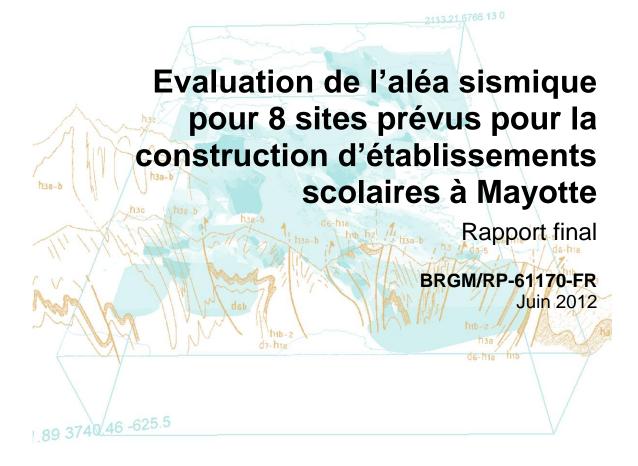


Document Public









Evaluation de l'aléa sismique pour 8 sites prévus pour la construction d'établissements scolaires à Mayotte

Rapport final

BRGM/RP-61170-FR

Juin 2012

Etude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM Convention BRGM/MEN DAF/JACJUR/LP 2011/209

J. Rey, V. Bastone, A. Bitri, R. Cochery, B. François, A. Roullé, D. Tardy

Vérificateur:

Nom: E. Vanoudheusden

Date: 14/06/2012

Signature:

Approbateur:

Nom: P. Puvilland

Date: 15/06/2012

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 9001:2008.



Mots clés: Aléa sismique, risque sismique, effets de site, liquéfaction, établissements scolaires, Mayotte, Acoua, Dembéni, Kawéni, Mamoudzou, Barakani, Ouangani, Tsoundzou II, Majicavo, Kwalé En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Rey J., Bastone V., Bitri A., Cochery R., François B., Roullé A., Tardy D. (2012) -Evaluation de l'aléa sismique pour 8 sites prévus pour la construction d'établissements scolaires à Mayotte. Rapport BRGM/RP-61170-FR. 176 p., 44 fig., 54 tabl., 1 annexe. © BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Cette étude réalisée à la demande du Vice-rectorat de Mayotte et sous le pilotage de la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL/SAEC/BP) de Mayotte, 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 de projets d'établissement scolaires sur huit sites localisés sur cinq communes différentes.

Les sites qui font l'objet de la présente étude sont respectivement les sites prévus pour :

- la construction du lycée polyvalent d'Acoua sur la commune d'Acoua, remplaçant par avenant à la demande du Vice-rectorat, le projet de collège sur la ZAC de Doujani, commune de Mamoudzou;
- la construction du collège de Kwalé sur la commune de Mamoudzou ;
- la construction du collège de Tsoundzou II sur la commune de Mamoudzou ;
- la construction du lycée de Mamoudzou II à Kawéni, commune de Mamoudzou;
- la construction du collège de Majicavo-Lamir sur la commune de Koungou;
- la construction du collège de Barakani sur la commune de Ouangani ;
- la construction de l'Université de Dembéni :
- l'extension du lycée de Mamoudzou.

L'archipel mahorais est situé en zone de sismicité 3 (« sismicité modérée ») selon la nouvelle réglementation sismique en vigueur depuis le 1^{er} 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 les 8 secteurs étudiés.

L'analyse des données géologiques, géotechniques, géophysiques et hydrogéologiques disponibles pour chacun des sites permet les conclusions suivantes :

- le site du futur lycée polyvalent d'Acoua sur la commune d'Acoua est modélisé par 2 colonnes de sol correspondant toutes les deux à des classes de sol C;
- le site du futur collège de Kwalé sur la commune de Mamoudzou est modélisé par 3 colonnes de sol correspondant respectivement à des classes de sol E (zone 1 et zone 2) et B (zone 3);

- le site du futur collège de Tsoundzou II sur la commune de Mamoudzou est modélisé par 2 colonnes de sol correspondant respectivement à des classes de sol B (zone 1) et C (zone 2);
- le site du futur lycée de Mamoudzou II à Kawéni, commune de Mamoudzou, est modélisé par 2 colonnes de sol correspondant respectivement à des classes de sol C (colonne 1, zone Ouest) et D (colonne 2, zone centre-Est);
- le site du futur collège de Majicavo-Lamir sur la commune de Koungou est modélisé par une unique colonne de sol correspondant à une classe de sol B;
- le site du futur collège de Barakani sur la commune de Ouangani est modélisé par une unique colonne de sol correspondant à une classe de sol C;
- le site de la future Université de Dembéni est modélisé par 2 colonnes de sol correspondant respectivement à des classes de sol C (colonne 1, partie amont) et B (colonne 2, partie centrale et aval);
- le site de l'extension du lycée de Mamoudzou est modélisé par une unique colonne de sol correspondant à une classe de sol C.

Les spectres de réponse proposés pour le dimensionnement de ces établissements scolaires sont les spectres définis dans la réglementation pour la classe de sol respectivement définie (voir Figure 4).

Les fichiers définissant les spectres fournis en Annexe 2 de ce rapport pourront être utilisés (fichiers 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol A.xls', 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol B.xls', 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol D.xls', 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol D.xls', 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol E.xls' pour les spectres horizontaux et 'Ouvrage_III_sismicité modérée_vertical.xls' pour le spectre vertical).

Compte-tenu de la présence suspectée de terrains liquéfiables sur 4 de ces 8 sites, des analyses de liquéfaction ont également été menées. Il en ressort que :

- L'évaluation de la liquéfaction au droit des sondages pressiométriques du site de Kwalé a mis en évidence que la formation d'alluvions vasardes pouvait présenter un risque de liquéfaction, qualifié toutefois de peu probable et particulièrement sur l'horizon de sol situé entre 4 et 6 m au droit de SP2, où le coefficient de sécurité est inférieur à 1. Ainsi, une attention particulière face au risque liquéfaction devra être portée sur l'ensemble du site comportant cette couche d'alluvions vasardes :
- A partir des informations à notre disposition pour le site de Tsoundzou II, on vérifie que 10 échantillons sur 11 prélevés sur site ne sont pas susceptibles de se liquéfier. L'évaluation quantitative du risque de liquéfaction au niveau du 11^{ème} échantillon a montré que cette couche de sol n'est pas liquéfiable.
- L'évaluation de la liquéfaction au droit des sondages pressiométriques SP1 et SP2 du site de Kawéni a mis en évidence que la formation d'alluvions vasardes pouvait présenter un risque de liquéfaction, qualifié toutefois de peu probable et

particulièrement sur l'horizon de sol situé entre 3 et 6 m au droit de SP2, où le coefficient de sécurité est le plus faible. Ainsi, une attention particulière face au risque liquéfaction devra être portée sur l'ensemble du site comportant cette couche d'alluvions vasardes ;

 A partir des informations à notre disposition pour le site de la future université de Dembéni, on vérifie que les échantillons prélevés sur site ne sont pas susceptibles de se liquéfier.

Pour les 4 autres sites, ces sites ne présentant *a priori* pas de formations liquéfiables, aucune étude de liquéfaction n'a été menée.

Sommaire

1.	Intr	oduction	. 17
2.	Co	ntexte réglementaire	. 19
	1.	LA NOUVELLE REGLEMENTATION	. 19
	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.	. 19
3.	Eva	aluation réglementaire de l'aléa sismique – spectres de réponse	. 23
	1.	EVALUATION REGLEMENTAIRE DE L'ALEA SISMIQUE REGIONAL – SPECTRES DE REPONSE POUR UN SOL DE TYPE ROCHEUX	. 23
	2.	EVALUATION REGLEMENTAIRE DE L'ALEA SISMIQUE LOCAL – SPECTRES DE REPONSE TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE	25
	3.	ANALYSE DE LA LIQUEFACTION	. 28
4.	Site	e du futur lycée polyvalent d'Acoua	. 31
	1.	SYNTHESE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU SITE D'ACOUA	. 31 . 31 . 31
	2.	ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS	. 35
	1.	SPECTRES DE REPONSE POUR LE DIMENSIONNEMENT	. 35
5.	Site	e du futur collège de Kwalé	. 37
	1.	SYNTHESE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU SITE DE KWALE 5.1.1.Documents de référence	. 37 . 37 . 42 . 43 . 46

		5.1.7. Hydrogéologie	47
	2.	ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS	47
	3.	SPECTRES DE REPONSE POUR LE DIMENSIONNEMENT	48
	4.	ANALYSE DE LA LIQUEFACTION	
		5.4.1. Définition de la liquéfaction et méthodologie d'évaluation	
		5.4.2. Définition des termes utilisés	
		5.4.3. Résultats de laboratoire	
		5.4.4. Saturation des sols	
		5.4.5. Principes d'évaluation de la liquéfaction	
		5.4.6. Evaluation pour le site d'étude	55
6.	Site	e du futur collège de Tsoundzou II	62
	1.	SYNTHESE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU SITE DE TSOUNDZO	
		6.1.1. Documents de référence	
		6.1.2 Données disponibles	
		6.1.3. Analyse des données	65
	2.	ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS	66
	3.	SPECTRES DE REPONSE POUR LE DIMENSIONNEMENT	67
	4.	ANALYSE DE LA LIQUEFACTION	67
		6.4.1. Résultats de laboratoire	68
		6.4.2. Saturation des sols	69
		6.4.3. Evaluation pour le site d'étude	70
7.	Site	e du futur lycée de Kawéni	75
	4	CYNTHESE OF A COLOUR ET CEOTECHNIQUE DU SITE DE KAMENI	75
	1.	SYNTHESE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU SITE DE KAWENI	
		7.1.1.Documents de référence	
		7.1.3. Analyse des données géologiques	
		7.1.4. Analyse des données géotechniques	
		7.1.6. Essais en laboratoire	
		7.1.7. Hydrogéologie	
		7.1.7.1 ly di Ogoologio	04
	2.	ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS	84

	3.	SPECTRES I	DE REPONSE POUR LE DIMENSIONNEMENT	. 85
	4.	7.4.1. Saturat	E LA LIQUEFACTIONion des solsion pour le site d'étude	. 86
8.	Site		ège de Majicavo-Lamir	
	1.	SYNTHESE (8.1.1. Docume 8.1.2. Donnée	GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU SITE DE MAJICAVO ents de référence es disponibles des données	. 93 . 93 . 93
	2.	ETABLISSEN	MENT DES COLONNES DE SOLS	. 97
	3.	SPECTRES I	DE REPONSE POUR LE DIMENSIONNEMENT	. 97
9.	Site	e du futur coll	ège de Barakani (Ouangani)	. 99
	1.	OUANGANI 9.1.1.Docume 9.1.2.Donnée	GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE SUR LE SITE DE ents de référence es disponibles e des données	. 99 . 99
	2.	ETABLISSEN	MENT DES COLONNES DE SOLS	104
	1.	SPECTRES I	DE REPONSE POUR LE DIMENSIONNEMENT	105
10).	Site de la fut	ure université de Dembéni	106
	1.	10.1.1. Do	GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU SITE DE DEMBENI . cuments de référence	106 106
	2.	ETABLISSEN	MENT DES COLONNES DE SOLS	114
	3.	SPECTRES I	DE REPONSE POUR LE DIMENSIONNEMENT	115
	4.	10.4.1. Fo 10.4.2. Sa	E LA LIQUEFACTION	116 116
11		Site de l'exte	ension du lycée de Mamoudzou	119

1.		HESE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE SUR LE SITE DE DUDZOU	119
	11.1.1	Documents de référence	119
	11.1.2	. Données disponibles	119
	11.1.3	. Analyse des données	122
2.	ETABL	LISSEMENT DES COLONNES DE SOLS	128
3.	SPEC	TRES DE REPONSE POUR LE DIMENSIONNEMENT	129
12.	Concl	usion	131
13.	Biblio	graphie	133
	a) [Détail de la méthode SASW	136
	b) F	Résultats des mesures H/V in situ	136
	a) A	∖ coua	138
	b) E	Barakani (Ouangani)	142
	c) [Dembéni	146
	d) ł	Kawéni	151
	e) k	Śwalé	155
	f) N	Majicavo	159
	g) N	Mamoudzou	163
	h) 7	Fsoundzou II	167

Liste des figures

Figure 1 - Zonage sismique réglementaire de la France en vigueur depuis le 1 st mai 2011	22
Figure 2 - Spectre de réponse réglementaire horizontal en accélération au rocher pour un bâtiment de catégorie d'importance III en zone de sismicité 3	24
Figure 3 - Spectre de réponse réglementaire vertical en accélération au rocher pour un bâtiment de catégorie d'importance III en zone de sismicité 3	24
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	27
Figure 5 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2011 (extrait du rapport SEGC n°1858, décembre 2011)	32
Figure 6 - Localisation des mesures géophysiques effectuées par le BRGM en 2011	33
Figure 7 - Zonage pour l'établissement des colonnes de sol	34
Figure 8 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2012 (extrait du rapport SEGC n°1868, février 2012) (échelle non respectée)	39
Figure 9 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2010 (extrait du rapport SEGC n°1700, octobre 2010)	40
Figure 10 - Localisation des mesures géophysiques effectuées par le BRGM en 2011	41
Figure 11 - Localisation de l'ensemble des données disponibles pour l'étude	42
Figure 12 - Zonage proposé pour le site de Kwalé	44
Figure 13 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2012 (extrait du rapport SEGC n°1869, mars 2012) (échelle non respectée)	63
Figure 14 - Localisation des mesures géophysiques effectuées par le BRGM en 2011 sur le site de Tsoundzou II	64
Figure 15 - Localisation de l'ensemble des données disponibles pour l'étude (site de Tsoundzou II)	64
Figure 16 - Localisation de la zone d'étude de Kawéni	76
Figure 17 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2012 (extrait du rapport SEGC, février 2012)	77
Figure 18 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2010 (extrait du rapport SEGC, décembre 2010)	78
Figure 19 - Localisation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2009 (extrait du rapport SEGC, janvier 2009), au Nord –Est de la zone d'étude	78
Figure 20 - Localisation des reconnaissances géophysiques réalisées par le BRGM en 2011	79
Figure 21 - Extrait de la carte géologique de Mayotte au 1/50 000 ^{ième} (Stieltjes, 1988)	80

Figure 22 - Synthèse lithologique et géotechnique suite aux investigations menées en 2010 (extrait rapport SEGC 2010)	82
Figure 23 - Zonage proposé pour le site de Kawéni	83
Figure 24 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2010 (extrait du rapport SEGC n°1723, décembre 2010)	94
Figure 25 - Localisation des mesures géophysiques effectuées par le BRGM en 2011 sur le site de Majicavo	95
Figure 26 - Localisation de la zone d'étude de Ouangani	100
Figure 27 - Localisation de la zone d'étude menée par SEGC en 2010 (extrait extrait rapport SEGC, juillet 2010)	100
Figure 28 - Implantation des sondages de la campagne SEGC de 2010 (rapport SEGC, janvier 2010)	101
Figure 29 - Localisation des mesures géophysiques effectuées par le BRGM en 2011	102
Figure 30 - Extrait de la carte géologique au 1/50 000 ^{ième} de Mayotte (Stieltjes, 1988)	103
Figure 31 - Localisation de la zone d'étude de Dembéni	107
Figure 32 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2012 (extrait du rapport SEGC, mars 2012)	108
Figure 33 - Localisation du site de l'IFM situé à l'Est de la zone d'étude (extrait rapport BRGM 54960, 2006)	108
Figure 34 - Implantation des reconnaissances de la campagne géophysique BRGM 2011	109
Figure 35 - Carte géologique et morpho-pédologiques du site (extrait rapport SEGC, 2012)	110
Figure 36 - Proposition de zonage du site de Dembéni	113
Figure 37 - Localisation zone d'étude (extrait rapport SEGC, janvier 2011)	120
Figure 38 - Implantation des sondages de la campagne SEGC de 2011 (extrait du plan topographique du lycée de Mamoudzou- rapport SEGC, janvier 2011)	121
Figure 39 - Localisation des mesures géophysiques effectuées par le BRGM en 2011 sur le site de Mamoudzou	122
Figure 40 - Extrait de la carte géologique au 1/50 000 de Mayotte (Stieltjes, 1988)	123
Figure 41 - Cartographie géologique de Mamoudzou au 1/10 000 ^{ième} (Debeuf et Bachèrel, 2001)	124
Figure 42 - Coupe géologique issue de la cartographie au 10 000 ^{ième} de Mamoudzou (Debeuf et Bachèrel, 2001) traversant la zone d'étude	124
Figure 43 - Carte lithologique de Mamoudzou centre (extrait du rapport BRGM sur le microzonage sismique de Mamoudzou, Sabourault et al., 2002))	125
Figure 44 - Coune lithologique prévisionnelle de la zone d'étude	126

Liste des tableaux

Tableau 1 - Classification des classes de sol selon les EC8.	26
Tableau 2 - Colonne de sols retenue pour le site à l'Ouest	35
Tableau 3 - Colonne de sols retenue pour le site à l'Est	35
Tableau 4 - Colonne de sols retenue pour la zone 1	47
Tableau 5 - Colonne de sols retenue pour la zone 2	47
Tableau 6 - Colonne de sols retenue pour la zone 3	48
Tableau 7 - Résultats des essais de laboratoire sur les échantillons argileux (campagne 2012)	51
Tableau 8 - Résultats des essais de laboratoire sur les échantillons sableux (campagne 2012)	51
Tableau 9 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 1 issu de SPs1	55
Tableau 10 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 2 issu de SPs1	56
Tableau 11 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 3 issu de SPs1	56
Tableau 12 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 4 issu de SPs1	56
Tableau 13 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 5 issu de SPs1	57
Tableau 14 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 6 issu de SPs1	57
Tableau 15 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 7 issu de SPs1	57
Tableau 16 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 1 issu de SPs2	57
Tableau 17 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 2 issu de SPs2	58
Tableau 18 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 3 issu de SPs2	58
Tableau 19 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 4 issu de SPs2	58
Tableau 20 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 5 issu de SPs2	58
Tableau 21 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 6 issu de SPs2	59

Tableau 22 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 7 issu de SPs2	59
Tableau 23 - Calcul du facteur de sécurité pour l'échantillon 5 du sondage SPs1	60
Tableau 24 - Calcul du facteur de sécurité pour l'échantillon 4 du sondage SPs2	60
Tableau 25 - Colonne de sols retenue pour la zone 1	67
Tableau 26 - Colonne de sols retenue pour la zone 2	67
Tableau 27 - Résultats des essais de laboratoire sur les échantillons argileux (campagne 2012)	68
Tableau 28 - Résultats des essais de laboratoire sur les échantillons sableux (campagne 2012)	69
Tableau 29 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 1 issu de SPs3	70
Tableau 30 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 2 issu de SPs3	70
Tableau 31 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 3 issu de SPs3	70
Tableau 32 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 4 issu de SPs3	70
Tableau 33 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 5 issu de SPs3	71
Tableau 34 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 1 issu de SPs4	71
Tableau 35 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 2 issu de SPs4	71
Tableau 36 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 3 issu de SPs4	71
Tableau 37 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 4 issu de SPs4	72
Tableau 38 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 5 issu de SPs4	72
Tableau 39 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 6 issu de SPs4	72
Tableau 40 - Calcul du facteur de sécurité pour les échantillons de SPs4	
Tableau 41 - Niveau de nappe observés sur différents secteurs et prédiode (données issues rapport SEGC 2010)	84
Tableau 42 - Colonne de sols 1 retenue pour la zone Ouest de la zone d'étude	85
Tableau 43 - Colonne de sols 2 retenue pour la zone centre et Est de la zone d'étude	85
Tableau 44 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction sur les 13 échantillons de sols prélevés (campagne SEGC 2011)	87
Tableau 45 - Evaluation de la liquéfaction au droit du sondage SP1	

Tableau 46 - Evaluation de la liquéfaction au droit du sondage SP2	89
Tableau 47 - Colonne de sols retenue pour le site	97
Tableau 48 - Résultats de l'essai ld'identification réalisé sur un échantillon de cendres volcaniques prélevé sur la zone d'étude (rapport SEGC, 2010)	104
Tableau 49 - Colonne de sols retenue pour le site de Ouangani	105
Tableau 50 - Colonne de sols 1 retenue pour la partie amont de la zone d'étude	115
Tableau 51 - Colonne de sols 2 retenue pour la partie centrale et aval de la zone d'étude	115
Tableau 52 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction sur les 7 échantillons de sols prélevés (campagne SEGC 2012)	117
Tableau 53 - Résultats des essais laboratoires réalisés sur un échantillon de cendres volcaniques ferralitiques prélevé sur le secteur de l'hôpital (rapport SEGC, 2005)	128
Tableau 54 - Colonne de sols retenue pour le site de Mamoudzou	129
Liste des annexes	
Annexe 1 Mesures géophysiques : méthodes utilisées	136
Annexe 2 Résultats bruts des mesures géophysiques	138

1. Introduction

L'île de Mayotte est soumise à la réglementation parasismique française depuis le 1 er 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 des futurs collèges et lycées ont été déposées officiellement après le 1^{er} 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^{er} 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 sera menée dans le cadre de cette étude pour les 8 sites étudiés.

Par ailleurs cette nouvelle réglementation impose également que **des études évaluant les potentialités de liquéfaction** des formations sédimentaires au droit des sites soient menées. Des études spécifiques sont donc réalisées pour les 4 sites pour lesquels des formations susceptibles de se liquéfier étaient identifiées.

2. Contexte réglementaire

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^{er} 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 toutes les communes dans lesquelles des établissements scolaires sont en projet dans le cadre de la présente étude sont situées dans cette zone de sismicité.

En zone de sismicité 3, toutes les constructions nouvelles ou portant 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 <u>l'application des règles de constructions</u> parasismique.

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 de hauteur 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^{ère} à la 3^{ème} catégorie (soit une capacité d'accueil supérieure à 300 personnes), bâtiments d'habitation collective ou à usage de bureaux dont la hauteur dépasse 28 m, 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.

Tous 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=JORFTEXT0000

 22941706&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=3F46EFBB859559DB9DDB 308ADCAA00A3.tpdjo04v_3?cidTexte=JORFTEXT000022941731&dateTexte=&old Action=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=37C0052CBE1232A62F4B5 0A7868AE36D.tpdjo04v 3?cidTexte=JORFTEXT000022941755&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id

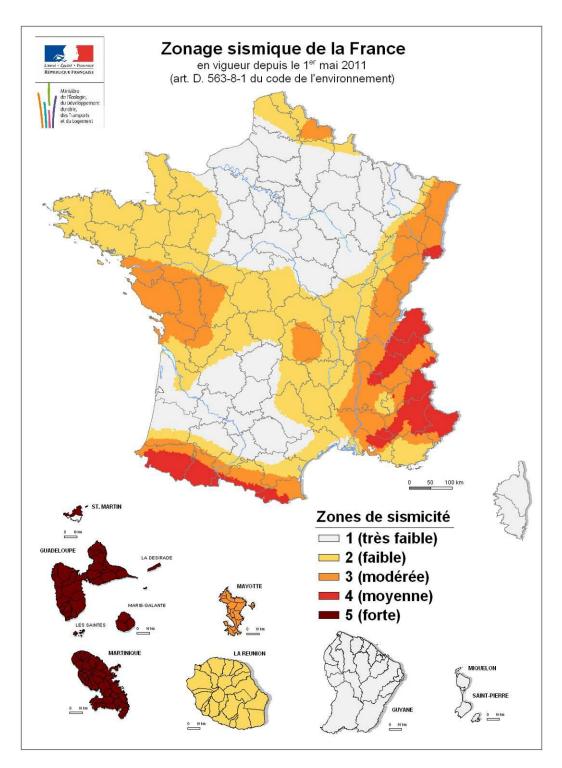


Figure 1 - Zonage sismique réglementaire de la France en vigueur depuis le 1^{er} mai 2011

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

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 respectivement 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 m/s² et les périodes de coupures définissant le spectre de réponse horizontal en accélération sont respectivement $T_B=0,03s$, $T_C=0,2s$ et $T_D=2,5s$.

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 m/s² et les périodes de coupures sont respectivement $T_B=0,03s$, $T_C=0,2s$ et $T_D=2,5s$.

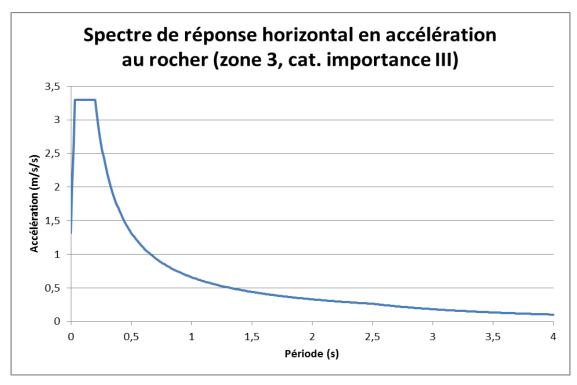


Figure 2 - Spectre de réponse réglementaire horizontal en accélération au rocher pour un bâtiment de catégorie d'importance III en zone de sismicité 3

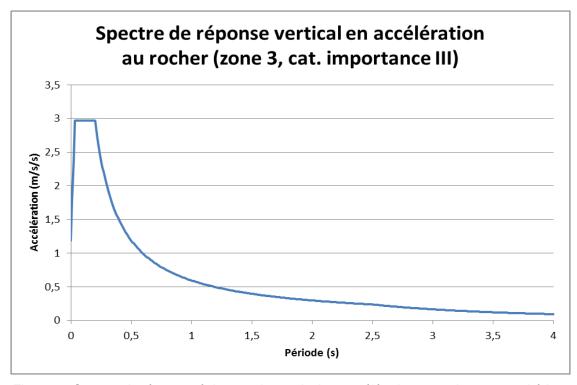


Figure 3 - Spectre de réponse réglementaire vertical en accélération au rocher pour un bâtiment de catégorie d'importance III en zone de sismicité 3

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 molle à fort contraste de vitesses avec la couche sous-jacente (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 meuble 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 :

 $H = V_s/(4*f)$ avec H: épaisseur de la couche meuble en m

 $V_{\mbox{\scriptsize S}}$: vitesse de propagation des ondes de cisaillement

dans la couche meuble en m/s

f : fréquence de résonance de la couche meuble en Hz

Les effets de site lithologiques sont pris en compte dans la réglementation parasismique applicable à partir du 1^{er} mai 2011, en fonction de la classe de sol en présence au droit du site.

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 $V_{s,30}$). Le Tableau 1 résume cette classification.

			Paramètres		
Classe de sol	Description du profil stratigraphique	V _{s,30} (m/s)	<i>N_{SPT}</i> (Nb/30cm)	c _u (kPa)	
А	Rocher ou tout autre formation géologique de ce type comportant une couche superficielle d'au plus 5 m de matériau moins résistant.	> 800	-	_	
В	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	
С	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 ₁	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 ₂	Dépôts de sols liquéfiables d'argiles sensibles ou tout autre profil de sol non compris dans les classes A à E ou S_1				

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

 $\emph{\emph{V}}_{s,30}$ 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 critère prépondérant 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 20 octobre 2010 pour des sols non rocheux (sols de type B, C, D ou E) sont présentés sur la Figure 4 ci-dessous.

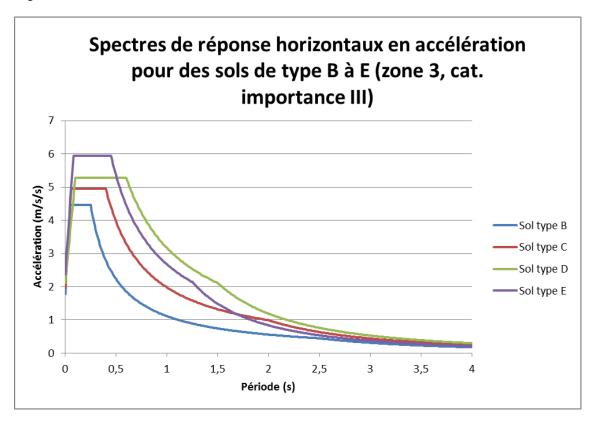


Figure 4 - Spectres de réponse réglementaires horizontaux en accélération pour un bâtiment de catégorie d'importance III en zone de sismicité 3 et pour les classes de sol B, C, D et E

Pour ce type de bâtiment (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/s², 1,98 m/s², 2,112 m/s² et 2,376 m/s². 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 au rocher (Figure 3).

Les fichiers définissant les spectres sont fournis en annexe de ce rapport. Il s'agit respectivement des fichiers 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol A.xls', 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol B.xls', 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol D.xls' et 'Ouvrage III sismicité modérée classe de sol E.xls') pour les spectres de réponse

horizontaux et du fichier 'Ouvrage_III_sismicité modérée_vertical.xls' pour le spectre de réponse vertical.

3. ANALYSE DE LA LIQUEFACTION

L'arrêté du 20 octobre 2010 indique que l'analyse de la liquéfaction n'est requise que pour les zones de sismicité 3, 4 et 5 (article 4.f). Ainsi l'analyse de la liquéfaction est requise pour tous les projets de construction à Mayotte.

Il est précisé dans cet arrêté que dans le cadre de l'analyse de la liquéfaction, la procédure à appliquer est celle définie dans l'annexe B de la norme NF EN 1998-5 septembre 2005, dite « règles Eurocode 8 ».

Néanmoins, dans le cadre de la présente étude, l'évaluation de la susceptibilité de liquéfaction des sols a été réalisée suivant les règles PS 92 NF P 06-013, toujours en application, à titre transitoire, jusqu'au 31 octobre 2012. Dans les cas où la susceptibilité a été vérifiée, l'évaluation de l'intensité de cette liquéfaction s'est basée sur les résultats des essais in situ (essais pressiométriques), par utilisation de corrélations, faute de pouvoir faire réaliser sur l'île les essais in situ adéquates (SPT ou CPT – voir les explications ci-dessous).

Par ailleurs, par convention, la magnitude à retenir pour les études est M = 5,5 pour la zone de sismicité 3. C'est cette magnitude qui sera utilisée pour les études menées pour les établissements scolaires concernés dans la présente étude.

Comparaison des documents en vigueur (PS 92 et Eurocode 8) pour l'évaluation de la susceptibilité et de la potentialité de liquéfaction

De manière générale, les deux normes présentent une méthodologie différente.

Les règles PS 92 proposent une approche conditionnelle clairement découpée, en termes de méthodologies et de moyens :

- Dans un premier temps, la susceptibilité qualitative à la liquéfaction est évaluée par rapport à des critères précisément définis, évalués à partir de résultats de laboratoire (teneur en eau, courbe granulométrique, limites d'Atterberg),
- Dans un second temps, s'il y a susceptibilité à la liquéfaction, la potentialité à la liquéfaction est évaluée. Les méthodes à utiliser pour cette évaluation ne sont pas détaillées; il est simplement indiqué qu'il convient d'utiliser des « corrélations expérimentales entre mesures in-situ et contraintes critiques de cisaillement cyclique dont on sait qu'elles ont causé une liquéfaction lors de séismes passés ». Il y a donc lieu de se référer aux rapports et articles scientifiques récents et reconnus.

