



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Méthodologie de révision de l'aléa sismique local et de la liquéfaction Application aux zones pilotes de Dembeni, Longoni et Combani

Rapport final

BRGM/RP-71365-FR

Novembre 2021

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Service public du BRGM AP19MDZ025

A. Roullé, A. Raingeard, R. Cochery, J. Baptiste, E. Vanoudheusden, P.A. Reninger, A. Bitri,
L. Sadeski, F. Beaubois, G. Dectot
Avec la collaboration de
F. Lacquement, E. Carne, G. Noury

Vérificateur :

Nom : Didier BERTIL

Fonction : chef de projet

Date : 17/12/21

Approbateur :

Nom : Charlotte MUCIG

Fonction Directrice Régionale
Mayotte

Date : 28/03/22

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots-clés : Risque sismique, Aléa sismique, Carte d'aléa, Effets de site, Mayotte, Géophysique

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

Roullé A., Raingeard A., Cochery R., Baptiste J., Vanoudheusden E., P.A. Reninger, Bitri A., Sadeski L., Beaubois F., Dectot G. (2021) – Méthodologie de révision de l'aléa sismique local et de la liquéfaction : Application aux zones pilotes de Dembeni, Longoni et Combani. Rapport final. BRGM/RP-71365-FR, 160 p., 71 fig., 9 Tab., 3 ann.

Synthèse

À la demande de la DEAL Mayotte, le BRGM a été chargé de mettre à jour la cartographie de l'aléa sismique local réalisée en 2004 dans le cadre des atlas des aléas naturels. Pour cela, une phase méthodologique, objet du présent rapport, a été proposée afin d'intégrer l'ensemble des données acquises depuis 2004, à savoir :

- les nouvelles cartes géologiques de l'île réalisées au 1/30 000 en 2013 et au 1/10 000 en 2020 dans le cadre du projet EROMAY, orientées vers la cartographie des formations superficielles et de leur degré d'altération ;
- les données géophysiques sol (H/V et MASW) et géotechniques acquises lors des différentes études de site menées à travers l'île pour la détermination de l'aléa sismique local depuis 15 ans (dont les mesures réalisées près des barrages pour le SIEAM lors de la crise sismique de 2018 à la demande de la DEAL) ;
- l'analyse des données sismologiques enregistrées lors de la crise sismo-volcanique initiée en 2018 sur les stations sismologiques à terre ;
- les données des levés électromagnétiques héliportés réalisés en 2010 (Auken *et al.* 2011).

Ce travail a été réalisé dans le cadre des actions de Service public du BRGM (projet AP19MDZ025) et d'une convention de recherche et développement partagés avec la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL) de Mayotte (Convention n° 2019-002-DEAL-SEPR).

Le présent rapport de synthèse détaille la méthodologie développée dans le cadre de cette étude pour la révision de la cartographie des effets de site lithologiques, topographiques et de l'aléa liquéfaction ainsi que les résultats obtenus sur les 3 sites pilotes de Dembeni, Longoni et Combani choisis en début d'étude.

En ce qui concerne les effets de site lithologiques, l'estimation de l'aléa s'est basée sur les classes de sol EC8 en suivant la méthodologie suivante :

- identification des couches responsables des effets de site lithologiques (interfaces cibles) à partir des données géologiques de surface et des données géophysiques sol (H/V et MASW) ;
- identification de ces interfaces cibles sur les données EM aéroportées par croisement avec les données géophysiques sol ;
- estimation de la géométrie, de la profondeur et de la nature des interfaces cibles à partir des données EM aéroportées en s'appuyant sur les données géologiques (cartographie et logs) ;
- extraction des valeurs d'épaisseur des couches superficielles responsables des effets de site lithologiques sur les données EM aéroportées et géophysiques sol pour deux types de formations géologiques : les alluvions et les formations volcaniques altérées ;
- application des critères de classification en classes de sol EC8 en fonction de la nature et des épaisseurs des couches superficielles pour obtention du zonage des effets de site lithologiques. Ces critères sont spécifiques aux conditions rencontrées à Mayotte et devront être vérifiés lors la phase d'application de la méthodologie à l'ensemble de l'île.

C'est la première fois que les données EM aéroportées sont utilisées à des fins de cartographie de l'aléa sismique local.

En ce qui concerne les effets de site topographiques, ceux-ci ont été traités de façon forfaitaire comme préconisés dans la réglementation. Pour cela, nous nous sommes basés sur la méthode de calcul utilisée dans les Atlas (méthode basée sur les critères PS92) mais en utilisant un MNT de résolution plus fine (MNT IGN au pas de 5 m au lieu du pas de 50 m disponible en 2004).

En ce qui concerne la liquéfaction, l'analyse des travaux sur l'aléa liquéfaction menés pour différents sites dans le cadre de l'étude pour le Vice-Rectorat en 2019 a permis de définir un niveau d'aléa potentiellement extrapolable à l'ensemble de l'île sur quelques formations géologiques clefs, à savoir : les alluvions indifférenciées, les colluvions et les isaltérites. Cette extrapolation pourrait se faire moyennant l'hypothèse forte selon laquelle les différentes formations lithologiques sont semblables à l'échelle de l'île. À ce jour néanmoins, les formations de dépôts de plage, des isaltérites de cinérites *et* alluvions, et des projections volcanoclastiques de Petite-Terre et Mamoudzou ne peuvent pas être cartographiées vis-à-vis de l'aléa liquéfaction faute de données pertinentes pour le faire. Nous préconisons la réalisation d'investigations complémentaires pour permettre l'évaluation de l'aléa liquéfaction à l'échelle de l'île : des propositions de site ont été faits pour pallier le manque d'informations constaté.

Outre la description de la méthodologie employée pour aboutir à la cartographie de l'aléa sismique local et de la liquéfaction, le rapport présente notamment, pour chacun des sites pilotes :

- une carte de l'ensemble des données disponibles ;
- une carte des fréquences de résonance et paramètres $V_{s,30}$ mesurés ;
- une carte des épaisseurs des différentes formations superficielles susceptibles de présenter un effet de site lithologique au droit des points de mesures géophysiques ;
- une cartographie des effets de site lithologiques selon les classes de sol EC8 avec un rappel des spectres réglementaires associés ;
- une cartographie préliminaire de l'aléa liquéfaction pour les sites pilotes de Dembeni et Longoni. Elle n'est pas réalisable sur le site de Combani faute d'informations sur les isaltérites de cinérites *et* alluvions présentes sur ce site.

Pour chacun des phénomènes étudiés (effets de site lithologiques, effets de site topographiques et liquéfaction), les limites du travail réalisé sont exposées et des recommandations ou perspectives d'amélioration sont proposées, notamment pour l'extrapolation des méthodologies de cartographie à l'échelle de l'île prévues en deuxième phase du projet.

Sommaire

1. Introduction.....	11
2. Aléa sismique à Mayotte : état des lieux.....	13
2.1 CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE	13
2.1.1 Zone de sismicité	13
2.1.2 Spectres de réponse pour un sol de type rocheux	14
2.1.3 Spectres de réponse tenant compte des conditions de site.....	15
2.2 ÉTAT DE L'ART SUR L'ÉTUDE DES EFFETS DE SITE LITHOLOGIQUES EN MILIEU VOLCANIQUE ALTÉRÉ.....	18
2.3 ANALYSE DES CARTOGRAPHIES D'ALÉA SISMIQUE LOCAL EXISTANTES SUR MAYOTTE	19
2.3.1 Atlas des aléas naturels (2001-2004).....	19
2.3.2 Microzonage de Mamoudzou (2002).....	20
2.3.3 Études de site	22
2.4 ANALYSE DES DONNÉES DE LA CRISE SISMO-VOLCANIQUE INITIÉE À MAYOTTE EN MAI 2018	24
3. Sites pilotes	27
4. Méthodologie de cartographie des effets de site lithologiques à partir de données EM aéroportées.....	33
4.1 DONNÉES SOURCES.....	33
4.1.1 Cartographie des formations superficielles	33
4.1.2 Données EM héliportées.....	34
4.1.3 Données géophysiques sol	35
4.1.4 Données géotechniques	37
4.2 IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES FORMATIONS GÉOLOGIQUES SUSCEPTIBLES DE PRÉSENTER UN EFFET DE SITE LITHOLOGIQUE	37
4.3 ANALYSE DES DONNÉES EM	40
4.3.1 Retraitement des lignes	40
4.3.2 Obtention des profondeurs des interfaces d'intérêt	43
4.3.3 Vers des approches permettant de travailler à plus grande échelle	44
4.4 INTÉGRATION DES DONNÉES EM DANS LA CARTOGRAPHIE DES EFFETS DE SITE LITHOLOGIQUES.....	46
4.5 ZONAGE EN CLASSES DE SOL RÉGLEMENTAIRE (EC8)	47

5. Cartographie des effets de site lithologiques : application aux zones pilotes	49
5.1 DEMBENI.....	50
5.2 LONGONI.....	56
5.3 COMBANI.....	61
5.4 LIMITES ET PERSPECTIVES.....	65
6. Effets de site topographiques	67
6.1 DÉFINITION	67
6.2 CARTOGRAPHIE.....	68
6.3 APPLICATION AUX 3 ZONES PILOTES.....	68
6.4 LIMITES ET PERSPECTIVES.....	71
7. Liquéfaction.....	73
7.1 LE PHÉNOMÈNE DE LIQUÉFACTION	73
7.1.1 Définition du phénomène.....	73
7.1.2 Évaluation de l'aléa liquéfaction.....	74
7.2 LE CONTEXTE MAHORAIS.....	76
7.2.1 Géologie et sensibilité des formations à la liquéfaction	76
7.2.2 Potentiels indices de liquéfaction lié à la crise sismique actuelle	79
7.2.3 Sismicité locale et liquéfaction.....	79
7.2.4 Hydrogéologie	80
7.3 ÉVALUATION DES NIVEAUX D'ALÉA LIQUÉFACTION DES DIFFÉRENTES FORMATIONS.....	82
7.3.1 Réanalyse des évaluations sur différents sites	82
7.3.2 Conclusion des études de liquéfaction sur site	88
7.4 CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA LIQUÉFACTION	89
7.4.1 À l'échelle de l'île.....	89
7.4.2 À l'échelle d'un site.....	94
7.5 APPLICATION AUX SITES PILOTES	95
7.5.1 Dembeni.....	95
7.5.2 Longoni	96
7.5.3 Combani.....	96
8. Conclusions.....	97
9. Bibliographie	101

Liste des figures

Figure 1 :	Zonage sismique réglementaire de la France en vigueur depuis le 1 ^{er} mai 2011	14
Figure 2 :	Spectres de réponse au rocher horizontal affleurant à Mayotte (zone de sismicité 3) pour la catégorie d'importance II et pour la composante horizontale du mouvement sismique.	15
Figure 3 :	Principe des effets de site lithologiques. Les ondes réfléchies dans la couche meuble sont piégées et provoquent une résonance de cette couche.	15
Figure 4 :	Spectres de réponse à Mayotte (zone de sismicité 3) pour la catégorie d'importance II en fonction de la classe de sol EC8 (composante horizontale).	18
Figure 5 :	Exemple de cartographie des effets de site lithologiques d'après l'atlas des aléas de 2004 sur Dembéné.	20
Figure 6 :	Microzonage sismique de Mamoudzou : zones de réponse sismique homogène vis-à-vis des effets de site lithologiques (Sabourault <i>et al.</i> , 2002).	21
Figure 7 :	Spectres de réponse proposés pour chacune des zones à effets de site lithologique de la Figure 6 dans le cadre du microzonage sismique de Mamoudzou (Sabourault <i>et al.</i> , 2002).	22
Figure 8 :	Localisation des stations sismologiques en opération lors de la crise sismo-volcanique de 2018 et traitées dans cette étude.	24
Figure 9 :	Comparaison entre les PGA (Peak Ground Acceleration = pics en accélération) enregistrés à la station de référence YTMZ et les PGA enregistrés à la station considérée.	25
Figure 10 :	Analyse directionnelle des rapports H/V de la station MTSB. La figure A donne le résultat de l'analyse sur l'ensemble des azimuts et montre le saut de fréquence de résonance à 40° et 120° (en bleu). La figure B donne les courbes H/V pour un azimut de 80° et de 180° et illustre le saut de fréquence de résonance observé sur la figure A.	26
Figure 11 :	Localisation des mesures géophysiques sol (H/V ou MASW) ou mesures EM héliportées disponibles en début d'étude pour le choix des sites pilotes. La localisation des stations sismologiques sont indiquées pour rappel.	28
Figure 12 :	Localisation générale des sites pilotes de l'étude.	29
Figure 13 :	Configuration du site pilote de Longoni avec localisation des données géologiques, géotechniques et géophysiques disponibles avant projet.	31
Figure 14 :	Configuration du site pilote de Dembeni avec localisation des données géologiques, géotechniques et géophysiques disponibles avant projet.	31
Figure 15 :	Configuration du site pilote de Combani avec localisation des données géologiques, géotechniques et géophysiques disponibles avant projet.	32
Figure 16 :	Vues du système SkyTEM® ; (a) arrière et (b) avant de la boucle émettrice et (c) en plein vol.	35
Figure 17 :	Localisation des mesures géophysiques sol (H/V ou MASW) ou mesures EM héliportées disponibles pour la réalisation de l'étude (données antérieure au projet et acquises durant le projet).	36
Figure 18 :	Distribution de la fréquence de résonance f_0 en fonction de la géologie superficielle (EROMAY).	38
Figure 19 :	Distribution du paramètre $V_{s,30}$ en fonction de la géologie superficielle (EROMAY).	39
Figure 20 :	Exemple de sondages de résistivité obtenus après inversion.	41

Figure 21 :	Localisation des données de géophysique aéroportée retraitées par le BRGM dans le cadre de cette étude sur la carte du régolithe EROMAY sur fond topo IGN.	42
Figure 23 :	Corrélation géologie/EM : Sondage BSS002PPKK (A), le profil (C) et le sondage (B) EM les plus proches.	43
Figure 24 :	Dendrogramme correspondant à la classification ascendante hiérarchique (CAH) en 3 classes (résistivités sur les 33 premiers mètres) réalisée sur les sondages EM de la zone de Longoni.....	44
Figure 25 :	Représentation des résultats de la CAH (sur les 33 premiers mètres, divisés en 2 classes) sous forme ponctuelle (au niveau de la localisation des sondages EM) et sous forme de polygones après triangulation de Voronoï.	45
Figure 26 :	Représentation du sondage moyen (en noir) et de la densité de probabilité des valeurs dans chaque classe (ou cluster) de la CAH appliquée sur Longoni avec les données EM des 33 premiers mètres.	45
Figure 27 :	Épaisseurs des interfaces cibles susceptibles d'induire les effets de site lithologiques observés sur le site pilote de Dombéni.	46
Figure 28 :	Courbes de Vs,30 calculées en fonction de l'épaisseur de la couche meuble en surface et différentes valeurs Vs (selon la couleur de la courbe) en supposant une valeur de Vs de 800 m/s pour la couche sous-jacente (substratum sismique).....	47
Figure 29 :	Critères définissant les classes de sol EC8 pour les alluvions ou colluvions en zone basse.....	48
Figure 30 :	Critères définissant les classes de sol EC8 pour les formations volcaniques altérées (allotérites, isaltérites, colluvions) présentes sur les reliefs.	48
Figure 31 :	Schéma explicitant le processus suivi pour aboutir à la cartographie des classes de sol EC8 à partir des données géologiques, géophysiques aéroportées et géophysiques sol. ...	50
Figure 32 :	Carte indiquant les fréquences de résonance f0 issues des mesures H/V, les valeurs de Vs,30 issues des mesures MASW (valeurs indiquées en gras souligné) sur fond de carte géologique EROMAY sur le site de Dombéni.	51
Figure 33 :	Profil EM aéroporté et sa localisation dans le secteur de Dombéni.	52
Figure 34 :	Épaisseurs des formations géologiques superficielles responsables des effets de site lithologiques d'après les données EM aéroportées sur le site de Dombéni.	53
Figure 35 :	Classification des classes de sol EC8 sur le site pilote de Dombéni.....	54
Figure 36 :	Cartographie des classes de sol EC8 sur le site pilote de Dombéni.	54
Figure 37 :	Cartographie des effets de site lithologiques sur le site de Dombéni d'après l'atlas des aléas de 2004.	55
Figure 38 :	Carte indiquant les fréquences de résonance f0 issues des mesures H/V, les valeurs de Vs,30 issues des mesures MASW (valeurs indiquées en gras souligné) sur fond de carte géologique EROMAY sur le site de Longoni.....	56
Figure 39 :	Profil EM aéroporté et sa localisation dans le secteur de Longoni.	57
Figure 40 :	Épaisseurs des formations géologiques superficielles d'après les données EM aéroportées sur le site de Longoni.....	58
Figure 41 :	Classification des classes de sol EC8 sur le site pilote de Longoni..	59
Figure 42 :	Cartographie des classes de sol EC8 sur le site pilote de Longoni.....	59
Figure 43 :	Cartographie des effets de site lithologiques sur le site de Longoni d'après l'atlas des aléas de 2004.	60

Figure 44 :	Carte indiquant les fréquences de résonance f_0 issues des mesures H/V, les valeurs de $V_{s,30}$ issues des mesures MASW (valeurs indiquées en gras souligné) sur fond de carte géologique EROMAY sur le site de Combanî.	61
Figure 45 :	Profil EM aéroporté et sa localisation dans le secteur de Combanî.	62
Figure 46 :	Épaisseurs des formations géologiques superficielles d'après les données EM aéroportées sur le site de Combanî.	63
Figure 47 :	Classification des classes de sol EC8 sur le site pilote de Combanî.	64
Figure 48 :	Cartographie des classes de sol EC8 sur le site pilote de Combanî.	64
Figure 49 :	Cartographie des effets de site lithologiques sur le site de Combanî d'après l'atlas des aléas de 2004.	65
Figure 50 :	Principe des effets topographiques.	67
Figure 51 :	Cartographie des effets de site topographiques sur le site de Dembeni. La localisation de station sismologique d'Iloni (MILA) est indiquée par un triangle rouge.	69
Figure 52 :	Comparaison entre la cartographie des effets de site topographiques de la présente étude (en rouge) et celle issues des atlas d'aléa de 2004 (hachures noires).	69
Figure 53 :	Cartographie des effets de site topographiques sur le site de Longoni.	70
Figure 54 :	Cartographie des effets de site topographiques sur le site de Combanî.	70
Figure 55 :	Courbes pour le calcul de la résistance à la liquéfaction (Youd <i>et al.</i> , 2001).	75
Figure 56 :	Association des valeurs d'indice de liquéfaction aux niveaux de probabilité, d'intensité et d'aléa liquéfaction (d'après AFPS, 1993).	75
Figure 57 :	Profil schématique des différents horizons composant un profil d'altération typique de l'île de Mayotte (Prognon <i>et al.</i> 2020).	78
Figure 58 :	Localisation des points de suivi des niveaux hydrogéologiques (cercles bleus).	81
Figure 59 :	Secteur de l'île où le phénomène de liquéfaction n'a pu être évalué.	90
Figure 60 :	Secteurs (ronds rouges) d'investigation proposés pour la formation d'isaltérites de cinérites et alluvions.	92
Figure 61 :	Secteurs (ronds rouges) d'investigation proposés pour les formations volcanoclastiques de Petite-Terre.	93
Figure 62 :	Étendue (zones jaunes) des formations de plages affleurantes d'après la carte lithologique des formations superficielles (rapport BRGM/RP-69555-FR, Prognon <i>et al.</i>).	93
Figure 63 :	Dépôts de sables affleurant à proximité du Mlima Mahozani.	94
Figure 64 :	Cartographie de l'aléa liquéfaction sur le site pilote de Dembeni.	96
Figure 65 :	Cartographie de l'aléa liquéfaction sur le site pilote de Longoni.	96
Figure 66 :	Localisation des mesures H/V et des profils MASW acquis dans le cadre de ce projet sur le site de Dembeni.	115
Figure 67 :	Localisation des mesures H/V et des profils MASW acquis dans le cadre de ce projet sur le site de Longoni.	124
Figure 68 :	Localisation des mesures H/V et des profils MASW acquis dans le cadre de ce projet sur le site de Combanî.	134
Figure 69 :	Localisation des mesures H/V et des profils MASW acquis en 2018 pour le compte du SIEAM près de la retenue collinaire de Dzoumogné.	146
Figure 70 :	Principe de calcul du coefficient τ pour l'évaluation des effets de site topographiques.	157
Figure 71 :	Choix des profils pour le calcul du coefficient τ .	158

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des classes de sol selon les EC8.	17
Tableau 2 : Paramètres définissant le spectre de réponse réglementaire à Mayotte en fonction de la classe de sol EC8 définie dans le Tableau 1 selon la réglementation en vigueur.	18
Tableau 3 : Liste des études de site utilisées dans ce rapport par année de réalisation.	23
Tableau 4 : Synthèse des paramètres ayant présidé au choix des 3 sites pilotes.	30
Tableau 5 : Synthèse des valeurs de distributions statistiques obtenues pour la fréquence de résonance f_0 et le paramètre $V_{s,30}$ en fonction de la géologie superficielle (EROMAY).	39
Tableau 6 : Coordonnées des mesures H/V acquises dans le cadre du projet.	113
Tableau 7 : Coordonnées des mesures H/V acquises pour le compte du SIEAM en 2018.	114
Tableau 8 : Coordonnées des profils MASW acquis dans le cadre du projet (sont indiqués les coordonnées des deux extrémités du profil correspondant aux géophones n°1 et n°24). ...	150
Tableau 9 : Coordonnées des profils MASW acquis pour le SIEAM sur les retenues collinaires de Combani et Dzoumogné en juin 2018.	150

Liste des annexes

Annexe 1 : Mesures H/V réalisées dans le cadre du projet	109
Annexe 2 : Mesures MASW réalisées dans le cadre du projet	149
Annexe 3 : Principe de calcul du coefficient topographique	157

1. Introduction

L'étude des séismes historiques survenus à Mayotte (Terrier *et al.*, 2000 ; Bertil *et al.*, 2021) a montré que des séismes potentiellement destructeurs peuvent survenir. Citons le séisme de magnitude 5,2 survenu à moins de 40 km de l'archipel comorien le 1^{er} décembre 1993 ; cet événement a été ressenti avec une intensité de VI-VII en causant notamment de nombreux dommages aux cases d'habitation. Plus récemment, une crise sismique d'origine sismo-volcanique est en cours à l'Est de Mayotte depuis le 10 mai 2018, avec plusieurs milliers de séismes enregistrés, dont plusieurs centaines ressentis par la population et un séisme maximal de magnitude Mw 5,9 (Lemoine *et al.*, 2020 ; Cesca *et al.*, 2020 ; Feuillet *et al.*, 2021). Dans ce contexte, une démarche de prise en compte du risque sismique est encouragée afin de protéger la population y résidant.

Six atlas des aléas naturels ont été édités en 2004 par bassin de risques sur l'ensemble du territoire mahorais (Audru *et al.*, 2002 ; Audru *et al.*, 2004a, 2004b, 2004c, 2004d, 2004e ; Eucher *et al.*, 2004). Dans ces atlas, la cartographie des effets de site lithologiques et de la liquéfaction s'est basée sur la carte géologique de 1988 au 1/50 000 (Stieljes, 1988) et sur des mesures H/V et MASW réalisées sur l'ensemble du territoire mahorais (Audru *et al.*, 2002). La classification des sols s'est faite selon les règles parasismiques PS92 en vigueur au moment de l'étude en suivant le guide méthodologique pour la réalisation de microzonages sismiques (AFPS, 1993). Depuis leur réalisation, la réglementation nationale a évolué, notamment en ce qui concerne la classification des sols actuellement basés sur les Eurocode 8 (EC8) et l'évaluation de l'aléa liquéfaction, et les connaissances sur les formations superficielles mahoraises se sont considérablement améliorées avec la réalisation d'une nouvelle cartographie géologique au 1/25 000 (Lacquement *et al.*, 2013 et Nehlig *et al.*, 2013). Ce constat nous a amené à proposer à la DEAL une mise à niveau de la cartographie de l'aléa sismique local. Ce travail vise à intégrer l'ensemble des données acquises depuis 2004, à savoir :

- la carte géologique de l'île réalisée au 1/30 000 et sa notice associée (Lacquement *et al.*, 2013 et Nehlig *et al.*, 2013). Cette carte, orientée vers la cartographie des formations superficielles, est plus adaptée à l'estimation de l'aléa sismique local que la carte géologique de 1988, notamment en ce qui concerne les formations d'altération et les formations de pente et apporte, en plus d'une information sur la nature du substrat, une caractérisation de son degré d'altération ;
- les données géophysiques sol (H/V et MASW) et géotechniques acquises lors des différentes études de site menées à travers l'île pour la détermination de l'aléa sismique local depuis 15 ans (dont les mesures réalisées près des barrages pour le SIEAM lors de la crise sismique de 2018 à la demande de la DEAL, en annexe) ;
- l'analyse des données sismologiques enregistrées lors de la crise sismo-volcanique initiée en 2018 sur les stations sismologiques à terre (Baillet, 2020, Roullé *et al.*, 2021) ;
- les données des levés électromagnétiques héliportés réalisés en 2010 (Auken *et al.* 2011) permettant d'accéder à des informations déterminantes sur les épaisseurs et la complexité des géométries des couches superficielles.

La présente étude vise à proposer une méthodologie de révision des cartographies d'aléa sismique local (effets de site lithologiques, topographiques et liquéfaction) issues des atlas des risques naturels avec une application opérationnelle sur 3 sites pilotes choisis conjointement par le BRGM et la DEAL.

2. Aléa sismique à Mayotte : état des lieux

2.1 CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

2.1.1 Zone de sismicité

La 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 zonage sismique et les normes parasismiques qui s'y rapportent. Ces normes, appelées Eurocode 8 (EC8), sont d'application obligatoire depuis 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 ». Ces mouvements de référence dépendent de la catégorie d'importance du bâtiment concerné et de la zone de sismicité dans laquelle il se trouve.

L'intégralité du département de Mayotte, est située en **zone de sismicité 3** ou zone de sismicité « modérée » (voir Figure 1). La crise sismo-volcanique initiée en Mai 2018 a posé la question de la place de Mayotte dans le zonage sismique réglementaire. En 2019, une étude menée par Bertil *et al.* (2019) pour le compte de la DGPR a confirmé le classement de Mayotte en zone de sismicité 3.

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 l'application des règles de constructions parasismiques.

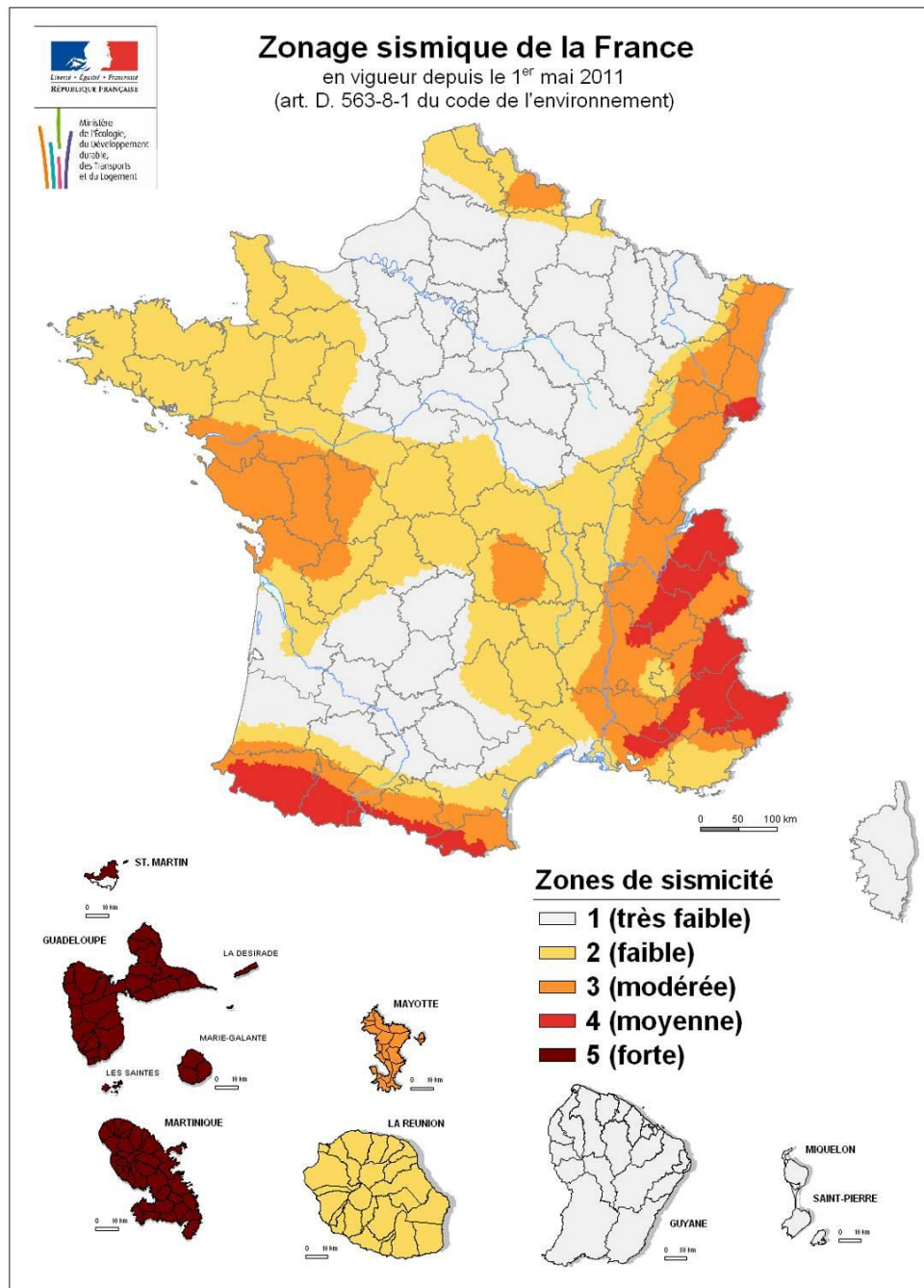


Figure 1 : Zonage sismique réglementaire de la France en vigueur depuis le 1^{er} mai 2011

2.1.2 Spectres de réponse 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 Tableau 1).

Pour un bâtiment de catégorie d'importance II comme par exemple une maison individuelle ou un logement collectif de moins de 28 m de hauteur, et dans une zone de sismicité 3 les spectres de réponse en accélération « au rocher », soit pour un sol de type A, sont définis par l'arrêté du 22 octobre 2010 et présentés sur la Figure 2 pour les composantes horizontales et verticales.

Pour ce type de bâtiment (catégorie d'importance II) en zone de sismicité 3 l'accélération nominale (à période nulle) est de $a_g = a_{gr}\gamma I = 1.1 * 1.0 = 1,1 \text{ m/s}^2$ et les périodes de coupures définissant le spectre de réponse horizontal en accélération sont respectivement $T_B=0,03\text{s}$, $T_C=0,2\text{s}$ et $T_D=2,5\text{s}$.

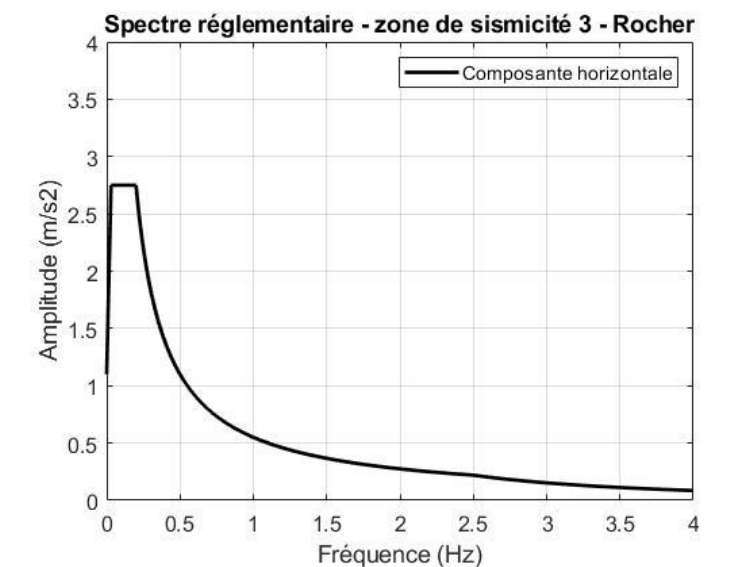


Figure 2 : Spectres de réponse au rocher horizontal affleurant à Mayotte (zone de sismicité 3) pour la catégorie d'importance II et pour la composante horizontale du mouvement sismique.

2.1.3 Spectres de réponse 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, voir Figure 3). Idéalement, il est défini par la fonction de transfert de la colonne de sol qui modifie le signal.

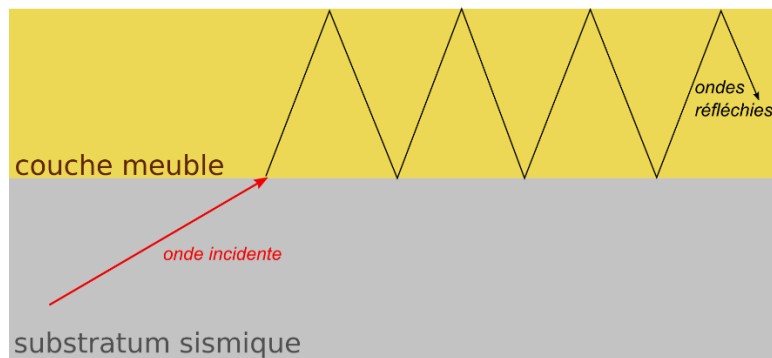


Figure 3 : Principe des effets de site lithologiques. Les ondes réfléchies dans la couche meuble sont piégées et provoquent une résonance de cette couche.

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 :

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

avec H : épaisseur de la couche meuble en **m**
 V_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 conditions géologiques locales (remplissage meuble, souvent sédimentaire ou dans le cas de Mayotte, altération) peuvent être à l'origine de modifications très importantes des caractéristiques du mouvement sismique (amplitude, contenu spectral, durée).

La réglementation parasismique prévoit leur prise en compte de manière forfaitaire en caractérisant la réponse du site en fonction de la catégorie de sol au droit du site selon la classification établie dans les EC8. Cette classification distingue 7 classes de sol (A, B, C, D, E et S1, S2 pour les sols potentiellement liquéfiables) caractérisées à partir des données géotechniques et/ou géologiques via leur profil lithologique et les paramètres $V_{s,30}$, N_{SPT} ou C_u (EN 1998-1 :2004 3.1.2 et EN 1998-5 :2004 4.2.2) donnés dans le Tableau 1.

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

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

Équation 1

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 moyenne de N_{SPT} sur les 30 premiers mètres pourra être utilisée.

N_{SPT} est le nombre de coups au pénétromètre dynamique SPT (Standard Penetration Test) pour une pénétration de l'outil de 30 cm ;

C_u est la cohésion non drainée.

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

Comme indiqué dans le tableau précédent, il convient de classer le site selon le paramètre $V_{s,30}$, s'il est disponible. Pour le connaître de manière satisfaisante et ainsi classer le sol conformément aux classes indiquées, l'Eurocode 8 indique (EN 1998-1 :2004, article 3) que des investigations appropriées doivent être réalisées. Le paramètre $V_{s,30}$ peut être estimé à partir de mesures directes du profil de vitesse V_s au moyen de dispositifs géophysiques en surface tels que la méthode non-invasive MASW¹. En complément, la mesure de la fréquence propre, à partir d'enregistrement de vibrations ambiantes et d'un traitement "H/V" permet de vérifier la compatibilité avec le profil de vitesse trouvé via la méthode MASW.

Si la mesure des V_s n'est pas disponible, l'EN 1998-5 [§ 4.2.1 (2)] recommande d'inclure, dans les programmes de reconnaissance, des essais de pénétration au cône (CPT ou CPTU) qui permettent d'obtenir des estimations de V_s par corrélations (annexe 1) ou des essais de pénétration standard (SPT) qui donnent une mesure directe du paramètre N_{SPT} indiqué dans le Tableau 1. Dans notre étude, très peu de données géotechniques étant disponibles, nous avons privilégié la détermination des classes de sol via les méthodes MASW et H/V.

Pour les classes de sol A à E, les spectres de réponse réglementaires correspondants sont définis à partir un paramètre de sol S et des périodes de coupure adaptés à la classe de sol considérée (Tableau 2 et Figure 4).

Pour les classes de sol S_1 et S_2 , une étude spécifique est préconisée afin de prendre en compte la possibilité de défaillance du sol sous une action sismique (notamment pour la classe S_2). Ces sols très particuliers n'ont pas été identifiés à Mayotte et ne sont donc pas considérés dans la suite de l'étude.

¹ La méthode MASW utilise les propriétés des ondes de surface, dont les variations de la vitesse de propagation avec la fréquence, sont intimement liées au profil de V_s avec la profondeur.

Classe de sol	Paramètre de sol S	TB	TC	TD
A	1	0.03	0.2	2.5
B	1.35	0.05	0.25	2.5
C	1.5	0.06	0.4	2
D	1.6	0.1	0.6	1.5
E	1.8	0.08	0.45	1.25

Tableau 2 : Paramètres définissant le spectre de réponse réglementaire à Mayotte en fonction de la classe de sol EC8 définie dans le Tableau 1 selon la réglementation en vigueur.

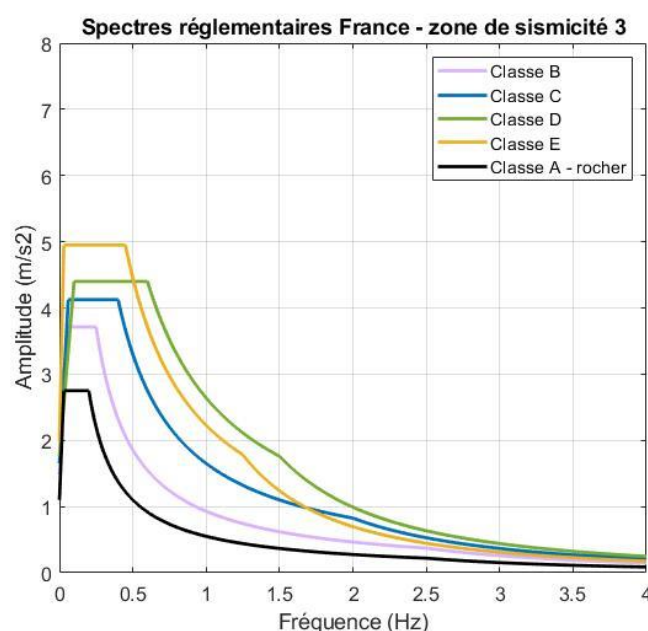


Figure 4 : Spectres de réponse à Mayotte (zone de sismicité 3) pour la catégorie d'importance II en fonction de la classe de sol EC8 (composante horizontale).

2.2 ÉTAT DE L'ART SUR L'ÉTUDE DES EFFETS DE SITE LITHOLOGIQUES EN MILIEU VOLCANIQUE ALTÉRÉ

La littérature est assez pauvre au niveau de la prise en compte des effets de site lithologiques en milieu volcanique tropical soumis à une forte altération.

Nous trouvons néanmoins quelques exemples de caractérisation des formations volcaniques altérées à Hawaï, île volcanique soumise à des pluies intenses comme Mayotte, avec une estimation simple des profondeurs d'altération à partir des mesures H/V (Nelson et McBride, 2019) et une imagerie détaillée des variations spatiales de la zone altérée sur des basaltes (Von Voigtlander *et al.*, 2018). Dans les deux cas, les valeurs de vitesse d'ondes S sont largement inférieures aux 800 m/s attendues pour des sites rocheux au sens des EC8 (classe A). Les travaux de Von Voigtlander *et al.* (2018) montrent en outre la forte influence de la pluviométrie sur les valeurs de gradients de vitesse d'ondes S pour un même faciès géologique.

Des travaux de modélisations numériques montrent, quant à eux, l'importance de la présence d'une couche altérée en surface (zone à faible vitesse) dans l'amplification du mouvement sismique que ce soit en l'absence de relief (Davis, 1995) ou sur une topographie (Graizer, 2009 ; Narayan, 2015 ; Kumar *et al.*, 2017 ou Wang *et al.*, 2018). Les travaux de Graizer (2009) étudient notamment les effets d'amplification directionnels observés sur une colline composée de schistes altérés à Tarzana en Californie et montrent la combinaison des effets d'amplification liés à la topographie et à la présence d'une couche meuble en surface caractérisée par une V_s de l'ordre de 250 m/s : ces effets se traduisent notamment par une forte amplification du mouvement sismique dans la direction perpendiculaire à l'axe de la colline.

Plusieurs auteurs cherchent à estimer le mouvement sismique en zones altérées, finement afin d'estimer les mouvements de terrain induits comme c'est le cas au Kirgizstan (Havenith *et al.*, 2002), à Taiwan (Rault, 2019 ; Rault *et al.*, 2020) ou au Japon (Ma *et al.*, 2019), ou pour expliquer des dommages particuliers observés lors de séisme comme c'est le cas à San Gregorio en Italie suite au séisme de l'Aquila (Di Naccio *et al.*, 2017). Ces auteurs utilisent communément l'analyse de polarisation des mesures H/V pour comprendre les phénomènes en jeu.

L'ensemble des travaux cités ici montrent l'importance de l'altération sur le mouvement sismique, aussi bien en termes d'amplification, de modification du contenu spectral du signal et de la directivité de l'énergie sismique. Néanmoins, ils restent cantonnés à des sites spécifiques et sont difficilement généralisables à l'échelle d'une région.

Certains travaux abordent la cartographie régionale des formations volcaniques en milieu tropical à travers la réalisation d'une carte des sols basées sur les classes de sol issues de la réglementation parasismique en vigueur dans le pays comme c'est le cas au Japon (Matsuoaka *et al.*, 2005) ou à Taiwan (Lee et Tsai, 2008). Dans les deux cas, les auteurs indiquent des fourchettes de $V_{s,30}$ associées aux différentes géologies en place, qui seront comparées avec les valeurs obtenues sur Mayotte (voir chapitre 4.3).

2.3 ANALYSE DES CARTOGRAPHIES D'ALÉA SISMIQUE LOCAL EXISTANTES SUR MAYOTTE

2.3.1 Atlas des aléas naturels (2001-2004)

Dans le cadre des politiques de prévention des risques naturels, six atlas des aléas naturels ont été édités en 2004 par bassin de risques sur l'ensemble du territoire mahorais (Audru *et al.*, 2002 ; Audru *et al.*, 2004a, 2004b, 2004c, 2004d, 2004e ; Eucher *et al.*, 2004). Dans ces atlas, la cartographie des effets de site lithologiques, topographiques et de la susceptibilité à la liquéfaction s'est basée sur le MNT de l'IGN au pas de 50 m, sur la carte géologique de 1988 au 1/50 000 (Stieljes, 1988) et sur des mesures H/V et MASW réalisées sur l'ensemble du territoire mahorais. La classification des sols s'est faite selon les règles parasismiques PS92 en vigueur au moment de l'étude en suivant le guide méthodologique pour la réalisation de microzonages sismiques (AFPS, 1993).

Les principales limites de ces cartographies sont les suivantes :

- les règles parasismiques sur lesquelles sont basées ces travaux (PS92) ont évoluées depuis 2010. Les classifications des sols associées sont maintenant basées sur les critères EC8 (Tableau 1) ;
- les niveaux d'aléa faible/moyen/fort utilisés en 2004 ne permettent pas une utilisation simple de ces cartographies à des fins d'aménagement du territoire puisque cela ne correspond pas à une réponse de site définie sous forme de spectre de réponse réglementaire ;

- l'amélioration des connaissances sur les effets de site sur l'île de Mayotte, issue notamment des études de site réalisées depuis 2002 (Tableau 3) et de la crise sismo-volcanique initiée en Mai 2018 (Baillet, 2020), a montré que les formations susceptibles de présenter un effet de site lithologique couvrent une majorité de l'île, en raison notamment de la présence massive de formations d'altération sur l'île. Ces formations étaient mal identifiées lors de la réalisation des atlas et leur susceptibilité à l'effet de site lithologique était mal connue. Certaines zones cartographiées en aléa nul à faible présentent donc des effets de site notoires que les études plus récentes ont permis d'identifier. Un exemple de ce cas de figure est donné sur la Figure 5 à Dombéni.

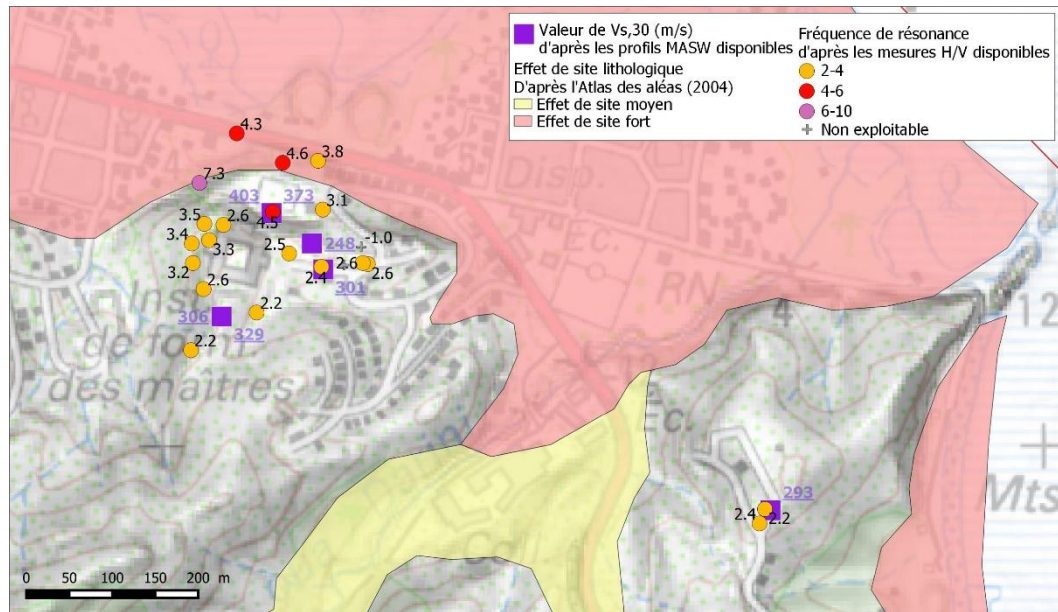


Figure 5 : Exemple de cartographie des effets de site lithologiques d'après l'atlas des aléas de 2004 sur Dombéni. Les zones non colorisées indiquent un effet de site supposé nul à faible. Les cercles pleins indiquent les mesures H/V issues d'études antérieures à l'atlas et leur fréquence de résonance respective (la couleur du cercle dépend de la fréquence de résonance observée). Les rectangles indiquent la position de profils MASW disponibles et leur valeur de $V_{s,30}$ respective.

2.3.2 Microzonage de Mamoudzou (2002)

En 2002, un microzonage sismique a été réalisé au niveau du centre-ville de Mamoudzou (Sabourault *et al.*, 2002). Ce microzonage fournit une carte au 1/10 000 des items suivants :

- zones de réponse sismique homogène vis-à-vis des effets de site lithologiques (Figure 6 et Figure 7). Quatre zones ont ainsi été identifiées dont trois s'appuient sur les classes de sol EC8, pour lesquelles les spectres de réponse associés peuvent être utilisés (Tableau 2 et Figure 4), et une s'appuie sur un spectre spécifique défini à partir de simulations 1D (zone du cratère de Kavani) ;
- zones susceptibles de présenter un effet de site topographique selon les règles PS92 ;
- zones de susceptibilité à la liquéfaction selon les règles PS92 ;
- zone susceptibles d'être soumise à un aléa mouvement de terrain selon une approche naturaliste. Cet aléa n'est pas considéré dans la présente étude.

Concernant les effets de site lithologiques et topographiques, bien que la réglementation ait évolué avec l'application des règles parasismiques basées sur l'EC8 à partir de 2010, l'étude menée en 2002 reste compatible avec la méthodologie actuelle.

La cartographie des effets de site lithologiques s'est basée sur une cartographie géologique au 1/10 000 réalisée spécifiquement sur la zone de Mamoudzou (Debeuf et Bachélery, 2001) et tenant compte des formations superficielles, notamment des formations volcaniques altérées. On peut donc considérer que cette cartographie reste valable dans ses grandes lignes. Néanmoins, la cartographie géologique ayant été affinée depuis lors avec notamment l'introduction de différents niveaux d'altération pour les formations volcaniques et de nouvelles mesures H/V ayant été réalisées sur la zone, il pourrait être intéressant de revoir cette cartographie et la mettre à jour dans la phase 2 de ce projet. Cela permettrait en outre de revoir les spectres donnés dans ce microzonage. En effet, les spectres proposés en 2002 sont basés sur la version européenne des règles parasismiques EC8 (Figure 7) et ne tiennent pas compte des spectres français définis en 2010 (Tableau 2 et Figure 4), mieux adaptées au contexte français mais non encore disponibles en 2002 lors de la réalisation du microzonage. Par ailleurs, une des zones du microzonage de 2002, au niveau du cratère de Kavani, est caractérisé par un spectre spécifique non défini dans les règles parasismiques EC8.

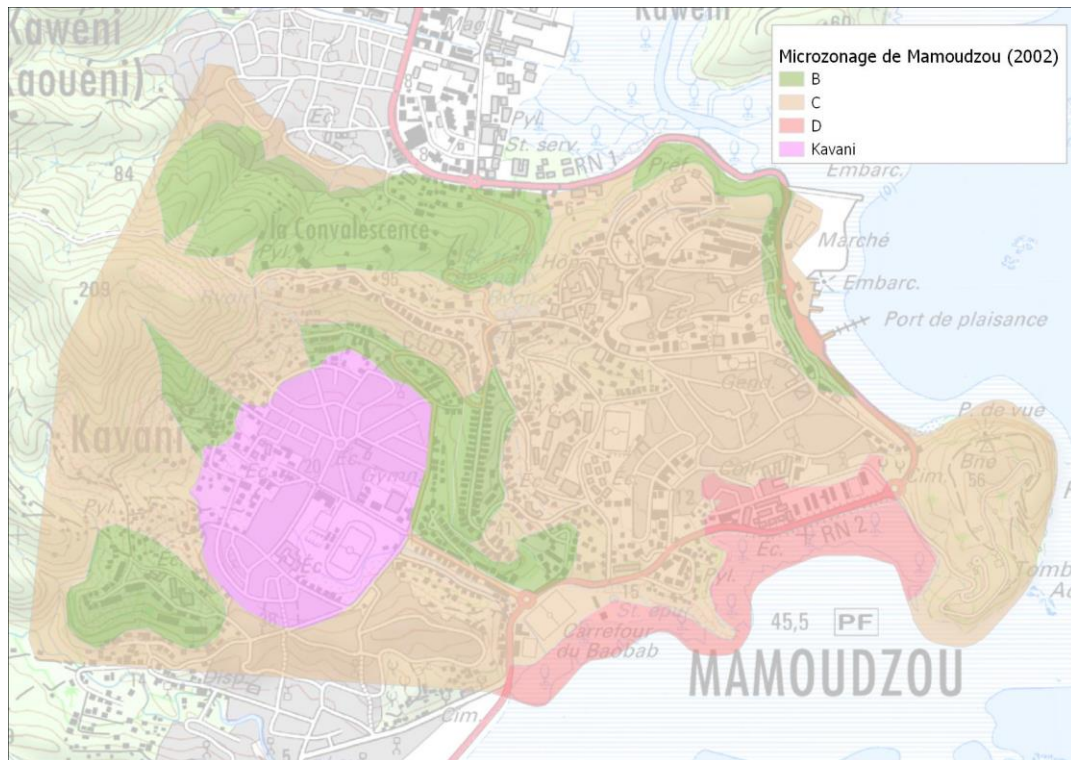


Figure 6 : Microzonage sismique de Mamoudzou : zones de réponse sismique homogène vis-à-vis des effets de site lithologiques (Sabourault et al., 2002).

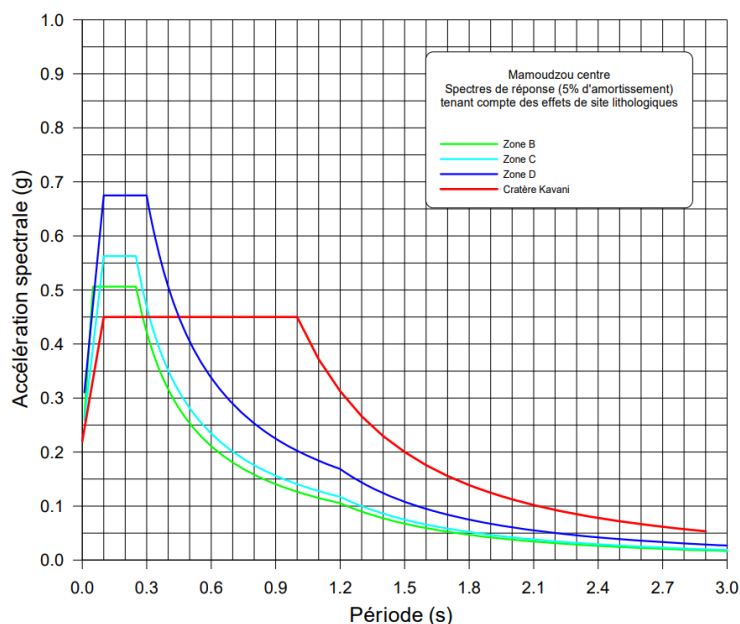


Figure 7 : Spectres de réponse proposés pour chacune des zones à effets de site lithologique de la Figure 6 dans le cadre du microzonage sismique de Mamoudzou (Sabourault et al., 2002).

Concernant la liquéfaction, la méthode employée en 2002 était basée sur les règles parasismiques PS92. Elle est maintenant considérée comme obsolète : le zonage n'est donc plus applicable. Une réflexion sur la révision de la cartographie de l'aléa liquéfaction selon les règles parasismiques en vigueur est menée dans le chapitre 7.

2.3.3 Études de site

Certaines études de site réalisées depuis 2002 présentent un zonage des effets de site lithologiques à l'échelle de la parcelle, soit en utilisant les classes de sol réglementaires (PS92 ou EC8), soit en proposant des spectres de réponse spécifiques issus de simulations numériques 1D (Tableau 3). Ces études ont été réalisées à une résolution plus fine que le zonage attendu sur l'ensemble de l'île. Ces données pourront être intégrées dans le zonage de l'aléa sismique local de Mayotte soit en exploitant directement les classes de sol obtenues lors de ces études (dans la limite de résolution de la carte finale), soit en valorisant les mesures géophysiques (H/V ou MASW) réalisés pour ces études.

Site	Année	N° rapport	Référence bibliographique
Site emplisseur de gaz, port de Longoni	2002	RC-52052-FR	Sabourault <i>et al.</i> , 2002
Centrale thermique de Longoni	2003	RC-52437-FR	Depinois <i>et al.</i> , 2003
Remblai de M'tsapéré	2003	RC-52142-FR	Sabourault <i>et al.</i> , 2003a
Extension de l'aéroport de Dzaoudzi-Pamandzi	2003	RC-52438-FR	Sabourault <i>et al.</i> , 2003b
Marché et comité du tourisme de Mamoudzou	2005	RC-53831-FR	Dominique <i>et al.</i> , 2005
Lycée de Chirongui	2005	RP-53832-FR	Roullé <i>et al.</i> , 2005a
Hôpital de Mamoudzou	2005	RP-53975-FR	Roullé <i>et al.</i> , 2005b
Aéroport de Dzaoudzi-Pamandzi	2006	RP-55151-FR	Auclair <i>et al.</i> , 2006
IFM de Dombéni	2006	RP-54960-FR	Rey <i>et al.</i> , 2006a
Lycée de Dombéni	2006	RP-54467-FR	Rey <i>et al.</i> , 2006b
LEP de Kaouéni	2006	RP-54470-FR	Rey <i>et al.</i> , 2006c
Lycée de Pamandzi	2006	RP-54471-FR	Rey <i>et al.</i> , 2006d
Lycée de Dombéni, site de Tsararano	2008	RP-56431-FR	Vermeersch <i>et al.</i> , 2008
Dépôt d'hydrocarbures de Longoni	2009	RC-57925-FR	Auclair <i>et al.</i> , 2009
Collège de Labattoir, collège de Bouéni et lycée de Chirongui	2009	RP-57715-FR	Oppermann <i>et al.</i> , 2009
Maison d'arrêt de Majicavo-Lamir	2010	RP-58025-FR	Rey <i>et al.</i> , 2010
Collège de Bambo Ouest	2012	RP-61593-FR	Rey et Cochery, 2012
Huit sites d'établissements scolaires	2012	RP-61170-FR	Rey <i>et al.</i> , 2012
Trois sites d'extension d'établissements scolaires	2013	RP-62972-FR	Rey <i>et al.</i> , 2013a
Extension de la préfecture de Mayotte	2013	RP-62965-FR	Rey <i>et al.</i> , 2013b
Centre Hospitalier de Mamoudzou	2013	RP-63175-FR	Rey <i>et al.</i> , 2013c
Lycée de Kwalé	2014	RP-63836-FR	Cochery <i>et al.</i> , 2014
Mesures réalisées sur les barrages pour le compte de la SIEAM	2018	Pas de rapport associé, voir annexe 1	
Dix sites de construction/extension d'établissements scolaires	2019	RP-68294-FR	Roullé <i>et al.</i> , 2019

Tableau 3 : Liste des études de site utilisées dans ce rapport par année de réalisation.

2.4 ANALYSE DES DONNÉES DE LA CRISE SISMO-VOLCANIQUE INITIÉE À MAYOTTE EN MAI 2018

Dans le cadre d'un stage de M2, une analyse poussée des signaux de mouvements forts issus de la crise sismo-volcanique initiée en Mai 2018 a été réalisée sur les stations sismologiques utilisées dans le cadre de la surveillance sismique du territoire, à savoir YTMZ, MILA, KNKL, MTSB et MCHI (Baillet, 2020). Ce travail a été poursuivi depuis pour compléter l'analyse sur les autres stations du réseau ReVoSiMa en fonctionnement au moment de l'étude (PMZI et R1EE) (Roullé *et al.*, 2021). La localisation des stations sismologiques indiquées dans ce chapitre est présentée sur la Figure 8.



Figure 8 : Localisation des stations sismologiques en opération lors de la crise sismo-volcanique de 2018 et traitées dans cette étude.

Cette analyse a confirmé 1) le fait que YTMZ puisse être considérée comme station de référence (sans effet de site notable) sur Mayotte et 2) l'importance des effets de site sur les autres stations, avec des amplifications observées au niveau des pics en accélération (PGA) variant de 1.4 pour MCHI à 4.9 pour MTSB. Pour 5 des stations analysées (MILA, KNKL, MTSB, PMZI et R1EE), ces coefficients sont supérieurs à ceux donnés par les coefficients de sol S des règles parasismiques (valeurs allant de 1.35 à 1.8, voir Tableau 2). Nous observons donc des amplifications importantes du mouvement sismique sur ces stations. Ces résultats sont néanmoins à nuancer puisque les données analysées couvrent principalement une plage de valeurs de PGA comprise entre 0.1 et 10 mg (avec peu de valeurs de mouvements forts). Un calcul de coefficient d'amplification a été réalisé en complément sur l'ensemble de la gamme de fréquences du mouvement sismique en suivant les travaux de Rey *et al.* (2002) : il donne des valeurs d'amplification de l'ordre de 1.2 (MCHI) à 3.8 (MILA), cohérentes avec les gammes d'amplification observée sur les PGA.

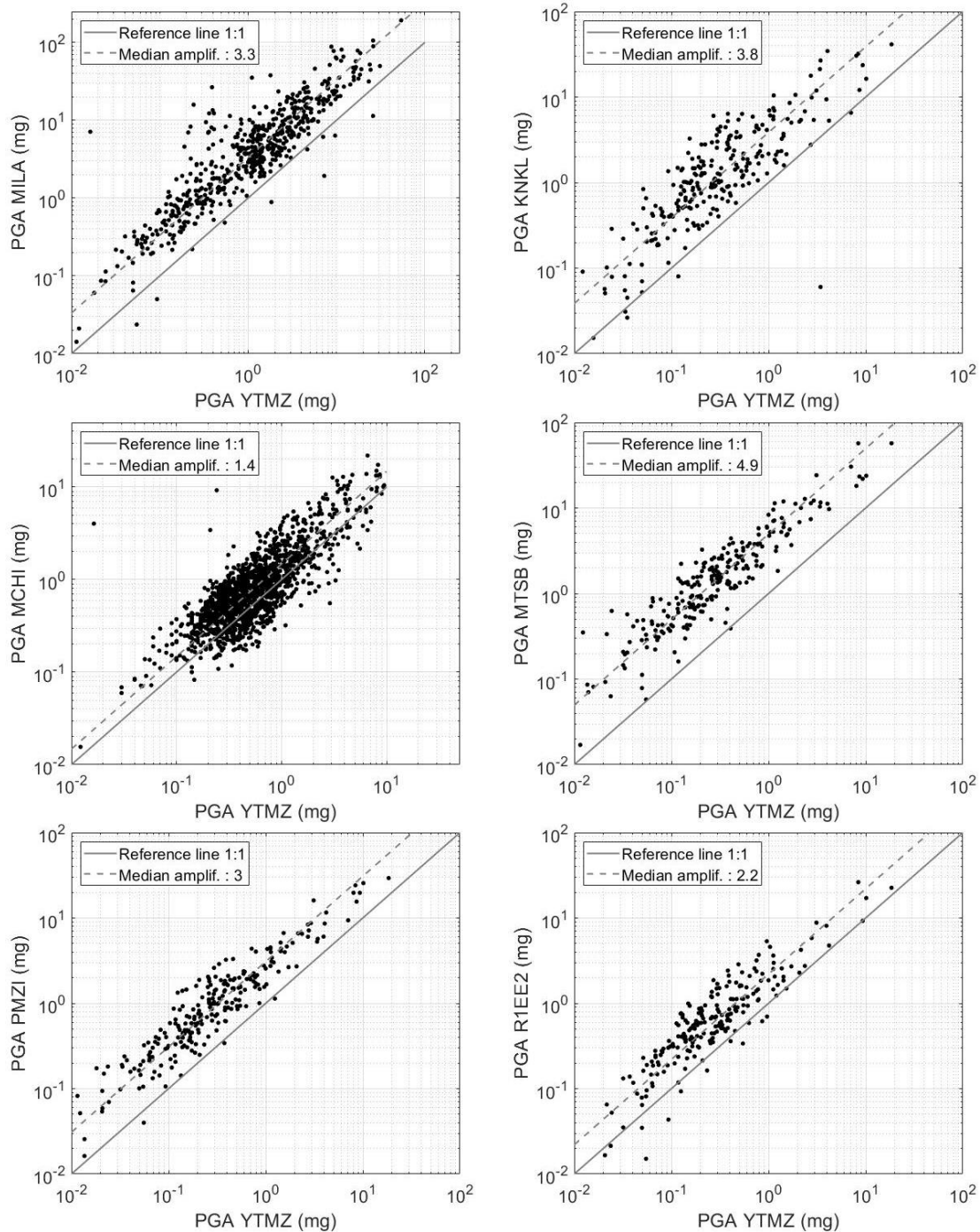


Figure 9 : Comparaison entre les PGA (Peak Ground Acceleration = pics en accélération) enregistrés à la station de référence YTMZ et les PGA enregistrés à la station considérée. Chaque graphique correspond à une station sismologique spécifique dont le nom est indiqué en ordonnée. Pour chaque graphique, les points noirs représentent la valeur de PGA pour chaque séisme enregistré, la droite grise indique la ligne de référence correspondant à $PGA_{YTMZ} = PGA_{station}$ et la droite en pointillés gris indique la droite d'amplification médiane. L'amplification médiane correspond au rapport entre le PGA à la station et le PGA à YTMZ : sa valeur est indiquée dans la légende. Cette figure est extraite des travaux de Roullé et al., 2021.

Les analyses de directivité du mouvement sismique réalisées montrent des effets complexes avec des fréquences de résonance variables en fonction de l'azimut considéré sur certaines stations (un exemple est montré sur la station MTSB, Figure 10). L'hypothèse avancée ici est que nous observons une combinaison d'effets liés à la topographie et d'effets liés à la présence de couches géologiques à faible vitesse en surface (formations altérées) comme indiqué par exemple dans les travaux de Graizer (2009). Si l'on considère le coefficient simplifié d'amplification topographique ST maximal de 1,4 préconisé dans les règles parasismiques pour tenir compte de ces effets aggravants, augmenté de 20 % en présence d'une couche lâche en surface, nous obtenons une amplification topographique potentielle de 1.68. En multipliant cette valeur avec celles des coefficients de sol S du Tableau 2 pour tenir compte à la fois de l'effet de site lithologique et topographique, nous retombons alors sur des valeurs comprises entre 2.268 (sol de classe B avec effet topographique) et 3.024 (sol classe E avec effet topographique), soit des valeurs du même ordre de grandeur que les coefficients d'amplification médians observés sur les stations sismologiques (Figure 9).

