

Document public

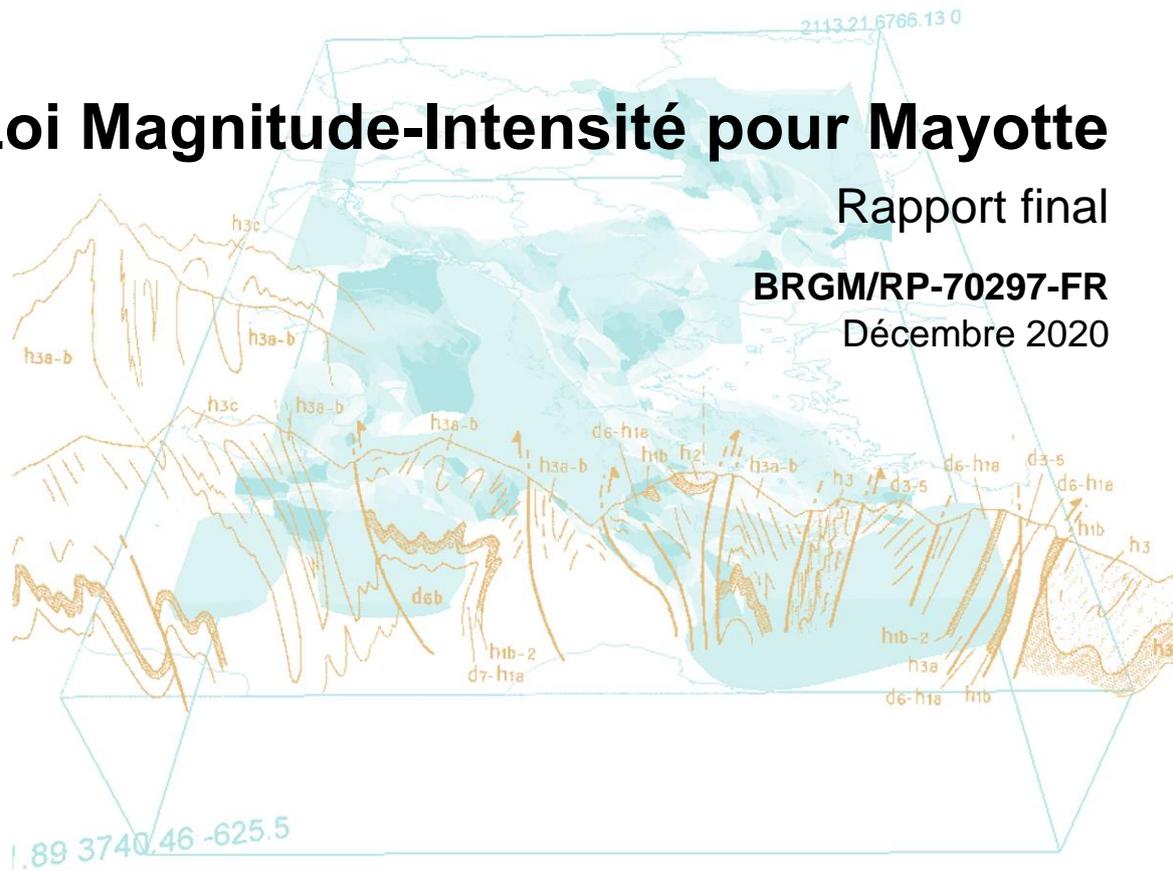


Loi Magnitude-Intensité pour Mayotte

Rapport final

BRGM/RP-70297-FR

Décembre 2020



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Loi Magnitude-Intensité pour Mayotte

Rapport final

BRGM/RP-70297-FR

Décembre 2020

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du
BRGM 2020 - Convention DGPR

D. Bertil

avec la collaboration de
R. Hoste-Colomer

Vérificateur :

Nom : Agathe Roullé

Fonction : Ingénieur

Date : 30/11/2020

Signature :



Approbateur :

Nom : N Taillefer

Fonction : Resp. d'Unité RSV

Date : 11/12/2020

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

Mots-clés : Séisme, Mouvement du sol, Relation empirique, Intensité, Mayotte.

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

Bertil D., Hoste-Colomer R. (2020) Loi Magnitude-Intensité pour Mayotte. Rapport final. Rapport BRGM/RP70297-FR, 52 p.,14 fig.,10 tab., 4 ann.

Synthèse

La crise sismo-volcanique de Mayotte a provoqué depuis Mai 2018 des milliers de séismes, dont plusieurs centaines sont susceptibles d'avoir été ressentis par la population de Mayotte.

Cette étude, faite dans le cadre du programme d'actions annuel avec la DGPR, exploite les données de mouvements forts de cette crise et de la sismicité régionale. L'objectif principal est d'obtenir un modèle empirique pour la prédiction rapide des intensités macrosismiques à Mayotte suivant une démarche similaire à la relation Bcube (Beauducel *et al.*, 2011) utilisée actuellement aux Antilles Françaises pour les communiqués de séisme ressenti des Observatoires volcanologiques.

Les données sont suffisamment nombreuses pour n'exploiter que celles des stations sismiques sans effet de site et définir une relation au rocher (8 739 valeurs de PGA utilisées). Elles restent cependant concentrées sur une gamme étroite de distance (distances épacentrales 25-60 km puis 230-270km) et de magnitude (Mw 3 à 5.8.).

Les valeurs de PGA (Peak Ground Acceleration) associées aux distances et magnitudes de séismes sont comparées à huit relations d'atténuations couramment utilisées dans des études d'aléa sismique régionales. Aucune de ces lois n'est compatible avec les observations sur l'ensemble de la gamme de magnitude et distance. La recherche de relations spécifiques calées sur les PGA observés est donc nécessaire. L'atténuation avec la distance est faible, plus proche de celle des relations en domaine superficiel stable que de celle des relations en domaine crustal actif.

La comparaison des PGA mesurés avec les listes de séismes ressentis données par le CSEM et le BCSF montrent qu'un seuil de PGA de 1 mg sur la station au rocher de YTMZ à Mayotte pourraient correspondre à un seuil de sismicité ressenti.

Quatre relations magnitude-intensité sont proposées selon que l'on considère les magnitudes de moment Mw ou locales Mlv et les distances hypocentrales ou épacentrales. Les relations calculées sont de type $\text{Log(PGA)} = a M + b R - \text{Log}(R) + c$ avec évaluation des incertitudes sur Log(PGA) . L'intensité est ensuite obtenue avec la conversion PGA/Intensité de Caprio *et al.* (2015). Deux cas sont envisagés : intensité moyenne pour des sites au rocher et intensité pour des sites susceptibles de produire des effets de site forts.

Ces relations peuvent donc être utilisées pour les communiqués du REVOSIMA en cas de séisme autour de Mayotte comme pour la loi b3 aux Antilles françaises.

L'utilisation pour d'autres usages comme des modélisations de type Shakemaps, SEISAID, simulations de dommages, doit tenir compte des limitations liées aux domaines de validité

Sommaire

1. Cadre de l'étude	11
1.1. CONTEXTE ET OBJECTIF	11
1.2. MÉTHODOLOGIE.....	12
2. Constitution d'un catalogue de sismicité avec accélérations PGA	13
2.1. CATALOGUE DE SÉISMES DE RÉFÉRENCE.....	13
2.2. EXTRACTION DES PGA	14
2.3. MAGNITUDES MLV – MLH – MW	18
2.3.1. Mlv-Mlh	18
2.3.2. Calages avec mb USGS ou Mw GCMT	18
3. Établissement d'une relation empirique $PGA = f(\text{distance, magnitude})$	21
3.1. COMPARAISON PGA AVEC UNE SÉLECTION DE GMPE	21
3.2. RELATION EMPIRIQUE	23
4. Sismicité ressentie pour la crise de Mayotte	27
4.1. INFORMATIONS BCSF	27
4.2. INFORMATIONS CSEM	27
4.3. INFORMATIONS PUBLIÉES PAR LE REVOSIMA	28
4.4. BILAN	29
5. Relation empirique Intensité =f (distance, magnitude)	31
5.1. CONVERSION PGA / INTENSITÉ.....	31
5.2. LOI INTENSITÉ/MAGNITUDE/DISTANCE POUR MAYOTTE	32
6. Bilan-Conclusions	35
7. Références bibliographiques	37

Liste des figures

Figure 1 : Épicentres des séismes du catalogue avec au moins une valeur de PGA sur YTMZ, MDZA, CAB, MOIN ou GGLO (cercles rouges). La plupart des séismes proviennent de la zone d'essaim (autour de 45.5°E ; les séismes régionaux se répartissent entre Grande Comore et Mohéli (vers 43.5°E), Anjouan (vers 44.5°E), vers les Jumelles et banc de Geysier (au nord-est de l'essaim), sur la ride de Davie (entre 40.5 et 42.5°E). Fond de carte d'après Michon (2016).	16
Figure 2 : Répartition des données de PGA (au rocher) en magnitude M_{lv} et distance hypocentrale.....	17
Figure 3 : Répartition des données de PGA (au rocher) en magnitude M_{lv} et distance épicentrale...	17
Figure 4 : Comparaisons M_{lv} – M_{lh}	18
Figure 5 : Comparaison M_{lh} / m_b USGS.....	19
Figure 6 : Comparaison des PGA pour $M_w=4.0$ avec les lois d'atténuations en distance à la rupture.....	22
Figure 7 : Comparaison des PGA pour $M_w=4.0$ avec les lois d'atténuations en distance Joyne & Boore.	22
Figure 8 : Comparaison entre la relation PGA/ M_{lv} /Rhyppo pour Mayotte et la relation PGA/ M_d /Rhyppo pour Bcube et les Antilles.	24
Figure 9 : Modèle de prédiction du PGA au rocher en fonction de la distance hypocentrale et de la magnitude de Moment M_w . Les traits verticaux noirs représentent la gamme de distance hypocentrale des séismes de la zone d'essaim par rapport à Mamoudzou (30 à 60 km).	25
Figure 10 : Modèle de prédiction du PGA au rocher en fonction de la distance hypocentrale et de la magnitude locale M_{lv} . Les traits verticaux noirs représentent la gamme de distance hypocentrale des séismes de la zone d'essaim par rapport à Mamoudzou (30 à 60 km). .	25
Figure 11 : Comparaison entre le PGA mesuré sur la station YTMZ (au rocher) et le nombre de témoignages associé au séisme sur le site du CSEM.....	28
Figure 12 : Magnitude M_{lv} en fonction de la distance hypocentrale par rapport à YTMZ (Mamoudzou) pour un PGA entre 1 et 2 mg	29
Figure 13 : Correspondance entre accélération PGA et intensité sur les communiqués actuels du REVOSIMA pour Mayotte.	31
Figure 14 : Correspondance entre accélération PGA et intensité avec la loi Caprio <i>et al.</i> (2015) utilisée par le BCSF en France métropolitaine.	31