L'Eurocode 8 propose une approche plus globale, principalement en termes de moyens :

- Pour une évaluation complète de la susceptibilité à la liquéfaction, des moyens de reconnaissances précis sont recommandés tels que la réalisation de SPT, CPT et de courbes granulométriques,
- Comme dans le cas des règles PS 92, les méthodes à utiliser pour l'évaluation de la potentialité ne sont pas détaillées. Les moyens cités pour l'évaluation de la susceptibilité (SPT ou CPT) sont les essais préconisés dans les articles de référence.

4. Site du futur lycée polyvalent d'Acoua

1. SYNTHESE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU SITE D'ACOUA

4.1.1. Préambule

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

4.1.2. Documents de référence

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

- le rapport SEGC intitulé « Construction du lycée d'Acoua Étude de faisabilité géotechnique. Missions de type G11 », datant de décembre 2011, dossier n° 1858.
- les résultats de la campagne géophysique réalisée par le BRGM dans le cadre de cette étude,
- la carte géologique de Mayotte à 1/50 000 (Stieltjes, 1988).

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

4.1.3. Données disponibles

Les données suivantes sont à notre disposition à travers les différents documents cités ci-dessus :

- étude SEGC n° 1858 (Figure 5) :
 - 4 sondages pressiométriques (SPs1 à SPs4), de 3,3 à 5,5 mètres de profondeur,
 - 5 sondages à la tarière manuelle (ST1 à ST5),
 - 10 sondages au pénétromètre dynamique (SP1 à SP10), de 1,4 à 2 mètres de profondeur,
- campagne géophysique du BRGM (Figure 6) :

- o 10 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »),
- o 3 profils de sismique SASW.

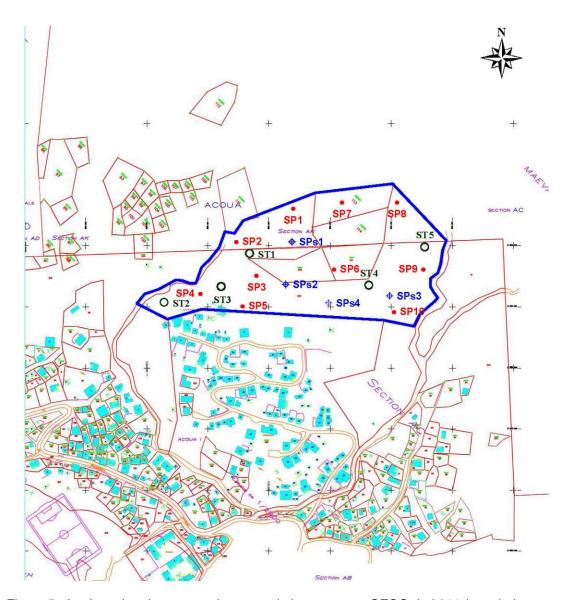


Figure 5 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2011 (extrait du rapport SEGC n°1858, décembre 2011)

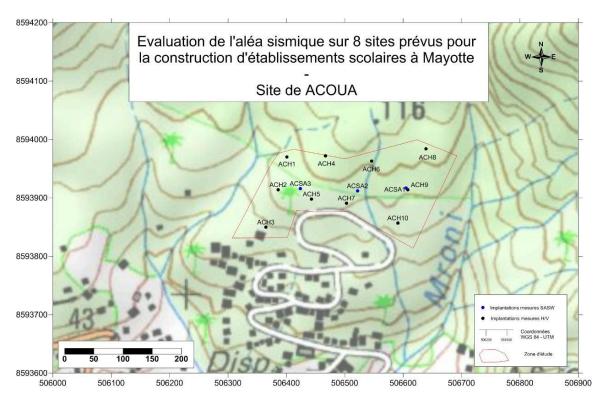


Figure 6 - Localisation des mesures géophysiques effectuées par le BRGM en 2011

4.1.4. Analyse des données

Géologie

D'après la carte géologique, le site se situe sur des terrains du Mio-Pliocène de type basanites, altérées, formant la base du bouclier ancien septentrional.

Les différents forages montrent un faciès de type colluvions composés de limons à blocs basaltiques sains et altérés de taille pluri-centimétrique à pluri-décimétrique voire métrique, jusqu'à la profondeur de 5,5 m.

Géotechnique

Les différents sondages ont rencontré un faciès lithologique de colluvions jusqu'à la profondeur de 5,5 m; les résultats montrent des valeurs globalement homogènes de pression limite et de module pressiométrique.

Tous les sondages donnent une pression limite entre 0,88 et 2,02 MPa, et un module pressiométrique compris entre 16,4 MPa et 38,1 MPa. Ces valeurs correspondent à des sols de résistance moyenne.

Géophysique

Une campagne de mesures géophysiques a été menée sur le site par le BRGM. Celleci a consisté en la réalisation de 10 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »), et de 3 profils de sismique SASW (cf. Figure 6 pour la localisation des mesures et en Annexe 2 pour les résultats bruts).

Concernant les mesures H/V, la zone d'étude présente des effets de site. Les fréquences de résonance sont homogènes et comprises entre 2,5 à 3 Hz à l'Ouest (points 1 à 5) et 3,5 à 5 Hz environ à l'Est (points 6 à 10). Deux zones (« zone Est » et « zone Ouest ») seront donc considérées pour les colonnes de sol (voir zonage en Figure 7).

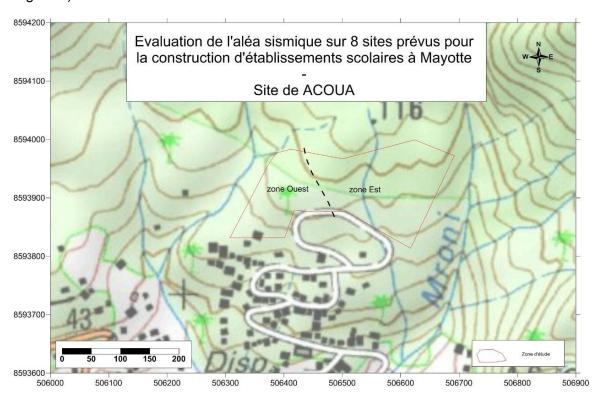


Figure 7 - Zonage pour l'établissement des colonnes de sol

Les profils SASW ont été interprétés en termes de profils de vitesse d'ondes de cisaillement (Vs). Compte tenu des résultats géotechniques, les corrélations issues des règles PS92 donnent des valeurs de Vs de l'ordre de 150 à 400 m/s, au moins pour les 5 premiers mètres de profondeur, limite d'investigation des essais géotechniques. Des valeurs comprises entre 150 et 300 m/s ont été observées dans les 7 premiers mètres de profondeur. Au-delà, des valeurs de 300 à 450 m/s ont été obtenues jusqu'à 30 m de profondeur. Le substratum n'est pas atteint par les mesures.

Hydrogéologie

Pendant les sondages effectués par SEGC en 2011 (dossier n°1858), aucune venue d'eau n'a été constatée jusqu'à 5,5 m de profondeur.

2. ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS

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.

Formation	Epaisseur colonne (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\frac{\gamma}{(kN/m^3)}$
Colluvions	7 m	220	415	18
Altérites	25 m	350	655	19
Substratum	Infini	800	1500	22

Tableau 2 - Colonne de sols retenue pour le site à l'Ouest

Formation	Epaisseur colonne (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\frac{\gamma}{(kN/m^3)}$
Colluvions	7 m	220	415	18
Altérites	15 m	350	655	19
Substratum	Infini	800	1500	22

Tableau 3 - Colonne de sols retenue pour le site à l'Est

Ces deux colonnes de sol permettent de représenter respectivement les deux zones définies (voir zonage en Figure 7). Les calculs réalisés à l'aide du logiciel Cyberquake® (Foerster & Modaressi, 2007), permettant de modéliser la réponse de la colonne de sol à une sollicitation de type bruit de fond sismique, montrent que la colonne retenue pour la zone Ouest présente un pic de résonance marqué vers 2,8 Hz et la colonne Est présente également un pic marqué vers 4 Hz. Les fréquences de résonances de ces deux colonnes sont ainsi parfaitement cohérentes avec les pics respectivement observés dans les deux zones sur les mesures H/V. Ceci permet de confirmer les épaisseurs et les vitesses des couches estimées pour ces deux colonnes.

1. SPECTRES DE REPONSE POUR LE DIMENSIONNEMENT

La classe de sol au sens de la réglementation est estimée pour ces deux colonnes de sol caractéristiques (voir Tableau 1). Pour cela la vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres (Vs,30) est estimée à partir des épaisseurs et des vitesses des ondes proposées respectivement pour chacune des deux colonnes.

Pour la colonne représentative de la zone Ouest la Vs,30 est estimée à 308 m.s⁻¹. Pour la colonne représentative de la zone Est la Vs,30 est estimée à 354 m.s⁻¹. Selon les Eurocode 8, cela correspond à des sols de classe C (voir Tableau 1).

Les spectres de réponse proposés pour le dimensionnement d'un établissement scolaire sur ce site d'Acoua sont donc les **spectres définis dans la réglementation pour cette classe de sol C** (voir Figure 4).

Les fichiers définissant les spectres fournis en Annexe 2 de ce rapport pourront être utilisés (fichiers 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol C.xls' et 'Ouvrage_III_sismicité modérée_vertical.xls').

5. Site du futur collège de Kwalé

1. SYNTHESE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU SITE DE KWALE

5.1.1. Documents de référence

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

- le rapport SEGC intitulé « Construction d'équipements scolaires du second degré – Site de Kwalé – Réalisation de sondages et d'essais. Mission de type G0 », datant de février 2012, dossier n° 1868,
- le rapport SEGC intitulé « Construction du collège de Kwalé au village de Tsoundzou I – Étude géotechnique complémentaire. Mission de type G11 », datant d'octobre 2010, dossier n° 1700,
- les données de SEGC (4 sondages pénétrométriques et 1 sondage pressiométrique), datant de juillet 2010, dossier n° 1645 « Pilône SFR sur les hauteurs de Kwalé »,
- les données de SEGC (4 sondages pénétrométriques, 1 sondage pressiométrique et 2 tests d'infiltration à niveau constant), datant de janvier 2010, dossier n° 1565 « Abattoir de volailles à Kwalé »,
- le rapport SEGC intitulé « Construction d'un collège au village de Tsoundzou I Étude géotechnique préliminaire. Mission de type G11 », datant de juillet 2009, dossier n° 1482,
- les résultats de la campagne géophysique réalisée par le BRGM dans le cadre de cette étude,
- la carte géologique de Mayotte au 1/50 000 (Stieltjes, 1988).

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

5.1.2. Données disponibles

Les données suivantes sont à notre disposition à travers les différents documents cités ci-dessus :

- Etude SEGC n° 1868 (Figure 8):

- 2 sondages pressiométriques (SPs1 et SPs2), de 19,5 mètres de profondeur,
- o Essais en laboratoire sur échantillons prélevés sur sondage à la tarière :
 - sur 14 échantillons : limites d'Atterberg, granulométrie et teneur en eau naturelle.
- Etude SEGC n° 1700 (Figure 9) :
 - 2 sondages pénétrométriques (SP1 et SP2) entre 3,6 et 4 mètres de profondeur,
 - 2 sondages pressiométriques (SPs1 et SPs2) entre 6,2 et 6,5 mètres de profondeur.
- Etude SEGC n° 1645 (pas de plan d'implantation fourni) :
 - 4 sondages pénétrométriques (SP1 à SP4) de 4 m de profondeur,
 - 1 sondage pressiométrique (SPs1) de 6,3 m de profondeur.
- Etude SEGC n° 1565 (pas de plan d'implantation fourni) :
 - o 4 sondages pénétrométriques (SP1 à SP4) de 2 m de profondeur,
 - 1 sondage pressiométrique (SPs1) de 7 m de profondeur,
 - 2 tests d'infiltration à niveau constant dans les remblais superficiels (0,6 et 0,7 mètres de profondeur).
- Etude SEGC n° 1482 (le plan d'implantation ne nous a pas été remis) :
 - 4 sondages pressiométriques (SPs1 à SPs4) dont trois entre 6,5 et 10,5 mètres de profondeur et un (SPs4) à 19,5 m de profondeur,
 - Essais en laboratoire sur échantillons (prélevés sur sondages tarière ?) :
 - sur 2 échantillons : granulométrie, valeur au bleu, teneur en eau naturelle et à l'optimum Proctor Normal,
 - sur 2 échantillons : essais de cisaillement.
- Campagne géophysique du BRGM (Figure 10) :
 - o 12 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »),
 - 5 profils de sismique SASW.

La Figure 11 présente sur une même figure l'ensemble des données cartographiées (dont les plans d'implantations nous ont été fournis) citées ci-dessus.



Figure 8 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2012 (extrait du rapport SEGC n°1868, février 2012) (échelle non respectée)

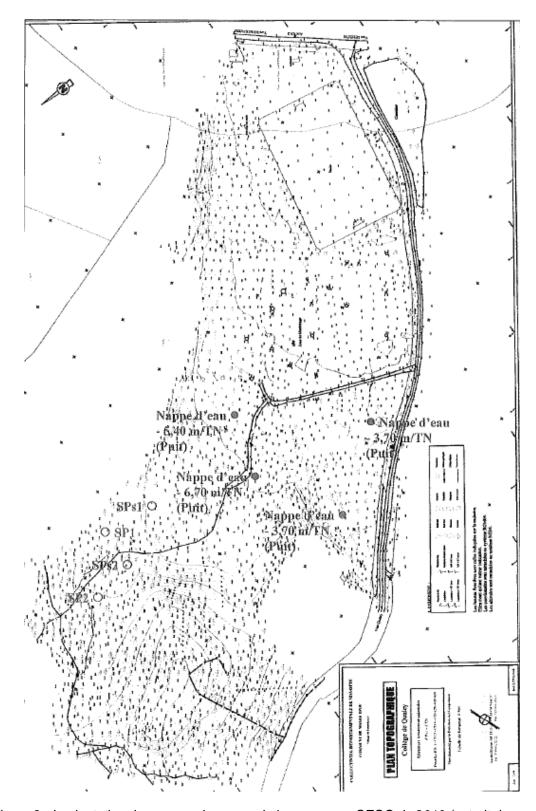


Figure 9 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2010 (extrait du rapport SEGC n°1700, octobre 2010)

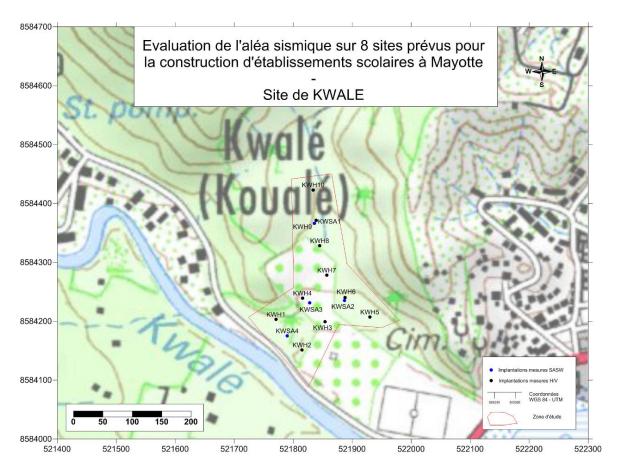


Figure 10 - Localisation des mesures géophysiques effectuées par le BRGM en 2011

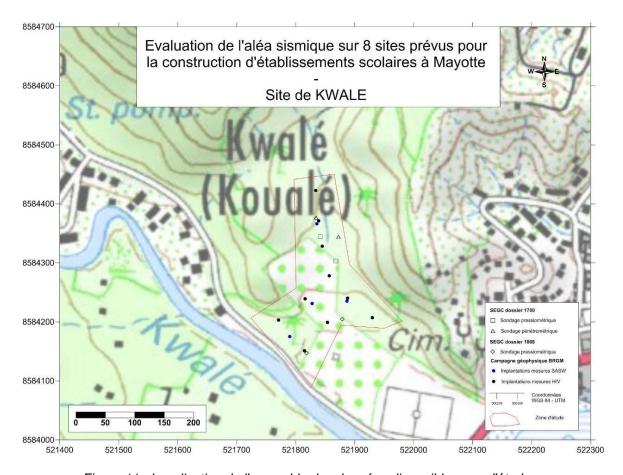


Figure 11 - Localisation de l'ensemble des données disponibles pour l'étude

5.1.3. Analyse des données

i. Géologie

D'après la carte géologique, le site semble se situer sur 2 types de terrains :

- le bouclier primitif méridional, formation volcanique Mio-Pliocène,
- les formations de rivières (alluvions et petites accumulations de déjection).

Les différents forages montrent plusieurs faciès : des alluvions surmontant des altérites au niveau de la plaine alluviale, et des glacis d'épandage et cendres volcaniques recouvrant des altérites dans une zone intermédiaire jusqu'au versant, lequel est composé presque uniquement d'altérites.

ii. Géotechnique

Si les différentes études délimitent bien les mêmes faciès lithologiques, elles n'obtiennent pas les mêmes valeurs des paramètres géotechniques pour chaque couche.

Pression limite

Les glacis d'épandage : pl = 0,4 à 0,9 MPa (dossiers 1700 et 1482), ou plus faible : < 0,1 MPa (dossier 1868)

Cendres volcaniques : pl = 0,3 à 0,5 MPa (dossier 1868) 0,9 à 1,9 MPa (1482)

Alluvions fines : pl = 0.3 à 0.6 MPa (1868 et 1482)

Alluvions vasardes : pl < 0,1 MPa (1482) 0,2 à 0,6 MPa (1868)

Altérites : pl > 1 MPa (1868) 0,45 à 1,9 MPa (1482) 0,45 à 4 MPa (1645)

Module pressiométrique

Les glacis d'épandage : Em = 1 à 4 MPa (dossier 1868) 6 à 12 MPa (1700 et 1482)

Cendres volcaniques : Em = 3 à 23 MPa (1868) 18 à 50 MPa (1482)

Alluvions fines: Em = 3 à 6 MPa (1868) 4 à 15 MPa (1482) 0,3 à 2 MPa (1565)

Alluvions vasardes: Em = 2 à 4 MPa (1868) < 1 MPa (1482) 1,5 MPa (1565)

Altérites: Em > 10 MPa (1868 et 1645) > 3,6 MPa (1482)

5.1.4. Zonage retenu

Compte-tenu des informations à notre disposition, nous proposons une division du site en trois zones avec trois faciès différents (Figure 12) :

- Zone 1 : glacis en bordure de versant,
- Zone 2 : plaine alluviale,
- Zone 3: versant nord.

Une certaine incertitude existe néanmoins sur la position de ces limites de zones.

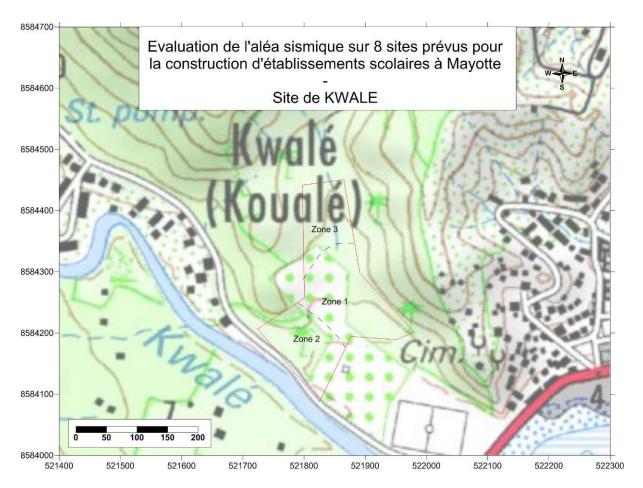


Figure 12 - Zonage proposé pour le site de Kwalé

Zone 1

Le sondage SPs1 (dossier SEGC n° 1868) se situe dans cette zone. *A priori*, en l'absence de plan d'implantation, nous considérons aussi que le sondage SPs3 du dossier SEGC n° 1482 a été fait dans cette zone.

Les deux sondages rencontrent **des glacis d'épandage** (5,4 à 6 mètres d'épaisseur), **des cendres volcaniques** (3,2 à 5,8 mètres d'épaisseur) **puis des altérites** (plus de 7,5 mètres d'épaisseur).

Le sondage SPs1 (dossier n° 1868) rencontre des glacis d'épandage à la pression limite et au module pressiométrique très faible (Em jusqu'à 0,9 MPa et pl jusqu'à 0,07 MPa). Les cendres volcaniques apparaissent hétérogènes (une valeur d'Em à 23 MPa et deux valeurs à 3 MPa), et les altérites de qualité moyenne à bonne (Em > 10 MPa, pl > 1 MPa).

Le sondage SPs3 (dossier n° 1482) rencontre des glacis d'épandage de meilleure qualité que le sondage précédent (Em de 6,4 à 10,2 MPa, pl de 0,58 à 0,92 MPa). Les cendres volcaniques sont de meilleure qualité et plus homogènes que précédemment

(Em à partir de 17,9 MPa et pl de 0,92 à 1,88 MPa). Les altérites sont à nouveau de qualité moyenne à bonne, mais sont ici hétérogènes (Em de 3,6 à 67,6 MPa et pl de 0,45 à 1,89 MPa).

Zone 2

Le sondage SPs2 (dossier SEGC n° 1868) est dans cette zone. *A priori*, en l'absence de plan d'implantation, nous considérons aussi que les sondages SPs1, SPs2 et SPs4 du dossier SEGC n°1482 ont été faits dans cette zone.

L'ensemble des sondages traversent des **alluvions fines** (d'épaisseurs très variables, de 1,7 m à 5,3 mètres), puis des **alluvions vasardes** (7 mètres d'épaisseur). Le sondage SPs2 (dossier n° 1868) rencontre ensuite les **altérites** (épaisseur supérieure à 8,5 mètres).

Les résultats du dossier n° 1482 montrent, pour les glacis alluvions fines, des valeurs de module pressiométrique de 4,5 à 15,0 MPa, et des valeurs de pression limite de 0,24 à 0,64 MPa. Comme l'indique la remarque dans le rapport du dossier n°1482 – page 5, les résultats de l'essai pressiométrique SPs2 ne sont pas utilisés ici car ils sont non représentatifs des caractéristiques du sol suite à un problème de sonde. Le sondage SPs2 du dossier n° 1868, quant à lui, montre des valeurs de Em entre 3,5 et 6,5 MPa, et de pl entre 0,44 et 0,52 MPa.

Pour les alluvions vasardes, les résultats du dossier n° 1482 montrent des valeurs de module pressiométrique faibles, de moins de 0,1 MPa à 1,6 MPa, et des valeurs de pression limite également faibles, de moins de0,01 à 0,16 MPa. Les résultats du dossier n° 1868 montrent, eux, un module pressiométrique et une pression limite plus élevés, respectivement entre 2,2 et 3,8 MPa et entre 0,19 et 0,54 MPa.

Zone 3

Le Nord de la zone d'étude semble être un peu différent : ni les alluvions ni les cendres n'y ont été rencontrées. Les sondages du dossier 1700 ont été faits dans ce secteur. Les valeurs du dossier SEGC n°1645 sont *a priori* (en l'absence de plan d'implantation) à rapprocher de ce secteur.

Les dossiers SPs1 et SPs2, SP1 et SP2 (dossier SEGC n° 1700) ont été faits dans cette zone. Ils ont rencontré ce qui a été décrit comme des **glacis**, et non comme des altérites. Les valeurs de Em sont comprises entre 5,9 et 12,4 MPa et celles de pl entre 0,41 et 0,77 MPa. Avec le pénétromètre, les valeurs de résistance dynamique apparente du sol Rd mesurées sont comprises entre 2 et 6 MPa.

Dans les hauteurs de Kwalé, le dossier n° 1645 rencontre, sous une faible épaisseur de terre végétale, uniquement des **altérites**. Les valeurs de Em sont comprises entre 12,9 et 54,1 MPa et celles de pl entre 0,44 et 3,55 MPa.

5.1.5. Géophysique

Une campagne de mesures géophysiques a été menée sur le site par le BRGM. Celleci a consisté en la réalisation de 10 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »), et de 4 profils de sismique SASW (voir Figure 10 pour la localisation des mesures et en Annexe 2 pour les résultats bruts).

Concernant les mesures H/V, la zone d'étude est hétérogène avec un fort effet de site caractérisé par des fréquences de résonance allant de 2,4 (au Sud-Est) à 4,8 Hz (au Nord-Ouest). Le point KWH1 est un point particulier, avec une résonance autour de 6,7 Hz. Ainsi les points situés dans la zone 1 (points 8 à 10) présentent des pics peu marqués et larges entre 1,5 et 4 Hz. Ceux situés dans la zone 2 (points 1 à 4) présentent des pics marqués et étroits entre 2,5 et 3,5 Hz, sauf le point 1. Enfin ceux de la zone 3 (points 5 à 7) présentent des pics peu marqués et plus hautes fréquences (5-7 Hz).

Les profils SASW ont été interprétés en termes de profils de vitesse d'ondes de cisaillement (Vs).

Le point KWSA1 est un point particulier. Situé le plus au nord, il présente une augmentation rapide et continue de Vs avec la profondeur, sans discontinuité majeure. Ces observations peuvent être corrélées avec les sondages des hauteurs de Kwalé (dossier SEGC n°1645) qui montraient une seule couche dans les profondeurs investiguées.

Les points KWSA2 à KWSA4 montrent un palier (environ 200 m/s, voire moins pour KWSA4) jusqu'à 5 à 7 m de profondeur, puis un deuxième palier plus élevé (entre 200 et 300 m/s) jusqu'à 15 à 25 m de profondeur. Le point KWSA4, le plus proche de la rivière, présente les valeurs les plus basses et une inversion marquée des vitesses Vs jusqu'à 7 m de profondeur.

Le point KWSA1, le plus au Nord, présente une augmentation de Vs avec la profondeur sans discontinuité majeure, que l'on peut

5.1.6. Essais en laboratoire

Quelques essais en laboratoire ont été réalisés sur des échantillons prélevés dans les carottes lors de la campagne de mesures de SEGC en 2012.

Deux échantillons de limons ont été étudiés en termes de granulométrie, teneur en eau naturelle, et limites d'Atterberg.

Ces différentes mesures permettent une première identification sommaire des sols présents sur le site. Les résultats détaillés de ces essais sont présentés dans le chapitre concernant la liquéfaction des sols.

5.1.7. Hydrogéologie

L'observation de puits pendant la campagne 2010 (dossier 1700) a permis d'obtenir le relevé des niveaux d'eau ; ceux-ci, au niveau des puits, sont compris entre 3,7 et 6,7 mètres de profondeur.

La nappe est vraisemblablement régulée par la rivière. Il est donc possible que sur le versant Nord, à des niveaux plus élevés que les puits présents sur le site, le niveau d'eau soit plus profond.

2. ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS

Au niveau du site, les colonnes de sol décrites ci-dessous ont été établies 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 entre 2,4 et 4,8 Hz).

On distingue 3 zones correspondant à 3 colonnes de sol ; ces zones sont représentées sur la Figure 12.

Formation	Epaisseur colonne (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\frac{\gamma}{(\mathbf{k}\mathbf{N}/\mathbf{m}^3)}$
Glacis d'épandage	5,5	200	375	19
Cendres	4,5	220	410	19
Altérites	> 7,5	280	525	19
Substratum	Infini	800	1500	22

Tableau 4 - Colonne de sols retenue pour la zone 1

Formation	Epaisseur colonne (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\frac{\gamma}{(kN/m^3)}$
Alluvions fines	3	180	335	19
Alluvions vasardes	7	120	225	19
Altérites	> 8,5	250	470	19
Substratum	Infini	800	1500	22

Tableau 5 - Colonne de sols retenue pour la zone 2

Formation	Epaisseur colonne (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\frac{\gamma}{(kN/m^3)}$
Glacis d'épandage ou altérites	4	250	470	19
Glacis d'épandage ou altérites	4	350	655	19
Glacis d'épandage ou altérites	4	500	935	20
Substratum	Infini	800	1500	22

Tableau 6 - Colonne de sols retenue pour la zone 3

Les résonances théoriques, sous sollicitation de bruit de fond sismique, de ces différentes colonnes ont été estimées à l'aide du logiciel Cyberquake[®] (Foerster et Modaressi, 207).

Pour la zone 1 les épaisseurs ont été très légèrement augmentées de façon à présenter un pic peu marqué entre 3 et 3,5 Hz, ce qui est cohérent avec les rapports H/V obtenus pour les points situés dans cette zone.

Pour la zone 2 la colonne de sol proposée est validée car elle présente un pic marqué à 2,5 Hz, ce qui est cohérent avec les mesures H/V des points de cette zone.

Pour la zone 3 il est proposé de segmenter la première couche (glacis d'épandage ou altérites) pour présenter une augmentation de la vitesse régulière selon 3 couches d'épaisseur 4 m (voir Tableau 6) de façon à reproduire un pic de résonance peu marqué et hautes-fréquences (5-7 Hz) comme pour les points H/V de cette zone.

3. SPECTRES DE REPONSE POUR LE DIMENSIONNEMENT

La classe de sol au sens de la réglementation est estimée pour ces trois colonnes de sol caractéristiques (voir Tableau 1). Pour cela la vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres (Vs,30) est estimée à partir des épaisseurs et des vitesses des ondes proposées respectivement pour chacune des trois colonnes.

Pour la colonne représentative de la zone 1 la Vs,30 est estimée à 312 m.s⁻¹. Pour la colonne représentative de la zone 2 la Vs,30 est estimée à 243 m.s⁻¹. Pour la colonne représentative de la zone 3 la Vs,30 est estimée à 415 m.s⁻¹. Selon les Eurocode 8, cela correspond à des sols de classe C ou E pour les zones 1 et 2 et une classe de sols B pour la zone 3 (voir Tableau 1).

Selon les Eurocode 8, pour les zones 1 et 2 la Vs,30 estimée correspond à une classe de sol C (voir Tableau 1). Cependant une classe de sol E est définie dans les Eurocode 8 pour des sites présentant une couverture sédimentaire peu épaisse (5 à 20 m d'épaisseur) avec des Vs,30 caractéristiques de sols C ou D reposant sur un substratum rocheux avec un fort contraste d'impédance. Dans le cas présent, on

remarque que l'épaisseur de la couche sédimentaire est justement de l'ordre d'une vingtaine de mètres pour les colonnes de sol des zones 1 et 2, soit la limite au-delà de laquelle un sol n'est pas de classe E selon les EC8. De plus, le substratum sismique (basaltes plus ou moins altérés), bien que de Vs,30 sans doute supérieure à 800 m/s ne présente pas un contraste d'impédance très marqué avec les formations sédimentaires qui le recouvrent. Pour ces différentes raisons, il pourrait être envisagé de ne pas retenir pour ces deux zones une classe de sol E. Malgré ces réserves, pour aller dans le sens de la sûreté nous proposons une classe de sol E pour les zones 1 et 2 du site..