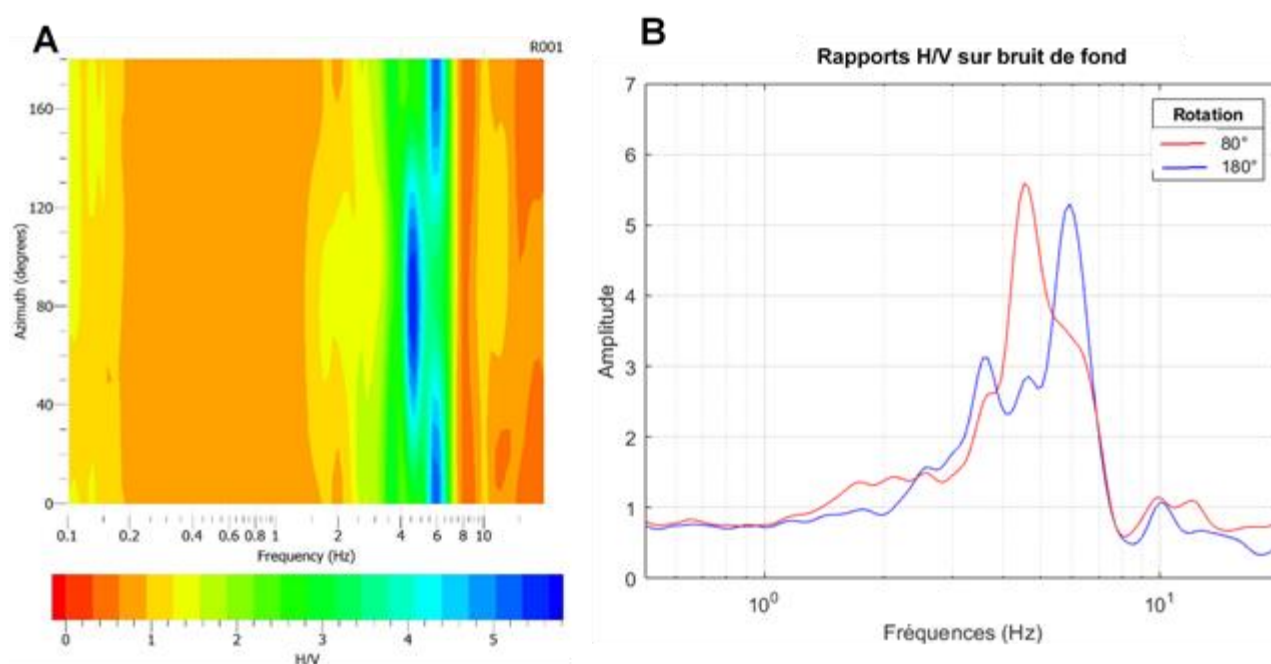


Figure 10 : Analyse directionnelle des rapports H/V de la station MTSB. La figure A donne le résultat de l'analyse sur l'ensemble des azimuts et montre le saut de fréquence de résonance à 40° et 120° (en bleu). La figure B donne les courbes H/V pour un azimut de 80° et de 180° et illustre le saut de fréquence de résonance observé sur la figure A. Cette figure est issue des travaux de stage de Marie Baillet (Baillet, 2020).

Au final, l'analyse des mouvements sismiques enregistrés lors de la crise sismo-volcanique initiée en Mai 2018 nous confirme à la fois l'importance des effets de site lithologiques liées à la géologie superficielle et l'importance de la prise en compte des effets topographiques. C'est la raison pour laquelle ces deux effets seront traités par la suite. Par ailleurs, bien que certains coefficients d'amplification observés sur les enregistrements soient supérieurs à ceux préconisés par les règles parasismiques en vigueur et même si des travaux de recherche complémentaires seront nécessaires pour comprendre complètement les phénomènes en jeu, nous considérons que, au premier ordre, les classes de sol EC8 et les spectres associés, sont utilisables sur le territoire mahorais. La cartographie des effets de site lithologique se fera donc selon les classes de sol EC8 en vigueur (Tableau 1).

3. Sites pilotes

Comme rappelé en introduction, la présente étude vise à proposer une méthodologie de révision des cartographies d'aléa sismique local (effets de site lithologiques, topographiques et liquéfaction) issues des atlas des aléas naturels avec une application opérationnelle sur 2 ou 3 sites pilotes choisis conjointement par le BRGM et la DEAL et couvrant une surface maximale de 12 km².

Le choix des sites pilotes a été fait en se basant sur les données suivantes:

- la carte géologique de l'île réalisée au 1/30 000 (Lacquement *et al.*, 2013) et sa notice associée (Nehlig *et al.*, 2013) ;
- les données géophysiques (H/V et MASW) acquises au sol lors des différentes études de site menées à travers l'île pour la détermination de l'aléa sismique local depuis 15 ans dont la liste exhaustive de ces études est donnée dans le Tableau 3 et la localisation est indiquée en Figure 11. Par la suite, ces données sont également appelées données géophysiques « sol » ;
- l'analyse des données sismologiques enregistrées lors de la crise sismo-volcanique initiée en 2018 sur les stations sismologiques à terre (voir chapitre 2.4) ;
- les données géotechniques et géologiques disponibles via la Banque de Données du Sous-Sol (BSS) ;
- les données des levés électromagnétiques hélicoptérés réalisés en 2010 (Auken *et al.* 2011) permettant d'accéder à des informations déterminantes sur les épaisseurs et la complexité des géométries des couches superficielles. Par la suite, ces données sont également appelées données « EM aéroportées ».

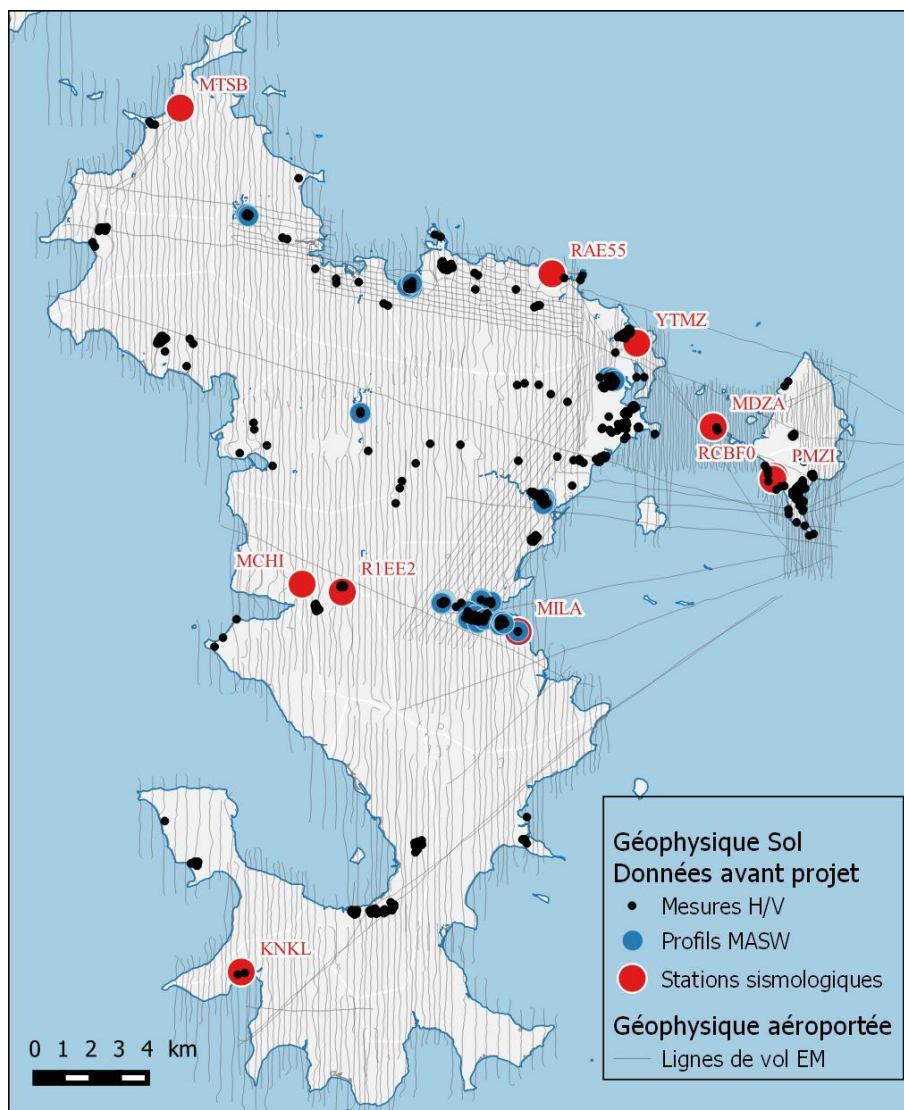


Figure 11 : Localisation des mesures géophysiques sol (H/V ou MASW) ou mesures EM hélicoptérées disponibles en début d'étude pour le choix des sites pilotes. La localisation des stations sismologiques sont indiquées pour rappel.

Les sites pilotes ont été choisis selon les critères suivants :

- la susceptibilité des sols en présence à présenter un effet de site lithologique en s'appuyant sur les études décrites dans les chapitres 2.3 et 2.4 ;
- la représentativité des formations géologiques en présence, notamment la présence de formations géologiques couvrant l'ensemble du profil d'altération type (allotérites, isaltérites, colluvions, alluvions) ;
- la disponibilité et la qualité des données géophysiques EM aéroportées en privilégiant au maximum les zones non urbanisées qui sont mal couvertes par cette méthode ;
- la disponibilité de données géophysiques sol (H/V et MASW), de logs géologiques ou de sondages géotechniques sur un même site afin de caler les interfaces d'intérêt à interpréter sur les données EM aéroportées ;

- l'accessibilité du site pour faciliter la réalisation de mesures géophysiques complémentaires au sol ;
- au moins un site couvrant la thématique liquéfaction avec, pour ce site, la disponibilité de données géotechniques utiles à cette thématique (essais).

Ces critères nous ont conduits à choisir les trois sites pilotes suivants (Figure 12) :

- le site de Longoni (Figure 13), qui a la particularité de disposer de données géophysiques EM aéroportées de bonne qualité et avec une résolution spatiale fine (distance entre les lignes de vol variant de 150 à 250 m dans les directions Nord-Sud et Est-Ouest), ce qui constitue le cas optimal pour l'utilisation de ces données ;
- le site de Dembeni (Figure 14), qui présente une zone alluvionnaire de grande étendue intéressante pour le volet liquéfaction, une variabilité de la distribution spatiale des données EM aéroportée (peu de données sur la zone urbanisée à l'Est) avec une acquisition réalisée à maille lâche (distance entre les lignes de vol variant de 150 à 750 m dans la direction Est-Ouest), et des données géophysiques sol et géotechniques déjà disponibles. Ce site est représentatif des conditions standards attendues pour réaliser la cartographie des classes de sol ;
- le site de Combani, qui présente une géologie particulière avec la présence potentielle d'une forte épaisseur d'altération (paléosurface de Combani).

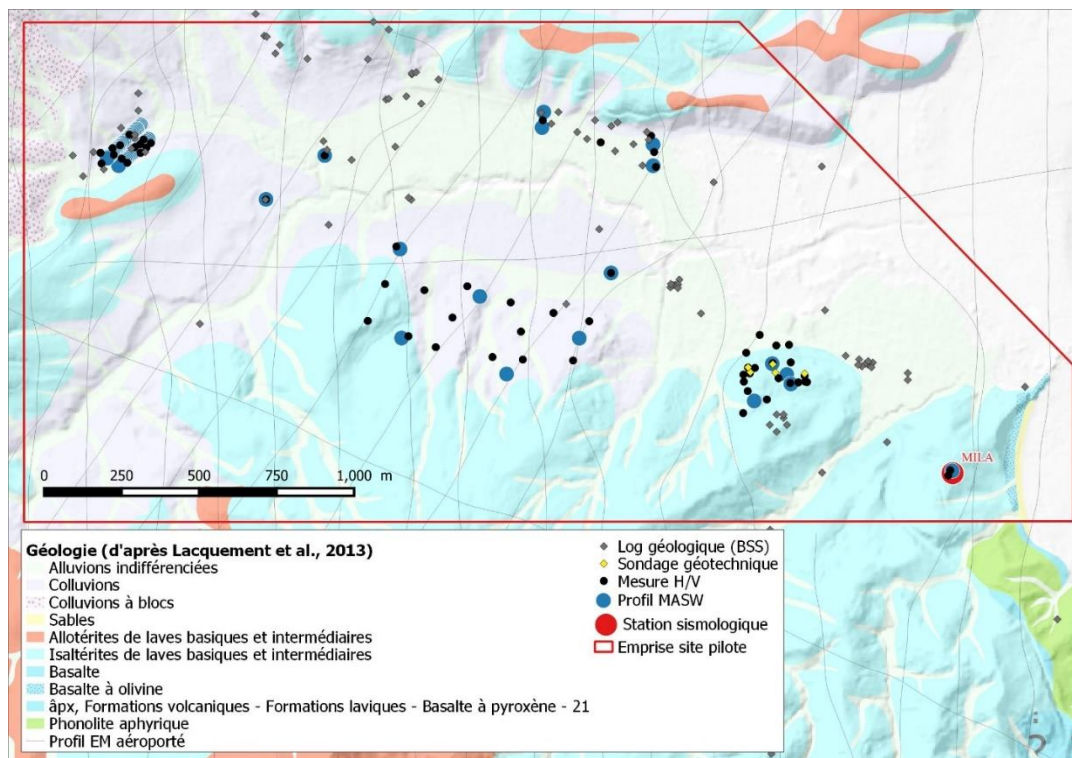
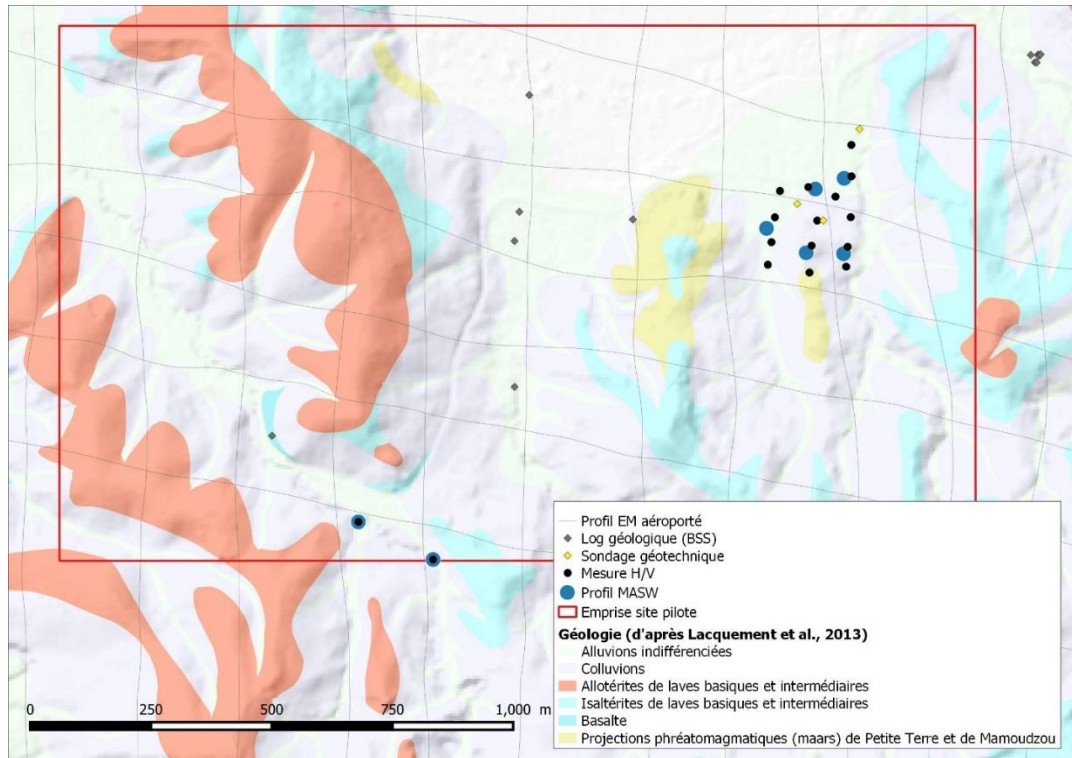
L'ensemble des paramètres ayant présidé au choix des sites pilotes est synthétisé dans le Tableau 4.



Figure 12 : Localisation générale des sites pilotes de l'étude.

Critères de choix	Longoni	Dembeni	Combani
Susceptibilité à l'effet de site lithologique	Oui	Oui	Supposée Non connue sur le site mais extrapolée d'après les données issues de la station sismologique MCHI située sur le même type de formation géologique
Géologie	Profil d'altération complet sur le site Présence de roche saine (basalte) sous le profil d'altération Présence d'une grande zone alluvionnaire d'intérêt pour le volet liquéfaction	Profil d'altération complet sur le site Présence d'une grande zone alluvionnaire d'intérêt pour le volet liquéfaction	Formation géologique spécifique avec présence d'une forte épaisseur d'altération (paléosurface de Combani) Un forage profond disponible
Données géophysiques EM héliportées	Distance entre les lignes de vol variant de 150 à 250 m dans la direction Nord-Sud et Est-Ouest Conditions optimales	Distance entre les lignes de vol variant de 150 à 750 m dans la direction Est-Ouest Peu de données au niveau d'Iloni, à l'Est du site (zone urbanisée) Conditions standard	Distance entre les lignes de vol variant de 150 à 250 m dans la direction Est-Ouest Peu de données au niveau de Combani, au Sud du site (zone urbanisée) Conditions standard
Données géophysiques sol	Quelques données disponibles	Beaucoup de données disponibles : peu de mesures complémentaires à réaliser Station sismologique d'Iloni dans le périmètre (MILA)	Peu de données disponibles Mesures complémentaires à réaliser (site prioritaire pour la mission géophysique)
Données géotechniques	Quelques données disponibles	Quelques données disponibles	Pas de donnée
Accessibilité	Oui	Oui	Oui
Etude(s) de référence sur le site	RP-68294-FR	RP-54467-FR RP-54960-FR RP-56431-FR RP-61770-FR RP-68294-FR	Etude retenue collinaire SIEAM

Tableau 4 : Synthèse des paramètres ayant présidé au choix des 3 sites pilotes.



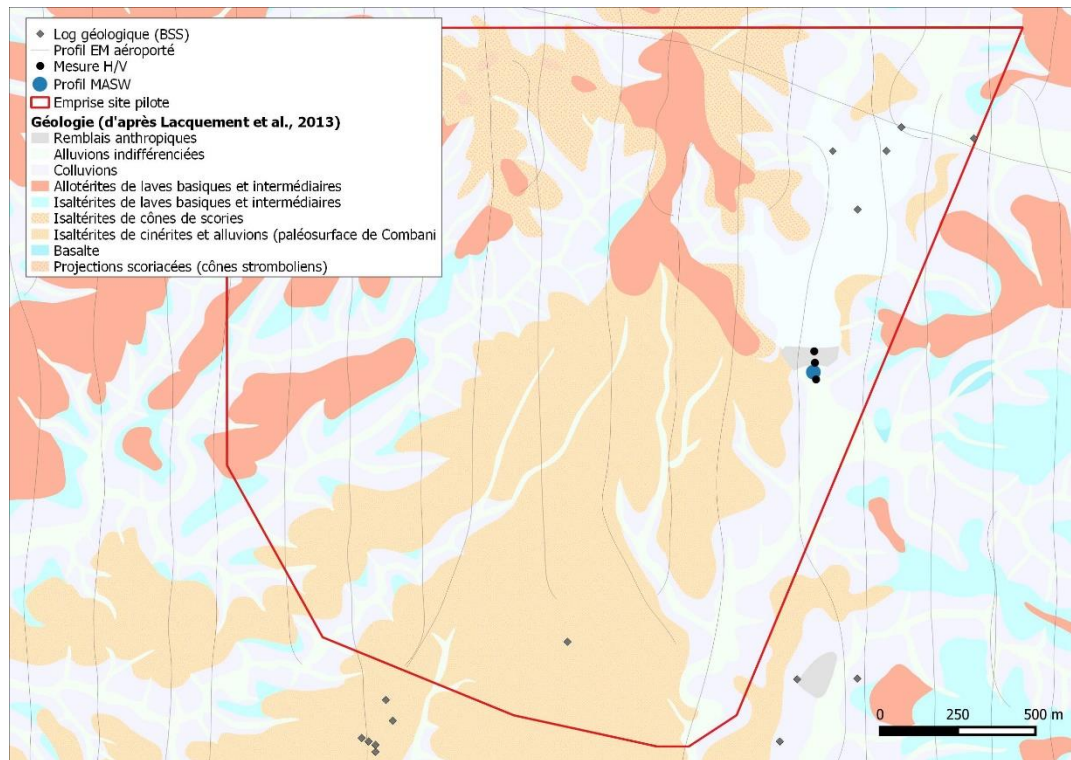


Figure 15 : Configuration du site pilote de Combani avec localisation des données géologiques, géotechniques et géophysiques disponibles avant projet.

4. Méthodologie de cartographie des effets de site lithologiques à partir de données EM aéroportées

4.1 DONNÉES SOURCES

Pour rappel, la cartographie des effets de site lithologique se basera sur les classes de sol issues de la réglementation en vigueur (Tableau 1). Pour définir ces classes de sol, il est nécessaire de connaître la nature des formations géologiques superficielles, leur épaisseur ainsi que leurs caractéristiques géomécaniques, notamment via le paramètre $V_{S,30}$. Ce travail se fait à l'aide de l'ensemble des données géologiques, géotechniques, géophysiques héliportées et géophysique sol disponibles sur les sites pilotes et décrites dans ce chapitre. Pour rappel, la nouveauté du travail présenté ici vient de l'utilisation des données EM aéroportées dans l'estimation des effets de site lithologiques. En effet, les études actuelles se basent essentiellement sur les données géologiques, géotechniques, et géophysique sol du type H/V et MASW (voir par exemple les travaux réalisés par le BRGM sur les Antilles depuis 2011).

4.1.1 Cartographie des formations superficielles

Réalisée en 2013, la carte géologique de Mayotte à 1/30 000 fournit des informations concernant la nature lithologique des terrains affleurant sur l'île de Mayotte (Lacquement *et al.*, 2013 ; Nehlig *et al.*, 2013). Sur ce document, les différentes formations géologiques ont été cartographiées tout en apportant une information sur le degré d'altération des roches autochtones (en « place ») ainsi que sur la nature des formations allochtones (alluvions et formations de pente) qui masquent les terrains autochtones. Néanmoins, les caissons représentés sur la carte géologique de Mayotte ont vocation à représenter les roches, formations ou régolithes constituant l'assise des terrains étudiés, et font souvent abstraction du premier mètre du sol.

Plus récemment (2020), un document cartographique de résolution plus fine à 1/10 000 permettant de restituer les variations lithologiques présentes en surface a été produit dans le cadre du projet EROMAY (Prognon *et al.*, 2020). Ce document a été réalisé en suivant une méthodologie spécifique alliant acquisitions de terrain et un important travail interprétatif prenant en compte des données de géophysique aéroportée. Sur ce document cartographique ont été distinguées de manière plus précise les formations autochtones ainsi que les formations allochtones :

Les formations autochtones correspondent à l'ensemble des roches constituant le « socle » volcanique de l'île de Mayotte (ensembles laviques, pyroclastiques, volcanoclastiques et intrusifs) caractérisé selon son degré d'altération. Un profil d'altération est divisé en cinq horizons (Thiery *et al.* 2019) selon le degré de fracturation, d'oxydation et de cohésion et de transformation de la roche. Il correspond à une dégradation de la roche décrite sous forme d'horizons allant de la roche saine (H1) jusqu'à sa transformation totale en « allotérite » (H5), c'est-à-dire un matériel dans lequel il n'est plus possible d'identifier la roche initiale. L'ensemble des roches ayant subi une altération météoritique « partielle » sont regroupées sous le terme générique « isaltérite »

Les formations allochtones correspondent à des dépôts où le matériel qui compose la formation a subi un transport plus ou moins important, que ce soit sous l'effet de l'eau (ex : les alluvions), de la gravité (ex : les colluvions), ou de l'homme (ex : les dépôts anthropiques). Dans l'immense majorité des cas, ces formations allochtones recouvrent les formations autochtones du vieux « socle » volcanique de l'île de Mayotte. Elles sont classées selon le processus qui a entraîné leur formation, et peuvent être affectées par des degrés variables d'altération.

Pour chaque entité décrite en carte, la description des terrains concernés permet d'avoir une idée des différents états de la roche suivant son altération, ou des différents faciès lithologiques résultant d'un contexte de remobilisation et/ou dépôt. Or ces variations sont parfois trop importantes au sein d'un même caisson ne permettant pas une traduction directe de celui-ci en termes de lithologie, une variabilité importante de lithologie pouvant être contenu au sein d'un seul caisson. Pour des études plus locales, l'utilisation de ces cartes doit être appuyée par l'interprétation des données EM héliportées afin d'apporter des informations sur les relations géométriques entre les différentes formations ainsi que sur leur épaisseur.

4.1.2 Données EM héliportées

4.1.2.1 Principe de Mesure

La théorie de l'électromagnétisme (EM) appliquée à la géophysique est documentée dans différents ouvrages tels que Ward et Hohmann (1988) et Nabighian et Macnae (1991).

Les grands principes de l'EM se basent sur les équations de Maxwell (XIX^e siècle), et plus particulièrement sur celles du domaine diffusif (i.e. les courants de conduction dominant) dans le cas d'un levé EM en domaine temporel. Ces équations permettent d'expliquer la diffusion des courants dans le sous-sol suite à une excitation externe ; diffusion qui dépendra, au premier ordre, de la conductivité/résistivité électrique du milieu, qui sera donc le paramètre imagé.

Le système de mesure utilisé est le système SkyTEM® (<http://skytem.com>). Il est composé d'une boucle émettrice, qui permet l'excitation du sous-sol et d'une boucle réceptrice, pour mesurer la réponse du sous-sol. Il comporte également, un générateur, comme source d'énergie, ainsi que différents instruments de navigation tels que GPS, inclinomètres et altimètres laser afin de positionner à tout moment la mesure dans l'espace (Figure 16). On note également la présence d'un magnétomètre, enregistrant le champ magnétique naturel, à l'avant du système ; les mesures magnétiques n'ont pas été utilisées dans la présente étude et ne sont donc pas discutées plus en détail. La particularité du système SkyTEM® est d'émettre deux moments magnétiques différents (fonction du nombre de tours, de l'aire de la boucle d'émission et de l'intensité du courant injecté) : un moment, dit faible, qui assure une résolution en proche surface (dans la gamme ~0-50 m) et un moment, dit fort, fournissant une information à des profondeurs plus importantes. Ces deux moments regroupés dans un même point de mesure (un sondage électromagnétique) et sont interprétés conjointement.

Lors d'une mesure EM, un courant d'une intensité donnée est injecté dans la boucle émettrice afin de créer un champ magnétique, dit primaire (d'après l'équation de Maxwell Ampère). Ce même courant est ensuite coupé le plus nettement possible, entraînant alors une variation du champ primaire. Celle-ci se traduit par l'induction de courants de Foucault dans le sous-sol (d'après l'équation de Maxwell Faraday), créant, à leur tour, un champ magnétique, dit secondaire, et mesuré au niveau de la boucle réceptrice. Les courants se dissipant dans le sous-sol avec le temps (effet Joule), la donnée recueillie informera donc sur la décroissance du champ secondaire en fonction du temps, celle-ci étant directement liée à la conductivité du milieu. La profondeur d'investigation de la méthode, de l'ordre de 300 m en moyenne dans le cadre de la mission menée à Mayotte, dépend de l'intensité du courant injecté, de l'aire de la boucle d'émission, du niveau de bruit de la mesure ainsi que de la conductivité du sous-sol.

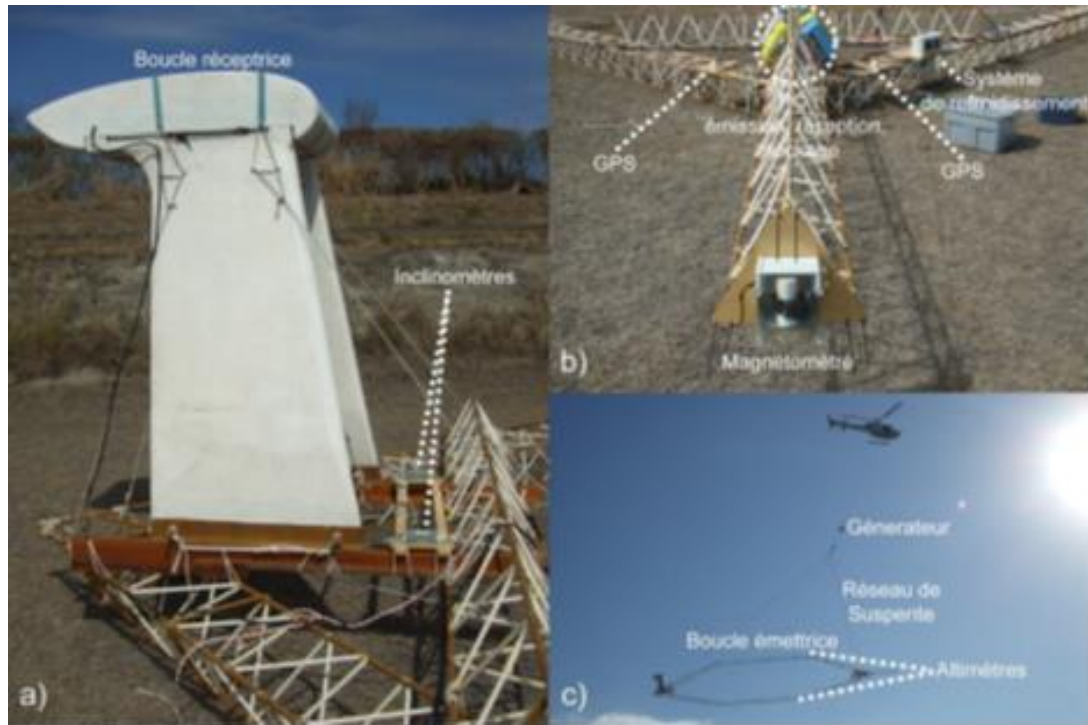


Figure 16 : vues du système SkyTEM® ; (a) arrière et (b) avant de la boucle émettrice et (c) en plein vol.

4.1.2.2 Mesures sur Mayotte

Le levé EM de l'île de Mayotte, effectué par l'université d'Aarhus en partenariat avec le BRGM, s'est déroulé du 06 octobre au 10 novembre 2010. Il comprend 3 000 km sous la forme de lignes de vol nord-sud espacées de 200 m. Des zones d'intérêt pour les risques naturels ou l'hydrogéologie ont également fait l'objet d'une densification. Celle-ci a consisté soit en l'acquisition de données supplémentaires selon une direction différente, soit en un resserrement local des lignes de vol. Lors d'un vol, la mesure est prise sans discontinuer et à pas régulier, ce qui, dans le cas du levé de l'île de Mayotte, représente en moyenne un point de donnée tous les 30 m environ, suivant les lignes de vol

4.1.3 Données géophysiques sol

Comme souligné précédemment, la cartographie des classes de sol est basée sur les classes de sol EC8 en vigueur (Tableau 1). Pour déterminer le paramètre $V_{S,30}$ nécessaire à cette classification, nous nous sommes basés les mesures MASW qui permettent de définir les profils de vitesse d'ondes S (V_S) avec la profondeur et sur les mesures H/V qui permettent de mesurer la fréquence de résonance du sol, elle-même liée à l'épaisseur de la couche superficielle meuble et sa vitesse d'ondes S (voir paragraphe 2.1.3).

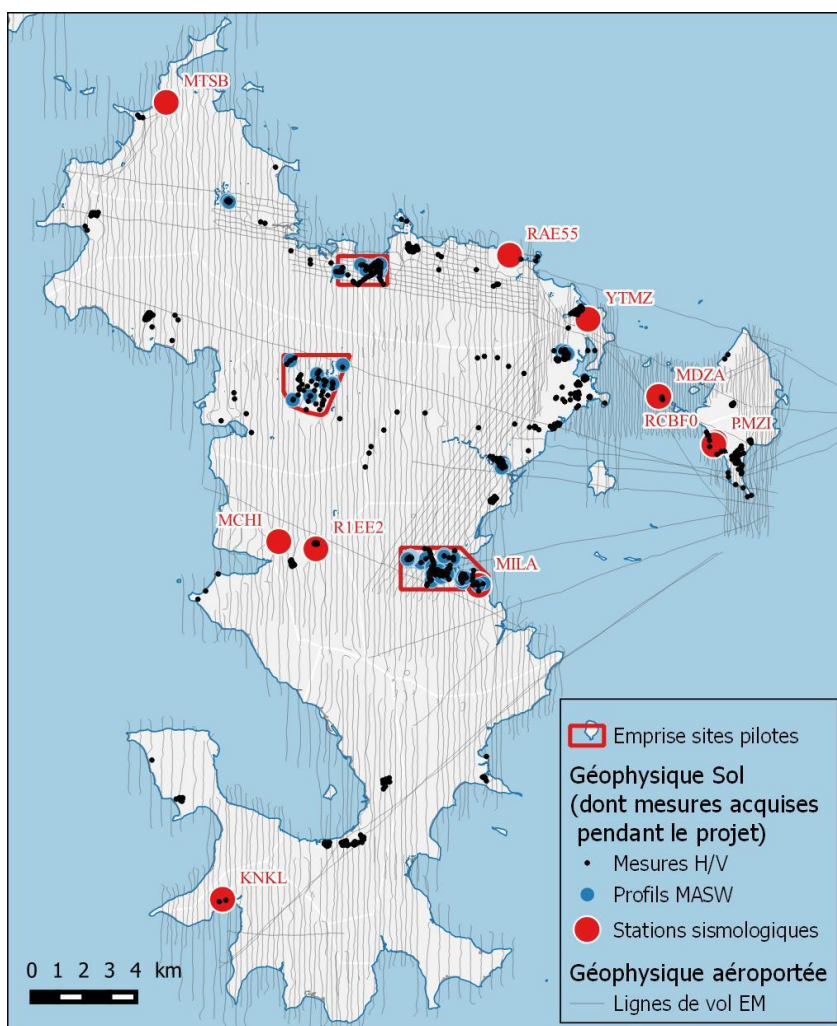
Pour analyser au mieux les formations géologiques en présence, nous avons collecté l'ensemble des données MASW et H/V acquises depuis les premières études d'aléa sismique local réalisées en 2002, à savoir le microzonage de Mamoudzou (Sabourault *et al.*, 2002) et l'ensemble des études de site listées dans le Tableau 3.

Nous avons également réalisé deux campagnes de géophysique sol pour compléter les données existantes sur les 3 sites pilotes :

- une campagne de mesures H/V du 20 au 26 Novembre 2019 sur les 3 sites ;
- une campagne de mesures MASW du 28 septembre au 2 octobre 2020 sur les 3 sites. À noter que, pour chaque profil MASW réalisé, une mesure H/V a été réalisée sur le même site ;
- une campagne de mesures H/V complémentaires du 24 au 26 Août 2020 sur le site de Longoni.

Au total, ce sont 92 mesures H/V et 15 profils MASW qui ont été acquis dans le cadre de ce projet. Les localisations et résultats de traitement de ces nouvelles mesures sont présentées en annexe.

Au final, ce sont plus de 550 mesures H/V et 60 profils MASW qui ont pu être analysés sur l'ensemble de l'île (Figure 17).



4.1.4 Données géotechniques

Il existe des corrélations entre certains paramètres géotechniques et les valeurs de V_s . Il s'agit notamment des sondages pénétrométriques (paramètre N_{SPT} du Tableau 1) ou des sondages pressiométriques (pression limite et module pressiométrique) utilisés dans les anciennes règles parasismiques PS92 (applicables jusqu'au 1^{er} janvier 2014 sous conditions). Les données géotechniques disponibles au moment du projet étant très peu nombreuses sur les sites pilotes, elles ont été consultées ponctuellement pour vérification mais n'ont pas fait l'objet d'une analyse systématique pour la thématique des effets de site lithologiques. En revanche, une analyse plus poussée de ces données a été réalisée pour le volet *aléa* liquéfaction (voir chapitre 7).

4.2 IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES FORMATIONS GÉOLOGIQUES SUSCEPTIBLES DE PRÉSENTER UN EFFET DE SITE LITHOLOGIQUE

Nous avons réalisé une étude statistique sur l'ensemble des données H/V et MASW collectées sur le territoire mahorais via le calcul de la distribution des valeurs de fréquence de résonance f_0 et du paramètre $V_{s,30}$ en fonction de la géologie superficielle définie dans le cadre de la cartographie EROMAY. L'objectif de cette analyse est d'identifier les formations susceptibles de présenter un effet de site lithologique (c'est-à-dire avec des fréquences de résonance non nulles et des valeurs de $V_{s,30}$ supérieures à 800 m/s) et d'établir la variabilité des deux paramètres f_0 et $V_{s,30}$ pour les différentes formations géologiques présentes sur l'île. Seules les formations géologiques présentant plus de 10 échantillons de f_0 ont été représentées.

En ce qui concerne la distribution de la fréquence de résonance f_0 en fonction de la géologie superficielle (Figure 18 et Tableau 5), les résultats indiquent que l'ensemble des formations géologiques échantillonnées (soit 79 % du territoire mahorais) sont susceptibles de présenter un effet de site puisque, pour chaque géologie présentée sur la figure, plus de 85 % de la distribution des valeurs de f_0 présente des valeurs non nulles. Nous constatons aussi que, pour la majorité des géologies représentées, les valeurs médianes de f_0 se situent entre 2 et 3,5 Hz, ce qui correspond à des interfaces cibles de profondeur comprise entre 20 et 40 m (en considérant une V_s moyenne de l'ordre de 250 à 300 m/s dans la couche superficielle d'après l'équation 2 et la Figure 19). Seuls les colluvions (C et Cb) présentent des fréquences de résonance plus élevées (médiane supérieure à 4 Hz), indiquant des épaisseurs de couche moindres et/ou des vitesses V_s dans la couche plus élevées. Si l'on considère une valeur de V_s de l'ordre de 350 m/s (d'après la Figure 19), nous obtenons une profondeur d'interface cible de l'ordre de 15 à 20 m.

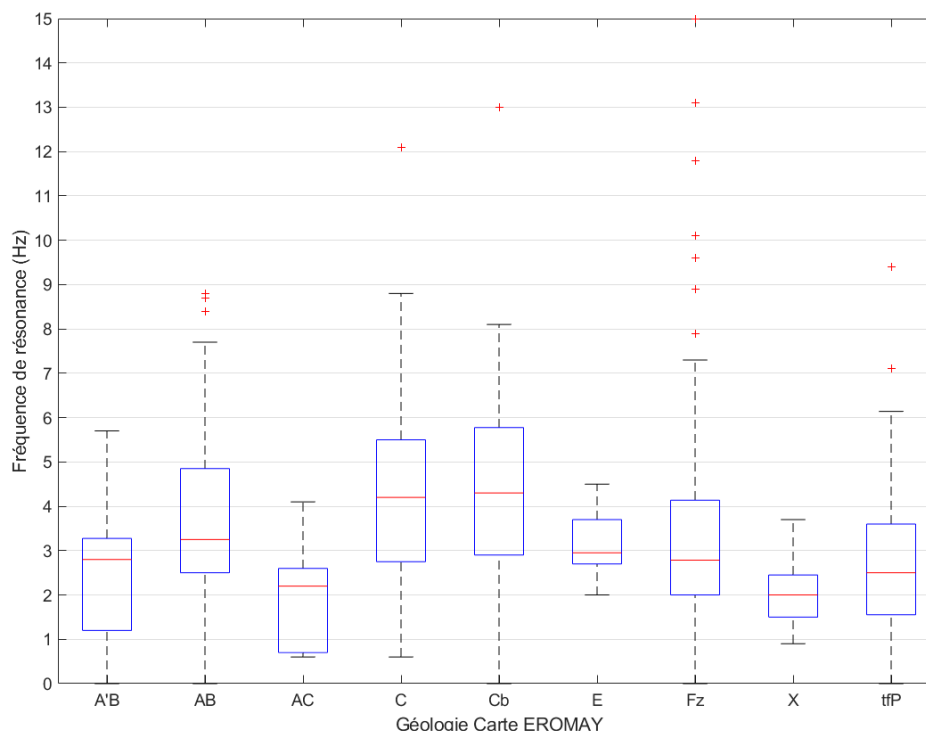


Figure 18 : Distribution de la fréquence de résonance f_0 en fonction de la géologie superficielle (EROMAY). Les codes des formations géologiques indiqués en abscisse sont explicités dans le Tableau 5. Pour chaque boîte à moustaches (en bleu), la ligne rouge indique la valeur médiane, les bornes de la boîte indiquent les 25ème et 85ème percentiles. Les moustaches (pointillées) s'étendent sur une fourchette de valeurs équivalente à 1,5 fois l'intervalle interquartile, et les valeurs aberrantes sont représentées par des croix rouges.

En ce qui concerne la distribution du paramètre $V_{s,30}$ en fonction de la géologie superficielle (Figure 19 et Tableau 5), les résultats indiquent que les valeurs de $V_{s,30}$ sont assez homogènes d'une géologie à l'autre avec des valeurs médianes comprises entre 254 et 305 m/s pour les allotérites (A'B) et les isaltérites (AB) de laves basiques et intermédiaires ainsi que pour les isaltérites correspondant à la paléosurface de Combani (AC) ainsi que pour les alluvions (Fz). D'après cette analyse, l'essentiel de ces formations se situeraient dans la classe C des EC8. Pour les colluvions (C et Cb), les valeurs de $V_{s,30}$ sont plus rapides avec des valeurs médianes oscillant entre 332 et 360 m/s, ce qui situeraient ces formations à cheval entre les classes B et C de l'EC8. L'étirement des valeurs de $V_{s,30}$ pour le quantile Q75 observée sur les isaltérites (AB) et les alluvions (Fz) est probablement lié à des variations d'épaisseur de couche en bord de zone, phénomène qui a tendance à tirer les valeurs de $V_{s,30}$ vers le haut (avec la prise en compte de la couche sous-jacente à plus forte vitesse V_s dans le calcul du paramètre $V_{s,30}$). Ce point sera à approfondir dans la phase 2 du projet lors de l'extrapolation de la méthodologie à l'ensemble de l'île puisqu'il faudrait identifier ces zones à plus forte valeur de $V_{s,30}$ qui pourraient basculer d'une classe de sol C à une classe de sol B. Il est également à noter que la classe D n'est quasiment pas représentée dans ces distributions, hormis pour quelques points situés dans les remplissages de l'ancien cratère de Kaweni à Mamoudzou.

Les valeurs de $V_{s,30}$ observées à Mayotte sur les formations volcaniques altérées sont comparables à ce qui est observé à Hawaï par Nelson *et al.* (2019) ou Von Voigtlander *et al.* (2018) sur des basaltes altérés soumis à de fortes précipitations. Il serait intéressant en phase 2 de ce travail de comparer les valeurs de V_s obtenues ici à celles observables au Sud de l'île où la pluviométrie est la moins forte.

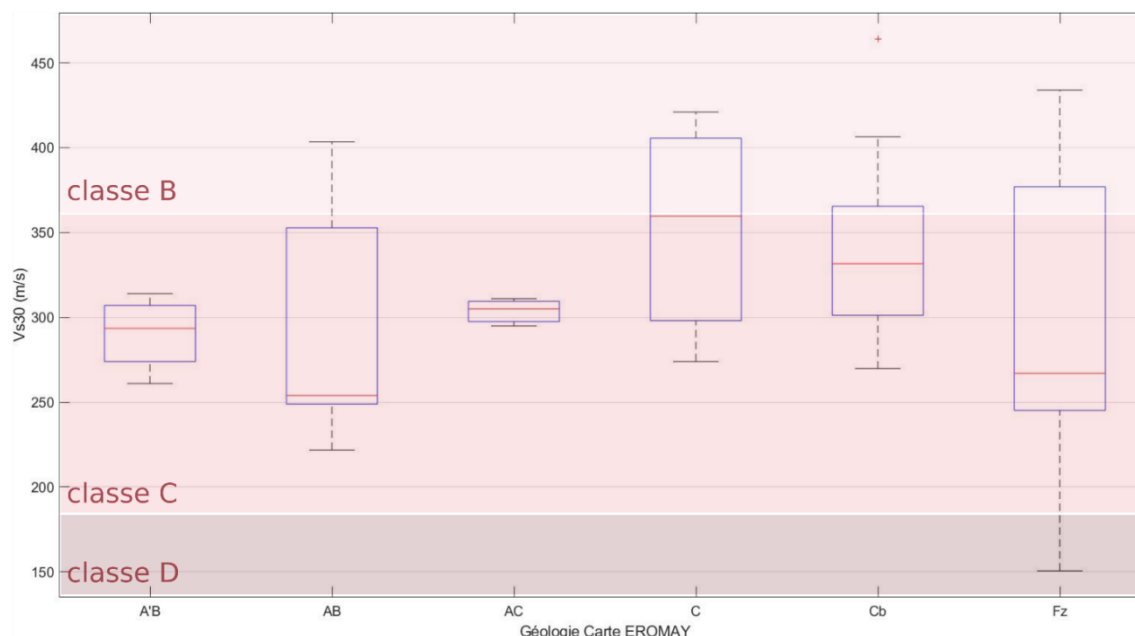


Figure 19 : Distribution du paramètre $V_{s,30}$ en fonction de la géologie superficielle (EROMAY). Les codes des formations géologiques indiqués en abscisse sont explicités dans le Tableau 5. Le descriptif des graphiques est le même que sur la figure précédente. Les classes de sol EC8 sont indiquées pour rappel. A noter que la classe E n'est pas indiquée sur cette figure car elle est définie également en fonction de l'épaisseur de la couche superficielle.

Géologie	Code	f_0 (nombre)	f_0 (Q25)	f_0 (Q50)	f_0 (Q75)	$V_{s,30}$ (nombre)	$V_{s,30}$ (Q25)	$V_{s,30}$ (Q50)	$V_{s,30}$ (Q75)
Remblais anthropiques	X	23	1.5	2.0	2.4	1	-	-	-
Allotérites de laves basiques et intermédiaires	A'B	43	1.2	2.8	3.3	4	274	293	307
Isaltérites de laves basiques et intermédiaires	AB	80	2.5	3.2	4.8	7	249	254	353
Isaltérites de cinérites et alluvions (Paléosurface de Combani)	AC	40	0.7	2.2	2.6	3	297	305	309
Colluvions	C	49	2.7	4.2	5.5	7	298	360	406
Colluvions à blocs	Cb	71	2.9	4.3	5.8	24	301	332	365
Eboulis	E	10	2.7	2.9	3.7	0	-	-	-
Alluvions indifférenciés	Fz	203	2.0	2.8	4.1	16	245	267	377
Projections phréatomagmatiques de Petite Terre et Mamoudzou	tfP	62	1.5	2.5	3.6	0	-	-	-

Tableau 5 : Synthèse des valeurs de distributions statistiques obtenues pour la fréquence de résonance f_0 et le paramètre $V_{s,30}$ en fonction de la géologie superficielle (EROMAY). Les valeurs indiquées dans le tableau pour les 2 variables étudiées sont : nombres d'échantillons, valeurs pour les quantiles Q25, Q50 et Q75.

Au final, l'analyse de la distribution des paramètres f_0 et $V_{s,30}$ en fonction de la géologie montre que :

- l'ensemble des formations échantillonnées (soit 79% du territoire) sont concernées par les effets de site lithologiques ;
- la géologie superficielle telle qu'elle est décrite dans la cartographie EROMAY ne semble pas être le paramètre discriminant principal en termes de réponse sismique, c'est-à-dire que les valeurs de f_0 et $V_{s,30}$ sont assez stables, quelle que soit la géologie considérée (hors colluvions) avec des valeurs médianes de l'ordre de 2 à 3 Hz pour f_0 et 254 à 305 m/s pour $V_{s,30}$;
- les colluvions (C et Cb) présentent des caractéristiques légèrement différentes avec des fréquences de résonance plus hautes (4.2-4.3 Hz en médiane) et des valeurs de $V_{s,30}$ plus élevées (332-360 m/s en médiane) ;
- les distributions de $V_{s,30}$ montrent que l'ensemble des formations échantillonnées pourraient être associées majoritairement à des classes de sol C voire B pour les colluvions notamment (hors considération d'épaisseur qui permettraient de distinguer également la classe E). La classe de sol D est très peu représentée dans notre échantillonnage. La connaissance de l'épaisseur des couches superficielles va être un élément déterminant pour la classification des sols selon l'EC8 et la distinction entre les classes B, C et E ;
- les profondeurs des interfaces cibles responsables des effets de site lithologiques seraient de l'ordre de 20 à 40 m hors colluvions et 15 à 20 m pour les colluvions.

4.3 ANALYSE DES DONNÉES EM

4.3.1 Retraitement des lignes

Les données acquises dans le secteur étudié dans le cadre de ce projet ont été retraitées afin d'optimiser l'imagerie. Un traitement basé sur l'utilisation de la décomposition en valeurs singulières a été utilisé (Reninger *et al.*, 2020). Ce traitement permet de « débruiter » le jeu de données tout en conservant la donnée aussi brute que possible. Nous récupérons également toute donnée exploitable, non acquise sur les lignes de vols mais provenant des différents allers-retours de l'hélicoptère sur la zone. Ce traitement est complété par une édition manuelle afin de supprimer le bruit et de conserver le maximum de données exploitables.

4.3.1.1 Pré-traitement des données

Le but du pré-traitement est de préparer les données à l'inversion et de les adapter à l'algorithme utilisé. En pratique, le traitement des données acquises comprend plusieurs étapes :

- le traitement des données de navigation (GPS, d'altitude et d'attitude de la boucle) ;
- le filtrage des données TDEM ;
- l'édition manuelle des données TDEM.

Le traitement des données de navigations a été précédemment évoqué, les deux autres étapes sont des traitements réalisés dans ce secteur spécifiquement pour cette étude.

La mesure EM est extrêmement sensible aux champs EM « ambiants » aussi bien naturels qu'artificiels, ces derniers induisant un bruit sur la donnée. Comme source naturelle de bruit, on peut citer les « spherics », ondes EM issues de l'activité orageuse, se propageant dans l'ionosphère ; les sources artificielles de bruit comprennent, quant à elles, toutes installations humaines interagissant avec ou produisant un champ électromagnétique. Afin de garder

uniquement les mesures fiables, il est donc nécessaire de les filtrer dans le but de « débruiter » le jeu de données. Le traitement appliqué par le BRGM est basé sur l'utilisation de la décomposition en valeurs singulières (Reninger *et al.*, 2011, 2015).

Certains bruits persistent car ils sont très difficiles à détecter au moyen de procédures numériques : une édition manuelle des données TDEM a donc complété les précédents traitements. Une inspection systématique des décroissances mesurées et leur édition manuelle ont été réalisées par le BRGM sur la zone d'étude. Cela permet également de récupérer davantage de données par rapport au traitement réalisé par le prestataire à la fin de l'acquisition en 2010.

4.3.1.2 Inversion et préparation des données

Le principe de l'inversion en géophysique est de retrouver les propriétés physiques du sous-sol à l'origine des différents signaux mesurés (i.e. ici les décroissances EM), affectés par les caractéristiques de celui-ci. Pour ce faire, il est nécessaire de trouver le modèle schématisant le sous-sol qui minimise la différence entre les données mesurées et celles prédites par la théorie ; celui-ci est obtenu par itération de modélisations EM et comparaisons à la donnée mesurée. Les modèles pris en considération à cette étape permettent donc d'imager les contrastes de résistivité dans le sous-sol.

Dans le cadre de cette étude, l'inversion utilisée considère des modèles 1D (selon la profondeur) constitués de n couches, chacune caractérisée par une épaisseur et une résistivité. L'inversion, dite « Smooth », a été réalisée avec le logiciel Aarhus Workench en considérant 30 couches entre 0 et 400 m de profondeur ; l'épaisseur des couches augmentant de façon logarithmique avec la profondeur et la couche la plus fine ayant une épaisseur de 3 m. Seule la résistivité peut varier pendant le processus d'inversion. Ce type d'inversion a l'avantage d'être moins dépendant des a priori définis pour initialiser le calcul (i.e. reflétant notre appréhension de la géologie), mais il a le désavantage d'imager des variations lissées de la résistivité selon la profondeur. Afin de stabiliser le processus, des contraintes spatiales entre les différentes couches des différents modèles sont également appliquées lors de l'inversion (cf. Spatially Constrained Inversion ; Viezzoli *et al.*, 2008). À la fin de cette inversion, la profondeur d'investigation de chaque mesure est également évaluée afin de calculer une limite basse (hypothèse pessimiste ; profondeur d'investigation la plus faible) et une limite haute (hypothèse optimiste ; profondeur d'investigation la plus importante). À l'issue de l'étape d'inversion, nous obtenons donc, à l'emplacement de chaque mesure, un modèle 1D constitué de 30 couches et défini par 30 épaisseurs et résistivités sensé rendre compte des contrastes de résistivité existants en subsurface.

La Figure 20 présente un exemple de modèle obtenu par inversion, la coloration étant directement liée à la valeur de résistivité en Ohm.m.

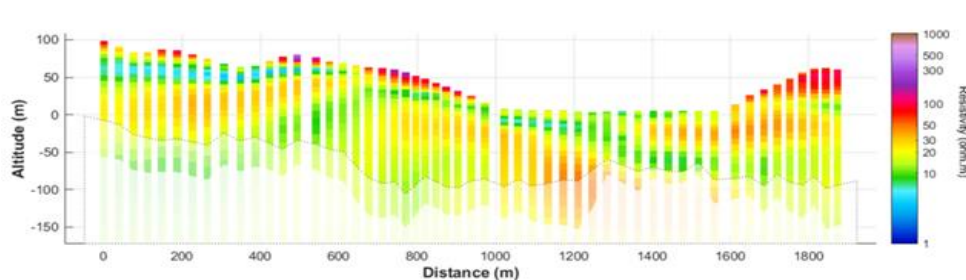


Figure 20 : Exemple de sondages de résistivité obtenus après inversion. La profondeur d'investigation de la méthode EM est représentée par une tranche en légèreté reflétant l'incertitude obtenue sur ce paramètre et définie par une limite haute et une limite basse (pointillé), sous la limite haute, la transparence appliquée étant nettement plus importante.

La Figure 21 localise les données qui ont été retraitées et analysées dans le cadre de cette étude.

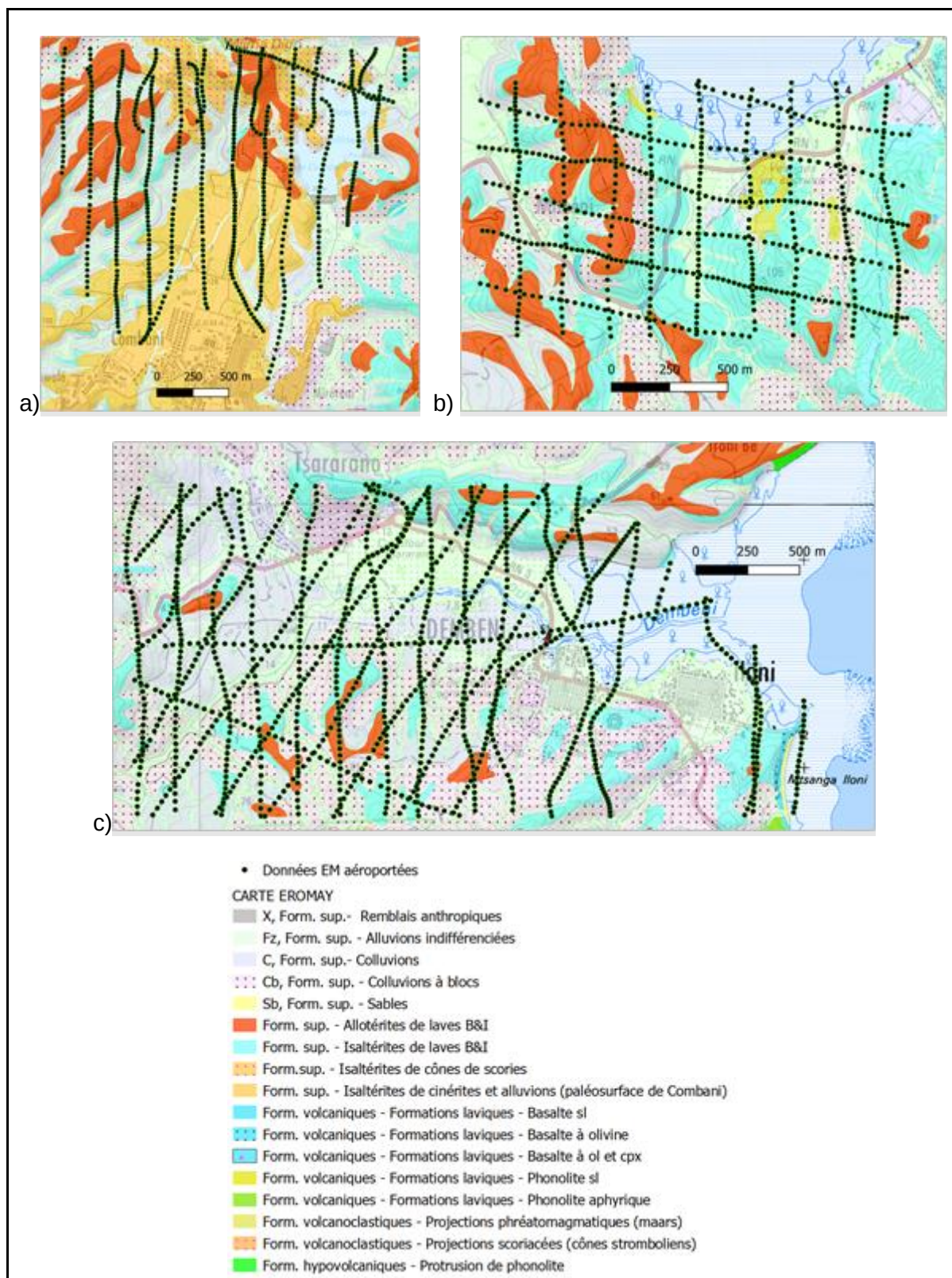


Figure 21 : Localisation des données de géophysique aéroportée retraitées par le BRGM dans le cadre de cette étude sur la carte du régithe EROMAY sur fond topo IGN. La ligne grise représente la profondeur d'investigation comme décrite sur la Figure 20.

On peut également corréler l'EM et les sondages BSS comme on voit un exemple ici avec le sondage BSS BSS002PPKK et le profil EM le plus proche (Figure 22) : Les limons et argiles des 15 premiers mètres sont conducteurs (à l'inverse des latérites), puis la résistivité remonte avec la profondeur lorsque l'on va du basalte altéré jusqu'au moins fracturé qu'on rencontre à 28,5 m et qui se retrouve bien autour de 30 m dans le sondage EM.

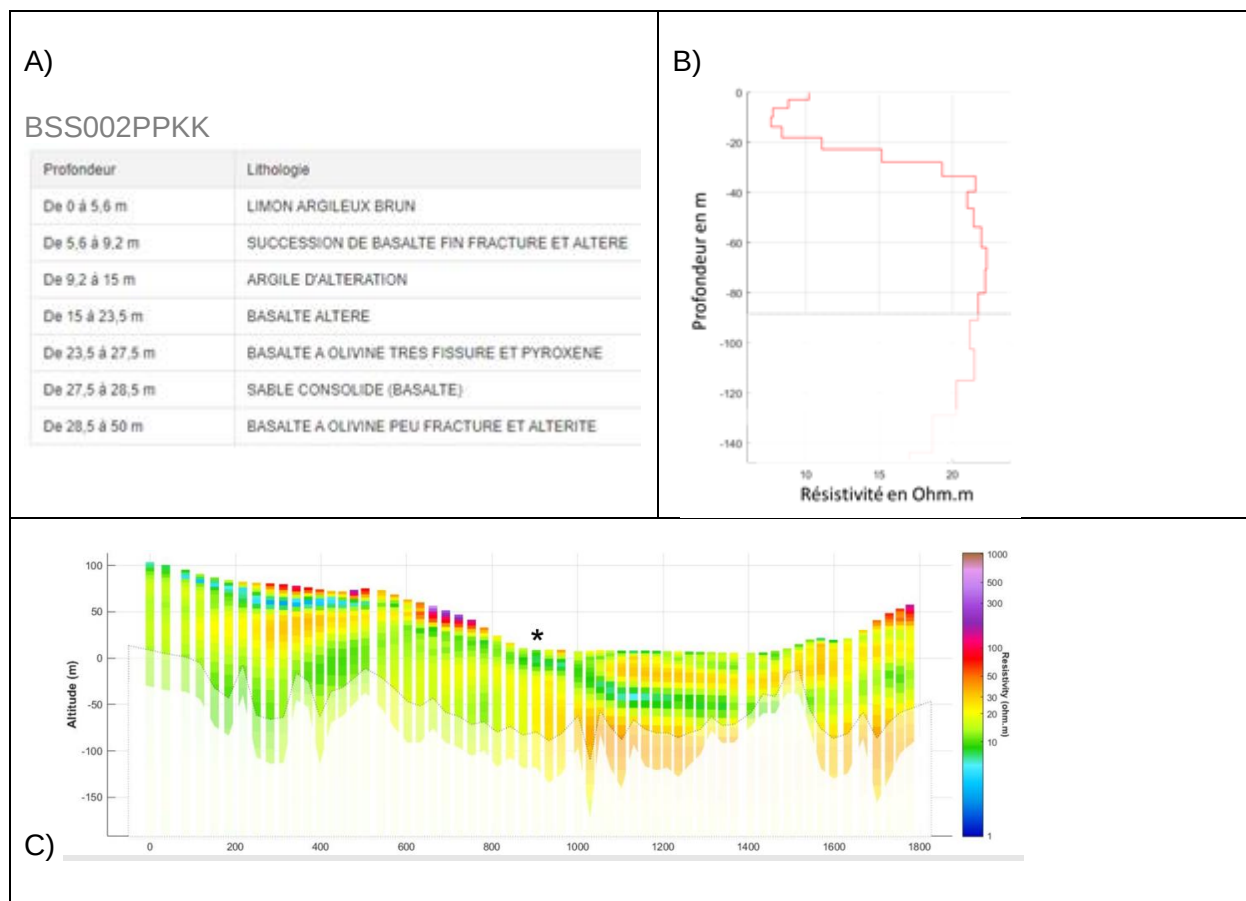


Figure 22 : Corrélation géologie/EM : Sondage BSS002PPKK (A), le profil (C) et le sondage (B) EM les plus proches. L'étoile noire sur le profil EM (C) indique la projection du log géologique (A) sur le profil EM (C).

Cette méthodologie a été appliquée sur l'ensemble des données de géophysique et géologie.

4.3.2 Obtention des profondeurs des interfaces d'intérêt

Le but a ensuite été de pointer les interfaces remarquables repérées précédemment afin de connaître la succession des couches et leurs épaisseurs. Cela s'est fait en repérant le contraste de résistivité au niveau du point de calage et en le continuant de proche en proche.

Le pointé manuel consiste à balayer l'ensemble des données EM, profil par profil, et de placer un point au niveau de l'interface à marquer. On en ressort un jeu de coordonnées 3D (x, y et z) pour chaque interface voulue. C'est la méthode qui a été employée sur la zone de Dembeni.

Ce pointé manuel étant long et fastidieux, il a été semi-automatisé pour les secteurs de Combani et Longoni. Une partie des pointés est fait manuellement puis l'utilisateur indique à l'ordinateur les informations sur le contraste qu'il cherche : résistivité et épaisseur minimales et maximales de la couche au-dessus de l'interface, de celle au-dessous également, ainsi que le rayon de recherche autour des points de calage préétablis par l'utilisateur. De cette manière, l'utilisateur va balayer tous les profils pour ajuster certains points artefacts, mais voir son temps de travail diminuer. Cette méthode est applicable dans un milieu géologique homogène où un contraste de résistivité correspond à une interface unique.

4.3.3 Vers des approches permettant de travailler à plus grande échelle

Après avoir passé les pointés des interfaces de façon semi-automatique, le pointé des interfaces est accéléré dans une zone à la géologie homogène (même schéma de succession des couches verticalement). Cependant le travail reste assez fastidieux, puisqu'il nécessite un editing manuel de tous les profils pour valider les pointés.

D'autres solutions ont été envisagées pour définir des secteurs sur lesquels la succession des couches géologiques est comparable. Pour cela nous avons utilisé une méthodologie appelé classification ascendante hiérarchique (CAH), appliquée sur les données électromagnétiques sur toute l'épaisseur des sondages de résistivité. Cette classification est une méthode de classification itérative qui permet de regrouper des sondages EM proches afin de faciliter les pointés des interfaces.