Liste des tableaux

Tableau 1 : Modèle de vitesse régional pour les localisations.	13
Tableau 2 : Nombre de valeurs de PGA extraites pour chaque station, les colonnes les plus à droite indiquent la valeur de PGA maximale mesurée sur la station (en mg) et la date d'observation de cette valeur maximale.	15
Tableau 3 : Comptage des magnitudes supérieures à 5.0.	19
Tableau 4 : Relations d'atténuations sélectionnées, avec domaine tectonique d'application et type de distance utilisée.	21
Tableau 5 : Régression linéaire pour la relation $\text{Log(PGA)}=f(M, R)$ à Mayotte.	23
Tableau 6 : Régression linéaire pour la relation $\text{Log(PGA)}=f(M, R)$ aux Antilles selon Beauducel <i>et al.</i> (2010).	24
Tableau 7 : Coefficients A,B,C, D pour la relation Intensité/magnitude/distance pour des sites au rocher, les coefficients sont donnés pour des magnitudes M_{lv} ou M_w et des distances épacentrales ou hypocentrales.	32
Tableau 8 : Coefficients A,B,C, D pour la relation Intensité/magnitude/distance pour des sites à effets de site, les coefficients sont donnés pour des magnitudes M_{lv} ou M_w et des distances épacentrales ou hypocentrales.	33
Tableau 9 : Abaque Intensité/magnitude/distance pour magnitude M_w , distance hypocentrale et zone à fort effet de site.	34
Tableau 10 : Abaque Intensité/magnitude/distance pour magnitude M_w , distance hypocentrale et zone au rocher.	34

Liste des annexes

Annexe 1 : Comparaison des données accélérométriques avec les lois d'atténuation (GMPE) sélectionnées	39
Annexe 2 : Comparaison des données accélérométriques avec les relations $\text{Log(PGA)}=f(M,R)$	43
Annexe 3 : Abaques Intensité/magnitude/distance	47
Annexe 4 : PGA observés pour les séismes de magnitude $M_{lv} \geq 5.0$	51

1. Cadre de l'étude

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIF

La crise sismo-volcanique de Mayotte a provoqué depuis Mai 2018 plusieurs milliers de séismes, dont plus de 1 800 de magnitude ML supérieure ou égale à 3.5, plus de 570 de magnitude ML supérieure ou égale à 4.0 et 54 de magnitude ML supérieure ou égale à 5.0. Une grande partie de ces séismes a été ressentie par la population de Mayotte.

L'objectif principal de l'étude est d'obtenir un modèle empirique pour la prédiction rapide des intensités macrosismiques à Mayotte juste après l'occurrence d'un séisme. On suit pour ce faire une démarche similaire à la relation Bcube (Beauducel *et al.*, 2011) utilisée actuellement aux Antilles Françaises pour les communiqués de séisme ressenti des Observatoires volcanologiques. Un tel outil devrait permettre d'affiner les communiqués de séismes ressentis qui commencent à se mettre en place à Mayotte dans le cadre du REVOSIMA (REseau VOlcanologique et Sismologique de MAYotte).

Pour ces séismes, nous disposons d'enregistrements de signaux permettant de calculer l'accélération maximale du sol (PGA ou Peak Ground Acceleration) sur plusieurs stations sismologiques dont trois (YTMZ à Mamoudzou, MDZA à Dzaoudzi, MILA à Iloni) sont en fonction depuis le début de la crise. À partir d'avril 2019, le nombre de sites instrumentés avec des stations de type vélocimètres ou accéléromètres est passé à huit, ce qui a produit des données supplémentaires (MXHI à Chiconi, PMZI à Pamandzi, KNKL à Kani Keli, MTSB à M'tsamboro et R1EE2 à Coconi). Les stations du réseau de surveillance volcanique du Karthala en Grande Comore permettent d'avoir des données supplémentaires vers l'est et à plus grande distance (vers 250 km).

Ces données ne couvrent qu'une gamme étroite de couverture azimutale (pratiquement pas de données de séismes enregistrées à l'ouest, au nord, au sud de Mayotte), de distance hypocentrale (de 25 à 60 km et 230-270 km) et de magnitude (3.5 à 5.8). Les données sont insuffisantes pour en déduire une véritable relation d'atténuation spécifique à Mayotte.

On peut néanmoins analyser toutes ces données pour une application spécifique de cette crise sismo-volcanique et en déduire une relation empirique régionale simplifiée entre PGA, magnitude et distance hypocentrale. Le passage du PGA à l'intensité se fait à l'aide d'une relation de conversion classiquement employée dans tous les contextes sismotectoniques

Cette étude est faite dans le cadre du programme d'actions BRGM-DGPR 2020.

1.2. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie proposée comporte plusieurs étapes :

- un catalogue de sismicité de référence est constitué à partir des localisations effectuées par le BRGM sur la période 2018-2020 pour la zone de l'essaim et la sismicité régionale (chapitre 2.1) ;
- pour chaque séisme du catalogue, on extrait les accélérations PGA des signaux enregistrés pour des stations sans effet de site significatif, donc supposées au rocher (chapitre 2.2) ;
- les données Magnitude/distance/PGA obtenues sont alors comparées avec une sélection de relations d'atténuations existantes pour voir si une de ces relations pourraient convenir dans la gamme de distance et de magnitude des données observées (chapitre 3.1) ;
- on élabore des lois de type $\text{Log(PGA)} = a M + b R - \text{Log}(R) + c$ utilisant les données Magnitude/distance/PGA avec estimation des incertitudes sur log(PGA) (chapitre 3.2) ;
- on analyse les séismes ressentis connus pour essayer d'estimer une valeur seuil de PGA correspondant aux séismes ressentis à Mayotte (chapitre 4) ;
- on propose une loi de conversion PGA/Intensité à utiliser (chapitre 5.1) ;
- on estime un coefficient d'amplification permettant de prendre en compte les effets de site possibles localement (chapitre 5.2) ;
- des relations Intensité/magnitude/distance sont alors proposés, pour une magnitude locale M_{lv} ou de moment M_w , pour des distances hypocentrales ou épacentrales, avec ou sans effets de site (chapitre 5.2).

Les principales conclusions de l'étude sont résumées au chapitre 6.

2. Constitution d'un catalogue de sismicité avec accélérations PGA

2.1. CATALOGUE DE SÉISMES DE RÉFÉRENCE

La crise sismique a été suivie depuis mai 2018 par le BRGM. À partir de Juin 2019, le suivi de la crise est repris par l'IPGP-RENASS puis le REVOSIMA. Le BRGM continue néanmoins un suivi de la sismicité régionale et des séismes de magnitudes M_{lv} 3.0 à 3.5 dans la zone de crise.

Pour le début de la crise de mai 2018 à mai 2019, un premier catalogue de sismicité a été constitué (Bertil *et al.*, 2019a). Il utilisait le module de localisation LOCSAT du logiciel Seiscomp et un modèle de vitesse IASP91-modifié peu adapté au contexte, avec des profondeurs fixées à 10 km.

Le catalogue mai 2018-mai 2019 a été entièrement revu pour l'article Lemoine *et al.* (2020), utilisant l'outil de localisation 1D Hypo71 et un modèle de vitesse mieux adapté au contexte régional (Tableau 1).

Profondeur de la base de la couche (km)	Vitesse V_p (km/s)
3	3.5
8	5.1
15	6.7
	8.1
VP/VS	1.74

Tableau 1 : Modèle de vitesse régional pour les localisations.

Ce modèle a pu être calé avec les localisations effectuées avec le réseau mis en place à partir de mars 2019 par l'IPGP/RENASS à Mayotte. Il a ainsi pu être vérifié qu'il n'y avait pas de variations significatives d'hypocentre et de magnitude entre les localisations BRGM et celles du catalogue REVOSIMA. Ces localisations sont accessibles en supplément de l'article Lemoine *et al.* (2020).

Nous utilisons ce modèle de vitesse car c'est le seul qui permet d'avoir un catalogue de sismicité homogène depuis le début de la crise jusqu'à présent utilisant des données régionales (des phases S jusqu'à 1 000 km de distance et des phases P jusqu'à 1 300 km). Son domaine de validité est pour les séismes de magnitude qui ont des données à plusieurs centaines de km de distances (Comores, Glorieuses, Madagascar) de magnitude au moins 3. Une thèse en cours (Thèse de Nicolas Mercury, collaboration BRGM/IPGS-CNRS avec financements BRGM et DGPR) a permis un repointé systématique de toutes les données de la période 10 mai 2018 - 1^{er} septembre 2018 (Mercury *et al.*, 2020) avec 1 187 séismes localisés sur cette période au lieu de 295 pour le catalogue Lemoine *et al.*, (2020).

Le catalogue utilisé est donc une compilation utilisant les travaux de Mercury *et al.* (2020), de Lemoine *et al.* (2020) et a été complété pour la période 15 mai 2019 à juin 2020, avec les localisations faites par le BRGM avec le même modèle de vitesse.

À cela nous rajoutons aussi la sismicité régionale détectée sur la période 2018-2020 entre 10°S et 21°S et entre 39°E et 51°N et localisée avec le même modèle de vitesse.

Le catalogue comporte plusieurs magnitudes :

- la magnitude locale M_{lv} calculée sur la composante verticale ;
- la magnitude locale M_{lh} calculée sur les composantes horizontales ;
- la magnitude d'onde de volume m_b provenant des localisations de l'USGS lorsque celle-ci est disponible ;
- la magnitude de moment M_w provenant de GCMT.

Au final, le catalogue utilisé couvre la période 1^{er} avril 2018 au 30 juin 2020. Il contient 4 919 séismes localisés dont 4 712 dans la zone de crise pour des magnitudes M_{lv} entre 1.3 et 6.0 et 207 séismes régionaux.

2.2. EXTRACTION DES PGA

Les calculs de mouvements forts (PGA, PGV) sont effectués avec le module `scwfparam` de Seiscomp. En cohérence avec l'approche Bcube utilisée par les observatoires, seuls les PGA sont utilisés ici, calculés à partir de la valeur maximale sur une des composantes horizontales.

`Scwfparam` est déclenché automatiquement à chaque localisation automatique ou manuelle de séisme. Les données de mouvement fort sont stockés dans des fichiers XML dans un format compatible aux données d'entrées des shakemaps. Les fichiers correspondant à des séismes de magnitude inférieure à 4 et de plus de 200 jours ne sont pas conservés. L'ensemble des données de 2018 a pu être récupéré à partir de travaux de relocalisations actuellement en cours dans le cadre de la thèse de N. Mercury. Toutes les données de Juillet 2019 à juin 2020 étaient disponibles mais nous n'avons pu récupérer que les données de magnitude supérieure à 4.0 du 1^{er} trimestre 2019.

Un outil d'extraction spécifique a été développé pour lire les fichiers XML stockés et récupérer les données de PGA par station et par composantes. Le Tableau 2 donne les statistiques de ce qui a pu être extrait. Au total, 18 597 valeurs de PGA ont été récupérées pour 15 stations sismiques.

code	Nombre	PGA max (mg)	date PGA Max
YTMZ	3879	53.95	15/05/2018
MDZA	717	46.56	15/05/2018
MILA	1866	180.9	15/05/2018
MCHI	1879	22.36	27/01/2018
MTSB	438	78.8	28/03/2019
PMZI	413	55.5	28/03/2019
KNKL	487	36.9	21/03/2020
R1EE2	395	22.94	02/01/2020
ROCC5	231	19.03	21/03/2020
CAB	3179	12.86	08/10/2019
MOIN	892	2.97	30/05/2018
SBC	2729	34.54	21/03/2020
DEMB	450	15.47	21/08/2018
GGLO	72	0.33	21/03/2020
SBV	970	0.6	20/05/2018
PGA extraits	18597		
valeurs au rocher	8739		

Tableau 2 : Nombre de valeurs de PGA extraites pour chaque station, les colonnes les plus à droite indiquent la valeur de PGA maximale mesurée sur la station (en mg) et la date d'observation de cette valeur maximale.