Selon les Eurocode 8, la colonne de la zone 3 correspond à une classe de sols de classe B (voir Tableau 1).

Les spectres de réponse proposés pour le dimensionnement d'un établissement scolaire sur ce site de Kwalé sont donc les spectres définis dans la réglementation pour une classe de sol E pour les zones 1 et 2 et pour une classe de sol B pour la zone 3 (voir Figure 4). Il conviendra de bien identifier au préalable dans quelle(s) zone(s) du site l'établissement est projeté pour prendre en compte les spectres de dimensionnement correspondants, tout en gardant en mémoire qu'une certaine incertitude existe sur l'emplacement de ces limites de zone. Les fichiers définissant les spectres fournis en Annexe 2 de ce rapport pourront être utilisés (respectivement fichier 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol B.xls' ainsi que 'Ouvrage_III_sismicité modérée_vertical.xls' pour le spectre vertical).

4. ANALYSE DE LA LIQUEFACTION

5.4.1. Définition de la liquéfaction et méthodologie d'évaluation

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 produit 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.

5.4.2. Définition des termes utilisés

- D_X ouverture du tamis laissant passer x% du poids des grains
- I_P indice de plasticité
- S_r degré de saturation
- w teneur en eau
- W_l limite de liquidité
- $\sigma_{\scriptscriptstyle v}$ contrainte verticale totale
- σ'_{v} contrainte verticale effective

5.4.3. Résultats de laboratoire

Les résultats de laboratoire disponibles pour l'évaluation de la liquéfaction sont issus de la campagne 2012 (dossier 1868). Ils sont présentés dans les tableaux ci-dessous (le Tableau 7 pour les échantillons argileux, *i.e.* tous les échantillons sauf le n°4 du sondage SPs2, et le Tableau 8 pour les échantillons sableux n°3 et 5 du sondage SPs1 et n°4 du sondage SPs2).

	City	uation échanti	llon		Granulométrie	Teneur	Limites d	'Atterberg	Gra	nulométrie	Limites d'Atterberg
Sondage	Sitt	adion echanii	llion	Description lithologique complète	Passant à 15%	en eau	Limite de liquidité	Indice de plasticité	Passant à 10%	Passant à 70%	Indice de plasticité
ž	Profondeur début	Profondeur fin	Profondeur milieu		D ₁₅	W	W _L	l _p	D ₁₀	D ₇₀	I _P
	m	m	m		mm	%	%	%	mm	mm	%
SPs1	0.00	3.00	1.50	Limons argileux peu sableux brun	< 0.0012	32.3	76	51.5	< 0.0012	0.003	51.5
SPs1	3.00	6.00	4.50	Limons argileux peu sableux brun	< 0.0012	49.8	63	30.2	< 0.0012	0.2	30.2
SPs1	6.00	9.00	7.50	Limons argileux peu sableux brun	< 0.0012	51.3	60	24.8	< 0.0012	0.5	24.8
SPs1	9.00	12.00	10.50	Limons argileux peu sableux brun	< 0.0012	63	49	17.8	< 0.0012	0.1	17.8
SPs1	12.00	15.00	13.50	Limons argileux beige à grisâtre	< 0.0012	74	56	23	< 0.0012	0.4	23
SPs1	15.00	18.00	16.50	Limons argileux beige à grisâtre	< 0.0012	46.6	65	30.5	< 0.0012	0.022	30.5
SPs1	18.00	20.00		Limons argileux beige à grisâtre	< 0.0012	44.4	55	20	< 0.0012	0.036	20
SPs2	0.00	3.00	1.50	Limons fins argileux peu sableux brun	< 0.0009	40.6	69	34.2	< 0.0009	0.004	34.2
SPs2	3.00	6.00	4.50	Limons fins argileux peu sableux grisâtre à gris foncé	< 0.0009	67.5	66	9	< 0.0009	0.014	9
SPs2	6.00	9.00		Limons fins argileux peu sableux grisâtre à gris foncé	< 0.0009	61.1	70	29.1	< 0.0009	0.3	29.1
SPs2	12.00	15.00	13.50	Limons argileux brun jaune à grisâtre	< 0.0009	71.1	59	28.9	< 0.0009	0.2	28.9
SPs2	15.00	18.00	16.50	Limons argileux brun jaune à grisâtre	< 0.0009	67.5	83	34.4	< 0.0009	0.1	34.4
SPs2	18.00	20.00	19.00	Limons argileux brun jaune à grisâtre	< 0.0009	76.8	71	26.1	< 0.0009	0.2	26.1

Tableau 7 - Résultats des essais de laboratoire sur les échantillons argileux (campagne 2012)

	Cit.	uation échanti	llon		Teneur	Granulométrie Teneur				Gra	nulométrie	Limites d'Atterberg
Sondage	Sitt	adion echanii	lion	Description lithologique complète	en eau	Passant à 60%		Coefficient d'uniformité		Passant à 10%	Passant à 70%	Indice de plasticité
ž	Profondeur début	Profondeur fin	Profondeur milieu		W	D ₆₀	D ₁₀	Cu	D ₅₀	D ₁₀	D ₇₀	l _P
	m	m	m		%	mm	mm	mm	mm	mm	mm	%
SPs1	6.00	9.00	7.50	Limons argileux peu sableux brun	51.3	0.3	< 0.0012	> 250	0.0385	< 0.0012	0.5	24.8
SPs1	12.00	15.00	13.50	Limons argileux beige à grisâtre	74	0.3	< 0.0012	> 250	0.08	< 0.0012	0.4	23
SPs2	9.00	12.00	10.50	Limons fins argileux peu sableux grisâtre à gris foncé	53.2	0.5	< 0.001	> 500	0.2	< 0.001	1	29.5

Tableau 8 - Résultats des essais de laboratoire sur les échantillons sableux (campagne 2012)

5.4.4. Saturation des sols

Durant les reconnaissances, des venues d'eau ont été repérées à des profondeurs variant entre 3,7 m et 6,7 m selon les puits. Les variations saisonnières de ce niveau ne sont pas connues.

En l'absence d'informations complémentaires, on supposera par défaut une saturation proche de 100% de l'ensemble des terrains.

5.4.5. Principes d'évaluation de la liquéfaction

i. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction

Définition

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 :
 - $\sigma'_{y} < 200kPa$ en zones de sismicité la et lb ;
 - $\sigma'_{v} < 250kPa$ en zone de sismicité II ;
 - $\sigma'_{v} < 300kPa$ en zone de sismicité III.

Par analogie au zonage sismique national une zone lb sera considérée pour l'île de Mayotte.

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 plasticité¹.

c) Critères d'exclusion :

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

- critère Ex1 : $D_{10} > 2mm$;

ii. Susceptibilité quantitative à la liquéfaction

Les méthodes, basées sur des essais *in situ* (Youd *et al.,* 2001) 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)_{\iota}**

Avec:

- τ_{L} , contrainte de cisaillement cyclique moyenne horizontale (résistance du sol);
- σ' , 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 Youd est le paramètre N (nombre de coups de mouton pour un enfoncement de 30 cm) du Standard Penetration Test (SPT).

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 à 20 x PI;
- limons : N = 30 x Pl;
- argiles sableuses ou sables argileux : N = 20 x PI ;
- sables : N = 20 x Pl.

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)

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.

$$C_N = (1 / \sigma_v)^{0.5}$$
 avec σ_v en bars

C_N ne doit pas dépasser 1,7 ; si c'est le cas, on retient la valeur de 1,7.

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 N₁, pour tenir compte des corrélations présentées par Youd pour ces sols.

Le taux de contrainte cyclique moyen nécessaire pour avoir la liquéfaction est alors obtenu grâce à l'abaque de Youd pour une magnitude et une valeur N₁ données. On notera que cette valeur doit être corrigée pour tenir compte du séisme réel de calcul.

iii. 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 (Youd *et al.*, 2001) :

$$\left(\frac{\tau_a}{\sigma_v'}\right)_{S} = 0.65 \times \frac{a_{\text{max}}}{g} \times \frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \times rd$$

avec $rd = 1 - 0.00765 \times z$, pour $z \le 9.15$ m, où z est la profondeur en mètres, $rd = 1.174 - 0.0267 \times z$, pour $9.15 < z \le 23$ m, $\tau_a = \text{contrainte de cisaillement cyclique induite par le séisme.}$

Le rapport des taux de contraintes cycliques moyens définit le facteur de sécurité de la façon suivante :

$$FS_{\ell} = \left(\frac{\tau_{L}}{\sigma'_{\nu}}\right)_{\ell} / \left(\frac{\tau_{a}}{\sigma'_{\nu}}\right)_{S}$$

iv. 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

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

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

z profondeur (en m)

La valeur de IL 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 IL = 0 ;
- liquéfaction peu probable : 0 < IL ≤ 5 ;
- liquéfaction probable : 5 < IL ≤ 15 ;
- - liquéfaction quasi certaine : IL > 15.

5.4.6. Evaluation pour le site d'étude

i. Susceptibilité qualitative

A partir des résultats succincts d'identification des sols (Tableau 7 et Tableau 8), on vérifie les critères de susceptibilité à la liquéfaction pour les 14 échantillons (Tableau 9 à Tableau 22). Bien que ces échantillons soient définis comme des limons, l'analyse granulométrique montre des terrains plutôt argileux, excepté les échantillons n°3 et 5 du sondage SPs1 et n°4 du sondage SPs2; l'analyse de la susceptibilité à la liquéfaction se fera donc suivant les critères des terrains argileux, sauf pour les échantillons au comportement sableux.

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs1 – 0 à 3 m	$D_{70} < 74 \mu m \text{ et } I_P > 10$	oui
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	$w > 0.9 . w_L$	non
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	oui

Tableau 9 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 1 issu de SPs1

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs1 – 3 à 6 m	D_{70} < 74 μ m et I_P > 10	non
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	$W > 0.9 \cdot W_{L}$	non
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 10 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 2 issu de SPs1

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs1 – 6 à 9 m	$D_{10} > 2mm$	non
	$D_{70} < 74 \ \mu m \ et \ I_P > 10$	non
	Critères de suspicion	
	Sr voisin de 100 %	oui
critères des terrains sableux	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$	non
terrains sabieux	$0.05 < D_{50} < 1.5mm$	non
	$\sigma'_{\nu} < 200kPa$	oui
	D ₁₅ > 5 μm	non
critères des	w _L < 35 %	non
terrains argileux	$w > 0.9 . w_L$	non
torrains argileux	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 11 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 3 issu de SPs1

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs1 – 9 à 12 m	D_{70} < 74 μ m et I_P > 10	non
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	w > 0,9 . w _L	oui
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 12 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 4 issu de SPs1

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs1 – 12 à 15 m	$D_{10} > 2mm$	non
	D_{70} < 74 μ m et I_P > 10	non
	Critères de suspicion	
	Sr voisin de 100 %	oui
critères des	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$	non
terrains sableux	$0.05 < D_{50} < 1.5mm$	oui
	$\sigma'_{\nu} < 200kPa$	oui
	D ₁₅ > 5 μm	non
critères des	w _L < 35 %	non
terrains argileux	w > 0,9 . w _L	oui
terrains argileux	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 13 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 5 issu de SPs1

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs1 –15 à 18m	$D_{70} < 74 \mu m \text{ et } I_P > 10$	non
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	$W > 0.9 . W_L$	non
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 14 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 6 issu de SPs1

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs1 –18 à 19,5m	$D_{70} < 74 \mu m \text{ et } I_P > 10$	non
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	$w > 0.9$. w_L	non
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 15 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 7 issu de SPs1

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs2 – 0 à 3m	$D_{70} < 74 \mu m \text{ et } I_P > 10$	non
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	$w > 0.9 . w_L$	non
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 16 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 1 issu de SPs2

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs2 – 3 à 6m	$D_{70} < 74 \ \mu m \ et \ l_P > 10$	non
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	$w > 0.9 \cdot w_L$	oui
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 17 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 2 issu de SPs2

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs2 – 6 à 9m	D_{70} < 74 μ m et I_P > 10	non
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	$w > 0.9 . w_L$	non
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 18 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 3 issu de SPs2

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs2 – 9 à 12m	$D_{10} > 2mm$	non
	Critères de suspicion	
	Sr voisin de 100 %	oui
	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$	non
	$0.05 < D_{50} < 1.5mm$	oui
	$\sigma'_{v} < 200kPa$	oui

Tableau 19 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 4 issu de SPs2

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs2 – 12 à 15m	$D_{70} < 74 \mu m \text{ et } I_P > 10$	non
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	w > 0,9 . w _L	oui
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	oui

Tableau 20 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 5 issu de SPs2

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs2 – 15 à 18m	$D_{70} < 74 \mu m \text{ et } I_P > 10$	non
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	$w > 0.9$. w_L	non
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 21 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 6 issu de SPs2

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs2 -18 à 19,5m	$D_{70} < 74 \mu m \text{ et } I_P > 10$	non
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	$w > 0.9 . w_L$	oui
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 22 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 7 issu de SPs2

Compte-tenu des résultats des essais d'identification sur ces 14 échantillons, nous pouvons considérer que la majorité des échantillons prélevés, sans vérifier le critère d'exclusion vis-à-vis d'une susceptibilité à la liquéfaction, peuvent être considérés comme non susceptibles puisqu'ils ne vérifient pas la majorité des 4 critères d'inclusion. Seuls les échantillons n°5 du sondage SPs1 et n°4 du sondage SPs2 vérifient au moins 3 des 4 critères; ils présentent un caractère sableux, identifié par l'analyse granulométrique, mais non mentionné lors des forages.

ii. Susceptibilité quantitative

Les échantillons n°5 du sondage SPs1 et n°4 du sondage SPs2, présentant une susceptibilité à la liquéfaction, ont été identifiés respectivement comme des altérites et des alluvions vasardes. Etant donné l'incertitude liée à la nature et profondeur exacte de prélèvement de l'échantillon pris par cutting, on évaluera la liquéfaction sur l'ensemble de la couche de cendres et d'altérites au droit de SP1 et sur l'ensemble de la couche d'alluvions vasardes et altérites au droit de SP2.

La magnitude de séisme retenue pour corriger
$$\left(\frac{\tau_L}{\sigma_v'}\right)_L$$
 est M = 5,5.

L'accélération maximale sur site retenue pour le calcul est de 2,376 m/s², conforme à la classe de sol évaluée au droit du site précédemment (accélération prise pour la classe E, qui est la classe de sol la plus pénalisante pour les 2 zones étudiées).

Profondeu	r (m)	Horizon	γ (kN/m³)	γ' (kN/m³)	σ _v (kPa)	σ' _v (kPa)	calcı	ul de (τ/α	5') _{vs}			ca	cul c	de (τ/σ	·') _ı		Facteur de sécurité	Intens	ité liquéf	action
ht et bas	moy.						a _{max (m/s²)}	r_d	$(\tau/\sigma')_{vs}$	pl (MPa)	N _{équ.}	C_N	N_1	$N_{1,CS}$	(τ/σ') _{I (brut)}	$(\tau/\sigma')_{l \text{ (corrigé)}}$	FS _I	F_L	l _{Li}	l _L
6 - 8 m	7	Limons	18	8	126	56	2.376	0.9465	0.3353	0.37	7.4	1.3363	10	17	0.179	0.395	1.177	0.0000	0.0000	
8 - 10 m	9	Limons	18	8	162	72	2.376	0.9312	0.3298	0.39	7.8	1.1785	9	16	0.171	0.375	1.138	0.0000	0.0000	
10 - 12 m	11	Limons	18	8	198	88	2.376	0.8803	0.3118	0.45	9	1.0660	10	17	0.176	0.386	1.239	0.0000	0.0000	
12 - 14 m	13	Limons	18	8	234	104	2.376	0.8269	0.2929	1.11	22	0.9806	22	31				0.0000	0.0000	
14 - 16 m	15	Limons	18	8	270	120	2.376	0.7735	0.2740	1.49	30	0.9129	27	38				0.0000	0.0000	
16 - 18 m	17	Limons	18	8	306	136	2.376	0.7201	0.2551	1.88	38	0.8575	32	44				0.0000	0.0000	0.0000

Tableau 23 - Calcul du facteur de sécurité pour l'échantillon 5 du sondage SPs1

																	Facteur de			
Profondeu	r (m)	Horizon	γ (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)	σ _v (kPa)	σ' _v (kPa)	calcı	ul de (τ/c	5') _{vs}			cal	cul c	de (τ/d	ɔ')ı		sécurité	Inten	sité liquéf	action
ht et bas	moy.						a _{max (m/s²)}	r_{d}	$(\tau/\sigma')_{vs}$	pl (MPa)	N _{équ.}	C_N	N_1	$N_{1,CS}$	$(\tau/\sigma')_{l \text{ (brut)}}$	$(\tau/\sigma')_{I \text{ (corrigé)}}$	FSı	FL	l _{Li}	Į.
4 - 6 m	5	Limons	18	8	90	40	2.376	0.9618	0.3407	0.19	3.8	1.5811	6	12	0.133	0.293	0.860	0.1403	1.0521	
6 - 8 m	7	Limons	18	8	126	56	2.376	0.9465	0.3353	-										
8 - 10 m	9	Limons	18	8	162	72	2.376	0.9312	0.3298	0.54	11	1.1785	13	20	0.219	0.481	1.460	0.0000	0.0000	
10 - 12 m	11	Limons	18	8	198	88	2.376	0.8803	0.3118	0.44	8.8	1.0660	9	16	0.173	0.380	1.220	0.0000	0.0000	
12 - 14 m	13	Limons	18	8	234	104	2.376	0.8269	0.2929	1.05	21	0.9806	21	30	0.449	0.987	3.370	0.0000	0.0000	
14 - 16 m	15	Limons	18	8	270	120	2.376	0.7735	0.2740	1.12	22	0.9129	20	30	0.438	0.964	3.520	0.0000	0.0000	
16 - 18 m	17	Limons	18	8	306	136	2.376	0.7201	0.2551	1.87	37	0.8575	32	43				0.0000	0.0000	
18 - 20 m	19	Limons	18	8	342	152	2.376	0.6667	0.2362	1.85	37	0.8111	30	41				0.0000	0.0000	1.0521

Tableau 24 - Calcul du facteur de sécurité pour l'échantillon 4 du sondage SPs2

Au droit de SP1, l'ensemble des tranches de sols recoupant les horizons de cendres volcaniques et altérites présentent des nombres de coups $N_{1,CS}$ supérieur à 30 et des valeurs de facteurs de sécurité supérieur à 1. L'ensemble de la couche n'est donc pas liquéfiable.

Au droit de SP2, l'ensemble des tranches de sols recoupant les horizons d'argiles vasardes et altérites présentent des facteurs de sécurité supérieur à 1 et des nombres de coups $N_{1,CS}$ supérieur à 30 mis à part pour la tranche située entre 4 et 6m dans les argiles vasardes. Toutefois le coefficient de sécurité sur cette tranche de sol reste proche de 1 (Fs=0,86).

L'indice global de liquéfaction au droit de SP2 est égal à 1,05. Etant inférieur à 5, la liquéfaction est qualifiée de peu probable.

iii. Conclusion

L'évaluation de la liquéfaction au droit des sondages pressiométriques a mis en évidence que la formation d'alluvions vasardes pouvait présenter un risque de liquéfaction, qualifié toutefois de peu probable et particulièrement sur l'horizon de sol situé entre 4 et 6 m au droit de SP2, où le coefficient de sécurité est inférieur à 1.

Ainsi, une attention particulière face au risque liquéfaction devra être portée sur l'ensemble du site comportant cette couche d'alluvions vasardes.

6. Site du futur collège de Tsoundzou II

1. SYNTHESE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU SITE DE TSOUNDZOU II

6.1.1. Documents de référence

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

- le rapport SEGC intitulé « Construction d'équipements scolaires du second degré Site de Tsoundzou II – Réalisation de sondages et d'essais et étude de faisabilité géotechnique. Missions de type G0 et G11 + G12 », datant de mars 2012, dossier n° 1869,
- les données de SEGC (2 sondages pressiométriques), datant de novembre 2009, dossier n° 1550 « MJC Tsoundzou II »,
- les données de SEGC (6 sondages pénétrométriques, un sondage pressiométrique et 2 sondages à la tarière), datant de juin 2007, dossier n° 1081 « Construction du T3 Tsoundzou II ».
- les données de SEGC (6 sondages pénétrométriques, 2 sondages pressiométriques et 5 sondages à la tarière), datant d'octobre 2006, dossier n° 923 « École élémentaire T11 à Tsoundzou II »,
- les résultats de la campagne géophysique réalisée par le BRGM dans le cadre de cette étude.
- la carte géologique de Mayotte au 1/50 000 (Stieltjes, 1988).

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

6.1.2. Données disponibles

Les données suivantes sont à notre disposition à travers les différents documents cités cidessus :

- Etude SEGC n° 1869 (Figure 13):
 - 4 sondages pressiométriques (SPs1 à SPs4), de 2,8 à 19 mètres de profondeur,
 - 12 sondages pénétrométriques (SP1 à SP12), de 1,6 à 2 mètres de profondeur,
 - o Essais en laboratoire sur échantillons prélevés sur sondage à la tarière :
 - sur 11 échantillons : limites d'Atterberg, granulométrie et teneur en eau naturelle.
- Etude SEGC n° 1550 (pas de plan d'implantation fourni) :

- 2 sondages pressiométriques (SPs1 et SPs2) de 6,3 mètres de profondeur.
- Etude SEGC n° 1081 (pas de plan d'implantation fourni) :
 - o 6 sondages pénétrométriques (SP1 à SP4) de 3,2 à 5 mètres de profondeur,
 - o 1 sondage pressiométrique (SPs1) de 5,6 mètres de profondeur,
 - o 2 sondages à la tarière (ST1 et ST2) de 1,1 et 1 mètre de profondeur.
- Etude SEGC n° 923 (pas de plan d'implantation fourni) :
 - o 6 sondages pénétrométriques (SP1 à SP6) de 2 à 5 mètres de profondeur,
 - 2 sondages pressiométriques (SPs1 et SPs2) de 4,4 et 4,6 mètres de profondeur,
 - o 6 sondages à la tarière de 0,5 à 2 mètres de profondeur.
- Campagne géophysique du BRGM (Figure 14) :
 - 10 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »),
 - 4 profils de sismique SASW.

La Figure 15 présente sur une même figure l'ensemble des données cartographiées (dont le plan d'implantation qui nous a été fourni) citées ci-dessus.

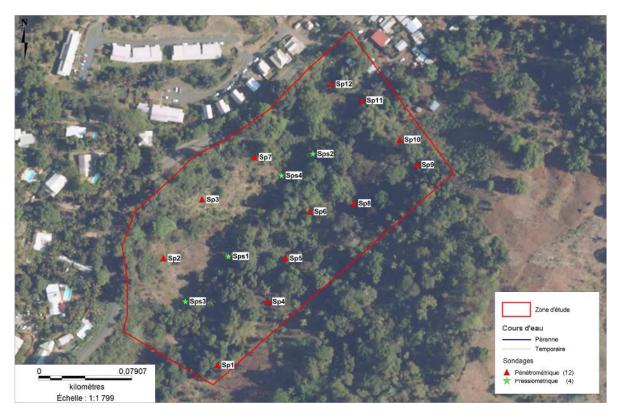


Figure 13 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2012 (extrait du rapport SEGC n°1869, mars 2012) (échelle non respectée)

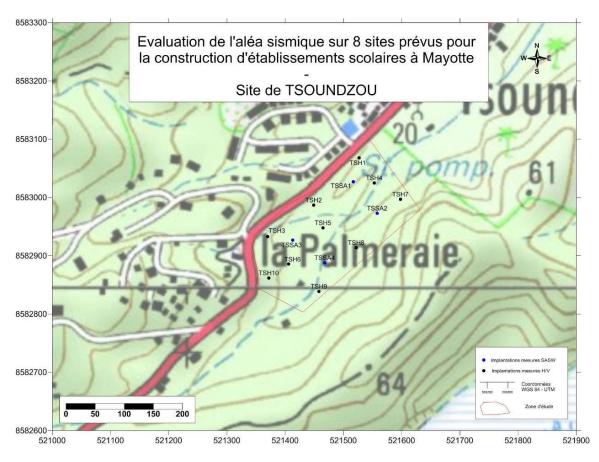


Figure 14 - Localisation des mesures géophysiques effectuées par le BRGM en 2011 sur le site de Tsoundzou II

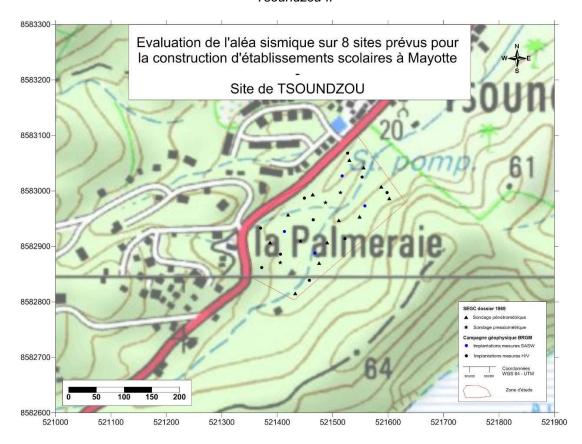


Figure 15 - Localisation de l'ensemble des données disponibles pour l'étude (site de Tsoundzou II)

6.1.3. Analyse des données

i. Géologie

D'après la carte géologique, le site semble se situer sur 2 types de terrains :

- le bouclier primitif méridional, formation volcanique Mio-Pliocène,
- les formations de rivières (alluvions et petites accumulations de déjection).

Les différents forages montrent un faciès avec des colluvions surmontant des altérites. À proximité de la parcelle, un site (dossier n° 923) présente des sols ferralitiques jusqu'à au moins 4,5 mètres de profondeur.

ii. Géotechnique

Les sondages pressiométriques réalisés dans le cadre du dossier SEGC n° 1869 sont globalement alignés dans l'axe de la rivière. En conséquence, nous ne disposons pas d'informations discriminantes sur la géologie du sous-sol le long d'un profil perpendiculaire à la rivière, qui traverserait des unités morphologiques différentes. Ces informations manquantes auraient été utiles pour éventuellement distinguer plusieurs zones sur la parcelle. Nous nous baserons uniquement sur les informations fournies, mais il est possible que ces informations ne rendent pas compte de la diversité du site.

Les quatre sondages rencontrent des **colluvions** (3,8 à 5 mètres d'épaisseur) puis des **altérites** (plus de 15 mètres d'épaisseur).

Les sondages SPs1 à SPs5 (dossier n° 1869) rencontrent des colluvions à la pression limite et au module pressiométrique hétérogènes (respectivement 0,17 MPa à 1,67 MPa et 1,3 à 38,8 MPa). Les altérites apparaissent également hétérogènes, avec des valeurs plus élevées (Em compris entre 20,5 et 186,6 MPa et pl compris entre 1,16 et 5,3 MPa).

Les dossiers SEGC n° 1081 et 1550, qui relèvent aussi la présence de colluvions et d'altérites similaires à proximité de la parcelle d'étude, confirment les résultats du dossier n° 1869, tant en matière d'hétérogénéité que de valeur moyenne des modules pressiométriques et pressions limites. Notons dans le dossier n° 1550 quelques valeurs particulièrement élevées du module pressiométrique dans les colluvions, jusqu'à 129,1 MPa.

Notons également que, dans le dossier SEGC n° 1869, les sols ont montré une résistance de pointe relativement importante (> 15 MPa) pour 10 des 12 sondages pénétrométriques, allant jusqu'au refus sur bloc avant 2 mètres de profondeur pour 6 des 12 sondages.

iii. Géophysique

Une campagne de mesures géophysiques a été menée sur le site par le BRGM. Celle-ci a consisté en la réalisation de 10 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »), et de 4 profils de sismique SASW (cf. Figure 14 pour la localisation des mesures et en Annexe 2 pour les résultats bruts).

Concernant les mesures H/V, la zone d'étude présente un effet de site marqué caractérisé par des pics très nets. Les fréquences de résonance sont cependant très hétérogènes. Elles vont de 3 Hz environ (points 1, 5, 6 et 9) à 7 Hz (points 4 et 7) en passant par 4-5 Hz (points 2, 3, 8 et 10). Il est difficile de différencier des zones claires à partir de ces points (cf. données géotechniques). Cependant, du fait qu'un effet de site est marqué pour l'ensemble

de la zone d'étude et que les mesures sont relativement hétérogènes (et qu'il est ainsi difficile de rattacher chaque mesure H/V à une zone homogène), il est proposé de représenter ce site par deux colonnes marquant les cas extrêmes rencontrés, soit des résonances respectivement pour des fréquences de 3 Hz et de 7 Hz.

Les profils SASW ont été interprétés en termes de profils de vitesse d'ondes de cisaillement (Vs).

Les profils SASW sont eux-aussi hétérogènes en termes de gradient de vitesse avec la profondeur puisque, à Vs équivalentes en surface (autour de 200 m/s), les vitesses Vs à 20 m de profondeur varient entre 280 et 550 m/s.

Les profils TSSA1 et TSSA2 sont proches, montrant un palier à 225 m/s jusqu'à 5 mètres de profondeur et une augmentation continue jusqu'à 500 à 600 m/s à 25 mètres de profondeur. Le profil TSSA3 montre une inversion de vitesse vers 3 mètres de profondeur, et des valeurs de Vs inférieures à 250 m/s jusqu'à 8 mètres de profondeur. Le profil TSSA4 montre un palier entre 200 et 250 m/s jusqu'à 15 mètres de profondeur, puis une légère augmentation jusqu'à environ 350 m/s à 25 mètres de profondeur.

iv. Essais en laboratoire

Quelques essais en laboratoire ont été réalisés sur des échantillons prélevés dans les carottes lors de la campagne de mesures de SEGC en 2012.

Onze échantillons de colluvions et d'altérites ont été étudiés en termes de granulométrie, teneur en eau naturelle, et limites d'Atterberg.