La première étape du processus consiste à sélectionner les résistivités des x premières couches du modèle après inversion sur plusieurs tranches de profondeur, à savoir :

- sur la globalité des sondages EM (0-400m de profondeur) ;
- sur la proche surface uniquement (0-33m) ;
- sur les sondages EM sans la proche surface (14-400 m de profondeur), afin de ne pas prendre en compte la présence d'alluvions superficielles.

Ce processus s'initialise sur N objets, ici correspondant aux N points de mesures EM sur la zone (ex. 617 points de mesure EM hélicoptère sur la zone de Longoni).

Au début du processus, à chaque objet correspond sa propre classe. Nous avons donc par ex. 617 classes sur le secteur de Longoni. Puis les deux classes dont les valeurs (ici les x valeurs de résistivité) sont les plus proches sont regroupées. Elles forment ainsi une nouvelle classe ce qui donne alors un total de $N-1$ classes restantes (ici 616). L'opération de regroupement deux à deux est ensuite répétée jusqu'à n'avoir plus qu'une classe contenant tous les objets regroupés.

Ces regroupements successifs produisent un arbre de classification ou dendrogramme (Figure 23), dont la racine correspond à la classe unique regroupant tous les objets. Il représente une hiérarchie des classes. La certitude des corrélations entre les objets est indiquée par la longueur du trajet pour aller d'un élément à un autre sur l'arbre.

L'opérateur peut alors choisir de tronquer l'arbre à un niveau voulu (3 par exemple, Figure 23) afin d'observer la répartition des objets dans ces classes.



Figure 23 : Dendrogramme correspondant à la classification ascendante hiérarchique (CAH) en 3 classes (résistivités sur les 33 premiers mètres) réalisée sur les sondages EM de la zone de Longoni.

Cette méthodologie peut apporter deux types d'informations :

- un regroupement des zones à sondages de résistivité similaires sur un critère objectif, afin d'aider à la représentation cartographique 2D de l'aléa. Les sondages sont répartis en classes puis l'information est spatialisée par triangulation de Voronoï. Le résultat est un ensemble de polygones représentant des secteurs homogènes sur lesquels peuvent s'appliquer des critères de pointé automatique identiques (Figure 24) ;
- la définition d'un sondage de résistivité moyen associé à chaque classe (Figure 25). Il est alors possible de pointer l'interface sur le sondage moyen de chaque classe et ensuite reporter ce pointé aux localisations de tous les sondages de cette même classe avec la densité des occurrences de chaque valeur.

À titre d'illustration sur le site pilote de Longoni, la Figure 24 présente les deux classes de résistivité obtenues par CAH et la Figure 25 présente les sondages de résistivité moyens associés aux deux classes. La classe 1 (en vert sur la Figure 24) se caractérise, par exemple, par une couche résistante (jusqu'à 100 Ohm.m) d'une quinzaine de mètres d'épaisseur sur un milieu plus conducteur. Il serait envisageable de propager cette interface à 15 m sur l'ensemble des sondages EM de la classe 1.

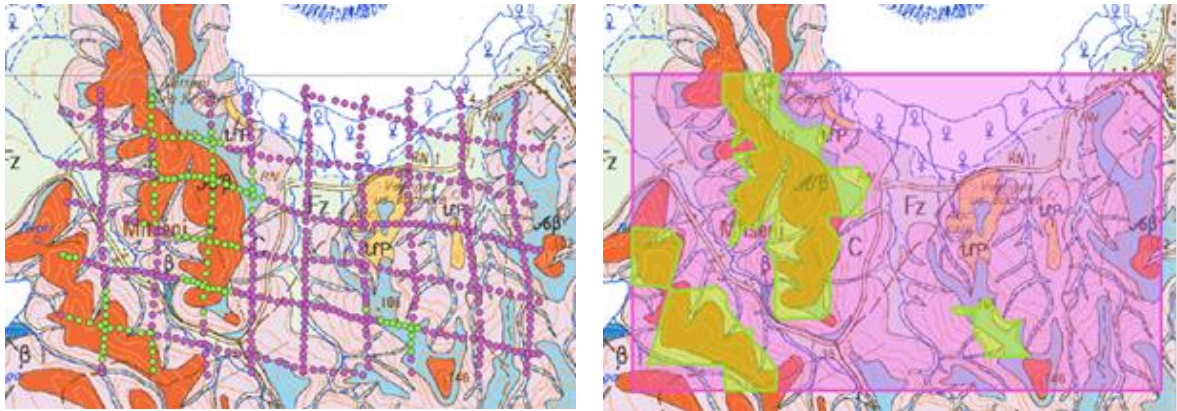


Figure 24 : Représentation des résultats de la CAH (sur les 33 premiers mètres, divisés en 2 classes) sous forme ponctuelle (au niveau de la localisation des sondages EM) et sous forme de polygones après triangulation de Voronoï.

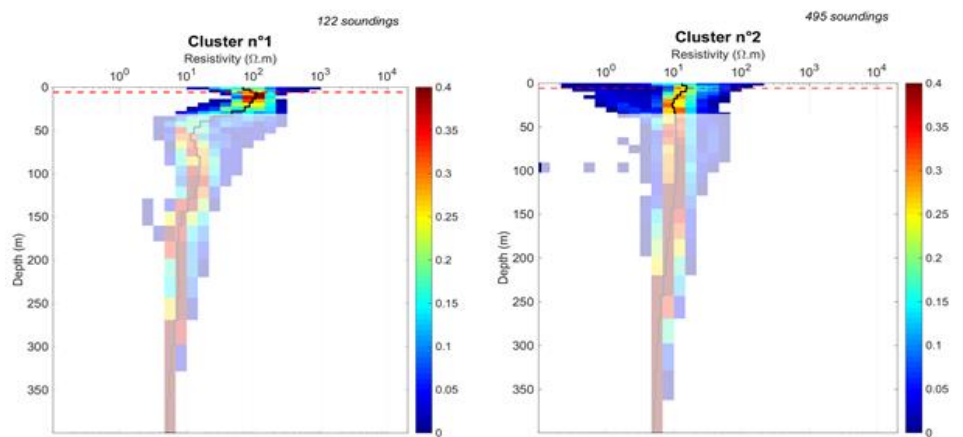


Figure 25 : Représentation du sondage moyen (en noir) et de la densité de probabilité des valeurs dans chaque classe (ou cluster) de la CAH appliquée sur Longoni avec les données EM des 33 premiers mètres. Les clusters 1 et 2 correspondent respectivement aux classes 1 (en vert) et 2 (en rose) de la Figure 24.

4.4 INTÉGRATION DES DONNÉES EM DANS LA CARTOGRAPHIE DES EFFETS DE SITE LITHOLOGIQUES

La prochaine étape du travail a consisté à intégrer les données EM aéroportées dans l'analyse des effets de site lithologiques et à combiner ces données avec les interprétations des mesures H/V et MASW utilisées plus classiquement dans ce genre d'analyse. Nous avons, dans un premier temps, traduit les fréquences de résonances f_0 issues des mesures H/V disponibles sur chacun des sites pilotes en épaisseurs de couche via l'équation 2. Pour cela, nous avons utilisé une valeur moyenne de V_s fixée à 200 m/s pour la couche superficielle sur les sites de Dembeni et Longoni et 250 m/s sur le site de Combani. Cette valeur est tirée de l'analyse des profils MASW disponibles sur les sites pilotes et doit être ajustée localement.

Nous obtenons alors une carte reproduisant les épaisseurs (et/ou profondeurs) des interfaces d'intérêt (celles qui sont supposées induire l'effet de site lithologique) sur l'ensemble du site pilote considéré comme illustré ci-dessous pour le site de Dembeni (Figure 26). Pour chacun des sites pilotes considérés, deux interfaces ont ainsi été cartographiées : l'interface entre les alluvions et l'encaissant pour les zones alluvionnaires et l'interface entre le haut du profil d'altération (correspond au résistant présent en surface dans les données EM aéroportées) et les formations volcaniques sous-jacentes au niveau des formations volcaniques altérées.

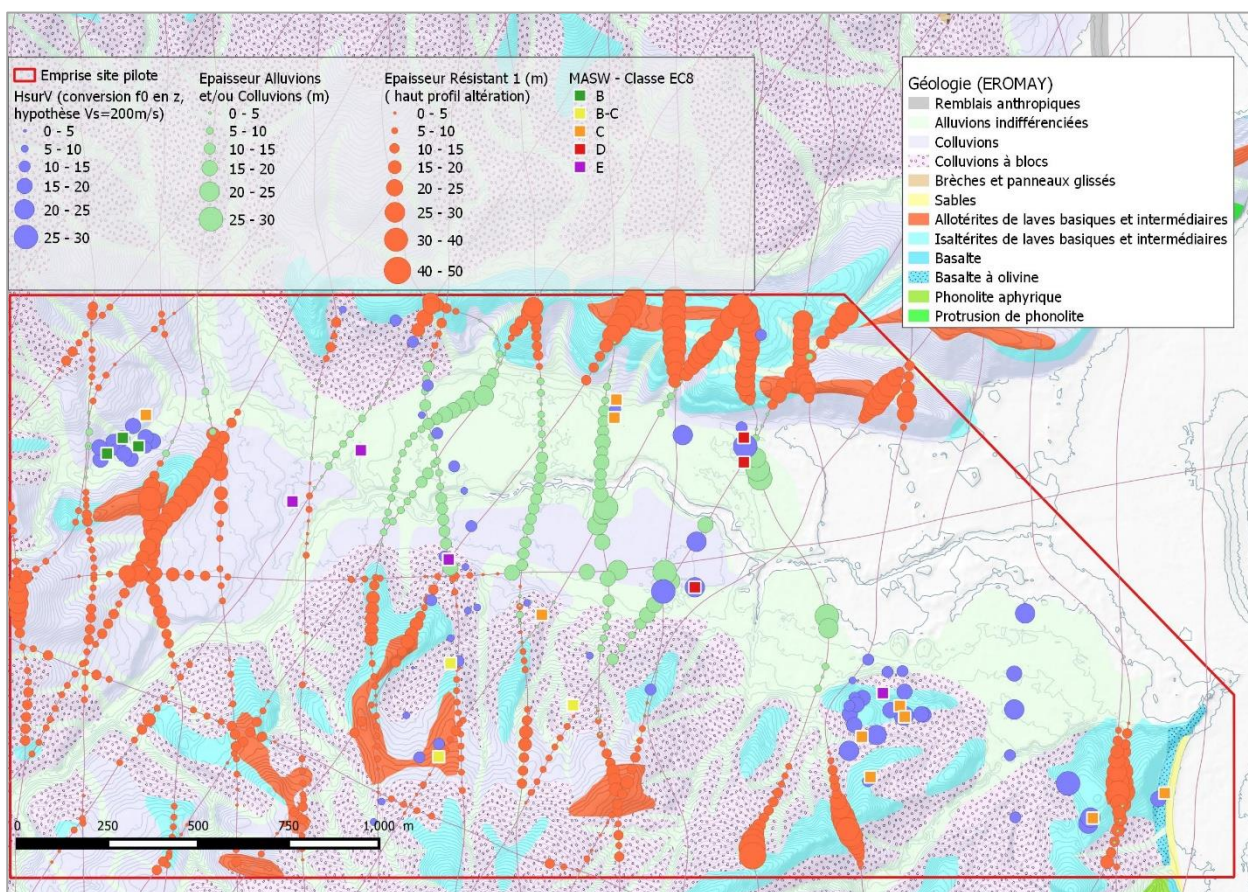


Figure 26 : Épaisseurs des interfaces cibles susceptibles d'induire les effets de site lithologiques observés sur le site pilote de Dembeni. Le fond de carte correspond à la carte géologique issue du projet EROMAY. Les classes de sol EC8 déduites des profils MASW disponibles sur le site sont également indiquées pour information.

4.5 ZONAGE EN CLASSES DE SOL RÉGLEMENTAIRE (EC8)

Une fois définies les épaisseurs des interfaces d'intérêt, nous avons défini des critères opérationnels simples afin de distinguer les différentes classes de sol EC8 en fonction de la nature et de l'épaisseur des couches géologiques en présence. Nous avons travaillé en distinguant les zones de dépôts alluvionnaires et les zones de dépôts issus des formations volcaniques altérées (allotérites, isaltérites, colluvions) en surface. Cette distinction s'est faite pour tenir compte notamment des plus faibles vitesses V_s observées dans les profils MASW et la présence possible de sols de classe E dans les zones alluvionnaires en raison du plus fort contraste de vitesse V_s observé entre les alluvions et les couches sous-jacentes que dans les dépôts d'altération.

Pour définir les critères permettant de distinguer les différentes classes de sol, nous nous sommes appuyés à la fois sur l'analyse combinée des données d'épaisseurs d'interface et des classes de sol issues des profils MASW présentées en Figure 26 et des abaques définissant la $V_{s,30}$ en fonction de l'épaisseur de la couche meuble en surface et de sa vitesse V_s (voir un exemple pour une V_s de substratum sismique à 800 m/s sur la Figure 27. On voit par exemple sur cette figure que, pour une valeur de V_s de 240 m/s dans la couche meuble, la bascule de classe de sol entre B et C se fait pour une épaisseur de couche meuble de l'ordre de 16 m.

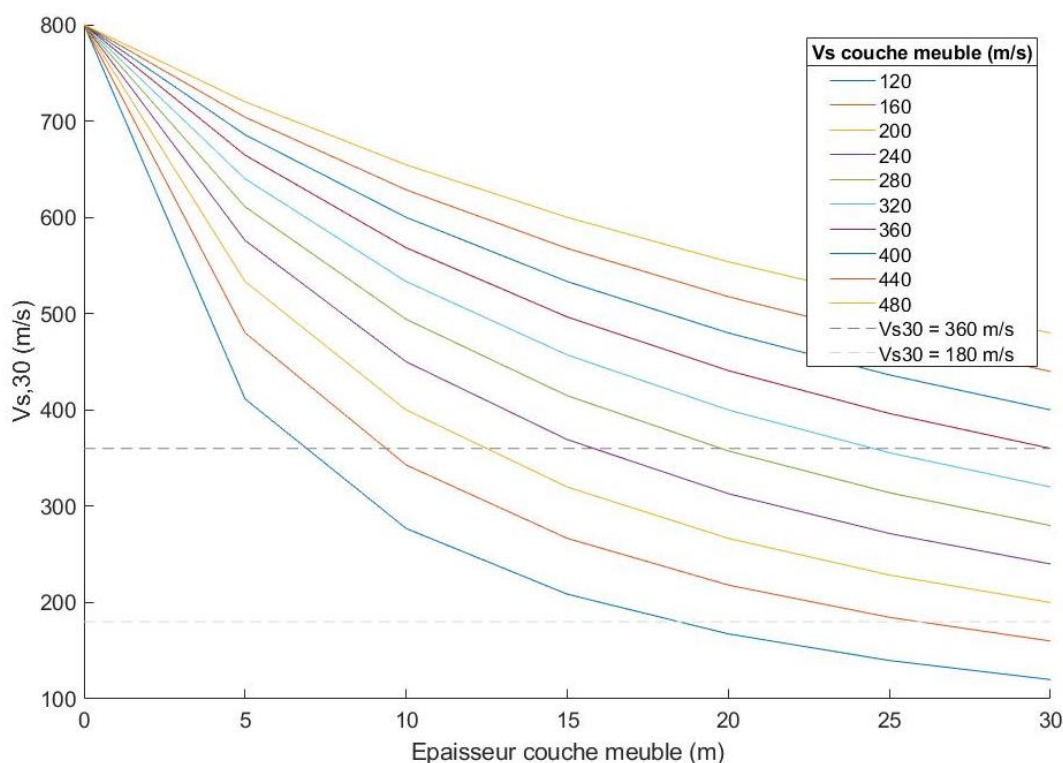


Figure 27 : Courbes de $V_{s,30}$ calculées en fonction de l'épaisseur de la couche meuble en surface et différentes valeurs V_s (selon la couleur de la courbe) en supposant une valeur de V_s de 800 m/s pour la couche sous-jacente (substratum sismique). Les lignes pointillées grise indiquent les limites de $V_{s,30}$ à 180 m/s et 360 m/s correspondant aux limites de classes de sol C-D (180 m/s) et B-C (360 m/s).

Nous avons adopté des critères définissant les classes de sol EC8 en fonction de :

- la nature de la formation géologique présente en surface d'après la carte géologique EROMAY en distinguant les dépôts alluvionnaires des dépôts issus des formations volcaniques altérées (allotérites, isaltérites et colluvions) ;

- la profondeur de l'interface d'intérêt entre la formation dite « meuble » responsable de l'effet de site lithologique et la formation sous-jacente issue des données EM aéroportées ;
- la fréquence de résonance éventuelle observée à partir des mesures H/V.

Au final, les critères définissant les classes de sol EC8 sont définis dans la Figure 28 pour les dépôts alluvionnaires (ou colluvions présents en zone basse) et dans la Figure 29 pour les altérites issus des formations volcaniques (allotérites, isaltérites, colluvions) présents sur les reliefs. Concernant le critère d'épaisseur appliqué aux altérites (15 à 20 m), il a été adapté à chaque site en fonction des valeurs de V_s estimées dans la couche altérée en surface d'après les profils $V_s(z)$ issus des mesures MASW et de la topographie (en l'absence de données d'épaisseur, les limites de zone suivent les isovaleurs d'altitude du MNT de référence).

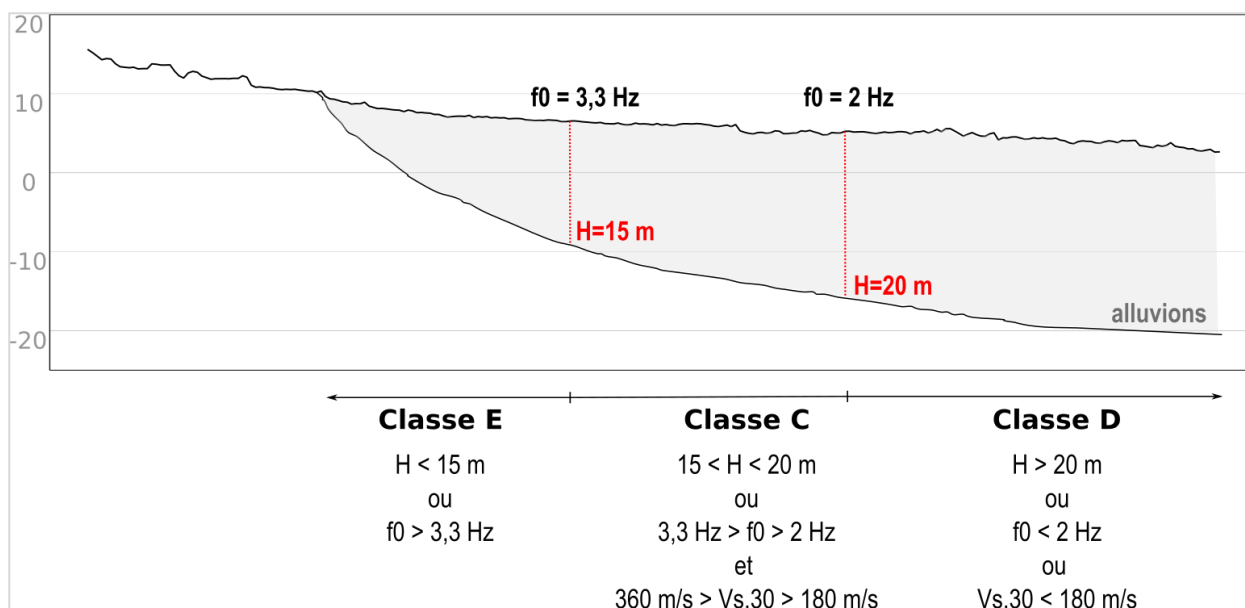


Figure 28 : Critères définissant les classes de sol EC8 pour les alluvions ou colluvions en zone basse.

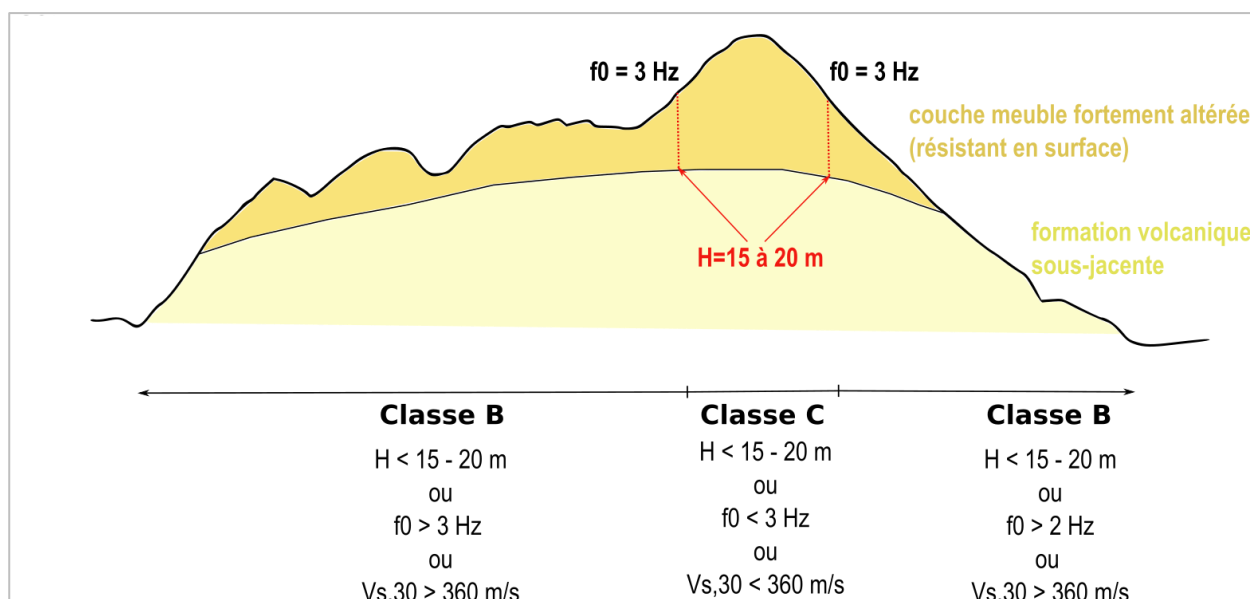


Figure 29 : Critères définissant les classes de sol EC8 pour les formations volcaniques altérées (allotérites, isaltérites, colluvions) présentes sur les reliefs.

5. Cartographie des effets de site lithologiques : application aux zones pilotes

La procédure générale suivie pour aboutir à la cartographie des classes de sol EC8 sur les 3 sites pilotes est décrite sur la Figure 30. Seule la phase d'analyse des données EM aéroportées pour obtenir les épaisseurs des interfaces cibles est différente pour les 3 sites pilotes : la méthode employée est précisée pour chaque site.

Pour chacun des sites pilotes, nous présentons les cartes suivantes, représentatives des différentes étapes du processus de cartographie :

- carte des fréquences de résonance f_0 et du paramètre $V_{s,30}$ issus des données géophysiques sol H/V et MASW ;
- carte des épaisseurs des formations superficielles responsables des effets de site lithologiques, issue des données EM aéroportées, en distinguant :
 - les alluvions (ou colluvions) des zones alluvionnaires basses,
 - les altérites des zones de relief ;
- carte présentant l'étape d'application des critères de classification décrits sur les Figure 28 et Figure 29 ;
- carte de zonage final des effets de site lithologiques en classes de sol EC8.

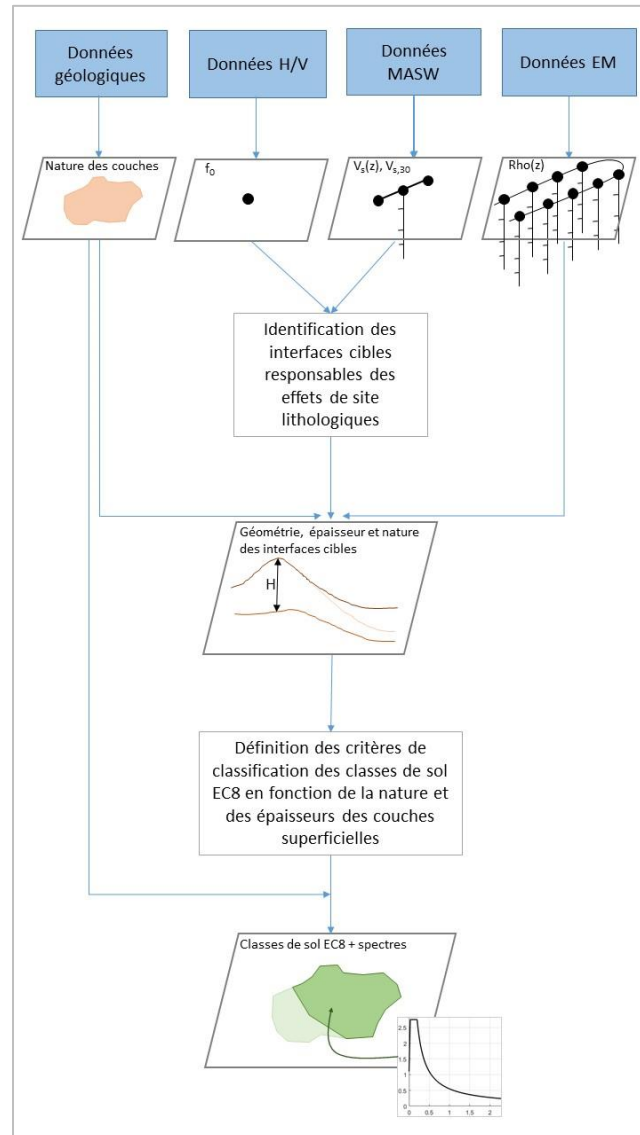


Figure 30 : Schéma explicatif du processus suivi pour aboutir à la cartographie des classes de sol EC8 à partir des données géologiques, géophysiques aéroportées et géophysiques sol.

5.1 DEMBENI

Sur le site pilote de Dembeni, les mesures géophysiques sol montrent des effets de site notables (Figure 31) aussi bien dans la zone alluvionnaire située au niveau de l'embouchure de la rivière, que sur les reliefs caractérisés par la présence en surface de formations volcaniques altérées de type colluvions à blocs, allotérites et isaltérites. Les fréquences de résonance observées sont très variables d'une zone à l'autre avec :

- des fréquences de résonance basses (inférieures à 2,5 Hz) sur la frange littorale, correspondant à des dépôts alluvionnaires profonds et de faible vitesse V_s (le paramètre $V_{s,30}$ y est inférieure à 180 m/s). Si l'on considère des V_s de l'ordre de 150 à 200 m/s en surface d'après les profils MASW, ces fréquences correspondent à une interface située à environ 20 m de profondeur, en cohérence avec les épaisseurs d'alluvions attendues sur la zone ;

- des fréquences de résonance qui augmentent vers les bords de la zone alluvionnaire et en amont de la rivière pour atteindre des valeurs variant de 3,5 à 6 Hz, correspondant à des dépôts alluvionnaires ou de colluvions moins profonds caractérisés par des valeurs de $V_{s,30}$ de l'ordre de 415 m/s. Si l'on considère des V_s de l'ordre de 200 m/s en surface d'après les profils MASW, ces fréquences f_0 correspondent à une interface située à 8 à 15 m de profondeur, toujours en cohérence avec les épaisseurs d'alluvions attendues sur la zone ;
- sur les zones de relief, des fréquences de résonance majoritairement comprises entre 2,5 et 4 Hz et pouvant présenter une forte variabilité spatiale. Pour ces zones, les valeurs de $V_{s,30}$ sont, elles aussi, très variables et comprises entre 254 et 464 m/s. Dans ces zones, l'interface correspondante à ces effets de site est plus complexe à identifier mais semble coïncider avec la base du corps résistant observé en surface dans les données EM correspondant à une altération latéritique en surface.

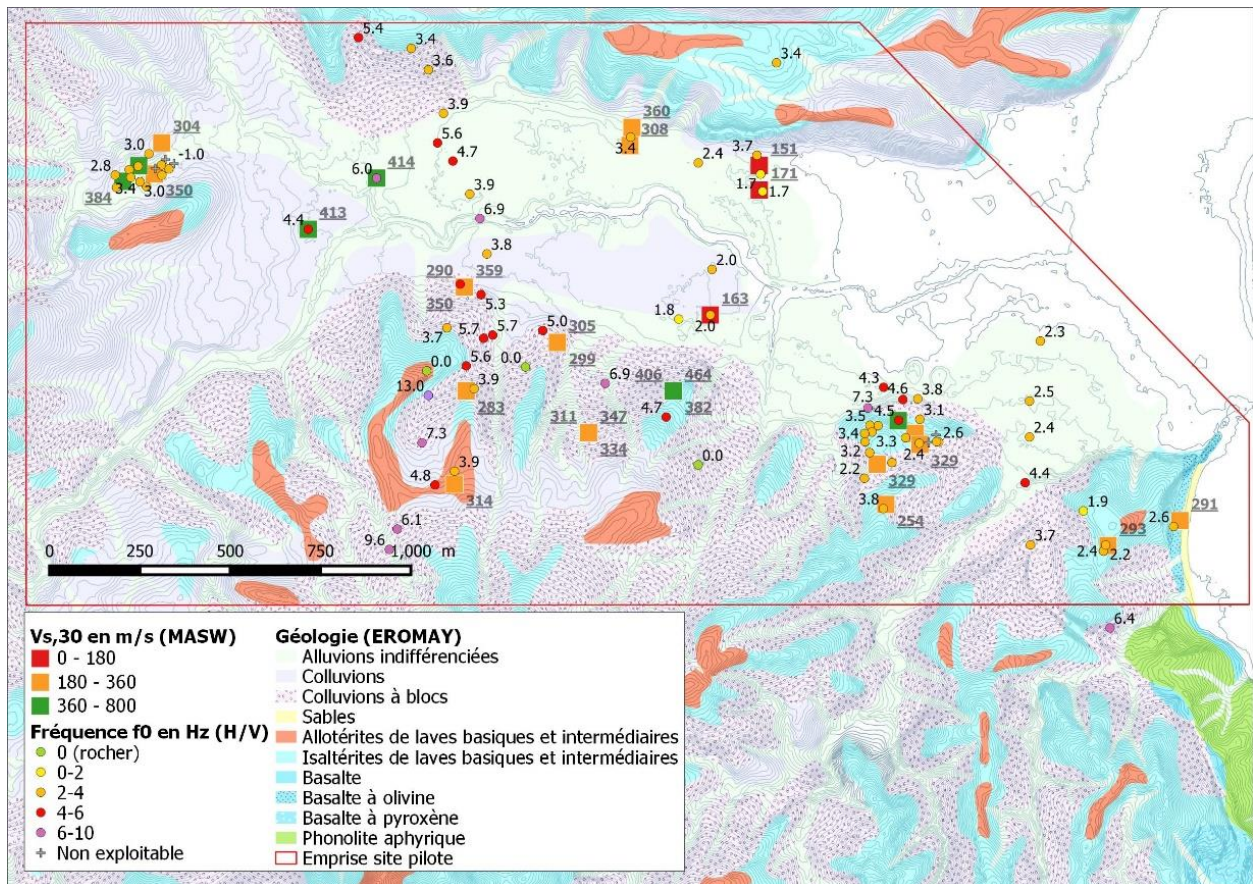


Figure 31 : Carte indiquant les fréquences de résonance f_0 issues des mesures H/V, les valeurs de $V_{s,30}$ issues des mesures MASW (valeurs indiquées en gras souligné) sur fond de carte géologique EROMAY sur le site de Dembeni.

En ce qui concerne l'analyse des données EM aéroportées, après étude et compréhension du secteur, nous avons repéré un schéma quasi constant dans la zone (Figure 32), à savoir un corps résistant profond (R1) sur lequel on observe une couche plus conductrice (C1), pouvant correspondre au profil d'altération de R1 ou à une autre formation plus altérée que R1. Au sommet de la pile, une formation résistante (R2) correspond à une altération latéritique en surface. À certains endroits, des alluvions (voire colluvions) conductrices drapent la topographie (C2).

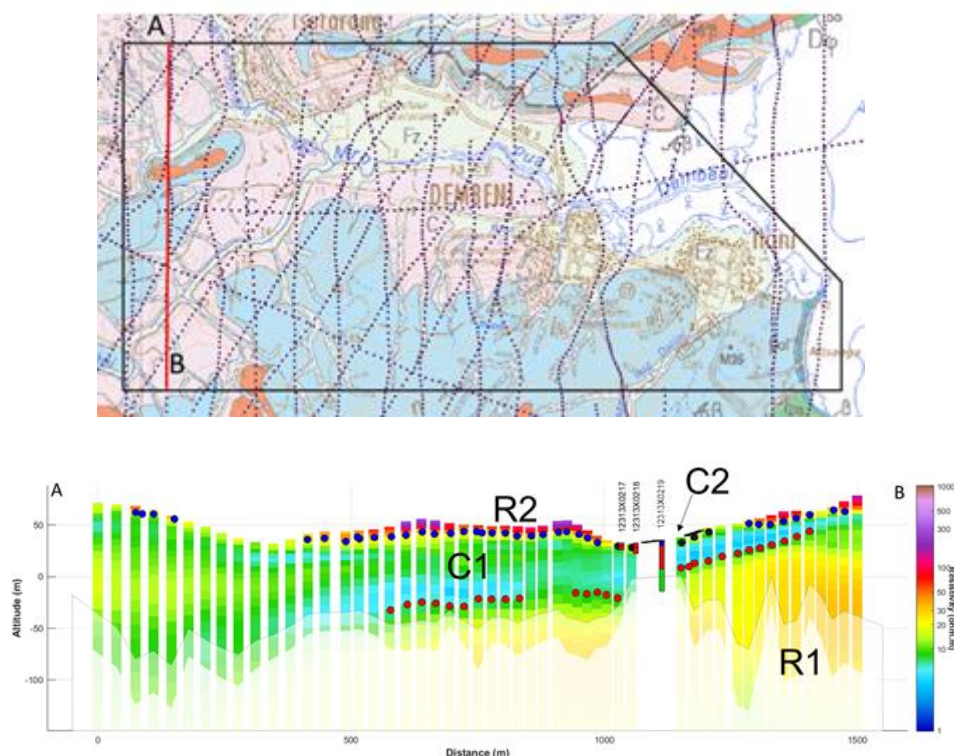


Figure 32 : Profil EM aéroporté et sa localisation dans le secteur de Dembeni. Sont également représentés les grands ensembles géophysiques, la localisation des données H/V et les pointés obtenus. Le toit de la roche saine fracturée (R1) est pointée sous forme de ronds rouges, la base de l'horizon latéritique (R2) est pointée en bleu et la base des alluvions/colluvions (C1/C2) est pointée en noir.

Pour ce site, les pointés des interfaces d'intérêt à partir des données EM ont été traités de façon manuelle après calage avec les données géologiques et géophysiques sol en suivant les contrastes de résistivité de proche en proche sur l'ensemble des profils de la zone (Figure 33). Les épaisseurs des couches géologiques responsables des effets de site lithologiques ont ainsi été extraites des données EM sur l'ensemble de la zone comme illustré sur la Figure 33.

La distribution spatiale des données obtenues via l'EM aéroportée est particulièrement intéressante aussi bien en termes de quantité d'information que de répartition spatiale de cette information. Les données géophysiques sol disponibles sur le site pilote de Dembeni sont 83 mesures H/V et 21 mesures MASW, soit 104 données ponctuelles réparties de façon inégale sur la zone (Figure 31). À titre de comparaison, les données aéroportées apportent des informations sur 1581 sondages avec en particulier 200 données d'épaisseur sur les alluvions/colluvions des zones basses et 523 données d'épaisseur sur la couche d'altérites présente en surface au niveau des reliefs (Figure 33). Elles sont, par ailleurs, réparties de façon beaucoup plus homogène sur la zone avec un quadrillage régulier (hors zone urbanisée comme Iloni au sud-est de la zone pilote).

À ce titre, l'apport des données EM est particulièrement intéressante pour la cartographie des effets de site lithologiques.

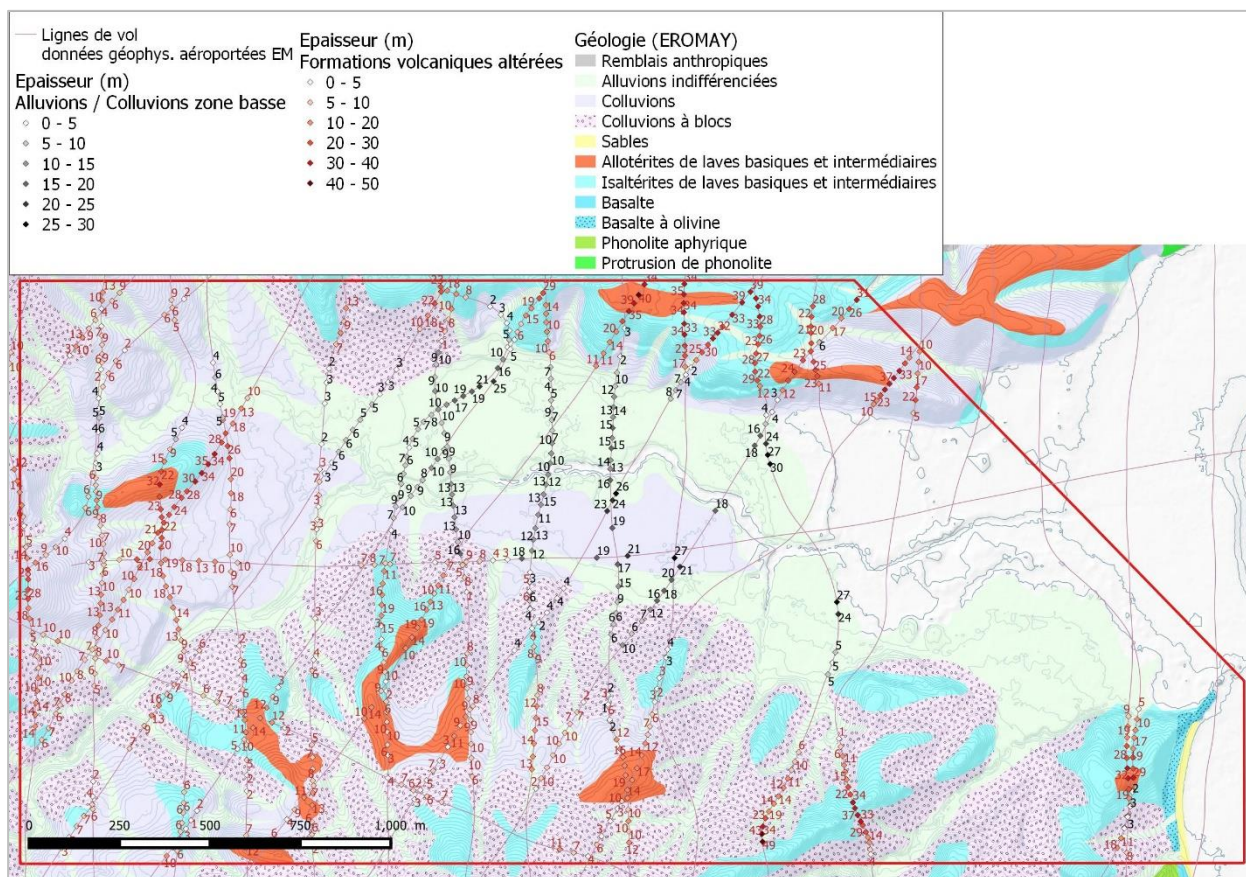


Figure 33 : Épaisseurs des formations géologiques superficielles responsables des effets de site lithologiques d'après les données EM aéroportées sur le site de Dembeni.

L'étape suivante du travail a consisté à rassembler les informations d'épaisseur de couches superficielles issues des données EM aéroportées et des données géophysiques sol. Pour cela, nous avons traduites les valeurs de fréquence de résonance f_0 issues des mesures H/V en épaisseur (appelée « épaisseur équivalente » par la suite) via l'équation 2 et en considérant une valeur de V_s constante sur la zone de 200 m/s (valeur déduite des profils MASW disponibles sur zone). Une fois obtenue la cartographie des épaisseurs des couches responsables de effets de site lithologiques, nous avons appliqué les critères de classification de classes de sol décrits sur les Figure 28 et Figure 29. Ce travail est présenté sur la Figure 34.

L'étape finale a simplement consisté à établir la cartographie des classes de sol EC8 à partir du zonage présenté en Figure 34. Cette cartographie est présentée en Figure 35. Les spectres de réponse correspondant sont ceux définis dans le Tableau 2 et représentés sur la Figure 7.

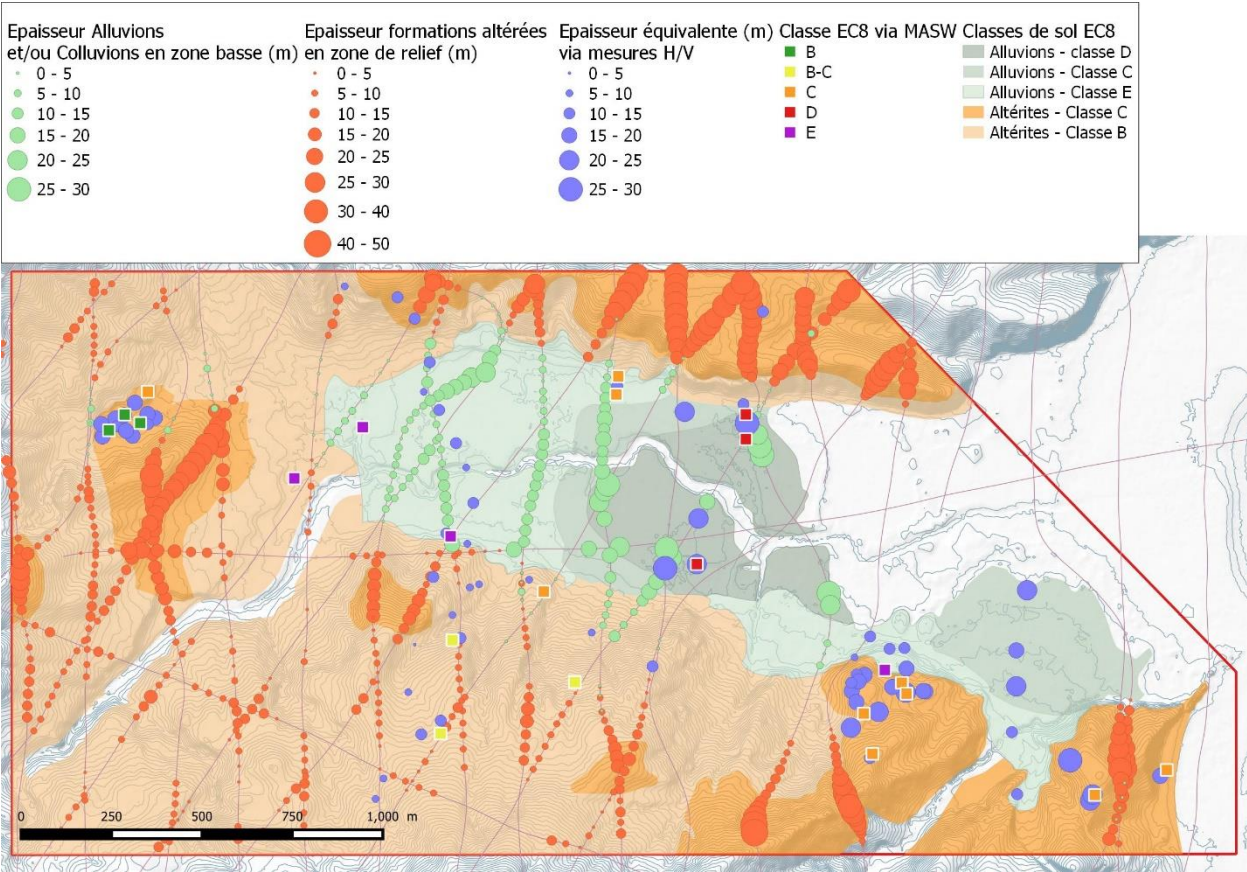


Figure 34 : Classification des classes de sol EC8 sur le site pilote de Dembeni. Etape intermédiaire d'application des critères de classification identifiés en Figure 28 et Figure 29.

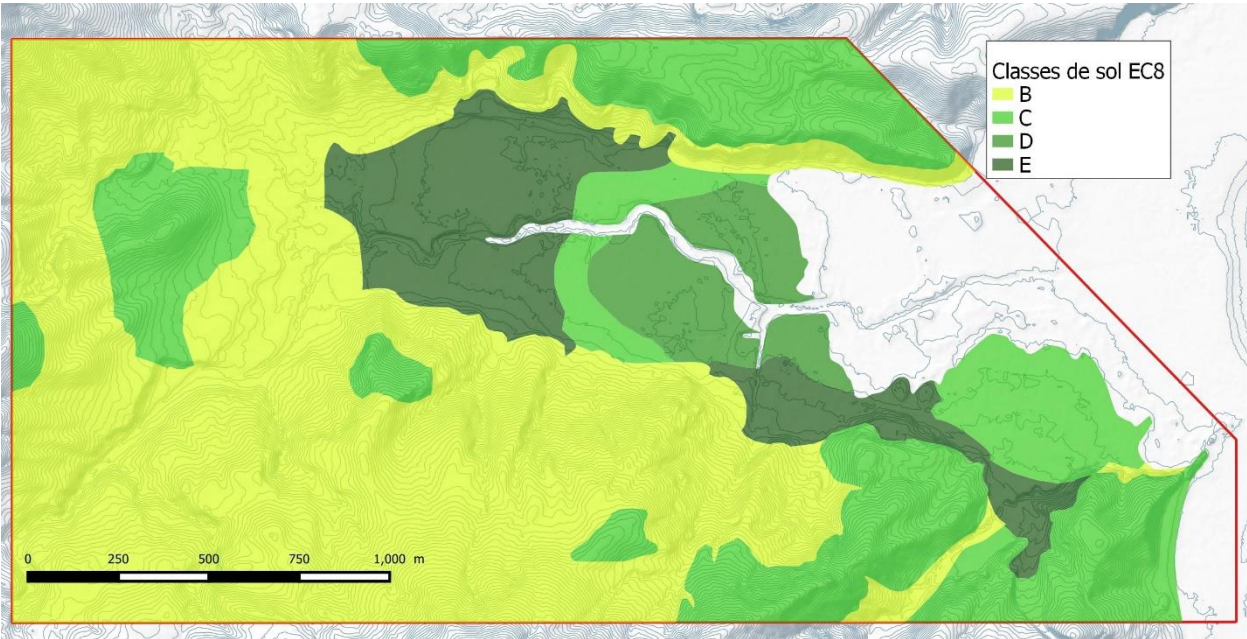


Figure 35 : Cartographie des classes de sol EC8 sur le site pilote de Dembeni.

À titre de comparaison, nous avons également représenté la cartographie des effets de site lithologiques issue des atlas des aléas de 2004 (Figure 36, à comparer avec la Figure 35). Nous voyons clairement apparaître :

- la différence de prise en compte des effets de site sur les zones de relief : ces zones étaient majoritairement caractérisées par un aléa nul à faible en 2004 (Figure 36) et sont maintenant majoritairement caractérisées par une classe de sol B, voire C pour certaines zones particulières (Figure 35) ;
- l'obtention d'une cartographie plus détaillée dans les zones alluvionnaires basses (au niveau de l'embouchure) avec l'étude actuelle : ces zones, caractérisées par un niveau d'aléa fort dans l'atlas de 2004 (Figure 36), sont maintenant découpées en 3 classes de sol distinctes ce qui permet une meilleure prise en compte notamment de la variabilité spatiale de l'épaisseur du remplissage alluvionnaire (Figure 35).

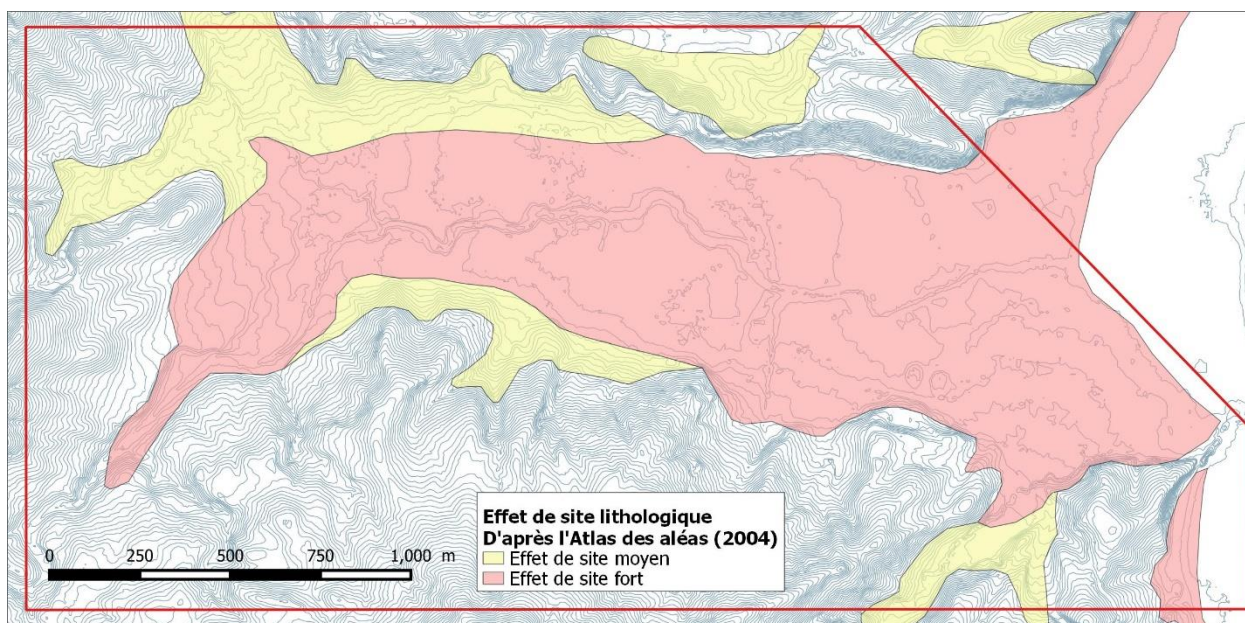
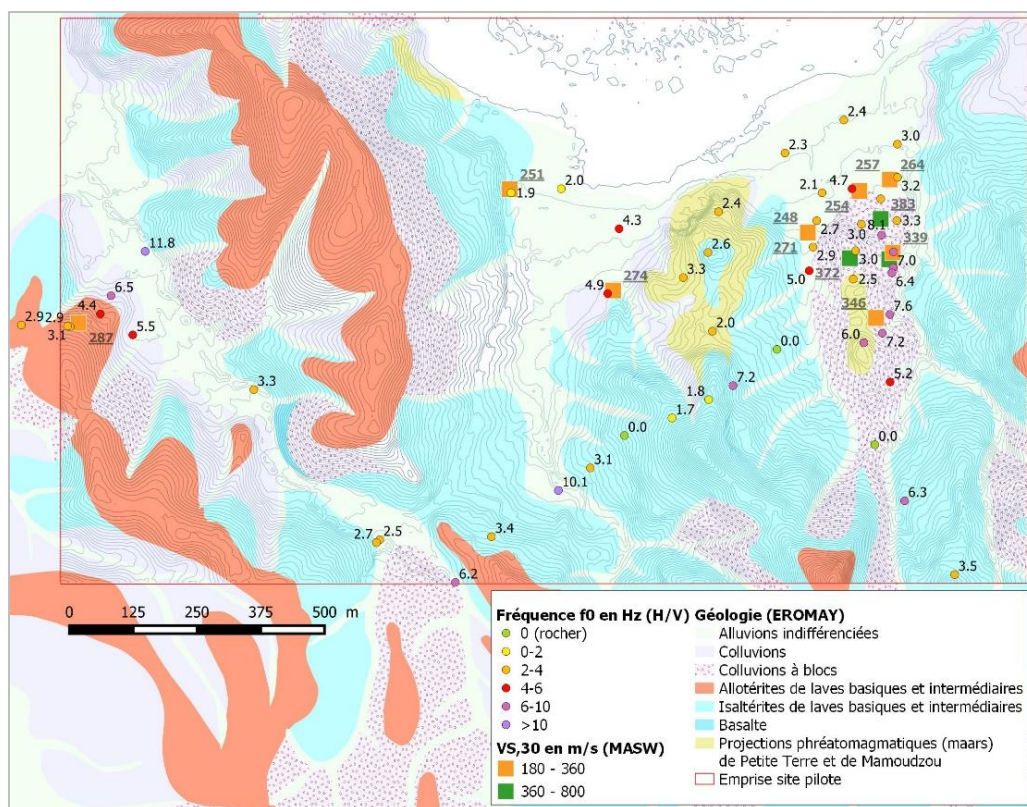


Figure 36 : Cartographie des effets de site lithologiques sur le site de Dembeni d'après l'atlas des aléas de 2004. Les zones non colorisées indiquent un effet de site supposé nul à faible.

5.2 LONGONI

Sur le site pilote de Longoni, comme pour le site de Dembeni, les mesures géophysiques sol montrent des effets de site notables (Figure 37) aussi bien dans la zone alluvionnaire située au niveau de l'embouchure de la rivière, que sur les reliefs caractérisés par la présence en surface de formations volcaniques altérées de type colluvions, colluvions à blocs, allotérites et isaltérites. Des effets de site sont également observés sur les projections phréatomagmatiques qui ne sont pas présentes sur le site de Dembeni. Les fréquences de résonance observées sont très variables d'une zone à l'autre avec :

- des fréquences de résonance globalement comprises entre 2 et 3 Hz sur la frange littorale, correspondant à des dépôts alluvionnaires de faible vitesse V_s (le paramètre $V_{s,30}$ y est de l'ordre de 250 m/s). Si l'on considère des V_s de l'ordre de 200 m/s en surface d'après les profils MASW, ces fréquences correspondent à une interface située à environ 10 à 15 m de profondeur, en cohérence avec les épaisseurs d'alluvions attendues sur la zone ;
- sur les zones de relief, des fréquences de résonance majoritairement comprises entre 3 et 7 Hz et présentant une forte variabilité spatiale, plus marquée que sur le site de Dembeni. Pour ces zones, les valeurs de $V_{s,30}$ sont assez stables, comprises entre 287 et 383 m/s. La ou les interfaces correspondantes à ces effets de site est plus complexe à identifier que sur le site de Dembeni, mais semble encore coïncider avec la base du corps résistant observé en surface dans les données EM correspondant à une altération latéritique en surface.



Dans le secteur de Longoni, il existe peu voire pas de données de forage pour caler en profondeur l'EM et la géologie. Nous avons donc utilisé les données MASW et H/V pour repérer les interfaces d'intérêt responsables des effets de site lithologiques. Un pointé semi-automatique des interfaces d'intérêt a ensuite été appliqué comme décrit dans le paragraphe 4.3.3 (exemple de pointé sur la Figure 38). Le secteur présente une géométrie d'interfaces beaucoup plus chahutée que sur Dembeni avec des interfaces plus complexes à pointer, notamment au niveau des alluvions. Malgré la phase de validation manuelle des pointés, le pointé semi-automatique a néanmoins permis d'accélérer le travail de traitement des données EM à l'échelle de la zone par rapport au site de Dembeni.

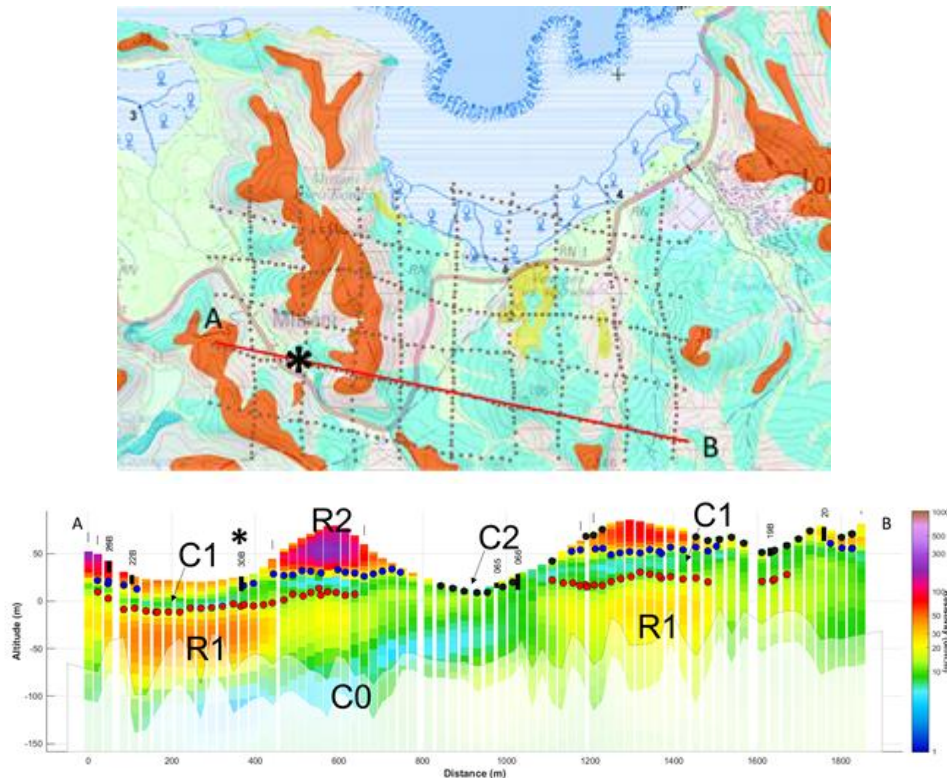


Figure 38 : Profil EM aéroporté et sa localisation dans le secteur de Longoni. Sont représentés les grands ensembles géophysiques, la localisation des données H/V et les pointés obtenus. La roche saine fracturée (R1) est indiquée par des ronds rouges, la base de l'horizon latéritique (R2) est pointée en bleu et la base des alluvions/colluvions (C1/C2) est pointée en noir.

Sur ce secteur, nous avons également testé la méthodologie de classification de type CAH (Classification Ascendante Hiérarchique) et la triangulation de Voronoï présenté au paragraphe 4.3.3 en considérant uniquement les couches en surface pour faciliter le regroupement des zones présentant des profils de résistivité similaires. Cette méthode ne remplace pas le pointé semi-automatique mais peut permettre de spatialiser en carte 2D des secteurs. Elle est efficace dans les secteurs où la donnée EM est dense comme c'est le cas à Longoni. Elle pourrait permettre, dans l'hypothèse d'un travail à plus grande échelle, et dans un milieu avec des couches successives régulières, de regrouper les sondages qui se ressemblent et définir une profondeur de chaque interface constante sur tous ces sondages de la même classe.

En termes de cartographie de l'aléa, cette classification ne nous a pas permis de faciliter les regroupements en classes de sol, les classes de résistivité ne correspondant pas nécessairement à des zones ayant des fréquences de résonance f_0 ou des valeurs de $V_{s,30}$ homogènes. Nous avons donc utilisé uniquement les épaisseurs d'interface pointées sur les sondages EM sans tenir compte des classes issues des calculs de CAH.

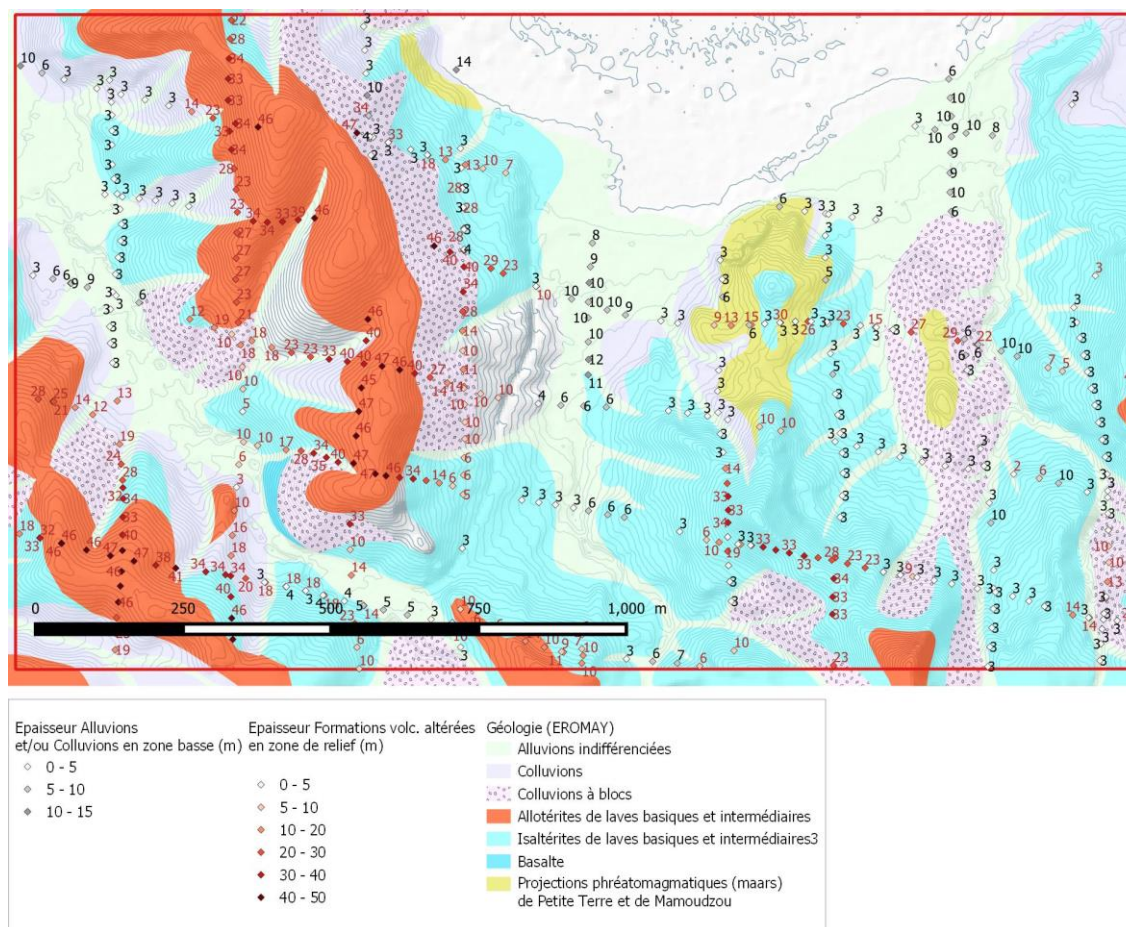


Figure 39 : Épaisseurs des formations géologiques superficielles d'après les données EM aéroportées sur le site de Longoni.

Comme pour Dembeni, l'étape suivante du travail a consisté à rassembler les informations d'épaisseur de couches superficielles issues des données EM aéroportées et des données géophysiques sol. Pour cela, nous avons traduites les valeurs de fréquence de résonance f_0 issues des mesures H/V en épaisseur équivalente en considérant une valeur de V_s constante sur la zone de 200 m/s. Une fois obtenue la cartographie des épaisseurs des couches responsables de effets de site lithologiques, nous avons appliqué les critères de classification de classes de sol décrits sur les Figure 28 et Figure 29. Ce travail est présenté sur la Figure 40. À noter que, sur certains sites, deux épaisseurs équivalentes sont représentées afin de tenir compte d'une double résonance.

L'étape finale a simplement consisté à établir la cartographie des classes de sol EC8 à partir du zonage présenté en Figure 40. Cette cartographie est présentée en Figure 41. Les spectres de réponse correspondant sont ceux définis dans le Tableau 2 et représentés sur la Figure 7.