Les valeurs maximales de PGA restent faibles (inférieures à 100 mg, sauf une valeur supérieure sur MILA). On n'a pas de données de séismes forts (magnitudes 5 et plus) à courte distance (moins de 30 km). **Le domaine de validité des lois ne couvre donc pas les séismes forts à courte distance.** Il couvre toute la gamme de distances et de magnitudes observées durant la crise de 2018-2020.

Pour cette étude, nous n'avons utilisé que les valeurs de PGA de **stations supposées au rocher** et pour des **distances inférieures à 400 km**. À Mayotte, on se limite donc aux données des stations YTMZ et MDZA, aux Comores des stations CAB et MOIN et aux Glorieuses GGLO.

Les stations CAB et MOIN sont supposées au rocher. CAB étant proche du sommet du Karthala, on est sûr de la roche volcanique récente peu altérée et on suppose une absence d'effet topographique. MOIN donne des valeurs du même ordre de grandeur que CAB. SBC a été éliminé car les valeurs de PGA sont systématiquement plus de trois fois supérieures à CAB. La station GGLO aux Glorieuses est sur une plateforme corallienne avec une couche de sable d'épaisseur indéterminée, mais sans alluvions ou colluvions. On la suppose sans effet de site. Les données de SBV au nord de Madagascar sont à plus de 450 km et n'ont pas été prises en compte.

Les données de CAB, MOIN et GGLO sont utilisées, d'une part, pour disposer de données régionales à courtes distance de ces stations, mais surtout pour caler l'atténuation avec la distance jusqu'à 250-300 km. GGLO, station installée tardivement et n'étant pas en enregistrement continu dispose de beaucoup moins de données que les autres stations.

Il n'a pas été possible de vérifier manuellement tous les calculs de PGA. Il s'agit de calculs automatiques recherchant des valeurs maximales sur une fenêtre de temps fixée. S'agissant d'un essaim sismique, il peut y avoir plusieurs séismes dans la même minute et notamment sur la période mai 2018 - aout 2018 où l'on observe la période d'activité la plus forte. Dans ce cas, le PGA n'est parfois pas associé au bon séisme. Certaines valeurs aberrantes ont été éliminées, mais il peut rester une dispersion dans les couples (PGA, Magnitude) liés à de mauvaises associations pour ces séismes rapprochés.

Les séismes avec au moins un PGA sur une des cinq stations sélectionnées sont représentés sur la Figure 1. (3 962 séismes de la zone de crise de Mayotte et 105 séismes régionaux.). On a moins de séismes que dans le catalogue, ceux manquants sont soit des petits séismes sans données sur les stations sélectionnées (notamment du premier semestre 2019) soit des séismes régionaux trop éloignés.

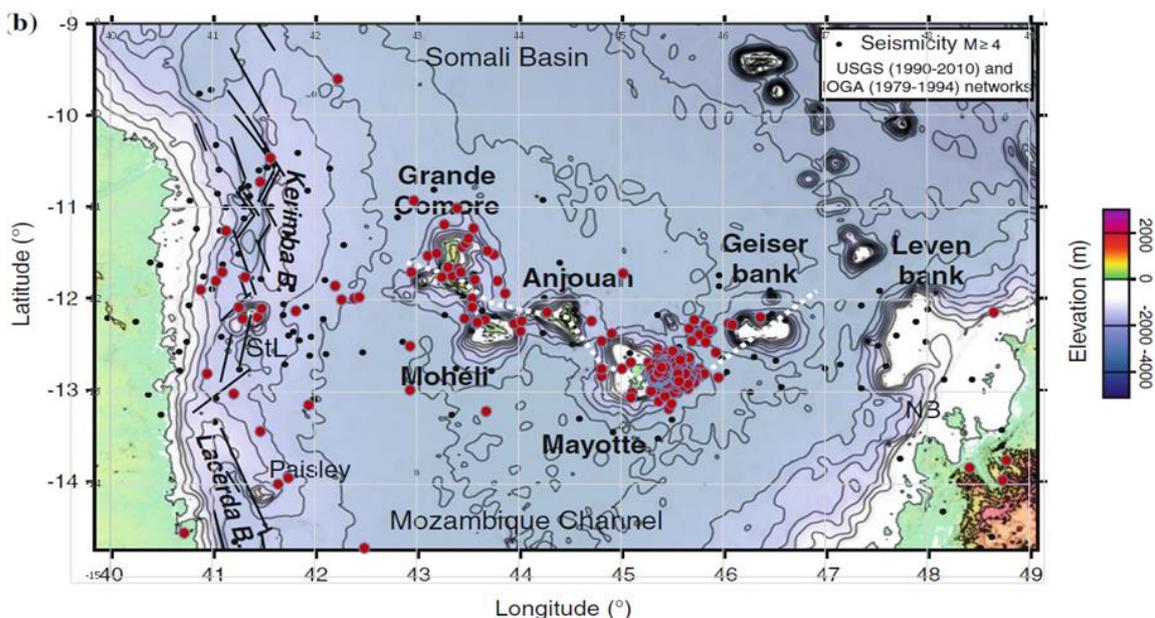


Figure 1 : Épicentres des séismes du catalogue avec au moins une valeur de PGA sur YTMZ, MDZA, CAB, MOIN ou GGLO (cercles rouges). La plupart des séismes proviennent de la zone d'essaim (autour de 45.5°E ; les séismes régionaux se répartissent entre Grande Comore et Mohéli (vers 43.5°E), Anjouan (vers 44.5°E), vers les Jumelles et banc de Geysier (au nord-est de l'essaim), sur la ride de Davie (entre 40.5 et 42.5°E). Fond de carte d'après Michon (2016).

La Figure 2 et la Figure 3 montrent la répartition des données en fonction de la magnitude et des distances hypocentrales et épacentrales. La répartition de la zone de crise en deux essaims distincts se voit bien en distance épacentrale. En distance hypocentrale, la répartition en distance est plus concentrée et la séparation en deux essaims ne se voit pas. Il y a très peu de données en dessous de $M_v=3.0$, ceci est lié au seuil de détection et au fait que nous avons limité la localisation des séismes de la crise au-dessus de ce seuil de magnitude. Les quelques données à distances inférieures à 10 km proviennent de localisations régionales proches des stations du Karthala CAB et MOIN. Pour les séismes régionaux détectés à Mayotte, nous avons quelques points entre 60 et 400 km.

La répartition en magnitude-distance n'est pas homogène et ne permet pas de définir une relation d'atténuation régionale selon les critères généraux définies pour élaborer des GMPE (Ground Motion Prediction Equations), c'est-à-dire disposer d'une distribution homogène de données dans une gamme de Magnitude/Distance de séismes ressentis à destructeurs : magnitudes ~4-7, distances ~10 -150 km au moins. La loi qu'on recherche ici sera donc une loi simplifiée **valide entre les magnitudes M_{lv} 3.0 et 6.0 et entre les distances 10 et 300 km environ.**

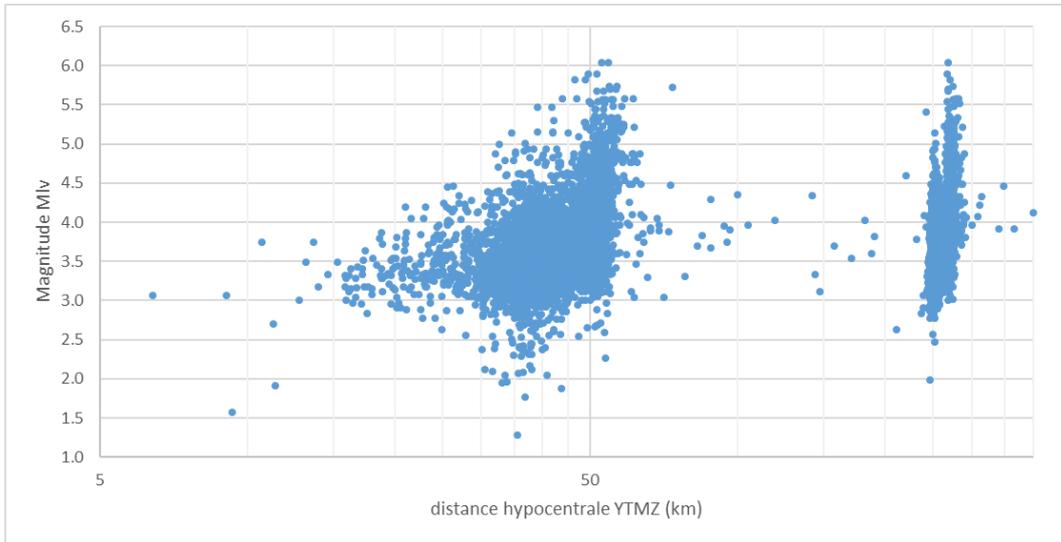


Figure 2 : Répartition des données de PGA (au rocher) en magnitude M_{lv} et distance hypocentrale.

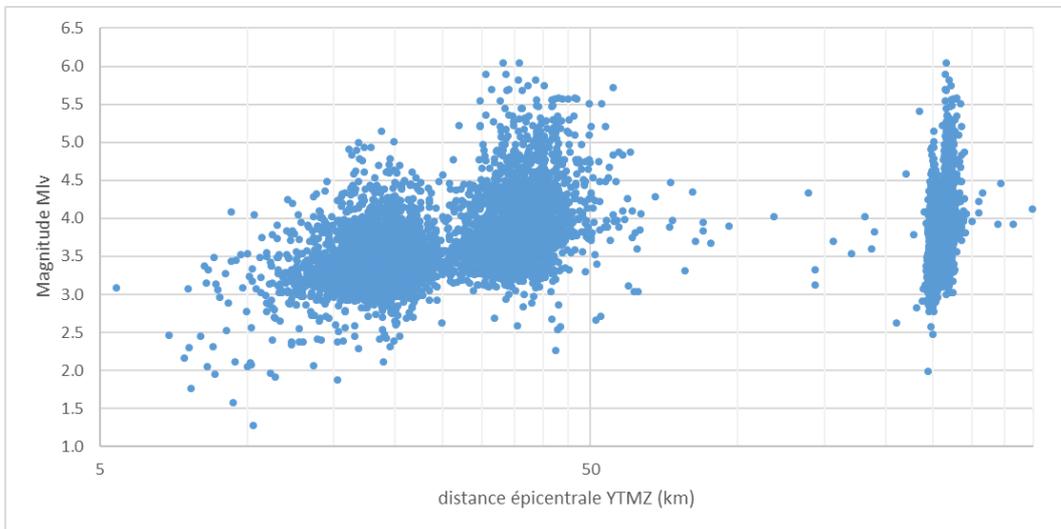


Figure 3 : Répartition des données de PGA (au rocher) en magnitude M_{lv} et distance épiscopentrale.

L'annexe 4 donne les valeurs de PGA obtenues pour les séismes de magnitude $M_{lv} \geq 5.0$.

2.3. MAGNITUDES MLV – MLH – MW

Les magnitudes calculées sont des magnitudes locales MI. Si on veut pouvoir comparer les PGA avec des relations d'atténuation existantes, il faut connaître la conversion entre Magnitude locale et magnitude de moment Mw qui est l'échelle utilisée pour les relations d'atténuations GMPE les plus récentes.

2.3.1. Mlv-Mlh

Les localisations avec Seiscomp et HYPO71 donnent un calcul de magnitude local ML, Mlv à partir de la composante vertical et Mlh à partir des composantes horizontales.