Ces différentes mesures permettent une première identification sommaire des sols présents sur le site. Les résultats détaillés de ces essais sont présentés dans le chapitre concernant la liquéfaction des sols.

v. Hydrogéologie

La zone d'étude est traversée par une rivière et un affluent. Des venues d'eau ont été observées dans les deux sondages les plus profonds du dossier SEGC n° 1869, à 3,6 mètres de profondeur (dans un forage dans la partie aval du site) et 7,5 mètres de profondeur (dans la partie amont du site). La nappe d'eau mise en évidence est vraisemblablement en relation avec la nappe alluviale de la rivière principale traversant le site. Les fluctuations en fonction de la saison sont inconnues.

2. ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS

Au niveau du site, les colonnes de sol décrites ci-dessous ont été établies 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 pour les deux colonnes proposées les valeurs extrêmes des résultats des mesures de bruit de fond (H sur V) réalisées sur site (soit des fréquences de l'ordre de 3 Hz et 7 Hz respectivement).

Deux colonnes de sols sont décrites. Les différentes investigations géotechniques et géophysiques n'ont pas permis de cartographier les zones d'emprise d'application de l'une ou l'autre de ces colonnes. La zone 2 semble limitée à la proximité de la rivière, mais dans des limites qui restent inconnues.

Formation	Epaisseur colonne (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\frac{\gamma}{(kN/m^3)}$
Colluvions	5	225	420	18
Altérites	15	500	935	19
Substratum	Infini	800	1500	22

Tableau 25 - Colonne de sols retenue pour la zone 1

Formation	Epaisseur colonne (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\frac{\gamma}{(kN/m^3)}$
Colluvions	17	225	420	18
Altérites	8	350	655	19
Substratum	Infini	800	1500	22

Tableau 26 - Colonne de sols retenue pour la zone 2

La réponse théorique de la colonne représentative de la zone 1 sous sollicitation de bruit de fond sismique est évaluée à l'aide du logiciel Cyberquake[®] (Foerster & Modaressi, 2007). Elle présente ainsi un pic relativement peu marqué entre 6 et 7 Hz. La colonne proposée pour la zone 2 présente un pic marqué vers 2.5-3 Hz. Ces deux colonnes sont donc bien cohérentes avec les cas extrêmes rencontrés lors des mesures H/V.

3. SPECTRES DE REPONSE POUR LE DIMENSIONNEMENT

La classe de sol au sens de la réglementation est estimée pour ces deux colonnes de sol caractéristiques (voir Tableau 1). Pour cela la vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres (Vs,30) est estimée à partir des épaisseurs et des vitesses des ondes proposées respectivement pour chacune des deux colonnes.

Pour la colonne représentative de la zone 1, la Vs,30 est estimée à 463 m.s⁻¹. Pour la colonne représentative de la zone 2, la Vs,30 est estimée à 287 m.s⁻¹. Selon les Eurocode 8, cela correspond respectivement à des sols de classe B pour la zone 1 et des sols de classe C pour la zone 2 (voir Tableau 1).

Etant donné que la délimitation entre les zones 1 et 2 n'est pas définie, il est recommandé d'utiliser le cas le plus pénalisant pour définir les mouvements de dimensionnement des structures sur ce site. Ainsi, les spectres de réponse proposés pour le dimensionnement d'un établissement scolaire sur ce site de Tsoundzou II sont donc les **spectres définis dans la réglementation pour la classe de sol C** (voir Figure 4).

Les fichiers définissant les spectres fournis en Annexe 2 de ce rapport pourront être utilisés (fichiers 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol C.xls' et 'Ouvrage_III_sismicité modérée_vertical.xls').

4. ANALYSE DE LA LIQUEFACTION

Pour la définition des termes et de la méthodologie utilisés on se reportera aux paragraphes 5.4.1 et 5.4.2. Les principes d'évaluation de la liquéfaction sont explicités au paragraphe 5.4.5

6.4.1. Résultats de laboratoire

Les résultats de laboratoire disponibles pour l'évaluation de la liquéfaction sont issus de la campagne 2012 (dossier 1869). Ils sont présentés dans les tableaux ci-dessous (Tableau 27 pour les échantillons argileux, et Tableau 28 pour les échantillons sableux, c'est-à-dire les échantillons n°5 du sondage SPs3 et n°3 et 6 du sondage SPs4).

	d	3			Granulométrie	Teneur	Limites d	Limites d'Atterberg	al9	Granulométrie
Sondage	ก็	oltuation ecnantillon		Description lithologique complète	Passant à 15%	en eau	Limite de liquidité	Indice de plasticité	Passant à 10%	Passant à 70%
S ∘N	Profondeur début	Profondeur fin	Profondeur milieu		D ₁₅	M	¹ M	٩	D ₁₀	D ₇₀
	ш	٤	٤		mm	%	%	%	ww	mm
SPs3	00'0	2.70	1.35 L	Limons argileux peu sableux	< 0.0012	26	09	22.3	< 0.0012	0.0068
SPs3	2.70	00.9	4.35	Limons argileux peu sableux	< 0.0011	44.1	20	19.2	< 0.0011	0.0048
SPs3	00'9	9.00	7.50	Limons argileux très peu sableux brun jaunâtre à gris	< 0.0012	47.9	62	24.7	< 0.0012	0.2
SPs3	00.6	12.50		10.75 Limons argileux très peu sableux brun jaunâtre à gris	< 0.0012	46.1	29	24.1	< 0.0012	0.3
SPs3	12.50	15.00		13.75 Limons argileux très peu sableux brun jaunâtre à gris	6000:0 >	37.9	29	25.3	< 0.0009	0.5
SPs4	00'0	3.00	1.50	Limons argileux peu sableux	< 0.0029	52.4	71	32.9	< 0.0029	0.2
SPs4	3.00	00.9		4.50 Limons argileux très peu sableux brun jaunâtre à gris	< 0.0011	47.9	89	25.6	< 0.0011	0.005
SPs4	00'9	9.00		7.50 Limons argileux très peu sableux brun jaunâtre à gris	6000:0 >	20.7	89	28.5	6000'0 >	0.5
SPs4	00.6	12.00	10.50	Limons argileux très peu sableux brun jaunâtre à gris	< 0.0012	44.1	25	20.2	< 0.0012	0.2
SPs4	12.00	15.00	13.50	Limons argileux très peu sableux brun jaunâtre à gris	< 0.0012	31.8	09	27.3	< 0.0012	0.3
SPs4	15.00	18.00		16.50 Limons argileux très peu sableux brun jaunâtre à gris	< 0.0009	54.1	28	16.3	< 0.0009	9:0

Tableau 27 - Résultats des essais de laboratoire sur les échantillons argileux (campagne 2012)

	đ		3		Teneur		Granulométrie	nétrie		Grai	Granulométrie	Limites d'Atterberg
egepuog	<u></u>	tuation echanti	antillon	Description lithologique complète	en eau	Passant à 60%	Passant Coefficient Passant à 10% d'uniformité à 50%	Coefficient l'uniformité	Passant à 50%	Passant à 10%	Passant à 70%	Indice de plasticité
N。 3	Profondeur début	Profondeur fin	Profondeur milieu		М	D ₆₀	D ₁₀	3	D ₅₀	D ₁₀	D_{70}	<u>4</u>
	ш	ш	ш		%	шш	mm		mm	mm	шш	%
SPs3	12.50	15.00	13.75	13.75 Limons argileux très peu sableux brun jaunâtre à gris	37.9	0.2	0.2 < 0.0009 > 222		0.0475	6000'0	0.5	25.3
SPs4	00.9	9.00	7.50	Limons argileux très peu sableux brun jaunâtre à gris	20.2	0.3	0.3 < 0.0009 > 333	> 333	0.028	0.0009	0.5	28.5
SPs4	15.00	18.00	16.50	16.50 Limons argileux très peu sableux brun jaunâtre à gris	54.1	0.4	0.4 < 0.0009 > 444		0.1	0.10 0.0009	9:0	16.3

Tableau 28 - Résultats des essais de laboratoire sur les échantillons sableux (campagne 2012)

6.4.2. Saturation des sols

Durant les reconnaissances, des venues d'eau ont été repérées à des profondeurs variant entre 3,6 m et 7,5 m selon les forages. Les variations saisonnières de ce niveau ne sont pas connues.

En l'absence d'informations complémentaires, on supposera par défaut une saturation proche de 100% de l'ensemble des terrains.

6.4.3. Evaluation pour le site d'étude

i. Susceptibilité qualitative

On vérifie les critères de susceptibilité à la liquéfaction (voir paragraphe 5.4.5) pour les 11 échantillons (Tableau 29 à Tableau 39). Bien que ces échantillons soient définis comme des limons, l'analyse granulométrique montre des terrains plutôt argileux; l'analyse de la susceptibilité à la liquéfaction se fera donc suivant les critères des terrains argileux.

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs3 – 0 à 2,7 m	$D_{70} < 74 \mu m \text{ et } I_P > 10$	oui
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	$w > 0.9 . w_L$	oui
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 29 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 1 issu de SPs3

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs3 – 2,7 à 6 m	D_{70} < 74 μ m et I_P > 10	oui
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	$w > 0.9 . w_L$	non
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 30 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 2 issu de SPs3

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs3 – 6 à 9 m	$D_{70} < 74 \mu m \text{ et } I_P > 10$	non
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	$W > 0.9 . W_L$	non
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 31 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 3 issu de SPs3

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs3 – 9 à 12,5 m	$D_{70} < 74 \mu m \text{ et } I_P > 10$	non
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	$w > 0.9 . w_L$	non
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 32 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 4 issu de SPs3

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs3 –12,5 à 15m	$D_{10} > 2mm$	non
	D_{70} < 74 μ m et I_P > 10	non
	Critères de suspicion	
	Sr voisin de 100 %	oui
critères des terrains sableux	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$	non
terrains sabieux	$0.05 < D_{50} < 1.5mm$	non
	$\sigma'_{\nu} < 200kPa$	oui
	D ₁₅ > 5 μm	non
critères des	w _L < 35 %	non
terrains argileux	$w > 0.9$. w_L	non
terrains argileux	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 33 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 5 issu de SPs3

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs4 – 0 à 3m	$D_{70} < 74 \mu m \text{ et } I_P > 10$	non
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	$W > 0.9 . W_L$	non
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 34 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 1 issu de SPs4

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs4 – 3 à 6m	D_{70} < 74 μ m et I_P > 10	oui
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	$W > 0.9 . W_L$	non
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 35 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 2 issu de SPs4

Echantillon	Critères d'exclusion				
SPs4 – 6 à 9m	SPs4 – 6 à 9m $D_{10} > 2mm$				
	D_{70} < 74 μ m et I_P > 10	non			
	Critères de suspicion				
	Sr voisin de 100 %	oui			
critères des terrains sableux	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$	non			
terrains sabieux	$0.05 < D_{50} < 1.5mm$	non			
	$\sigma'_{v} < 200kPa$	oui			
	D ₁₅ > 5 μm	non			
critères des	w _L < 35 %	non			
terrains argileux	$w > 0.9 . w_L$	non			
terrains argileux	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non			

Tableau 36 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 3 issu de SPs4

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs4 – 9 à 12m	D_{70} < 74 μ m et I_P > 10	non
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	w > 0,9 . w _L	non
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 37 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 4 issu de SPs4

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs4 – 12 à 15m	$D_{70} < 74 \mu m \text{ et } I_P > 10$	non
	Critères de suspicion	
	D ₁₅ > 5 μm	non
	w _L < 35 %	non
	w > 0,9 . w _L	non
	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 38 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 5 issu de SPs4

Echantillon	Critères d'exclusion	
SPs4 – 15 à 18m	$D_{10} > 2mm$	non
	$D_{70} < 74 \ \mu m \ et \ l_P > 10$	non
	Critères de suspicion	
	Sr voisin de 100 %	oui
critères des terrains sableux	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$	non
terrains sabieux	$0.05 < D_{50} < 1.5mm$	oui
	$\sigma'_{\nu} < 200kPa$	oui
	D ₁₅ > 5 μm	non
critères des	w _L < 35 %	non
terrains argileux	$w > 0.9 . w_L$	oui
terrains argileux	Sol au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité	non

Tableau 39 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction de l'échantillon n° 6 issu de SPs4

Compte-tenu des résultats des essais d'identification sur ces 11 échantillons, nous pouvons considérer que 10 des échantillons prélevés, sans vérifier systématiquement le critère d'exclusion vis-à-vis d'une susceptibilité à la liquéfaction, peuvent être considérés comme non susceptibles puisqu'ils ne vérifient pas au moins 3 des 4 critères. Seul l'échantillon n°6 du sondage SPs4 vérifie 3 des 4 critères d'inclusion.

ii. Susceptibilité quantitative à la liquéfaction

La magnitude de séisme de référence retenue est M = 5,5 et l'accélération maximale sur site retenue pour le calcul est de 1,98 m/s², conforme à la classe de sol évaluée au droit du site précédemment (classe de sol « C »).

Au niveau du SPs4, tous les autres échantillons (1 échantillon prélevé par intervalle de 3 mètres) se sont révélés non susceptibles à la liquéfaction. De ce fait, l'évaluation de la susceptibilité quantitative n'est réalisée que sur la tranche de l'échantillon n°6, à savoir entre 15 et 18 mètres.

																		Facteur
																		de
	Profondeur	r (m)	Horizon	$\gamma (kN/m^3)$	γ' (kN/m ³)	σ _v (kPa)	σ' _ν (kPa)	calc	ul de (τ/c) _{vs}			ca	lcul (de (τ/	σ') _ι		sécurité
Γ	ht et bas	moy.						a _{max (m/s²)}	Га	(τ/σ') _{vs}	pl (MPa)	Neau.	C _N	N ₁	N _{1.08}	(τ/σ') _{I (brut)}	(τ/σ') _{i (comigé)}	FS _I
Γ	15 - 18 m	16.5	Limons	18	8	297	132	1.98	0.7335	0.2165	2.48	50	0.8704	43	57			

Tableau 40 - Calcul du facteur de sécurité pour les échantillons de SPs4

N_{1,CS} est supérieur à 30 pour l'horizon considéré, donc celui-ci n'est pas liquéfiable.

iii. Conclusion

L'évaluation de la liquéfaction au droit des sondages pressiométriques a mis en évidence qu'un seul des échantillons prélevés était susceptible de se liquéfier en cas de séisme. Néanmoins, par corrélation avec les résultats de l'essai pressiométrique, il a été établi que l'horizon de cet échantillon n'est pas liquéfiable.

7. Site du futur lycée de Kawéni

1. SYNTHESE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU SITE DE KAWENI

7.1.1. Documents de référence

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

- le rapport SEGC intitulé « construction d'équipement scolaires du second degré site de Kawéni – Réalisation des sondages et d'essais - mission de type G0 », datant de février 2012, référence SEGC MAYOTTE/E.M./1814/2011,
- le rapport SEGC intitulé « étude de faisabilité géotechnique-mission de type G11+G12 phase 1 », datant de décembre 2010, référence SEGC MAYOTTE/TR/1721/2010.
- le rapport SEGC intitulé « construction d'un collège en modulaires à Kawéni II » -Etude géotechnique préliminaire mission de type G11 – datant de janvier 2009, référence SEGC MAYOTTE/AH/1397/2009,
- les résultats de la campagne géophysique réalisée par le BRGM dans le cadre de cette étude,
- la carte géologique de Mayotte à 1/50 000 (Stieltjes, 1988),
- Le rapport BRGM intitulé « Etude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. LEP de Kaouéni », mars 2006, BRGM/RP-54470-FR.

7.1.2. Données disponibles

Les données suivantes sont à notre disposition à travers les différents documents cités cidessus :

- Etude SEGC de février 2012 (Figure 17) :
 - 2 sondages à la tarière hélicoîdale SPs1 et SPs2 (diam. 63 mm) de 15 m et
 20 m de profondeur pour le prélèvement de 13 échantillons et essais pressiométriques réalisés tous les 2 m;
 - Essais laboratoires sur chacun des échantillons prélevés à la tarière : teneur en eau naturelle, analyse granulométrique, limites d'Atterberg, analyse granulométrique par sédimentation.
- Etude SEGC de décembre 2010 (Figure 18) :
 - 5 sondages à la tarière de 7,5 m de profondeur, pour 35 essais pressiométriques (SPs) (fouilles réalisées à la tarière mécanique à sec – Pressiomètre Ménard)
- Etude SEGC de janvier 2009 (Figure 19), située au Nord-Est de la zone d'étude :

- 6 sondages à la tarière donc 5 pour 23 essais pressiométriques(SPs) (fouilles réalisées à la tarière mécanique à sec-Pressiomètre Ménard) menés jusqu'à 6 m,
- 4 sondages pénétrométriques (SP).Pénétromètre dynamique léger type DSL, menés jusqu'à 5 m de profondeur.
- Campagne géophysique du BRGM réalisée en 2011(Figure 20) :
 - o 10 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »),
 - o 3 profils de sismique SASW.

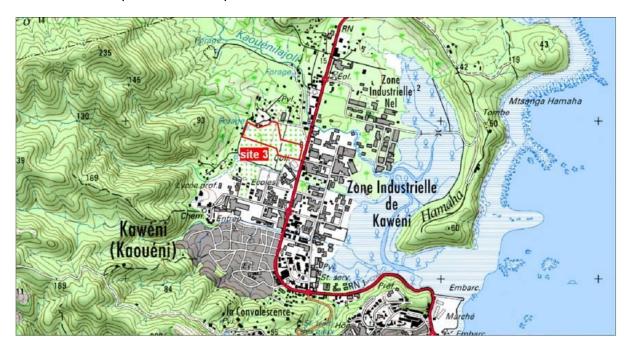


Figure 16 - Localisation de la zone d'étude de Kawéni

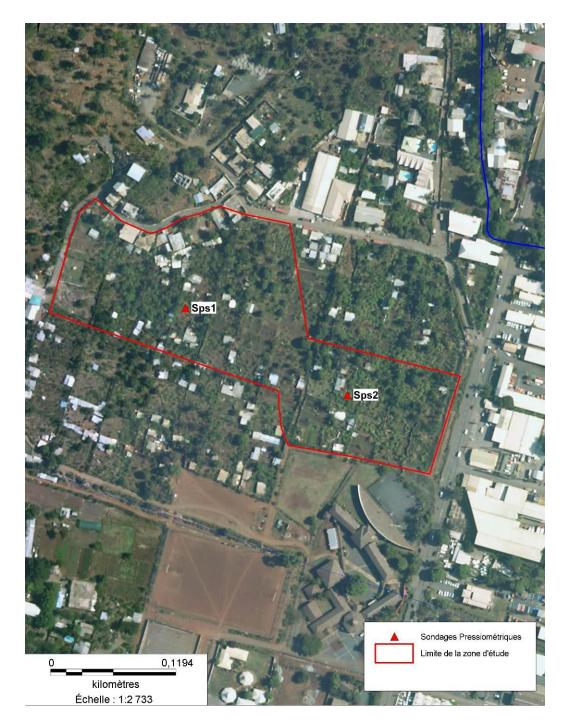


Figure 17 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2012 (extrait du rapport SEGC, février 2012)

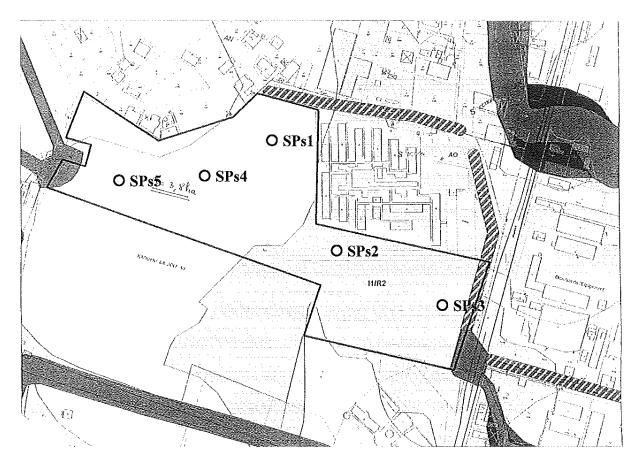


Figure 18 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2010 (extrait du rapport SEGC, décembre 2010)

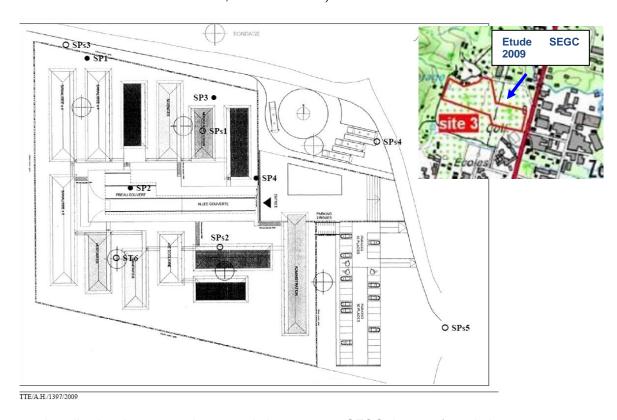


Figure 19 - Localisation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2009 (extrait du rapport SEGC, janvier 2009), au Nord-Est de la zone d'étude



Figure 20 - Localisation des reconnaissances géophysiques réalisées par le BRGM en 2011

7.1.3. Analyse des données géologiques

D'après les cartes morpho-pédologique et géologique de Mayotte au 1/50 000, la zone d'étude s'insère dans une unité morpho-pédologique de type plaines littorales à glacis d'épandage incisées par des cours d'eau sur 2 à 5 mètres.

SEGC précise dans son rapport de 2012, que les matériaux rencontrés définissent des alluvions fines provenant surtout des altérites ferralitiques et déposées en plusieurs phases.

Ces matériaux surmontent les anneaux de pyroclastites trachytiques de Kawéni issus de l'épisode différencié explosif au Nord de l'île, d'âge Pléistocène (0,5 Ma).

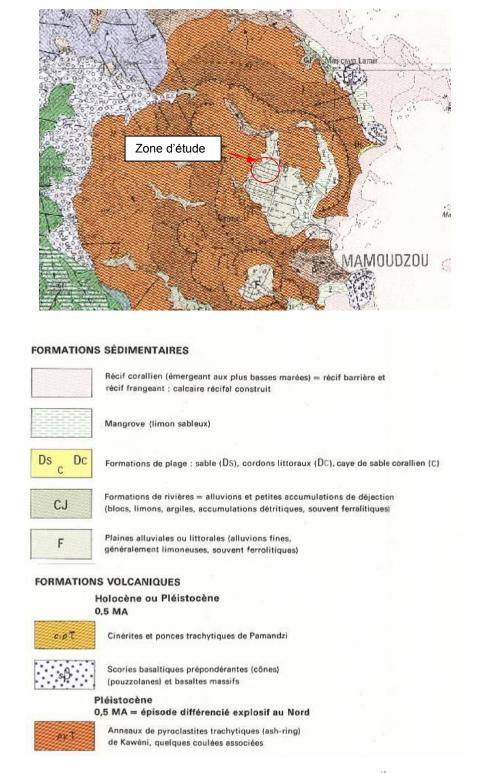


Figure 21 - Extrait de la carte géologique de Mayotte au 1/50 000^{ième} (Stieltjes, 1988)

7.1.4. Analyse des données géotechniques

Les campagnes géotechniques menées par SEGC en novembre 2010 (rapport SEGC 2011) et décembre 2011 (rapport SEGC 2012) ont permis de recouper les terrains suivants :

 des alluvions fines, correspondant à des limons fins argileux peu sableux, brun, peu compacts, à éléments polygéniques altérés, de taille inframillimétrique à millimétrique.

Ces matériaux présentent des portances généralement faibles à moyennes et sont compressibles :

- > pl variant entre 0,21 et 0,98MPa
- ➤ Em variant entre 1,9 et 12,6MPa

On peut souligner par ailleurs, que les caractéristiques mécaniques de cet horizon s'améliorent sur la partie sud-ouest (SPs5 et SPs4 de 2010 et SPs1 de 2012).

L'épaisseur de ces limons est variable, allant de 2,7 à Est à 4,8 mètres à l'Ouest.

 des alluvions vasardes, correspondant à des limons argileux peu sableux, grisâtre à gris foncé, peu compacts à lâches, à éléments polygéniques altérés de taille inframillimétrique à centimétrique.

Ces matériaux présentent des portances faibles et sont compressibles :

- pl variant généralement entre 0,11 et 0,54 MPa
- > Em variant entre 0,8 et 6,9 MPa

On peut noter par ailleurs, une légère amélioration des caractéristiques mécaniques d'Est en Ouest.

L'épaisseur de cette couche est variable allant de 11,4m à l'Est (sondage SP2, 2012) à 4,6m vers l'Ouest (sondage SPs1, 2012), voire inexistante à l'extrême partie Ouest de la zone d'étude (horizon non recoupé sur SPs5, 2011).

- **des altérites**, correspondant à matériaux argileux très peu sableux, brun jaune à grisâtre, moyennement à fortement compacts, à structure minéralogique visible.

Cet horizon a été recoupé par 3 sondages (SPs5 de 2011, et SPs1 et SPs2 de 2012). Ces matériaux présentent des portances moyennes et sont peu compressibles.

- pl variant entre 1,10 et 1,99 MPa
- Em variant entre 8.6 et 54.3 MPa

L'épaisseur de cet horizon est d'au moins 11,4 m.

Les investigations géotechniques réalisées fin 2010 par SEGC ont permis de tracer la coupe de synthèse lithologique suivante au droit du site :

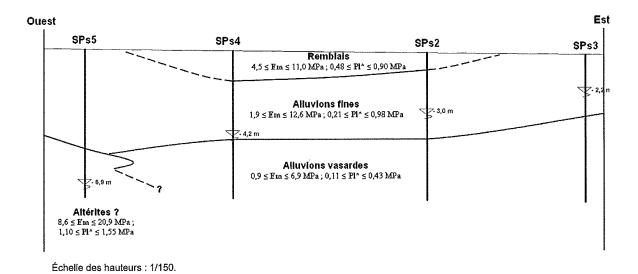


Figure 22 - Synthèse lithologique et géotechnique suite aux investigations menées en 2010 (extrait rapport SEGC 2010).

La synthèse des investigations géotechniques de 2010 complétées par les investigations réalisées en 2012, nous ont conduits à établir un zonage géotechnique. Ainsi, nous avons distingué 2 zones :

Zone Ouest :

Cette zone concerne l'extrémité Ouest de la zone d'étude. Elle a été recoupée par un seul sondage (SPs5 effectué en 2011).

Elle se caractérise par deux horizons lithologiques :

- Des alluvions fines sur une épaisseur de 4,8 m
- Des altérites sur une épaisseur minimale évaluée à 11,4 m

- Zone Centre et Est :

Cette zone constitue plus des deux tiers de la zone d'étude.

Elle se caractérise par 3 horizons lithologiques :

- Des alluvions fines sur une épaisseur variant de 2,7m à 4,8m d'Est en Ouest
- Des alluvions vasardes sur une épaisseur variant de 11,4 m à 4,6 m d'Est en Ouest
- Des altérites sur une épaisseur minimale évaluée à 11,4 m

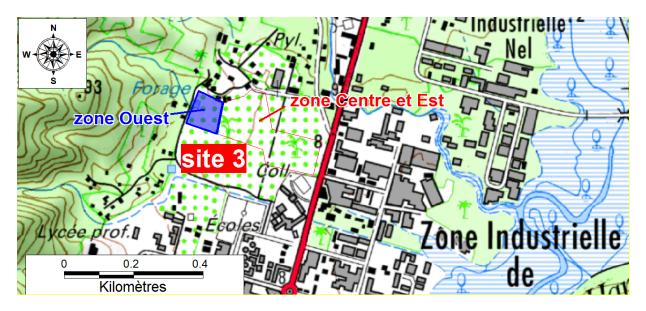


Figure 23 - Zonage proposé pour le site de Kawéni

7.1.5. Analyse des mesures géophysiques

Une campagne de mesures géophysiques a été menée sur le site par le BRGM. Celle-ci a consisté en la réalisation de 10 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »), et de 3 profils de sismique SASW (cf. Figure 20 pour la localisation des mesures et en Annexe 2 pour les résultats bruts).

Les mesures H/V, mettent en évidence un site assez homogène avec un fort effet de site caractérisé par des fréquences de résonance allant de 1,2 à 2,6 Hz. Les points H/V 1 à 4 sont situés dans la zone centre et Est et présente des résonances dans la gamme 1,2-1,6 Hz. Les points 5 à 10 sont situés dans la zone Ouest et les résonances sont comprises entre 2 et 2,6 Hz environ.

Les profils SASW ont été interprétés en termes de profils de vitesse d'ondes de cisaillement (Vs). Ces profils, qui sont représentés en Annexe 2, présentent une profondeur d'investigation comprise entre 20 et 35 mètres suivant les profils. On distingue 2 types de profils :

- Le profil 1 (Kasa 1) situé le plus à l'Ouest, où l'on observe un gradient de vitesses atteignant 400m/s à 20m de profondeur.
- Les profils 2 et 3 (Kasa 2 et 3), où l'on observe des vitesses très lentes en surfaces (entre 100 et 150m/s) qui s'améliorent légèrement à partir de 15 m de profondeur sur le profil 2 et 22 m sur le profil 3 avec des vitesses atteignant 200 à 300 m/s.

7.1.6. Essais en laboratoire

Des essais en laboratoire ont été réalisés sur des échantillons prélevés lors de la campagne SEGC de 2011.

13 échantillons ont été prélevés et les analyses ont porté sur la granulométrie, la sédimentologie, la teneur en eau naturelle et les limites d'Atterberg.

Ces différentes mesures ont été effectuées sur les 3 couches lithologiques observées et permettent une première identification sommaire des matériaux présents sur le site. Les

résultats détaillés de ces essais sont présentés dans le chapitre concernant la liquéfaction des sols.

7.1.7. Hydrogéologie

Les forages réalisés lors des campagnes SEGC de novembre 2010 et décembre 2011, recoupent la nappe à des profondeurs allant de 2,2 à 6,9m d'Est en Ouest.

Il est précisé dans le rapport SEGC 2012, que les niveaux d'eau recoupés par Sps1 et SPs2 à des profondeurs variant d'Est en Ouest de 3m à 6,5m profondeur/TN correspondent tous deux à la côte +4m NGM.

D'autres sondages réalisés dans le secteur ont permis d'observer différents niveaux de la nappe.

Campagne de sondage	Profondeur de la nappe /TN	Remarques
Février 1991 (forages AEP F1 et F2)	3,1 et 5,2m respectivement	Forages AEP F1 et F2 ; F2 (situé à proximité de Sps5)
Janvier 2009	entre 0 et 1,6m	Collège modulaire de Kawéni II, situé au Nord Est de la zone d'étude
Février 2009	entre 0 et 1,3m	Bassin de rétention KW9, situé au Sud-Ouest et centre de la zone d'étude

Tableau 41 - Niveau de nappe observés sur différents secteurs et prédiode (données issues rapport SEGC 2010)

Il est à noter que le niveau de la nappe est susceptible de fluctuer considérablement en fonction de la saison des pluies.