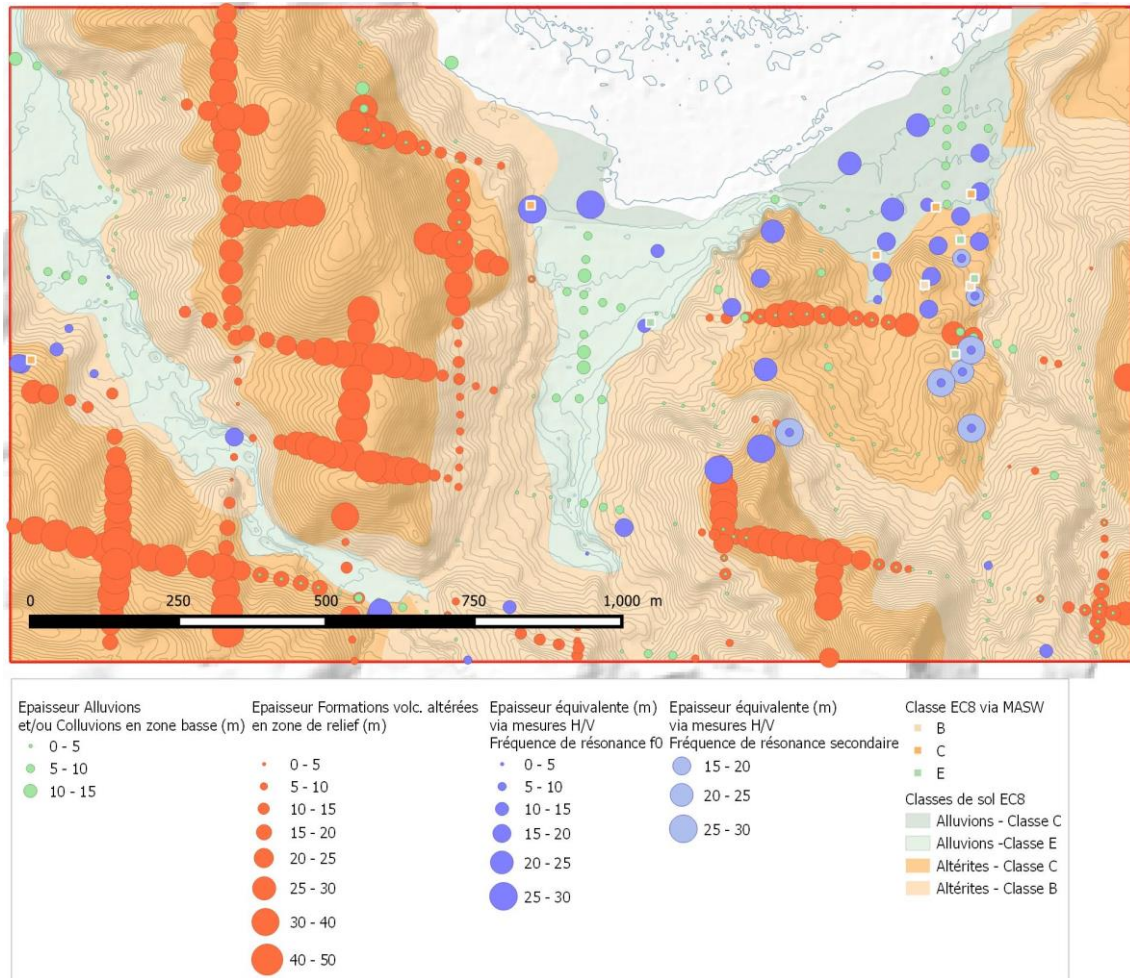


Figure 40 : Classification des classes de sol EC8 sur le site pilote de Longoni. Étape intermédiaire d'application des critères de classification identifiés en Figure 28 et Figure 29.

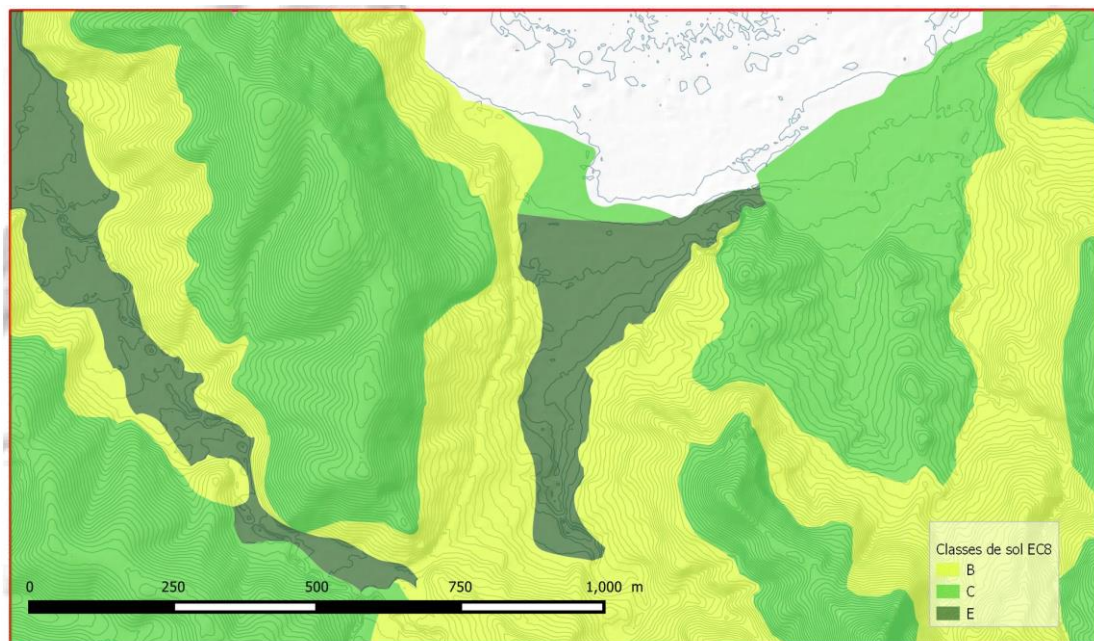


Figure 41 : Cartographie des classes de sol EC8 sur le site pilote de Longoni.

Comme pour le site de Dembeni, nous avons également représenté, à titre de comparaison, la cartographie des effets de site lithologiques issue des atlas des aléas de 2004 (Figure 42, à comparer avec la Figure 41). Nous voyons clairement apparaître :

- la différence de prise en compte des effets de site sur les zones de relief : ces zones étaient majoritairement caractérisées par un aléa nul à faible en 2004 à l'Ouest du site pilote et par un aléa moyen à l'Est et au Sud (Figure 42). La distinction géographique faite en 2004 n'étant pas confirmée par les données géophysiques analysées dans le cadre de cette étude, ces zones de relief sont maintenant caractérisées par une classe de sol B ou C sur des critères morphologiques d'épaisseur de couches altérées (Figure 41) et sont traitées de façon homogène sur l'ensemble du site pilote ;
- l'obtention d'une cartographie plus détaillée dans les zones alluvionnaires basses (au niveau de la côte et à l'Ouest de la zone pilote) avec l'étude actuelle : ces zones, caractérisées par un niveau d'aléa fort dans l'atlas de 2004 (Figure 42), sont maintenant découpées en 2 classes de sol distinctes ce qui permet une meilleure prise en compte de la variabilité spatiale de l'épaisseur du remplissage alluvionnaire (Figure 41). Les contours de ces zones ont également été affinés sur la base de la cartographie géologique actuelle, caractérisée par une meilleure résolution spatiale (1/10 000) que celle disponible en 2004 (1/50 000).

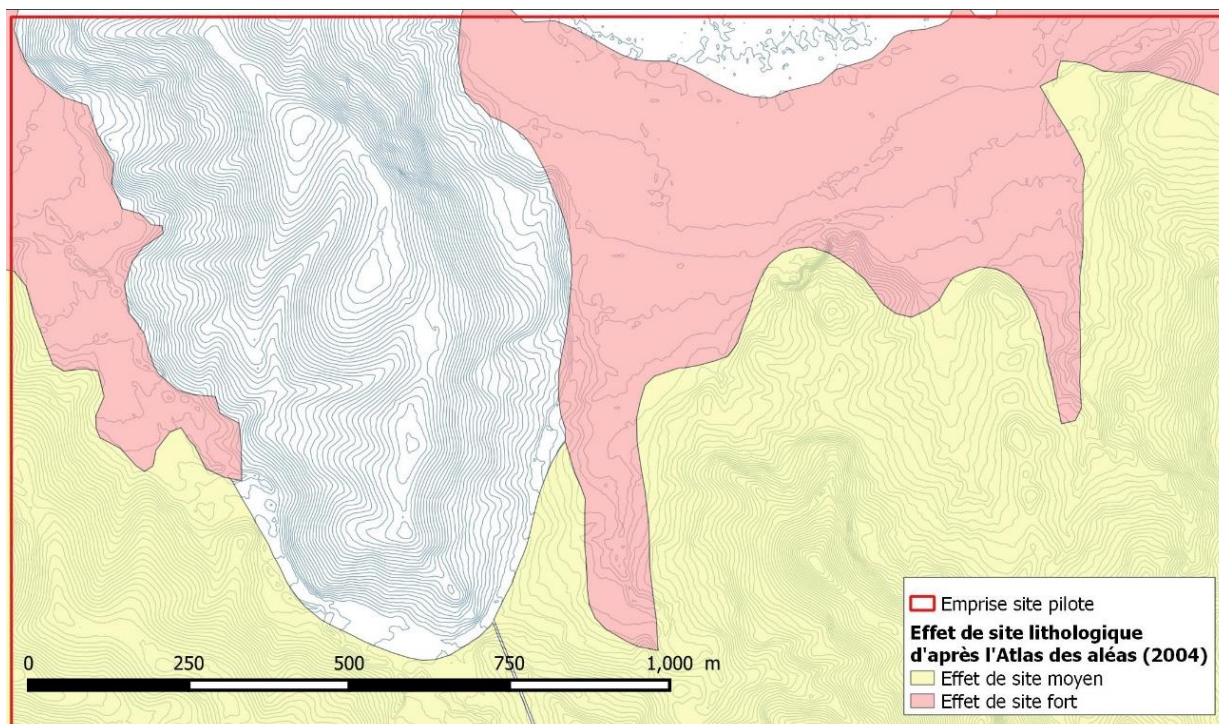


Figure 42 : Cartographie des effets de site lithologiques sur le site de Longoni d'après l'atlas des aléas de 2004. Les zones non colorisées indiquent un effet de site supposé nul à faible.

5.3 COMBANI

Sur le site pilote de Combani, comme pour les autres sites, les mesures géophysiques sol montrent des effets de site notables (Figure 43). La réponse du site est néanmoins beaucoup plus homogène que les autres, avec des fréquences de résonance globalement comprises entre 2 et 3 Hz et un paramètre $V_{s,30}$ de l'ordre de 300 m/s. Cette observation est cohérente avec la géologie connue sur cette zone où sont attendus des dépôts profonds d'isaltérites (paléosurface de Combani). Seules quelques données ponctuelles présentant des fréquences de résonance plus hautes, de l'ordre de 4 à 5 Hz, indiquent la présence d'une couche à effet de site moins épaisse comme c'est le cas par exemple à proximité de la retenue collinaire ou à la limite de certaines colluvions. Si l'on considère des Vs de l'ordre de 250 m/s en surface d'après les profils MASW, ces fréquences correspondent à une interface située à environ 20 à 30 m de profondeur, en cohérence avec les épaisseurs d'altérites attendues sur la zone.

Il est à noter qu'une fréquence de résonance très basse (autour de 0,7 Hz) est également observée sur l'ensemble de la zone (voir les mesures H/V en annexe). Elle est également observée sur les signaux des stations sismologiques de MCHI à Chiconi et R1EE à Coconi. Bien que d'un grand intérêt scientifique, cette résonance n'a pas été prise en compte dans cette étude car elle correspondrait à la fréquence de bâtiments de très grande hauteur, bâtiments qui n'existent pas sur le site pilote. Elle ne présente donc *a priori* pas de facteur de risque aggravant pour le bâti de Combani.

L'interface correspondant aux effets de site observés sur Combani semble coïncider avec la base du corps résistant observé en surface dans les données EM et correspondant à une altération latéritique en surface (Figure 44). Les spectres de réponse correspondant sont ceux définis dans le Tableau 2 et représentés sur la Figure 7.

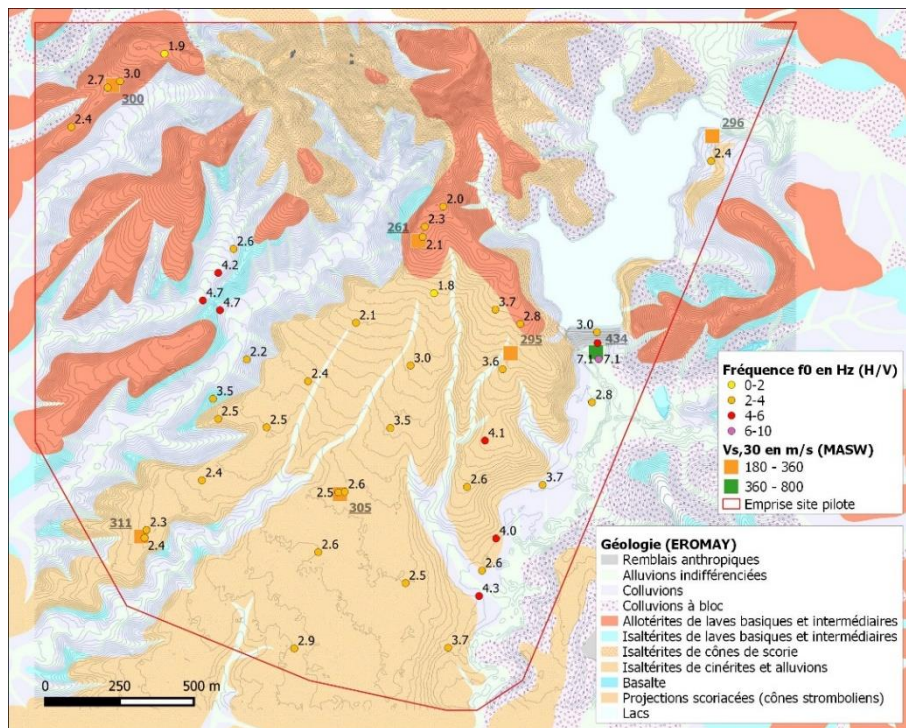


Figure 43 : Carte indiquant les fréquences de résonance f_0 issues des mesures H/V, les valeurs de $V_{s,30}$ issues des mesures MASW (valeurs indiquées en gras souligné) sur fond de carte géologique EROMAY sur le site de Combani.

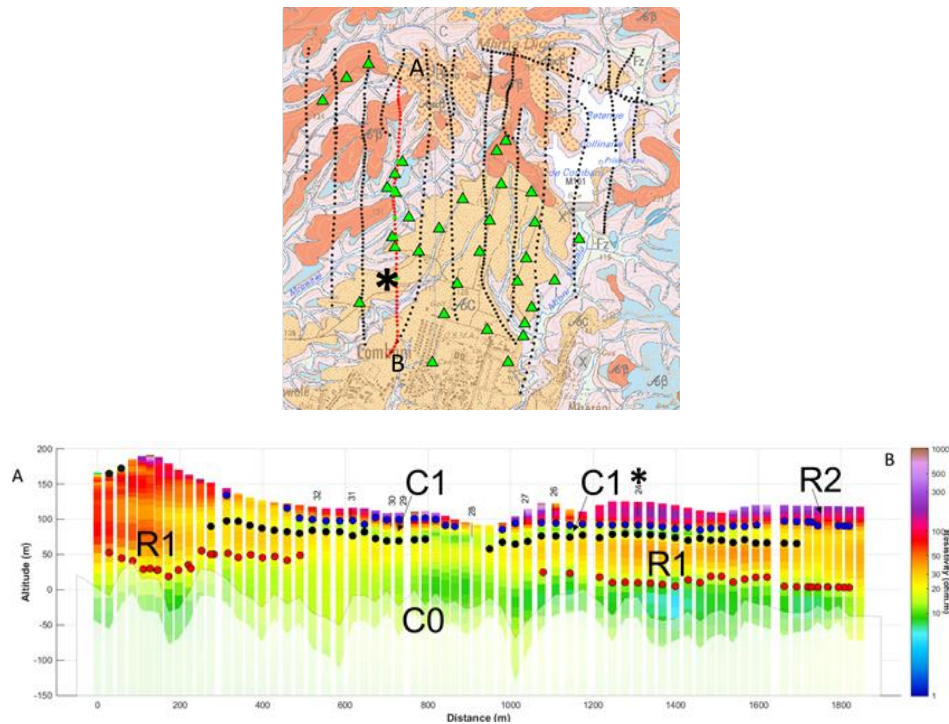


Figure 44 : Profil EM aéroporté et sa localisation dans le secteur de Combani. Sont également représentés les grands ensembles géophysiques, la localisation des données H/V (triangles verts) et les pointés obtenus : la roche saine fracturée est indiquée avec des ronds rouges, la base de l'horizon latéritique (R2) est pointée en bleu et la base des alluvions/colluvions (C1) est pointé en noir.

Dans le secteur de Combani, il n'existe pas de données de forage pour caler en profondeur l'EM et la géologie. Nous avons donc utilisé les données MASW et H/V pour repérer les interfaces d'intérêt responsables des effets de site lithologiques. Comme pour Longoni, un pointé semi-automatique des interfaces d'intérêt a ensuite été appliqué comme décrit dans le paragraphe 4.3.3 (exemple de pointé sur la Figure 38). Le résultat des pointés est indiqué sur la Figure 45.

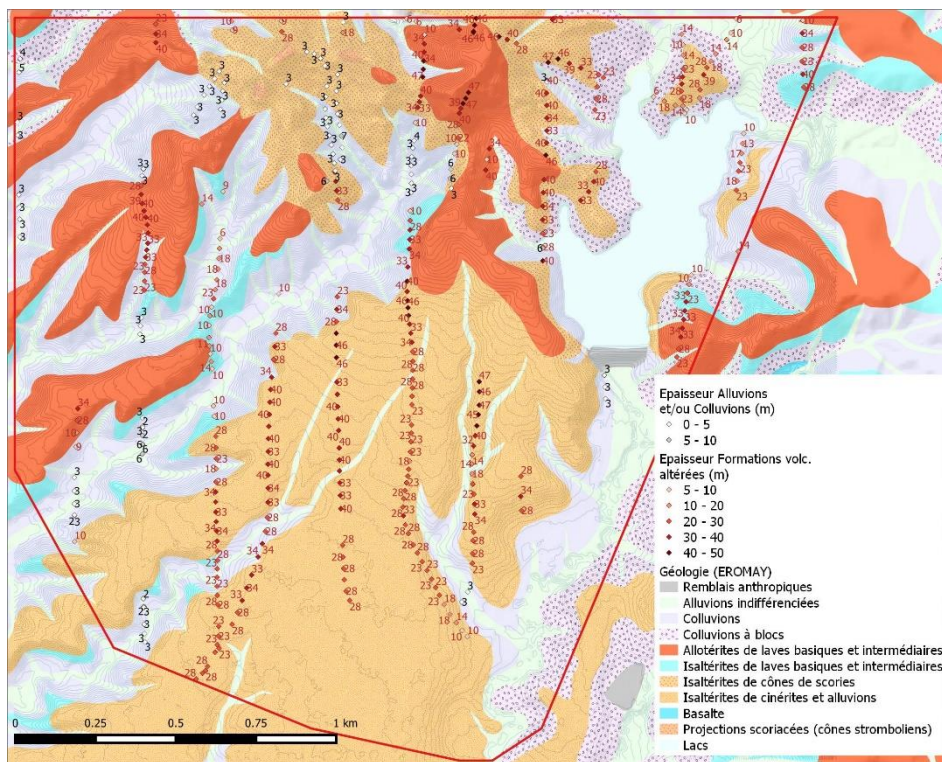
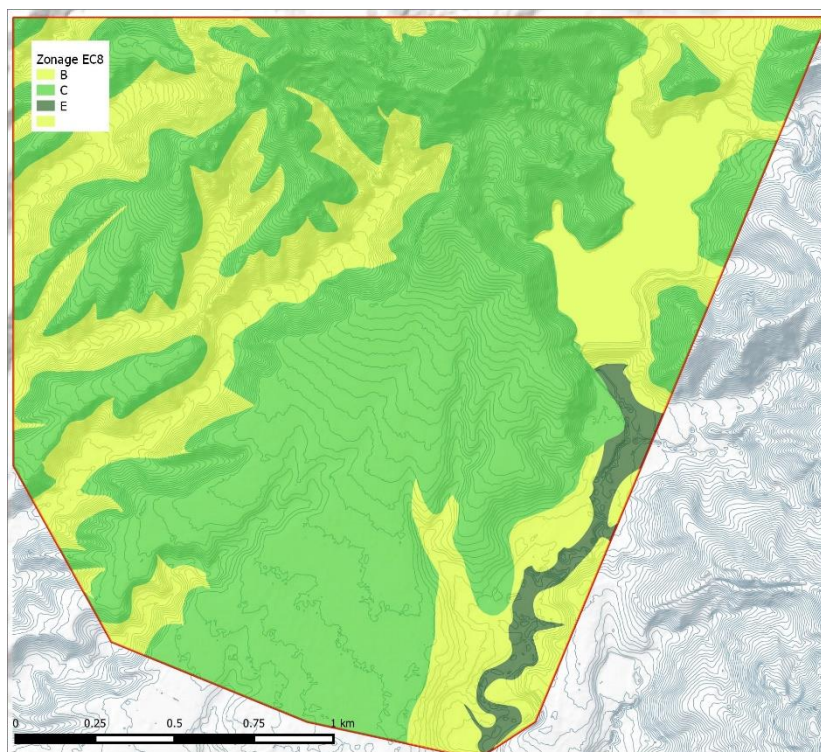
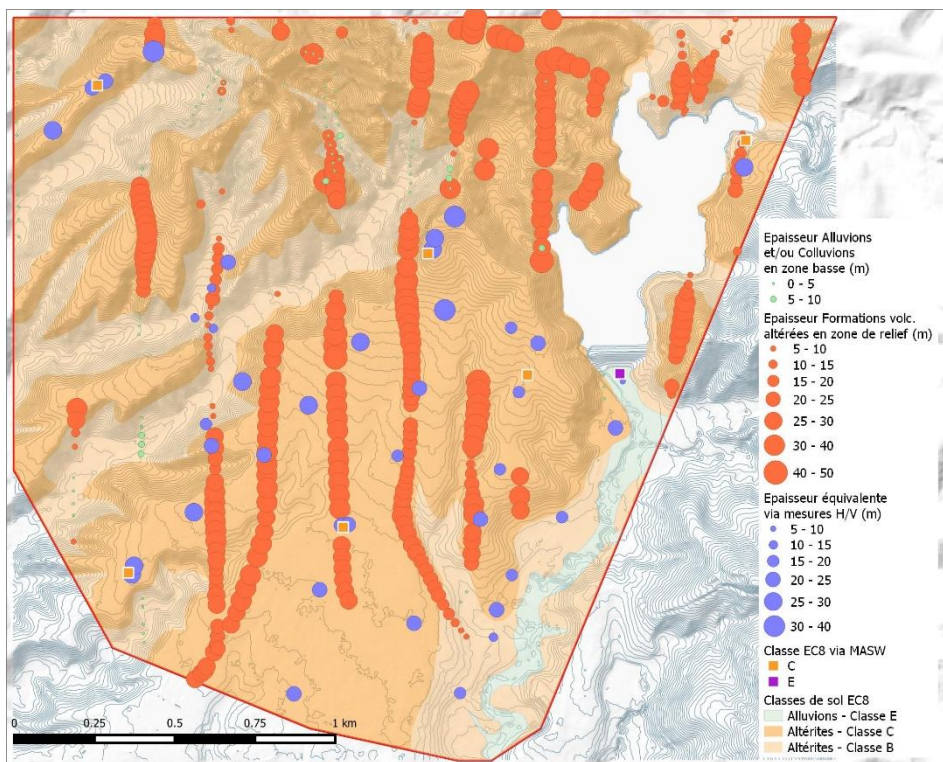


Figure 45 : Épaisseurs des formations géologiques superficielles d'après les données EM aéroportées sur le site de Combani.

L'étape suivante du travail a consisté à rassembler les informations d'épaisseur de couches superficielles issues des données EM aéroportées et des données géophysiques sol. Pour cela, nous avons traduites les valeurs de fréquence de résonance f_0 issues des mesures H/V en épaisseur équivalente en considérant une valeur de V_s constante sur la zone de 250 m/s. Une fois obtenue la cartographie des épaisseurs des couches responsables de effets de site lithologiques, nous avons appliqué les critères de classification de classes de sol décrits sur les Figure 28 et Figure 29. Ce travail est présenté sur la Figure 46.

L'étape finale a simplement consisté à établir la cartographie des classes de sol EC8 à partir du zonage présenté en Figure 46. Cette cartographie est présentée en Figure 47.



Pour le site de Combani, la comparaison entre la cartographie réalisée en 2004 (Figure 48) dans le cadre des atlas des aléas naturels et celle réalisée dans le cadre de cette étude (Figure 47) montre que la méthodologie actuelle a permis d'affiner le zonage existant (avec niveau d'aléa moyen présent sur la quasi-totalité de la zone) en distinguant deux classes de sol EC8 (B et C) dans les formations volcaniques présentes dans la zone pilote.

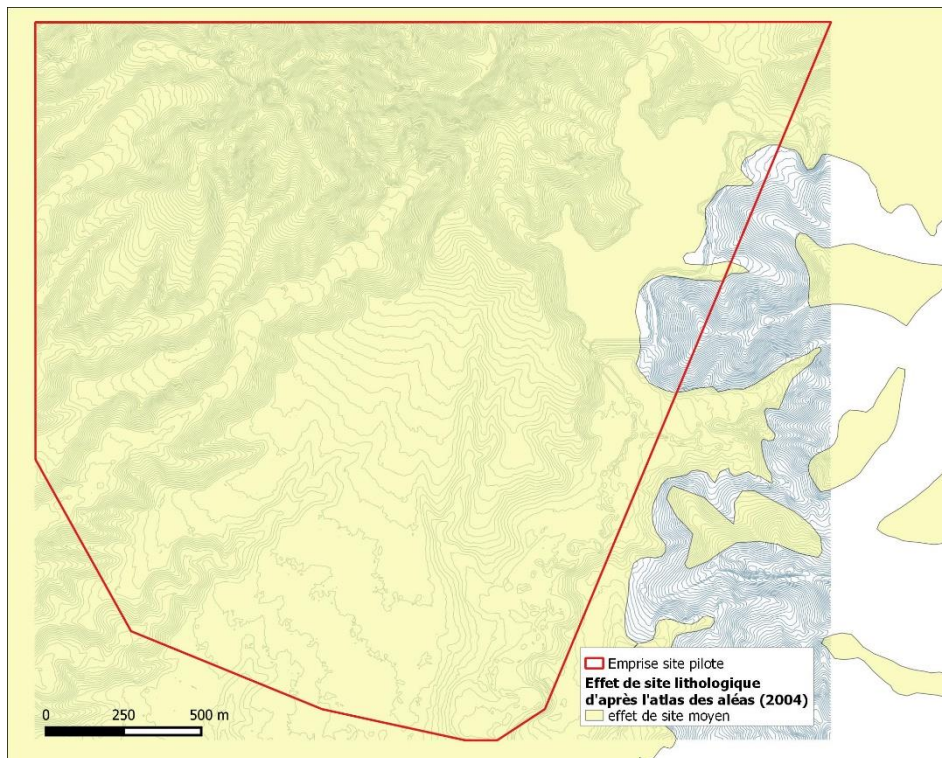


Figure 48 : Cartographie des effets de site lithologiques sur le site de Combani d'après l'atlas des aléas de 2004. Les zones non colorisées indiquent un effet de site supposé nul à faible.

5.4 LIMITES ET PERSPECTIVES

Le travail de cartographie des classes de sol réalisé sur les 3 sites pilotes a été concluant. Il montre notamment que les données EM aéroportées donnent une information pertinente en termes d'épaisseur des couches d'intérêt pour les effets de site lithologiques et complètent de façon utile les données géophysiques sol utilisées classiquement pour ce type d'étude (mesures H/V et MASW).

Pour les 3 sites pilotes, la distribution spatiale des données obtenues via l'EM aéroportée est particulièrement intéressante aussi bien en termes de quantité d'informations que de répartition spatiale de cette information. Elles sont, par ailleurs, réparties de façon beaucoup plus homogène avec un quadrillage régulier (hors zones urbanisées) ce qui facilite la spatialisation de l'information utile à la définition de classes de sol, et par là même, à la cartographie des effets de site lithologique. Les données EM aéroportées disponibles sur Mayotte sont donc des données sources indispensables à la cartographie des effets de site sur l'île, notamment si l'on souhaite déployer cette cartographie sur l'ensemble du territoire pour mettre à niveau les atlas des aléas naturels sortis en 2004.

Cela étant, la méthodologie employée est basée sur un pointé des interfaces d'intérêt réalisé soit de façon manuelle, soit de façon semi-automatique via des algorithmes nécessitant des calages locaux. L'extrapolation à l'ensemble de l'île présente donc un verrou opérationnel à lever lors de la phase 2 du projet. Des pistes de travail basées sur des algorithmes d'intelligence artificielle (deep learning ou réseaux neuronaux) sont déjà à l'étude pour cela.

Un autre point à considérer en phase 2 est plus opérationnel et concerne la phase de cartographie elle-même. Habituellement, les données disponibles étant peu nombreuses (quelques dizaines par site), la cartographie est basée essentiellement sur les polygones géologiques de la carte géologique de référence (ici EROMAY) avec des modifications manuelles ponctuelles en fonction des données disponibles. Ici, les données sont plus nombreuses (quelques milliers par site) et nécessiteront un traitement de cartographie automatisé avec utilisation de techniques de krigeage pour spatialiser l'information et appliquer les critères de classification des classes de sol de façon statistique. Cette phase d'automatisation du volet cartographique est prévue en phase 2.

6. Effets de site topographiques

6.1 DÉFINITION

On a constaté que, tous facteurs étant apparemment égaux par ailleurs, certaines configurations topographiques pouvaient entraîner des amplifications notoires d'un signal sismique, entraînant une augmentation locale de l'intensité du tremblement de terre. Il s'agit de zones de rupture de pente, de crête, de bordure de plateau, de sommet.

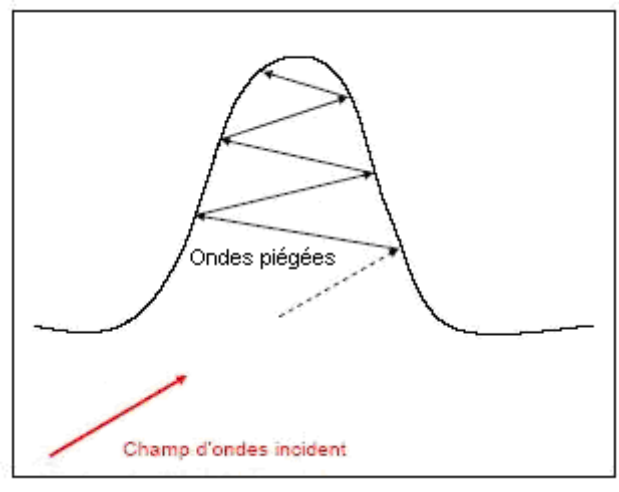


Figure 49 : Principe des effets topographiques

Les règles parasismiques EC8 tiennent compte de ces effets par l'application d'un coefficient multiplicateur d'amplification S_T pour les ouvrages se trouvant dans les situations topographiques listées précédemment. Dans la réglementation parasismique en vigueur (NF EN 1998-5), le coefficient d'amplification s'applique « de préférence lorsque les pentes font partie d'irrégularités topographiques bidimensionnelles, comme les buttes et versants longs de hauteur supérieure à environ 30 m ». Il est spécifié en outre que « pour des inclinaisons moyennes des terrains en pente, inférieures à environ 15°, les effets topographiques peuvent être négligés, alors qu'une étude spécifique est recommandée dans le cas d'une topographie locale fortement irrégulière ».

Le coefficient S_T varie entre 1 (pas d'augmentation des accélérations des spectres de dimensionnement) et 1,4 (majoration de 40 % des accélérations). Pour son calcul, les indications suivantes sont applicables (extraits de la norme NF EN 1998-5) :

- Versants et pentes isolés.* Il convient d'utiliser une valeur $S_T \geq 1,2$ pour les sites situés à proximité de la crête ;
- Buttes dont la largeur de la crête est notablement inférieure à la largeur à la base.* Il convient d'utiliser une valeur $S_T \geq 1,4$ à proximité de la crête des pentes dont l'angle d'inclinaison moyen est supérieur à 30°, et une valeur $S_T \geq 1,2$ pour les angles inférieurs ;
- Présence d'une couche lâche en surface.* Dans le cas d'une couche lâche en surface, il convient d'augmenter la valeur de S_T , donnée en (a) et (b), d'au moins 20 % ;
- Variation spatiale du coefficient d'amplification.* On peut admettre que la valeur de S_T décroît linéairement, en fonction de la hauteur au-dessus de la base du versant ou de la butte, jusqu'à valoir un à la base.

Si le coefficient ainsi décrit est applicable à l'échelle d'une parcelle, il s'avère complexe à appliquer de façon opérationnelle sur un site de quelques km² (*a fortiori* sur l'ensemble du territoire mahorais) en l'absence de critères quantitatifs sur la définition d'un versant isolé (critère a) ou d'une butte telle que définie selon le critère b).

Nous nous sommes donc appuyés sur les règles parasismiques antérieures PS-92 (AFNOR, 1995) qui décrivent le calcul du coefficient S_T (ou coefficient τ dans les règles PS-92) de façon plus explicite que les règles parasismiques EC8 tout en ayant une prise en compte des effets topographiques similaire à celle des règles parasismiques EC8 en vigueur. Il est obtenu à l'aide de formules empiriques basées sur l'analyse de profils topographiques bidimensionnels (voir description détaillée en annexe).

6.2 CARTOGRAPHIE

Dans le cadre d'une cartographie à l'échelle communale, il est nécessaire d'adapter ces règles (PS92 et EC8) pour aboutir à un zonage spatialement cohérent. Par conséquent, sur les 3 sites pilotes du projet, les effets de site topographiques sont représentés par un zonage binaire du coefficient τ , c'est-à-dire en distinguant les zones sans amplification (coefficient égal à 1) de celles où une modification du signal est possible (coefficient supérieur à 1).

Ce coefficient a été calculé en tout point du territoire d'étude par le programme *SUPERTAU* du BRGM, qui reprend le principe de calcul des règles PS92 françaises, et calcule la valeur de τ en chaque maille du modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 5 mètres.

Compte tenu de l'ensemble de ces remarques et afin de tenir compte de l'effet topographique comme préconisé par le Guide Méthodologique des Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR) partie Risques Sismiques (Fabriol et Garry, 2002), nous préconisons de fixer un facteur multiplicatif forfaitaire $\tau = 1,4$ sur les mouvements sismiques définis sous la forme de spectres en accélération pour toutes les zones concernées par une amplification topographique selon la démarche proposée. La cartographie des zones susceptibles de présenter un effet de site topographique se faisant de façon qualitative (nous ne distinguons pas les différentes valeurs du coefficient τ puisque celui-ci ne correspond pas à une estimation physique du phénomène), nous préconisons volontairement le facteur multiplicatif le plus pénalisant pour tenir compte de l'effet topographique.

6.3 APPLICATION AUX 3 ZONES PILOTES

Le calcul du coefficient d'amplification topographique τ tel que décrit dans le paragraphe précédent a été appliqué sur les 3 sites pilotes de Dembeni (Figure 50), Longoni (Figure 52) et Combani (Figure 53) pour aboutir à une cartographie des zones susceptibles de présenter un effet de site topographique ($\tau > 1$) au sens de la réglementation PS-92. Ce calcul a été réalisé à partir du MNT IGN au pas de 5 m. Il est à noter que, sur le site de Dembeni, la station sismologique MILA pour laquelle un effet de site topographique est suspecté (voir chapitre 2.4) est bien située sur une zone de susceptibilité à l'effet topographique.

Le zonage obtenu dans cette étude est beaucoup plus fin que celui obtenu en 2004 dans le cadre des atlas d'aléa du fait de la meilleure résolution du MNT de base. En 2004, le MNT utilisé pour les calculs était au pas de 50 m, à comparer au MNT au pas de 5 m disponible actuellement. Par ailleurs, il est possible que le critère de sélection des zones susceptibles de présenter un effet de site ($\tau > 1$) soit probablement plus conservateur que celui utilisé en 2004 (ce critère n'est pas mentionné dans les rapports correspondants aux atlas). Ces deux considérations expliquent les différences de zonage observé entre celui des atlas de 2004 et celui réalisé dans le cadre de cette étude (Figure 51).

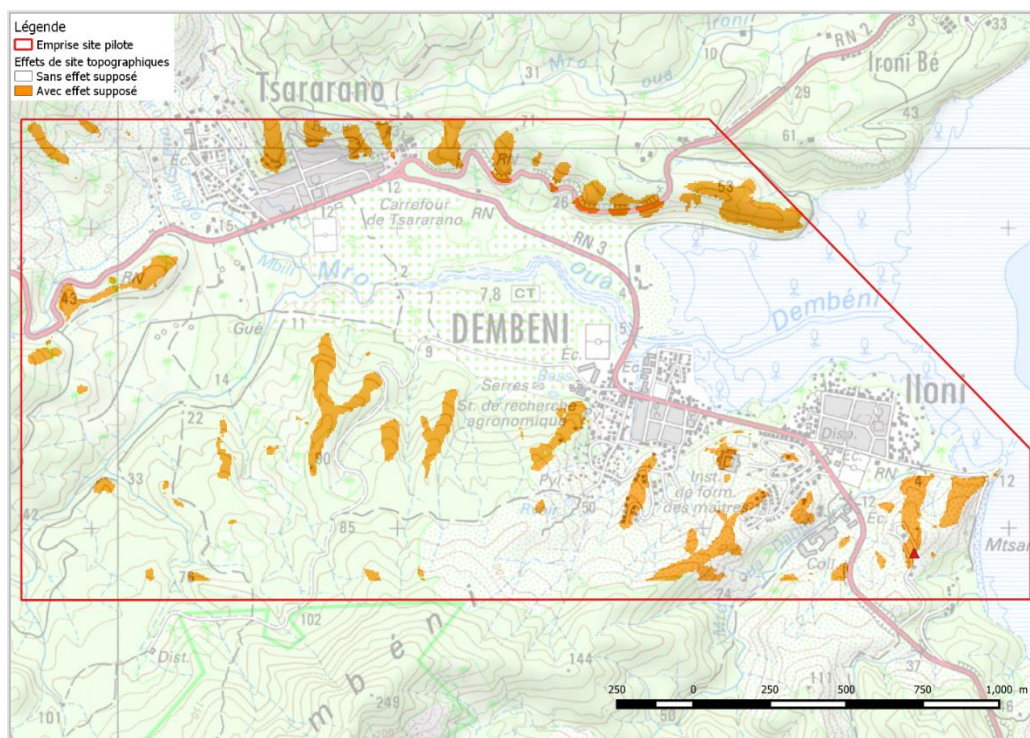


Figure 50 : Cartographie des effets de site topographiques sur le site de Dembeni. La localisation de station sismologique d'Iloni (MILA) est indiquée par un triangle rouge.

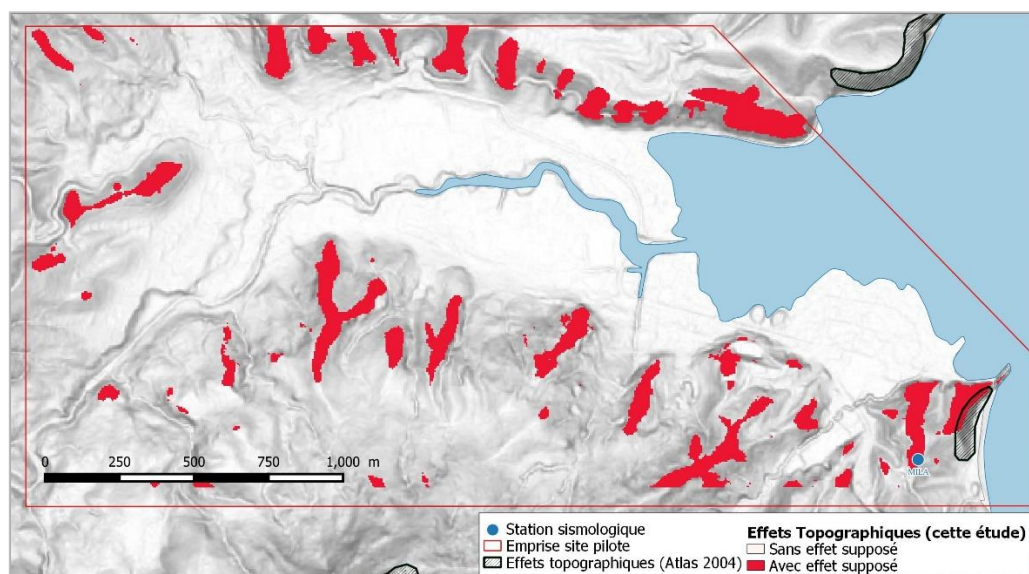


Figure 51 : Comparaison entre la cartographie des effets de site topographiques de la présente étude (en rouge) et celle issues des atlas d'aléa de 2004 (hachures noires). La localisation de station sismologique d'Iloni (MILA) est indiquée par un rond bleu.

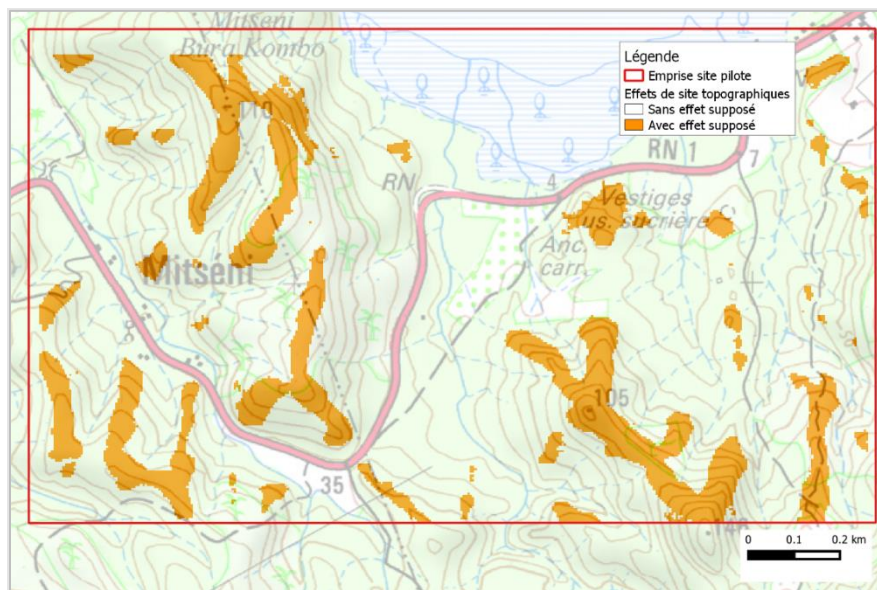


Figure 52 : Cartographie des effets de site topographiques sur le site de Longoni.

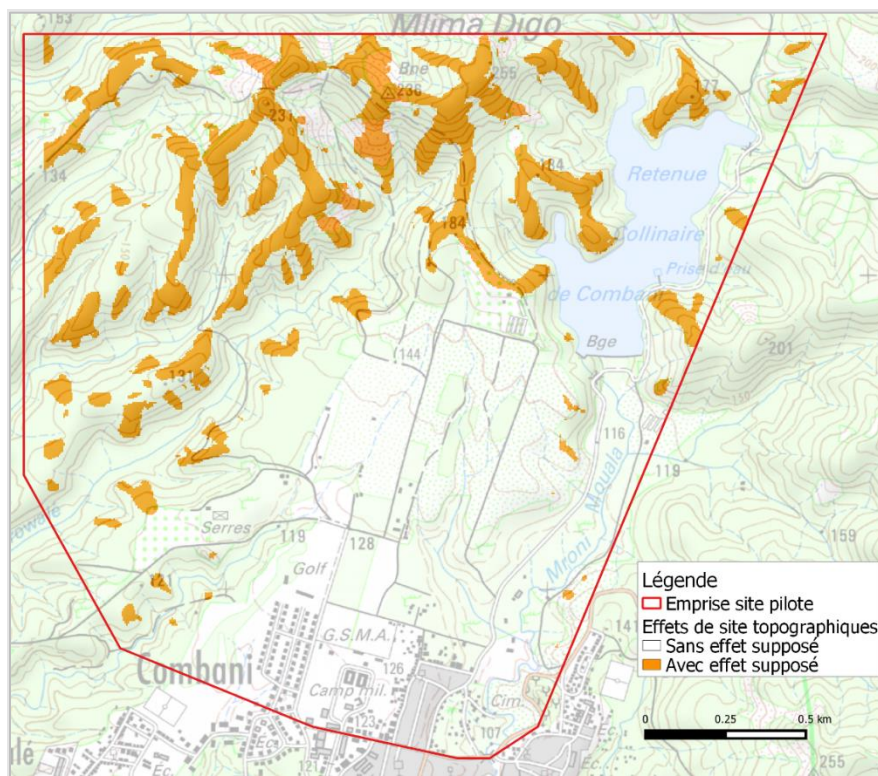


Figure 53 : Cartographie des effets de site topographiques sur le site de Combani.

6.4 LIMITES ET PERSPECTIVES

Les effets de site topographiques semblent jouer un rôle important dans les amplifications des mouvements sismiques observés lors de la crise sismo-volcanique initiée en 2018. Il est donc essentiel d'un fournir une cartographie utilisable à des fins d'aménagement du territoire et de porter à connaissance. Le calcul du coefficient topographique tel que préconisé dans la réglementation parasismique EC8 en vigueur est forfaitaire. Les critères proposés s'avèrent peu opérationnels et difficiles à appliquer sur une vaste zone. Nous avons donc choisi de s'appuyer sur le calcul tel que décrit dans la réglementation passée PS-92. Ce calcul est néanmoins très dépendant de la résolution du MNT choisi et des critères de sélection de la zone susceptible de présenter un effet topographique comme le montre la comparaison entre le zonage obtenu dans cette étude et celui de 2004.

Pour pallier ces inconvénients et s'appuyer sur une meilleure compréhension physique du phénomène, il serait intéressant de tester l'approche proposée par Maufroy *et al.* (2015) qui repose sur le calcul d'un paramètre appelé FSC (Frequency-Scaled Curvature) lui-même basé sur le calcul du paramètre géomorphologique de courbure. Cette méthode a l'avantage de se baser sur des critères simples et quantifiés et de proposer une approche plus physique du phénomène (notamment en termes de fréquence). Ce test pourra être proposé dans la phase 2 du projet.

7. Liquéfaction

Concernant le phénomène de liquéfaction, les travaux réalisés dans le cadre de cette étude viennent compléter les travaux préparatoires réalisés en 2017 (Noury, 2018) sur la révision de l'aléa, à travers :

- un retour d'expérience sur les potentiels indices ayant pu apparaître dans le cadre de la crise sismique actuelle ;
- un retour d'expérience du traitement de l'aléa liquéfaction sur les sites du Vice-rectorat ;
- une étude paramétrique de sensibilité à la liquéfaction.

L'objectif est d'établir une méthodologie opérationnelle de cartographie de ce phénomène, et de calibrer, si besoin, les analyses géotechniques complémentaires à réaliser.

7.1 LE PHÉNOMÈNE DE LIQUÉFACTION

7.1.1 Définition du phénomène

La liquéfaction est une perte de résistance au cisaillement du sol. Elle est créée par une quasi annulation de la contrainte effective (la force de contact entre les grains de sols) déclenchée par l'augmentation de la pression interstitielle. Celle-ci peut être causée par les sollicitations cycliques générées par un séisme. Dans ce cas, les retours d'expériences indiquent :

- que la liquéfaction concerne les sols situés à moins de 20-25 m de profondeur ;
- qu'elle se produit le plus souvent sur des sols non ou peu cohérents, lâches et saturés, tels que, par exemple, des alluvions récentes ou des remblais hydrauliques non compactés, sous nappe ;
- qu'elle est d'autant plus intense que la magnitude du séisme est forte et que l'accélération générée est forte.

Un sol liquéfié se déforme et peut même rompre. Ces modifications d'état se manifestent sous différentes formes (Youd, 1992) :

- des éjections de sable : la liquéfaction de matériaux situés en profondeur a tendance à les faire sortir à la surface du sol, sous la forme de trainées ou de volcans miniatures ;
- des glissements de terrain : selon la pente du terrain, les sols liquéfiés peuvent glisser, voire entraîner une coulée de boue. Ces déplacements peuvent être de plusieurs mètres voire dizaines de mètres. Les conséquences pour les aménagements situés dans la zone déformée peuvent être très dommageables ;
- des déformations de la surface du sol : dans le cas d'une surface plane, la liquéfaction d'une couche de sol située en profondeur peut entraîner le déplacement et la fissuration de la couche de sol la surplombant, impactant les aménagements de surface par des déformations et ruptures des revêtements, des déformations des canalisations enterrées, etc...
- la perte de résistance au cisaillement, des tassements et des tassements différentiels : lorsque le sol liquéfié se situe sous des fondations, la résistance résiduelle au cisaillement peut diminuer et devenir plus faible que celle nécessaire à la bonne stabilité des aménagements ; le sol support va alors tasser, voire être poinçonné ;
- des soulèvements d'ouvrages enterrés : les sols liquéfiés exercent une poussée vers le haut pouvant entraîner un soulèvement des aménagements les plus légers.

7.1.2 Évaluation de l'aléa liquéfaction

D'après la réglementation en vigueur, le risque de liquéfaction doit être évalué selon les règles définies dans la norme NF EN 1998-5 : Eurocode 8, partie 5. Elle impose de s'interroger sur la liquéfaction des sols situés jusqu'à 20 mètres de profondeur (ou moins profond s'il est avéré que les matériaux ne sont plus liquéfiables en deçà d'un certain horizon géotechnique).

L'Eurocode 8 indique des critères d'exclusion permettant de négliger l'aléa liquéfaction :

« Il est aussi permis de négliger le risque de liquéfaction lorsque $\alpha \cdot S < 0,15$ et lorsque, en même temps, une des conditions suivantes au moins est remplie :

- les sables contiennent de l'argile en proportion supérieure à 20 % avec un indice de plasticité $PI > 10$;
- les sables contiennent des silts en proportion supérieure à 35 % et, simultanément le nombre de coups SPT, normalisé pour l'effet de surcharge due au terrain et du rapport d'énergie, $N1(60) > 20$;
- les sables sont propres, avec la valeur du nombre de coups SPT, normalisé pour l'effet de surcharge due au terrain et du rapport d'énergie $N1(60) > 30$. »

où α correspond au rapport de la valeur de calcul de l'accélération du sol pour un sol de classe A, à l'accélération de la pesanteur g ; et S correspond au coefficient de sol. *A priori*, étant donné le niveau d'aléa sismique de l'île, seuls les sols de classe de sol A satisferaient la première condition permettant de négliger le risque de liquéfaction. On justifie donc ainsi l'analyse systématique de la potentialité du phénomène de liquéfaction.

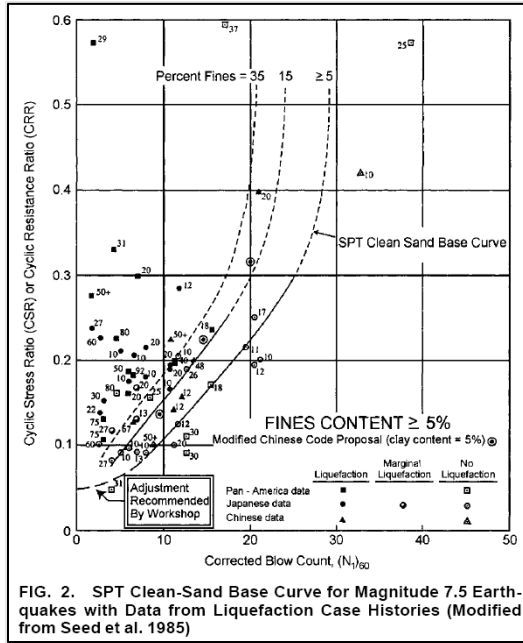
Dans le cas où les critères d'exclusion ne sont pas satisfaits, l'Eurocode 8 présente tout d'abord une approche qualitative pour cette évaluation ; l'évaluation de la susceptibilité à la liquéfaction doit en effet « être effectuée lorsque le sol de fondation comprend des couches étendues ou des lentilles épaisses de sable lâche, avec ou sans fines silteuses ou argileuses, au-dessous du niveau de la nappe phréatique, et lorsque ce niveau est proche de la surface du sol ».

Cette réglementation indique en particulier que « les reconnaissances exigées à cette fin doivent comporter au minimum la réalisation *in situ* soit d'essais de pénétration standard (SPT) soit d'essais de pénétration au cône (CPT), ainsi que la détermination des courbes granulométriques en laboratoire » (EN-1998-5 : 2004 4.1.4 (3)P). Par conséquent les évaluations privilégieront l'analyse d'essais CPT (avec mesure de la pression interstitielle si possible – CPTu) ou SPT, et d'essais d'identification en laboratoire (granulométrie par tamisage et par sédimentométrie, puis détermination des limites d'Atterberg).

Si le risque de liquéfaction ne peut être négligé, l'Eurocode 8 préconise une évaluation « par des méthodes reconnues d'ingénierie géotechnique. ». Nous retenons le principe d'un calcul d'un coefficient de sécurité FS, complété par l'approche NCEER de 2001, puis le calcul d'une valeur intégrante sur l'ensemble de la colonne de sol.

Le coefficient de sécurité peut être calculé en comparant les paramètres suivants, développés dans l'article de Youd *et al.* (2001) :

- la résistance du sol (Cyclic Resistance Ratio : CRR). Celle-ci est généralement calculée à partir des caractéristiques mécaniques mesurées *in-situ* et de règles empiriques basées sur l'étude des cas historiques. En pratique, les caractéristiques mécaniques sont fournies par des sondages géotechniques : l'essai de pénétration standard (SPT) et l'essai de pénétration statique (CPT), et par les essais géophysiques MASW. Le graphique de la Figure 54 présente le principe de calcul du CRR ;



Courbes liées à l'essai de pénétration standard (SPT)

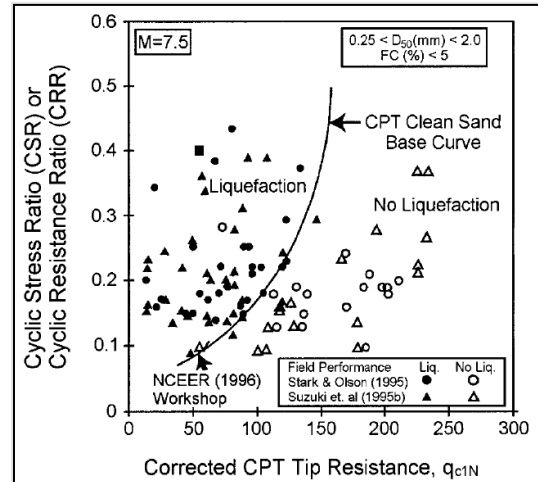


FIG. 4. Curve Recommended for Calculation of CRR from CPT Data along with Empirical Liquefaction Data from Compiled Case Histories (Reproduced from Robertson and Wride 1998)

Courbe liée à l'essai de pénétration statique (CPT)

Figure 54 : Courbes pour le calcul de la résistance à la liquéfaction (Youd et al., 2001).

- la sollicitation sismique (Cyclic Stress Ratio : CSR). Celle-ci est calculée à partir des scénarii sismiques retenus, en particulier avec la magnitude du séisme de référence et avec l'accélération horizontale maximale établie lors de l'évaluation des effets de site ;
- le coefficient de sécurité (Factor of Safety : FS). C'est le rapport entre la résistance du sol et la sollicitation sismique ($FS = CRR/CSR$).

Une fois calculé le coefficient de sécurité à chaque profondeur, la méthode d'Iwasaki *et al.* (1983), réalise une intégration de la valeur de FS sur toute la hauteur de la colonne de sol. Ce calcul final fournit l'indice de liquéfaction I_L :

$$I_L = \int_0^{20} (10 - 0.5z) F_L dz \quad \text{où : } F_L = 1 - F_S \text{ si } F_S \leq 1$$

$$F_L = 0 \text{ si } F_S > 1$$

z : profondeur (en m)

Les valeurs de I_L varient de 0 à 100. Les niveaux de probabilités, d'intensité et d'aléa associés sont les suivants :

Valeurs de I_L	Probabilité associée	Intensité associée	Aléa associé
$I_L = 0$	Pas de liquéfaction	Pas de désordre	Nul
$0 < I_L \leq 5$	Liquéfaction peu probable	Désordres peu dommageables	Faible
$5 < I_L \leq 15$	Liquéfaction probable	Désordres dommageables	Moyen
$I_L > 15$	Liquéfaction quasi-certaine	Désordres très dommageables (entraînant la ruine)	Fort

Figure 55 : Association des valeurs d'indice de liquéfaction aux niveaux de probabilité, d'intensité et d'aléa liquéfaction (d'après AFPS, 1993)

7.2 LE CONTEXTE MAHORAIS

7.2.1 Géologie et sensibilité des formations à la liquéfaction

Les informations concernant la géologie sont tirées à la fois de la notice explicative accompagnant la carte géologique de 2013 (Nehlig *et al.*, 2013), et du rapport BRGM/RP-69555-FR (Prognon *et al.*) ayant produit la carte lithologique des formations superficielles de l'île.

L'île de Mayotte se compose de trois ensembles volcaniques morphologiquement et structuralement distincts qui forment le soubassement de l'île ; il s'agit des complexes du sud, du nord-ouest et du Mtsapéré ; auxquels s'ajoutent une activité récente sur Petite-Terre. Ce socle volcanique est principalement composé de laves, avec des niveaux plus ou moins importants de dépôts volcanoclastiques.

Une altération supergène généralisée des terrains a entraîné le développement d'un régolithe autochtone (« altérites ») complexe, que l'on retrouve partout sur l'île. Les formations superficielles sont aussi composées de formations allochtones, correspondant à des dépôts où le matériel qui compose la formation a subi un transport plus ou moins important.

L'ensemble de ces formations superficielles peuvent présenter une sensibilité au phénomène de liquéfaction, discuté ci-dessous. Cette sensibilité est appréciée en tenant compte de la définition donnée dans l'Eurocode 8 : « des couches étendues ou des lentilles épaisses de sable lâche, avec ou sans fines silteuses ou argileuses, au-dessous du niveau de la nappe phréatique, et lorsque ce niveau est proche de la surface du sol. ». On ne tient néanmoins pas compte du niveau de la nappe dans cette première approche.

7.2.1.1 Formations superficielles allochtones

Les principaux vecteurs de transport de ces terrains sont l'eau et la gravité. Elles sont aussi parfois le résultat d'une action anthropique. On précise ci-dessous entre parenthèse la notation de cette formation sur les cartes géologiques.

7.2.1.1.1 Dépôts anthropiques (X)

Ces formations sont de nature variables, depuis les faciès argileux jusqu'aux faciès à blocs. Les épaisseurs sont elles aussi très variables (généralement quelques mètres).

Compte-tenu de cette variabilité de nature, il n'est pas possible de définir une sensibilité *a priori* au phénomène de liquéfaction.

7.2.1.1.2 Dépôts alluvionnaires (FG – dépôts torrentiels et FL – dépôts limoneux)

Ces dépôts alluvionnaires correspondent à des dépôts torrentiels (FG), alluvions grossières d'origine torrentielles, localisées dans les fonds de vallée. Ils sont constitués de blocs de taille centimétriques à métrique, avec parfois une matrice sablo-limoneuse. Dans les zones de plaine, ces alluvions sont parfois recouvertes par une épaisseur limitée (2 mètres au maximum) de limons argileux fluviaux (FL) traduisant un changement de dynamique de dépôt des sédiments au cours de l'histoire géologique. Ces alluvions fines argilo-sableuses sont composées d'une certaine proportion de matière organique et présentent une texture grumeleuse fine avec des grumeaux de quelques millimètres au maximum

Compte-tenu de la nature grossière des éléments constituant les dépôts torrentiels, ceux-ci ne sont pas supposés sensibles à la liquéfaction. Les alluvions fines limoneuses ne sont pas non plus supposées sensibles à ce phénomène.

7.2.1.1.3 Dépôts de pente

La carte lithologique au 1/10 000 distingue :

- les dépôts de pente fins dérivant des formations superficielles autochtones (CH5) ;
- les dépôts de pente (C - colluvions) ;
- les dépôts de pente à blocs (CB) ;
- les dépôts de pente à blocs jointifs (CBJ).

Ils sont généralement constitués d'une matrice sablo-limoneuse, bruns à rougeâtres, contenant des proportions variables de blocs de dimensions variées. Les épaisseurs de ces dépôts varient de quelques centimètres à plusieurs mètres, en augmentant à mesure que l'on descend depuis les crêtes vers le bas de pente.

Compte-tenu de la nature de la matrice de ces formations de pente, elles sont supposées comme susceptibles au phénomène de liquéfaction.

7.2.1.1.4 Dépôts de plage (Sb)

Les sables côtiers en plages se localisent surtout sur les côtes exposées à la houle du large. Les faciès sont généralement d'autant plus grossiers que la plage se situe à proximité d'une passe. Il s'agit de sable corallien et de sables d'origine volcanique dont les constituant dépendent des matériaux sources. Localement, des cordons de galets sont présents.

Les fonds des baies sont envahis par un mélange de limons sableux où s'installe la mangrove. Le fond du lagon, profond en moyenne de 20 à 40 mètres, est couvert de vase.

Compte-tenu de la nature principalement sableuse de cette formation, elle est supposée sensible au phénomène de liquéfaction. Au contraire, les formations de mangrove sont généralement considérées comme constituées de formations trop fines pour être sensible au phénomène.

7.2.1.2 Formations superficielles autochtones

Les formations autochtones correspondent à l'ensemble des roches constituant le « socle » volcanique de l'île de Mayotte, avec des degrés d'altération divers. L'altération est un phénomène de transformation de la roche saine de manière progressive depuis la surface vers la profondeur. L'évolution du phénomène se caractérise par une dégradation de la roche jusqu'à sa transformation totale en « allotérite ». Les roches ayant subi une altération « partielle » sont regroupées sous le terme d'« isaltérite ».

La Figure 56 présente ces différentes typologies de terrains en place. Les horizons les plus altérés sont ceux pouvant présenter une sensibilité au phénomène de liquéfaction.

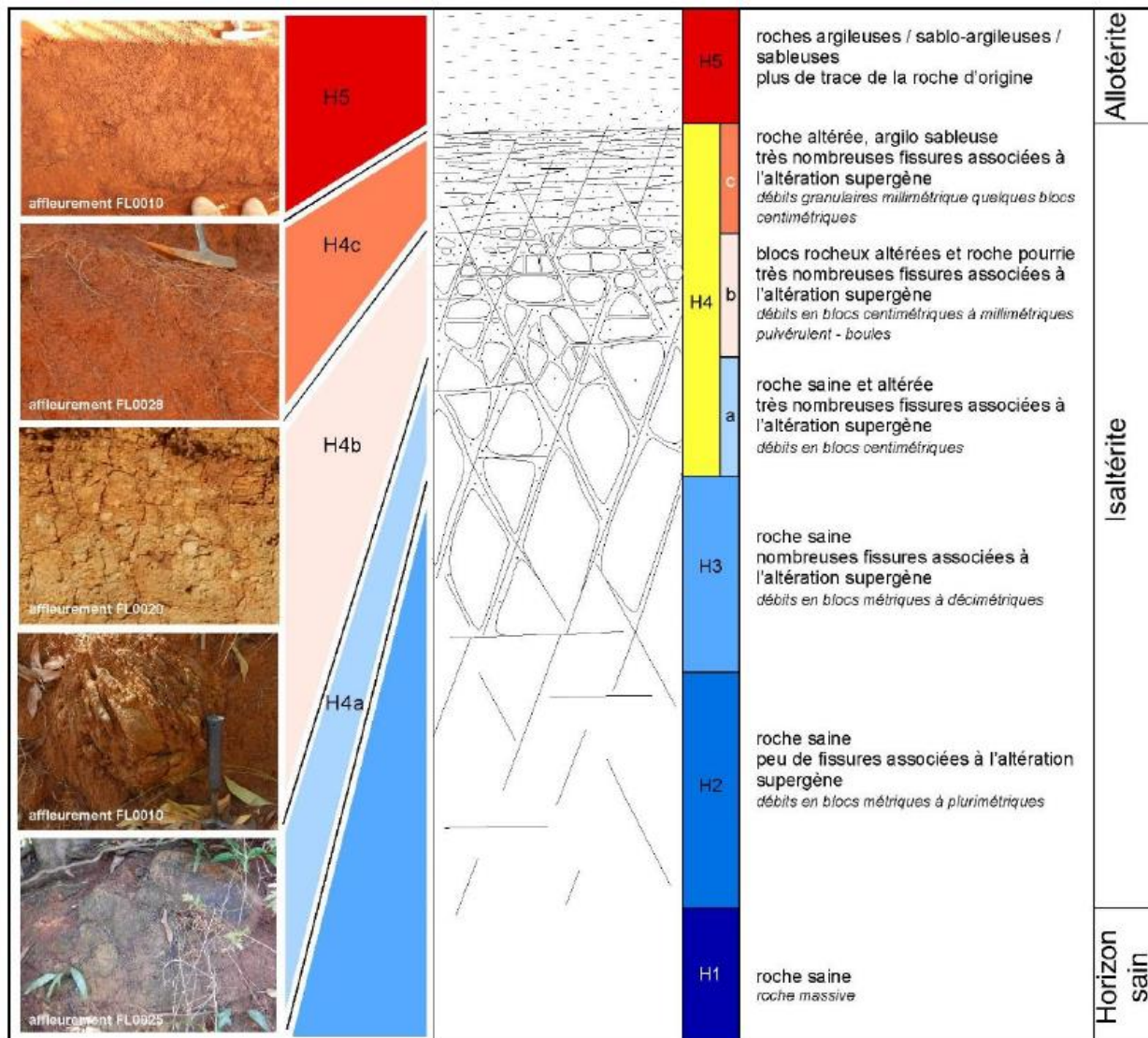


Figure 56 : Profil schématique des différents horizons composant un profil d'altération typique de l'île de Mayotte (Prognon et al. 2020)

7.2.1.2.1 Horizon H5

Cet horizon correspond à l'allotérite ; cette roche meuble est constituée par un matériel compact rouge-orangé, de nature ferreuse et argileuse. L'épaisseur de cet horizon est généralement métrique, le maximum observé atteint 1,5 mètres.