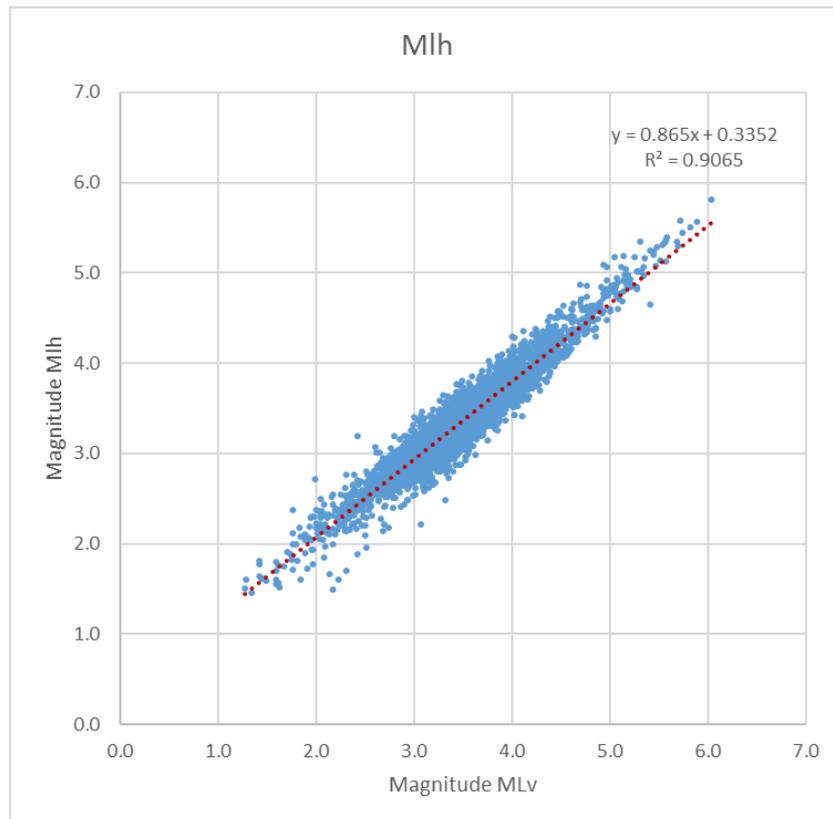


Figure 4 : Comparaisons Mlv – Mlh

La comparaison des deux échelles de magnitude sur la zone (Figure 4) montre que Mlv et Mlh sont sensiblement équivalents vers MI=3.0. Au-dessus de MI=5.0, Mlv est plus fort que Mlh. La courbe de tendance entre Magnitude 2.0 et 6.0 sous-estime Mlh par rapport à Mlv pour les valeurs les plus fortes.

2.3.2. Calages avec mb USGS ou Mw GCMT

Le catalogue de référence international USGS ne contient pour la région que les séismes de magnitude mb supérieure à 4.5 et quelques séismes entre 4.1 et 4.5 (228 séismes). Le catalogue GCMT ne contient que les séismes de magnitude supérieure à 5.0 et quelques séismes jusqu'à 4.9 (28 séismes). Une comparaison directe MI/Mw_{gcmt} ou MI/mb_{usgs} est difficile car il y a trop peu de données, dans une gamme de magnitude étroite non représentative de l'ensemble des données du catalogue (3 962 séismes).

La Figure 5 montre ainsi la comparaison entre $m_{b_{USGS}}$ et M_{lh} . Il y a 228 séismes de magnitude M_{lh} entre 3.6 et 5.8 pour lesquels une comparaison semble possible. La dispersion est très forte : par exemple pour $m_{b_{USGS}}=4.4$, M_{lh} varie de 3.8 à 4.6. Une courbe de régression linéaire classique (pointillé bleu sur le graphique Figure 5) n'est pas fiable ($R^2=0.52$).

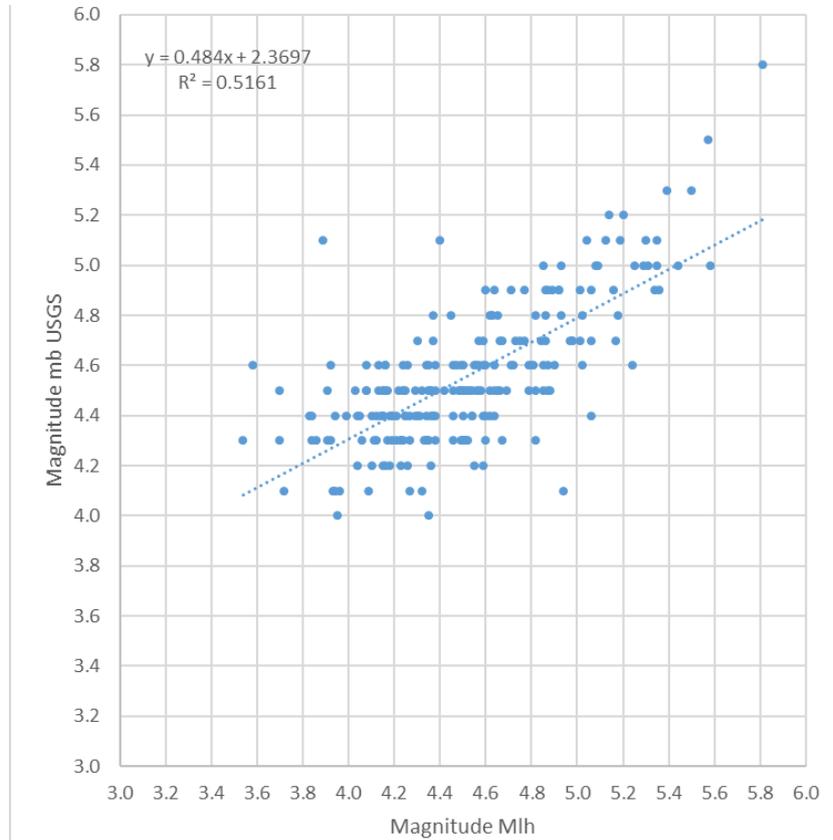


Figure 5 : Comparaison M_{lh} / $m_{b_{USGS}}$.

Un autre point de comparaison est le comptage du nombre de séismes de magnitude supérieure ou égale à 5.0 (Tableau 3).

On voit bien que le nombre de séismes de magnitude locale $M_{lv} \geq 5.0$ (66 séismes : 54 dans la zone de crise et 12 régionaux) est bien supérieur au nombre de séismes recensés par GCMT avec la magnitude $M_w \geq 5.0$. Pour obtenir un nombre équivalent, il faut $M_{lh}=5.2$ ou $M_{lv}=5.4$.

	nombre		Nombre
M_w GCMT ≥ 5.0	19		
$m_{b_{USGS}} \geq 5.0$	23		
$M_{lh} \geq 5.0$	35	$M_{lh} \geq 5.2$	20
$M_{lv} \geq 5.0$	66	$M_{lv} \geq 5.4$	20

Tableau 3 : Comptage des magnitudes supérieures à 5.0.

Une conversion $M_{lh} = M_w + 0.2$ est cohérente avec le comptage du nombre de séismes $M_w \geq 5.0$ dans les deux catalogues. On sait aussi que dans cette gamme de magnitude $m_{b_{USGS}} \sim M_w$ GCMT.

La correction $MI \rightarrow Mw$ ne peut être qu'approximative avec des incertitudes sans doute assez forte (Pour les magnitudes mb USGS > 4.3 , l'incertitude de correction ml/mb est de ± 0.2 . On peut supposer que l'incertitude est plus forte quand on descend en magnitude. Pour les quelques séismes où on peut directement comparer à Mw GCMT on a ± 0.35).

Faute de pouvoir évaluer une courbe de tendance linéaire, on applique une correction par une constante. Pour l'unification du catalogue de sismicité en magnitude Mw , on appliquera :

$$Mw = MIh - 0.2$$

$Mw = MIv - 0.4$, pour les cas où MIh n'est pas calculé (61 séismes sur 4 917 dans le catalogue)

Il n'y a aucune solution satisfaisante de calage entre magnitude locale MI et magnitude de moment Mw pour les faibles magnitudes (MI 2 à 4.5) puisqu'on a aucun point de comparaison avec Mw ou mb dans cette gamme là. Cette correction arbitraire calée sur les fortes magnitudes permet :

- d'avoir des estimations en cohérences avec celle des catalogues internationaux en cas de gros séismes ;
- de pouvoir faire des comparaisons directes avec des lois d'atténuations GMPE en Mw (dont le domaine de validité est de façon générale au-dessus de Mw 4.0).

En contrepartie, on peut supposer que dans la réalité cette correction n'est pas constante et quelle sous-estime les basses magnitudes. On préfère ici faire le choix de ne pas surestimer les fortes magnitudes.

Pour les calculs de loi PGA/Magnitude/distance, plusieurs choix sont possibles :

- utiliser une échelle de magnitude Mw pour une meilleure comparaison avec les GMPE existantes. Mais cela nécessite une conversion arbitraire de MI à Mw ;
- utiliser une échelle de magnitude MIv c'est l'échelle de magnitude utilisée par le REVOSIMA pour ses localisations et ses communiqués, mais en sachant que la magnitude MIv est surestimée au-delà de 5.0 par rapport aux catalogues internationaux de référence ;
- pour la distance on peut utiliser soit la distance épiscopale $D_{épi}$, soit hypocentrale D_{hypo} . Pour les stations à grande distance il y a peu de différence. Par contre pour les stations proches de l'essai le plus à l'ouest, on peut avoir des distances épiscopales de 10-15 km et des distances hypocentrales de 40 km car les foyers sont en profondeur.

On regardera les quatre possibilités de loi : Mw/D_{hypo} ; $Mw/D_{épi}$; MIv/D_{hypo} ; $MIv/D_{épi}$, pour laisser aux utilisateurs potentiels le choix des paramètres qu'ils souhaitent utiliser.

3. Établissement d'une relation empirique PGA = f (distance, magnitude)

3.1. COMPARAISON PGA AVEC UNE SÉLECTION DE GMPE

Une analyse préliminaire a été faite dans l'étude de Bertil *et al.* (2019b) sur l'aléa sismique à Mayotte. Une recherche des relations d'atténuation les plus couramment utilisées pour des PSHA en Afrique de l'Est et de lois pouvant correspondre à un contexte volcanique insulaire avait été faite. On avait abouti à une sélection de sept relations d'atténuation pour des zones continentales stables ou actives superficielles ou volcaniques. Nous avons rajouté à ces relations celle d'Ambraseys *et al.* (2005) utilisée par le REVOSIMA pour ses communiqués de séismes ressentis à Mayotte depuis Mars 2020. Les relations sont résumées dans le Tableau 4.

Relation GMPE	acronyme	Domaine d'application	Type de distance
Atkinson & Boore (2006)	ab06	continental stable	r_rup
Chiou & Youngs (2008)	cy08	active superficielle	r_rup
Pezehsk <i>et al.</i> (2011)	petal11	continental stable	r_rup
Campbell & Bozorgnia (2008)	cb08	active superficielle	r_rup
Bindi <i>et al.</i> (2014)	betal14	active superficielle	r_jb
Akkar <i>et al.</i> (2014)	aetal14	active superficielle	r_jb
Atkinson (2010)	a10	volcanique (Hawaï)	r_jb
Ambraseys <i>et al.</i> (2005)	aetal05	active superficielle	r_jb

Tableau 4 : Relations d'atténuations sélectionnées, avec domaine tectonique d'application et type de distance utilisée.

L'analyse de Bertil *et al.* (2019b) ne portait que sur environ 80 séismes de magnitude supérieure à 4.0 et uniquement sur les données de YTMZ. Nous disposons maintenant de beaucoup plus de données, pouvant descendre jusqu'à magnitude 3.0 et sur des distances jusqu'à 300-400 km et ainsi mieux évaluer l'atténuation avec la distance.