Par ailleurs, il est possible que les niveaux d'eau observés n'appartiennent pas à la même nappe d'eau : des niveaux d'eau plus superficiels ont été observés au centre et Est de la zone d'étude et des niveaux d'eau plus profonds (Ouest de la zone d'étude).

2. ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS

Au niveau du site, les colonnes de sol décrites ci-dessous ont été établies à partir des résultats des différentes investigations sur site. En particulier les épaisseurs ont été principalement ajustées avec les profils SASW (notamment pour les alluvions vasardes où une épaisseur de 20 m a été retenue).

On distingue 2 zones correspondant à 2 colonnes de sol ; ces zones sont représentées sur la Figure 23. Sans essais de laboratoire disponibles apportant cette information, les valeurs de la masse volumique (γ) ont été définies théoriquement, à partir de valeurs de bibliographie.

Formation	Epaisseur colonne (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\frac{\gamma}{(kN/m^3)}$
Alluvions fines	5	150	280	18
Altérites	12	250	470	19
Altérites	15	400	750	20
Substratum	Infini	800	1500	22

Tableau 42 - Colonne de sols 1 retenue pour la zone Ouest de la zone d'étude

Formation	Epaisseur colonne (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	γ (kN/m³)
Alluvions fines	3	150	280	18
Alluvions vasardes	20	125	235	16
Altérites	15	250	470	19
Substratum	Infini	800	1500	22

Tableau 43 - Colonne de sols 2 retenue pour la zone centre et Est de la zone d'étude

Les réponses des colonnes de sol proposées ont été testées sous sollicitation d'un bruit de fond sismique à l'aide du logiciel Cyberquake[®]. Pour la colonne de sol 1 (zone Ouest), on obtient un pic net entre 2,5 et 3 Hz, ce qui est cohérent avec les pics observés pour les H/V points 5 à 10 (2-2,6 Hz). Pour la colonne de sol 2 (zone centre et Est), on obtient un pic net entre 1 et 1,5 Hz, ce qui est cohérent avec les pics observés pour les H/V points 1 à 4 (1,2-1,6 Hz).

3. SPECTRES DE REPONSE POUR LE DIMENSIONNEMENT

La classe de sol au sens de la réglementation est estimée pour ces deux colonnes de sol caractéristiques (voir Tableau 1). Pour cela, la vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres (Vs,30) est estimée à partir des épaisseurs et des vitesses des ondes proposées respectivement pour chacune des deux colonnes.

Pour la colonne 1 représentative de la zone Ouest la Vs,30 est estimée à 264 m.s⁻¹. Pour la colonne 2 représentative de la zone centre-Est la Vs,30 est estimée à 144 m.s⁻¹. Selon les Eurocode 8, cela correspond à des sols de classe C pour la colonne 1 et D pour la colonne 2 (voir Tableau 1).

Les spectres de réponse proposés pour le dimensionnement d'un établissement scolaire sur ce site de Kawéni sont donc les spectres définis dans la réglementation pour une classe de sol C pour la zone 1 (Ouest) et pour une classe de sol D pour la zone 2 (centre et Est) (voir Figure 4). Il conviendra de bien identifier au préalable dans quelle(s) zone(s) du site retenu l'établissement est projeté pour prendre en compte les spectres de dimensionnement correspondants.

Les fichiers définissant les spectres fournis en Annexe 2 de ce rapport pourront être utilisés (fichiers 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol C.xls' pour la zone 1, 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol D.xls' pour la zone 2 et 'Ouvrage_III_sismicité modérée vertical.xls' pour le spectre vertical).

4. ANALYSE DE LA LIQUEFACTION

Pour la définition des termes et de la méthodologie utilisés on se reportera aux paragraphes 5.4.1. et 5.4.2. Les principes d'évaluation de la liquéfaction sont explicités au paragraphe 5.4.5..

7.4.1. Saturation des sols

Durant les reconnaissances, des venues d'eau ont été repérées à des profondeurs variant entre 2,2 m et 6,9 m d'Est en Ouest de la zone d'étude. Le niveau de la nappe semble plus profond sur la partie Ouest de la zone d'étude, pouvant correspondre à deux nappes différentes. Cependant des niveaux d'eau atteignant la surface ont été relevés en 2009 au Nord Est et sud – sud-ouest de la zone d'étude.

En l'absence d'informations complémentaires, on supposera par défaut une saturation proche de 100% de l'ensemble des terrains.

7.4.2. Evaluation pour le site d'étude

i. Susceptibilité qualitative

A partir des résultats d'identification des sols fournis par les essais en laboratoire réalisés durant la campagne 2011 (SEGC, rapport 2012), on vérifie les critères de susceptibilité à la liquéfaction pour les 13 échantillons. L'analyse granulométrique met en évidence des terrains plutôt argileux et plastiques. L'analyse de la susceptibilité à la liquéfaction se fera donc majoritairement suivant les critères des terrains argileux et pour certains échantillons selon les critères sableux.

Compte-tenu des résultats des essais d'identification sur les 13 échantillons prélevés (Tableau 44), nous pouvons considérer que les couches d'alluvions fines et d'altérites sont non susceptibles à la liquéfaction.

En effet, sur les 3 échantillons d'alluvions fines prélevés:

- 2 échantillons vérifient les critères d'exclusion.
- 1 échantillon ne vérifie qu'un critère sur 4 d'inclusion.

De même les échantillons prélevés sur la couche d'altérites (4 échantillons) :

- 2 échantillons vérifient les critères d'exclusions,
- 2 échantillons ne vérifient aucun ou seulement 1 seul des 4 critères d'inclusion.

Concernant **l'horizon d'argiles vasardes**, sur les 6 échantillons prélevés dans cette formation :

- 4 échantillons au comportement plutôt argileux sont non susceptibles à la liquéfaction (2 échantillons vérifient les critères d'exclusion et les 2 autres ne vérifient aucun des critères d'inclusion),
- 2 échantillons au comportement plutôt sableux, s'avèrent présenter une susceptibilité à la liquéfaction en vérifiant 2 à 3 des critères d'inclusion à la susceptibilité.

Ainsi, le risque de liquéfaction ne pouvant être écarté sur cette dernière formation, une analyse quantitative de la liquéfaction doit être réalisée.

	ECHANTILLO	N					RESU	JLTATS ES	SAIS LAE	BORATOI	RES		_	ES CRITERES LUSION	ARGILES : ANALYSE SELON CRITERES D'INCLUSION		SABLES, SABLES VASARDS ET SILTS : ANALYSE SELON CRITERES D'INCLUSION							
sondage	profondeur (m)	horizon lithologique	Prof.eau	comportement type matériau	teneur en eau naturelle(%	limite de liquidité(%)	Indice de plasticité(%)	granulo : D10 (mm)	granulo : D15 (mm)	granulo : D50 (mm)	granulo : D60 (mm)	granulo : D70 (mm)	D10 > 2mm	D70<74µ et lp > 10%	D15>0,005mm	WL<35%	W>0,9WL	Diagramme Casagrande- au dessu de la ligne A	BILAN TOTAL (%)	Sr vois in de 100%	Coefficient d'uniformité Cu=(D60/D15)<15	0,05mm <d50<1,5mm< td=""><td>σ'v <0,20MPa en zone l</td><td>BILAN TOTAL (%)</td></d50<1,5mm<>	σ'v <0,20MPa en zone l	BILAN TOTAL (%)
SP1	0 à 3	alluvions fines	0	argile	30.6	64	30.5		< 0.0009			0.05		oui					non susceptible					
SP1	3 à 6	alluvions fines	0	argile	40	77	42.2		< 0.0009			0.0037		oui					non susceptible					
SP1	6 à 9	alluvions vasardes	0	argile	51.7	63	30.1		< 0.0009			0.1		non	non	non	non	non	non susceptible					
SP1	9 à 12	alluvions vasardes	0	sable, sable vasard, silt	57.9			<0.001		0.015	0.2		non							oui	non	non	oui	50%
SP1	12 à 15	altérites	0	argile	50.2		35.7		<0.001			0.043		oui					non susceptible					
SP1	15 à 18	altérites	0	argile	74.7	94	27.4		< 0.0009			0.0308		oui					non susceptible					
SP1	18 à 20	altérites	0	argile	76.2	86	8.7		< 0.0009			0.0138		non	non	non	non	non	non susceptible					
SP2	0 à 3	alluvions fines	0	argile	50.6	74	47.1		<0.0008			0.2		non	non	non	non	oui	25%					
SP2	3 à 6	alluvions vasardes	0	sable, sable vasard, silt	51.7			<0.0009		0.3	0.4		non							oui	non	oui	oui	75%
SP2	6 à 9	alluvions vasardes	0	argile	55.3	68	30.7		< 0.0012			0.08		non	non	non	non	non	non susceptible					
SP2	9 à 12	alluvions vasardes	0	argile	48.1	65	29.7		<0.0011			0.0011		oui					non susceptible					
SP2	12 à 15	alluvions vasardes	0	argile	46.4	59	26.3		< 0.0012			0.019		oui				•	non susceptible					
SP2	15 à 15,5	altérites	0	argile	54.1	57	24.8		< 0.0009			0.0312		oui	non	non	oui	non	25%					

Tableau 44 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction sur les 13 échantillons de sols prélevés (campagne SEGC 2011)

ii. Susceptibilité quantitative

Seul l'horizon d'argiles vasardes présentant une susceptibilité à la liquéfaction, sera étudié ci-après.

La magnitude de séisme de référence retenue est M = 5,5 et l'accélération maximale sur site retenue pour le calcul est de 2,112 m/s², conforme à la classe de sol évaluée au droit du site précédemment.

Au droit du sondage SP1, l'échantillon présentant une susceptibilité à la liquéfaction a été prélevé à une profondeur allant de 9 à 12m et identifié comme de l'argile vasarde. Selon la coupe lithologique du pressiomètre SP1, les terrains traversés à cette profondeur sont des altérites. Etant donné l'incertitude liée à la nature et profondeur exacte de prélèvement de l'échantillon pris par cutting, on évaluera la liquéfaction sur l'ensemble de la couche d'alluvions vasardes et sur toute l'épaisseur de sol identifiée comme potentiellement susceptible à la liquéfaction. L'ensemble des résultats sont présentés dans le Tableau 45.

Les tranches de sols comprises entre 4 et 6m et 8 à 12m, présentent des nombres de coups $(N1)_{60cs}$ supérieurs à 30, signifiant que le sol n'est pas liquéfiable (Youd *et al.* 2001). De plus, la tranche de 6 à 8m présente un facteur de sécurité supérieur à 1, ce qui conduit à un calcul d'intensité I_1 égal à 0 pour cette tranche, donc non liquéfiable.

Au droit du sondage SP2, l'échantillon présentant une susceptibilité à la liquéfaction a été prélevé à une profondeur de 3 à 6m sur un horizon d'alluvions vasardes. La liquéfaction sera évaluée sur l'ensemble de cette formation. L'ensemble des résultats sont présentés dans le tableau 6.

L'analyse de la liquéfaction au droit de SP2, montre des facteurs de sécurité inférieurs à 1 à des profondeurs situées entre 4 et 8m et entre 12 et 14m de profondeur. Toutefois, les facteurs de sécurité restent très proches de 1 et présentent un indice de liquéfaction proche de 0 aux profondeurs situées entre 6 et 8m et 12 et 14m.

L'indice global de liquéfaction est égal à 2,5. Etant inférieur à 5, la liquéfaction est qualifiée de peu probable.

Profondeur N					KN/m³) γ'(KN/m³)	σ _{ν0} (KPa)	σ' _{v0} (KPa)	calcul de (τ/σ' _ν) _s			calcul de (τ/σ' _ν) _ι						Facteur de sécurité
		Moyenne	Horizon	γ (KN/m³)				a _{max}	r _d	(τ/σ' _ν) _s	pl (MD=)	N _{équ.}	CN	(N1) ₆₀	(N1) _{60CS}	(τ/σ' _ν) _ι	
											(MPa)	•				(M7,5)	FS
4 -	- 6 m	5	alluvions vasardes	16	6	88	38	2.112	0.9618	0.312	1.18	24	1.6222	38	51	non liq	-
6 -	- 8 m	7	alluvions vasardes	16	6	120	50	2.112	0.9465	0.318	0.34	7	1.4142	10	17	0.176	1.224
8 -	- 10 m	9	altérites	19	9	155	65	2.112	0.9312	0.311	1.14	23	1.2403	28	39	non liq	-
10 -	- 12 m	11	altérites	19	9	193	83	2.112	0.8803	0.286	1.45	29	1.0976	32	43	non liq	-

Tableau 45 - Evaluation de la liquéfaction au droit du sondage SP1

							calcul de (τ/σ' _v) _s					calcul de	e (τ/σ' _ν) _ι			Facteur de sécurité	Indice global de liquéfaction IL	
Profondeur	Moyenne	Horizon	γ (KN/m³)	γ'(KN/m³)	σ _{v0} (KPa)	σ' _{v0} (KPa)	a _{max}	r _d	(τ/σ' _ν) _s	pl (MPa)	N _{équ.}	CN	(N1) ₆₀	(N1) _{60CS}	(τ/σ' _ν) _ι (Μ7,5)			
															, , ,	FS	FL	IL
2 - 4 m	3	alluvions fines	18	8	54	24	2.112	0.9771	0.308	0.25	5	1.7000	9	15	0.162	1.165	0.0000	0.0000
4 - 6 m	5	alluvions vasardes	16	6	88	38	2.112	0.9618	0.312	0.11	2	1.6222	4	9	0.107	0.758	0.2419	1.6931
6 - 8 m	7	alluvions vasardes	16	6	120	50	2.112	0.9465	0.318	0.21	4	1.4142	6	12	0.132	0.921	0.0791	0.4749
8 - 10 m	9	alluvions vasardes	16	6	152	62	2.112	0.9312	0.319	0.54	11	1.2700	14	21	0.234	1.623	0.0000	0.0000
10 - 12 m	11	alluvions vasardes	16	6	184	74	2.112	0.8803	0.306	0.28	6	1.1625	7	13	0.139	1.002	0.0000	0.0000
12 - 14 m	13	alluvions vasardes	16	6	216	86	2.112	0.8269	0.291	0.21	4	1.0783	5	10	0.117	0.890	0.1100	0.3299
14 - 16 m	15	altérites	19	9	251	101	2.112	0.7735	0.269	1.89	38	0.9950	38	50	non liq	_	_	_

Tableau 46 - Evaluation de la liquéfaction au droit du sondage SP2

iii. Conclusion

A partir des échantillons prélevés, il s'est avéré que 2 échantillons sur 13, prélevés à des profondeurs allant de 9 à 12 m (SP1) et 3 à 6 m (SP2) au sein de terrain caractérisés comme des alluvions vasardes, présentent une susceptibilité à la liquéfaction.

L'évaluation de la liquéfaction au droit des sondages pressiométriques SP1 et SP2 a mis en évidence que la formation d'alluvions vasardes pouvait présenter un risque de liquéfaction, qualifié toutefois de peu probable et particulièrement sur l'horizon de sol situé entre 3 et 6 m au droit de SP2, où le coefficient de sécurité est le plus faible.

Ainsi, une attention particulière face au risque liquéfaction devra être portée sur l'ensemble du site comportant cette couche d'alluvions vasardes.

8. Site du futur collège de Majicavo-Lamir

1. SYNTHESE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU SITE DE MAJICAVO

8.1.1. Documents de référence

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

- le rapport SEGC intitulé « Construction du collège de Majicavo Lamir Étude de faisabilité géotechnique. Missions de type G11+G12 phase 1 », datant de décembre 2010, dossier n° 1723,
- le rapport BRGM intitulé « Evaluation de l'aléa sismique sur le site de l'extension de la maison d'arrêt de Majicavo-Lamir (Mayotte)», datant de janvier 2010, rapport BRGM/RP-58025-FR,
- les résultats de la campagne géophysique réalisée par le BRGM dans le cadre de cette étude,
- la carte géologique de Mayotte à 1/50 000 (Stieltjes, 1988).

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

8.1.2. Données disponibles

Les données suivantes sont à notre disposition à travers les différents documents cités ci-dessus :

- Etude SEGC n° 1723 (Figure 24):
 - 5 sondages pressiométriques (SPs1 à SPs5), de 6 à 7,5 mètres de profondeur.
- Campagne géophysique du BRGM (Figure 25) :
 - o 9 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »),
 - o 3 profils de sismigue SASW.

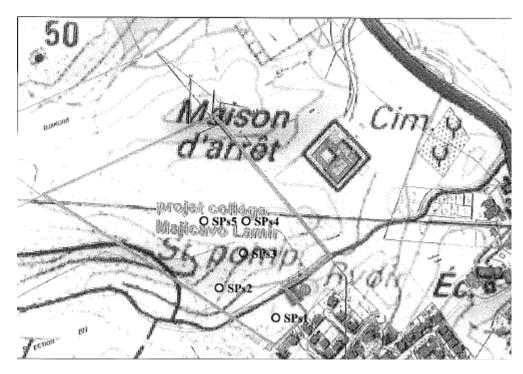


Figure 24 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2010 (extrait du rapport SEGC n°1723, décembre 2010)

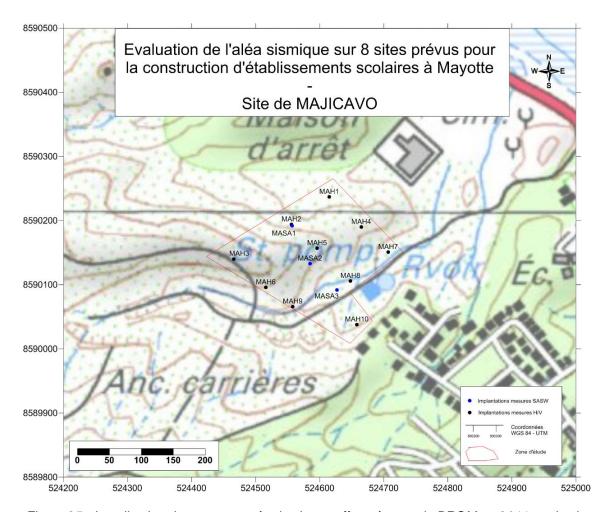


Figure 25 - Localisation des mesures géophysiques effectuées par le BRGM en 2011 sur le site de Majicavo

8.1.3. Analyse des données

i. Géologie

D'après la carte géologique, le site semble se situer sur des terrains du Pléistocène de type anneaux de pyroclastites trachytiques (ash-ring) de Kawéni, ou coulées associées.

Les différents forages montrent un faciès de type altéritique ou cendres volcaniques avec des limons à éléments volcaniques sains et altérés. D'après le rapport du dossier SEGC n° 1723, les cendres volcaniques semblent constituer les crêtes du relief.

ii. Géotechnique

Si les différents sondages délimitent les faciès lithologiques des altérites et des cendres volcaniques, ils obtiennent des valeurs similaires de pression limite et de module pressiométrique pour ces deux ensembles.

Les deux sondages rencontrent, sous une couche peu épaisse de terre végétale et/ou de remblais, des **cendres volcaniques** ou des **altérites** au minimum jusqu'à la limite de reconnaissance des sondages, soit 6 à 7,5 mètres de profondeur. Les cendres et les altérites ont une description très proche, à savoir des limons à éléments volcaniques infra-millimétriques à centimétriques sains et altérés. La granulométrie, la plasticité et la compacité des limons (observées lors du forage mais pas mesurées en laboratoire) sont différentes entre les cendres et les altérites. Les altérites sont décrites comme des limons argileux plastiques et les cendres comme des limons légèrement sableux compacts.

Tous les sondages montrent une pression limite entre 0,93 et 2,08 MPa, et un module pressiométrique supérieur à 11,3 MPa.

Ces terrains correspondraient à la zone 2 (zone Sud-Ouest) observée sur le site voisin de la maison d'arrêt de Majicavo-Lamir (rapport BRGM/RP-58025-FR).

Étant donné les sondages effectués sur le site, on peut estimer que la profondeur minimale du substratum est de 6 mètres.

iii. Géophysique

Une campagne de mesures géophysiques a été menée sur le site par le BRGM. Celleci a consisté en la réalisation de 10 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »), et de 4 profils de sismique SASW (cf. Figure 25 pour la localisation des mesures et en Annexe 2 pour les résultats bruts).

Concernant les mesures H/V, la zone d'étude est hétérogène avec :

- soit un effet de site assez peu marqué (sauf pour le point n° 3) caractérisé par des fréquences de résonance allant de 3,2 à 5,4 Hz,
- soit une absence d'effet de site (HV n°4, 7, 8 et peut-être 9).

Les profils SASW ont été interprétés en termes de profils de vitesse d'ondes de cisaillement (Vs).

Tous les profils montrent un palier de Vs à 300 m/s jusqu'à 6 à 8 m de profondeur. Ensuite, une légère augmentation est visible d'environ 400 à 550 m/s jusqu'à 25 à 30 m de profondeur, sauf pour le profil MASA3, pour lequel un des tirs a atteint une valeur supérieur à 800 m/s à environ 25 m de profondeur.

iv. Hydrogéologie

Pendant les sondages effectués par SEGC en 2010 (dossier n° 1723), aucune venue d'eau n'a été constatée jusqu'à 7,5 m de profondeur. La ravine au Sud de la parcelle était sèche.

Toutefois, plusieurs relevés indiquent une présence d'eau à proximité de la parcelle. Premièrement, une zone humide avait été observée vers le réservoir sur la parcelle voisine au cours de l'étude du dossier SEGC n° 1723. Deuxièmement, des nappes d'eau sub-affleurantes avaient été observées à l'Est de la maison d'arrêt et du terrain de football par des études précédentes (dossiers SEGC n° 268 de septembre 2002 et n° 294 de janvier 2003, tous deux mentionnés dans le dossier n° 1723 mais non consultés pendant la présente étude).

2. ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS

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 entre 3,2 et 5,4 Hz). Les épaisseurs des couches sédimentaires sont par ailleurs conformes à ce qui avait été estimé pour la prison de Majicavo, située proche du site d'étude (Rey et al., 2010).

Formation	Epaisseur colonne (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	(kN/m^3)
Argilites ou cendres	7 m	200	F60	18
volcaniques	7 m	300	560	10
Argilites ou cendres	15 m	500	935	19
volcaniques	13111	300	333	13
Substratum	Infini	800	1500	22

Tableau 47 - Colonne de sols retenue pour le site

Cette colonne présente une fréquence de résonance théorique estimée sous sollicitation de bruit de fond sismique avec le logiciel Cyberquake[®] entre 5,5 et 6 Hz. C'est assez cohérent avec les mesures H/V des points 4 à 6, représentatifs de la zone.

3. 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 (Vs,30) est estimée à partir des épaisseurs et des vitesses des ondes proposées respectivement pour cette colonne.

Pour cette colonne représentative la Vs,30 est estimée à 474 m.s⁻¹. Selon les Eurocode 8, cela correspond à des sols de classe B (voir Tableau 1).

Ainsi, les spectres de réponse proposés pour le dimensionnement d'un établissement scolaire sur ce site de Majicavo-Lamir sont donc les **spectres définis dans la réglementation pour cette classe de sol B** (voir Figure 4).

Les fichiers définissant les spectres fournis en Annexe 2 de ce rapport pourront être utilisés (fichiers 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol B.xls' et 'Ouvrage_III_sismicité modérée_vertical.xls').

9. Site du futur collège de Barakani (Ouangani)

1. SYNTHESE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE SUR LE SITE DE OUANGANI

9.1.1. Documents de référence

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

- le rapport SEGC intitulé « construction d'un collège à Ouangani reconnaissance géotechnique mission de type G0+G11 », datant de juillet 2010, référence SEGC MAYOTTE/T.R./1632/2010,
- les résultats de la campagne géophysique réalisée par le BRGM dans le cadre de cette étude,
- la carte géologique de Mayotte à 1/50 000 (Stieltjes, 1988).

9.1.2. Données disponibles

Les données suivantes sont à notre disposition à travers les différents documents cités ci-dessus :

- Etude SEGC (Figure 27 et Figure 28) :
 - 10 sondages au pénétromètre dynamique (SP)
 - o 7 sondages à la tarière manuelle,
 - 1 prélèvement d'échantillon pour une analyse GTR.
- Campagne géophysique du BRGM (Figure 29) :
 - o 10 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »),
 - 3 profils de sismique SASW.

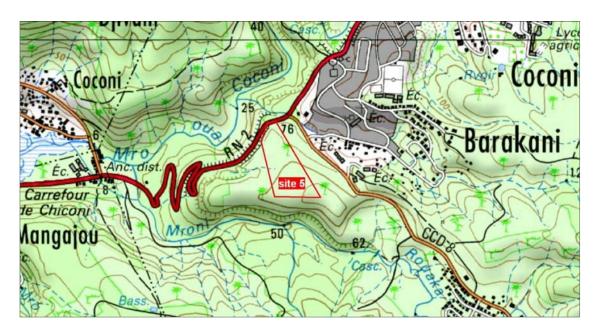


Figure 26 - Localisation de la zone d'étude de Ouangani

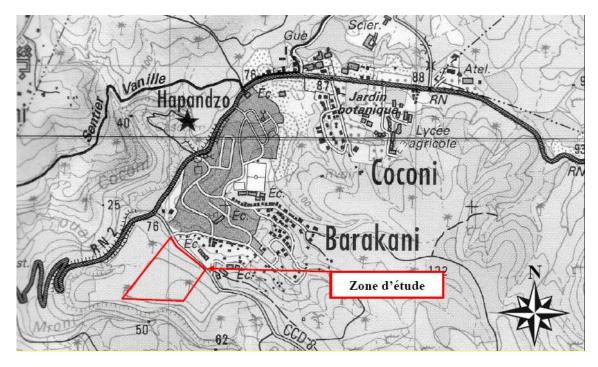


Figure 27 - Localisation de la zone d'étude menée par SEGC en 2010 (extrait extrait rapport SEGC, juillet 2010)

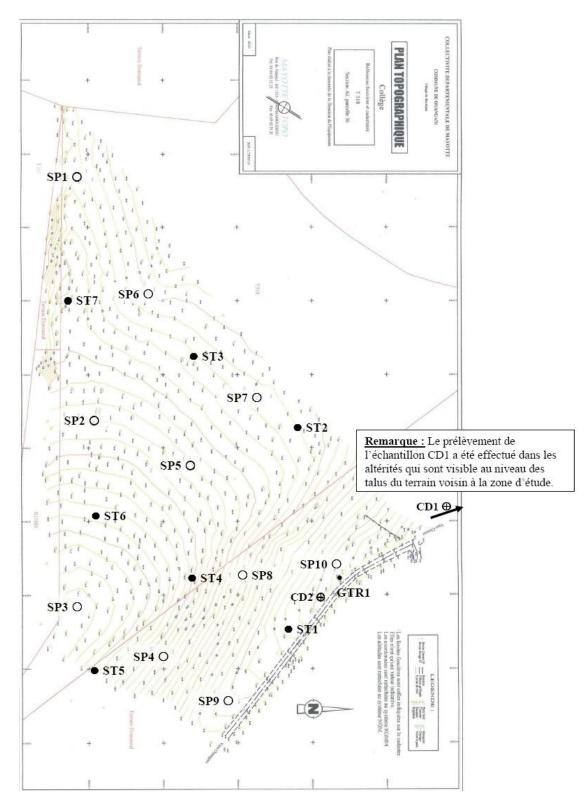


Figure 28 - Implantation des sondages de la campagne SEGC de 2010 (rapport SEGC, janvier 2010)

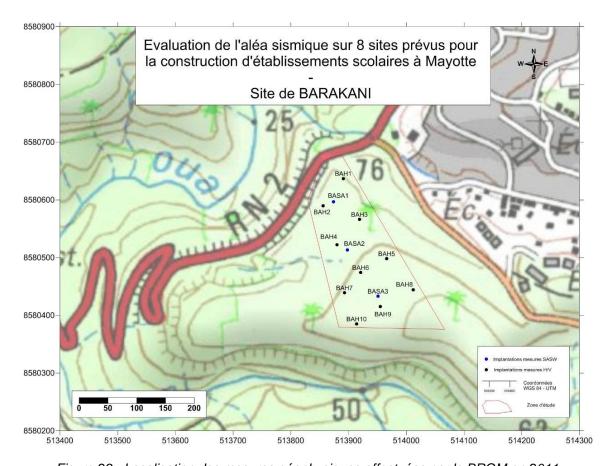


Figure 29 - Localisation des mesures géophysiques effectuées par le BRGM en 2011

9.1.3. Analyse des données

i. Géologie

D'après les cartes morpho-pédologique et géologique de l'Île de Mayotte au 1/50 000ème, la zone s'insère dans l'unité morpho-pédologique de type volcanisme moyen planèzes à plateaux plus ou moins allongés en « lanières ».

Les matériaux rencontrés définissent des cendres « récentes » sur un sol ferralitique «moyen » en place sur le volcanisme moyen. Ces matériaux peuvent surmonter ou être issus des basaltes, basaltes à néphéline, néphélinites, altérés, formant la base du bouclier méridional, d'âge Mio-Pliocène (4,0 à 8,0 Ma) (Figure 30).



Figure 30 - Extrait de la carte géologique au 1/50 000^{ième} de Mayotte (Stieltjes, 1988)

ii. Géotechnique

La campagne géotechnique menée par SEGC en juillet 2010 à consister à réaliser 7 sondages à la tarière manuelle menés jusqu'à 2 m de profondeur et 10 sondages au pénétromètre dynamique menés au maximum jusqu'à 4 m de profondeur, correspondant au refus de l'appareil du à la forte compacité des matériaux.

Ces sondages ont permis de recouper sous une terre végétale superficielle (environ 0,2 m d'épaisseur), des **cendres volcaniques** caractérisées comme des limons fortement compacts, bruns clair, à éléments volcaniques polygéniques altérés de taille infra-millimétrique. L'épaisseur de cet horizon est minimum de 4 m.

Les résistances à la pénétration Rd des terrains est comprise entre 3,1 MPa et 11,4 MPa à partir d'au moins 1 m de profondeur.

Il est a pu être observé sur les talus de terrain avoisinant depuis la RN2 **des altérites**, dont l'épaisseur au droit de la zone d'étude est évaluée à minima à 2-2,5 m.

iii. Géophysique

Une campagne de mesures géophysiques a été menée sur le site par le BRGM en 2011. Celle-ci a consisté en la réalisation de 10 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »), et de 3 profils de sismique SASW (cf. Figure 29 pour la localisation des mesures et en Annexe 2 pour les résultats bruts).

Les mesures H/V mettent en évidence des fréquences de résonance très homogènes avec 2 pics nets : le plus fort autour de 3-4 Hz, l'autre autour de 1,2 Hz.

Les profils SASW ont été interprétés en termes de profils de vitesse d'ondes de cisaillement (Vs).