Compte-tenu de la nature argileuse et ferreuse de cet horizon, il n'est pas supposé sensible à la liquéfaction.

7.2.1.2.2 Horizon H4

L'horizon H4 correspond à un horizon de transition de roches fissurées intensément altérées à une roche meuble où persistent quelques fantômes de roches. Il est subdivisé en 3 niveaux :

- horizon H4c : roche meuble pulvérulente où seuls quelques éléments fantômes de roches persistent ;

- horizon H4b : roche intensément fracturée libérant des blocs de toute taille millimétriques à décimétriques. La cohésion des matériaux est faible ;
- horizon H4a : masse rocheuse fortement fracturée avec de nombreux blocs centimétriques à décimétriques.

Compte-tenu des descriptions de ces horizons, seuls les horizons H4b et H4c sont supposés comme potentiellement sensibles à la liquéfaction.

On notera, au sein de cet horizon H4b, la particularité forte des terrains de Petite-Terre. Ceux-ci sont notés comme terrains volcanoclastiques récents (projections phréato-magmatiques de type maar), aux caractéristiques très spécifiques par rapport aux terrains de Grande-Terre. Du fait de leur nature fine, contenant parfois des blocs, elles sont supposées comme potentiellement sensibles à la liquéfaction.

Les isaltérites de cinérites et alluvions, situées autour de Combani et Kahani, présentent, elles, une sensibilité à la liquéfaction du fait d'une nature sablo-silteuse, liée à l'altération des cendres.

7.2.2 Potentiels indices de liquéfaction lié à la crise sismique actuelle

Les informations présentées ici sont issues du document établi par le RENASS (Sira *et al.*, 2018) et intitulé « BCSF-RENASS-R4 – 07/2018 – Essaim sismique à l'est de Mayotte. Analyse pour la période du 10 mai au 15 juin 2018 ». Ce rapport fait état des dommages recensés dans différentes communes de l'île de Mayotte suite aux sollicitations sismiques survenues entre le 10 mai et le 15 juin 2018, via les effets rapportés par la Préfecture, une mission DGPR, les médias et réseaux sociaux, et via une mission de terrain spécifique. Cette mission s'est déroulée du 11 au 15 juin et a mobilisé 2 binômes d'experts du groupe d'intervention macrosismique. Aucun indice de liquéfaction n'est mentionné dans ce document.

Cependant, l'objectif de la mission post-sismique était de classer l'endommagement par niveau et selon chaque classe de vulnérabilité ; elle n'avait donc pas vocation à décrire de façon exhaustive tous les dommages identifiés. De ce fait, il est possible que des effets « faibles », indices de phénomènes de liquéfaction, peuvent ne pas être relatés dans ce rapport bilan. Pour la présente étude, nous considérons qu'il ne s'est pas produit de liquéfaction notable pendant la période couverte par cette analyse.

7.2.3 Sismicité locale et liquéfaction

Une évaluation d'aléa sismique probabiliste, tenant compte de la crise sismique en cours à Mayotte, a été produite dans le cadre d'une étude réalisée en 2019 (Bertil *et al.*, 2019). Celle-ci aboutit aux conclusions suivantes :

- un pga de 0,13 g en valeur moyenne, confirmant, en moyenne, la position de Mayotte en zone de sismicité 3 ;
- des incertitudes persistent sur cette valeur, qui entraînent des valeurs de pga à 0,09 g en percentile 15 % et 0,18 g en percentile 85 % ;
- à 475 ans, les sources les plus contributives sont autour des magnitudes 4.5-5.0. Pour des périodes de retour plus longues, les magnitudes à considérer seraient plus grandes.

Il est indiqué dans ce rapport que « la crise volcano-tectonique de 2018-2019 ne remet pas en question ce résultat. », même si les connaissances actuelles sont encore insuffisantes.

Comme indiqué dans le paragraphe 7.1.2 précisant les modalités d'évaluation du phénomène de liquéfaction, le CSR (Cyclic Stress Ratio) est calculé en tenant compte de la magnitude du séisme de référence et de l'accélération horizontale maximale établie lors de l'évaluation des effets de site. Compte-tenu des conclusions de l'étude de 2019, et des incertitudes persistantes faute d'une connaissance suffisante, il semble important de mener une étude de sensibilité sur ces 2 paramètres dans le calcul des indices de liquéfaction. Ceci est l'objet des réanalyses du paragraphe 7.3.1 ci-dessous.

7.2.4 Hydrogéologie

Le phénomène de liquéfaction est conditionné par la présence de terrains meubles saturés. Les conditions hydrogéologiques sont donc importantes à appréhender au mieux dans le contexte de l'étude. Les éléments rapportés ici sont tirés de quatre documents : la notice de la carte géologique de 2013 (Nehlig *et al.*, 2013) et trois synthèses du potentiel en eau souterraine de Mayotte (Guilbert M. *et al.* 2008 et Jaouën *et al.*, 2012 et 2013).

En global, on peut retenir que l'île de Mayotte correspond à un mille-feuille hydrogéologique, résultant d'un enchevêtrement de formations basaltiques saines et fissurées reposant sur des unités plus altérées. Cette organisation géologique permet la formation d'unités aquifères distinctes à différentes profondeurs, depuis la nappe perchée jusqu'à la nappe profonde captive, et aux propriétés hydrodynamiques variées.

27 piézomètres font ou ont fait l'objet d'un suivi. Ils sont répartis sur l'ensemble du territoire (Figure 57). Ils permettent une visibilité sur le niveau de l'eau au point de suivi. Ces points montrent pour l'essentiel la présence d'eau à faible profondeur, à savoir à moins de 20 mètres de la surface. Les battements de nappes sont variables d'un piézomètre à l'autre, de quelques centimètres à plusieurs mètres.

Compte-tenu de ces observations, il est acté qu'aucun secteur de l'île ne peut être écarté de l'analyse de liquéfaction vis-à-vis du critère de présence d'eau dans la frange 0-20 m.



Figure 57 : Localisation des points de suivi des niveaux hydrogéologiques (cercles bleus).

7.3 ÉVALUATION DES NIVEAUX D'ALÉA LIQUÉFACTION DES DIFFÉRENTES FORMATIONS

À ce stade, les formations identifiées comme sensibles à la liquéfaction (paragraphe 7.2.1 ci-dessus) sont :

- les dépôts de pente ;
- les dépôts de plage ;
- les isaltérites de cinérites et alluvions ;
- les formations volcanoclastiques de Petite-Terre.

Les autres formations isaltérites H4c et H4b sont quant à elles considérées comme potentiellement sensibles.

Il convient maintenant de vérifier cette sensibilité *a priori* de ces différentes formations, à partir des évaluations de liquéfaction menées sur différents sites depuis plusieurs années, et rappelées dans le paragraphe 2.3.3 précédent. Il convient aussi, comme explicité précédemment, de vérifier la sensibilité de ces évaluations compte-tenu des variabilités potentielles sur les paramètres de magnitude de référence et d'accélération maximale ; compte-tenu des fortes incertitudes sur les niveaux d'eau, ce paramètre fait aussi l'objet d'une analyse de sensibilité.

7.3.1 Réanalyse des évaluations sur différents sites

Nous ne retenons que les sites pour lesquels des forages, les essais géotechniques *in situ* et les caractérisations en laboratoire, ont été effectivement faites, et permettent ainsi une évaluation du phénomène de liquéfaction selon la réglementation actuelle EC8. Malheureusement, les Bureaux d'Études et foreurs présents sur l'île ne proposent que depuis quelques années des essais de type CPT ou CPTu (et toujours pas de SPT), ce qui implique que les seules études de liquéfaction permettant de vérifier les critères de l'EC8 sont celles réalisées en 2018 dans le cadre des projets de construction / extension d'établissements scolaires (rapport BRGM/RP-68294-FR). Auparavant, les estimations de potentialité de liquéfaction étaient réalisées au moyen de corrélations avec les résultats d'essais pressiométriques, qui d'une part, entraînent des incertitudes fortes, et, d'autre part, ne correspondent pas à la réglementation actuelle.

Dans le cadre de ces travaux précédents, l'aléa sismique considéré est caractérisé par une magnitude maximale de $M_w = 5,2$ et des valeurs d'accélération au rocher de $1,32 \text{ m/s}^2$ considérant un bâti de catégorie d'importance III.

7.3.1.1 Futur lycée des métiers du bâtiment - Longoni

Concernant ce site, la liquéfaction a été évaluée à partir de 8 CPTu profond de 7 à 11 m.

La carte géologique nous indique que ce site est positionné dans des formations d'alluvions indifférenciées et de colluvions. Les forages précisent cette géologie :

- les alluvions sont des matériaux limoneux argilo-sableux, moyennement compacts (alluvions fines) devenant faiblement compacts (alluvions vasardes, dégageant une odeur de matière organique en décomposition) avec la profondeur ;
- les colluvions de pente sont des matériaux *a priori* limoneux ;
- les altérites sont à l'affleurement au niveau des collines qui entourent le site et à environ 5 m de profondeur sous la plaine alluviale ; elles sont de caractère argileux.

Une nappe est détectée entre 2,3 et 5 m de profondeur.

Les classes de sol définies pour le site sont des classes C (nord et ouest du site) et B (sud-est), d'où des accélérations retenues de $1,98 \text{ m/s}^2$ et $1,782 \text{ m/s}^2$. Sous ces conditions, et en retenant une profondeur de l'eau tel que mesurée durant la foration des CPTu, les niveaux d'aléa calculés sont nuls pour 7 CPTu, et faible (indice de liquéfaction IL très proche de 0) pour l'un d'entre eux (CPTu7), situés au sein de la zone de colluvions.

En faisant varier de la façon la plus défavorable possible les paramètres Magnitude, Accélération et Niveau d'eau, les indices de liquéfaction les plus forts obtenus sont ceux mentionnés dans le tableau ci-dessous, et sont obtenus en prenant une magnitude $M = 5,2$, un pga égal à $1,8 \text{ m/s}^2$ et un niveau d'eau au niveau de la surface.

Identifiant CPTu	Profondeur du forage	Indice de liquéfaction	Niveau d'aléa
CPTu1	9,73	1,8	Faible
CPTu2	10,95	0,2	Faible
CPTu3	6,21	0,1	Faible
CPTu4	6,5	0	Nul
CPTu5	5,29	0,1	Faible
CPTu7	7,27	0	Nul
CPTu9	6,18	0,2	Faible
CPTu10	7	0,9	Faible

Les CPTu1 et 10 sont les plus sensibles aux incertitudes des paramètres de calcul. Ce sont ceux situés les plus au nord de la zone, au sein des formations d'alluvions indifférenciées.

Au sein de ces forages, les couches les plus contributrices à l'aléa liquéfaction sont les niveaux les plus profonds (pour CPTu1 entre 6,8 et 9,8 m – fin du forage, pour CPTu10 vers 6,8 – 6,9 m) reliés à des niveaux d'altération. Pour CPTu10, une fine couche au sein des terrains superficiels (de 1,2 à 1,4 m de profondeur) contribue aussi largement à la valeur de l'indice de liquéfaction.

Les autres CPTu (hormis le CPTu2) sont moins profonds que les deux mentionnés ci-dessus, ce qui peut expliquer que l'indice de liquéfaction reste faible. Le CPTu2 est aussi profond ; la couche d'altération contribue à l'indice de liquéfaction mais dans une moindre mesure que pour CPTu1 et CPTu10.

On peut donc retenir de ce premier site que :

- les niveaux d'altération situés vers 10 m de profondeur contribuent au niveau d'aléa calculé au moyen des CPTu ;
- au sein des terrains superficiels, certaines couches fines peuvent aussi être liquéfiables.

7.3.1.2 Extension du Centre Universitaire de Formation et de Recherche - Dembéni

Concernant ce site, la liquéfaction a été évaluée à partir de 3 CPTu profonds seulement de 4,5 à 8,8 m.

La carte géologique nous indique que le projet d'extension est positionné dans des formations colluvions et d'isaltérites de laves. Les forages confirment cette géologie, puisque les deux forages recoupent essentiellement des altérites sous faible couverture de remblais limoneux et glaciés d'épandage (pour un seul des 2 forages). Différentes couches d'altérites sont traversées, témoignant des différentes coulées de laves épandues dans le secteur.

Des niveaux d'eau sont mesurés en forage, l'un à 5 m de profondeur, l'autre à 13,8 m, sur deux forages proches. Cette différence (représentant plus de 22 m de différence d'altitude) s'explique probablement par le fait que 2 nappes différentes aient pu être interceptées.

Les classes de sol définies pour le site sont des classes E (au nord du site) et C (sud du site). Les 3 CPTu utilisables pour le calcul de l'aléa liquéfaction sont situés dans la zone E. Sous ces conditions, et en retenant une profondeur de l'eau telle que mesurée durant la foration des CPTu, les niveaux d'aléa calculés sont nuls pour ces 3 CPTu. Néanmoins, la profondeur limitée de ces forages doit inciter à prendre avec précaution cette conclusion.

En faisant varier de la façon la plus défavorable possible les paramètres Magnitude, Accélération et Niveau d'eau, les indices de liquéfaction les plus forts obtenus sont ceux mentionnés dans le tableau ci-dessous, et sont obtenus en prenant une magnitude $M = 5,2$, un p_{ga} égal à $1,8 \text{ m/s}^2$ et un niveau d'eau au niveau de la surface.

Identifiant CPTu	Profondeur du forage	Indice de liquéfaction	Niveau d'aléa
CPTu1	5,51	0,2	Faible
CPTu2	8,82	0,2	Faible
CPTu3	4,51	0,0	Nul

Pour les 3 CPTu du site, les niveaux d'aléas ainsi calculés restent faibles. La contribution à l'indice de liquéfaction est le fait de quelques petites couches, souvent superficielles. On retiendra cependant la faible profondeur de ces forages : des niveaux liquéfiables, potentiellement situés entre 10 et 20 mètres, peuvent exister et contribuerait à la définition d'un indice de liquéfaction (et donc un niveau d'aléa) plus fort.

En retenant la limite exprimée ci-dessus, on note que les formations de colluvions et d'isaltérites de laves localisées sur ce site présentent un niveau d'aléa faible.

7.3.1.3 Collège de Tsimkoura – Chirongui

Concernant ce site, la liquéfaction a été évaluée à partir de 4 CPTu profond seulement de 6,6 à 10,3 m (2 autres CPTu n'ont pu être utilisés car de trop faible profondeur).

La carte géologique nous indique que ces forages sont positionnés dans des formations d'alluvions indifférenciées, des colluvions, et dans des isaltérites. Les forages carottés confirment une couche de surface constituée de colluvions pour le premier, et directement sur les altérites pour le second. Ces colluvions sont un limon sablo-argileux à éléments polygéniques. Le 1^{er} sondage trouve la roche saine à 14 m de profondeur.

Les niveaux d'eau mesurés en forage sont de 2,6 m pour le premier forage carotté, soit au sein des colluvions, et un niveau à 5 m dans le second forage carotté, soit au sein des altérites.

La classe de sol définie pour le site est une classe C. Sous ces conditions, et en retenant une profondeur d'eau telle que mesurée durant la foration des CPTu, les niveaux d'aléa calculés sont nuls pour ces 4 CPTu. Néanmoins, la profondeur limitée de ces forages doit inciter à prendre avec précaution cette conclusion.

En faisant varier de la façon la plus défavorable possible les paramètres Magnitude, Accélération et Niveau d'eau, les indices de liquéfaction les plus forts obtenus sont ceux mentionnés dans le tableau ci-dessous, et sont obtenus en prenant une magnitude $M = 5,2$, un p_{ga} égal à $1,8 \text{ m/s}^2$ et un niveau d'eau au niveau de la surface.

Identifiant CPTu	Profondeur du forage	Indice de liquéfaction	Niveau d'aléa
I28	6,63	0,5	Faible
I29	9,67	0,1	Faible
I31	10,31	0,0	Nul
I36	7,22	0,4	Faible

Pour les 4 CPTu du site, les niveaux d'aléa ainsi calculés restent faibles. La contribution à l'indice de liquéfaction est le fait de quelques petites couches, souvent superficielles. On notera la présence de couches de silts sableux à sables, au sein des altérites vers 4 et 6 m de profondeur, qui présentent des caractéristiques mécaniques les désignant comme liquéfiables ; leurs faibles épaisseurs (20 à 30 cm) entraînent cependant une valeur de l'indice de liquéfaction faible.

On identifie au sein du forage I28, quelques couches d'au maximum 10 cm d'épaisseur pour lesquelles il persiste une incertitude sur leur contribution à l'indice final de liquéfaction. Sur ces niveaux, la méthode retenue pour évaluer l'aléa liquéfaction (explicitée au paragraphe 7.1.2) préconise la réalisation d'essais en laboratoire (identification et/ou essais triaxiaux cycliques) pour vérifier la susceptibilité à la liquéfaction. Faute d'avoir ce type d'essais, le calcul mené ici a choisi une hypothèse majorante de liquéfaction de ces niveaux. Ceci implique, pour ce forage une sur-estimation de l'indice de liquéfaction. Dans l'hypothèse inverse minorante (les essais de laboratoire montreraient que ces niveaux ne sont pas liquéfiables), l'indice de liquéfaction de I28 serait 0,2 (donc toujours un niveau d'aléa faible).

En conclusion, les colluvions et isaltérites de ce site présentent un niveau d'aléa faible, qu'il faut cependant relativiser compte-tenu de la profondeur limitée (maximum 10 m) des forages.

7.3.1.4 Site LPO - Chirongui

Concernant ce site, la liquéfaction a été évaluée à partir de 6 CPTu profond de 7,5 à 11,4 m (2 autres CPTu n'ont pu être utilisés car de trop faible profondeur).

La carte géologique nous indique que le site est essentiellement positionné au sein des alluvions indifférenciées. L'extrémité sud du site, en pied de colline, se trouve sur des isaltérites. Les forages confirment cette géologie, en précisant :

- la plaine fluvio-maritime est constituée de limons sablo-vasards, d'épaisseurs entre 3 et 14 mètres ;
- sous ces alluvions, une couche d'altérites est rencontrée, avant de retrouver la roche basaltique plus saine en profondeur ;
- l'épaisseur de la couche d'alluvions augmente vers le nord.

Les niveaux d'eau en forage ont été mesurés entre 2 et 8 m de profondeur sur les différentes campagnes d'investigation.

La classe de sol définie pour le site est une classe C. Sous ces conditions, et en retenant une profondeur de l'eau telle que mesurée durant la foration des CPTu, les niveaux d'aléa calculés sont nuls pour 5 CPTu et faible (mais avec une valeur d'indice de liquéfaction de liquéfaction IL égal = 0) pour le CPTu4 positionné au sein des alluvions. On notera que ces forages n'atteignent cependant pas la profondeur des 20 m comme exigé réglementairement.

En faisant varier de la façon la plus défavorable possible les paramètres Magnitude, Accélération et Niveau d'eau, les indices de liquéfaction les plus forts obtenus sont ceux mentionnés dans le tableau ci-dessous, et sont obtenus en prenant une magnitude $M = 5,2$, un p_{ga} égal à $1,8 \text{ m/s}^2$ et un niveau d'eau au niveau de la surface.

Identifiant CPTu	Profondeur du forage	Indice de liquéfaction	Niveau d'aléa
P22-2	7,99	0,2	Faible
P22-3	11,42	0,5	Faible
P22-4	8,97	0,6	Faible
P22-5	7,51	0,2	Faible
P22-6	8,36	0,5	Faible
P22-7	8,58	0,9	Faible

Pour les 6 CPTu du site, les niveaux d'aléas ainsi calculés restent faibles.

La contribution à l'indice de liquéfaction est le fait de différentes couches :

- une couche de surface, qui peut être négligée car excavée dans le cadre de tout travaux d'aménagement ;
- des couches fines d'altérites entre 6 et 10 mètres de profondeur selon les forages, présentant un profil silteux à sableux.

Les forages se finissant sur cette couche sablo-silteuse, on ne peut écarter le fait que d'autres couches liquéfiables existent entre ces fins de forages (10 m environ) et 20 mètres de profondeur.

On notera qu'on identifie dans les forages P22-4, P22-6 et P22-7, des couches d'au maximum 20 cm d'épaisseur pour lesquelles il persiste une incertitude sur leur contribution à l'indice final de liquéfaction. Sur ces niveaux, la méthode retenue pour évaluer l'aléa liquéfaction (explicitée au paragraphe 7.1.2) préconise la réalisation d'essais en laboratoire (identification et/ou essais triaxiaux cycliques) pour vérifier la susceptibilité à la liquéfaction. Faute d'avoir ce type d'essais, le calcul mené ici a choisi une hypothèse majorante de liquéfaction de ces niveaux. Ceci implique, pour les 3 forages mentionnés une sur-estimation de l'indice de liquéfaction. Dans l'hypothèse inverse minorante (les essais de laboratoire montreraient que ces niveaux ne sont pas liquéfiables), les indices de liquéfaction de P22-4 et de P22-6 seraient 0,2 et celui du P22-7 serait 0,7 (donc toujours des niveaux d'aléa faible).

Les alluvions vasardes présentent des caractéristiques mécaniques qui les classent parmi les formations d'argiles silteuses et de silts argileux. En global, elles ne sont pas liquéfiables.

7.3.1.5 Internat et cuisine centrale de Kawéni - Mamoudzou

Concernant ce site, la liquéfaction a été évaluée à partir de 3 CPTu profonds de 8,5 à 18,5 m (1 autre CPTu n'a pu être utilisé à cause d'un problème d'enregistrement des données).

La carte géologique nous indique que ce site est positionné au sein des alluvions indifférenciées. Les forages confirment cette géologie et précisent :

- dans ce secteur, les formations superficielles atteignent des profondeurs importantes (les forages carottés se finissent au sein de ces alluvions à 23m de profondeur) ;
- ces formations sont de natures variées : des alluvions vasardes, des cendres, des dépôts fins... ;
- une couche d'alluvions fines de 4 à 6 mètres d'épaisseur surmonte des dépôts lagunaires d'épaisseur supérieure à 12 mètres.

Les niveaux d'eau mesurés en forage sont proches de la surface (moins de 1 m de profondeur).

Les classes de sol définies pour le site sont des classes C (dans les secteurs nord et sud) et D (en partie centrale). Sous ces conditions, et en retenant une profondeur de l'eau tel que mesurée durant la foration des CPTu, les niveaux d'aléa calculés sont faibles à nuls pour les 3 CPTu.

En faisant varier de la façon la plus défavorable possible les paramètres Magnitude, Accélération et Niveau d'eau, les indices de liquéfaction les plus forts obtenus sont ceux mentionnés dans le tableau ci-dessous, et sont obtenus en prenant une magnitude $M = 5,2$, un p_{ga} égal à $1,8 \text{ m/s}^2$ et un niveau d'eau au niveau de la surface.

Identifiant CPTu	Profondeur du forage	Indice de liquéfaction	Niveau d'aléa
CPTu3	16,21	3,9	Faible
CPTu4	18,48	0,5	Faible
CPTu6	8,56	0,0	Nul

Pour les 3 CPTu du site, les niveaux d'aléas ainsi calculés restent faibles.

La contribution à l'indice de liquéfaction du CPTu3 vient de :

- deux niveaux, situés entre 1,6 et 2,6 m de profondeur, présentant une épaisseur globale de 60 cm ;
- quelques niveaux de 10 à 50 cm entre 10,5 et 12,5 m de profondeur, au sein des alluvions vasardes, présentant des caractéristiques mécaniques relatives à des silts sablonneux et des sables silteux.

On retrouve un tel niveau au sein des alluvions vasardes dans le CPTu4, mais avec un moindre pouvoir liquéfiant.

On notera qu'on identifie dans le CPTu3, des couches d'au maximum 40 cm d'épaisseur pour lesquelles il persiste une incertitude sur leur contribution à l'indice final de liquéfaction. Sur ces niveaux, la méthode retenue pour évaluer l'aléa liquéfaction (explicitée au paragraphe 7.1.2) préconise la réalisation d'essais en laboratoire (identification et/ou essais triaxiaux cycliques) pour vérifier la susceptibilité à la liquéfaction. Faute d'avoir ce type d'essais, le calcul mené ici a choisi une hypothèse majorante de liquéfaction de ces niveaux. Ceci implique, pour ce forage une sur-estimation de l'indice de liquéfaction. Dans l'hypothèse inverse minorante (les essais de laboratoire montreraient que ces niveaux ne sont pas liquéfiables), l'indice de liquéfaction de CPTu3 seraient 1,9 soit toujours un niveau d'aléa faible.

7.3.2 Conclusion des études de liquéfaction sur site

Les calculs des niveaux d'aléa de liquéfaction sur ces quelques sites, en retenant les valeurs des paramètres magnitude, accélération et niveau d'eau les plus impactant, amène les conclusions suivantes :

- concernant les alluvions indifférenciées :
 - en général, ces formations présentent une faible contribution à l'indice de liquéfaction,
 - cependant, dans le secteur de Kawéni où cette formation présente une épaisseur supérieure à 20 mètres, ces alluvions, notées vasardes dans les profils de forage, contribuent de manière plus importante à l'indice de liquéfaction ;
- concernant les colluvions, on mesure une contribution très faible de ces formations à l'indice de liquéfaction ;
- concernant les isaltérites : ces formations contribuent dans une petite mesure à l'indice de liquéfaction.

Ces conclusions sont tirées de l'analyse de quelques forages CPTu positionnés uniquement sur 5 sites de l'île, et généralement limités à 10 mètres de profondeur. Il conviendra donc d'asseoir cette analyse par des études complémentaires sur des sites complémentaires.

En particulier, le secteur de Mamoudzou – Kawéni présente une sensibilité particulière que l'étude du site Internat / Cuisine centrale (paragraphe 7.3.1.5) n'a pas permis *a priori* de totalement appréhender. Dans ce secteur, nous préconisons donc la réalisation d'investigations ciblées avec de nouveaux CPT, sondages (avec prélèvements d'échantillons et essais labo) et investigations géophysiques pour bien modéliser l'extension des couches susceptibles.

De même, on retient aussi qu'il n'a pas été réalisé d'évaluation de l'aléa liquéfaction pour les formations des dépôts de plage, pour les isaltérites de cinérites et alluvions, et pour les projections volcanoclastiques de Petite-Terre, considérées comme potentiellement liquéfiables de par leur nature lithologique.

7.4 CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA LIQUÉFACTION

7.4.1 À l'échelle de l'île

Les conclusions précédentes permettent de travailler à une première cartographie de l'aléa liquéfaction à l'échelle de l'ensemble du territoire de Mayotte, en prenant une hypothèse forte selon laquelle les différentes formations lithologiques sont semblables, à cette échelle de travail, en terme de comportement vis-à-vis de la liquéfaction.

Les fortes incertitudes sur le niveau de nappes (cf. explications au paragraphe 7.2.4) nous incite à ne pas considérer ce facteur comme un critère permettant d'ignorer un phénomène de liquéfaction sur un secteur de l'île.

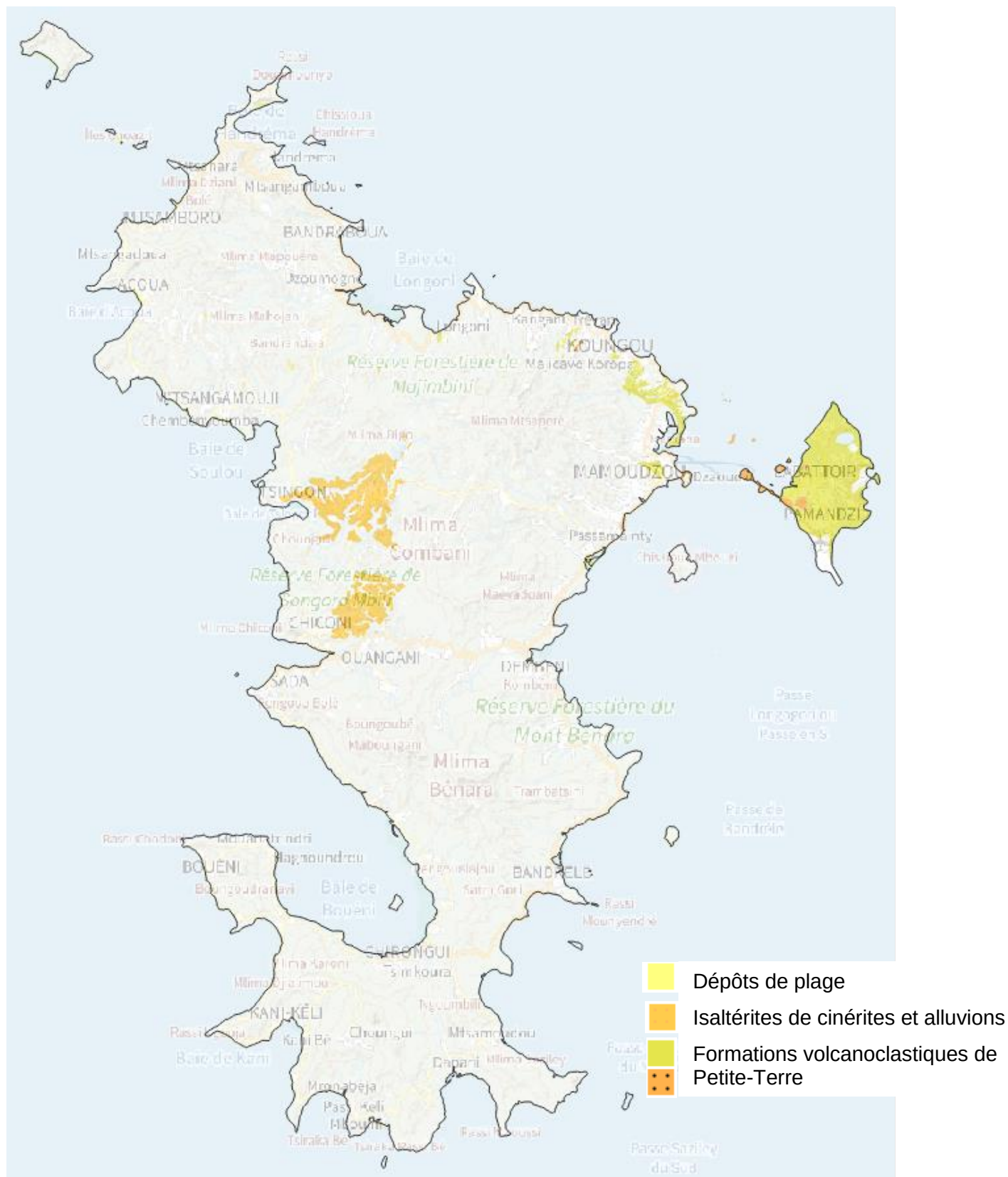
La cartographie à l'échelle de l'île pourrait donc suivre la méthodologie suivante :

- aléa nul à faible pour les secteurs de dépôts de pente et les isaltérites (hors isaltérites de cinérites) ;
- pour les secteurs d'alluvions indifférenciées, il conviendrait en premier lieu d'établir l'épaisseur de ces alluvions, en utilisant les méthodes décrites au paragraphe 4.4 permettant d'aboutir à ces mesures d'épaisseur à partir des données EM ; puis :
 - pour des épaisseurs inférieures à 20 mètres² : aléa nul à faible,
 - pour des épaisseurs supérieures à 20 mètres : aléa faible.

Une meilleure appréhension du potentiel de liquéfaction sur le secteur de Kawéni est nécessaire via les investigations décrites au 7.3.2.

De plus, les données actuellement disponibles ne permettent pas de conclure vis-à-vis de la liquéfaction des formations de dépôts de plage, des isaltérites de cinérites et alluvions, et des projections volcanoclastiques de Petite-Terre et Mamoudzou. À l'échelle de l'île, cela représente les territoires en couleur de la Figure 58.

² Cette valeur limite de 20 mètres a été définie à dire d'expert à partir de l'analyse des CPTu disponibles sur les quelques sites étudiés en 2018, et précisée dans le paragraphe précédent. Il conviendra de confirmer cette épaisseur limite par la suite.



De ce fait, et de façon à pouvoir établir une cartographie de l'aléa liquéfaction à l'échelle de l'île, nous préconisons la réalisation d'investigations adaptées pour l'évaluation de cet aléa dans les secteurs suivants :

- les formations d'isaltérites de cinérites et alluvions dans le quartier de Combani sur la commune de Tsingoni et le quartier de Kahani sur la commune de Chiconi ;
 - *a minima*, ces formations seront caractérisées sur 2 sites, à savoir un dans chacun des principaux caissons de cette formation affleurante identifiée sur la carte géologique. Pour un meilleur résultat, 4 sites seront investigués (2 dans chaque caisson). Compte-tenu des zones construites actuelles, et de l'emplacement de bâtiments publics (susceptibles de faire l'objet d'extension à l'avenir ?), nous proposons les 4 sites identifiés sur la Figure 59 ;
- les formations volcanoclastiques de Petite-Terre ;
 - *a minima*, ces formations seront caractérisées sur Petite-Terre, au sein des projections scoriacées et des projections phréatomagmatiques, ainsi qu'au sein de cette même dernière formation au nord de Mamoudzou. Des emplacements sont proposés sur la Figure 60 ;
- les formations de plage : ces formations sont très éparses sur le territoire, constituant généralement des plages sur le littoral. En ciblant les zones les plus étendues et susceptibles de faire l'objet d'une urbanisation, on pourra réaliser une 1^{ère} série d'investigations de ces plages littorales soit au niveau de la baie de Handrèma, soit dans le centre bourg d'Acoua (qui présente un intérêt plus grand vis-à-vis de l'urbanisation) (Figure 61) ; une 2^{ème} série d'investigation pourra cibler les zones d'affleurement de ces dépôts « à terre » : en effet, deux secteurs sont cartographiés au sud-est et à l'ouest du Mlima Mahojani (Figure 62) ; il conviendra de vérifier l'intérêt d'investiguer ces zones en tenant compte d'éventuels projets par exemple.

Ces investigations devront comporter d'une part la réalisation d'essais CPT ou SPT, et d'autre part des séries de prélèvements d'échantillons sur lesquels seront réalisés en laboratoire des essais d'identification : granulométrie complète (à savoir granulométrie par tamisage et par sédimentométrie) et limites d'Atterberg.

SPT et CPT peuvent répondre tous les deux aux objectifs fixés, le CPT étant favorable du fait des mesures en quasi-continuité. L'idéal est la réalisation de CPTu, correspondant à l'enfoncement d'une tige à vitesse constante avec une mesure de la résistance du sol tous les 2 cm (CPT) avec mesure de la pression interstitielle.

Sur chacun des sites retenus, on réalisera plusieurs CPT (ou SPT) répartis de façon à couvrir une zone assez large permettant de s'affranchir des spécificités locales via plusieurs mesures. De même, les prélèvements seront réalisés dans plusieurs sondages différents, et dans un même sondage à plusieurs profondeurs.

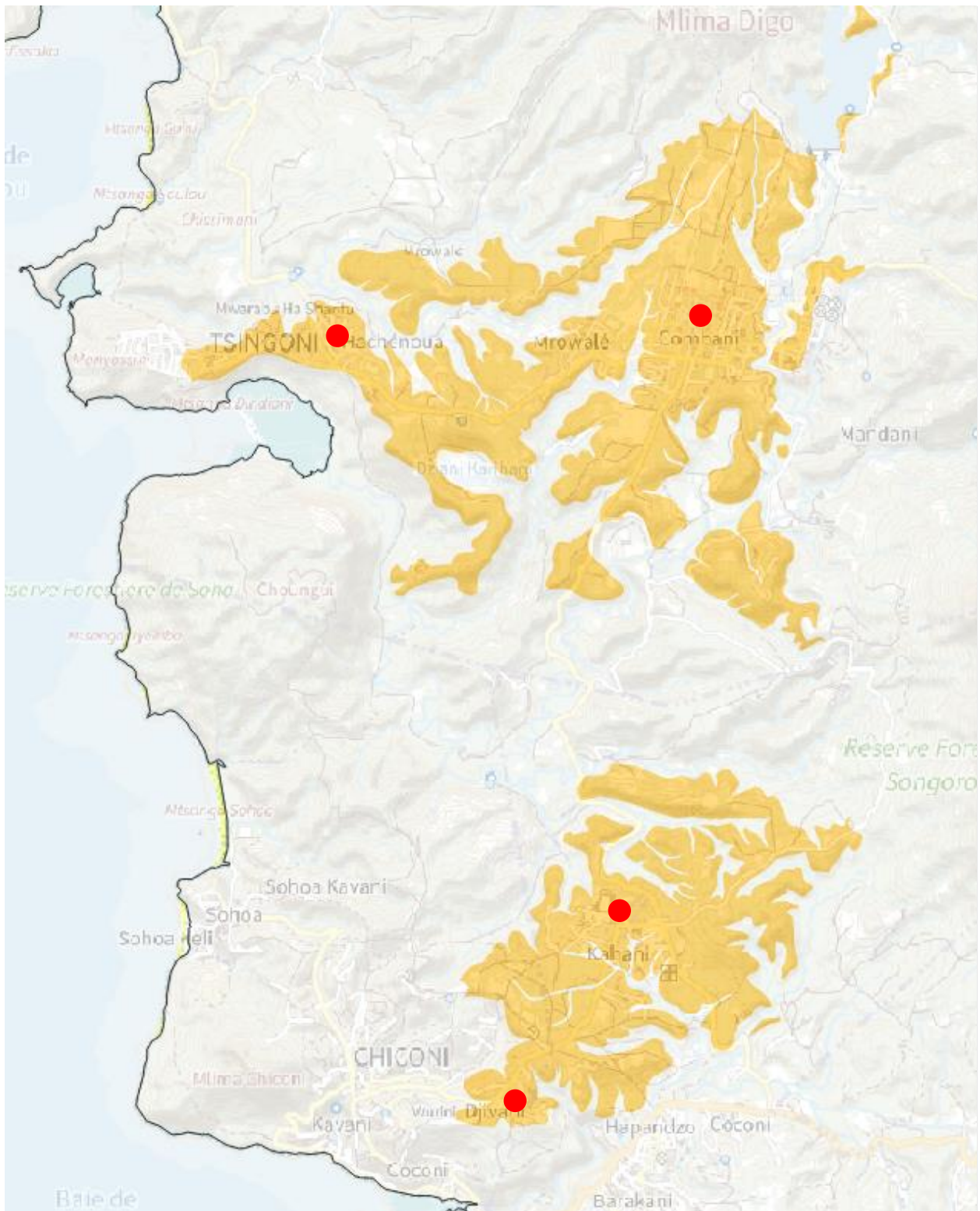


Figure 59 : Secteurs (ronds rouges) d'investigation proposés pour la formation d'isaltérites de cinérites et alluvions.

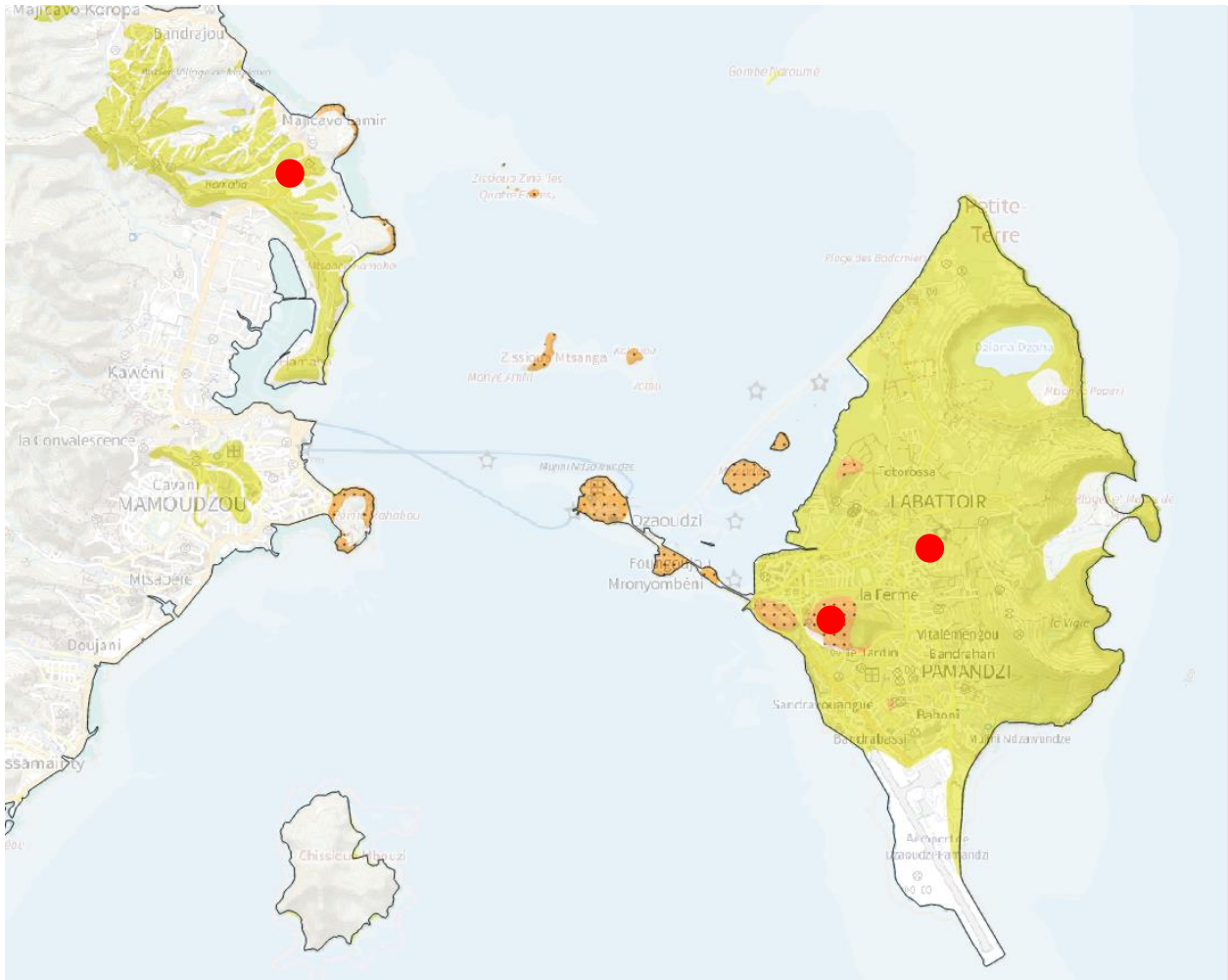


Figure 60 : Secteurs (ronds rouges) d'investigation proposés pour les formations volcanoclastiques de Petite-Terre.

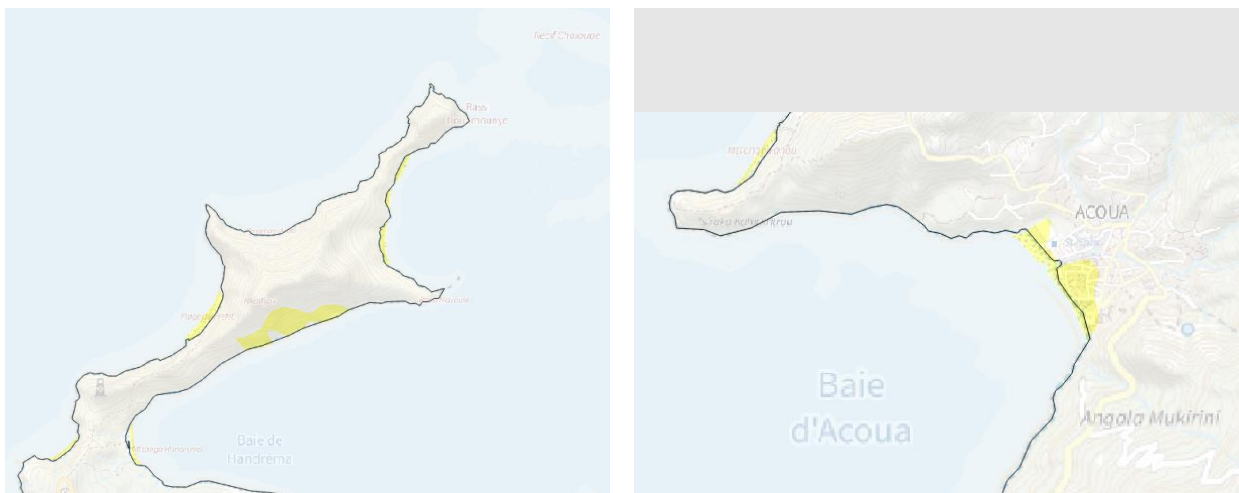


Figure 61 : Étendue (zones jaunes) des formations de plages affleurantes d'après la carte lithologique des formations superficielles (rapport BRGM/RP-69555-FR, Prognon et al.)

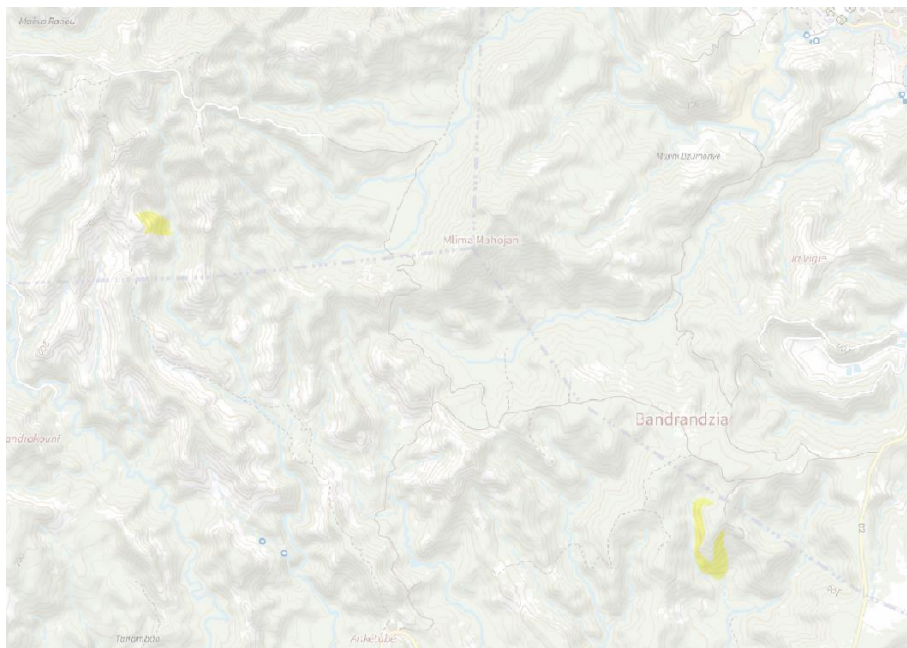


Figure 62 : Dépôts de sables affleurant à proximité du Mlima Mahozani.

Après réalisation de ces investigations, il conviendra d'analyser les résultats pour déterminer le niveau d'aléa associé à chacun des sites, et, si cela s'avère possible, finaliser la méthodologie de cartographie de l'aléa liquéfaction à l'échelle de l'île.

7.4.2 À l'échelle d'un site

La cartographie de l'aléa à l'échelle de l'île, dont les éléments de méthodologie ont été définis dans le paragraphe précédent, s'appuie sur une hypothèse, selon laquelle les terrains présentent le même niveau d'aléa à la liquéfaction quel que soit leur emplacement sur l'île.

Cette hypothèse pourrait s'avérer relativement forte, et demande par conséquent quelques investigations complémentaires que pourrait apporter l'étude de nouveaux sites. C'est pourquoi, jusqu'à une nouvelle analyse des données disponibles qui viendra confirmer (ou infirmer) cette hypothèse, il convient de réaliser les investigations adaptées à l'étude de la liquéfaction sur chacun des sites d'étude, en privilégiant :

- en premier lieu, les investigations au sein des formations pour lesquelles aucune évaluation de l'aléa liquéfaction n'a encore été faite : à ce jour les formations d'isaltérites de cinérites et alluvions, volcanoclastiques de Petite-Terre et les dépôts de sables ;
- en second, des investigations pourront être menées au sein des remblais si le site en présente, de façon à en caractériser les épaisseurs et propriétés géotechniques ;
- enfin, des investigations seront menées sur les formations pour lesquels nous possédons déjà une connaissance du niveau d'aléa, tels que les colluvions, les alluvions indifférenciées et les isaltérites (hors isaltérites de cinérites).

À l'échelle du site, on veillera aussi à mesurer un niveau d'eau après forage (les mesures durant la foration sont moins caractéristiques d'un niveau stabilisé), de façon à compléter notre connaissance locale des nappes.

Les recommandations du paragraphe précédent, concernant les types d'investigations et leur nombre sont identiques à cette échelle.

À l'issue de toute analyse sur un site, on vérifiera la cohérence des niveaux d'aléas obtenus sur celui-ci à ceux exposés ci-dessus, de façon à modifier la cartographie à l'échelle de l'île tenant compte de nouvelles évaluations de l'aléa liquéfaction local.

À défaut d'investigations complémentaires, la cartographie pourra être réalisée en utilisant les critères précisés pour la méthodologie de cartographie à l'échelle de l'île :

- aléa nul à faible pour les secteurs de dépôts de pente et les isaltérites (hors isaltérites de cinérites) ;
- pour les secteurs d'alluvions indifférenciées, il conviendrait en premier lieu d'établir l'épaisseur de ces alluvions, en utilisant les méthodes décrites au paragraphe 4.4 permettant d'aboutir à ces mesures d'épaisseur à partir des données EM ; puis :
 - pour des épaisseurs inférieures à 20 mètres³ : aléa nul à faible,
 - pour des épaisseurs supérieures à 20 mètres : aléa faible ;
- à ce jour, les formations de dépôts de plage, des isaltérites de cinérites et alluvions, et des projections volcanosclastiques de Petite-Terre et Mamoudzou ne peuvent pas être cartographiées vis-à-vis de l'aléa liquéfaction.

7.5 APPLICATION AUX SITES PILOTES

Malgré les incertitudes restantes sur les niveaux d'aléa liquéfaction applicables aux différentes formations lithologiques, on peut appliquer la méthodologie de cartographie proposée ci-dessus aux sites pilotes de cette étude.

7.5.1 Dembeni

L'ensemble des données disponibles (forages BSS, géophysique aéroportée, géophysique sol) permet d'établir une cartographie des formations lithologiques du secteur. Les explications de ce travail sur ce site sont données au paragraphe 5.1. Ce travail permet de produire la carte lithologique présentée en Figure 34.

De cette caractérisation lithologique, on déduit la carte de l'aléa liquéfaction sur le secteur, en se basant sur la méthodologie décrite au paragraphe 7.4.2 (sans investigations complémentaires). On obtient ainsi la carte présentée en Figure 63.

³ Cette valeur limite de 20 mètres a été définie à dire d'expert à partir de l'analyse des CPTu disponibles sur les quelques sites étudiés en 2018, et précisée dans le paragraphe précédent. Il conviendra de confirmer cette épaisseur limite par la suite.

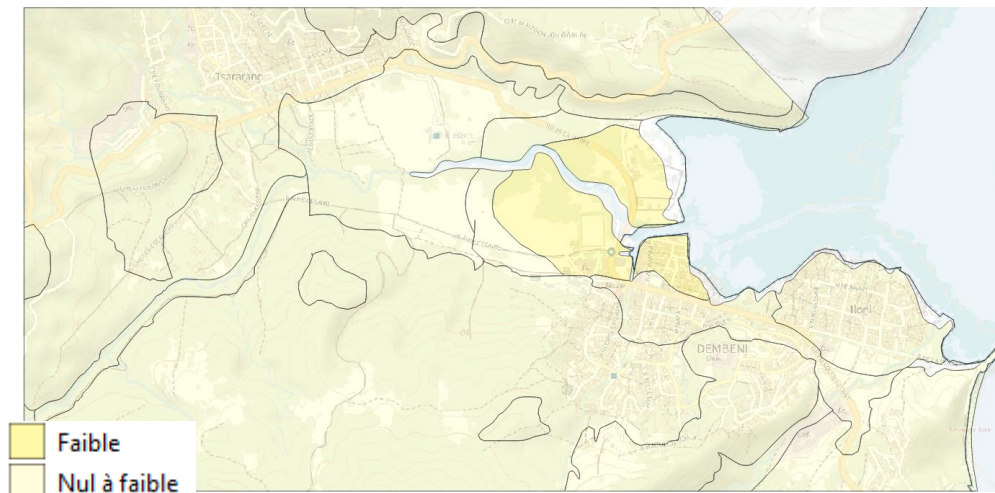


Figure 63 : Cartographie de l'aléa liquéfaction sur le site pilote de Dembeni

7.5.2 Longoni

La carte lithologique obtenue à partir de l'ensemble des données disponibles est présentée en Figure 40. La carte de l'aléa liquéfaction ainsi déduite est présentée ci-dessous. L'ensemble du site pilote est défini par un aléa liquéfaction nul à faible. Une zone reste à évaluer car aucune investigation n'y a été faite.

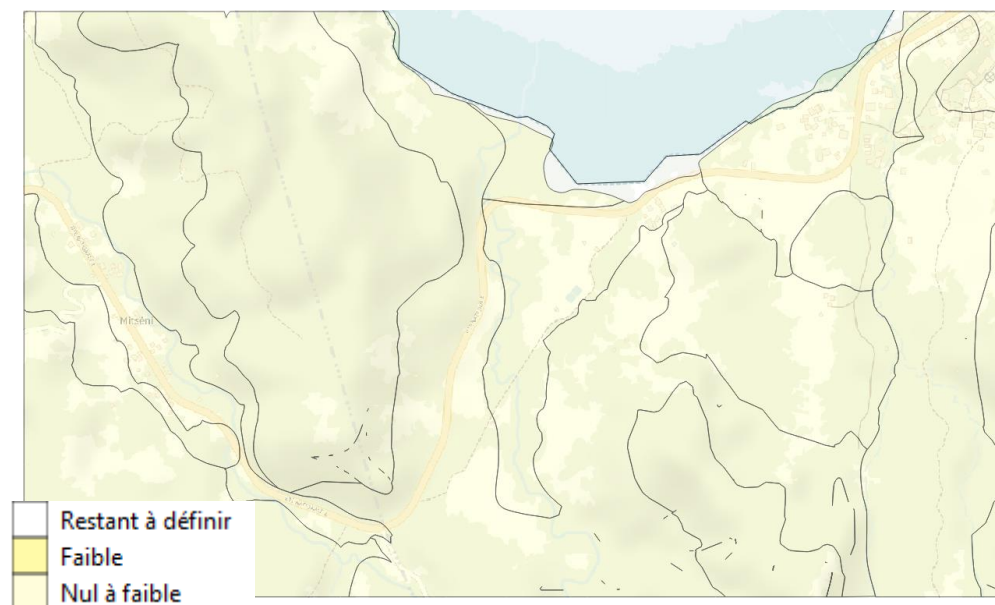


Figure 64 : Cartographie de l'aléa liquéfaction sur le site pilote de Longoni

7.5.3 Combani

Le secteur de Combani a déjà été ciblé dans le cadre de l'étude de l'aléa liquéfaction comme un secteur pour lequel des investigations complémentaires doivent être réalisées afin de déterminer le niveau d'aléa liquéfaction attribuable aux formations d'isaltérites de cinérites qui compose l'essentiel de son sous-sol.

Ceci étant, dans le secteur pilote de Combani, seules les formations d'alluvions fines, déposées le long du ruisseau exutoire de la retenue collinaire, peuvent être qualifiées à ce jour vis-à-vis de l'aléa liquéfaction.

8. Conclusions

À la demande de la DEAL Mayotte, le BRGM a été chargé de mettre à jour la cartographie de l'aléa sismique local réalisé en 2004 dans le cadre des atlas des aléas naturels.

Ce rapport présente les résultats de la première phase du projet qui propose une méthodologie de révision des cartographies d'aléa sismique local (effets de site lithologiques, topographiques et liquéfaction) définie à partir des travaux réalisés sur les 3 sites pilotes de Dembeni, Longoni et Combani choisis en début de projet et applicable à l'ensemble de l'île de Mayotte.

En ce qui concerne les effets de site lithologiques, nous avons pris en compte l'amélioration des connaissances depuis 2004 sur :

- la cartographie des formations géologiques superficielles en utilisant les cartes géologiques de 2013 et 2020 ;
- la géométrie et l'épaisseur des couches superficielles responsables des effets de site lithologiques en exploitant les données géophysiques EM aéroportées acquises en 2010 ;
- les effets de site lithologiques en exploitant les études de site menées depuis 2002 (données MASW et H/V) et l'exploitation des données de mouvements forts enregistrés lors de la crise sismo-volcanique initiée en Mai 2018.

L'estimation des effets de site lithologiques s'est basée sur les classes de sol EC8 en suivant la méthodologie suivante :

- identification des couches responsables des effets de site lithologiques (interfaces cibles) à partir des données géologiques de surface et des données géophysiques sol (H/V et MASW) ;
- identification de ces interfaces cibles sur les données EM aéroportées par croisement avec les données géophysiques sol ;
- estimation de la géométrie, de la profondeur et de la nature des interfaces cibles à partir des données EM aéroportées en s'appuyant sur les données géologiques (cartographie et logs) ;
- extraction des valeurs d'épaisseur des couches superficielles responsables des effets de site lithologiques sur les données EM aéroportées et géophysiques sol pour deux types de formations géologiques : les alluvions et les formations volcaniques altérées ;
- application des critères de classification en classes de sol EC8 en fonction de la nature et des épaisseurs des couches superficielles pour obtention du zonage des effets de site lithologiques. Ces critères sont spécifiques aux conditions rencontrées à Mayotte et devront être vérifiés lors la phase d'application de la méthodologie à l'ensemble de l'île.

Cette méthodologie a pu être développée grâce 1) aux cartographies des formations superficielles issue des travaux de 2013 et 2020 qui permettent d'identifier les formations géologiques responsables des effets de site lithologiques (notamment au niveau des formations volcaniques altérées) et 2) aux données EM aéroportées qui permettent d'avoir une image 2D, voire 3D, de la géométrie des couches et de densifier de façon conséquente la distribution spatiale de l'information sur la nature et l'épaisseur des couches géologiques (nous passons de quelques dizaines de données disponibles au km² à quelques milliers de données au km²). C'est la première fois que les données EM aéroportées sont utilisées à des fins de cartographie de l'aléa sismique local.

Pour les trois sites pilotes, les produits suivants ont été réalisés :

- une carte d'inventaire des données géophysiques disponibles avant et après le projet ;
- une carte des fréquences de résonance et paramètres V_s ,30 mesurés ;
- une carte des épaisseurs des différentes formations superficielles susceptibles de présenter un effet de site lithologique au droit des points de mesures géophysiques ;
- une carte des effets de site lithologiques selon classes de sol EC8 avec un rappel des spectres réglementaires associés.

L'extrapolation de ces travaux à l'ensemble de l'île soit 375 km² (à comparer aux 12 km² traités dans cette étude) sera réalisée lors de la phase 2 du projet, initiée en Décembre 2021. Lors de cette phase 2, il est prévu de travailler notamment sur le développement d'outils de traitement des données EM permettant une automatisation des pointés des interfaces cibles afin de s'affranchir du pointé manuel ou semi-automatique réalisé dans cette étude. Par ailleurs, une automatisation de la phase de zonage des effets de site lithologiques sur la base des critères de classification en classes de sol EC8 définis ici est également prévue. Il est à noter que les zones urbanisées ne disposant pas de données EM aéroportées comme le centre de Mamoudzou, Kawéni ou l'Ouest de Petite Terre, devront être traités de façon plus conventionnelle en se basant uniquement sur les données géologiques, géotechniques et géophysiques sol disponibles.

En ce qui concerne les effets de site topographiques, ceux-ci ont été traités de façon forfaitaires comme préconisés dans la réglementation. Pour cela, nous nous sommes basés sur la méthode de calcul utilisée dans les Atlas (méthode basée sur les critères PS92) mais en utilisant un MNT de résolution plus fine (MNT IGN au pas de 5 m au lieu du pas de 50 m disponible en 2004). Nous avons ainsi présenté une carte des effets de site topographiques pour chacun des sites pilotes. L'extrapolation de ces travaux à l'ensemble de l'île est prévue lors de la phase 2 du projet, avec une phase d'optimisation de l'outil actuel pour l'adapter aux règles parasismiques EC8 en vigueur et le rendre applicable à l'ensemble du territoire.

En ce qui concerne la liquéfaction, l'analyse des travaux sur l'aléa liquéfaction menés pour différents sites dans le cadre de l'étude pour le Vice-Rectorat en 2019 a permis de définir un niveau d'aléa potentiellement extrapolable à l'ensemble de l'île sur quelques formations géologiques clefs, à savoir : les alluvions indifférenciées, les colluvions et les isaltérites. Cette extrapolation pourrait se faire moyennant l'hypothèse forte selon laquelle les différentes formations lithologiques sont semblables à l'échelle de l'île (c'est-à-dire en ne tenant pas compte d'une éventuelle variabilité spatiale de ces formations). À ce jour néanmoins, les formations de dépôts de plage, des isaltérites de cinérites et alluvions, et des projections volcanoclastiques de Petite-Terre et Mamoudzou ne peuvent pas être cartographiées vis-à-vis de l'aléa liquéfaction faute de données pertinentes pour le faire. Nous préconisons la réalisation d'investigations complémentaires pour permettre l'évaluation de l'aléa liquéfaction à l'échelle de l'île : des propositions de site ont été faits pour pallier le manque d'informations constaté. Une carte préliminaire de l'aléa liquéfaction a néanmoins été produite pour les sites pilotes de Dembeni et Longoni. Elle n'est pas réalisable sur le site de Combani faute d'informations sur les isaltérites de cinérites et alluvions présentes sur ce site.

Au vu des résultats obtenus dans cette étude, une application de la méthodologie à des contextes géologiques similaires (i.e. contexte volcanique altéré) comme les Antilles seraient à envisager. Ce travail nécessiterait néanmoins une révision des critères de classification des classes de sol basés sur la nature et l'épaisseur des couches en fonction du contexte géologique et sismique local. En effet, le niveau d'aléa sismique étant beaucoup plus fort aux Antilles qu'à Mayotte, un zonage basé exclusivement sur les classes de sol EC8 peut s'avérer insuffisant. Par ailleurs, les cartographies de formations superficielles en cours en Martinique montre que l'interprétation

géologique de la signature EM des formations géologiques antillaises peut s'avérer complexe d'où la nécessité de revoir les critères de classification des classes de sol en fonction des données locales. Néanmoins, l'apport des données EM s'avère essentiel pour améliorer notre compréhension des effets de site lithologiques dans des contextes géologiques complexes comme ceux de Mayotte ou des Antilles puisque cela nous permet d'avoir accès à des informations spatialisées sur la géométrie 2D voire 3D des couches en présence, informations jusqu'à présent inaccessibles par les méthodes actuelles basées sur des mesures ponctuelles (H/V et MASW) peu denses et à moindre profondeur de pénétration. Il serait également intéressant de tester l'apport de ces données dans des contextes sédimentaires métropolitains plus classiques.

9. Bibliographie

Documents réglementaires et/ou techniques :

AFPS (1993) – Guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique. Association Française du Génie Parasismique.

Article R563-4 du code de l'environnement. Zonage réglementaire pour la prise en compte de la sismicité. Version en vigueur depuis le 1 mai 2011. Lien accédé le 09 décembre 2021
https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?sessionId=587D7DC36407025FD6F536A7E0B99A5F.tplgfr22s_2?idArticle=LEGIARTI000022959067&cidTexte=LEGITEXT000006074220&categorieLien=id&dateTexte=

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

NF EN 1998-5 (2005) - Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 5 : Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques (P 06-035-1), AFNOR.

Décret n° 2010-1254 du 22 octobre 2010. Décret relatif à la prévention du risque sismique. (NOR : DEVP0910497D) (JORF n°0248 du 24 octobre 2010). Lien accédé le 09 décembre 2021.
<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGIARTI000022957989/2010-10-25/>

Décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010. Décret portant délimitation des zones de sismicité du territoire français (NOR DEVP0823374D) (JORF n°0248 du 24 octobre 2010). Lien accédé le 09 décembre 2021. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000022941731>

NF P06-013. Règles de construction parasismique. Règles applicables aux bâtiments – PS92, AFNOR.

Publications scientifiques

Auclair S., E. Vanoudheusden, J. Rey, A. Roullé, J.-C. Audru et G. Eucher (2006) – Projet de piste longue de l'aéroport de Pamandzi (Mayotte) - Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Rapport BRGM/RP-55151-FR, 55 p., 18 illust., 13 tabl., 1 annexe.