La Figure 6 et la Figure 7 montrent en exemple les PGA extraits sur les stations YTMZ, MDZA, CAB et MOIN en fonction de la distance (distance hypocentrale D_{hypo} pour la Figure 6, distance épacentrale $D_{\text{épi}}$ pour la Figure 7) et pour une magnitude $\sim M_w=4.0$ (361 valeurs de PGA pour une gamme de magnitude 3.9-4.1). Les PGA sont représentés avec des couleurs différentes en fonction de la station.

Sur la Figure 6 : cy08 et ab06 paraissent plus proches des observations que petal11 et cb08 autour de 50 km. Mais cy08 atténue trop vite avec la distance et il n'y a plus de compatibilité avec les données à 200-300 km.

Sur la Figure 7 : betal14 et aetal14 sont proches des observations à 50 km mais sous évaluent le PGA à 250 km. Les lois a10 et aetal05 surévaluent le PGA à 50 km et sous-évaluent le PGA à 250 km.

Ces comparaisons sont reproduites en annexe 1 pour $M_w=3.0$; $M_w=4.0$, $M_w=5.0$ et $M_w=5.8$ et de façon séparée pour chacune des lois.

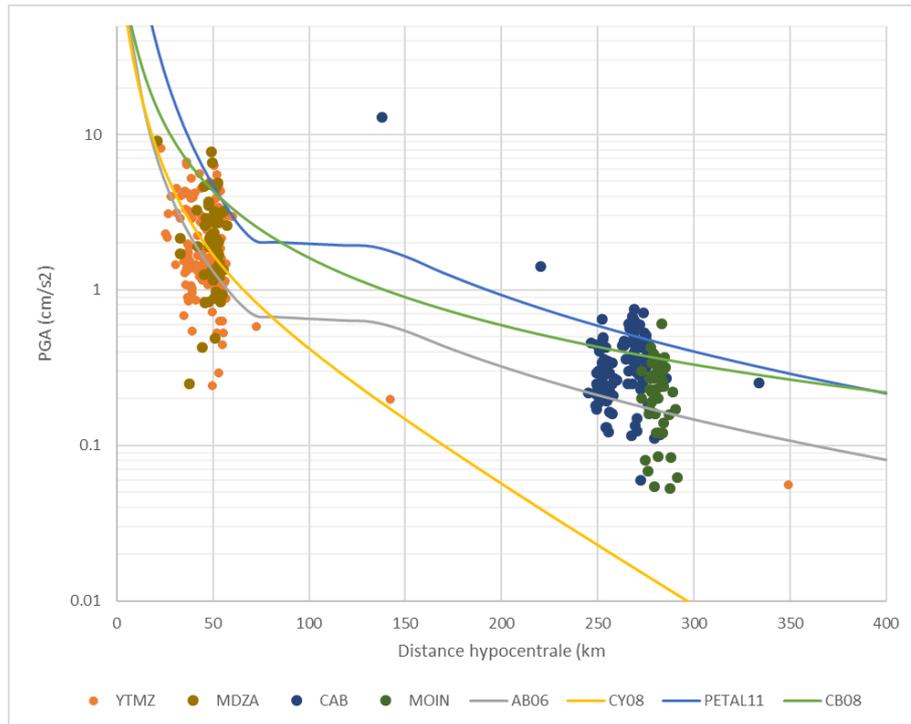


Figure 6 : Comparaison des PGA pour $M_w=4.0$ avec les lois d'atténuations en distance à la rupture.

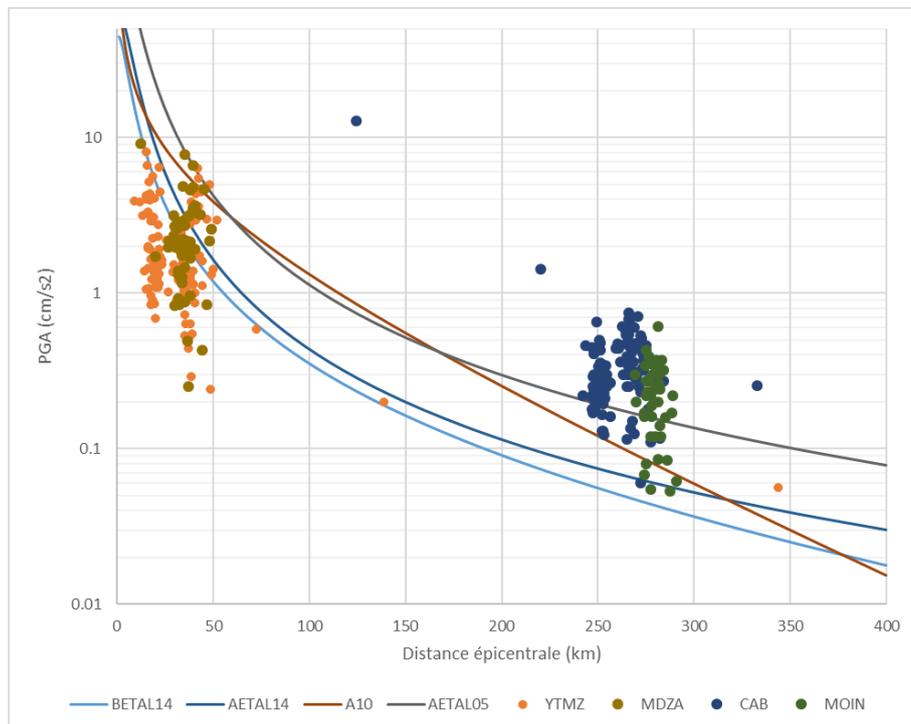


Figure 7 : Comparaison des PGA pour $M_w=4.0$ avec les lois d'atténuations en distance Joyne & Boore.

Aucune des lois testées n'est vraiment en accord avec les PGA observées sur la gamme de distance 10-300 km et les magnitudes 3.0-6.0, d'où la nécessité d'obtenir une relation empirique mieux adaptée aux données d'observation.

3.2. RELATION EMPIRIQUE

Pour cette relation empirique, nous nous basons sur la démarche adoptée par Beauducel *et al.* (2011) pour la loi Bcube utilisée pour les communiqués des Observatoires de l'IPGP aux Antilles :

Nous recherchons une loi de type $\text{Log(PGA)} = a M + b R - \text{Log(R)} + c$

Où PGA est l'accélération maximale de pic est en g, R la distance en km et les Log sont des logarithmes décimaux.

Comme indiqué précédemment, nous nous limitons aux données de PGA qui seraient à priori au rocher pour éviter d'introduire plus de dispersion dans la relation. La loi Beauducel *et al.* 2011 utilisait toutes les données y compris celles de stations à effet de site. Ici nous avons suffisamment de données pour rester au rocher et l'étude des effets de site à Mayotte (Baillet, 2020) nous indique qu'un coefficient multiplicatif de 1.5 à 3.0 peut être appliqué selon les sites.

Pour le calcul nous disposons de 8 649 données provenant de 4 056 séismes.

Nous effectuons une régression multilinéaire pour trouver les trois coefficients a, b, c dans

$$\text{Log(PGA)} + \text{Log(R)} = a M + b R + c$$

Les résultats et les incertitudes associés sont dans le Tableau 5. La comparaison des courbes obtenues avec les données PGA sont en Annexe 2.

PGA / Mw / R _{hypo}	PGA / Mw / R _{épi}	PGA / Mlv / R _{hypo}	PGA / Mlv / R _{épi}
a=0.8230+-0.0065	a=0.8447+-0.0067	a=0.7566+-0.0061	a=0.7979+-0.0060
b=1.00E-5+-2.77E-5	b=9.94E-4+-2.71E-5	b=-5.79E-5+-2.83E-5	b=9.00E-4+-2.63E-5
c=-4.3847+-0.0216	c=-4.7127+-0.0224	c=-4.4332+-0.0227	c=-4.8491+-0.0224
Erreur type = 0.2851	Erreur type = 0.2963	Erreur type = 0.2902	Erreur type = 0.2867

Tableau 5 : Régression linéaire pour la relation $\text{Log(PGA)}=f(M, R)$ à Mayotte.

À noter que le coefficient b est très faible ($\sim 10^{-5}$) ce qui signifie que la variation du PGA avec la distance se fait en Log(R) essentiellement et très peu en R.

Pour la loi Bcube-Antilles de Beauducel *et al.* (2011), les coefficients calculés sont représentés sur le Tableau 6. La magnitude utilisée était une magnitude de durée Md et la distance, une distance hypocentrale.

PGA / Md / R _{hypo}
a=0.6176
b=-0.0331
c=-3.3968
Erreur type = 0.47

Tableau 6 : Régression linéaire pour la relation $\text{Log}(\text{PGA})=f(M, R)$ aux Antilles selon Beauducel et al. (2010).

L'erreur type était beaucoup plus forte, sans doute liée à un mélange de stations au rocher et à effet de site. La comparaison entre la loi pour les Antilles et celle pour Mayotte avec Magnitude locale pour Mayotte, de durée pour Antilles et une distance hypocentrale est donnée sur la Figure 8. L'atténuation avec la distance est beaucoup plus forte aux Antilles.

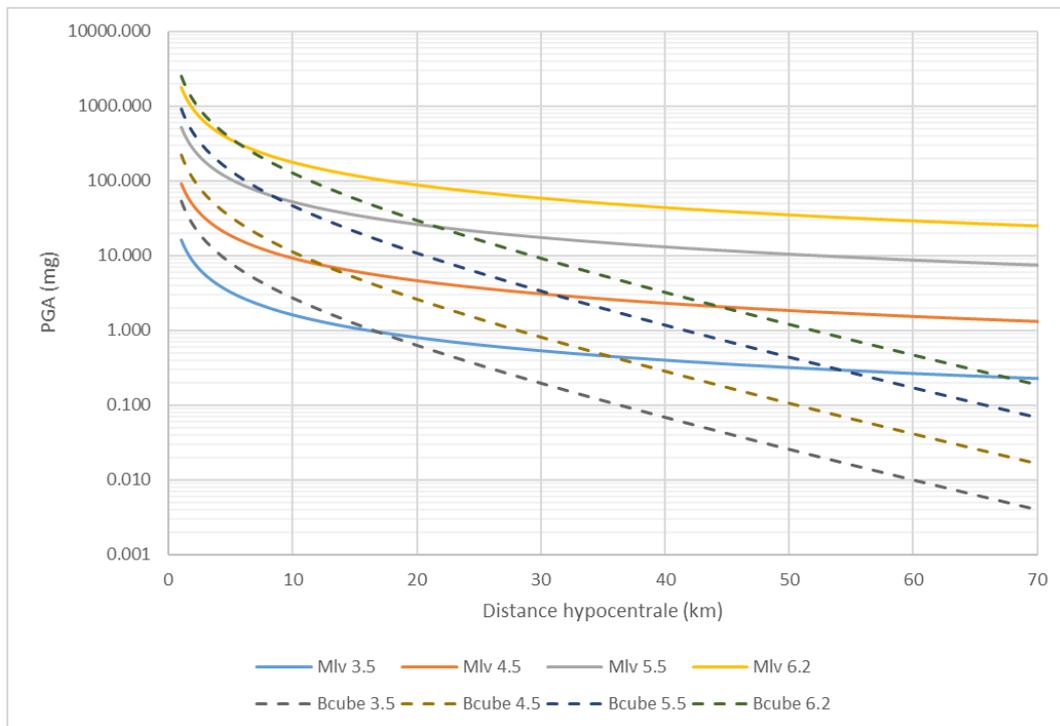


Figure 8 : Comparaison entre la relation $\text{PGA}/Mlv/R_{hypo}$ pour Mayotte et la relation $\text{PGA}/Md/R_{hypo}$ pour Bcube et les Antilles.

