifiant BSS 12316X0002/HY) est présente immédiatement à l'Est du site, en amont de celui-ci, laissant supposer la présence de masses d'eau souterraines en bordure du site.

#### 4.5. ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS

Afin de calculer le spectre de réponse tenant compte des conditions de site, il convient de définir la ou les colonnes de sol représentatives des terrains en place.

Au niveau du site, la colonne de sol décrite ci-dessous a été établie à partir des résultats des différentes investigations sur site et en laboratoire. En particulier, les épaisseurs des couches et les vitesses des ondes ont été calées de manière à vérifier les résultats des mesures de bruit de fond (H sur V) réalisées sur site (fréquence comprise entre 4 et 5 Hz).

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'altérites, reconnue sur environ 20 mètres par la SASW, est scindée en 2 couches, de 10 m chacune, et présentant des vitesses  $V_s$  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 ;

Formation	Epaisseur colonne (m)	$V_s$ (m/s)	$V_p$ (m/s)	$\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )
Altérites en place	10 m	250	375	19
Altérites en place	10 m	400	700	19
Substratum	Infini	800	1200	23

Tableau 4 - Colonne de sols retenue pour le site

#### 4.6. SPECTRES DE REPONSE POUR LE DIMENSIONNEMENT

La classe de sol au sens de la réglementation est estimée pour cette colonne de sol caractéristique (voir Tableau 1). Pour cela la vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres ( $V_{s,30}$ ) est estimée à partir des épaisseurs et des vitesses des ondes proposées.

Pour la colonne représentative du site la  $V_{s,30}$  est estimée à  $387 \text{ m.s}^{-1}$ . Selon les Eurocode 8, cela correspond à des sols de classe B (voir Tableau 1).

Le spectre de réponse proposé pour le dimensionnement d'un établissement scolaire sur ce site de Bambo Ouest est donc le **spectre défini dans la réglementation pour cette classe de sol B** (voir Figure 4).

Les fichiers définissant les spectres fournis sur CD-Rom en annexe de ce rapport pourront être utilisés (fichiers 'Ouvrage\_III\_sismicité modérée\_classe de sol B.xls' et 'Ouvrage\_III\_sismicité modérée\_vertical.xls').

## 5. Conclusion

Cette étude a été réalisée à la demande du Vice-Rectorat de Mayotte. Elle a pour objet la prise en compte de l'aléa sismique régional et local, dans le cadre de la vérification de la tenue sous sollicitation sismique d'un projet d'établissement scolaire à Bambo Ouest sur la commune de Bouéni.

L'archipel mahorais est situé en zone de sismicité 3 (« sismicité modérée ») selon la nouvelle réglementation sismique en vigueur depuis le 1<sup>er</sup> mai 2011. Les établissements scolaires concernés dans cette étude sont en catégorie d'importance III et sont donc soumis à cette nouvelle réglementation. Les spectres horizontaux et verticaux de réponse en accélération sont définis par la réglementation au rocher et pour différents types de sol. Il convient donc d'estimer au préalable les conditions de site pour le secteur étudié.

L'analyse des données géologiques, géotechniques, géophysiques et hydrogéologiques disponibles permet de conclure que le site du futur collège de Bouéni (Bambo Ouest) est modélisé par une unique colonne de sol correspondant à une classe de sol B.

Les spectres de réponse proposés pour le dimensionnement de cet établissement scolaire sont les **spectres définis dans la réglementation pour la classe de sol B** (voir Figure 4).

Les fichiers définissant les spectres horizontaux et verticaux pourront être utilisés (fichiers 'Ouvrage\_III\_sismicité modérée\_classe de sol B.xls' pour les spectres horizontaux et 'Ouvrage\_III\_sismicité modérée\_vertical.xls' pour le spectre vertical). Ils sont accessibles sur le CD-Rom fourni en annexe de ce rapport.



## 6. Bibliographie

**Arrêté du 22 octobre 2010** relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal » relatifs à la prévention du risque sismique

[http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=37C0052CBE1232A62F4B50A7868AE36D.tpdjo04v\\_3?cidTexte=JORFTEXT000022941755&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id](http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=37C0052CBE1232A62F4B50A7868AE36D.tpdjo04v_3?cidTexte=JORFTEXT000022941755&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id)

**Décret n° 2010-1254 du 22 octobre 2010** relatif à la prévention du risque sismique

<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=?cidTexte=JORFTEXT000022941706&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id>

**Décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010** portant sur la délimitation des zones de sismicité du territoire français

[http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=3F46EFBB859559DB9DDB308ADCAA00A3.tpdjo04v\\_3?cidTexte=JORFTEXT000022941731&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id](http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=3F46EFBB859559DB9DDB308ADCAA00A3.tpdjo04v_3?cidTexte=JORFTEXT000022941731&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id)

**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.

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

**SEGC (2007)** – Construction du collège de Bouéni – Reconnaissance géologique et géotechnique. Mission de type G12, dossier n° 1201, décembre 2007.

**SEGC (2008a)** – Construction du collège de Bouéni – Note complémentaire, dossier n°1201, janvier 2008.

**SEGC (2008b)** – Construction du collège de Bouéni – Note complémentaire n°2, dossier n°1201, mars 2008.

**SEGC (2008c)** – Construction du collège de Bouéni – Note complémentaire n°3. Exécution d'essais. Mission de type G0, dossier n°1317, juillet 2008.

**SEGC (2008d)** – Construction du collège de Bouéni – Note de synthèse, dossier n°1201, octobre 2008.

**Stieltjes L.** (1988) – Carte géologique de Mayotte à 1/50 000 et sa notice. Ed. BRGM



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

**Direction Régionale de Mayotte**  
9, centre Amatoula - Z.I. de Kawéni  
B.P. 363  
97600 Mamoudzou - Mayotte  
Tél. : 02 69 61 28 13