Auclair S., E. Vanoudheusden, J. Rey, S. Bernardie, C. Garnier, A. Oppermann, J-M Baltassat, A. Blondel, A. Bitri et A. Roullé (2009) - Site TOTAL du dépôt d'hydrocarbures de Longoni (commune de Koungou, Mayotte). Evaluation de l'aléa sismique local et des mouvements de terrain induits. Rapport final. BRGM/RC-57925-FR, 122 p., 24 figures, 16 tableaux, 5 annexes.

Audru J.-C., Bitri A., Desprats J.-F., Mathon, C., Maurillon N., Sabourault P., Terrier-Sedan M., Sedan O. (2002) – Projets risques naturels et érosion à Mayotte : résultats d'année 1. Rapport BRGM/RP-51738-FR.

Audru J.C., Desprats J.-F., Eucher G., Jossot O., Mathon C., Nédellec J.L., Rançon J.P., Sedan O., Zornette N., Guillobez S., Daniel P., Haie B. (2004a) - Atlas des aléas naturels à Mayotte. Communes de Chiconi, Ouangani, Sada et Chirongui. Rapport BRGM/RP-52662-FR.

Audru J.C., A. Bitri, J.F. Desprats, C. Mathon, N. Maurillon, J.L. Nédellec, O. Jossot, J.P. Rançon, P. Sabourault, O. Sedan, M. Terrier, N. Zornette (2004b) - Atlas des aléas naturels à Mayotte. Communes de Mamoudzou, Koungou, Dzaoudzi, Pamandzi. Rapport BRGM/RP-53037-FR.

Audru J.C., B. Auber, J.F. Desprats, N. Frissant, O. Jossot, C. Mathon, D. Moirial, J.L. Nédellec, O. Sedan, N. Zornette (2004c) - Atlas des aléas naturels à Mayotte. Communes de Bandraboua et Tsingoni. Rapport BRGM/RP-53116-FR.

Audru J.C., B. Auber, J.F. Desprats, G. Eucher, O. Jossot, C. Mathon, J.L. Nédellec, O. Sedan, N. Zornette (2004d) - Atlas des aléas naturels à Mayotte. Communes de Mtsamboro, Acoua, Mtsangamouji. Rapport BRGM/RP-53194-FR.

Audru J.-C., G. Eucher, J.-F. Desprats, O. Jossot, C. Mathon, J.-L. Nédellec, O. Sedan (2004e) - Atlas des aléas naturels à Mayotte, Communes de Bandréle et Dembéné. Rapport BRGM/RP-53678-FR.

Audru J.-C., Bitri A., Desprats J.-F., Dominique P., Eucher G., Hachim S., Jossot O., Mathon C., Nédellec J.-L., Sabourault P., Sedan O., Stollsteiner P., Terrier-Sedan M. (2010) - Major natural hazards in a tropical volcanic island: a review for Mayotte island, Comoros archipelago, Indian Ocean. *Engineering geology*, 114, p. 264-381.

Auken E., HYDROGEOPHYSICS GROUP (2011) - SkyTEM Survey Mayotte 2010. Report Number 2010-10-01, 150 p.

Baillet M. (2020) - Étude des effets de site observés à Mayotte lors de la crise sismo-volcanique 2018-2019 à partir des données sismologiques à terre. Rapport de stage de M2, Université Grenoble Alpes.

Bertil D., Lemoine A. et Roullé A. (2019) – Évaluation d'un niveau d'aléa sismique probabiliste à Mayotte et à la Réunion. Rapport final. Rapport BRGM/RP-69481-FR, 93 p, 37 fig., 14 tab.

Bertil, D., Mercury, N., Doubre, C., Lemoine, A., Van der Woerd, J. (2021) - The unexpected Mayotte 2018-2020 seismic sequence: a reappraisal of the regional seismicity of the Comoros. *C. R. Géoscience*, 353, Online First (2021), pp. 1-25. <https://doi.org/10.5802/crgeos.79>

Borcherdt, R.D. (1970) - Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **60**, 29-61.

Cesca, S., Letort, J., Razafindrakoto, H.N.T, Heimann, S., Rivalta, E., Isken, M.P., Passarelli, L., Petersen, G.M., Cotton, F., Dahm, T., (2020) - Drainage of a deep magma reservoir near Mayotte inferred from seismicity and deformation. *Nature Geoscience*, 13, 87-93. Doi: 10.1038/s41561-019-0505-5

Cochery R., G. Lauret, J. Rey, L. Forestier (2014) - Caractérisation des aléas mouvements de terrain, inondation et sismiques sur le futur site d'implantation du futur lycée de la Kwalé. Rapport BRGM/RP-63836-FR, 78 p., 24 fig., 6 tabl., 3 ann., 1 CD.

Davis, R., (1995) - Effects of weathering on site response. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 24: 301-309. <https://doi.org/10.1002/ege.4290240212>

Debeuf, D., Bachèlery, P. (2001) - Carte lithologique à 1/10 000 des villes de Mamoudzou et Koungou, Mayotte. Rapport d'étude du Laboratoire des Sciences de la Terre de l'Université de la Réunion.

Depinois S., B. Le Brun, P. Dominique, J.L. Nédellec, N. Zornette, P. Sabourault, J.C. Audru (2003) - Projet de centrale thermique à Longoni (Mayotte). Evaluation de l'aléa sismique local. Rapport BRGM/RC-52437-FR, 55p., 16 fig., 12Tabl., et 1 Ann.

Di Naccio, D., Vassallo, M., Di Giulio, G., Amoroso, S., Cantore, L., Haïlemikael, S., Falcucci, E., Gori, S., Milana G., (2017) - Seismic amplification in a fractured rock site. The case study of San Gregorio (L'Aquila, Italy). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **Vol. 98**, 90-106. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.07.004>

Dominique P., J.C. Audru et J.L. Nédellec (2005) – Evaluation de l'aléa sismique local. Projet de marché et de comité du tourisme. Mamoudzou (Mayotte). Rapport BRGM/RC-53831-FR, 25 p., 5 fig., 4 tabl.

Eucher G., J.-C. Audru, E. Bouleau, J.-F. Desprats, E. Djaco, O. Jossot, J.-L. Nédellec, A. Vigneau (2004) - Atlas des aléas naturels à Mayotte, Communes de Bouéni et Kani Kéli. Rapport BRGM/RP-55077-FR.

Feuillet, N., Jorry, S., Crawford, W.C. et al. Birth of a large volcanic edifice offshore Mayotte via lithosphere-scale dyke intrusion. *Nat. Geosci.* (2021). <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00809-x>.

Field, E.H., and K.H. Jacob (1995) - A comparison and test of various site-response estimation techniques, including that are not reference-site dependent, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**, 1127-1143.

Graizer, V., (2009) - Low-velocity zone and topography as a source of site amplification effect on Tarzana hill, California. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29(2)**, 324-332.

Guilbert M., Aunay B., Lachassagne P., Malard A., Mathieu F. (2008) - Synthèse hydrogéologique du Nord-Est de Mayotte. Caractérisation des masses d'eau souterraine des secteurs de Petite-Terre et de Tsoundzou-Koungou. Rapport BRGM/RP-56600-FR, 79 p., 29 ill. et 8 ann.

Havenith, H.-B., Jongmans, D., Faccioli, E., Abdrakhmatov, K., Bard, P.-Y. (2002) - Site effect analysis around the seismically induced Ananevo Rockslide, Kyrgyzstan. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **92**, 3190-3209.

Iwasaki, T., Arakawa, T., Tokida, K. I., & Kimata, T. (1983) - Estimation procedures of liquefaction potential and its application to earthquake resistant design. In *Wind and seismic effects: proceedings of the 14th joint panel conference of the US-Japan cooperative program in natural resources*, **Vol. 651**, p. 172). US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards.

Jaouën T., Vittecoq B., Lions J., Castillo C., Deparis J., Baltassat J.M., François B., Pinson S., Gourcy L., Winckel A., et Allier D. (2012) - Caractérisation hydrogéologique du potentiel en eau souterraine de Mayotte – Secteur Nord-Ouest. Rapport final BRGM/RP-59550-FR. 424 p., 258 ill., 7 ann.

- Jaouën T., Vittecoq B., Castillo C., Deparis J., Lions J. avec la collaboration de Gourcy L., Allier D. et Pinson S.** (2013). Caractérisation hydrogéologique du potentiel en eau souterraine de Mayotte – Secteurs Centre et Sud. Rapport final BRGM/RP-61757-FR. 320 p., 148 ill. et 8 ann.
- Kumar, V., Narayan, J. P., Kumar, M.,** (2017) - Numerical Study of Effect of Ridge-Weathering Thickness Effect on the Ground Motion Amplification. *Earth Science India*, **10**.
- Lacquement F., Nehlig P., Bernard J.** (2013) - Carte géol. France (1/30 000), feuille Mayotte (1179). Orléans : BRGM.
- Lachet, C., and Bard P.Y** (1994) - Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. *J. Phys. Earth*, **42**, 377-397.
- Lee C.-T., Tsai B.-R.** (2008) - Mapping Vs30 in Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **19(6)**, 671-682.
- Lemoine, A., Briole, P., Bertil, D., Roullé, A., Foumelis, M., Thinon, I., Raucoules, D., de Michele, M., Valt, P., Hoste Colomer, R.,** (2020) - The 2018–2019 seismo-volcanic crisis east of Mayotte, Comoros islands: seismicity and ground deformation markers of an exceptional submarine eruption, *Geophysical Journal International*, 223, 22–44. Doi: 10.1093/gji/ggaa273
- Lermo, J., and F.J. Chávez-García** (1993) - Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **83**, 1574-1594.
- Matsuoka, M., Wakamatsu, K., Fujimoto, K., Midorikawa, S.** (2005) - Nationwide site amplification zoning using GIS-based Japan Engineering Geomorphologic Classification Map. *Proc. 9th Int. Conf. on Struct. Safety and Reliability*, pp. 239-246.
- Maufroy, E., Cruz-Atienza, V. M., Cotton, F., & Gaffet, S.** (2015) - Frequency-scaled curvature as a proxy for topographic site-effect amplification and ground-motion variability. *Bulletin of the seismological society of America*, 105(1), 354-367.
- Nabighian, M. N., & Macnae, J. C.** (1991) - Time domain electromagnetic prospecting methods. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, 2(Part A), 427-509.
- Nakamura, Y.** (1989) - A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR of RTR1*, **30, 1**, 25-32.
- Narayan, J. P., Kumar, V.,** (2015) - A numerical study of effects of ridge-weathering and ridge-shape-ratio on the ground motion characteristics. *Journal of Seismology*, **19(1)**, 83-104.
- Nehlig P., Lacquement F., Bernard J., Caroff M., Deparis J., Jaouen T., Pelleter A.-A., Perrin J., Prognon C., Vittecoq B.** (2013) - Carte géologique de Mayotte au 1/25 000 et sa notice. BRGM/RP-61803-FR.
- Nelson, S., McBride, J.,** (2019) - Application of HVSr to estimating thickness of laterite weathering profiles in basalt. *Earth Surface Processes and Landforms* 44(7), 1365-1376.
- Noury G.** (2018) - Étude préparatoire en vue de la révision de « l'aléa » liquéfaction à Mayotte. Rapport final. BRGM/RP-68018-FR, 50 p., 24 fig.

NF EN 1998-5 (2005) - Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 5 : Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques (P 06-035-1), AFNOR.

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

Prognon C., Bernard J., Reninger P.-A, Lacquement F., Raingeard A., Bernachot I. (2020) - EROMAY Erosion Mayotte : Rapport final. Cartographie prédictive de la lithologie des formations superficielles à partir des données électromagnétiques. BRGM/RP-69555-FR. 45 p., 24 fig., 1 tab.

Rault C. (2019) - Effets de site, endommagement et érosion des pentes dans les zones épacentrales des chaînes de montagnes actives. Thèse de doctorat, Sciences de la Terre. Université Paris sciences et lettres. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02291313>

Rault C., Chao, W. A., Gelis, C., Burtin, A., Chang, J. M., Marc, O., ... & Meunier, P. (2020) - Seismic response of a mountain ridge prone to landsliding. Bulletin of the Seismological Society of America, 110(6), 3004-3020.

Reninger, P. A., Martelet, G., Deparis, J., Perrin, J., & Chen, Y. (2011) - Singular value decomposition as a denoising tool for airborne time domain electromagnetic data. Journal of Applied Geophysics, 75(2), 264-276.

Reninger PA, Martelet G., Perrin J., (2015) - Frame effective tilt correction for HEM data acquired over rugged terrain. First European Airborne Electromagnetics Conference, 6-10 Septembre, Turin

Rey, J., Faccioli, E. & Bommer, J.J. (2002) - Derivation of design soil coefficients (S) and response spectral shapes for Eurocode 8 using the European Strong-Motion Database. *Journal of Seismology*, 6, 547–555. <https://doi.org/10.1023/A:1021169715992>

Rey J., A. Roullé, E. Vanoudheusden, J.C. Audru (2006) - Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques sur le site de l'IFM de Dembéli (Mayotte). Rapport BRGM/RP-54960-FR, 31 p., 13 ill., 1 annexe.

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

Rey J., A. Roullé, F. De Martin, J.-C. Audru, J.-M. Miehe, A. Bitri et J.-L. Nédellec (2006) - Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. LEP de Kaouéni (Mayotte). Rapport BRGM/RP-54470-FR, 49 p., 11 Illust., 9 tabl., 2 annexes.

Rey J., Roullé A., De Martin F., Audru J.-C. et Euchet G. (2006) - Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Lycée de Pamandzi (Mayotte). Rapport BRGM/RP-54471-FR, 31 p., 7 Illust., 6 tabl., 1 annexe.

Rey J., S. Auclair, E. Vanoudheusden, A. Oppermann, B. François, A. Bitri (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.

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

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.

Rey J., Bastone V., Bitri A., François B., Lauret G., Tardy D. (2013) - Evaluation de l'aléa sismique pour 3 sites d'extensions d'établissements scolaires à Mayotte. Rapport BRGM/RP-62972-FR. 67 p., 23 fig., 4 tabl., 1 ann.

Rey J., Bastone V., Bitri A., François B., Lauret G., Tardy D. (2013) - Evaluation de l'aléa sismique pour le site du projet d'extension de la Préfecture de Mayotte. Rapport BRGM/RP-62965-FR. 38 p., 9 fig., 5 tabl., 1 annexe.

Rey J., Vanoudheusden E., Lauret G. (2013) - Evaluation de l'aléa sismique pour le site du projet d'extension du Centre Hospitalier de Mamoudzou (CHM). Rapport BRGM/RP-63175-FR. 34 p., 10 fig., 2 tabl..

Roullé A., Audru J.-C., Bernardie S. et Nédellec J.-L. (2005) - Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques sur le site du lycée de Chirongui (Mayotte). Rapport BRGM/RP-53832-FR, 61 p., 14 fig., 16 tabl., 2 annexes.

Roullé A., Bernardie S., Bitri A., Miehe J.M, Audru J.C. et Euchet 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.

Roullé A., M. Belvaux, J. Abad, B. François, A. Colombain, G. Noury (2019) - Évaluation de l'aléa sismique pour 10 sites de construction/extension d'établissements scolaires à Mayotte. Rapport BRGM/RP-68294-FR. 238 p., 80 fig., 11 tabl., 3 annexes.

Roullé A., Baillet M., Bertil D., Cornou C. (2021) - Site effects observations and mapping on the weathered volcanic formations of Mayotte Island, *submitted to CR Géosciences*.

Sabourault P., Nédellec J.L. avec la coll. de J.C. Audru (2002) - Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques sur le site emplisseur de gaz, port de Longoni (Mayotte). Rapport BRGM/RC-50052-FR - 2002 Mayotte 10, 52 p., 13 Fig., 13 Tabl.

Sabourault P., Nédellec J.L. et Lebrun B. avec la coll. De J.C. Audru (2003) - Aménagement du remblai de Mtsapéré, commune de Mamoudzou, Mayotte. Evaluation de l'aléa sismique local. Rapport BRGM/RC-52142-FR, 2003 – Mayotte 02, 60 p., 15 fig., 12 Tabl. et 1 Ann.

Sabourault P., Zornette N., Bitri A., Nédellec J.L. et Audru J.C. (2003) - Extension de l'aéroport de Dzaoudzi-Pamandzi, Mayotte. Evaluation de l'aléa sismique local. Rapport BRGM/RC-52438-FR, 78 p., 21 fig., 8 Tabl. et 1 Ann.

Sira C., Schlupp A., Bontemps M., Regis E., Van der Woerd J. (2018) - Essaim sismique à l'est de Mayotte. Analyse pour la période du 10 mai au 15 juin 2018. Note préliminaire du BCSF-RENASS, BCSF-RENASS2018-R4, 62 p., 4 tab., 47 fig., 5 annexes.

Stieltjes, L. (1988) - Geological map of Mayotte at 1/50 000, BRGM (Ed.).

Terrier M., Audru J.C., Bour M., Dominique P. (2000) - Etude de l'aléa sismique régional de l'île de Mayotte ; détermination des mouvements sismiques de référence. Rapport BRGM/RP-50250-FR, 95 p., 26 fig., 10 tabl., 1 annexe.

Thiery, Y., Lacquement, F., Marçot, N. (2019) - Landslides triggered in weathered crystalline rocks of moderate latitudes: A case study in Mediterranean environment (The Maures Massif, France). *Engineering Geology*, **248**, 164-184.

Vermeersch F., S. Auclair, E. Vanoudheusden, J. Rey, A. Roullé, A. Bitri et C. Cluzet (2008) - Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Futur lycée de Dombéni, site de Tsararano (Mayotte). Rapport BRGM/RP-56431-FR, 52 p., 13 fig., 6 tabl., 3 annexes.

Viezzoli A., Auken E., Munday E. (2009) - Spatially constrained inversion for quasi 3D modelling of airborne electromagnetic data—An application for environmental assessment in the Lower Murray Region of South Australia. *Exploration Geophysics*, 40. 10.1071/EG08027.

Von Voigtlander, J., Clark, M. K., Zekkos, D., Greenwood, W. W., Anderson, S. P., Anderson, R. S., Godt, J. W. (2018) - Strong variation in weathering of layered rock maintains hillslope-scale strength under high precipitation. *Earth Surface Processes and Landforms*, **43(6)**, 1183-1194.

Wang, G., Du, C., Huang, D., Jin, F., Koo, R. C., Kwan, J. S. (2018) - Parametric models for ground motion amplification considering 3D topography and subsurface soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.

Ward S.H., Hohmann G.W., (1988) - Electromagnetic theory for geophysical applications. Nabighian, M.N. (Ed.), *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Society of Exploration Geophysicists 1, 131-311

Youd, T. L. (1992) - "Liquefaction, ground failure, and consequent damage during the 22 April 1991 Costa Rica earthquake" in *Proceedings of the NSF/UCR U.S.-Costa Rica Workshop on the Costa Rica Earthquakes of 1990-1991: Effects on Soils and Structures*. Oakland, California Earthquake Engineering Research Institute.

Youd T. L., Idriss I. M., Andrus R. D., Arango I., Castro G., Christian J. T., Dobry R., Finn W. D. L., Harder L. F., Hynes M. E., Ishihara K., Koester J. P., Liao S. S. C. , 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 H/V réalisées dans le cadre du projet et en 2018 pour le SIEAM

De nombreuses techniques théoriques, numériques ou instrumentales ont été développées pour estimer les effets de site lithologiques (par ex. Borchardt, 1970). 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 (Lermo et Chávez-García, 1993). L'une de ces techniques consiste, à partir de l'enregistrement du bruit de fond ambiant, à calculer le rapport spectral entre les composantes horizontales et la composante verticale : c'est la méthode appelée couramment H/V (Nakamura, 1989). Le dispositif expérimental est constitué d'un sismomètre trois composantes et d'une station d'acquisition.

Les principes physiques sous-tendus par cette méthode ne sont actuellement pas tous bien cernés. Cependant, de nombreuses expériences ont comparé cette méthode avec des méthodes classiques et ont montré sa capacité à évaluer la fréquence propre du site puis, en conjonction avec d'autres éléments, les effets de site proprement dits (Lachet et Bard, 1994 ; Field et Jacob, 1995). 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 (ou fréquence propre).

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

Lorsque la géométrie du site peut être assimilée à un milieu mono-dimensionnel, On peut relier l'épaisseur d'une couche sédimentaire meuble (ayant un fort contraste d'impédance avec le substratum rocheux) à sa fréquence de résonance fondamentale f_0 par l'expression :

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

Avec :

H : épaisseur moyenne de la couche meuble,

V_s : vitesse moyenne de propagation des ondes S dans la couche meuble,

f_0 : fréquence de résonance fondamentale de la couche meuble.

Les données H/V acquises dans le cadre de cette étude ont été traitées à l'aide du logiciel Geopsy (www.geopsy.org) en suivant les critères préconisés dans les documents de référence du projet européen SESAME (2014).

L'ensemble des coordonnées des mesures H/V réalisées dans le cadre de cette étude sont indiquées dans le tableau suivant (Tableau 6). Sont également rappelées les coordonnées des mesures H/V acquises pour le compte du SIEAM en juin 2018 (Tableau 7).

Identifiant terrain	X	Y	f0	f1	Fichier brut
HV PS13	513958.565	8586777.18	2.4	0.63	201022_1021.106
HV PS14	513838.568	8588282.99	2.7	0.63	201022_1310.107
HV PS12	514595.393	8586928.78	2.5	0.77	201022_0854.105
HV PS11	515192.686	8587491.94	2.8	0.79	201021_1507.104
HV PS7	521095.748	8579714.39	2.6	1.6	201002_1141.100
HV PS3	517220.583	8591686.69	7.2	2.1	200930_1229.096
HV PS2	517241.462	8591814.22	6	2.9	200930_1106.095
HV PS1	517219.192	8591877.52	8.1	3.2	200930_0848.094
HV PS8	520312.775	8579764.08	3.8		201002_1551.101
HV PS9	515819.291	8588036.36	2.4		201021_0955.102
HV PS4	515668.358	8591700.51	3.1		201001_0836.097
HV PS5	516511.152	8591960.28	1.9		201001_1013.098
HV PS6	516695.784	8591764.26	4.9		201001_1437.099
HV PS15	519155.978	8579867.49	3.9		201022_1534.108
HV PS10	514872.824	8587782.88	2.1		201021_1341.103
9DB15D0	514955.545	8586409.22	3.7	0.9	191120_0849_062.002
9DB1F90	515056.791	8586582.01	4.3		191120_0917_062.003
9DB2200	515066.496	8586666.94	2.6		191120_0943_062.004
9DB1228	515112.789	8586774.4	4		191120_1015_062.005
9DB2470	515265.704	8586953.58	3.7		190405_0743_062.006
9DB1560	515428.007	8587229.62	2.8		191120_1120_062.007
9DB0229	514815.759	8586625.27	2.5	0.7	191120_1156_062.008
9D259B8	514528.957	8586729.15	2.6	0.7	190405_1024_062.009
9D93920	514615.998	8586930.92	2.6	0.7	190405_1053_062.010
9DAE430	514765.998	8587143.83	3.5	0.7	191120_1436_062.011
9DAE568	514832.423	8587352.8	3	0.7	191120_1502_062.012
9DB0358	514653.195	8587495.88	2.1	0.7	191120_1539_062.013
9DAE6A0	514909.613	8587594.83	1.8		191120_1610_062.014
9DAE7D8	515111.139	8587539.87	3.7		191120_1640_062.015
9D216A0	514450.538	8586407.06	2.9	0.7	191121_0855_062.016
9DAFC08	515134.584	8587340.47	3.6	0.8	190406_0630_062.017
9DAFE78	515076.714	8587101.75	4.1	1	191121_1012_062.018
9DAFF80	515017.588	8586946.96	2.6	0.9	191121_1040_062.019
9DAF490	514940.049	8587884.1	2		191121_1117_062.020
9DAE910	514879.449	8587817.01	2.3	0.7	191121_1158_062.021
9DAF998	514359.856	8587146.36	2.5	0.7	191121_1306_062.022
9DAFAD0	514495.715	8587300.45	2.4	0.7	191121_1348_062.023
9DAF700	514147.036	8586969.31	2.4	0.7	191121_1418_062.024
9DAF5C8	513965.157	8586803.64	2.3	0.6	191121_1502_062.025
9DB1708	514200.54	8587174.75	2.5	0.7	191121_1536_062.026

9DB26E0	514183.859	8587242.11	3.5	0.7	191121_1602_062.027
9DB20C8	514294.525	8587373.65	2.2	0.7	191121_1632_062.028
9DB1840	514206.801	8587538.35	4.7	0.7	191121_1659_062.029
9DB2338	514150.595	8587571	4.7	0.6	191122_0901_062.030
9DB1D20	514201.003	8587663.2	4.2	0.6	191122_0938_062.031
9DB1978	514251.514	8587742.91	2.6	0.6	191122_1007_062.032
9DB0490	513719.115	8588151.23	2.4		191122_1128_062.033
9DB05C8	513879.287	8588303.98	3		191122_1207_062.034
9DAFD40	514024.994	8588395.91	1.9		191122_1233_062.035
E586150	519039.914	8581029.66	3.4		191122_1410_062.037
E5879B0	519086.535	8580970.91	3.6		191122_1437_062.038
E586EB8	518897.783	8581059.61	5.4		191122_1338_062.036
E5864F8	519126.711	8580851.12	3.9		191122_1514_062.039
E586018	519243.856	8580464.87	3.8		191122_1602_062.040
E587128	519227.828	8580352.97	5.3		191122_1640_062.041
E587AE8	519234.473	8580232.98	5.7		191123_0858_062.042
E587398	519187.653	8580157.15	5.6		191123_0922_062.043
E585DA8	519085.599	8580076.16	13		191123_0948_062.044
E587608	519068.148	8579945.79	7.3		191123_1013_062.045
E586B10	519103.226	8579830.1	4.8		191123_1038_062.046
E587260	519001.255	8579708.96	6.1		191123_1108_062.047
E586D80	518979.949	8579652.8	9.6		191123_1133_062.048
E5F93A8	520736.892	8580224.28	2.3		191123_1227_062.049
E5F9FD8	520707.472	8580059.19	2.5		191123_1255_062.050
E5F8D90	520707.399	8579960.66	2.4		191123_1430_062.051
E5FA248	520695.587	8579835.05	4.4		191123_1501_062.052
E5F88B0	520709.892	8579664.29	3.7		191123_1528_062.053
E5F9AF8	520924.241	8579435.66	6.4		191123_1554_062.054
E5F9888	520852.432	8579757.52	1.9		191123_1622_062.055
E5874D0	519110.596	8580770.07	5.6		191125_0840_062.056
E587698	519152.013	8580719.94	4.7		191125_0910_062.057
E5868A0	519197.634	8580629.34	3.9		191125_0935_062.058
E586FF0	519224.824	8580562.09	6.9	3.7	191125_1002_062.059
E5F99CD	519813.451	8579884.56	0		191125_1043_062.060
E5F8640	519761.107	8580285.25	1.8		191125_1122_062.061
E5F9D68	519850.942	8580421.76	2		191125_1158_062.062
E5863CD	520025.399	8580989.38	3.4		191125_1356_062.063
D561DB8	516473.312	8591291.46	3.4		191126_0935_062.064
D561B48	516601.239	8591381.29	10.1		191126_1009_062.065
D561050	516662.272	8591425.05	3.1		191126_1040_062.066
D560F18	516727.549	8591488.04	0		191126_1119_062.067
D560CA8	516818.429	8591522.16	1.7		191126_1150_062.068
D561A10	516888.467	8591557.72	1.8		191126_1232_062.069

D560900	516935.161	8591584.9	7.2	1.7	191126_1315_062.070
D561EF0	517019.059	8591655.49	0		191126_1351_062.071
20B	517358.51	8591217.17	3.46		200824_1139.072
19B	517262.855	8591360.77	6.26		200824_1223.073
18B	517206.149	8591469.84	0		200108_1003.074
17B	517235.424	8591591.91	1.86		200108_1100.075
23B	517185.319	8591668.24	1.9		200108_1134.076
16B	517234.962	8591723.17	1.85		200108_1210.077
13B	517031.922	8592011.25			inexploitable
13C	517034.761	8592037.24	2.25		200108_1308.078
10B	516607.23	8591968.05	1.96		200108_1344.079
25B	516895.82	8591690.86	2.01		200109_0834.080
24B	516840.302	8591795.29	3.27		200109_0906.081
21B	516887.335	8591844.03	2.62		200109_0940.082
12B	516907.683	8591923.19	2.41		200109_1018.083
28B	515575.052	8591703.68	2.88		200109_1102.084
27B	515663.414	8591701.64	2.89		200109_1131.085
26B	515726.171	8591725.16	4.37		200109_1200.086
15B	515746.599	8591760.53	6.48		200109_1232.087
29B	515811.78	8591846.75	11.79		200109_1332.088
29C	515814.827	8591860.24			inexploitable
29D	515833.497	8591857.69			inexploitable
11B	516717.584	8591890.24	4.28		200109_1409.089
14B	517191.875	8592094.65			inexploitable
14C	517181.561	8592092.78			inexploitable
14D	517147.263	8592101.53	2.43		200110_0831.090
7B	516216.719	8591334.18			inexploitable
7C	516259.786	8591285.72	2.45		200110_0913.091
30B	516019.292	8591577.8	3.28		200110_0952.092
22B	515788.133	8591684.32	5.55		200110_1028.093

Tableau 6 : Coordonnées des mesures H/V acquises dans le cadre du projet. Sont également indiqués l'identifiant terrain de chacun des points de mesure ainsi que la fréquence de résonance f_0 et le nom du fichier brut. Le système de projection utilisé est le système RGM04 préconisé par l'IGN pour le territoire mahorais (EPSG4471).

Identifiant	X	Y	Localisation	fréquence de résonance f0 (Hz)	Fichier brut
CO1	515446.406	8587427.521	Milieu de la retenue (route)	4.6	*.261
CO2	515444.287	8587464.170	Crête	3.0	*.262
CO3	515450.007	8587374.03	Bas de la retenue	7.1	*.263
DZ1	511523.891	8594472.254	Crête Est	10.1	*.269
DZ2	511469.129	8594419.293	Crête Ouest	3.3	*.265
DZ3	511602.38	8594418.23	Point Sud Est (chemin)	0	*.266
DZ4	511500.112	8594386.14	Point Sud Ouest (bas de pente)	5.5	*.267
DZ5	511560.924	8594360.31	Point Sud Ouest (chemin)	7.2	*.268

Tableau 7 : Coordonnées des mesures H/V acquises pour le compte du SIEAM en 2018. Sont également indiqués l'identifiant terrain de chacun des points de mesure ainsi que la fréquence de résonance f0 et le nom du fichier brut. Le système de projection utilisé est le système RGM04 préconisé par l'IGN pour le territoire mahorais (EPSG4471).

Les localisations des mesures H/V et MASW sont indiquées sur la Figure 65 pour le site de Dembéni, la Figure 66 pour le site de Longoni, la Figure 67 pour le site de Combani et la Figure 68 pour la retenue collinaire de Dzoumogné (hors site pilote du projet). Pour chacun des sites sont également représentés les rapports H/V obtenus pour chacune des mesures réalisées.

Site de Dembeni

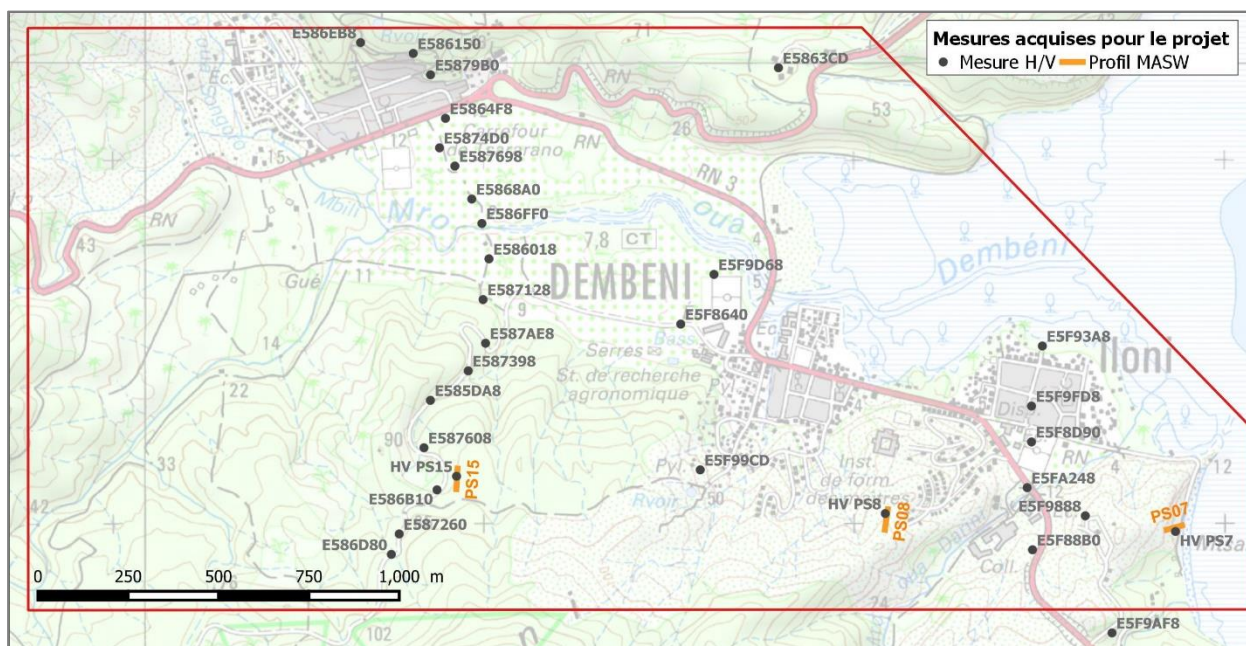
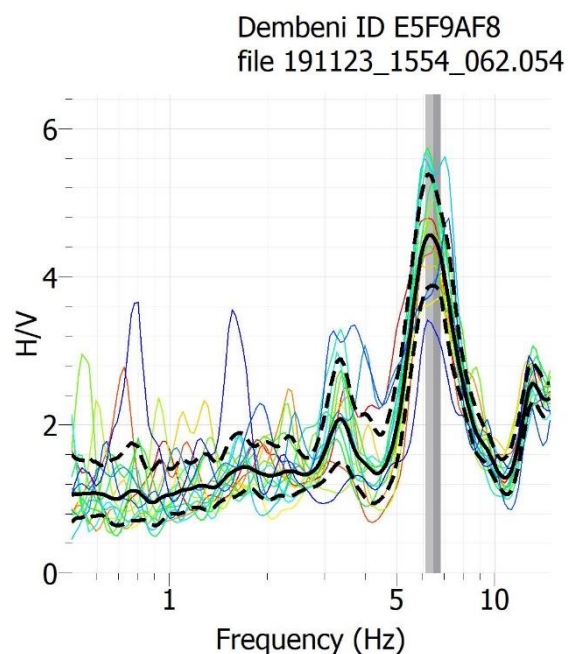
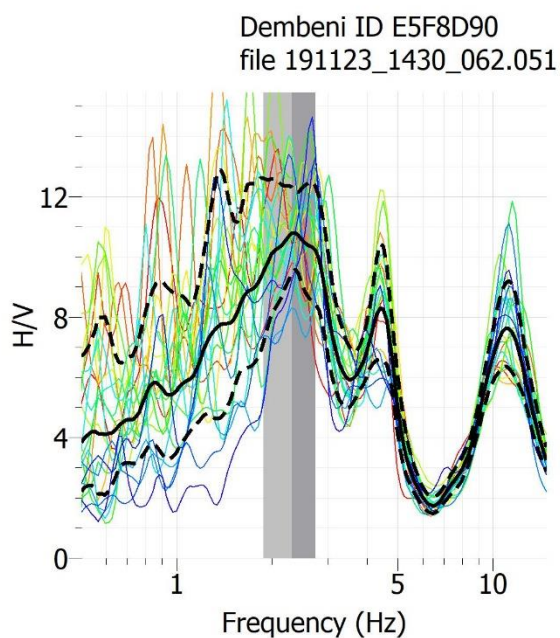
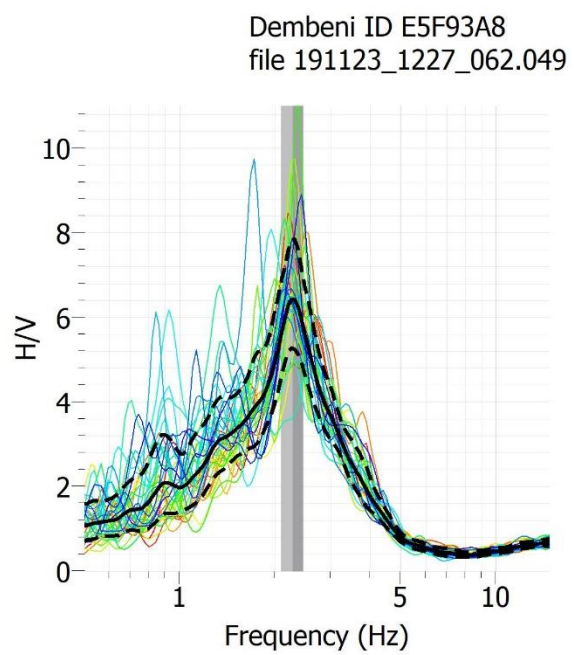
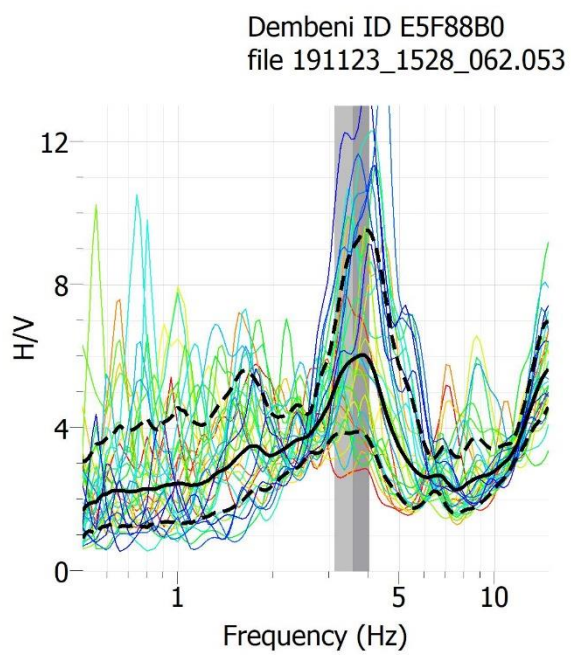
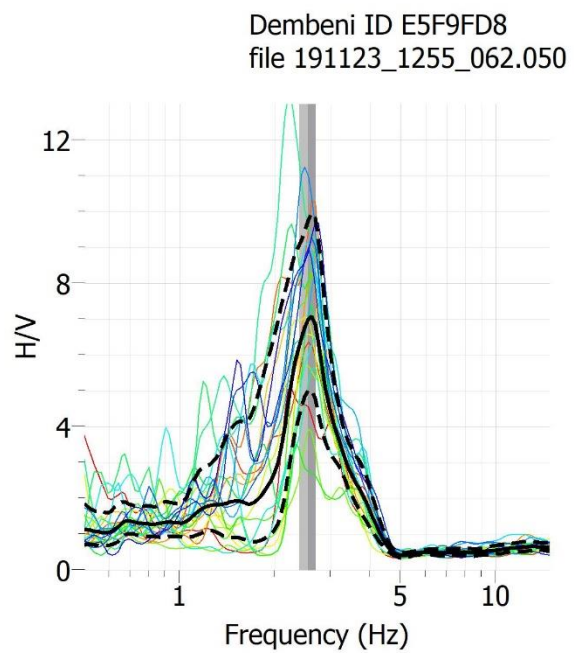
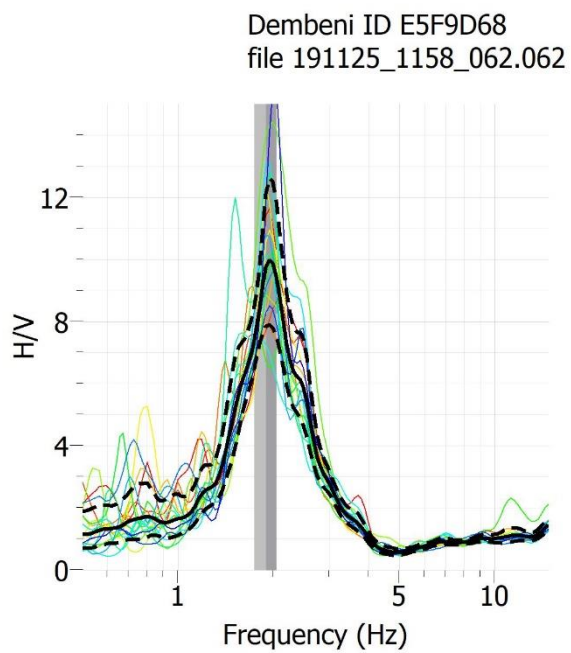
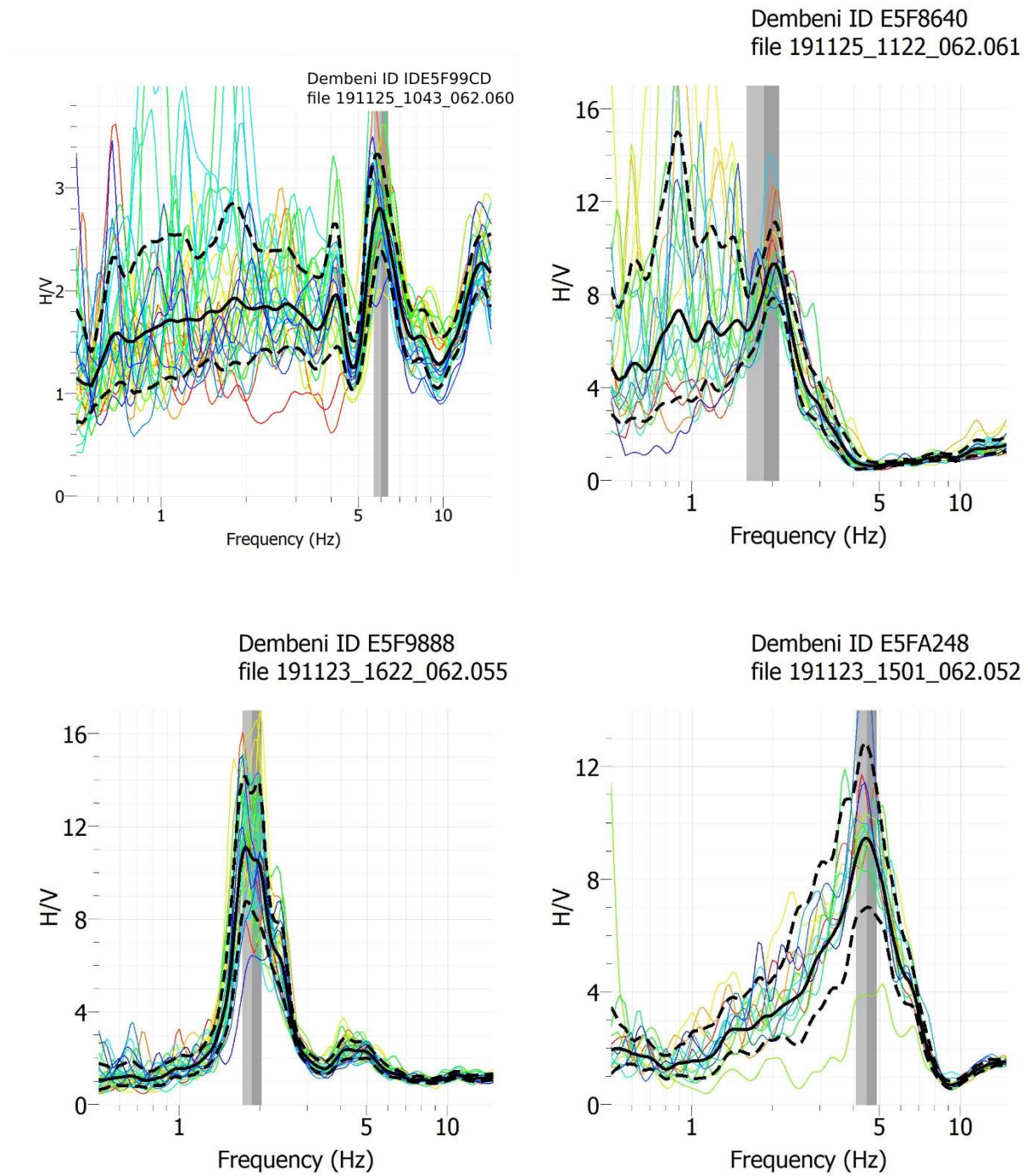


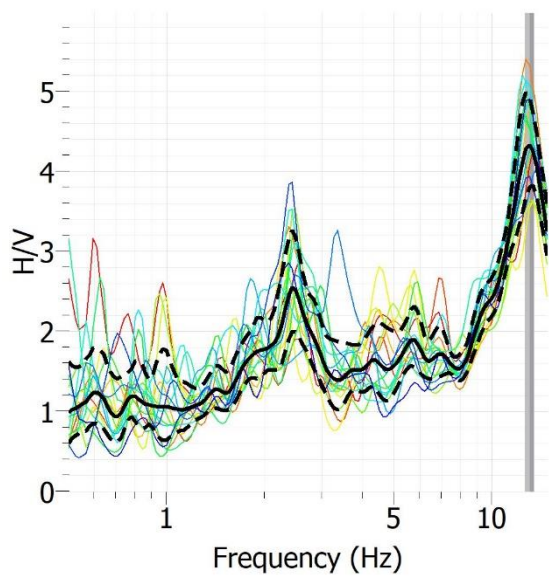
Figure 65 : Localisation des mesures H/V et des profils MASW acquis dans le cadre de ce projet sur le site de Dembeni.



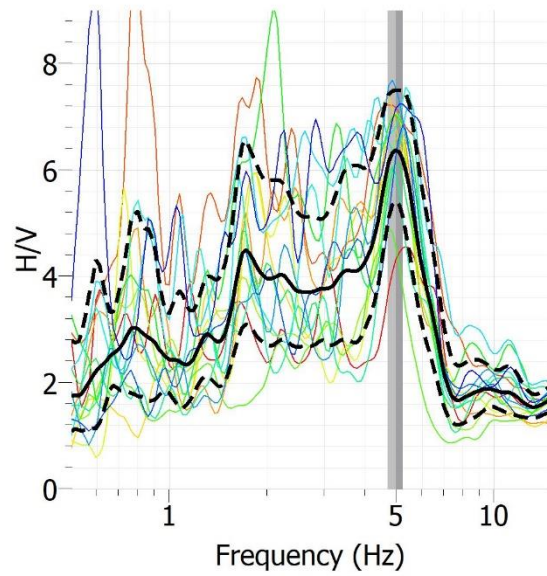




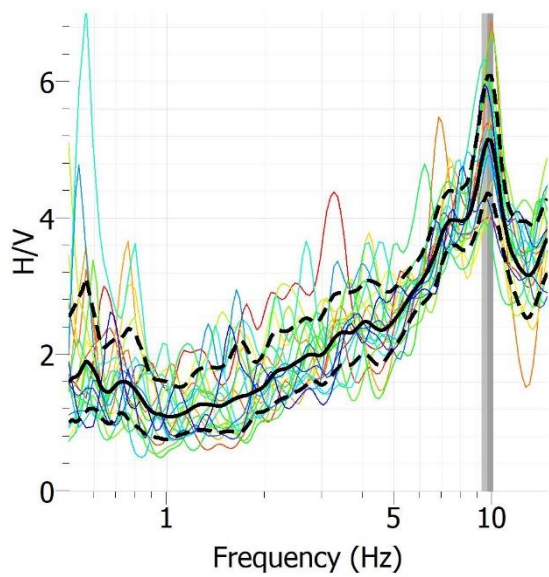
Dembeni ID E585DA8
file 191123_0948_062.044



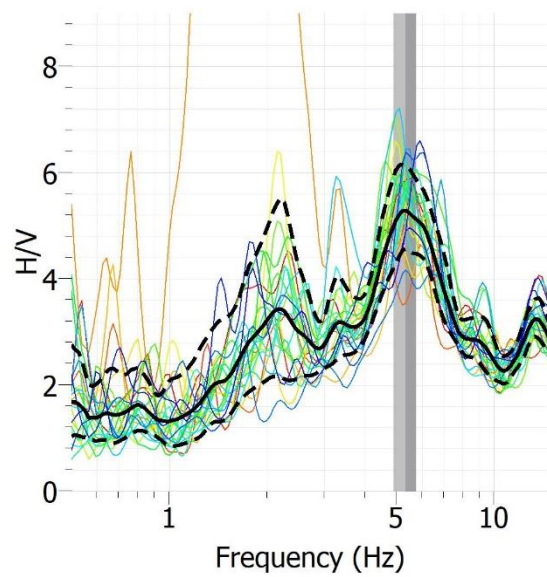
Dembeni ID E586B10
file 191123_1038_062.046



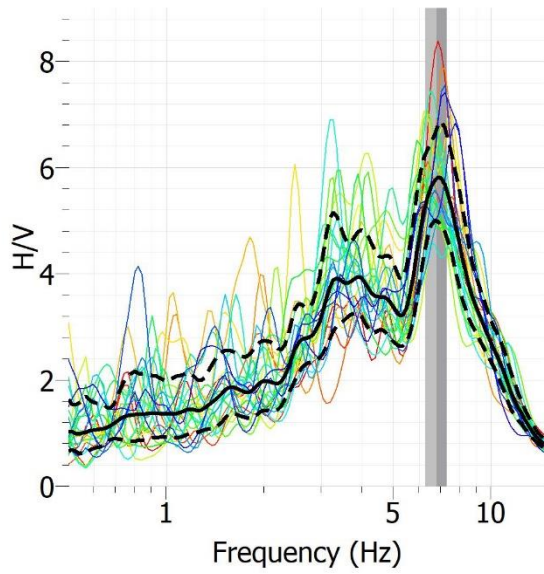
Dembeni ID E586D80
file 191123_1133_062.048



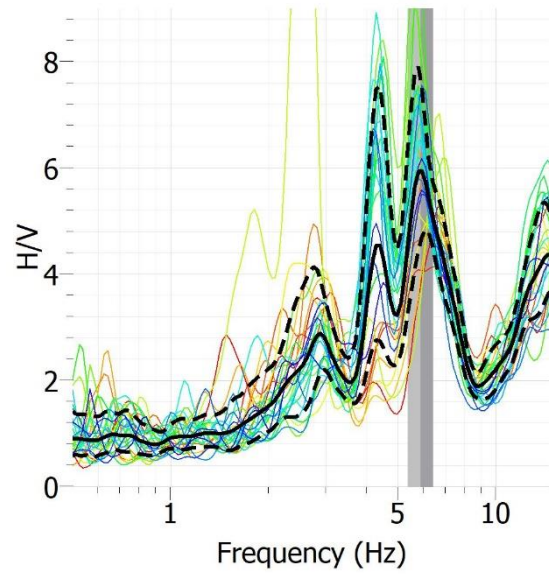
Dembeni ID E586EB8
file 191122_1338_062.036



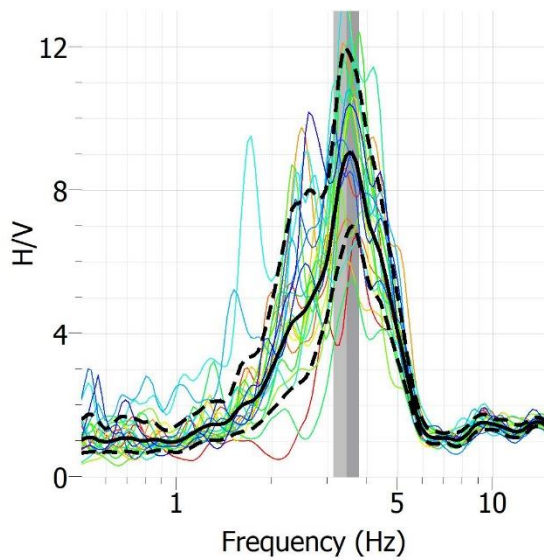
Dembeni ID E586FF0
191125_1002_062.059



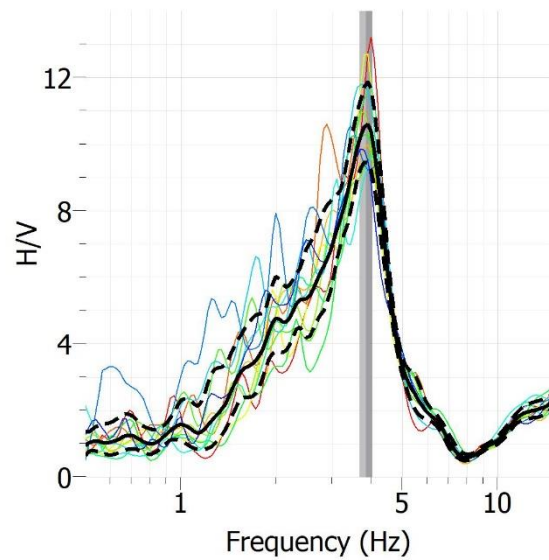
Dembeni ID E587AE8
191123_0858_062.042

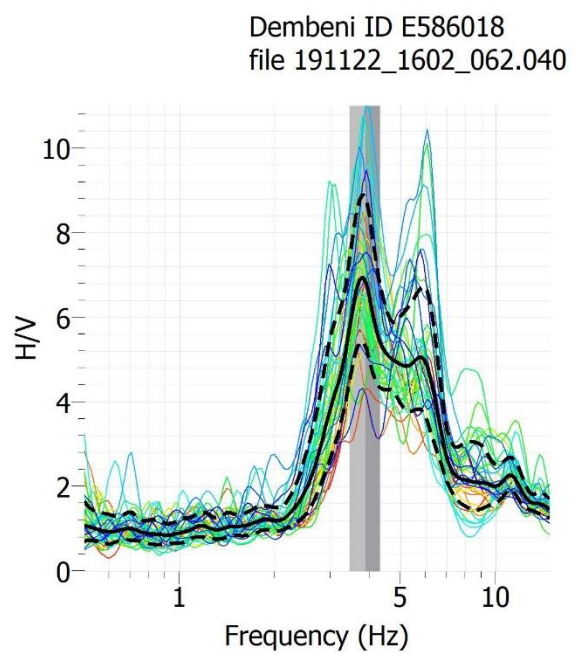
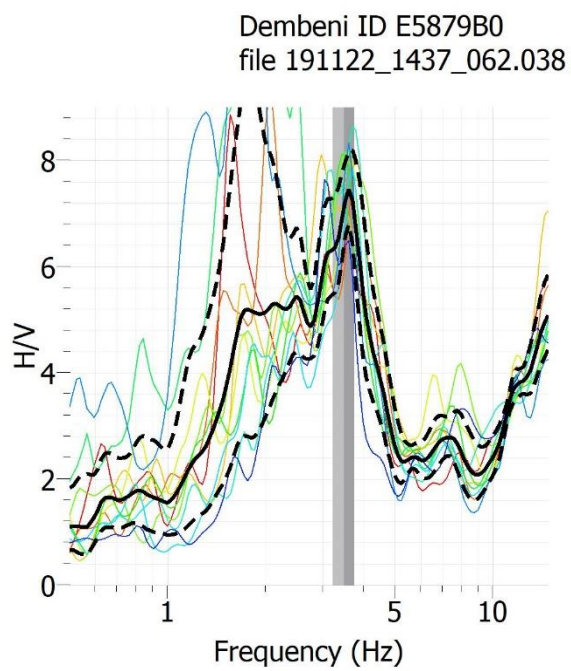
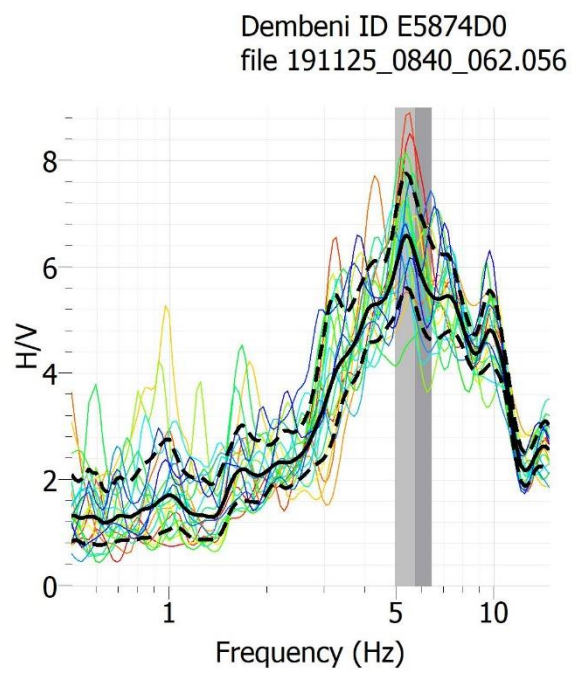
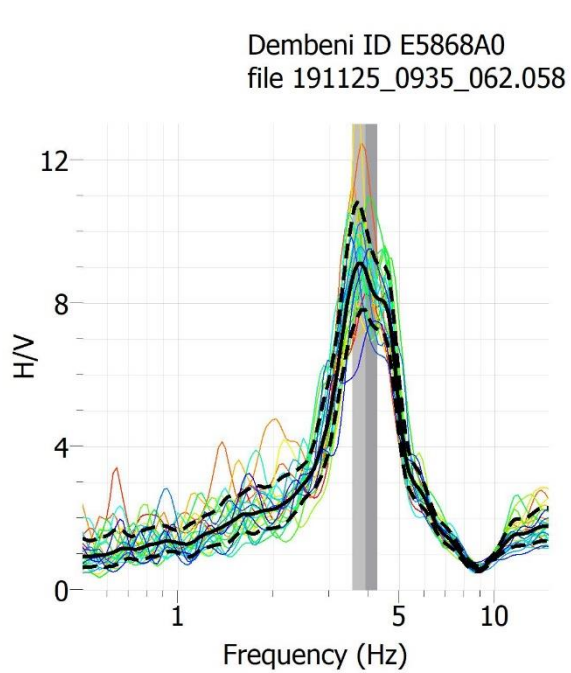


Dembeni ID E5863CD
file 191125_1356_062.063

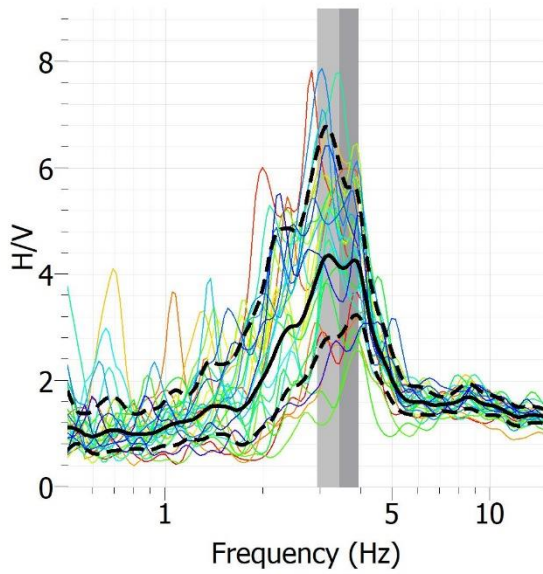


Dembeni ID E5864F8
file 191122_1514_062.039

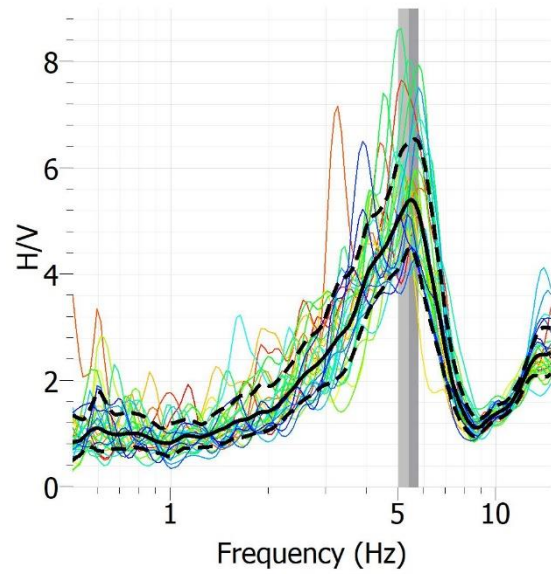




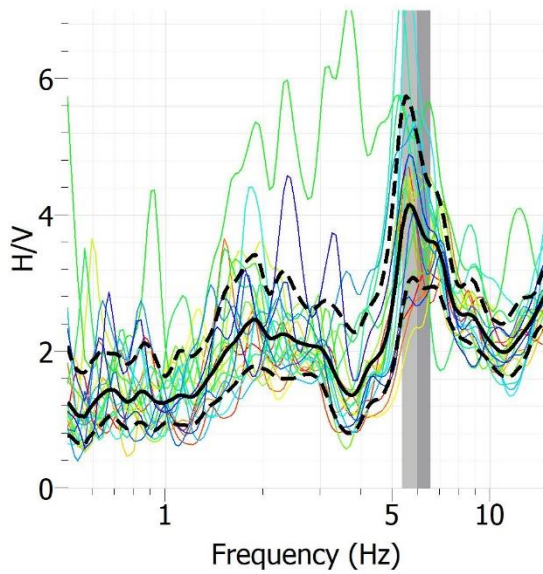
Dembeni ID E586150
file 191122_1410_062.037



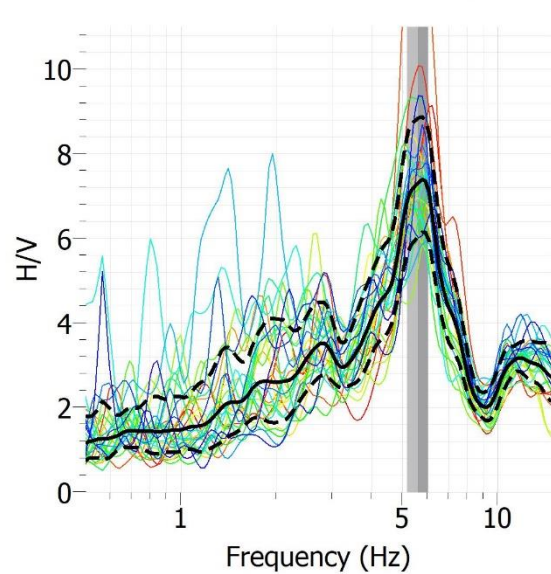
Dembeni ID E587128
file 191122_1640_062.041

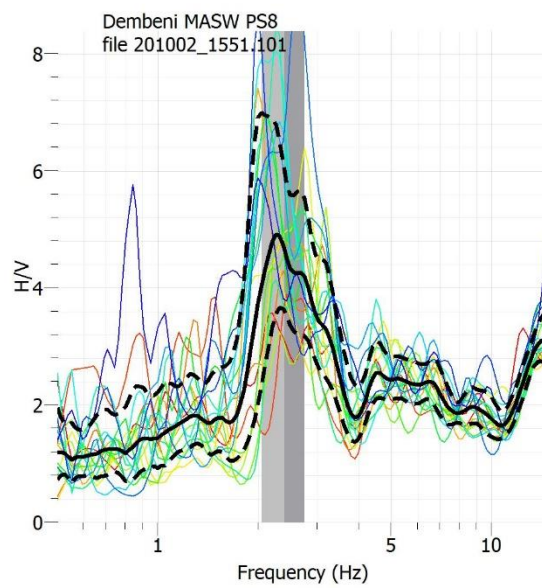
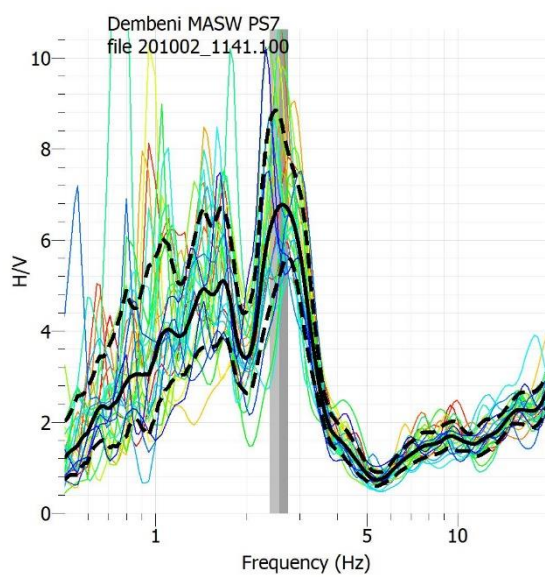
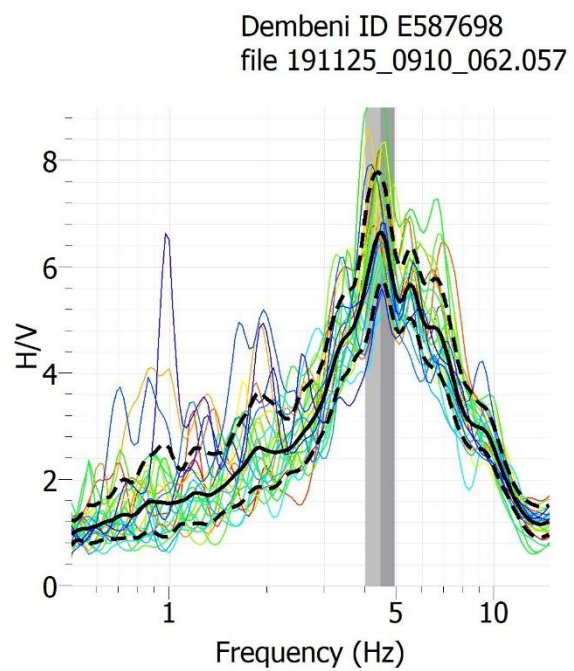
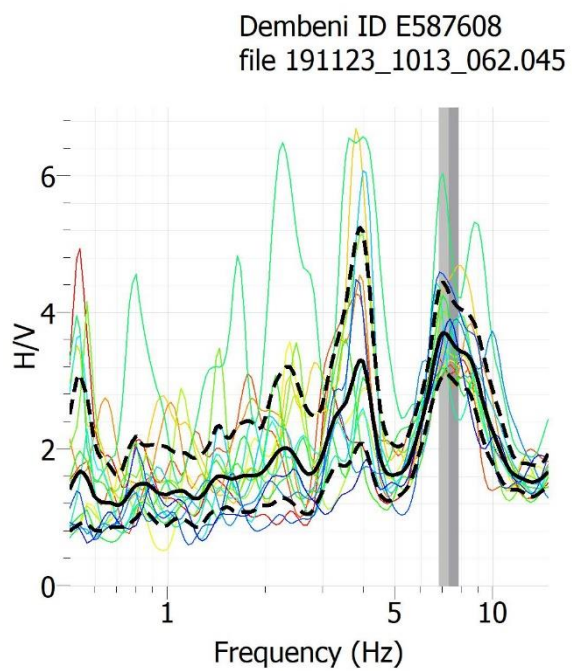