Les 3 profils MASW sont très homogènes avec une vitesse Vs0 de l'ordre de 300 m/s, suivi par une inversion de vitesse sur 5 à 10 m d'épaisseur et Vs = 200-250 m/s puis une augmentation de la vitesse Vs autour de 350 m/s en profondeur.

iv. Essais en laboratoire

Un essai laboratoire a été réalisé dans le cadre de l'étude géotechnique menée par SEGC en 2010.

Un essai d'identification a été réalisé sur un échantillon de cendres volcaniques.

Passant à 80µm	Passant à 2mm	Diamètre maximale Dmax	Teneur en eau naturelle Wn	OPN (%)	Valeur au bleu VBS	Classification NFP 11 300
92,4%	98,1%	16mm	34,8%	30,6%	0,66%	A1 h

Tableau 48 - Résultats de l'essai ld'identification réalisé sur un échantillon de cendres volcaniques prélevé sur la zone d'étude (rapport SEGC, 2010)

v. Hydrogéologie

Lors de la campagne d'essais géotechniques menés jusqu'à 4 m de profondeur par SEGC en 2010, aucune nappe d'eau n'a été observée.

2. ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS

La colonne de sol a été établie à partir des résultats des investigations réalisées au droit du site par SEGC en 2010 et campagne géophysique du BRGM en 2011.

Formation	Epaisseur colonne (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	γ (kN/m³)
Cendres volcaniques compactes	5m	300	560	18
Altérites	5m	225	420	18
Altérites	25m	350	655	19
Altérites	50m	420	785	20
Basalte sain (substratum)	infini	800	1500	22

Tableau 49 - Colonne de sols retenue pour le site de Ouangani

Les H/V donnent deux pics très nets à 1,2 Hz et 3-4 Hz. Les fréquences de résonances sous sollicitation de bruit de fond sismique simulées par Cyberquake[®] pour cette colonne de sol sont très similaires (deux pics identiques le premier vers 1,2 Hz et le second entre 3 et 3,5 Hz). En l'absence d'autres informations, la profondeur de l'interface avec le substratum est choisie uniquement en raison de cette cohérence avec les mesures H/V.

1. 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 (Vs,30) est estimée à partir des épaisseurs et des vitesses des ondes proposées respectivement pour cette colonne.

Pour cette colonne représentative la Vs,30 est estimée à 312 m.s⁻¹. Selon les Eurocode 8, cela correspond à des sols de classe C (voir Tableau 1).

Ainsi, les spectres de réponse proposés pour le dimensionnement d'un établissement scolaire sur ce site de Ouangani à Barakani sont donc les **spectres définis dans la réglementation pour cette classe de sol C** (voir Figure 4).

Les fichiers définissant les spectres fournis en Annexe 2 de ce rapport pourront être utilisés (fichiers 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol C.xls' et 'Ouvrage_III_sismicité modérée_vertical.xls').

10. Site de la future université de Dembéni

1. SYNTHESE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU SITE DE DEMBENI

10.1.1. Documents de référence

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

- le rapport SEGC intitulé « construction d'équipement scolaires du second degré site de l'université de Dembéni, réalisation de sondages et d'essais et étude de faisabilité géotechnique missions de type G0 et G11+G12 » datant de mars 2012, référence SEGC MAYOTTE/A.A./1871/2012,
- les données de SEGC, datant de novembre 2006, dossier n°945 « Pylône Orange de Dembéni » : 4 sondages pénétrométriques et un sondage pressiométrique,
- le rapport BRGM intitulé « Etude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques sur le site de l'IFM de Dembéni (Mayotte) », d'octobre 2006, référence BRGM RP 54 960- FR,
- les résultats de la campagne géophysique réalisée par le BRGM dans le cadre de cette étude.
- la carte géologique de Mayotte à 1/50 000 (Stieltjes, 1988).

10.1.2. Données disponibles

Les données suivantes sont à notre disposition à travers les différents documents cités cidessus :

- Etude SEGC de mars 2012 (Figure 32) :
 - 2 sondages à la tarière mécanique pour 10 essais pressiométriques (SPs)
 - 2 sondages à la tarière manuelle (ST) (tarière manuelle- diamètre 150 mm)
 - 18 sondages au pénétromètre dynamique (SP)
 - 3 sondages à la tarière hélicoîdale de 4,5 m à 8,5 m de profondeur pour le prélèvement de 7 échantillons
 - Essais laboratoires sur chacun des échantillons prélevés à la tarière : teneur en eau naturelle, analyse granulométrique, limites d'Atterberg, analyse granulométrique par sédimentation.
- Etude SEGC de novembre 2006 (pas de plan de localisation des sondages fourni) :
 - o 2 sondages pénétrométriques menés de 3 à 6 m de profondeur

- 1 sondage pressiométrique de 7,5m
- Rapport BRGM d'octobre 2006 (Figure 33) :
 - o 2 sondages pressiométriques de 20m
 - Essais laboratoires sur échantillons prélevés à la tarière : teneur en eau et limites d'Atterberg
 - 7 points de mesure H/V.
- Campagne géophysique du BRGM réalisée en 2011 (Figure 34) :
 - 15 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »),
 - 5 profils de sismique SASW.

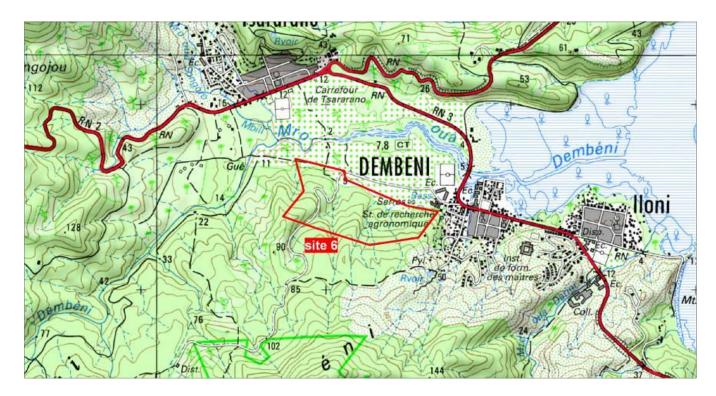


Figure 31 - Localisation de la zone d'étude de Dembéni

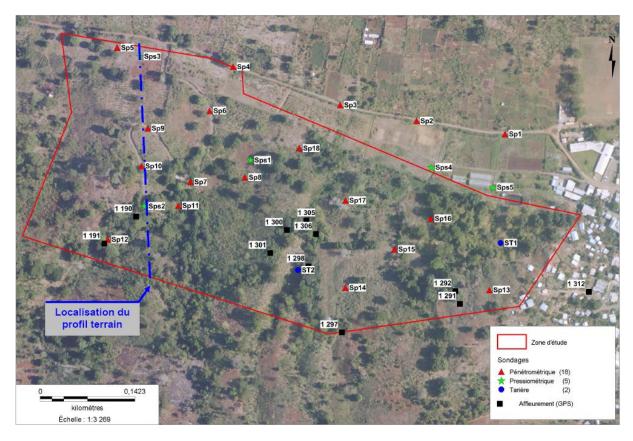


Figure 32 - Implantation des reconnaissances de la campagne SEGC de 2012 (extrait du rapport SEGC, mars 2012)

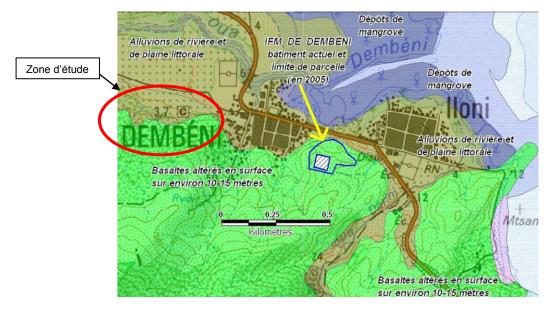


Figure 33 - Localisation du site de l'IFM situé à l'Est de la zone d'étude (extrait rapport BRGM 54960, 2006)

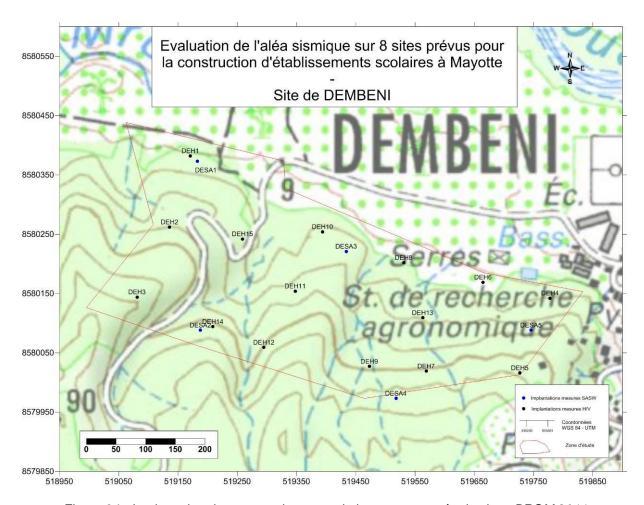


Figure 34 - Implantation des reconnaissances de la campagne géophysique BRGM 2011

10.1.3. Analyse des données

i. Géologie

D'après les cartes morpho-pédologique et géologique de Mayotte au 1/50 000^{ième}, la zone d'étude s'insère dans trois unités morpho-pédologique :

- Zone amont (partie sud): formation volcanique de basaltes ankaramitiques souvent altérés en boule, formant l'ossature du relief, coulée de fond de vallée en inversion de relief (Mio-Pléistocène).
 - On y retrouve ainsi la présence d'une couche de colluvions de surface (matrice limoneuse ferralitique et blocs sains de taille variable). Des seuils rocheux peuvent localement apparaître. Sous ces matériaux, on peut observer un matériau intermédiaire, l'altérite, pouvant présenter des fortes épaisseurs avant d'atteindre la roche mère.
- Zone centrale: formations de rivière. On y retrouve des alluvions et petites accumulations de déjection (blocs, limons, argiles, accumulations détritiques, souvent ferralitiques). Ces formations correspondent à des glacis d'épandage selon la carte morphopédologique.

- **Zone avale (partie Nord)** : formation sédimentaire : plaine alluviale ou littorale (alluvions fines, généralement limoneuses, souvent ferralitiques).

Il est précisé par ailleurs (rapport SEGC, 2012) que les glacis d'épandage sont des matériaux légèrement plus compacts que les alluvions fines. Ces matériaux s'observent majoritairement en pied de colline.

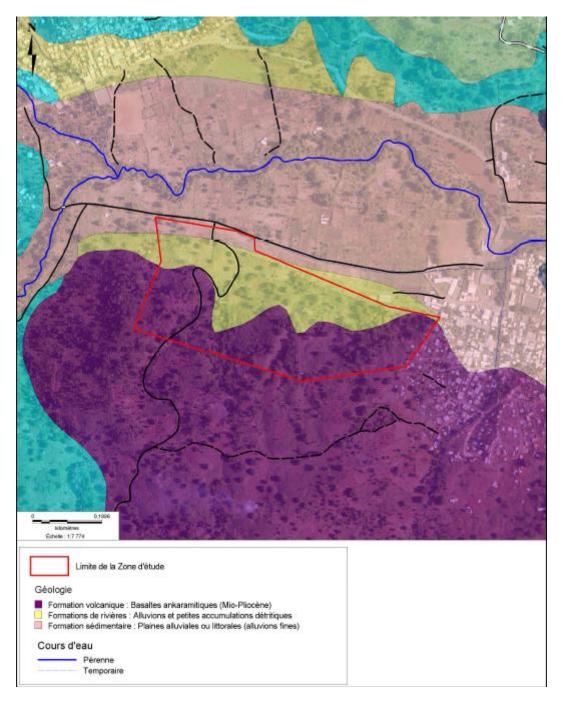


Figure 35 - Carte géologique et morpho-pédologiques du site (extrait rapport SEGC, 2012)

ii. Géotechnique

Les campagnes géotechniques menées par SEGC en 2012 ont permis de recouper les terrains suivants :

Sur la partie amont de la zone d'étude (SPS2 et ST2) :

- **des colluvions**, correspondant à des limons argileux, brun à rougeâtre, moyennement à fortement compacts, à éléments basaltiques sains et altérés de taille pluri-millimétrique à millimétrique.

Ces matériaux recoupés par un seul sondage pressiométrique (SPS2) présentent une caractéristique mécanique moyenne :

- \rightarrow pl = 0,95MPa
- \rightarrow Em = 19,2MPa

L'épaisseur de ces limons est d'au moins 1,3 m.

- **des altérites,** correspondant à des limons fins, brun rougeâtre, moyennement à fortement compacts, à structure minéralogique peu visible.

Ces matériaux présentent des caractéristiques mécaniques moyennes :

- > pl variant entre 0,96 MPa et 1,14 MPa
- > Em variant entre 14,3 MPa et 26,4 MPa

L'épaisseur de ces matériaux est d'au moins 4 mètres.

Sur le site de l'IFM, situé à L'Est de la zone d'étude (rapport BRGM, 2006) sur des formations volcaniques, des altérites qualifiées de compactes ont été recoupées sur 20 m de profondeur (limites d'investigations des forages pressiométriques).

2 horizons se distinguent :

 1 horizon aux caractéristiques mécaniques moyennes avec des épaisseurs variant d'un sondage à l'autre de 10 à 20 m d'épaisseur :

Cet horizon présente des caractéristiques mécaniques similaires aux altérites recoupées au droit du site d'étude.

- 1 horizon aux bonnes caractéristiques mécaniques recoupé sur 10 m d'épaisseur (SP1):
 - 2 MPa < pl < 2,5 MPa et 30 MPa < Em < 100 MPa (augmente avec la profondeur).

Sur la partie centrale et avale de la zone d'étude (SPs1, SPs3, SPs4, SPs5 et ST1) :

 des alluvions fines, correspondant à des limons fins argilo-sableux, brun à brun grisâtre, moyennement à peu compacts, à éléments polygéniques altérés, de taille infra-millimétrique à millimétrique.

Ces matériaux présentent des caractéristiques mécaniques faibles à moyennes :

- > pl variant entre 0,05 et 1,22 MPa
- > Em variant entre 0,3 et 25,9 MPa

Ces matériaux ont été recoupés jusqu'à 7,5 m au droit d'un sondage (SP3).

Des refus sur blocs à 4,5 m (SPs5) et 6 m (SPs4) de profondeur dans cette formation ont entrainé l'arrêt du sondage.

- **des altérites,** correspondant à des matériaux argileux, brun jaune à grisâtre, fortement compacts, à structure minéralogique visible.

Ces matériaux recoupés par un seul essai pressio (SP3) présentent des caractéristiques mécaniques moyennes :

- > pl = 1,66 MPa
- ightharpoonup Em = 25,9 MPa

Le sondage a été arrêté par refus sur bloc.

Ces matériaux semblent également avoir été recoupés sur le site du Pylone Orange de Dembéni (sondages que nous n'avons pu situer en l'absence de plan d'implantation des sondages).

En effet, les alluvions fines (0,07 MPa < pl < 0,78 MPa et 0,9 MPa < Em < 9,3 MPa) et altérites aux caractéristiques mécaniques toutefois un peu plus faibles pour les alluvions, mais similaires pour les altérites (1,39 MPa < pl < 1,65 MPa et 20,9 MPa < Em < 30,8 MPa) ont été respectivement recoupées sur une épaisseur de 5 m et 2,5 m.

Les sondages au pénétromètre dynamique ayant été menés jusqu'à 2 m de profondeur, au droit de la zone d'étude, apportent des informations très limitées sur le sous-sol. On peut toutefois préciser que les résistances dynamiques sont toutes supérieures à 1 MPa dès 0,2 m de profondeur.

La synthèse des investigations géotechniques de 2012 nous ont conduits à établir un zonage géotechnique. Ainsi, nous avons distingué 2 zones (Figure 36) :

- **Zone amont** (caractérisée par les sondages SPs2 et ST2):
 - Des colluvions (recoupés au droit du site sur une épaisseur de 1,3 m)
 - Des altérites (recoupés au droit du site sur une épaisseur de 4 m)
- Zone Centre et aval (caractérisée par les sondages SPs1, SPs3, SPs4, SPs5) :
 - Des alluvions fines (recoupées au droit du site sur une épaisseur de 7,5 m)
 - Des altérites

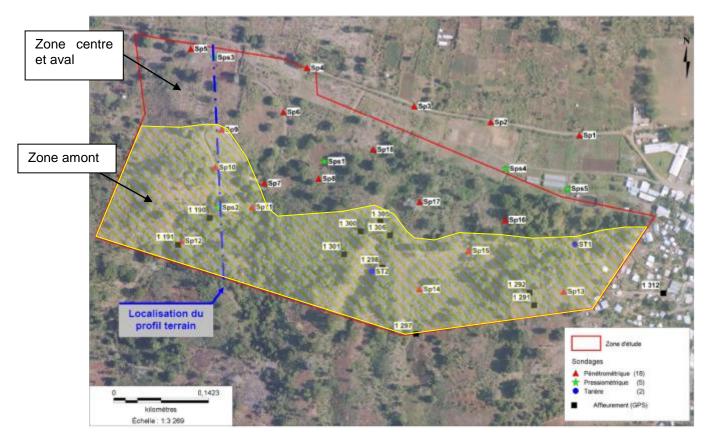


Figure 36 - Proposition de zonage du site de Dembéni

iii. Géophysique

Une campagne de mesures géophysiques a été menée sur le site par le BRGM. Celle-ci a consisté en la réalisation de 15 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V ») mais dont 6 mesures non pas pu être exploitées, et de 5 profils de sismique SASW (voir Figure 34 pour la localisation des mesures et en Annexe 2 pour les résultats bruts).

Les mesures H/V, mettent en évidence un site hétérogène mais présentant des pics marqués avec des fréquences de résonance allant de 3,7 à 7 Hz. Pour les points 2, 3, 5, 7, 9, 11, 12, 14 et éventuellement le point 13, situés dans la zone amont, on observe un pic net autour de 3 à 5 Hz. Pour les points 1, 4, 6, 8, 10, 15 et éventuellement le point 13, situés dans la partie aval, on observe un pic net autour de 5 à 6 Hz.

Les profils SASW ont été interprétés en termes de profils de vitesse d'ondes de cisaillement (Vs). Ces profils, qui sont représentés en Annexe 2 présentent une profondeur d'investigation comprise entre 20 et 35 mètres suivant les profils. On distingue 2 types de profils :

- Les profils 2 et 4 (DESA 2 et 4) situés le plus en amont de la zone d'étude, où l'on observe un gradient de vitesses atteignant respectivement 450 m/s à 550 m/s à 25 m de profondeur.
- Les profils 1, 3 (DESA 1,3), situés les plus en aval de la zone d'étude, et le profil 5 (DESA 5) situé au centre Est de la zone, où l'on observe des vitesses lentes à moyenne en surface (250 m/s sur les profils 1 et 3 et 350 m/s sur le profil 5) sur les 5

premiers mètres, puis une inversion de vitesse sur environ 5 m d'épaisseur, puis une augmentation graduelle de la vitesse Vs avec la profondeur atteignant 500 à 600 m/s à 30 m de profondeur.

Le substratum, dont la vitesse est évaluée à 800 m/s, n'a pas été atteint.

Les mesures H/V effectuées sur le site de l'IFM (rapport BRGM, 2006), situé sur des terrains de basalte altéré, ont permis d'estimer des vitesses d'onde Vs à 250 m/s sur les horizons aux caractéristiques les plus faibles et à 420 m/s sur l'horizon d'altération présentant les meilleures caractéristiques mécaniques.

iv. Essais en laboratoire

Des essais en laboratoire ont été réalisés sur des échantillons prélevés lors de la campagne SEGC de 2012.

7 échantillons ont été prélevés sur les sondages SPs3, SPs4 et SPs5 situés sur la partie aval du site. Les analyses ont porté sur la granulométrie, la sédimentologie, la teneur en eau naturelle et les limites d'Atterberg.

Les résultats détaillés de ces essais sont présentés dans le chapitre concernant la liquéfaction des sols.

v. Hydrogéologie

Les forages réalisés lors des campagnes SEGC début 2012, recoupent la nappe à des profondeurs allant respectivement d'Est en Ouest, de 0,3 m (+8,7 m NGM) au droit de Sps4 à 3 m (+6 m NGM) à l'Ouest.

Cette nappe est en relation avec la nappe d'eau de la plaine alluviale de la rivière pérenne «Mro Oua Dembéni » située au Nord de la zone d'étude.

Il est à noter que le niveau de la nappe est susceptible de fluctuer considérablement en fonction de la saison.

Concernant les zones hautes, elles présenteraient localement des résurgences (nappe perchée), plus marquées en saison de pluies.

2. ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS

Au niveau du site, les colonnes de sol décrites ci-dessous ont été établies à partir des résultats des différentes investigations sur site et en laboratoire.

On distingue 2 zones correspondant à 2 colonnes de sol : la partie amont du site et la partie centrale et aval ; ces zones sont représentées sur la Figure 36. Les masses volumiques (γ) ont été définies de façon théorique. Deux horizons d'alluvions fines ont été distingués pour mettre en évidence la diminution de vitesse visible sur les profils SASW. De même, plusieurs horizons d'altérites ont été distingués pour mettre en évidence les gradients de vitesses visibles sur les profils SASW. Les épaisseurs ont été évaluées en prenant en compte le profil le plus pénalisant (DESA2).

Formation	Epaisseur colonne (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\frac{\gamma}{(kN/m^3)}$
colluvions	2	250	470	17
Altérites	10	250	470	18
Altérites	5	350	655	18
Altérites	10	420	785	18
Altérites	5	500	935	19
Substratum	Infini	800	1500	22

Tableau 50 - Colonne de sols 1 retenue pour la partie amont de la zone d'étude

Formation	Epaisseur colonne (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\frac{\gamma}{(kN/m^3)}$
Alluvions fines	4	280	470	18
Alluvions fines	3	220	415	18
Altérites	5	300	560	18
Altérites	10	520	985	19
Substratum	Infini	800	1500	22

Tableau 51 - Colonne de sols 2 retenue pour la partie centrale et aval de la zone d'étude

La colonne 1 (partie en amont) proposée donne selon les simulations sous sollicitation bruit de fond réalisées avec le logiciel Cyberquake[®] un pic net vers 3-3,5 Hz, ce qui cohérent avec les mesures H/V dans cette zone (pic vers 3-5 Hz).

La colonne 2 (partie centrale et aval) proposée donne selon les simulations sous sollicitation de bruit de fond sismique réalisées avec le logiciel Cyberquake[®] un pic net vers 5 Hz, ce qui est cohérent avec les mesures H/V dans cette zone (pic vers 5-6 Hz).

3. SPECTRES DE REPONSE POUR LE DIMENSIONNEMENT

La classe de sol au sens de la réglementation est estimée pour ces deux colonnes de sol caractéristiques (voir Tableau 1). Pour cela la vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres (Vs,30) est estimée à partir des épaisseurs et des vitesses des ondes proposées respectivement pour chacune des deux colonnes.

Pour la colonne représentative de la zone 1, la Vs,30 est estimée à 326 m.s⁻¹. Pour la colonne représentative de la zone 2 la Vs,30 est estimée à 470 m.s⁻¹. Selon les Eurocode 8, cela correspond respectivement à des sols de classe C pour la zone 1 et des sols de classe B pour la zone 2 (voir Tableau 1).

Les spectres de réponse proposés pour le dimensionnement d'un établissement universitaire sur ce site de Dembéni sont donc les spectres définis dans la réglementation pour une classe de sol C pour la zone 1 et pour une classe de sol B pour la zone 2 (voir Figure 4). Il conviendra de bien identifier au préalable dans quelle(s) zone(s) du site retenu l'établissement est projeté pour prendre en compte les spectres de dimensionnement correspondants.

Les fichiers définissant les spectres fournis en Annexe 2 de ce rapport pourront être utilisés (respectivement fichier 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol C.xls' et 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol B.xls' ainsi que 'Ouvrage_III_sismicité modérée_vertical.xls' pour le spectre vertical).

4. ANALYSE DE LA LIQUEFACTION

Pour la définition des termes et de la méthodologie utilisés on se reportera aux paragraphes 5.4.1. et 5.4.2. Les principes d'évaluation de la liquéfaction sont explicités au paragraphe 5.4.5..

10.4.1. Formations à analyser

Parmi les horizons identifiés dans l'étude, les horizons d'alluvions fines en aval du site où une nappe a été identifiée, doivent faire l'objet d'une analyse vis-à-vis de l'aléa liquéfaction, dans la mesure où leur susceptibilité à la liquéfaction ne peut pas être définie *a priori*.

10.4.2. Saturation des sols

Durant les reconnaissances, des venues d'eau ont été repérées à des profondeurs variant d'Est en Ouest, de 0,3 m au droit de Sps4 à 3 m à l'Ouest.

En l'absence d'informations complémentaires, on supposera par défaut une saturation proche de 100% de l'ensemble des terrains.

10.4.3. Evaluation pour le site d'étude

A partir des résultats succincts d'identification des sols, on vérifie les critères de susceptibilité à la liquéfaction pour les 7 échantillons. L'analyse granulométrique met en évidence des terrains au comportement argileux. L'analyse de la susceptibilité à la liquéfaction se fera suivant les critères des terrains argileux (voir Tableau 52).

Compte-tenu des résultats des essais d'identification sur les 7 échantillons prélevés, nous pouvons considérer que les couches d'alluvions fines et d'altérites sont non susceptibles à la liquéfaction.

En effet, sur les 6 échantillons d'alluvions fines prélevés :

- 5 échantillons vérifient les critères d'exclusion.
- 1 échantillon ne vérifie qu'un critère sur 4 d'inclusion.

De même sur l'échantillon prélevé dans la couche d'altérites, les critères d'exclusion sont vérifiés.

Ainsi, à partir des informations à notre disposition, on vérifie que les échantillons prélevés sur site ne sont pas susceptibles de se liquéfier. De ce fait, il n'est pas utile de réaliser une évaluation quantitative du risque de liquéfaction.

	ECHANTILLO	DN			RESU	LTATS	ESSA	IS LABOR	RATOIRES	ANALYSE DES CRITERES D'EXCLUSION	ARGILI	ES : ANAL	YSE SELON	CRITERES I	D'INCLUSION
sondage	profondeur (m)	horizon lithologique	Prof.eau	comportement type matériau	teneur en eau naturelle(%	limite de liquidité(%)	Indice de plasticité(%)	granulo : D15(mm)	granulo : D70 (mm)	D70<74μ et lp > 10%	D15>0,005mm	WL<35%	W>0,9WL	Diagramme Casagrande- au dessu de la ligne A	BILAN TOTAL (%)
SPs3	0 à 3	alluvions	3	argile	26.8	64	34.3	0.0009	0.5	non	non	non	non	oui	25%
SPs3	3 à 6	alluvions	3	argile	59	75	40.9	0.0012	0.0028	oui					non susceptible
SPs3	6 à 8,5	altérites	3	argile	64.5	70	36.8	0.0012	0.0135	oui					non susceptible
SPs4	0 à 3	alluvions	0	argile	51.2	70	43.1	0.0008	0.0008	oui					non susceptible
SPs4	3 à 6	alluvions	0	argile	66.7	77	42.2	0.0011	0.0028	oui					non susceptible
SPs5	0 à 3	alluvions	0	argile	37.5	65	33.5	0.0011	0.0011	oui					non susceptible
SPs5	3 à 4,5	alluvions	0	argile	37.2	67	34.6	0.0012	0.0096	oui					non susceptible

Tableau 52 - Critères de susceptibilité à la liquéfaction sur les 7 échantillons de sols prélevés (campagne SEGC 2012)

11. Site de l'extension du lycée de Mamoudzou

1. SYNTHESE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE SUR LE SITE DE MAMOUDZOU

11.1.1. Documents de référence

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

- le rapport SEGC intitulé « Extension du lycée de Mamoudzou. Etude de faisabilité géotechnique mission de type G11 », datant de janvier 2011, référence SEGC MAYOTTE/T.R./1733/2010,
- les résultats de la campagne géophysique réalisée par le BRGM dans le cadre de cette étude,
- la carte géologique de Mayotte à 1/50 000 (Stieltjes, 1988),
- Le rapport BRGM intitulé « microzonage sismique de Mamoudzou-centre, Mayotte », datant de décembre 2002, référence BRGM/RP-51839-FR,
- Le rapport BRGM intitulé « Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques sur le site de l'hôpital de Mamoudzou (Mayotte) », de juillet 2005, référence BRGM/RC-53975-FR.

11.1.2. Données disponibles

Les données suivantes sont à notre disposition à travers les différents documents cités ci-dessus :

- Etude SEGC (Figure 38):
 - 2 sondages à la tarière (SPs1 et SPs2), pour 14 essais pressiométriques (tarière mécanique à sec – diamètre 63 mm – Pressiomètre Ménard).
- Campagne géophysique du BRGM (Figure 39) :
 - o 10 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »),
 - o 3 profils de sismigue SASW.