Les modèles de prédiction obtenus pour Mw et Mlv avec la distance hypocentrale sont représentés en Figure 9 et Figure 10. Une magnitude Mw=5.0 dans la zone de crise donne en moyenne entre 9 et 20 mg au rocher (Figure 9). Une magnitude Mlv=5.0 (correspond à Mw~4.6) dans la zone de crise donne en moyenne de 4 à 8 mg au rocher (Figure 10).

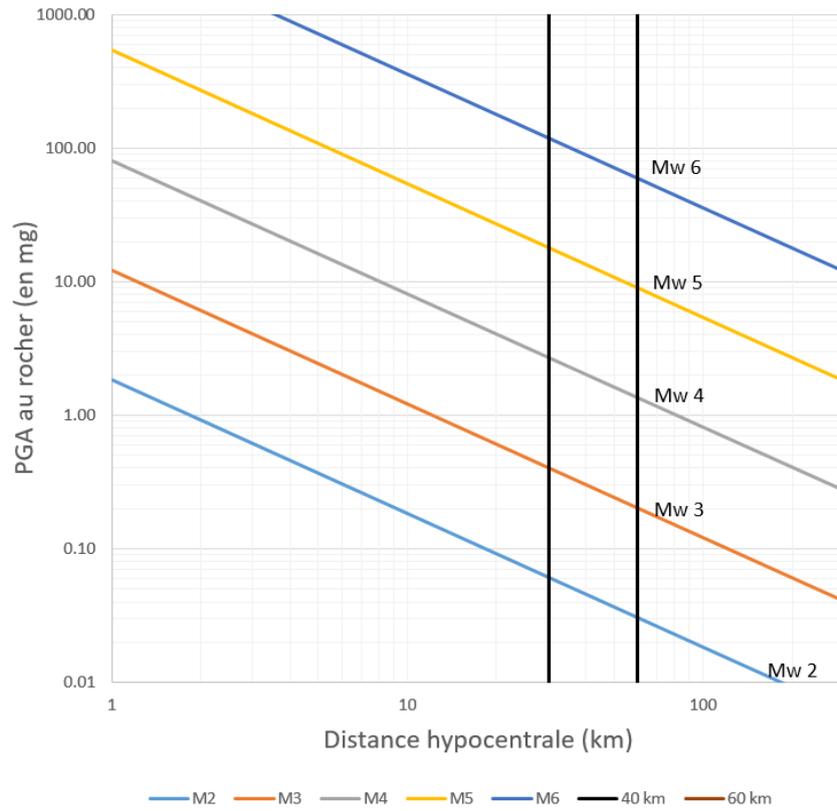


Figure 9 : Modèle de prédiction du PGA au rocher en fonction de la distance hypocentrale et de la magnitude de Moment Mw. Les traits verticaux noirs représentent la gamme de distance hypocentrale des séismes de la zone d'essai par rapport à Mamoudzou (30 à 60 km).

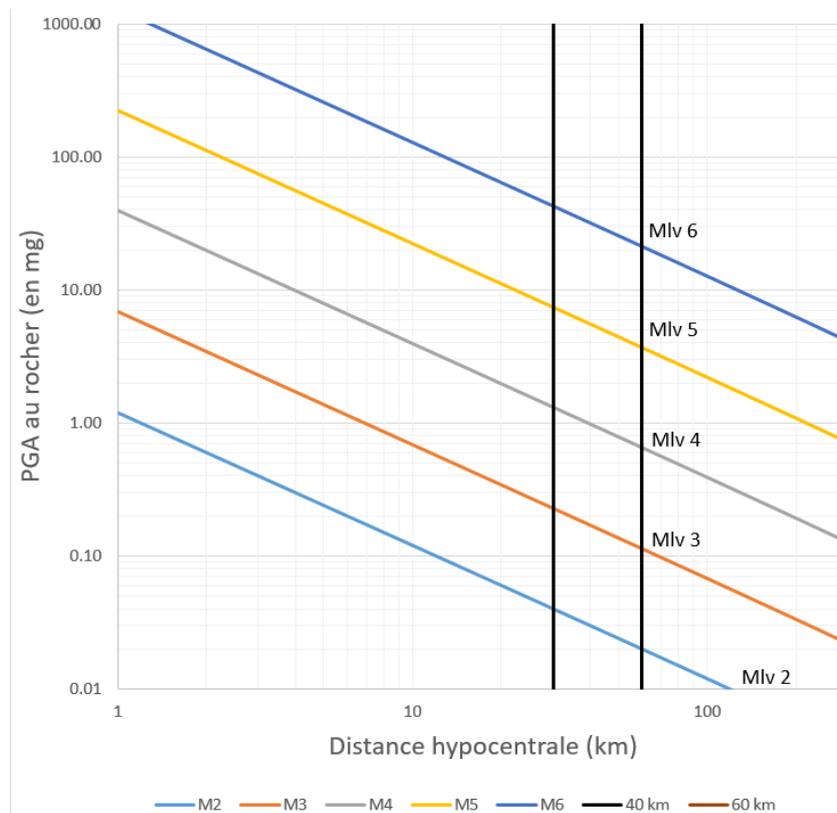


Figure 10 : Modèle de prédiction du PGA au rocher en fonction de la distance hypocentrale et de la magnitude locale Mlv. Les traits verticaux noirs représentent la gamme de distance hypocentrale des séismes de la zone d'essai par rapport à Mamoudzou (30 à 60 km).

4. Sismicité ressentie pour la crise de Mayotte

L'objectif étant d'évaluer la gamme d'intensité macrosismique possible en cas de séisme ressenti, on essaie dans ce chapitre de rassembler l'information existante sur les séismes ressentis.

4.1. INFORMATIONS BCSF

Jusqu'en avril 2019, le BCSF ne met en place des enquêtes macrosismiques en ligne que pour les séismes les plus gros (magnitude ~5.0) : seuls 56 séismes sont ainsi signalés.

Puis à partir d'avril 2019 jusqu'en avril 2020, ce sont les localisations RENASS avec le réseau de Mayotte qui permet de déclencher des enquêtes à partir de 3.5.

Il y a environ 110 séismes recensés. C'est incomplet et cela ne reflète pas le nombre de séismes réellement ressentis. Pour chaque séisme, il y a peu de témoignages. 35 séismes rassemblent plus de 50 témoignages.

4.2. INFORMATIONS CSEM

Le site web du CSEM donne une liste de 337 séismes susceptibles d'être ressentis à Mayotte entre mai 2018 et juin 2020. Mais seulement 190 d'entre eux sont indiqués avec au moins un témoignage en ligne. Bien que plus important que le nombre indiqué par le BCSF, ce chiffre n'est sans doute pas exhaustif. Sur les périodes les plus actives de mai-juin 2018, seuls les plus fortes secousses sont signalées au CSEM. En 2020, lorsque l'activité sismique a fortement diminué, des séismes plus petits sont indiqués comme ressentis.

Chacun de ces séismes a été associé avec la localisation du catalogue de référence du paragraphe 2. On peut ainsi comparer la valeur du PGA sur une station (YTMZ) et le nombre de témoignages reçus (Figure 11). On a des témoignages de séisme ressenti quand le PGA sur YTMZ dépasse 1 mg. Il faut au moins 2 mg sur YTMZ pour avoir plus de 10 témoignages sur le site.

Le PGA sur YTMZ se corrèle assez bien avec des signalements de séismes ressentis (Figure 11). Il peut donc être utilisé comme indicateur de séisme ressenti plus complet que les témoignages BCSF-CSEM puisqu'on a un suivi en continu de cette station depuis le début de la crise.

Si on fixe à 1mg sur YTMZ le seuil à partir duquel on peut avoir quelques témoignages, on a alors 812 séismes ressentis. Pour YTMZ \geq 2mg, le nombre n'est plus que de 308. C'est bien plus que les 110 séismes ayant fait l'objet d'un appel à témoigner du BCSF et des 190 séismes avec au moins un témoignage du CSEM.

Ceci permet d'évaluer un seuil de perception (avec le PGA de YTMZ) pour la crise de Mayotte. Il paraît toutefois difficile d'évaluer une intensité à partir de ces nombres de témoignages. À noter aussi que YTMZ est une station au rocher et que dans des zones à effet de site on peut avoir des accélérations PGA deux à trois fois plus fort.

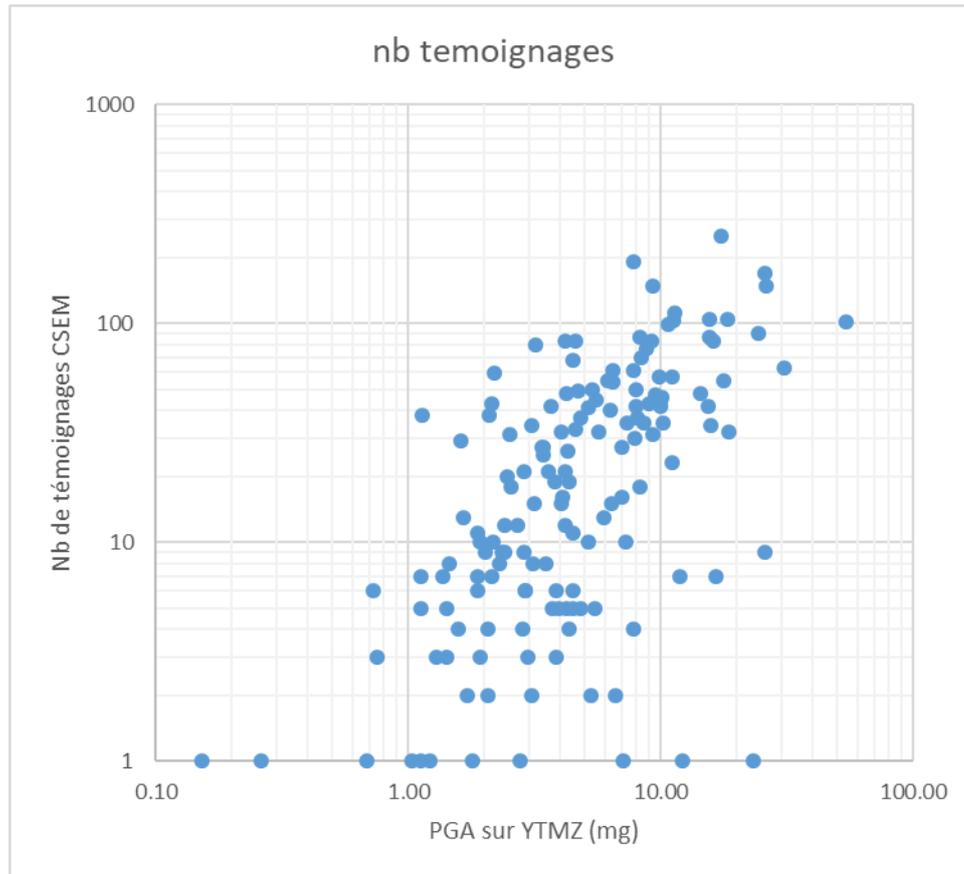


Figure 11 : Comparaison entre le PGA mesuré sur la station YTMZ (au rocher) et le nombre de témoignages associé au séisme sur le site du CSEM.