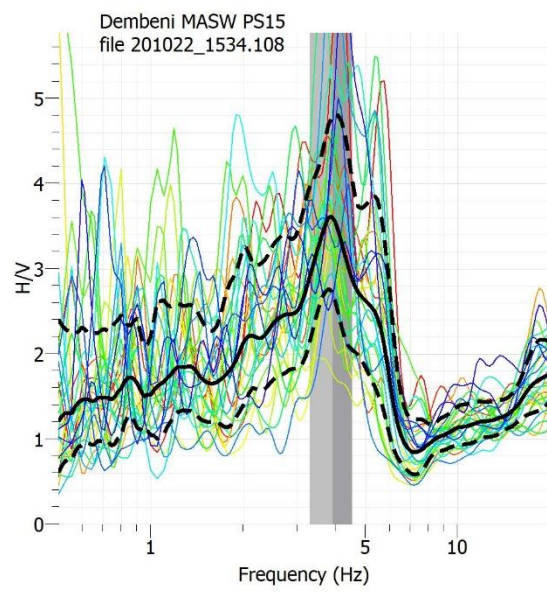
Dembeni ID E587260
file 191123_1108_062.047



Dembeni ID E587398
file 191123_0922_062.043







Site de Longoni

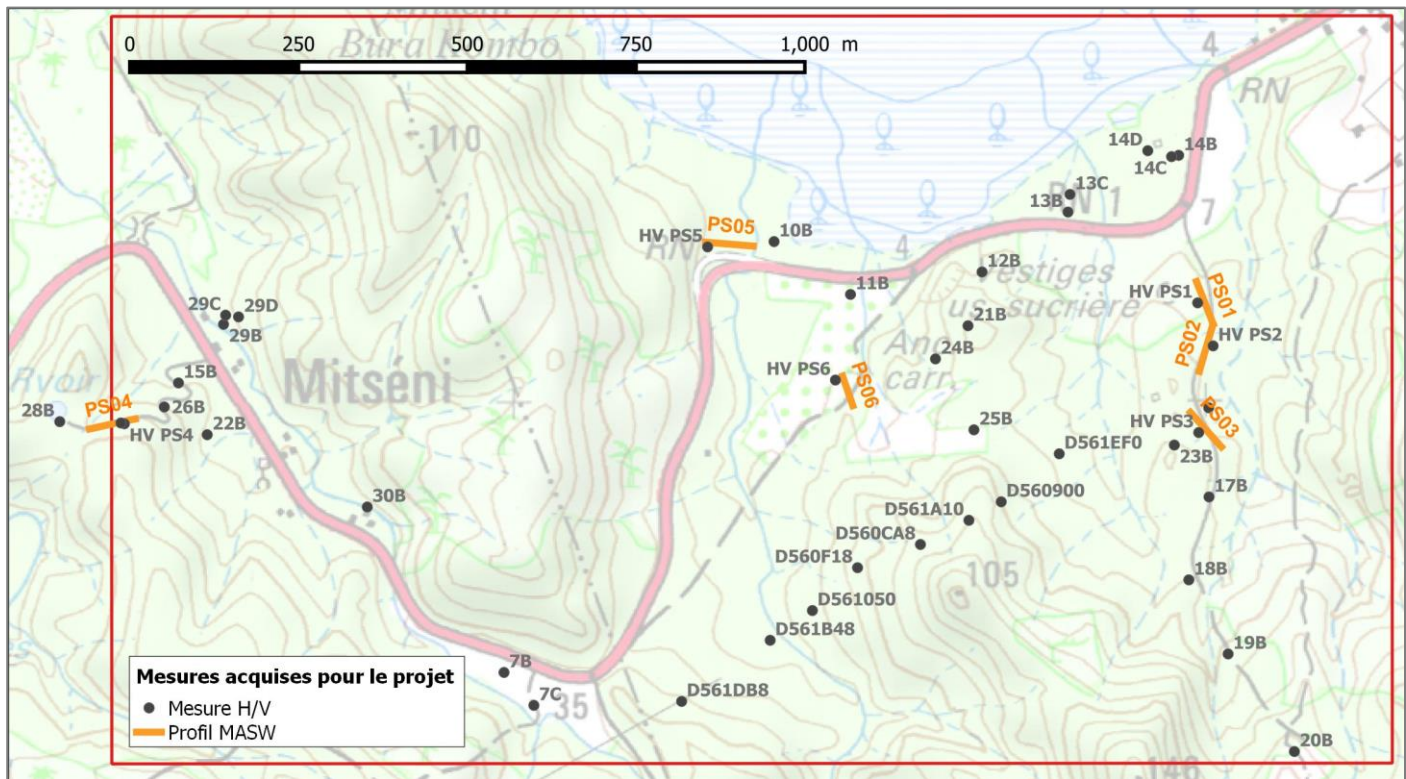
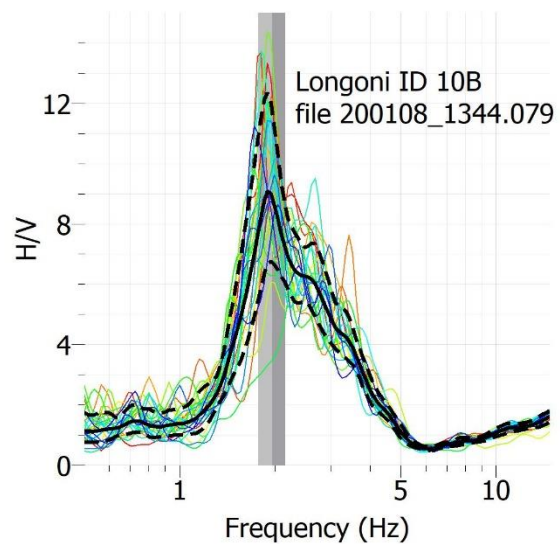
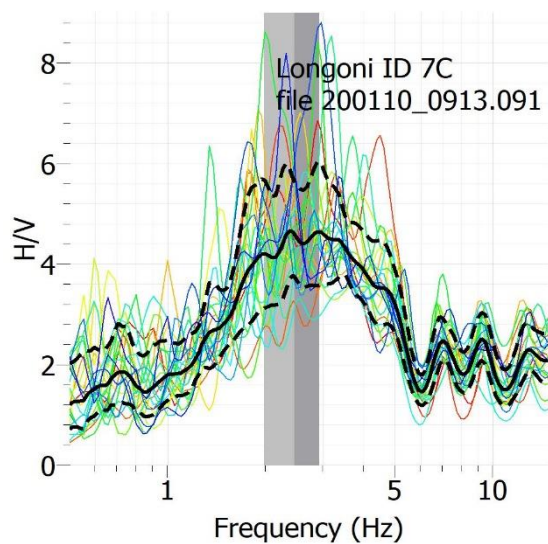
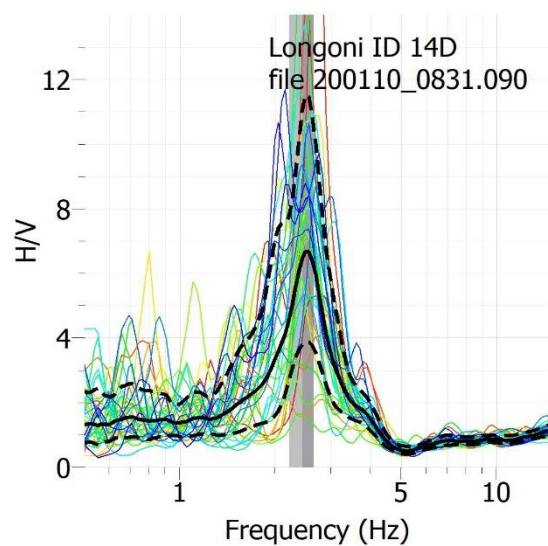
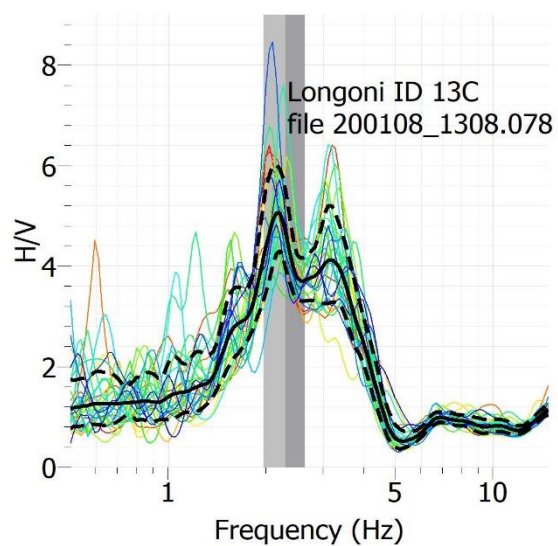
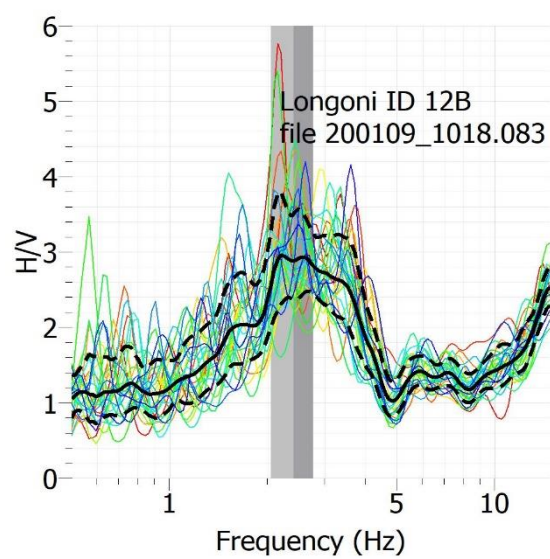
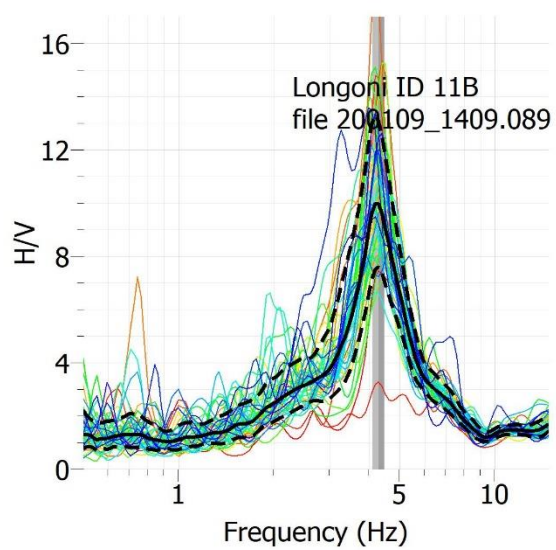
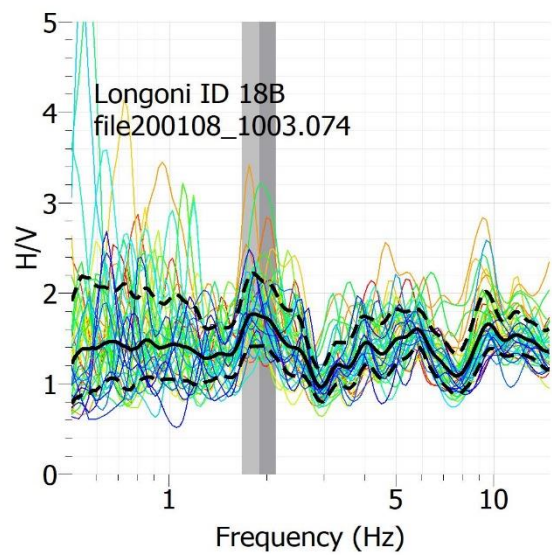
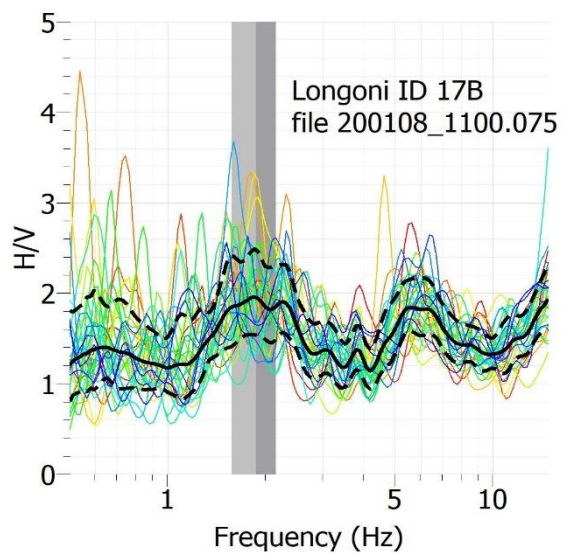
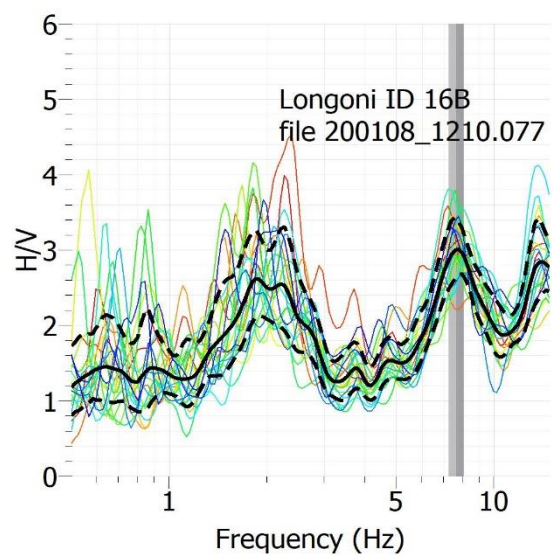
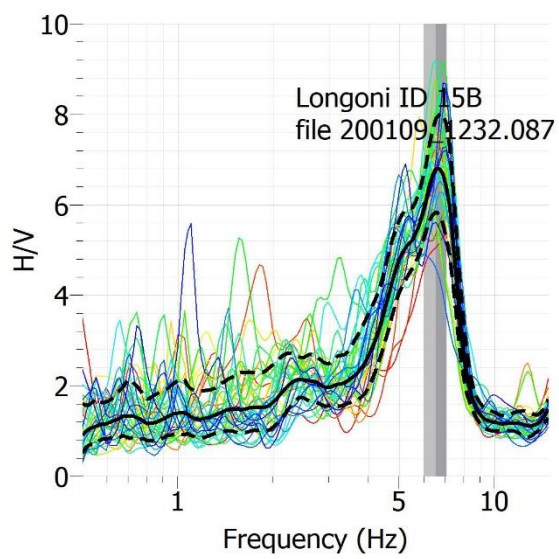
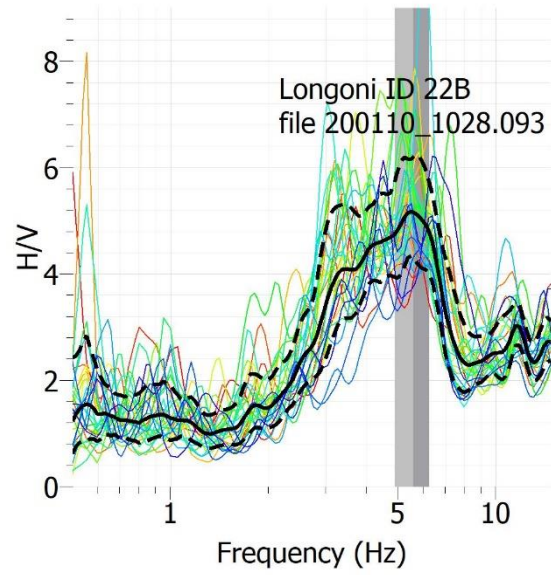
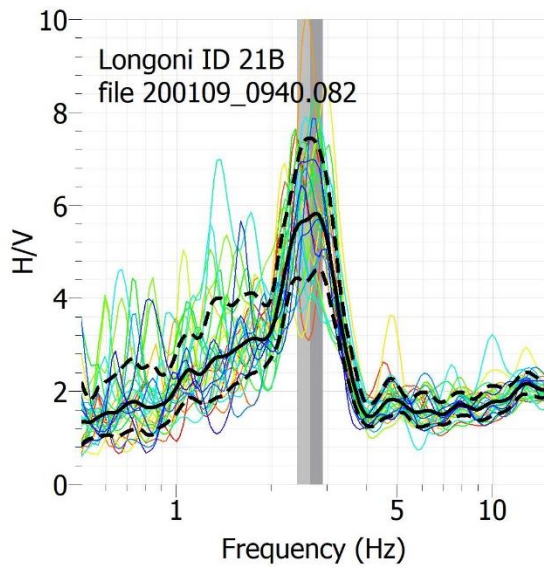
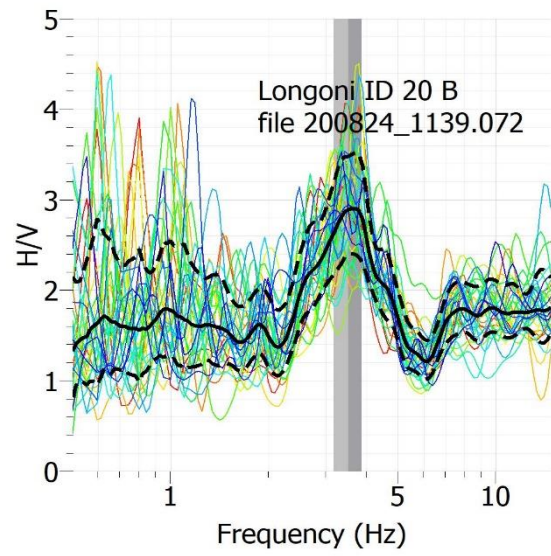
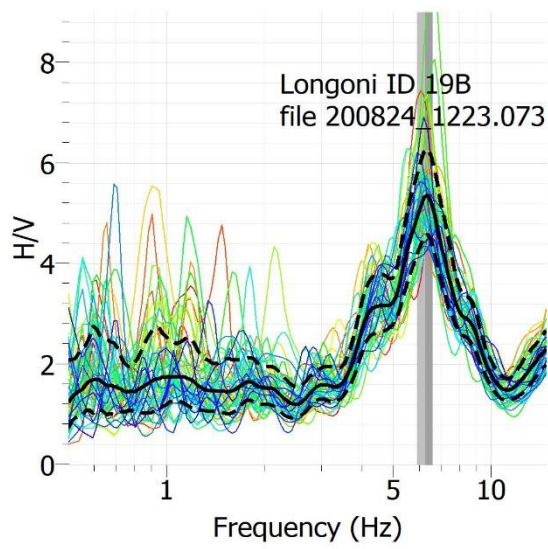


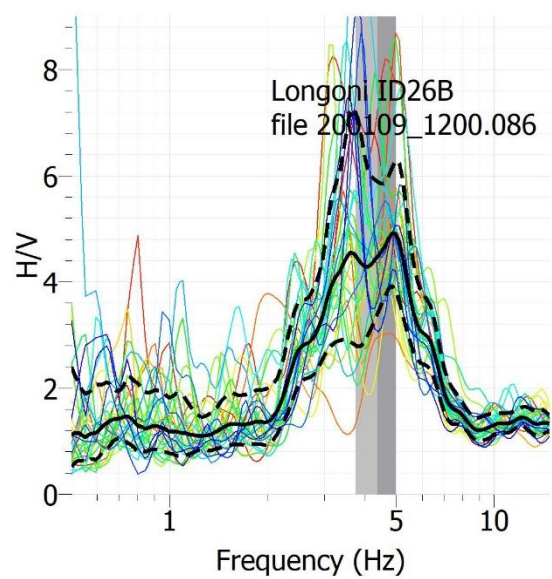
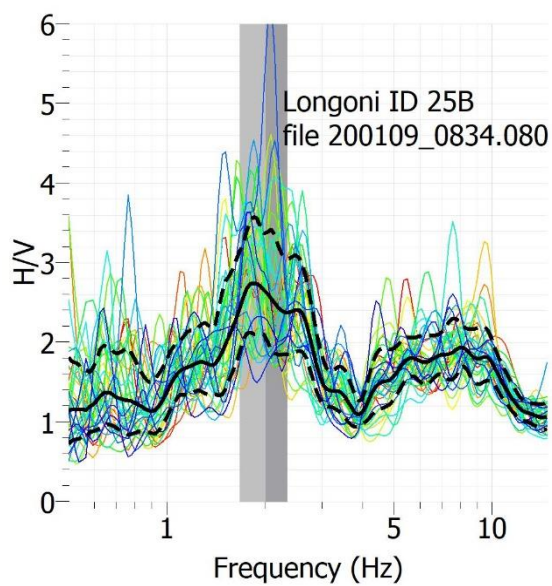
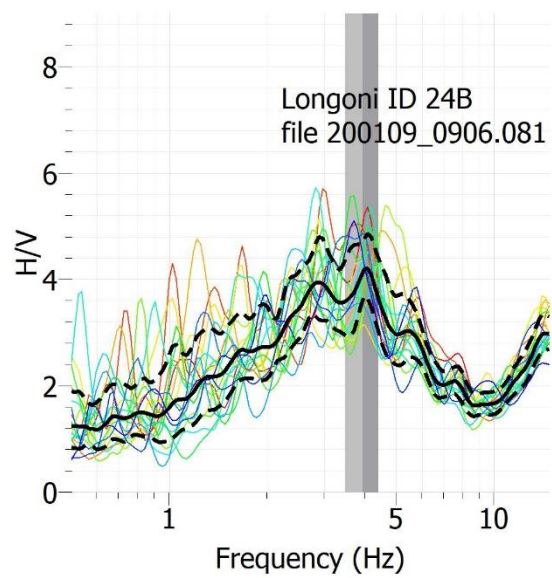
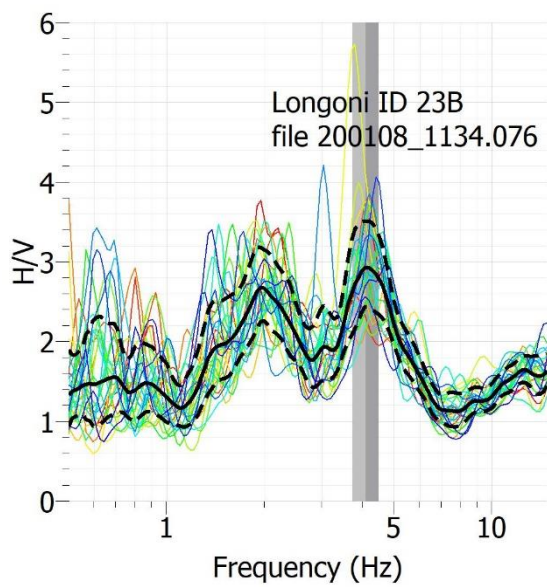
Figure 66 : Localisation des mesures H/V et des profils MASW acquis dans le cadre de ce projet sur le site de Longoni.

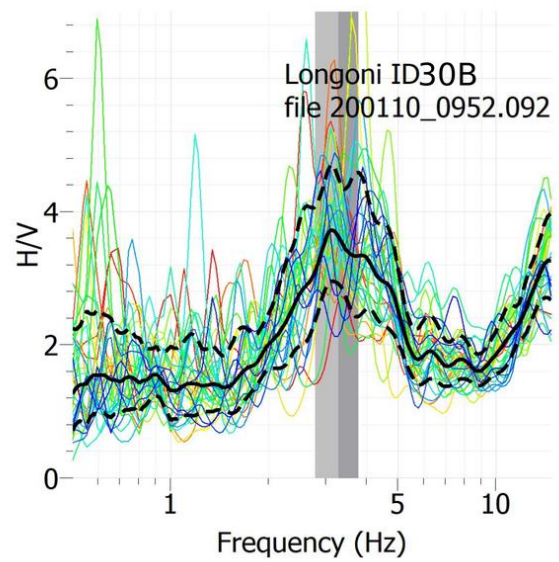
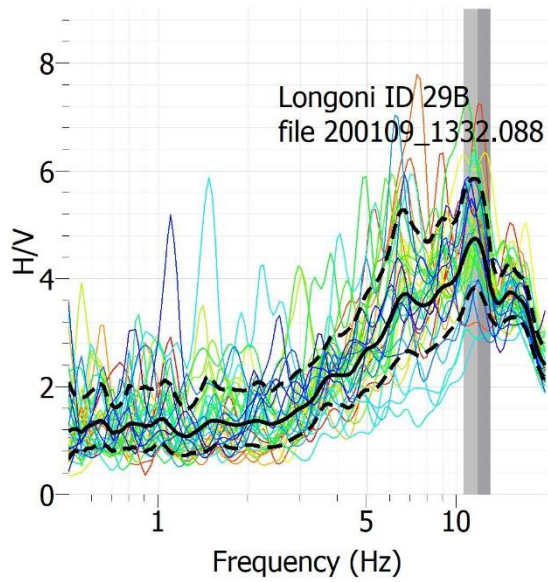
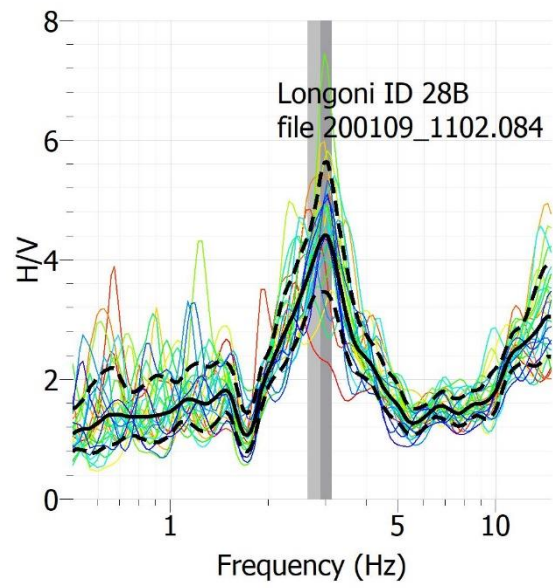
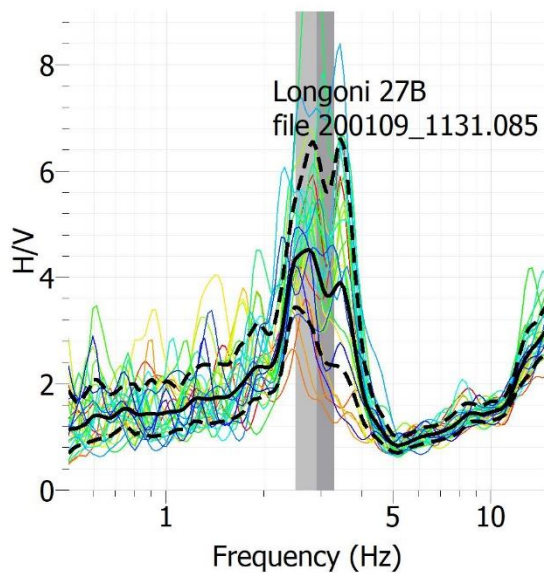


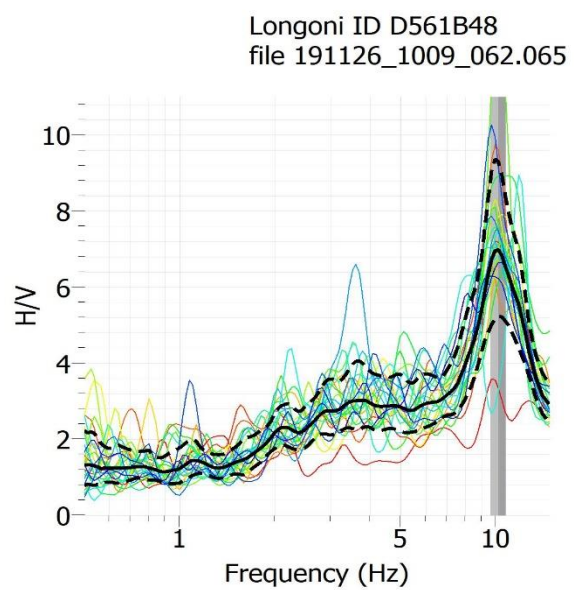
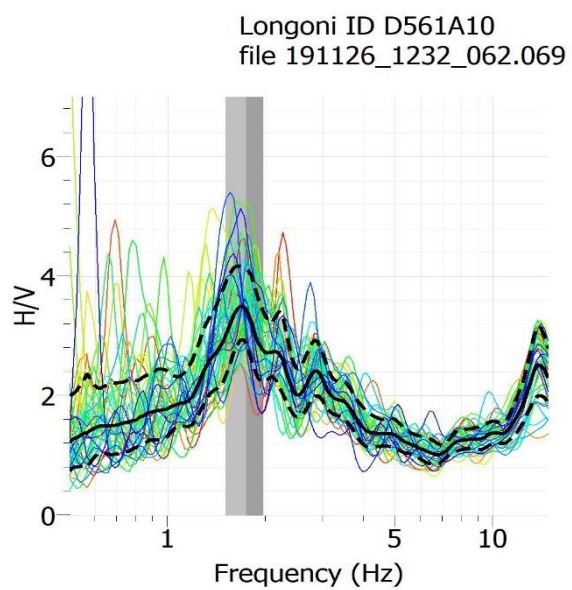
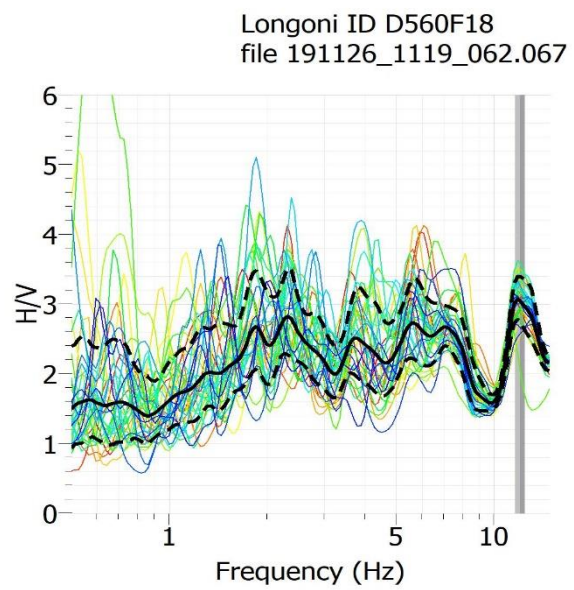
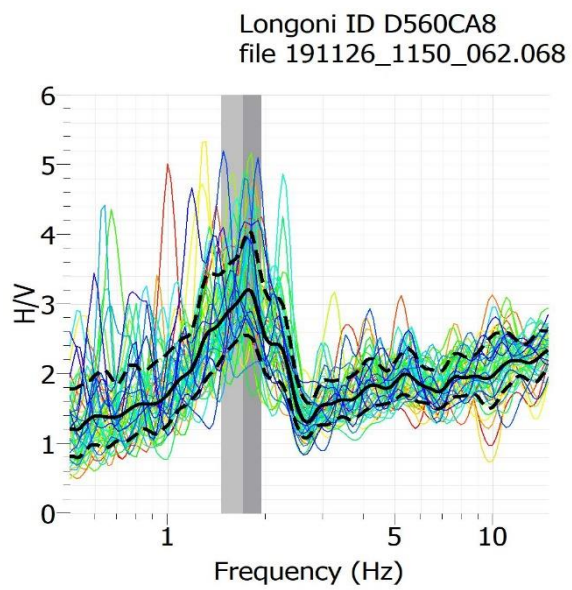


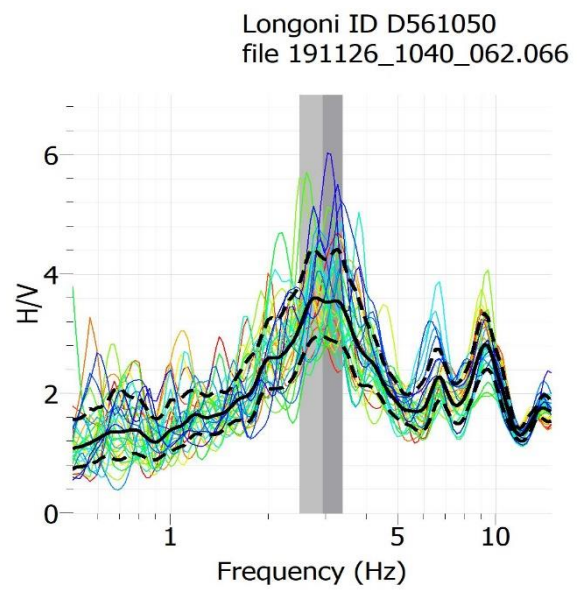
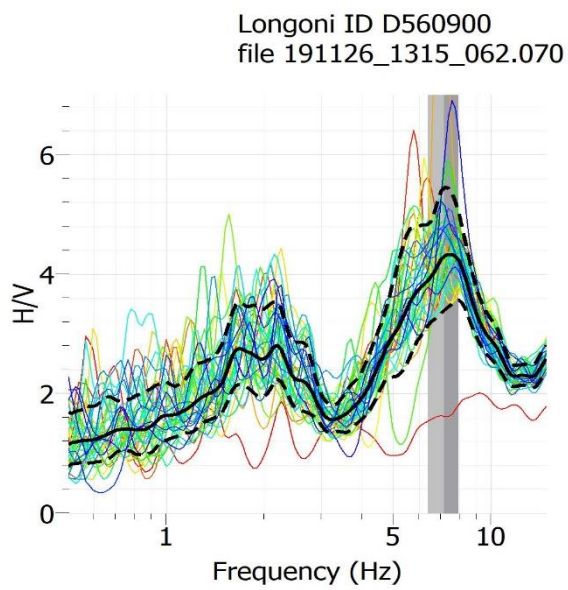
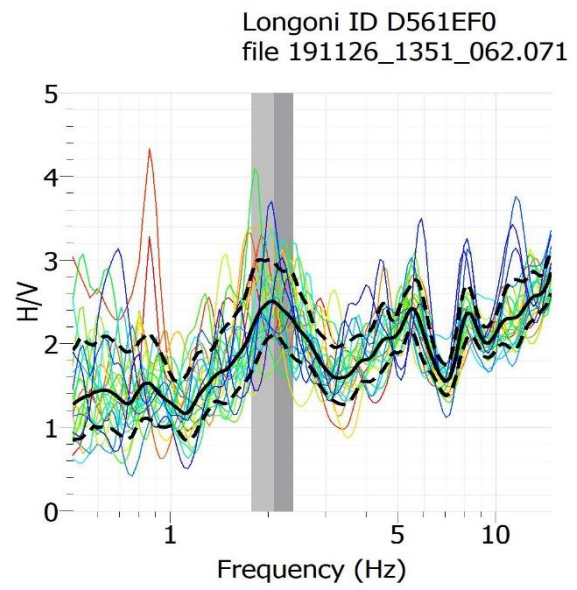
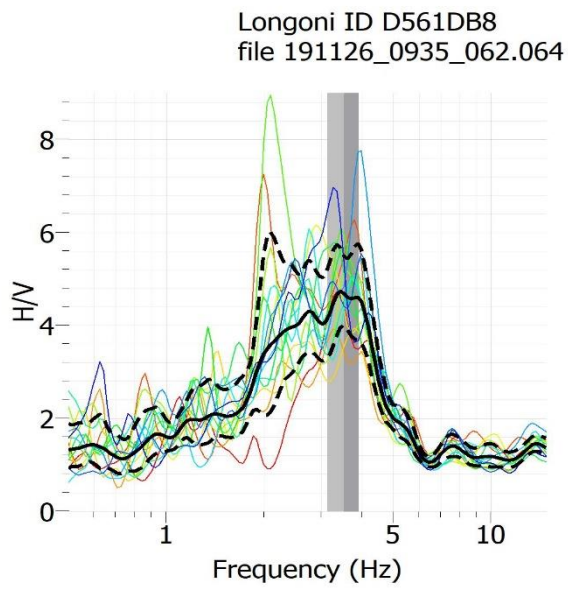


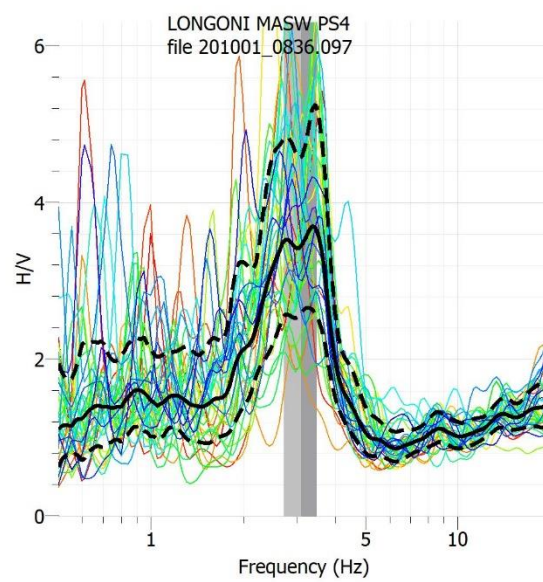
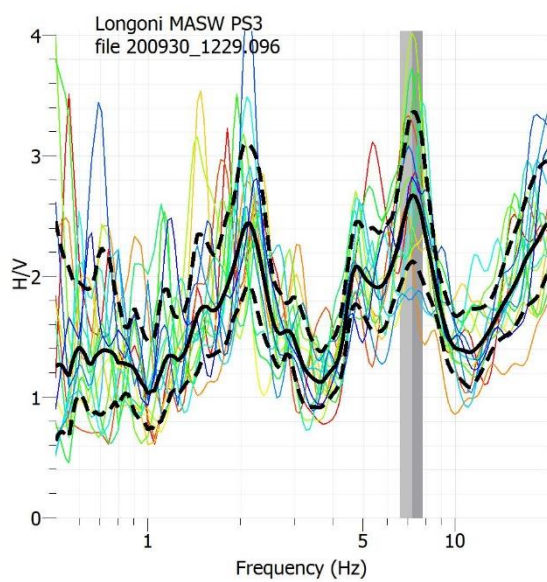
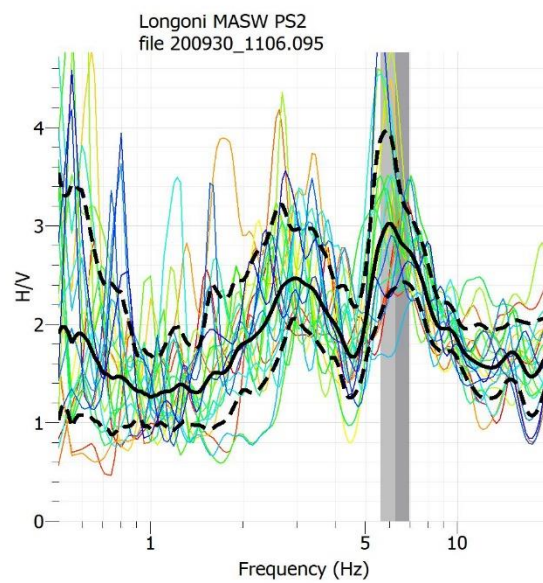
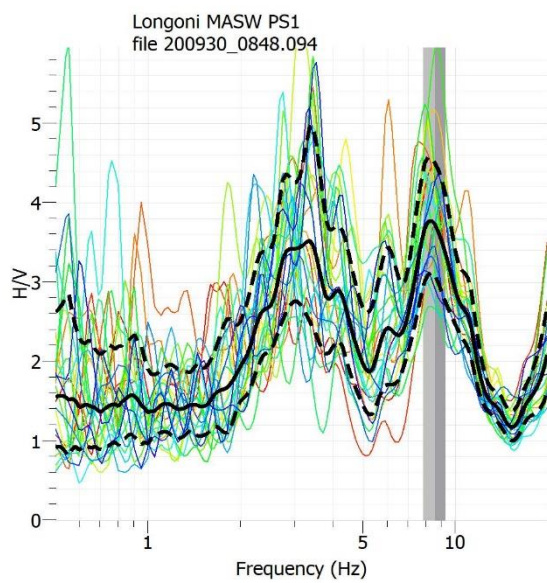


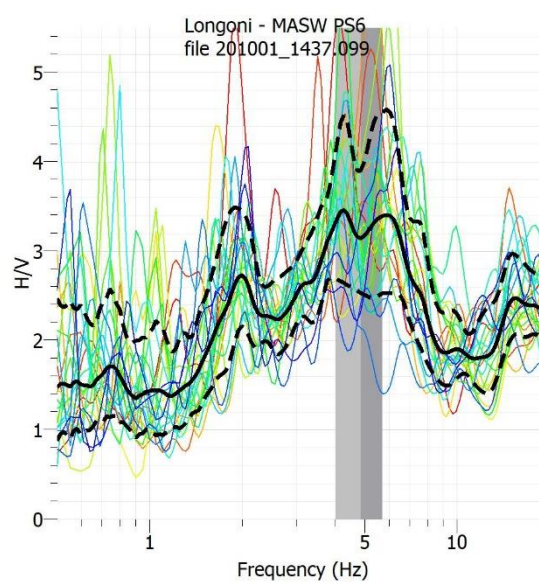
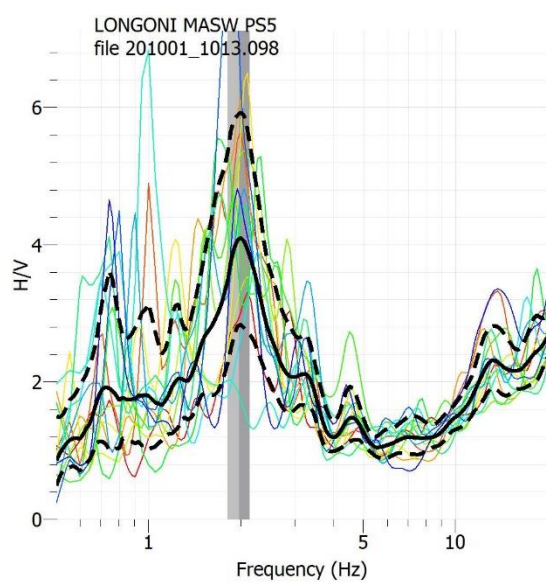












Site de Combani

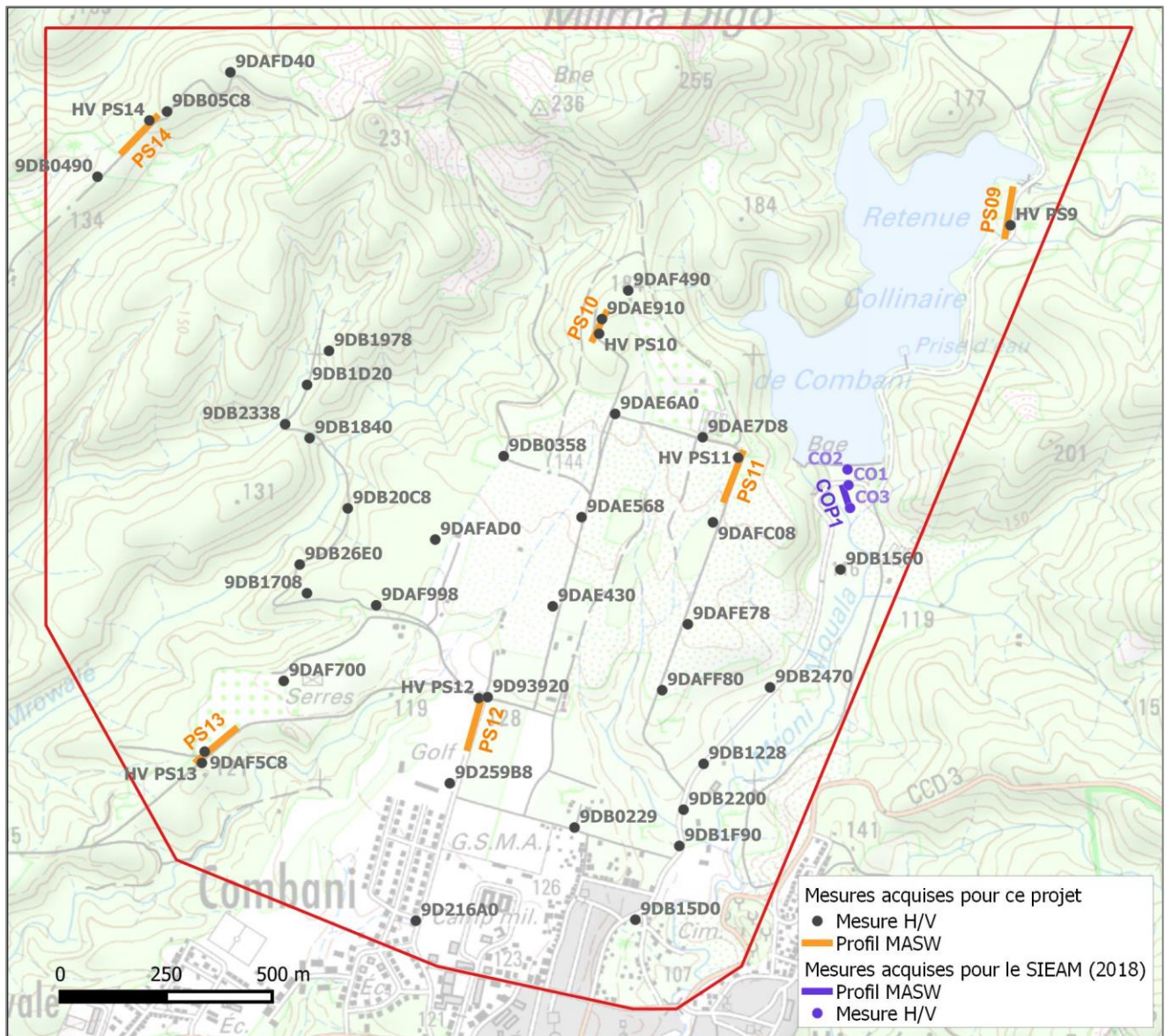
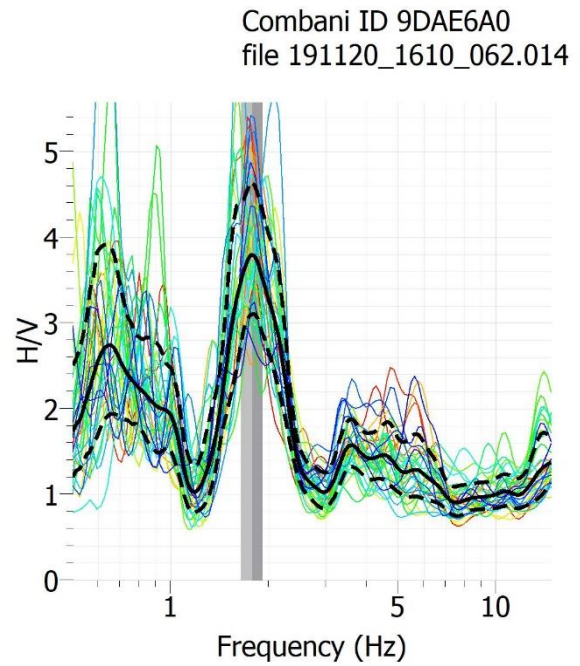
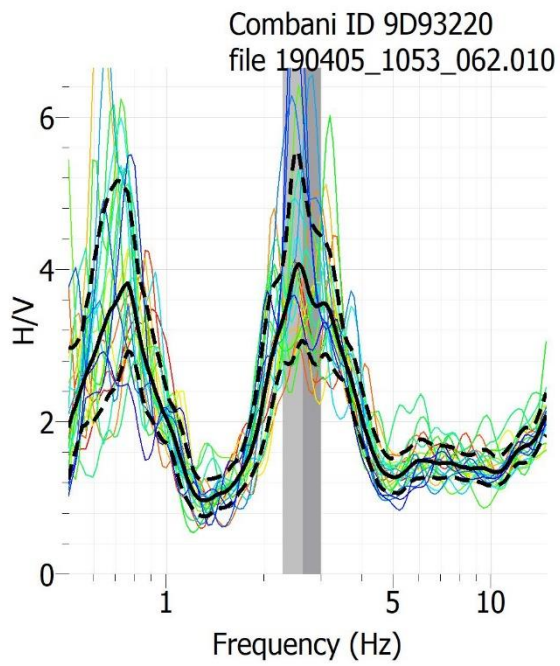
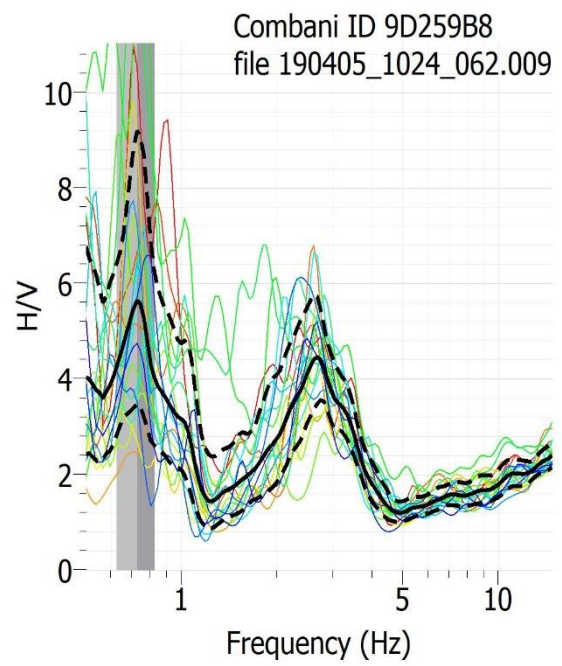
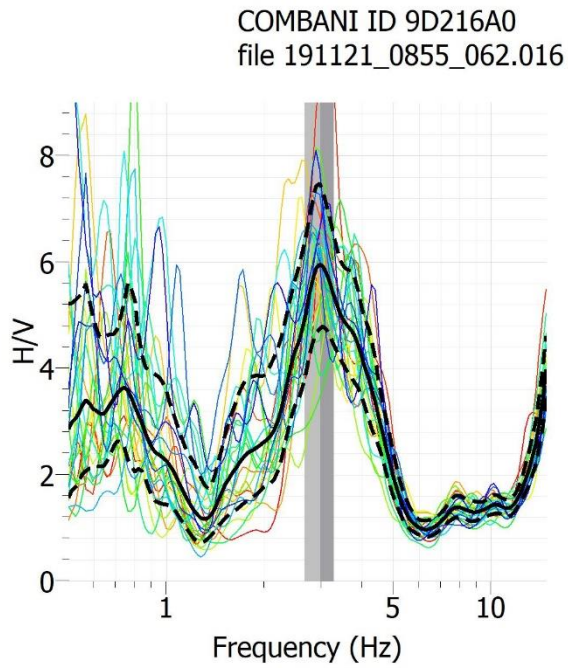
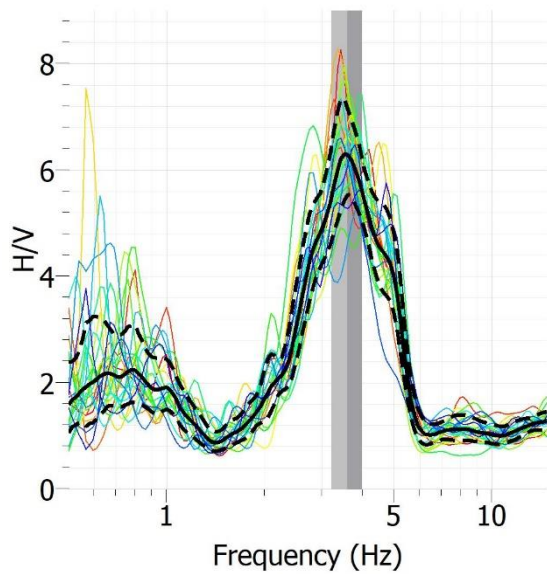


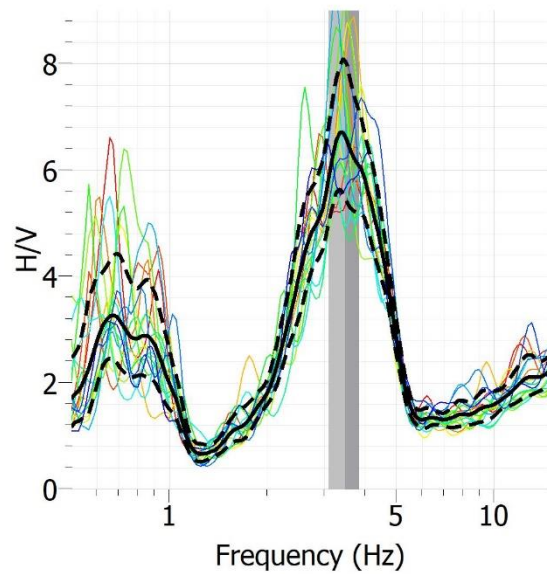
Figure 67 : Localisation des mesures H/V et des profils MASW acquis dans le cadre de ce projet sur le site de Combani. Sont également indiquées en violet les mesures réalisées en 2018 pour le compte du SIEAM pour rappel.



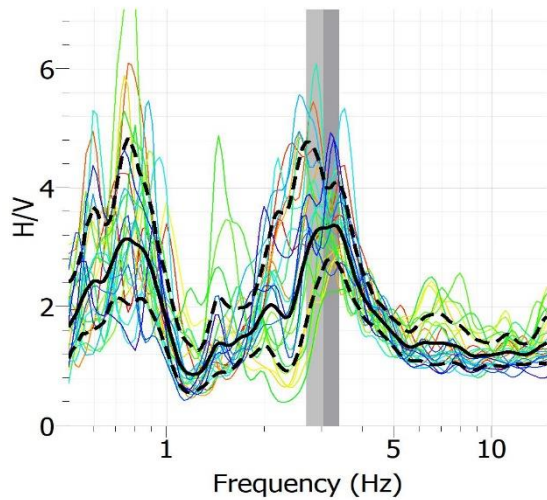
Combani ID 9DAE7D8
file 191120_1640_062.015



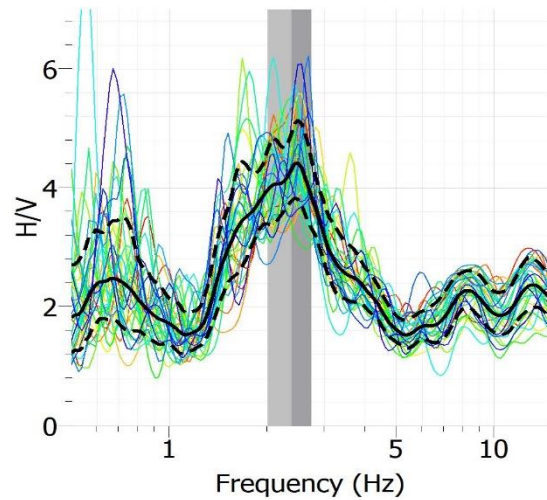
Combani ID 9DAE430
file 191120_1436_062.011

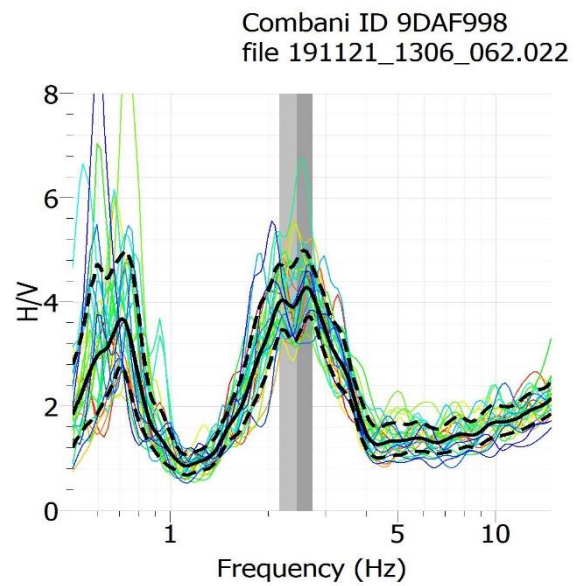
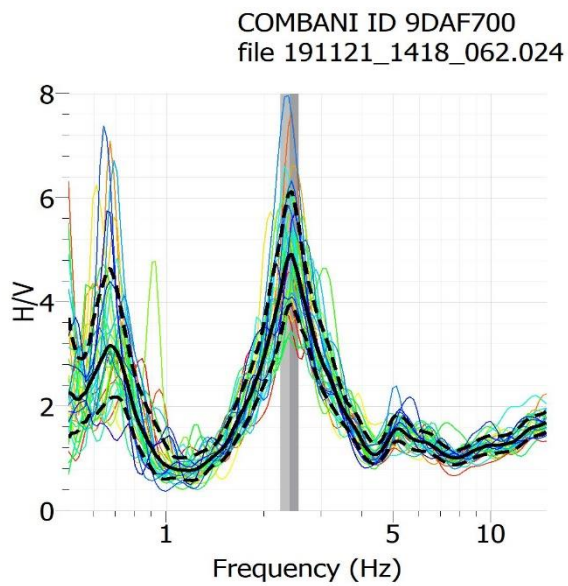
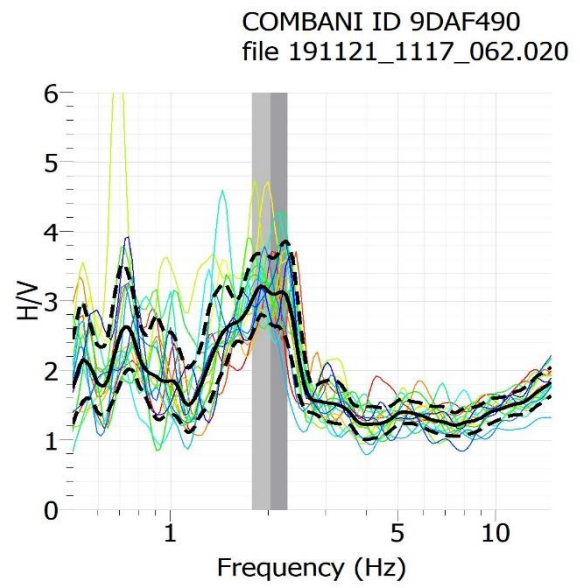
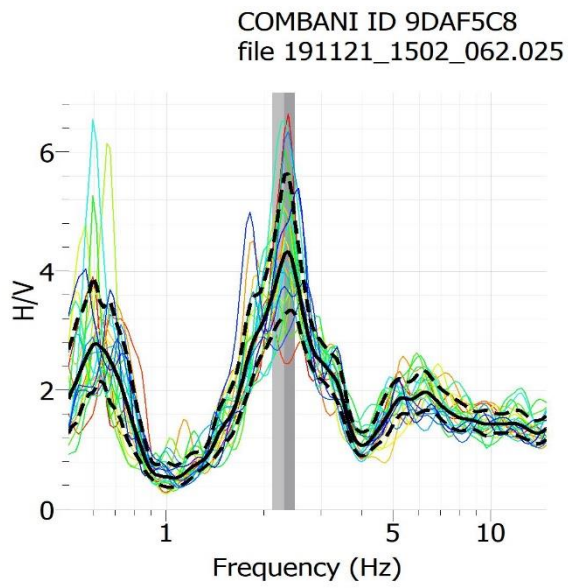


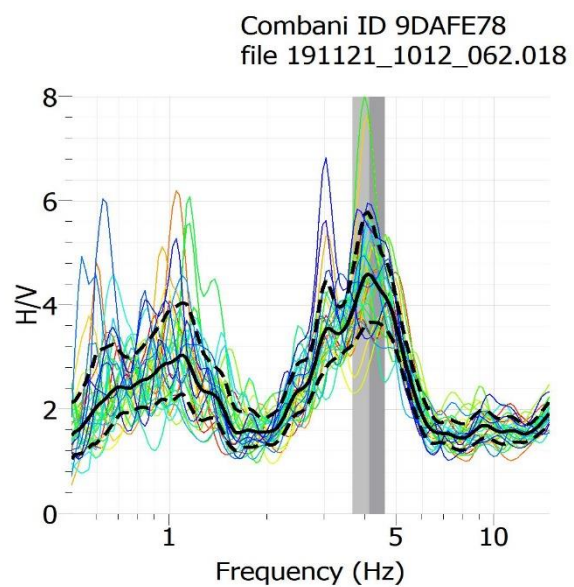
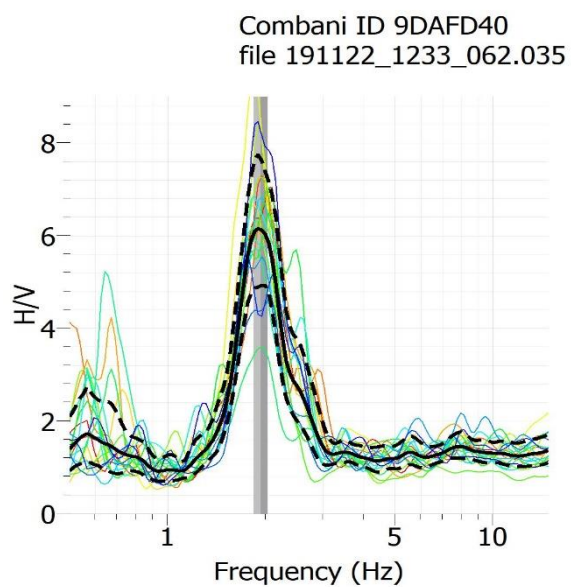
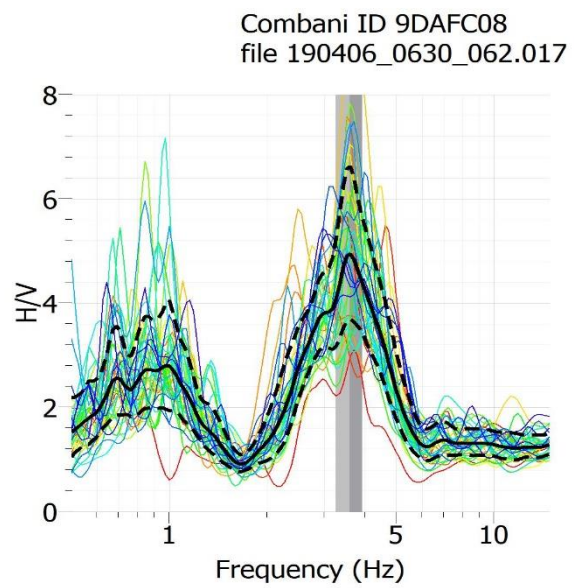
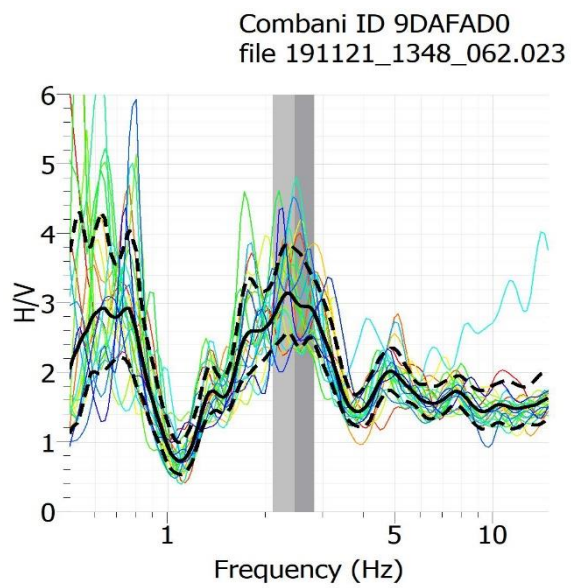
Combani ID 9DAE568
file 191120_1502_062.012