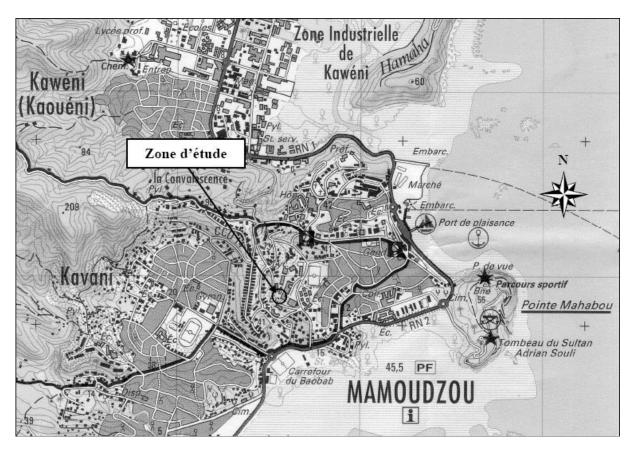


Figure 37 - Localisation zone d'étude (extrait rapport SEGC, janvier 2011)

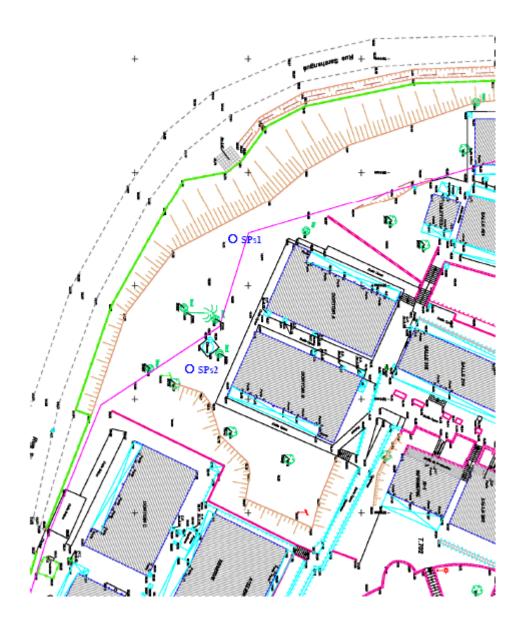


Figure 38 - Implantation des sondages de la campagne SEGC de 2011 (extrait du plan topographique du lycée de Mamoudzou- rapport SEGC, janvier 2011)

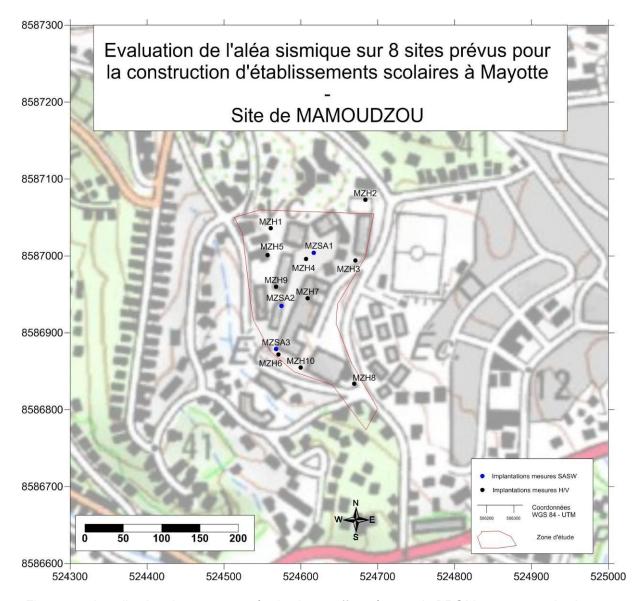


Figure 39 - Localisation des mesures géophysiques effectuées par le BRGM en 2011 sur le site de Mamoudzou

11.1.3. Analyse des données

i. Géologie

D'après la carte géologique au 1/50 000^{ième} (Stieltjes, 1988), le site se situe sur les laves différenciées de fond de vallée du M'tsapéré (1,4 à 1,5 Ma) et massif de Digo, formations volcaniques du Pléistocène (Figure 40).

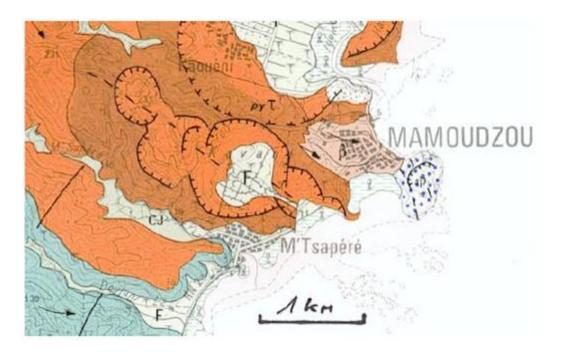


Figure 40 - Extrait de la carte géologique au 1/50 000^{ième} de Mayotte (Stieltjes, 1988)

Les levés géologiques complémentaires réalisés en septembre 2001, par D. Debeuf et P. Bachèlery dans le cadre du projet de microzonage sismique de Mamoudzou – centre (faisant l'objet du rapport BRGM/ RP-51839-FR, déc. 2002) ont permis de préciser la géologie de la zone d'étude (Figure 41 et Figure 42). On y retrouve ainsi :

- Des basaltes peu ou pas altérés correspondant à des coulées de laves anciennes,
- Des argiles rouges correspondant à l'altération climatique et hydrothermale intense de ces coulées de laves anciennes.

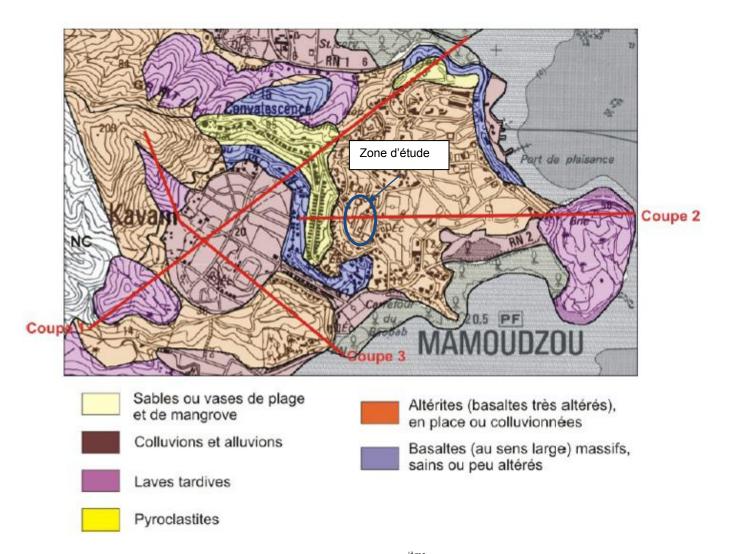


Figure 41 - Cartographie géologique de Mamoudzou au 1/10 000^{jème} (Debeuf et Bachèrel, 2001)

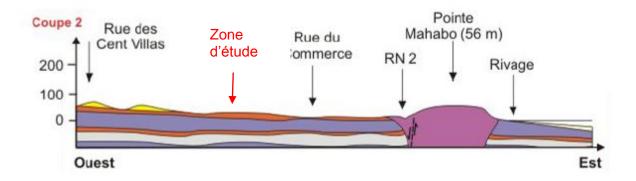


Figure 42 - Coupe géologique issue de la cartographie au 10 000^{ième} de Mamoudzou (Debeuf et Bachèrel, 2001) traversant la zone d'étude

Une carte et des coupes lithologiques ont été établies à partir de la carte géologique au 1/10 000^{ième} et d'observations de terrain, dans le cadre du microzonage sismique de Mamoudzou en 2002, permettant de préciser la nature et épaisseurs des formations superficielles du centre de Mamoudzou (Figure 43 et

Figure 44).

La zone d'étude se situerait ainsi sur des altérites. On retrouverait des argiles d'altération du basalte sur une dizaine de mètres d'épaisseur, qui surmontent une dizaine de mètres de basalte moins altéré reposant sur du basalte sain.

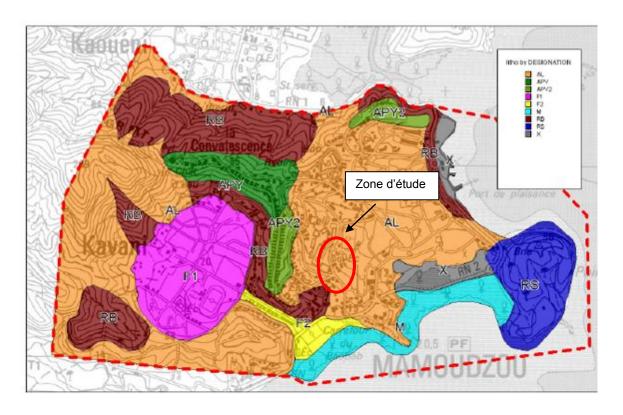


Figure 43 - Carte lithologique de Mamoudzou centre (extrait du rapport BRGM sur le microzonage sismique de Mamoudzou, **Sabourault et al., 2002)**)

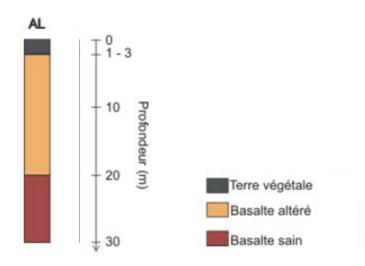


Figure 44 - Coupe lithologique prévisionnelle de la zone d'étude

Le rapport SEGC de 2011 précise que l'on retrouve sur la zone d'étude tout d'abord des altérites ferralitiques tronquées ou des cendres récentes issus du volcanisme ferralitisé, puis les altérites, pouvant présenter des épaisseurs considérables (décamétriques) avant d'atteindre la roche-mère.

ii. Géotechnique

La campagne géotechnique menée par SEGC en janvier 2011 à consister à réaliser 2 sondages à la tarière mécanique menés jusqu'à 7,5 m de profondeur avec des essais pressiométriques tous les mètres, dans le secteur Sud.

Les deux sondages recoupent les terrains suivants :

- Un remblai limoneux de surface dont l'épaisseur varie entre 0,5 et 1 m,
- Des cendres volcaniques ferralitisées, correspondant à un limon fin peu argileux, brun clair, moyennement compact à éléments basaltiques altérés de taille inframillimétrique à millimétrique.

Les caractéristiques mécaniques de ces terrains sont moyennes :

- ➤ Pression limite pl, entre 0,38 et 2,27 MPa. Il est à noter que les valeurs les plus faibles (<1MPa) se situent généralement dans les horizons superficiels.
- Module pressiométrique Em, entre 5,6 et 32 MPa. Il est à noter que les valeurs de Em augmentent globalement avec la profondeur.

Ces terrains sont observés jusqu'à la fin des sondages. Leur épaisseur est donc d'au moins 7 m.

Les sondages effectués n'ont pas permis d'atteindre l'horizon d'altérites ou coulée basaltique altérée.

Les reconnaissances effectuées en 2005 sur l'hôpital situé à quelques centaines de mètres au Nord de la zone d'étude, ont mis en évidence une épaisseur de cendres ferralitiques variant entre 9 et 25m. Leur caractéristiques mécaniques étaient également moyennes avec :

- pl variant entre 0,53MPa et 3,56MPa (généralement situées entre 0,5 et 1,5 MPa)
- Em entre 1MPa et 83,6MPa (généralement situées entre 10 et 20MPa)

Les altérites ont également été recoupées lors de ces investigations de 2005, où leur épaisseur a été estimée entre 10 et 15m.

Les valeurs géotechniques mettaient en évidence un rocher altéré ou fracturé avec :

- > pl variant entre 1,6 et 5,5 MPa
- Em variant entre 28 et 118 MPa

iii. Géophysique

Une campagne de mesures géophysiques a été menée sur le site par le BRGM en 2011. Celle-ci a consisté en la réalisation de 10 points de mesure de bruit de fond sismique (mesures dites « H/V »), et de 3 profils de sismique SASW (cf. Figure 39 pour la localisation des mesures et en Annexe 2 pour les résultats bruts).

Les mesures H/V mettent en évidence un site homogène avec un effet de site caractérisé par des fréquences de résonance allant majoritairement de 2,8 à 3,6 Hz. Il est à rappeler par ailleurs, que les mesures H/V qui ont été effectuées en 2005 sur le site de l'hôpital, sont également très homogènes avec une fréquence de résonance très nette généralement située entre 2 et 3 Hz, correspondant ainsi, pour une vitesse de 250 à 300 m/s, à une profondeur d'interface de l'ordre de 25 à 30 m.

Les profils SASW ont été interprétés en termes de profils de vitesse d'ondes de cisaillement (Vs).

Les 3 profils MASW sont eux-aussi homogènes avec une couche superficielle de 5 m environ de formation très lente (Vs = 150 à 200 m/s) suivie par un gradient de vitesse avec la profondeur et une vitesse atteignant 300 à 400 m/s à 15 m de profondeur.

Les profils de SASW réalisés en 2005 sur le site de l'hôpital de Mamoudzou montrent des vitesses moyennes de Vs de 300m/s dans les cendres volcaniques ferralitisées sur

une épaisseur de 15 m et des vitesses moyennes de 420 m/s pour les altérites. Au droit de notre site d'étude, les vitesses moyennes au sein des altérites variant entre 300 m/s (MZSA3) et 400 m/s (MZSA1 et 2) d'un profil à l'autre, une valeur moyenne de 350 m/s sera retenue au sein de cet horizon.

iv. Essais en laboratoire

Aucun essai laboratoire n'a été réalisé dans le cadre de l'étude géotechnique mené par SEGC en 2011.

Un essai laboratoire a été réalisé sur un échantillon de cendres volcaniques ferralitiques prélevé sur le site de l'hôpital de Mamoudzou (Roullé *et al.*, 2005), fournissant les résultats suivants :

Passant à 80µm	Diamètre maximale Dmax	Teneur en eau naturelle Wn	Limite de liquidité WI	Indice de plasticité IP	Indice de consistance IC	Valeur au bleu VBS
98,4%	<50mm	38,3%	61,3%	18,7%	1,2	1,53%

Tableau 53 - Résultats des essais laboratoires réalisés sur un échantillon de cendres volcaniques ferralitiques prélevé sur le secteur de l'hôpital (rapport SEGC, 2005)

v. Hydrogéologie

Lors de la campagne de forages pressiométriques menés jusqu'à 7,5 m de profondeur par SEGC en 2011 aucune nappe d'eau n'a été observée.

De même, les investigations géotechniques menées par SEGC jusqu'à 30 m de profondeur sur le site de l'Hôpital située au Nord de la zone d'étude, n'ont pas mis en évidence l'existence de nappe.

2. ETABLISSEMENT DES COLONNES DE SOLS

Il ressort de l'analyse des données que le site est relativement homogène et qu'une unique colonne de sol peut représenter l'ensemble du site. Cette colonne est définie cidessous dans le Tableau 54.

La colonne de sol a été établie à partir des résultats des investigations réalisées au droit du site par SEGC en 2011 et la campagne géophysique du BRGM en 2011, qui ont été complétées avec les données et hypothèses considérée par l'étude BRGM de 2005 sur le site de l'Hôpital.

Il est à noter que la vitesse Vs notée pour chaque formation, représente une moyenne de chaque horizon identifié sur les profils de SASW.

Concernant le substratum basaltique, il est intéressant de préciser que celui-ci n'a pas été atteint lors des investigations réalisées sur le site de l'hôpital dont certains forages ont été menés jusqu'à 30 m. De même, le profil SASW réalisé près de la zone d'étude (au Nord Est, stade près du collège) dans le cadre du microzonage de Mamoudzou (Sabourault *et al.*, 2002), le substratum basaltique (où la vitesse considérée pour cette étude est 950 m/s) n'a pas été atteint malgré une profondeur d'investigation menée jusqu'à 35 m (Vs =500 à 600m/s).

Formation	Epaisseur colonne (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	γ (kN/m³)
Cendres volcaniques ferrallitiques	7m	175	330	18
Cendres volcaniques ferralitiques	7m	250	470	18
Altérites ou coulées basaltiques altérées	15m	350	655	20
Basalte sain (substratum)	infini	800	1500	21

Tableau 54 - Colonne de sols retenue pour le site de Mamoudzou

La fréquence de résonance de la colonne proposée (3,4-3,5 Hz), estimée sous sollicitation de bruit de fond sismique à l'aide de Cyberquake[®], est cohérente avec les mesures H/V réalisées sur le site (pics marqués autour de 2,8 à 3,6 Hz).

3. 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 (Vs,30) est estimée à partir des épaisseurs et des vitesses des ondes proposées respectivement pour cette colonne.

Pour cette colonne représentative la Vs,30 est estimée à 268 m.s⁻¹. Selon les Eurocode 8, cela correspond à des sols de classe C (voir Tableau 1).

Ainsi, les spectres de réponse proposés pour le dimensionnement d'un établissement scolaire sur ce site de Mamoudzou sont donc les **spectres définis dans la réglementation pour cette classe de sol C** (voir Figure 4).

Les fichiers définissant les spectres fournis en Annexe 2 de ce rapport pourront être utilisés (fichiers 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol C.xls' et 'Ouvrage III sismicité modérée vertical.xls').

12. Conclusion

ette étude a été réalisée dans le cadre d'une convention entre l'Etat (Ministère de l'éducation nationale, Vice-rectorat de Mayotte) et le BRGM. 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 de projets d'établissements scolaires sur huit sites localisés sur cinq communes différentes du département de Mayotte.

L'archipel mahorais est situé en zone de sismicité 3 (« sismicité modérée ») selon la nouvelle réglementation sismique en vigueur depuis le 1^{er} 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 les 8 secteurs étudiés.

L'analyse des données géologiques, géotechniques, géophysiques et hydrogéologiques disponibles pour chacun des sites permet les conclusions suivantes :

- le site du futur lycée d'Acoua sur la commune d'Acoua est modélisé par 2 colonnes de sol correspondant respectivement à des classes de sol C (zone Ouest) et C (zone Est);
- le site du futur collège de Kwalé sur la commune de Mamoudzou est modélisé par 3 colonnes de sol correspondant respectivement à des classes de sol E (zone 1 et zone 2) et B (zone 3);
- le site du futur collège de Tsoundzou II sur la commune de Mamoudzou est modélisé par 2 colonnes de sol correspondant respectivement à des classes de sol B (zone 1) et C (zone 2);
- le site du futur lycée de Mamoudzou II à Kawéni, commune de Mamoudzou est modélisé par 2 colonnes de sol correspondant respectivement à des classes de sol C (colonne 1, zone Ouest) et D (colonne 2, zone centre-Est);
- le site du futur collège de Majicavo-Lamir sur la commune de Koungou est modélisé par une unique colonne de sol correspondant à une classe de sol B ;
- le site du futur collège de Barakani sur la commune de Ouangani est modélisé par une unique colonne de sol correspondant à une classe de sol C;
- le site de la future Université de Dembéni est modélisé par 2 colonnes de sol correspondant respectivement à des classes de sol C (colonne 1, partie amont) et B (colonne 2, partie centrale et aval) ;
- le site de l'extension du lycée de Mamoudzou est modélisé par une unique colonne de sol correspondant à une classe de sol C.

Les spectres de réponse proposés pour le dimensionnement de ces établissements scolaires sont les spectres définis dans la réglementation pour la classe de sol respectivement définie (voir Figure 4).

Les fichiers définissant les spectres fournis en Annexe 2 de ce rapport pourront être utilisés (fichiers 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol A.xls', 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol B.xls', 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol D.xls', 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol D.xls', 'Ouvrage_III_sismicité modérée_classe de sol E.xls' pour les spectres horizontaux et 'Ouvrage_III_sismicité modérée_vertical.xls' pour le spectre vertical).

Des analyses de liquéfaction ont également été menées pour 4 de ces sites. Il en ressort que :

- L'évaluation de la liquéfaction au droit des sondages pressiométriques du site de Kwalé a mis en évidence que la formation d'alluvions vasardes pouvait présenter un risque de liquéfaction, qualifié toutefois de peu probable et particulièrement sur l'horizon de sol situé entre 4 et 6 m au droit de SP2, où le coefficient de sécurité est inférieur à 1. Ainsi, une attention particulière face au risque liquéfaction devra être portée sur l'ensemble du site comportant cette couche d'alluvions vasardes.
- A partir des informations à notre disposition pour le site de Tsoundzou II, on vérifie que 10 échantillons sur 11 prélevés sur site ne sont pas susceptibles de se liquéfier. L'évaluation quantitative du risque de liquéfaction au niveau du 11^{ème} échantillon a montré que cette couche de sol n'est pas liquéfiable.
- L'évaluation de la liquéfaction au droit des sondages pressiométriques SP1 et SP2 du site de Kawéni a mis en évidence que la formation d'alluvions vasardes pouvait présenter un risque de liquéfaction, qualifié toutefois de peu probable et particulièrement sur l'horizon de sol situé entre 3 et 6 m au droit de SP2, où le coefficient de sécurité est le plus faible. Ainsi, une attention particulière face au risque liquéfaction devra être portée sur l'ensemble du site comportant cette couche d'alluvions vasardes.
- A partir des informations à notre disposition pour le site de la future université de Dembéni, on vérifie que les échantillons prélevés sur site ne sont pas susceptibles de se liquéfier.

13. Bibliographie

- **AFNOR (1995)** Règles de construction parasismique : règles PS applicables aux bâtiments, dites règles PS92. *AFNOR*, Paris, norme française NF P 06-013.
- 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.
- **BRGM (2006) -** Etude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. LEP de Kaoueni, BRGM/RP-54470-FR, mars 2006
- **BRGM (2006)** Etude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques sur le site de l'IFM de Dembéni (Mayotte), octobre 2006, BRGM RP 54 960- FR
- **Cassan M. (1988)** Les essais in situ en mécaniques des sols, 2e edition, 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.
- **Foerster, E. & Modaressi, H. (2007)** Nonlinear numerical method for earthquake site response analysis II case studies, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5(3), 325-345.
- **Kokusho T. (1980)** Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range. *Soils and foundations*, 20(4): p. 45-60.
- **Nakamura Y. (1989)** A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *QR of RTRI*, 30, 1, p. 25-33.
- **Nakamura Y. (1996)** Real-Time Information Systems for Seismic Hazards Mitigation UrEDAS, HERAS and PIC. *QR of RTRI*, 37, 3, p. 112-127.
- **Nogoshi M., and T. Igarashi (1971) -** On the propagation characteristics of microtremors. *Jour. Seism. Soc. Japan*, Vol 23, p. 264-280.
- Rey J., Auclair S., Vanoudheusden E., Oppermann A., François B., Bitri A. (2010)

 Evaluation de l'aléa sismique sur le site de l'extension de la maison d'arrêt de Majicavo-Lamir (Mayotte) Rapport BRGM/RP-58025-FR 73 p., 22 figures, 13 tableaux, 2 annexes.
- Roullé A., Bernardie S., Bitri A., Miehe J.M, Audru J.C. et Eucher G. (2005) Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques sur le site de

- l'hôpital de Mamoudzou (Mayotte). Rapport BRGM/RC-53975-FR, 45 p., 11 fig., 11 tabl., 2 annexes.
- **Sabourault P. (1999)** Du microzonage à la prédiction de mouvements forts : Confrontation de mesures de terrain, de simulations numériques et de modélisations sur modèles réduits centrifugés. Thèse de doctorat de l'université de Marne la Vallée.
- **Sabourault P., Bitri A. (2001)** Détermination de la géométrie des formations sédimentaires de la vallée du Grésivaudan autour du forage de Montbonnot (Isère) : utilisation des méthodes H/V et SASW. Rapport BRGM RP-51161-FR.
- Sabourault P., Sedan O., Audru J.C., Mathon C., Nédellec J.L., Bitri A., Bour M. et Le Brun B., avec la collaboration de J.P. Rançon (2002) Microzonage sismique de Mamoudzou-Centre, île de Mayotte. Rapport BRGM/RP-51839-FR.
- **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 (2011)** Construction du lycée d'Acoua Étude de faisabilité géotechnique. Missions de type G11, dossier n° 1858, décembre 2011.
- **SEGC (2010)** Construction du collège de Kwalé au village de Majicavo Lamir Étude de faisabilité géotechnique. Missions de type G11+G12 phase 1, dossier n° 1723, décembre 2010.
- **SEGC (2012)** Construction d'équipements scolaires du second degré Site de Kwalé Réalisation de sondages et d'essais. Mission de type G0, dossier n° 1868, février 2012.
- **SEGC (2009)** Construction d'un collège au village de Tsoundzou I Étude géotechnique préliminaire. Mission de type G11, dossier n° 1482, juillet 2009.
- **SEGC (2010)** Construction du collège de Kwalé au village de Tsoundzou I Étude géotechnique complémentaire. Mission de type G11, dossier n° 1700, octobre 2010.
- **SEGC (2011)** construction d'équipement scolaires du second degré site de Kawéni Réalisation des sondages et d'essais mission de type G0, référence SEGC MAYOTTE/E.M./1814/2011, février 2012.
- **SEGC (2010)** étude de faisabilité géotechnique-mission de type G11+G12 phase 1 », référence SEGC MAYOTTE/TR/1721/2010, décembre 2010.
- **SEGC (2009) -** construction d'un collège en modulaires à Kawéni II » Etude géotechnique préliminaire mission de type G11 –, référence SEGC MAYOTTE/AH/1397/2009, janvier 2009.

- **SEGC (2010)** « construction d'un collège à Ouangani reconnaissance géotechnique mission de type G0+G11 », juillet 2010, référence SEGC MAYOTTE/T.R./1632/2010.
- **SEGC (2006) -** dossier n°945 « Pylône Orange de Dembéni » : 4 sondages pénétrométriques et un sondage pressiométrique, mars 2006
- **SEGC (2012)** « construction d'équipement scolaires du second degré site de l'université de Dembéni, réalisation de sondages et d'essais et étude de faisabilité géotechnique missions de type G0 et G11+G12, mars 2012, SEGC MAYOTTE/A.A./1871/2012.
- **SEGC (2011)** « Extension du lycée de Mamoudzou. Etude de faisabilité géotechnique mission de type G11 », janvier 2011.
- Stieltjes L. (1988) Carte géologique de Mayotte à 1/50 000 et sa notice. Ed. BRGM.
- Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Liam Finn, W.D., Harder Jr., L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B. and Stokoe, K.H. (2001) Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(10), 817-833.

Annexe 1

Mesures géophysiques : méthodes utilisées

a) Détail de la méthode SASW

Cette méthode est fondée sur le principe de dispersion des ondes de surface (Bitri et al., 1997) pour la détermination des vitesses des ondes de cisaillement Vs dans les premières dizaines de mètres du sous-sol. Elle permet d'obtenir ce profil de vitesse, en plusieurs points, pour un coût largement inférieur aux méthodes destructives habituellement utilisées en géotechnique (cross-hole). La vitesse des ondes de cisaillement Vs intervient dans l'évaluation des modifications du signal sismique à la surface par rapport au mouvement au rocher (effets de site). C'est donc un paramètre déterminant dans une étude d'aléa sismique local.

Le matériel nécessaire pour effectuer des mesures sismiques des ondes de surface est composé d'une centrale d'acquisition sismique, de géophones et d'une source impulsionnelle (ici une chute de marteau). Les ondes de surface se propagent parallèlement à la surface de la terre. Dans le cas d'un milieu dont les propriétés élastiques varient avec la profondeur, la vitesse des ondes de surface varie avec la longueur d'onde, et donc avec la fréquence. Cet effet est appelé dispersion. Suivant la fréquence considérée, les ondes de surface contiennent de l'information sur les milieux traversés entre la surface et la profondeur maximale de pénétration des différents modes. En analysant la dispersion de ces ondes, il est donc possible d'obtenir des informations sur les valeurs des paramètres physiques à différentes profondeurs. Le maximum d'énergie dans le diagramme de dispersion donne les courbes de dispersion. Ces courbes, ainsi que les barres d'erreurs associées, sont ensuite inversées à partir d'un modèle de vitesse a priori dans le but de retrouver le profil vertical de vitesse des ondes S.

La méthode expérimentale SASW, permet ainsi de mesurer les profils de vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le sol et par conséquent de déterminer le type de sol en fonction des paramètres d'identification donnés dans les Eurocode 8.

b) Résultats des mesures H/V in situ

De nombreuses techniques théoriques, numériques ou instrumentales ont été développées pour estimer les effets de site lithologiques (Sabourault, 1999). Les techniques expérimentales font généralement appel à un site de référence, c'est-à-dire un site rocheux n'amplifiant pas le mouvement sismique. Ce site rocheux n'est pas toujours présent sur les zones d'études, ce qui peut engendrer des erreurs dans les estimations des effets de site. C'est pourquoi, des techniques plus récentes, ne faisant pas intervenir de site de référence, ont été mises au point. L'une de ces techniques consiste, à partir de l'enregistrement du bruit de fond ambiant, à calculer le rapport spectral entre les composantes horizontales et la composante verticale : c'est la méthode appelée couramment H/V (Nogoshi, 1971, Nakamura, 1989 et 1996). Le dispositif expérimental est constitué d'un sismomètre trois composantes et d'une station d'acquisition. Les principes physiques sous entendus par cette méthode ne sont actuellement pas tous bien cernés. Cependant, de nombreuses expériences ont comparé cette méthode avec des méthodes classiques et ont montré sa capacité à évaluer les effets de site. L'explication la plus communément admise est la suivante : soit un modèle très simple constitué d'une couche

meuble (souvent sédimentaire) surmontant un demi-espace homogène. Le bruit de fond est engendré par des sources proches comme le trafic urbain et donc composé d'ondes de surface. Seules les composantes horizontales sont amplifiées par les réflexions sur les interfaces des couches sous-jacentes. La composante verticale du bruit de fond contient, elle, la signature des sources de bruit. On suppose également que la base de la couche sédimentaire n'est pas affectée par les ondes de surface. Pour obtenir une pseudo-fonction de transfert à l'aide du bruit de fond, en s'affranchissant de l'effet de source, on divise donc le spectre d'une composante horizontale par le spectre de la composante verticale (d'où l'appellation H/V). Ce rapport donne avec une bonne précision la fréquence de résonance fondamentale du site, mais également une amplification spectrale relative qui dépend notamment du mode de traitement du signal. Les différentes amplifications relatives peuvent être comparées entre elles à condition d'avoir été établies avec les mêmes traitements.

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

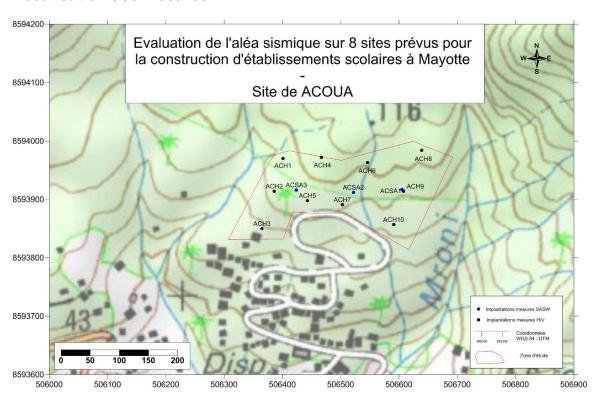
Lorsque la géométrie du site peut être assimilée à un milieu mono dimensionnel, on peut relier l'épaisseur d'une couche sédimentaire meuble (ayant un fort contraste d'impédance avec le substratum rocheux) à sa fréquence de résonance fondamentale f_0 par l'expression : $f_0 = V_s / 4$ H (H : épaisseur moyenne de la couche meuble, V_s vitesse moyenne de propagation des ondes S dans la couche meuble, f_0 : fréquence de résonance fondamentale de la couche meuble). La connaissance de deux paramètres permet donc d'estimer le troisième (V_s et f_0 connues donnent H par exemple) (Sabourault et Bitri, 2001).