4.3. INFORMATIONS PUBLIÉES PAR LE REVOSIMA

Le REVOSIMA a mis en place les communiqués pour séismes ressentis après le séisme du 21 mars 2020 (Séisme entre Anjouan et Mayotte, fortement ressenti). Un bulletin est émis s'il y a plus de deux témoignages en ligne.

Il y a eu cinq communiqués entre mars et juin 2020 : 21/03 (PGA sur YTMZ 18mg) ; 10/04 (PGA 1.45 mg) ; 16/04 (PGA 0.76mg) ; 27/04 (PGA 2.34 mg) ; 06/06 (PGA 1.37 mg).

4.4. BILAN

Les informations macrosismiques du BCSF et CSEM ou les communiqués REVISOMA ne permettent pas d'avoir une vision complète du nombre de séismes ressentis à Mayotte depuis mai 2018. Il manque beaucoup de témoignages en début de crise car il y avait trop de secousses et pas de localisations correspondantes, sans compter la notion subjective du ressenti.

C'est sur le site du CSEM qu'on a le plus d'indication de témoignages (190 séismes avec au moins un témoignage). Le nombre de témoignages augmente avec la valeur du PGA mesuré sur la station accélérométrique de YTMZ à Mamoudzou. On peut estimer un seuil de perception à 1 mg pour commencer à avoir des témoignages sur le site CSEM. Si on tient compte des effets de site, ce seuil est de 1 à 3 mg. **Avec ce critère de 1 mg, on a 810 secousses susceptibles d'être ressenties entre le 10 mai 2018 et le 30 juin 2020.**

Si on souhaite traduire ce **niveau de perception en magnitude**, la Figure 12 indique que pour des PGA à YTMZ entre 1 et 2 mg, la magnitude correspondante est d'environ **Mlv=3.7 à 30 km et Mlv = 4.2 à 55 km**. Cela reste des ordres de grandeur. Sur la figure, la dispersion est forte. On cumule plusieurs sources d'incertitudes : le calcul de la localisation (et de la distance hypocentrale), le calcul de magnitude moyenné sur plusieurs stations, le PGA qui ne représente que la station YTMZ (avec des variations possibles en fonction du mécanisme au foyer, de la directivité, ...).

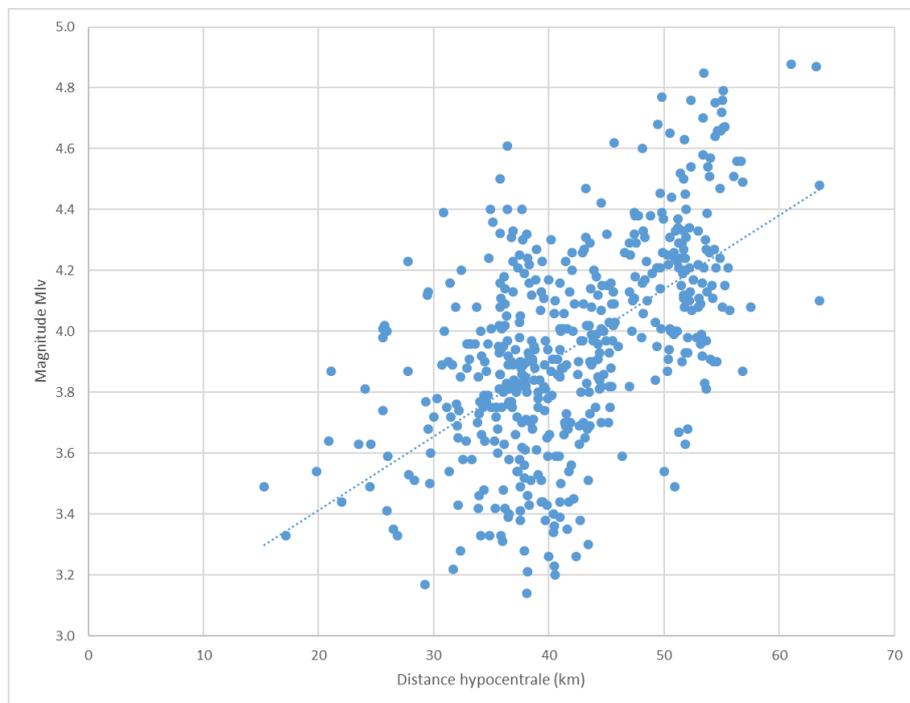


Figure 12 : Magnitude Mlv en fonction de la distance hypocentrale par rapport à YTMZ (Mamoudzou) pour un PGA entre 1 et 2 mg.

5. Relation empirique Intensité = f (distance, magnitude)

5.1. CONVERSION PGA / INTENSITÉ

Une fois obtenue une relation $PGA = f(\text{distance}, \text{magnitude})$, l'intensité correspondante ne peut être estimée qu'en appliquant une relation empirique de conversion PGA – Intensité (ou GMICE pour Ground Motion Intensity Conversion Equation).

Pour Bcube Antilles dans Beauducel *et al.* (2011), la GMICE est une relation simplifiée provenant de Gutenberg et Richter (1942) :

L'intensité macrosismique $I = 3 \text{ Log}(PGA)+3/2$, avec PGA en cm/s^2 ou mg et I en échelle EMS98

À Mayotte, le REVOSIMA utilise la même conversion qu'aux Antilles (voir Figure 13, tiré du communiqué REVOSIMA du séisme du 25 Août 2020).

Perception Humaine	non ressenti	très faible	faible	légère	modérée	forte	très forte	sévère	violente	extrême
Dégâts Potentiels	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	légers	modérés	importants	destructions	généralisés
Accélérations (mg)	< 1.5	1.5 – 3.2	3.2 – 6.8	6.8 – 15	15 – 32	32 – 68	68 – 150	150 – 320	320 – 680	> 680
Intensités EMS98	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Figure 13 : Correspondance entre accélération PGA et intensité sur les communiqués actuels du REVOSIMA pour Mayotte.

Si pour les intensités faibles (II-III) l'ordre de grandeur des PGA prédits semble en accord avec les observations, une gamme de PGA 68-150 mg est associée à une intensité VII donnant des dégâts modérés (Figure 13). Or pour le séisme du 15 mai 2018, le rapport du BCSF (Sira *et al.*, 2018) indique globalement sur ce séisme une intensité V-VI et les seules mesures de PGA disponibles indiquent 53 et 46 mg sur des sites au rocher (YTMZ, MDZA) et 180 mg sur un site à effet de site fort (MILA). L'intensité VII donné par cette conversion semble surestimée.

Les conversions PGA/intensité utilisées par le BCSF en France métropolitaine pour les cartes d'intensité obtenues à l'aide de l'outil de calcul ShakeMap, se font avec la GMICE de Caprio *et al.* (2015) qui est une loi empirique globale basée sur un grand nombre de données mondiales. La conversion Intensité/PGA/PGV est donnée sur la Figure 14. La conversion Intensité/PGA autour de 50-100 mg semble plus en accord avec les observations à Mayotte autour des intensité V-VI.

Intensités EMS98	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+
Dégâts potentiels bâtiments vulnérables	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	modérés	quelques effondrements partiels	nombreux effondrements partiels	nombreux effondrements	effondrements généralisés
Dégâts potentiels bâtiments peu vulnérables	aucun	aucun	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	modérés	effondrements partiels	nombreux effondrements
Perception humaine	aucune	très faible	faible	modérée	forte	brutale	très brutale	sévère	violente	extrême
PGA (%g)	<0.02	0.07	0.3	1.1	4.7	8.6	16	29	52	>96
PGV (cm/s)	<0.007	0.03	0.1	0.5	2.3	5.5	13	31	73	>174

Echelle basée sur Caprio *et al.* (2015)

Figure 14 : Correspondance entre accélération PGA et intensité avec la loi Caprio *et al.* (2015) utilisée par le BCSF en France métropolitaine.

Pour Caprio *et al.* (2015) la relation de conversion est la suivante :

$$I = 2.270 + 1.647 \text{ Log(PGA) si PGA} < 40 \text{ mg}$$

$$I = -1.361 + 3.822 \text{ Log(PGA) si PGA} \geq 40 \text{ mg}$$

I-II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
<2.5m g	2.5 - 6 mg	6 - 22 mg	23 - 62 mg	62 - 113 mg	114 - 208 mg	209 - 380 mg	381 - 700 mg	> 700 mg

5.2. LOI INTENSITÉ/MAGNITUDE/DISTANCE POUR MAYOTTE

Lorsqu'on applique Caprio *et al.* (2015) sur les relations $\text{Log(PGA)} = f(M, R)$, on obtient une relation de type :

$$I = A1 M - B1 \text{ Log(R)} + C1 R + D1 \text{ si Log(PGA)} < 1.6 \text{ (PGA en g, R en km)}$$

$$I = A2 M - B2 \text{ Log(R)} + C2 R + D2 \text{ si Log(PGA)} \geq 1.6 \text{ (PGA en g, R en km)}$$

Où on doit définir les coefficients A, B, C, D dans les deux formules.

La relation $\text{Log(PGA)} = f(M, R)$ obtenue au chapitre 3 est définie au rocher. Le Tableau 7 donne les coefficients obtenus pour des PGA au rocher.

Mw R _{hypo} Rocher				Mw R _{épi} Rocher			
A1	1.355	A2	3.146	A1	1.392	A2	3.230
B1	1.647	B2	3.822	B1	1.647	B2	3.822
C1	1.65E-05	C2	3.82E-05	C1	1.64E-03	C2	3.80E-03
D1	-0.011	D2	-6.654	D1	-0.551	D2	-7.907
Mlv + R _{hypo} Rocher				Mlv + R _{épi} Rocher			
A1	1.246	A2	2.892	A1	1.314	A2	3.050
B1	1.647	B2	3.822	B1	1.647	B2	3.822
C1	-9.54E-05	C2	-2.21E-04	C1	1.48E-03	C2	3.44E-03
D1	-0.090	D2	-6.838	D1	-0.775	D2	-8.428

Tableau 7 : Coefficients A, B, C, D pour la relation Intensité/magnitude/distance pour des sites au rocher, les coefficients sont donnés pour des magnitudes Mlv ou Mw et des distances épacentrales ou hypocentrales.

Le Tableau 8 donne les coefficients obtenus pour des PGA avec effets de site. Du fait de la combinaison des formules, entre le Tableau 7 et le Tableau 8, seul le coefficient D est modifié. L'effet de site variant selon les contextes, on donne ici une intensité correspondant à un effet de site supposé fort. Pour cela la valeur de PGA au rocher est multipliée par trois. On est bien au-delà des coefficients 1.5 ou 1.8 des sites de classe E / EC8. Le rapport de M. Baillet (2020) montre que de telles amplifications existent à Mayotte (notamment sur la station accélérométrique MILA).

Mw R_{hypo} + Effet de site				Mw $R_{\text{épi}}$ + Effet de site			
A1	1.355	A2	3.146	A1	1.392	A2	3.230
B1	1.647	B2	3.822	B1	1.647	B2	3.822
C1	1.65E-05	C2	3.82E-05	C1	1.63E-03	C2	3.78E-03
D1	0.763	D2	-4.857	D1	0.223	D2	-6.111
Mlv + R_{hypo} + Effet de site				Mlv + $R_{\text{épi}}$ + Effet de site			
A1	1.246	A2	2.892	A1	1.314	A2	3.050
B1	1.647	B2	3.822	B1	1.647	B2	3.822
C1	-9.54E-05	C2	-2.21E-04	C1	1.48E-03	C2	3.44E-03
D1	0.672	D2	-5.068	D1	-0.001	D2	-6.632

Tableau 8 : Coefficients A,B,C, D pour la relation Intensité/magnitude/distance pour des sites à effets de site, les coefficients sont donnés pour des magnitudes Mlv ou Mw et des distances épacentrales ou hypocentrales.