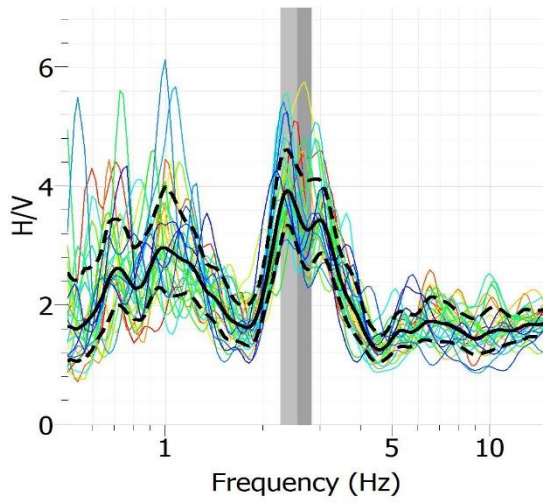
COMBANI ID 9DAE910
file 191121_1158_062.021



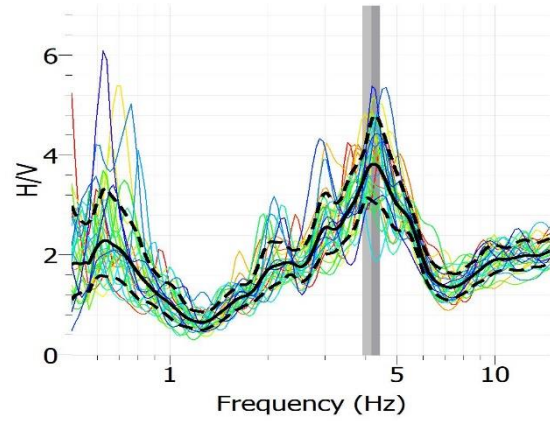




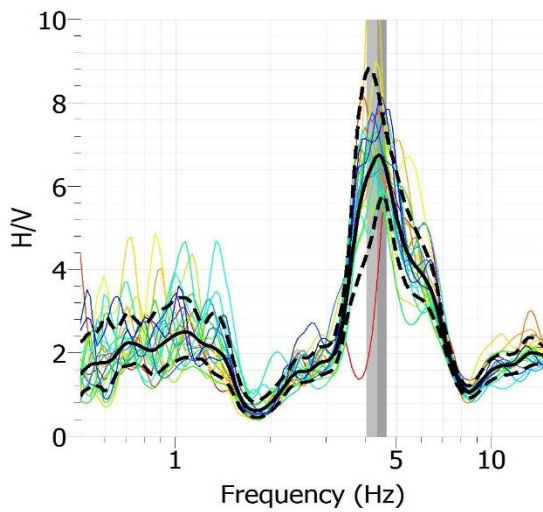
Combani ID 9DAFF80
file 191121_1040_062.019



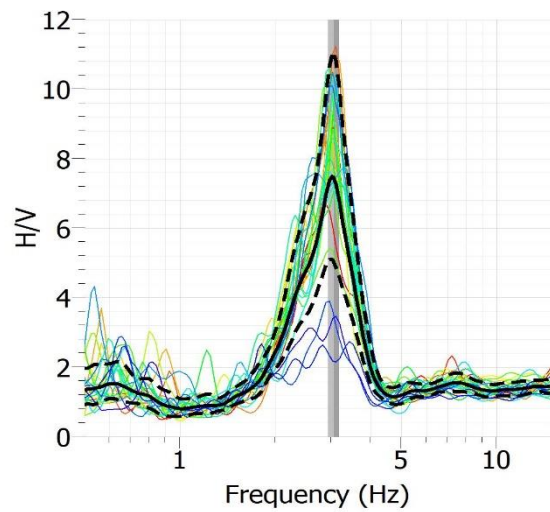
Combani ID 9DB1D20
file 191122_0938_062.031

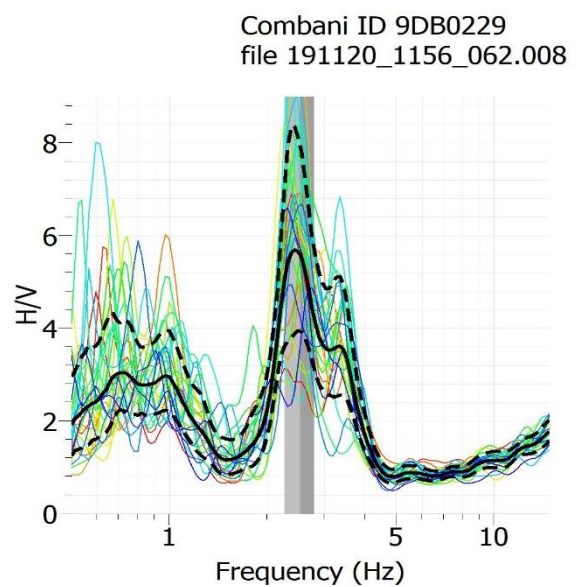
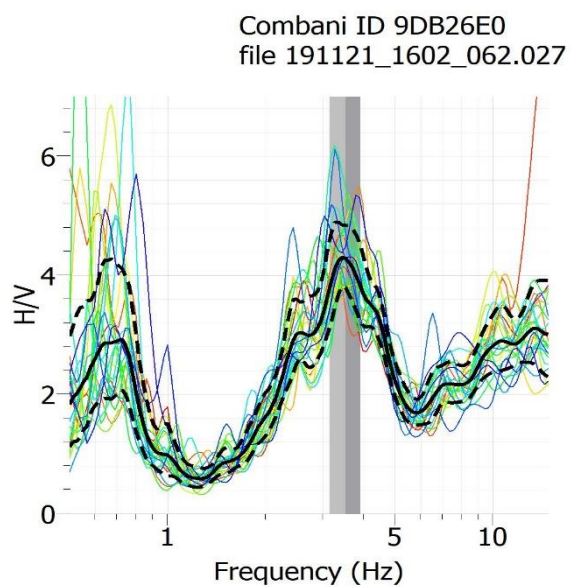
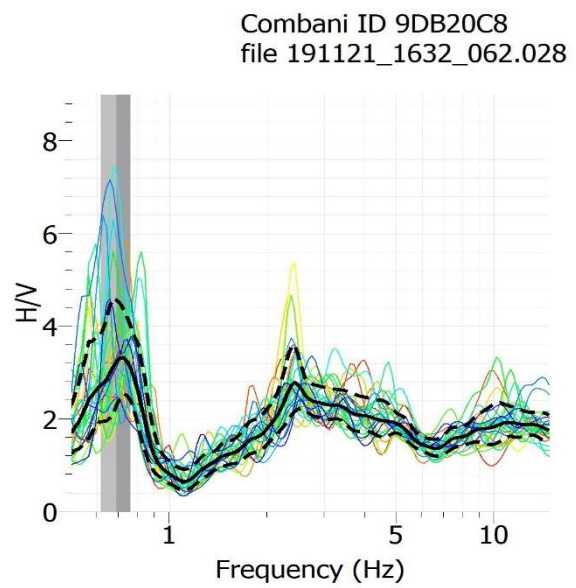
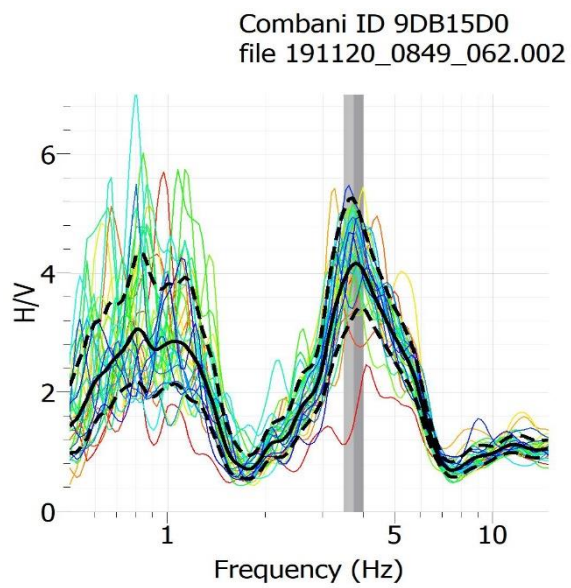


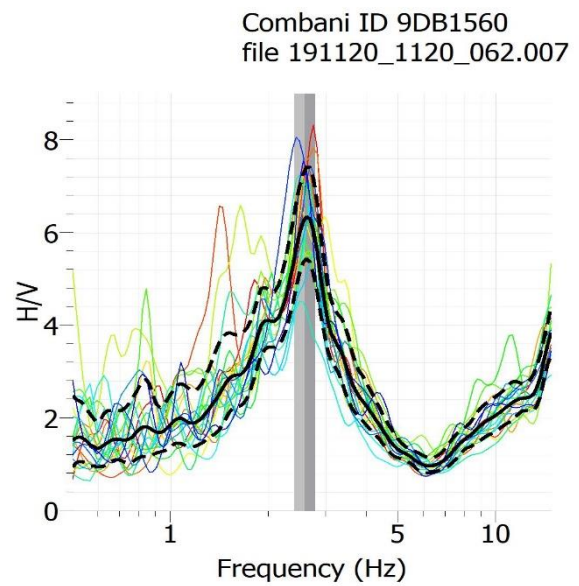
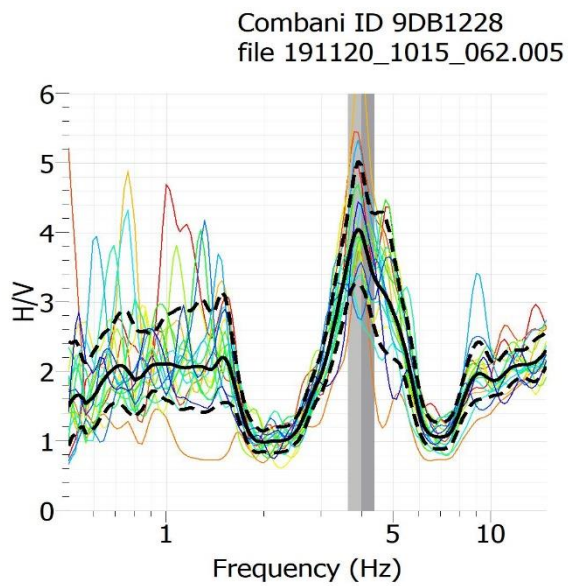
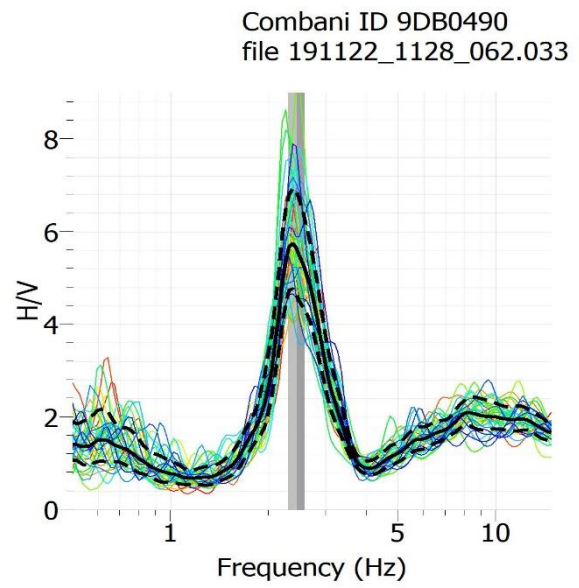
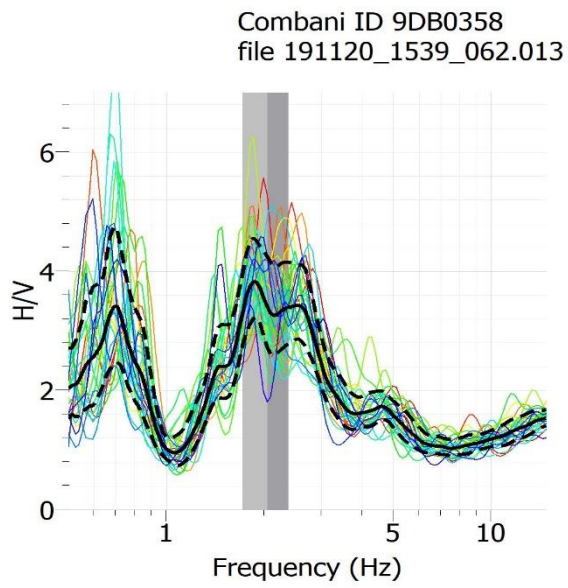
Combani ID 9DB1F90
file 191120_0917_062.003

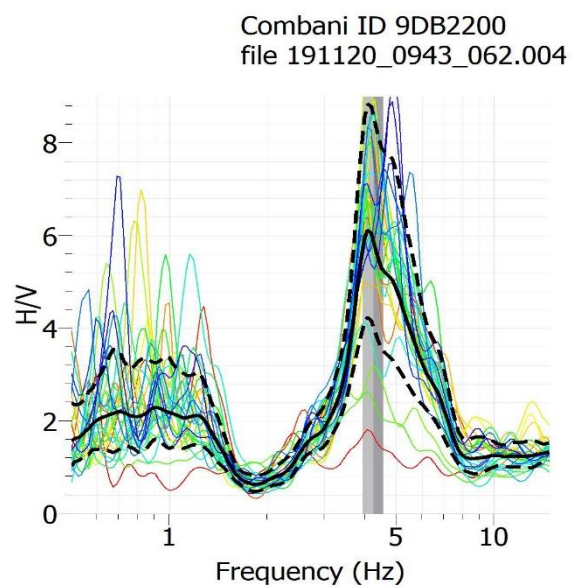
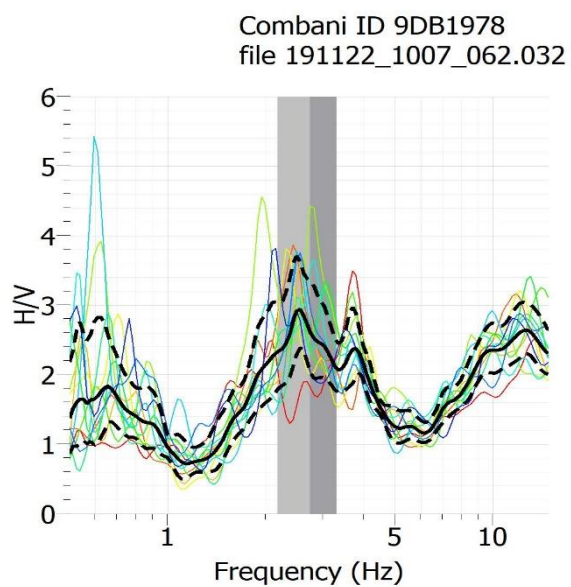
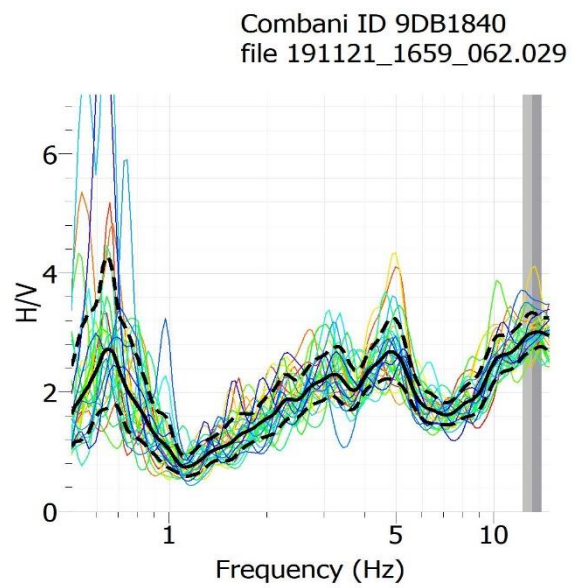
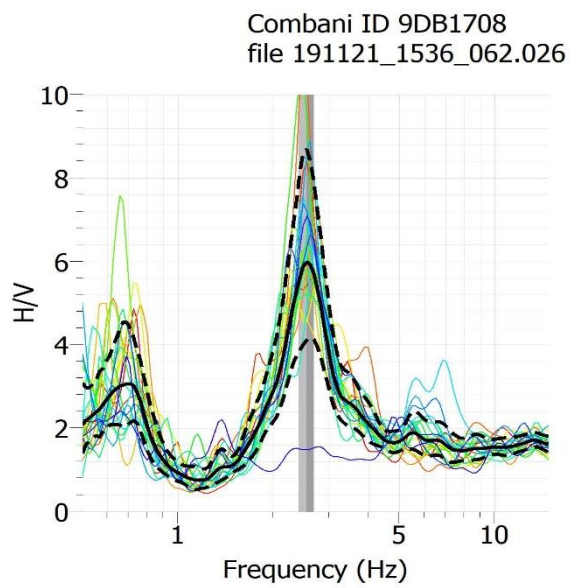


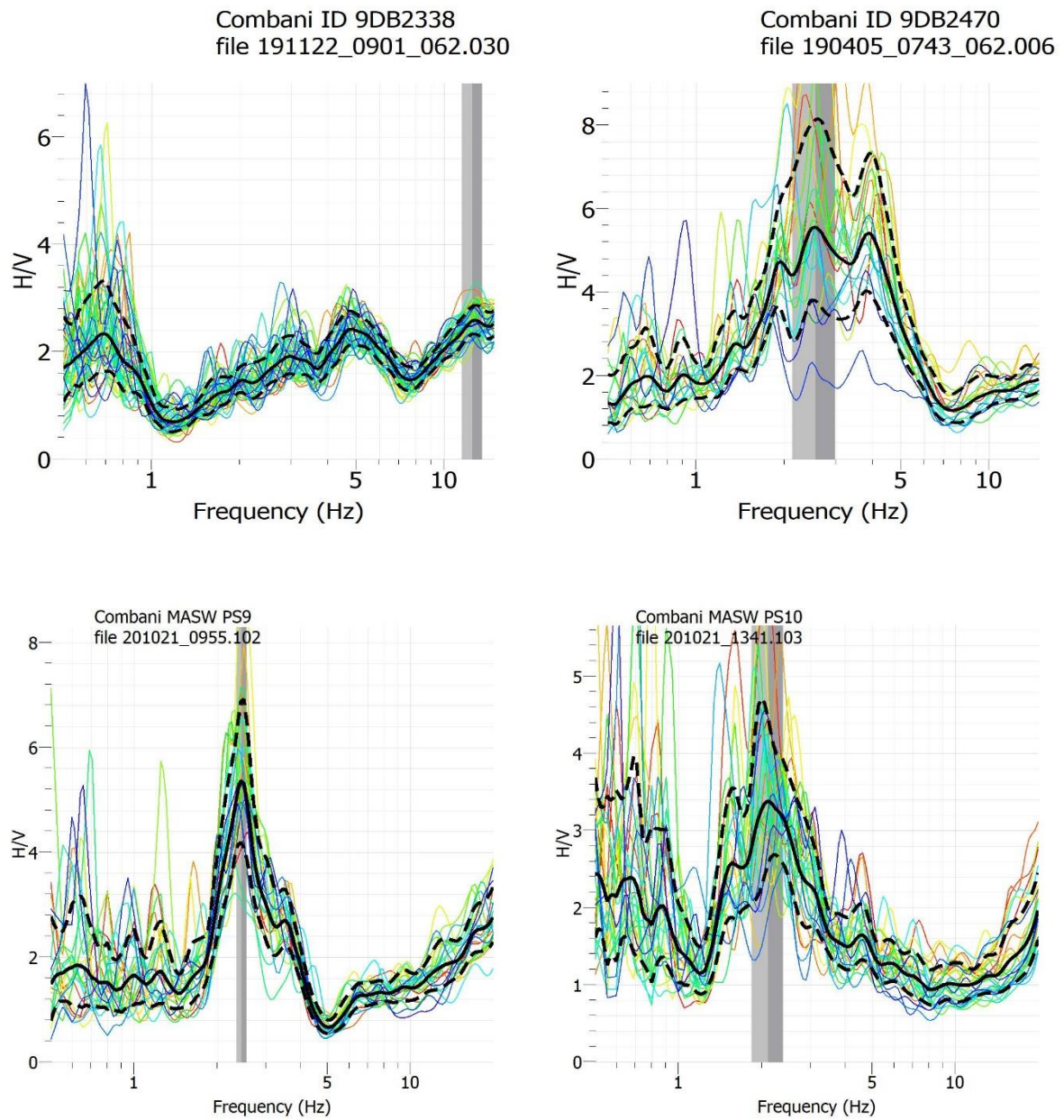
Combani ID 9DB05C8
file 191122_1207_062.034

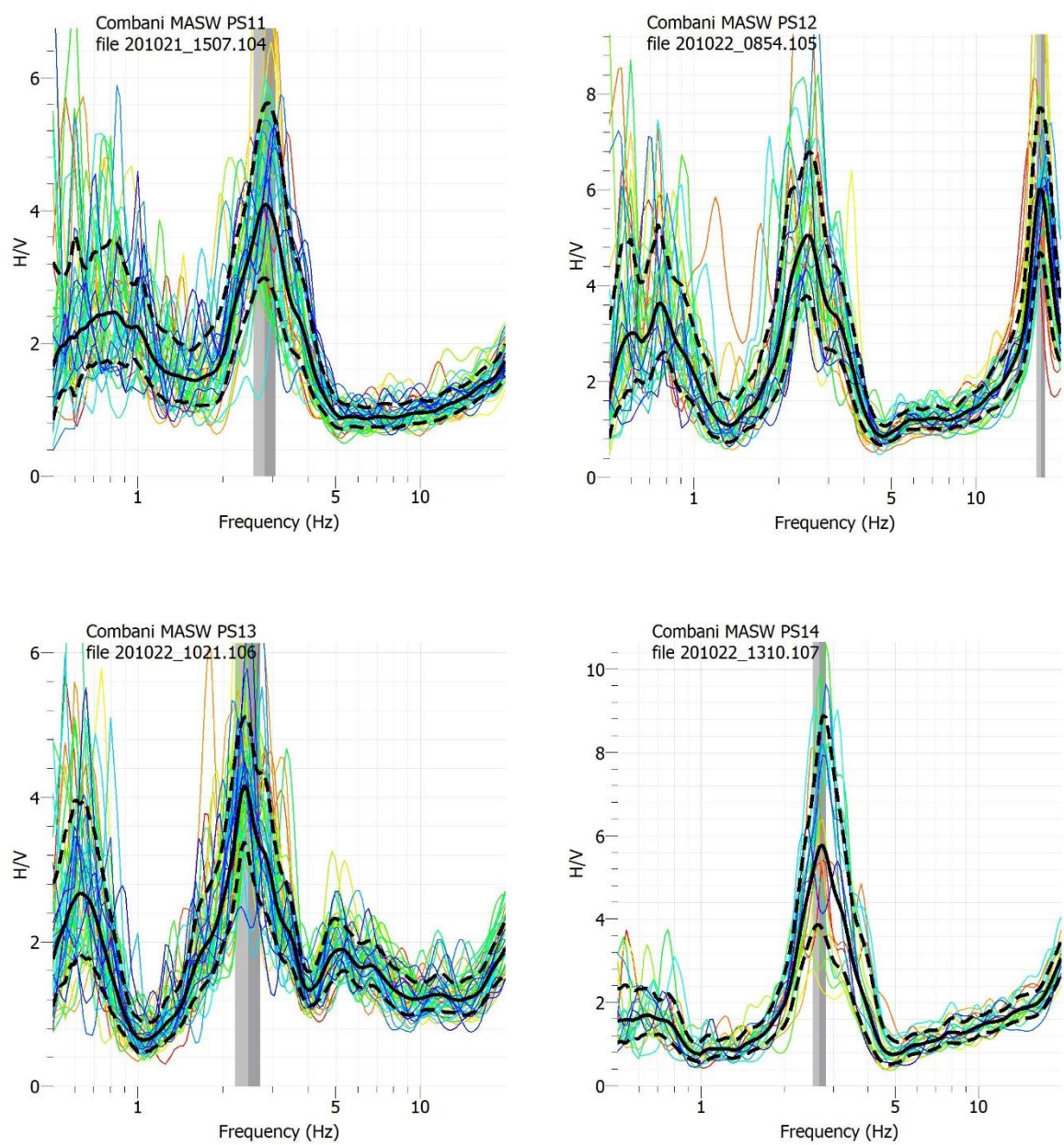






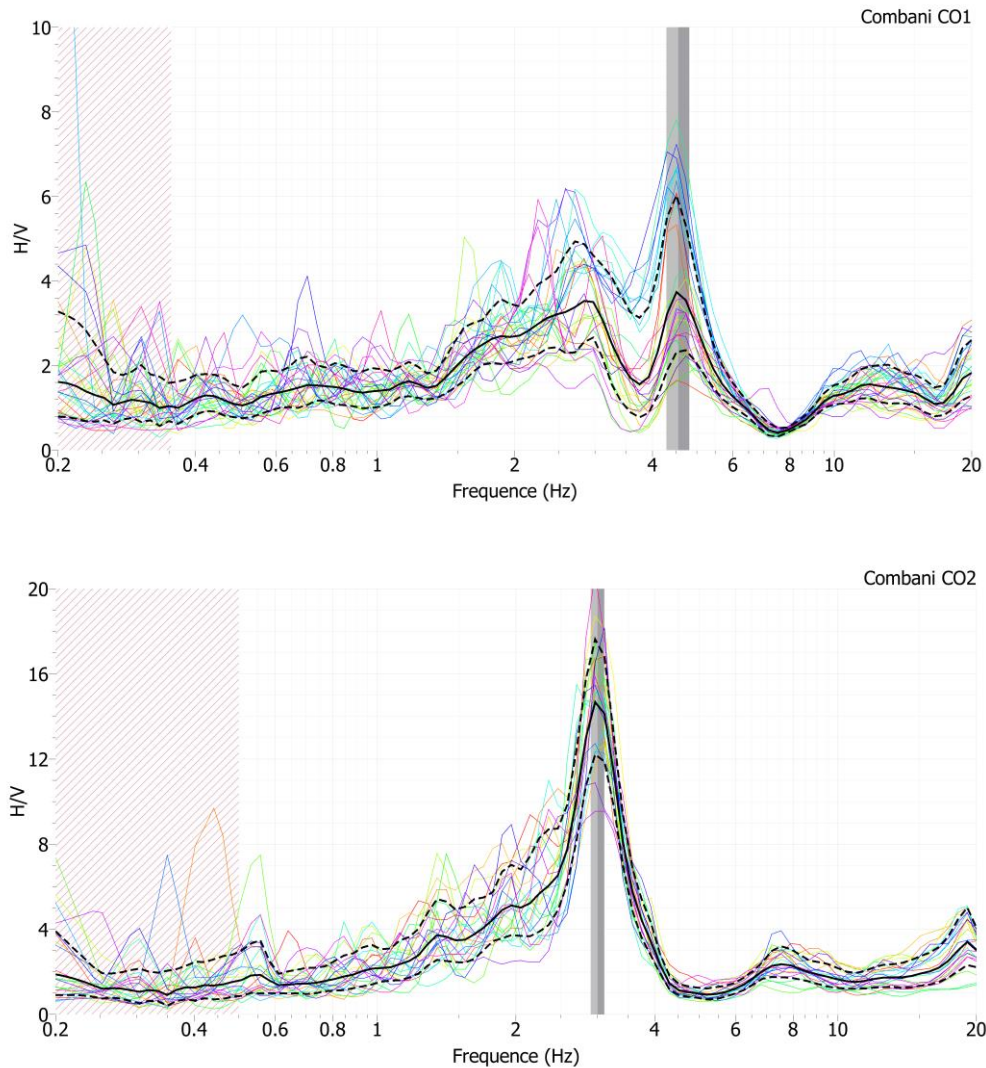


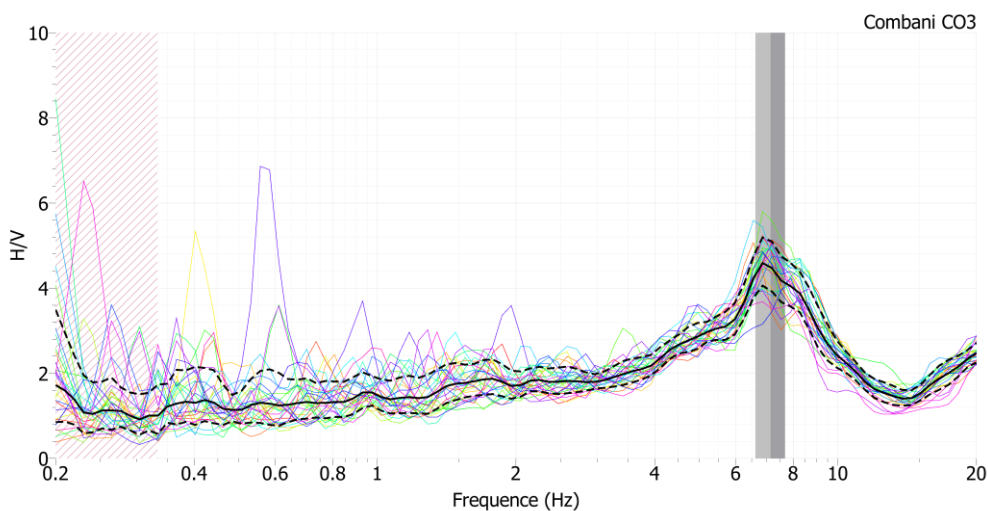




Retenue collinaire de Combani

La localisation des points de mesure est indiquée sur la Figure 67 (site pilote de Combani).

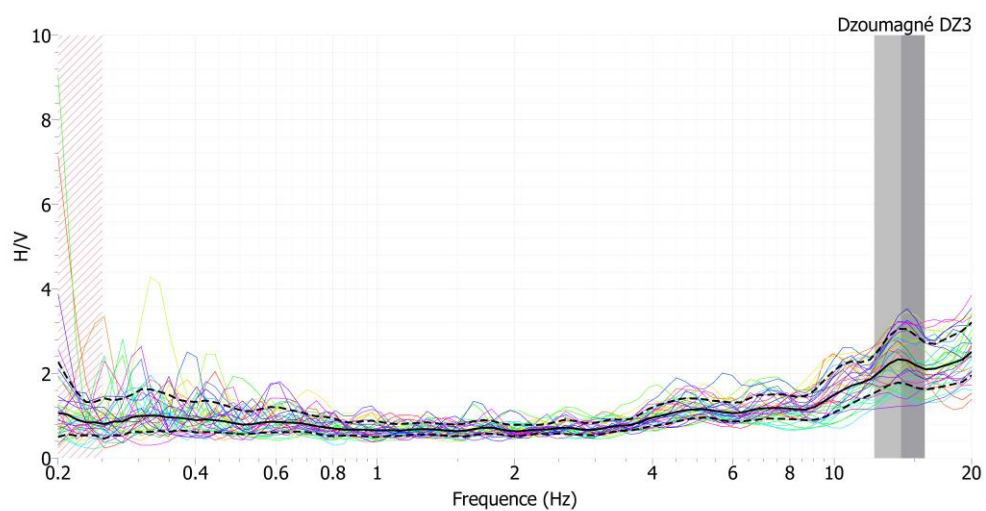
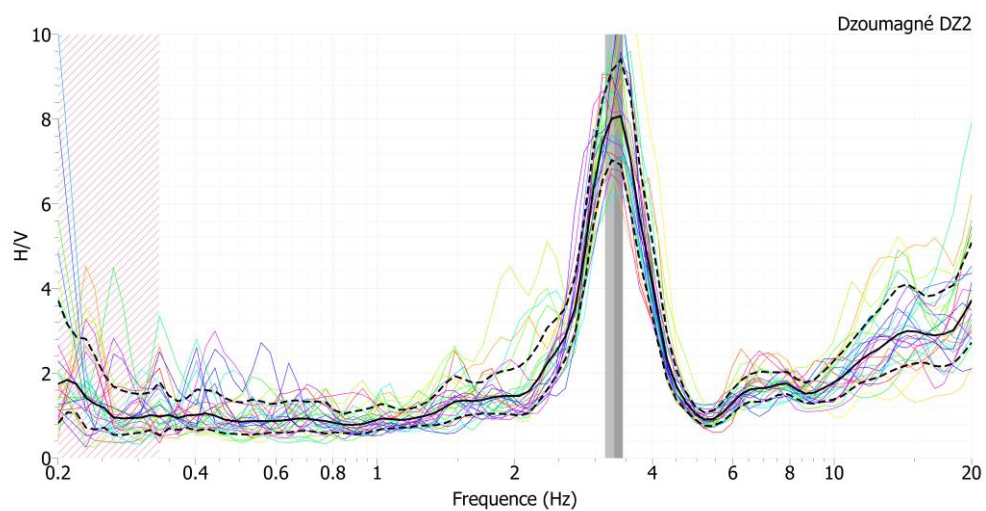
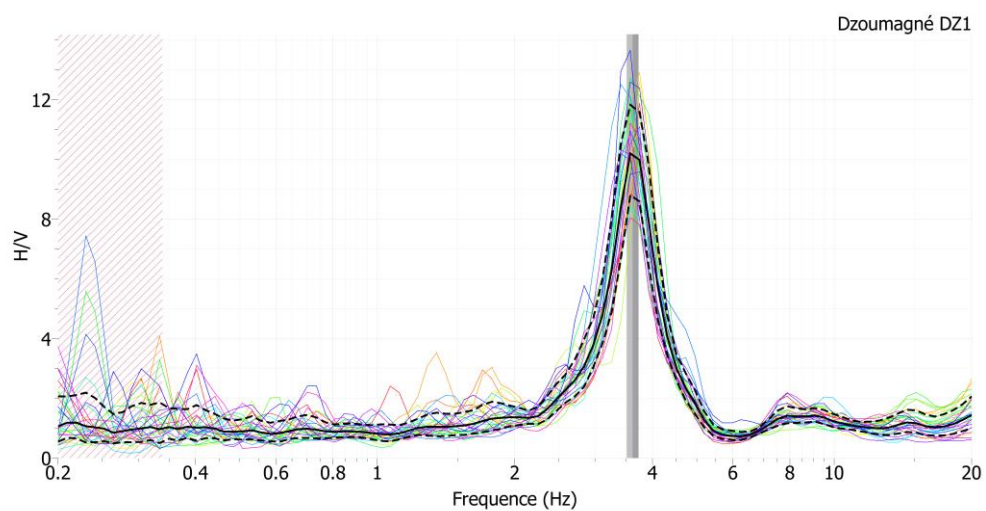


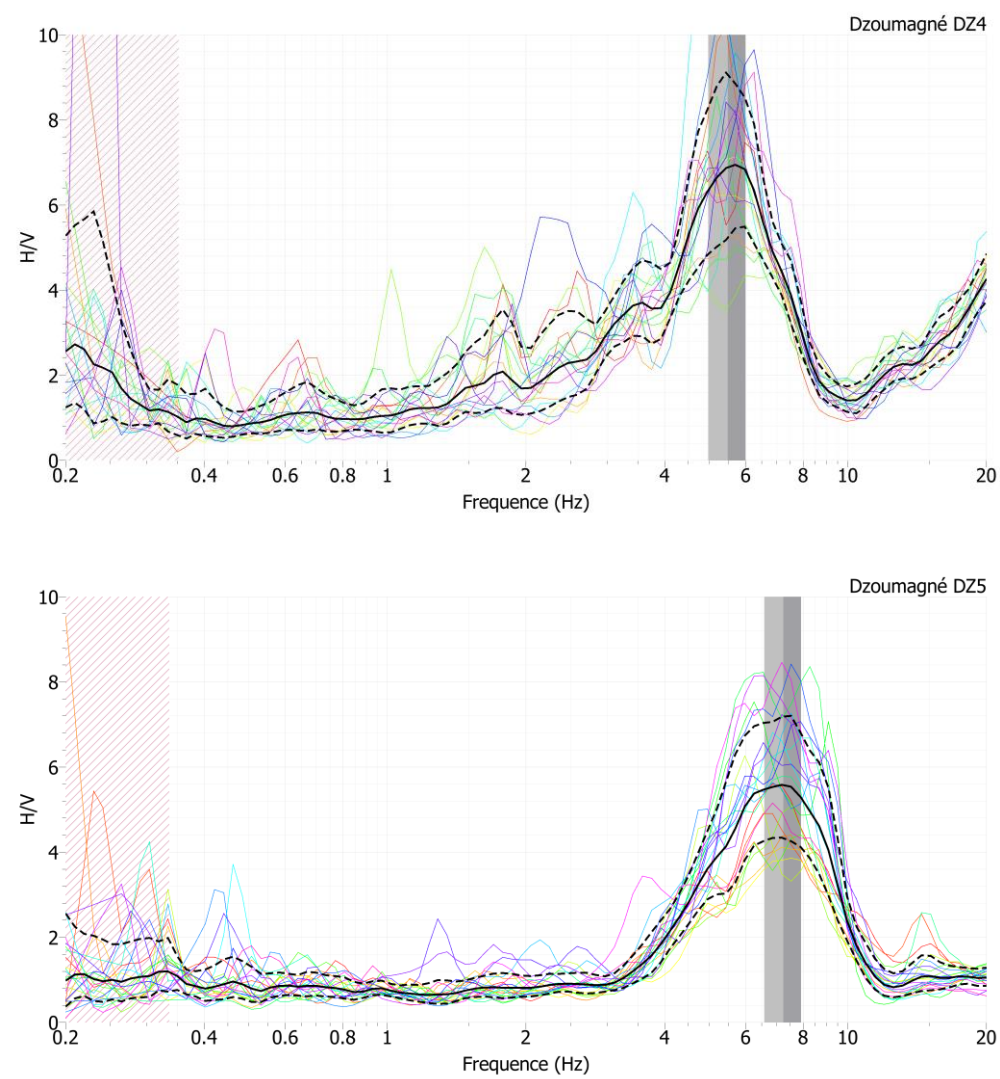


Retenue collinaire de Dzoumogné (hors sites pilotes)



Figure 68 : Localisation des mesures H/V et des profils MASW acquis en 2018 pour le compte du SIEAM près de la retenue collinaire de Dzoumogné.





Annexe 2

Mesures MASW réalisées dans le cadre du projet

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

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

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

Pour les profils n'atteignant pas les 30 mètres de profondeur, nous avons extrapolé la dernière valeur de V_s disponible jusqu'à 30 m de profondeur afin de pouvoir calculer le paramètre $V_{s,30}$. Ce choix peut induire une sous-évaluation du paramètre $V_{s,30}$ (Boore, 2004) et, par conséquent, une classe de sol EC8 plus pénalisante, notamment pour les profils peu résolus en profondeur. Dans notre cas, les profils de V_s étaient suffisamment résolus en profondeur (la plupart des profils descendent au-delà de 25 m de profondeur) pour éviter cet écueil. Nous avons néanmoins vérifié, pour chaque profil, que notre méthode d'extrapolation ne modifiait pas la classe de sol EC8 correspondante pour éviter de pénaliser le site.

L'ensemble des coordonnées des profils MASW réalisés dans le cadre de cette étude sont indiquées dans le tableau suivant (Tableau 8). Sont également rappelées les coordonnées des profils MASW acquis pour le compte du SIEAM en juin 2018 (Tableau 9).

Identifiant	X - Géophone 1	Y - Géophone 1	X - Géophone 24	Y - Géophone 24	Vs30	Tirs
Profil						Nom fichiers bruts *.dat
PS10	514888.6994	8587831.0511	514858.4302	8587769.7969	261	138 à 146
PS11	515160.8600	8587394.0000	515202.2789	8587502.0419	295	147 à 161
PS12	514570.1348	8586812.7508	514600.5474	8586922.7239	305	162 à 176
PS13	514034.5069	8586855.5038	513947.5818	8586782.1083	311	177 à 191
PS14	513776.6510	8588209.1450	513854.2664	8588290.6233	300	192 à 207
PS15	519155.4000	8579832.1000	519158.7902	8579888.5891	314	208 à 222
PS01	517241.6439	8591846.5009	517217.5404	8591908.9100	383	2 à 16
PS02	517221.4701	8591776.7264	517240.6584	8591843.6439	339	17 à 31
PS03	517253.3508	8591665.5277	517208.6188	8591716.3524	346	32 à 46
PS04	515618.0789	8591692.8588	515684.1394	8591707.6395	287	47 à 61
PS05	516577.1209	8591961.4867	516508.4576	8591967.2335	251	62 à 78
PS06	516720.8817	8591726.4987	516706.0798	8591770.0913	274	79 à 93
PS07	521071.9135	8579719.0679	521112.9846	8579730.6320	291	94 à 107
PS08	520311.4508	8579719.4529	520319.4161	8579775.6615	254	108 à 121
PS09	515807.0310	8588011.9463	515824.1554	8588119.4045	296	122 à 137

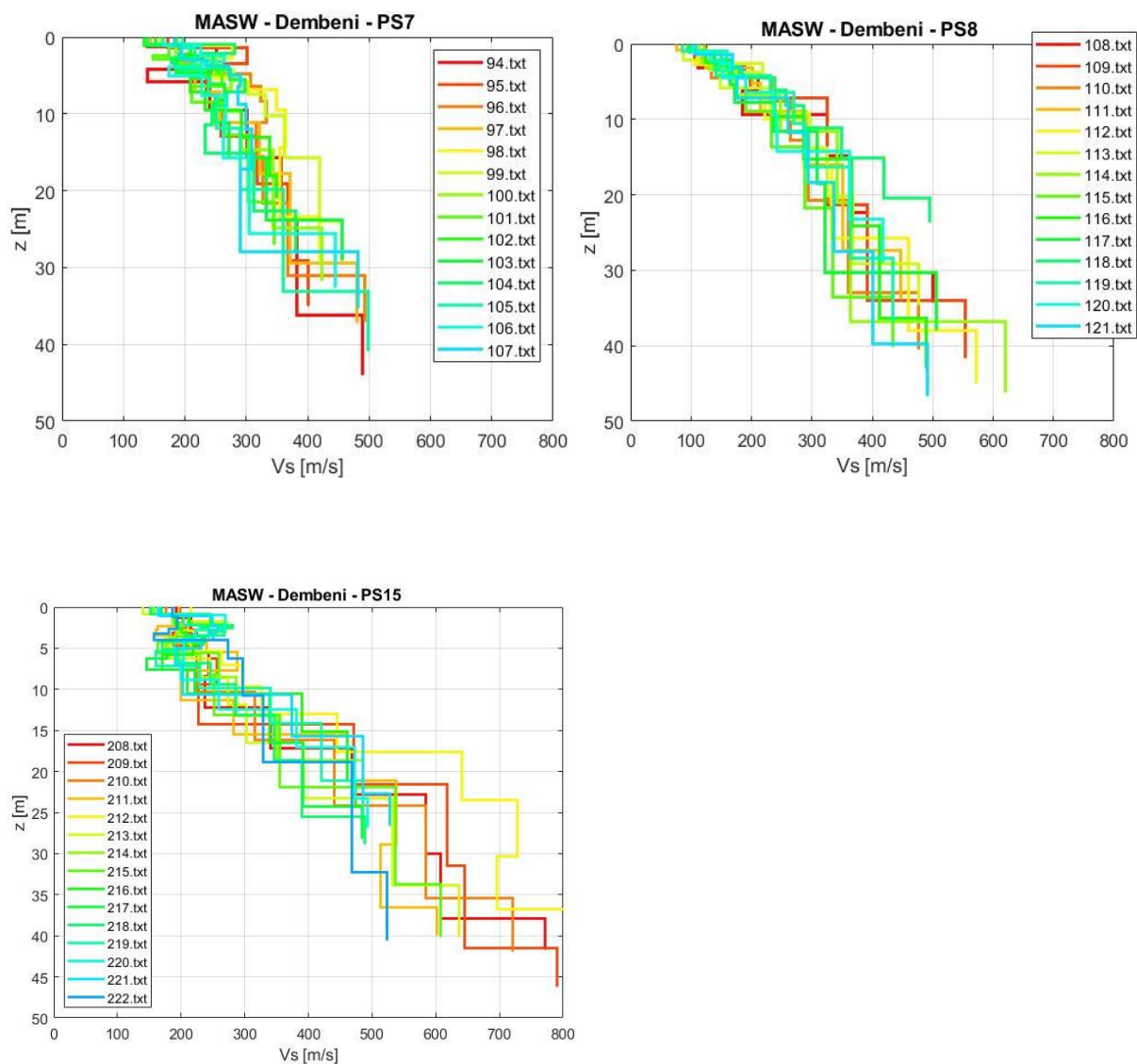
Tableau 8 : Coordonnées des profils MASW acquis dans le cadre du projet (sont indiqués les coordonnées des deux extrémités du profil correspondant aux géophones n°1 et n°24). Sont également indiqués le paramètre Vs,30 moyen par profil ainsi que les noms des fichiers de données bruts. Le système de projection utilisé est le système RGM04 préconisé par l'IGN pour le territoire mahorais (EPSG4471).

Identifiant	X – début profil	Y – début de profil	X – fin profil	Y – fin de profil	Vs30	Tirs
Profil						Nom fichiers bruts *.dat
COP1	515449.0536	8587373.9506	515433.8007	8587421.0592	434	101 à 103
DZP1	511505.6194	8594454.3533	511470.5593	8594418.5516	321	201 à 203
DZP2	511560.0768	8594359.9764	511539.8325	8594401.4979	421	301 à 303

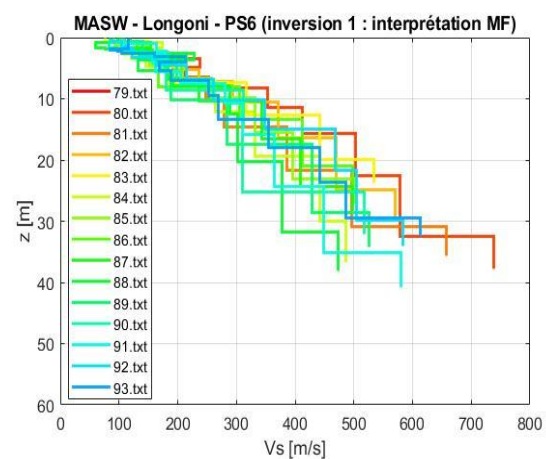
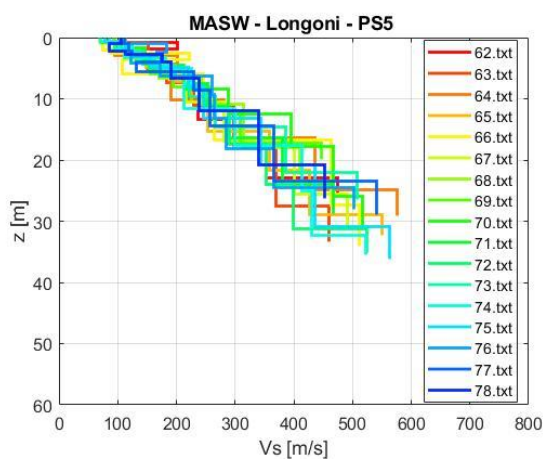
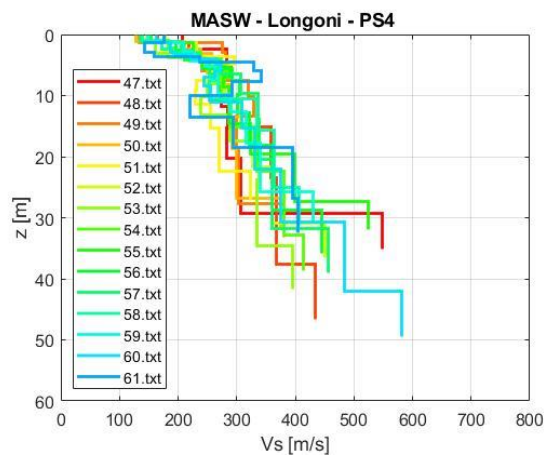
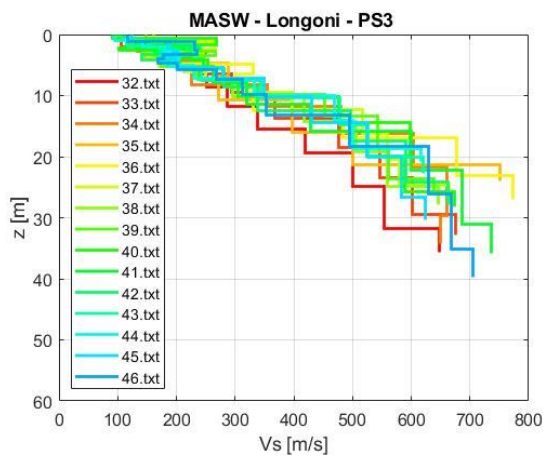
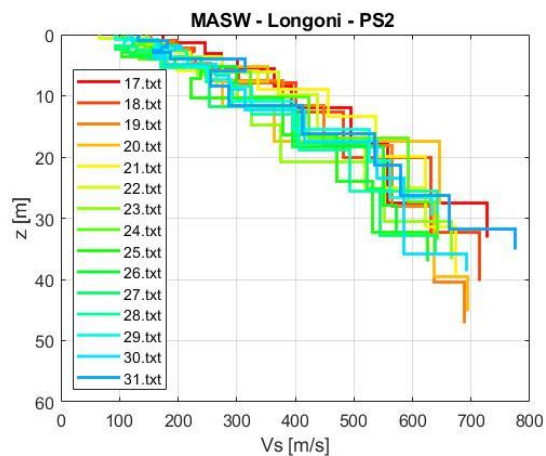
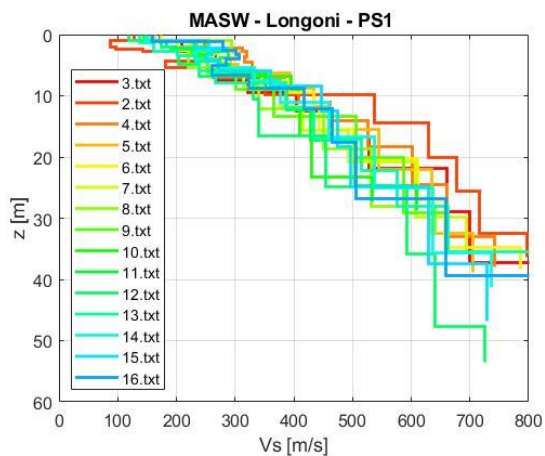
Tableau 9 : Coordonnées des profils MASW acquis pour le SIEAM sur les retenues collinaires de Combani et Dzoumogné en juin 2018. Sont également indiqués le paramètre Vs,30 moyen par profil ainsi que les noms des fichiers de données bruts. Le système de projection utilisé est le système RGM04 préconisé par l'IGN pour le territoire mahorais (EPSG4471).

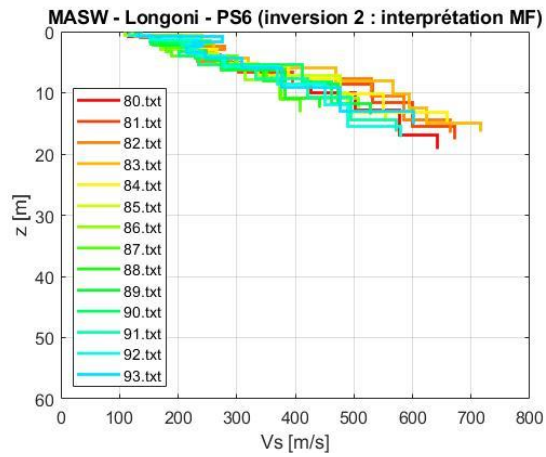
Les localisations des mesures MASW sont indiquées sur la Figure 65 pour le site de Dembeni, la Figure 66 pour le site de Longoni, la Figure 67 pour le site de Combani et la Figure 68 pour la retenue collinaire de Dzoumogné (hors site pilote du projet). Pour chacun des sites sont également représentés ci-dessous les rapports MASW obtenus pour chacun des profils réalisés.

Site de Dembeni

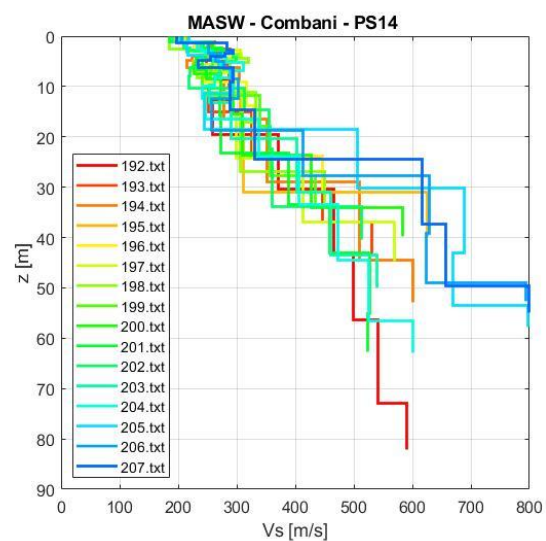
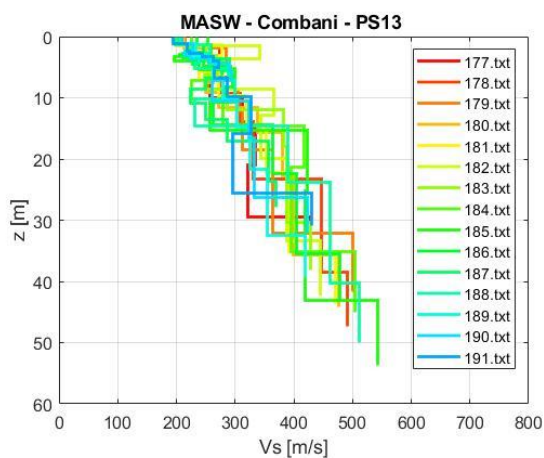
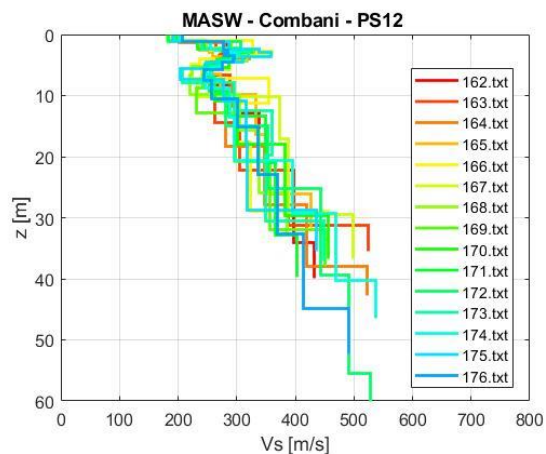
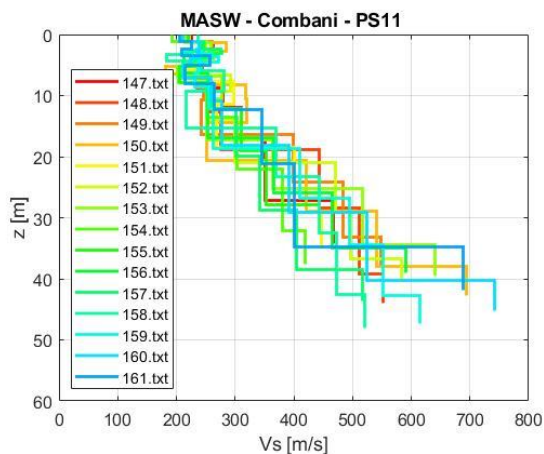
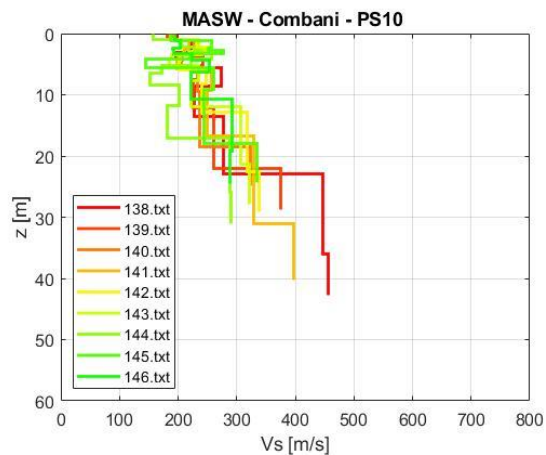
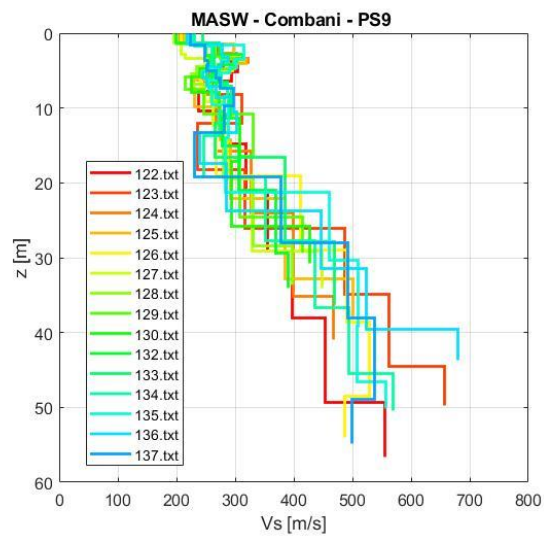


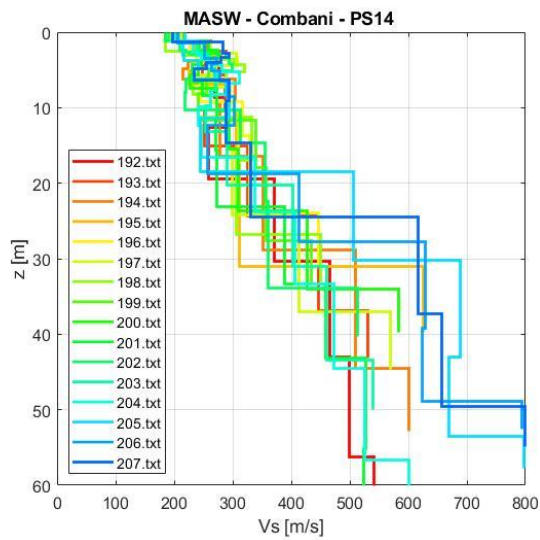
Site de Longoni



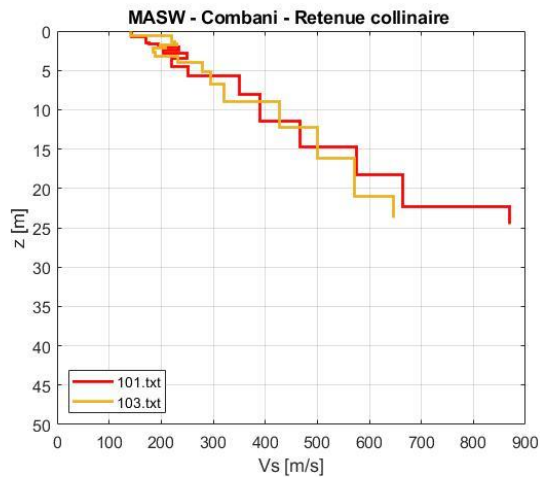


Site de Combani

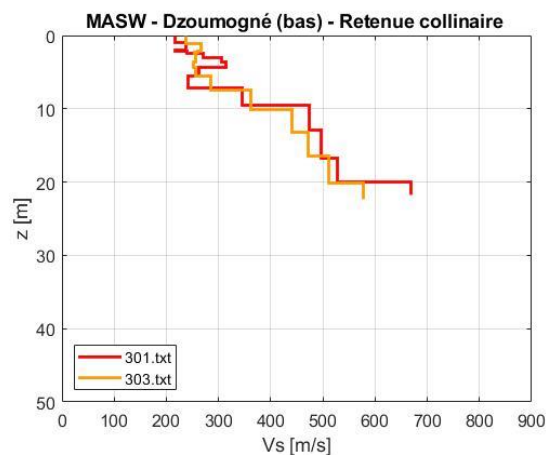
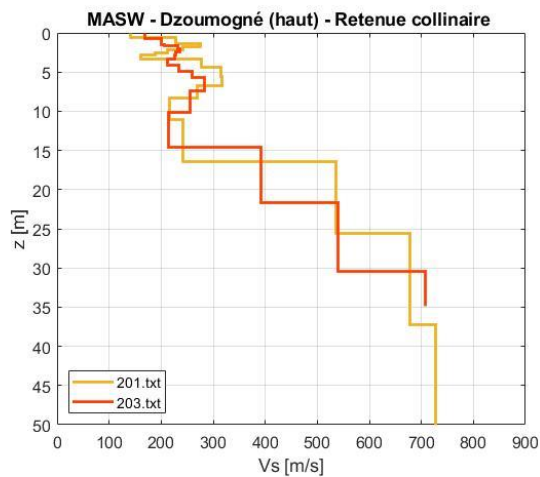




Retenue collinaire de Combani



Retenue collinaire de Dzoumogné



Annexe 3

Principe de calcul du coefficient topographique

Le principe du calcul du coefficient d'amplification topographique τ d'après les règles parasismiques PS92 est le suivant (AFNOR, 1995).

Si l'on considère une arête B délimitant un versant aval de pente l (tangente de l'angle de pente) et un versant amont de pente i (Figure 69), et si :

- $H \geq 10$ m (H étant la hauteur de l'arête au-dessus de la base du relief) ;
- $i \leq l/3$;

alors le coefficient τ prend la valeur :

- $\tau = 1$ pour $l-i \leq 0,40$;
- $\tau = 1+0,8(l-i-0,4)$ pour $0,40 \leq l-i \leq 0,90$;
- $\tau = 1,40$ pour $l-i \geq 0,90$.

l et i sont pris en valeur algébrique.

Sur le tronçon BC du versant amont défini par la longueur b de sa projection horizontale (exprimée en mètres) :

$$b = \text{minimum de } 20 \times l \text{ ou de } (H+4)/10$$

La valeur de τ fait l'objet d'un raccordement linéaire entre les valeurs 1 et le long des tronçons AB et CD de longueur :

- $A = AB = H/3$;
- $C = CD = H/4$.

Enfin, τ prend la valeur 1 à l'aval du point A et à l'amont du point D.

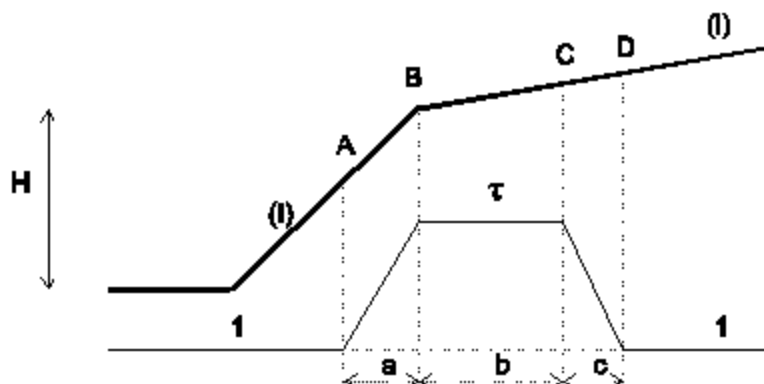
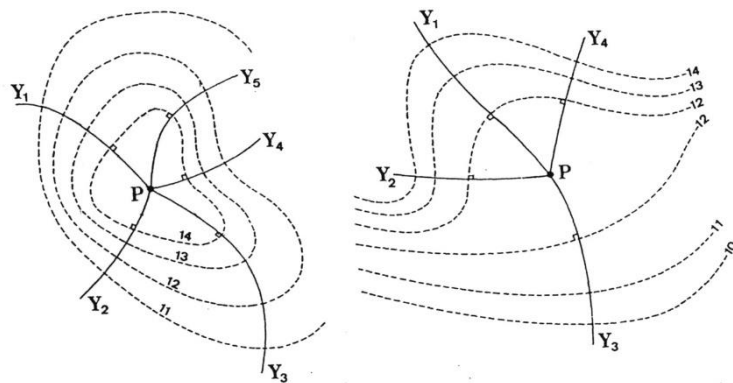


Figure 69 : Principe de calcul du coefficient τ pour l'évaluation des effets de site topographiques.

La détermination de H laisse une certaine part à l'appréciation. À titre indicatif, on peut considérer comme base du relief le point en dessous duquel la pente générale du site devient inférieure à 0,4.

La Figure 70 montre, pour un point de calcul, les différents profils sur lesquels il est possible de calculer le coefficient τ . On voit que selon le profil pris en compte, la valeur de τ va pouvoir varier sensiblement. C'est le profil le plus défavorable qui doit être utilisé pour le calcul.



Le profil à considérer est le plus défavorable des profils composites $Y_i P Y_j$.

Figure 70 : Choix des profils pour le calcul du coefficient τ .



Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 –

Direction régionale Mayotte

Imm. Jacaranda – Lot les 3 vallées

Les Hauts Vallons 363

97 646 – Mamoudzou CEDEX – Mayotte - France

Tél. : +269 (0)2 69 61 28 13

www.brgm.fr