Annexe 2

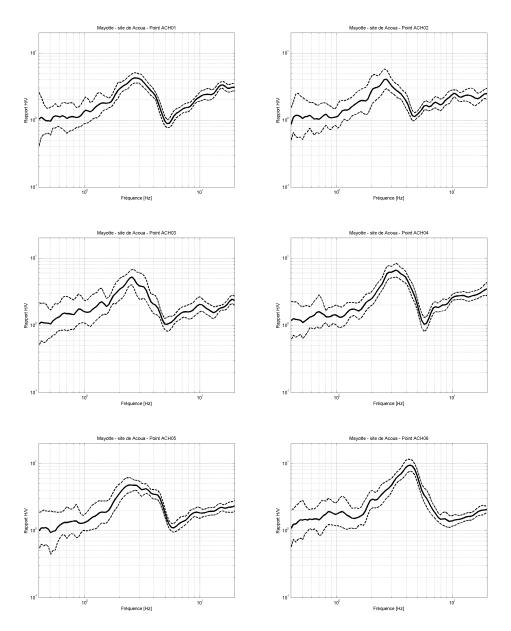
Résultats bruts des mesures géophysiques

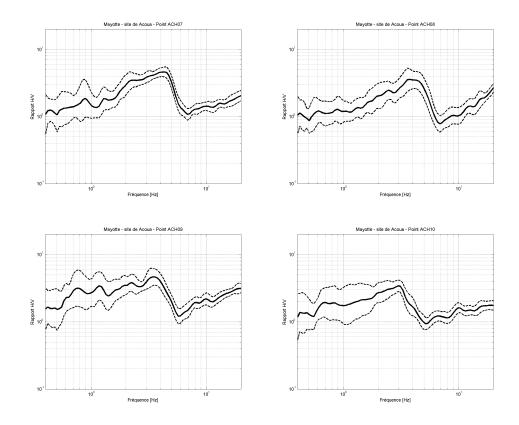
a) Acoua

Localisation des mesures

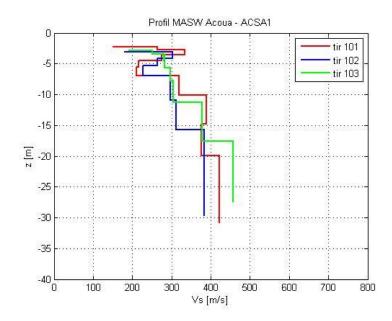


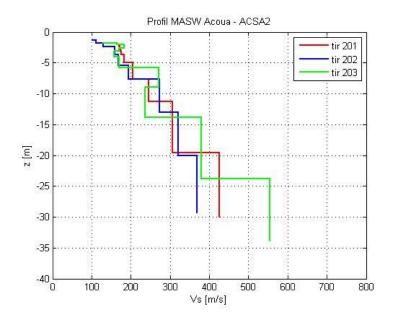
Mesures H/V

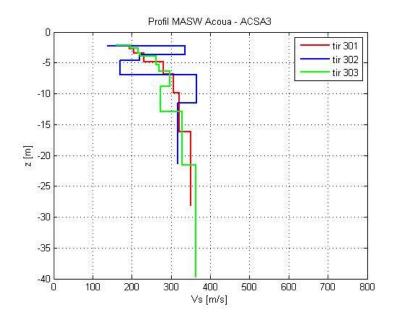




Mesures SASW

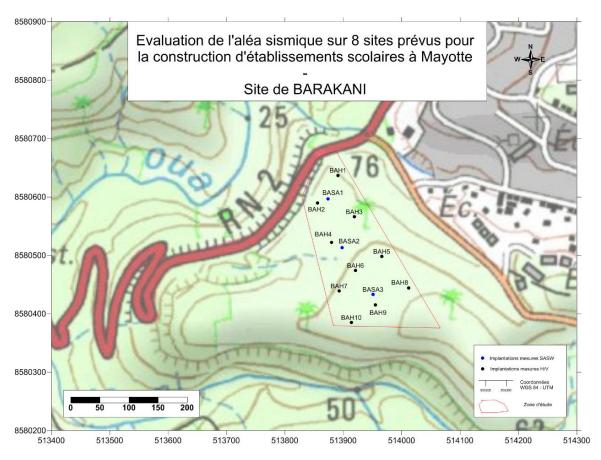




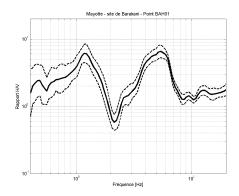


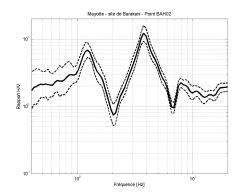
b) Barakani (Ouangani)

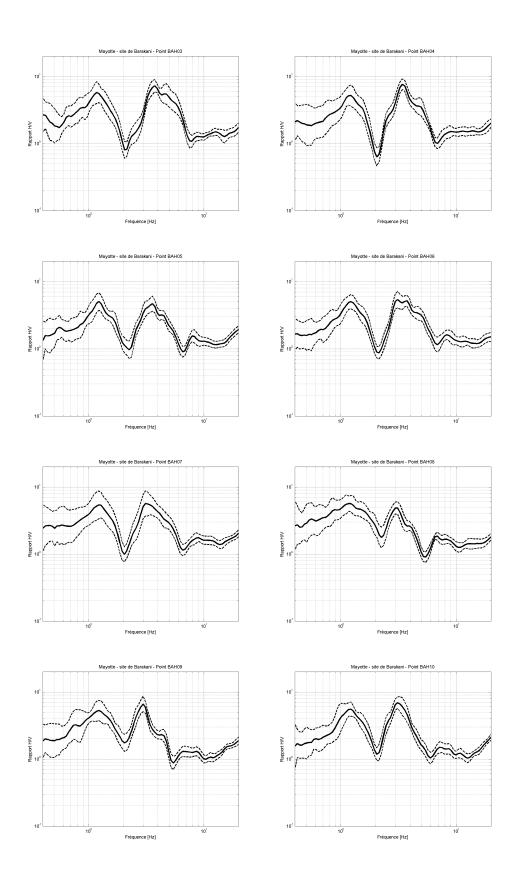
Localisation des mesures

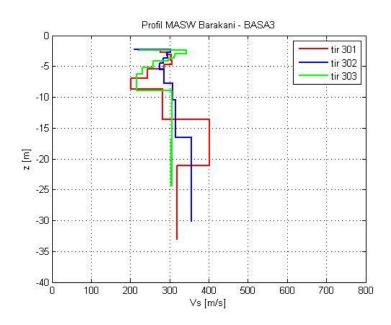


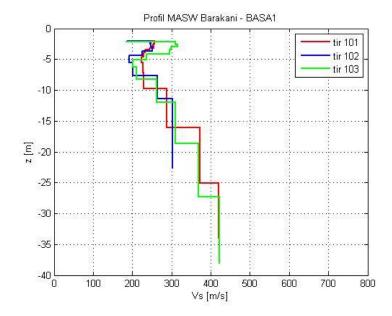
Mesures H/V

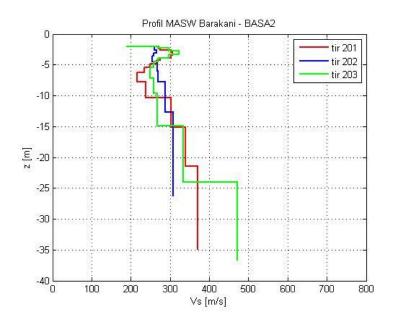




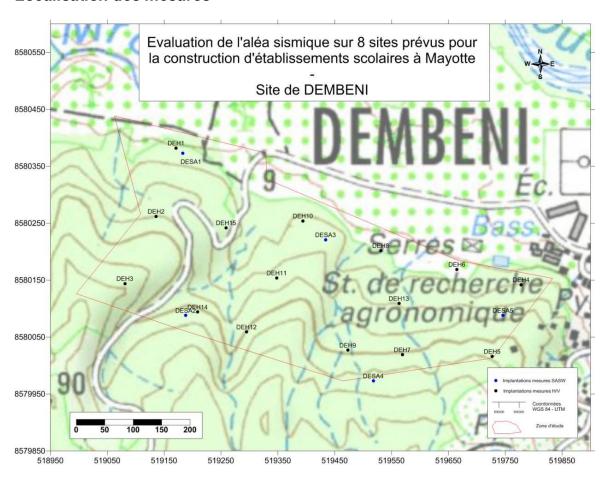


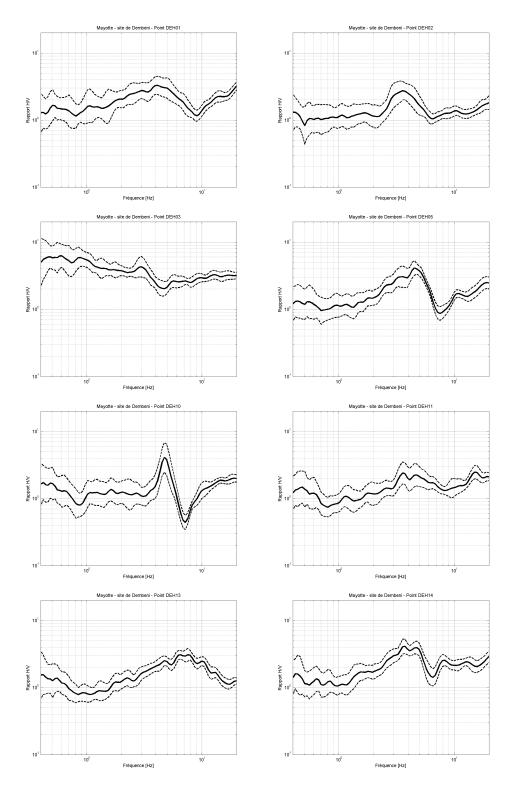


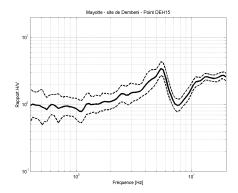


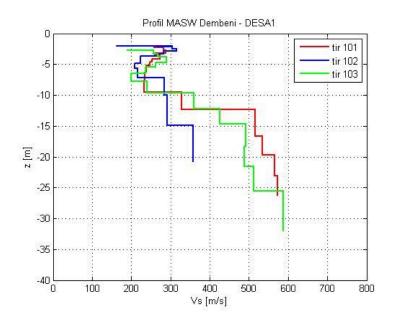


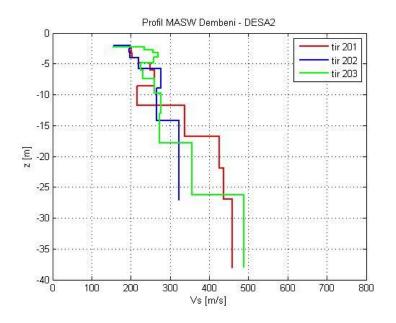
c) Dembéni

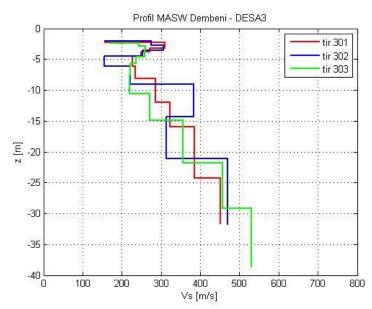


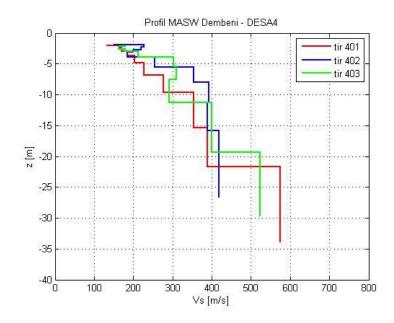


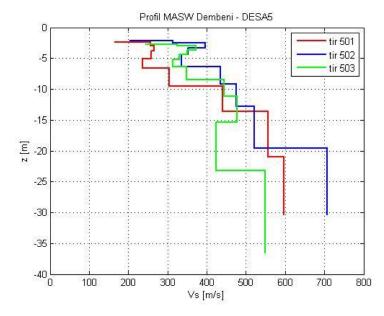




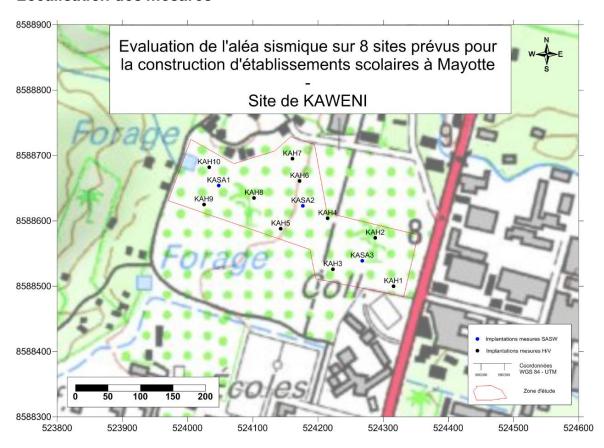


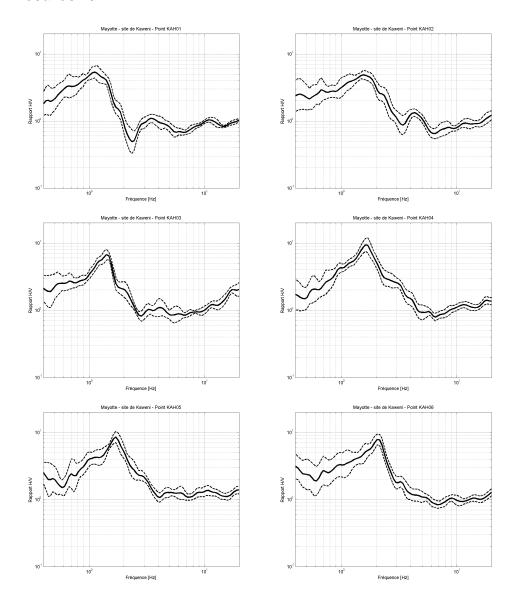


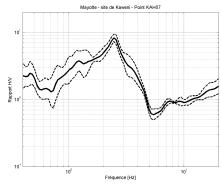


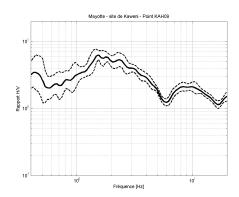


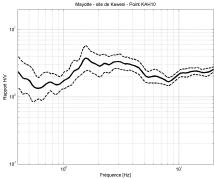
d) Kawéni

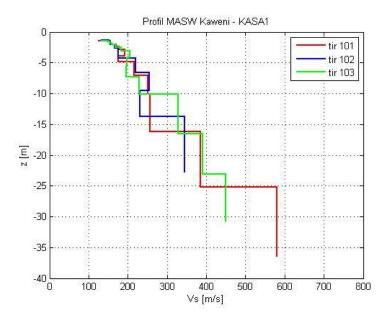


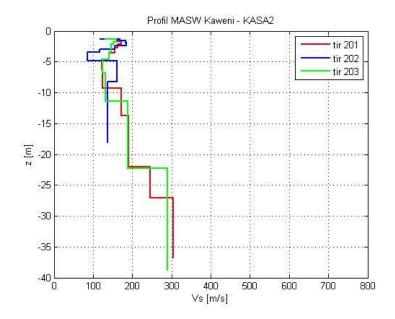


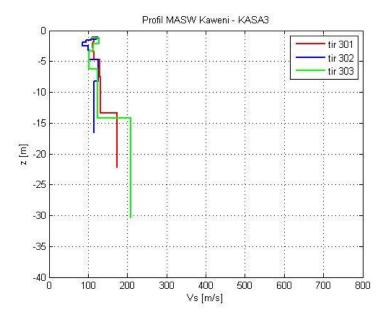






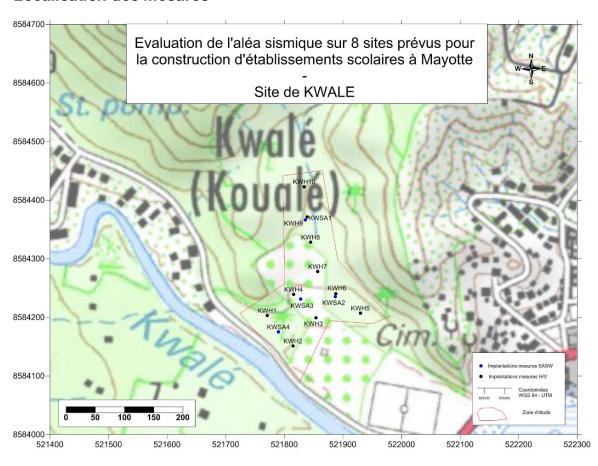


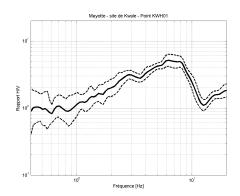


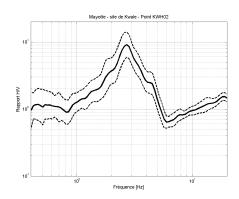


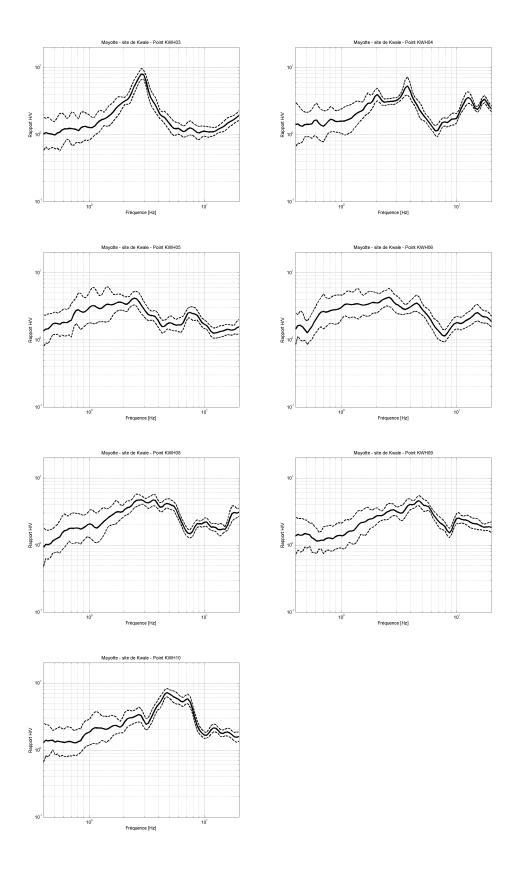
e) Kwalé

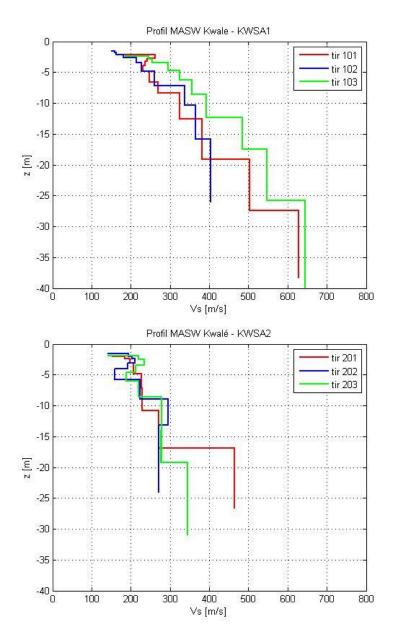
Localisation des mesures

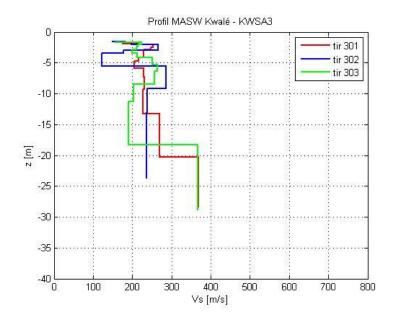


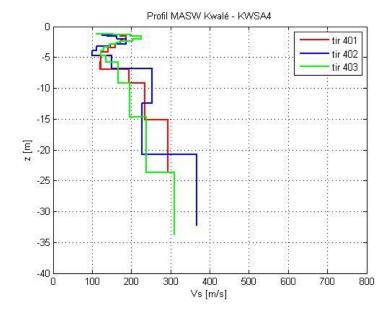








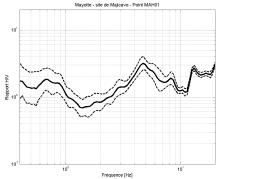


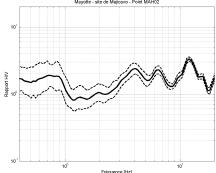


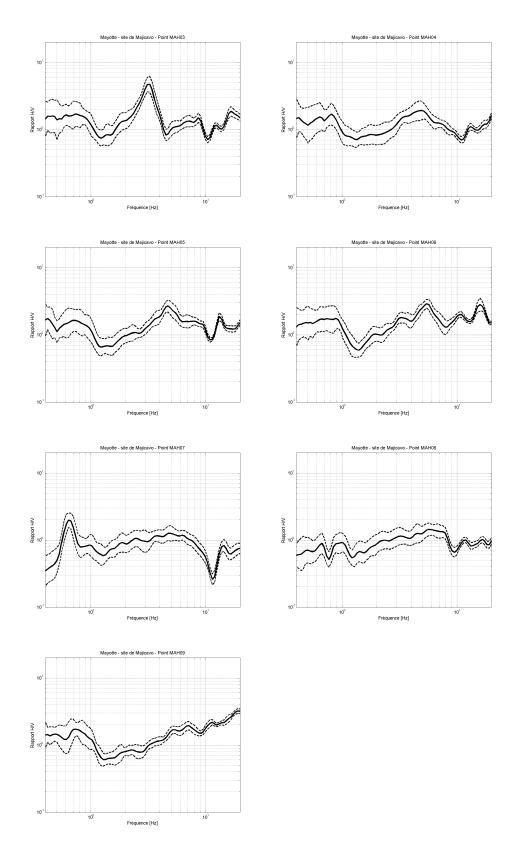
f) Majicavo

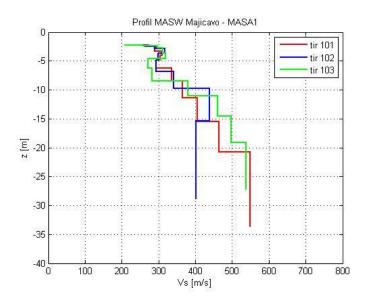
Localisation des mesures

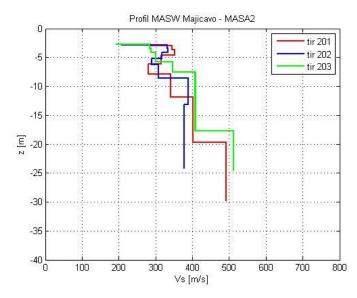


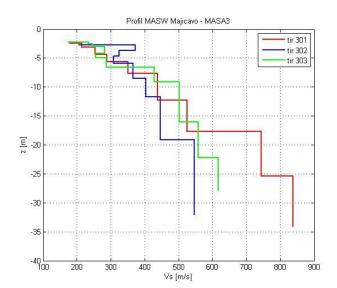




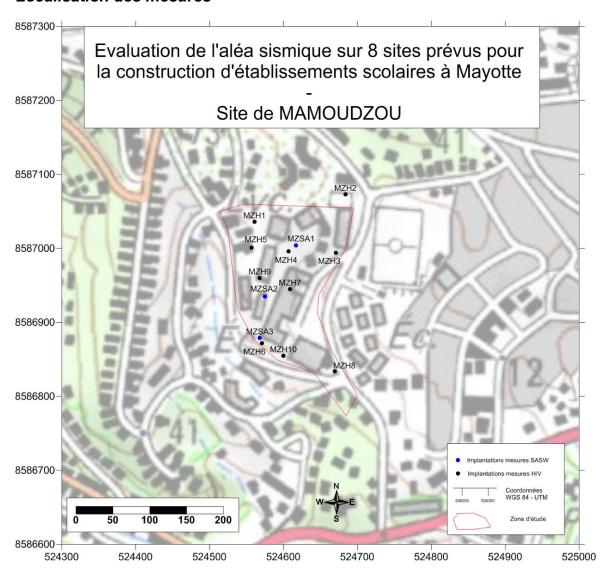


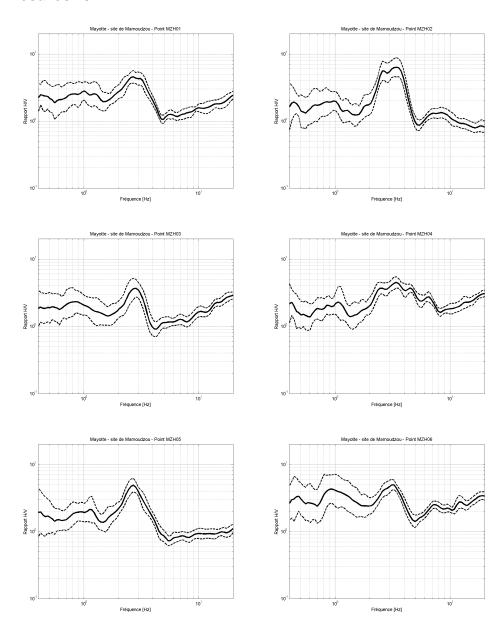


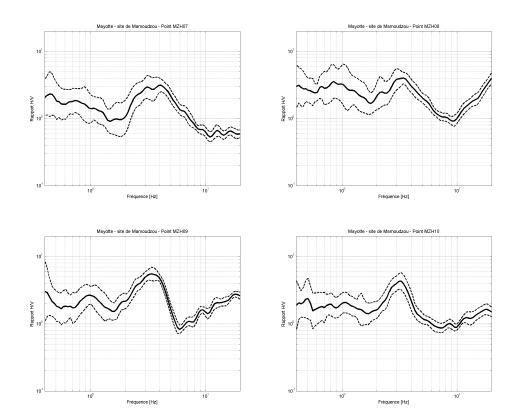


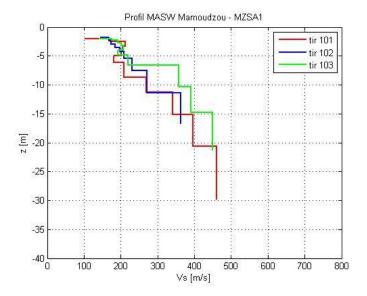


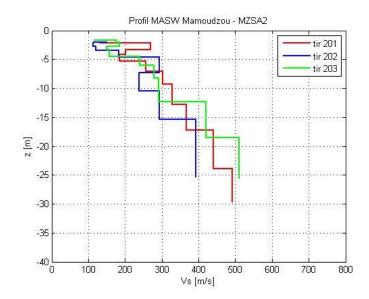
g) Mamoudzou

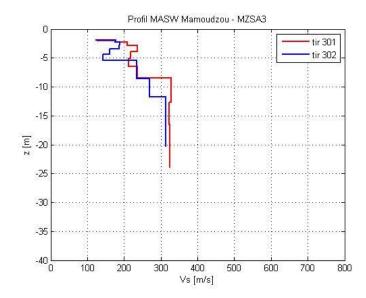




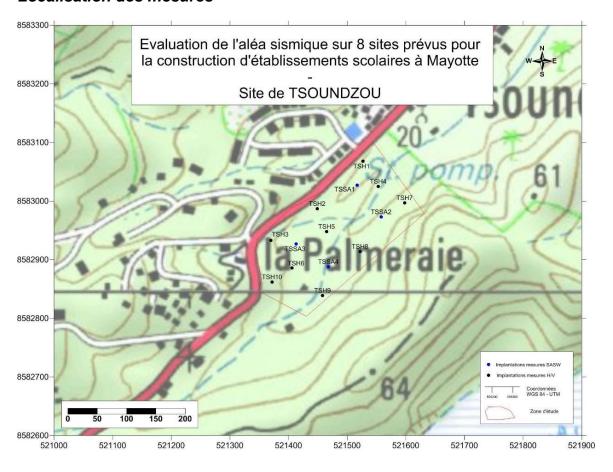


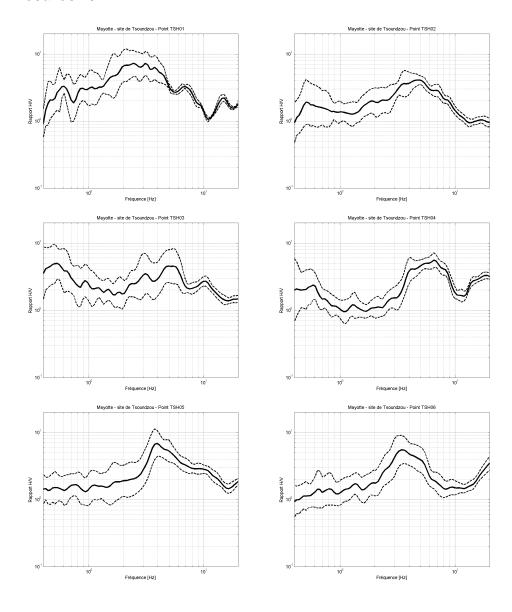


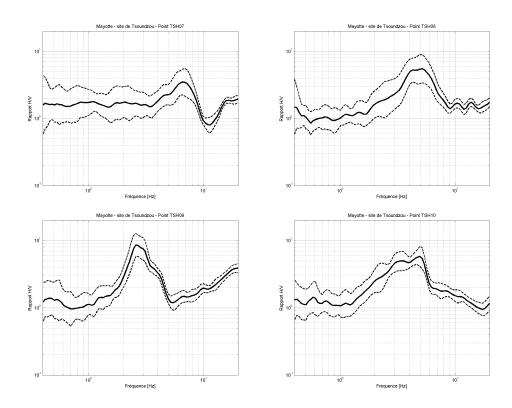


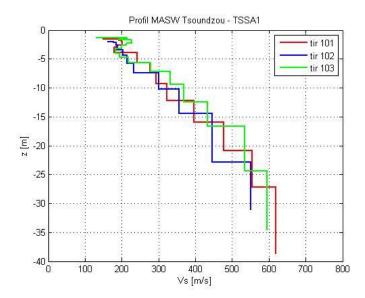


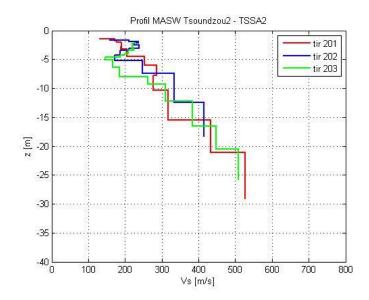
h) Tsoundzou II

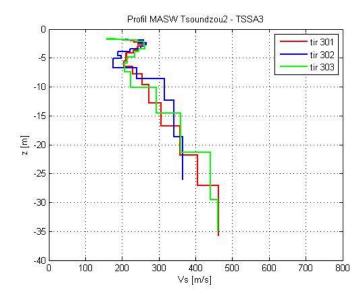


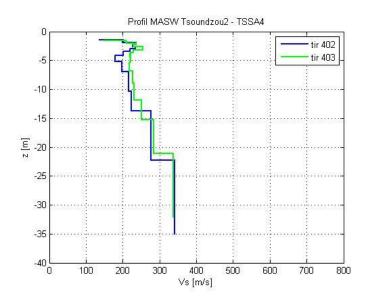












Evaluation de l'aléa sismique pour 8 sites de futurs établissements scolaires à Mayotte



Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 - Orléans Cedex 2 - France

Tél.: 02 38 64 34 34

Direction régionale Mayotte 9, centre Amatoula - Z.I. de Kawéni B.P. 363 97600 Mamoudzou - Mayotte

Tél.: 02 69 61 28 13