Le Tableau 9 illustre sous forme d'abaque la relation obtenue pour :

- une magnitude Mw ;
- une distance hypocentrale ;
- une zone à fort effet de site.

Les couleurs correspondent à l'échelle d'intensité de la Figure 14 (bleu pâle pour intensité II, jaune pour intensité IV, rouge pour intensité VI, ...).

Pour un séisme de magnitude Mw 5.8 à 50-60 km en fort effet de site, l'intensité est VI-VII (6.6 à 6.9). C'est ce qu'on aurait pu avoir au maximum sur quelques points pour le séisme du 15 mai 2018.

Pour un séisme de magnitude Mw=4.0 à 30-40 km hypocentral (séisme de l'essaim ouest proche de Pamandzi avec foyer profond), l'intensité maximale est III-IV

Pour un séisme de magnitude Mw 5.0 à 50-60 km (type 21 mars 2020), on a une intensité IV-V au maximum.

Le Tableau 10 donne les intensités possibles en tenant compte d'un coefficient d'amplification du PGA de 3. L'écart en intensité entre les deux tableaux varie de 0.5 pour les faibles valeurs de PGA et jusqu'à 2 pour les très fortes valeurs de PGA (courte distance, forte magnitude).

Les abaques pour les quatre relations Intensité/magnitude/distance sont reproduit en annexe 3.

Mw/Rhypo	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5	5.2	5.4	5.6	5.8	6	6.2
10	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.2	5.8	6.4	7.0	7.7	8.3	8.9	9.6	10.2	10.8
20	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.9	5.3	5.9	6.5	7.2	7.8	8.4	9.0	9.7
30	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.8	5.2	5.9	6.5	7.1	7.7	8.4	9.0
40	2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.4	6.0	6.6	7.3	7.9	8.5
50	2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0	5.6	6.3	6.9	7.5	8.2
60		2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.3	6.0	6.6	7.2	7.9
70		2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1	5.7	6.3	7.0	7.6
80		2.0	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7	4.9	5.5	6.1	6.7	7.4
90			2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.3	5.9	6.5	7.2
100			2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1	5.7	6.4	7.0
110			2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0	5.6	6.2	6.8
120				2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.7	4.8	5.4	6.1	6.7
130				2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.3	5.9	6.6
140				2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.6	4.8	5.2	5.8	6.4
150				2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1	5.7	6.3
160				2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0	5.6	6.2
170				2.0	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7	4.9	5.5	6.1
180				2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6	4.8	5.4	6.0	
190				2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.3	5.9	
200				2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.8	5.2	5.9	
210				2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.1	5.8	
220				2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1	5.7	
230				2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0	5.6	
240				2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9	5.6	
250				2.0	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7	4.9	5.5	
260					2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.7	4.8	5.4	
270					2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.4	
280					2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.3	
290					2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.8	5.2	
300					2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.2	

Tableau 9 : Abaque Intensité/magnitude/distance pour magnitude Mw, distance hypocentrale et zone à fort effet de site.

Mw/Rhypo	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5	5.2	5.4	5.6	5.8	6	6.2
10	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.8	5.3	5.9	6.5	7.1	7.8	8.4	9.0
20		2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.4	6.0	6.6	7.2	7.9
30			2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.3	5.9	6.6	7.2
40			2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7	4.8	5.5	6.1	6.7
50				2.1	2.3	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1	5.7	6.4
60					2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.7	4.8	5.4	6.1
70					2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.2	5.8
80					2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9	5.6
90						2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.4
100						2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.6	4.8	5.2
110						2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.8	5.0
120						2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9
130							2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6	4.8
140							2.1	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.9
150							2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8
160							2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8
170							2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.5	4.7
180							2.0	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7
190								2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6
200								2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6
210								2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6
220								2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5
230								2.1	2.3	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5
240								2.0	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5
250								2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.4
260								2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4
270								2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4
280									2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4
290									2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.3
300									2.1	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3

Tableau 10 : Abaque Intensité/magnitude/distance pour magnitude Mw, distance hypocentrale et zone au rocher.

6. Bilan-Conclusions

La crise sismo-tectonique de Mayotte 2018-2020 a permis d'acquérir plusieurs milliers de données de mouvements forts pour des séismes de magnitude Mw 3 à Mw 5.8.

Nous avons utilisé ces données pour le calcul d'une loi $\text{Log(PGA)} = f(\text{magnitude, distance})$. Ce type de calcul est possible aussi pour le PGV ou des accélérations spectrales. Mais la distribution en magnitude distance est insuffisante pour obtenir une relation GMPE dans les règles de l'art. La loi qu'on obtiendra est une loi simplifiée calée sur des données de répartition azimut/distance très réduite.

Les PGA utilisés ont été des PGA **pour des stations supposées au rocher** à des distances de moins de 300 km. Nous avons donc limité les données aux stations de Mayotte YTMZ et MDZA, aux stations des Comores CAB et MOIN et à la station des Glorieuses GGLO.

Un calcul utilisant aussi les stations de Mayotte à effets de site (PMZI, KNKL, MTSB, R1EE2, MCHI, MILA) aurait pu être fait. Mais :

- la relation obtenue ne pourrait pas être comparée avec les GMPE existantes au rocher ;
- l'écart type sur la relation serait bien plus large ;
- la relation obtenue ne pourrait être utilisée pour des scénarios de dommages qui rajoutent les effets de site à partir de cartes d'amplification de sol.

Les PGA au rocher observés sont comparés à huit relations GMPE pour les magnitudes 3,4,5 et 5.8 et des distances de 10 à 300 km. **Aucune de ces lois n'est compatible avec les observations** sur toute la gamme de magnitude et distance. La relation Atkinson & Boore (2005) reste la moins mauvaise pour les magnitudes Mw 3.0 à 5.0. Pour les seules observations de magnitude Mw 5.8-5.9 que l'on a, la relation sous-estime le PGA.

La relation Ambraseys *et al.* (2005) utilisée par le REVOSIMA pour les communiqués de séismes ressentis surestime le PGA pour les magnitudes inférieures à 5 et les distances hypocentrales 20-60 km qui concernent Mayotte. C'est encore plus accentué si M_{lv} est utilisé en supposant $M_{lv} = M_w$.

La recherche de relations spécifiques calées sur les PGA observés est donc nécessaire.

Pour cette loi $\text{Log(PGA)} = f(\text{Magnitude, distance})$, nous nous sommes basés sur les mêmes formules que Beauducel *et al.* (2011) pour la relation bcube aux Antilles ; Seuls les coefficients changent. Il faut définir le type de magnitude et le type de distance à utiliser. Nous avons choisi deux magnitudes :

- M_{lv} , magnitude locale utilisée avec les stations proches par les réseaux locaux de surveillance ;
- M_w , magnitude de moment, utilisée par les relations GMPE classiques.

Les données sont insuffisantes pour avoir une conversion fiable de M_{lv} vers M_w : nous avons choisi une conversion fixe $M_w = M_{lv} - 0.4$ qui se cale à peu près avec les magnitudes de moment GCMT. Cette conversion est arbitraire pour les magnitudes M_w 3.0 -4.0 pour lesquelles nous n'avons aucun point de comparaison.

Nous avons deux types de distance possible :

- distance hypocentrale ;
- distance épacentrale.

La différence n'est vraiment significative que pour l'essai le plus à l'ouest, plus proche de Mayotte.

Nous proposons donc **4 lois $\text{Log(PGA)} = f(\text{Magnitude, distance})$ pour les M_w/R_{hypo} , $M_w/R_{\text{épi}}$, M_l/R_{hypo} et $M_l/R_{\text{épi}}$**

Il n'y a pas de liste exhaustive de séismes ressentis à Mayotte durant cette crise donnée par le BCSF ou le CSEM, notamment sur les premiers mois de crise. Les comparaisons avec notre catalogue montrent qu'un **seuil de PGA de 1 mg sur la station au rocher de YTMZ à Mayotte pourraient correspondre à un seuil de sismicité ressenti.**

Ce seuil de perception serait pour des séismes de magnitude $M_l \sim 3.7-3.8$ vers l'essai ouest et $M_l \sim 4.1-4.2$ pour l'essai est. On aurait plus de 800 séismes susceptibles d'être ressentis dans l'île depuis le 10 mai 2018.

Pour obtenir une relation Intensité = f (magnitude, distance) il faut appliquer une relation de conversion entre le PGA et l'Intensité. Nous avons choisi la relation Caprio *et al.* (2015) qui est une relation mise au point avec un très grand nombre de données mondiales et qui est la relation utilisée en France métropolitaine pour les Shakemaps du BCSF.

Pour prendre en compte les effets de site possible, nous multiplions la valeur de PGA au rocher par un facteur 3 qui correspond à des amplifications fortes observées sur des données de stations sismiques à Mayotte pendant la crise (Baillet, 2020) Le chapitre 5 proposent donc 4 lois Intensité=f (magnitude, distance) pour des PGA moyens au rocher, et des lois 4 lois pour des intensités pouvant être atteintes sur des zones à effet de site fort.

Ces relations peuvent donc être utilisées comme on le souhaite : avec magnitude locale ou magnitude de moment, avec distance épacentrale ou hypocentrale, pour des sites au rocher ou avec effet de site.

7. Références bibliographiques

Akkar S, Sandikkaya MA, Bommer JJ (2014) - Empirical ground-motion models for point- and extended source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bull Earthq Eng* 12:359–387.

Ambraseys, N. N., Douglas, J., Sarma, S. K. et al. (2005) - Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 3(1): 1–53.

Atkinson, G. M. (2010) - Ground motion prediction equations for Hawaii from a referenced empirical approach. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(2):751-761, Apr 2010. doi: 10.1785/0120090098.

Atkinson G, Boore D (2006) - Earthquake ground-motion prediction equations for eastern North America. *Bull Seismol Soc Am* 96:2181–2205.

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 Master Sciences de la Terre et des planètes, Environnement. Université Grenoble Alpes.

Beauducel F., Bazin S., Bengoubou-Valérius M. et al. (2011) - Empirical model for rapid macroseismic intensities prediction in Guadeloupe and Martinique. *C. R. Geoscience* (2011), doi:10.1016/j.crte.2011.09.004.

Bertil, D., Roullé, A., Lemoine, A. et al. (2019a) - MAYEQSwarm2019 : BRGM earthquake catalogue for the Earthquake Swarm located East of Mayotte. 2018 May 10th - 2019 May 15th, <https://doi.org/10.18144/rmg1-ts50>.

Bertil D., Lemoine A. et Roullé A. (2019b) - Evaluation d'un niveau d'aléa sismique probabiliste à Mayotte et à la Réunion. Rapport final. Rapport BRGM/RP69481-FR, 93 p, 37 fig., 14 tab.

Bindi D., Massa M., Luzi L. et al. (2014) - Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods up to 3.0 using the RESORCE dataset, *Bulletin Earthquake Engineering*, 12, 391-430, doi : 10.1007/s10518-013-9525-5.

Campbell, K. W. and Y. Bozorgnia (2008) - “NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s”, *Earthquake Spectra*, 24(1): 139-171.

Caprio M., Tarigan B., Worden C.B. et al. (2015) - Ground Motion to Intensity Conversion Equations (GMICEs): A Global Relationship and Evaluation of Regional Dependency. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 105, No. 3, pp. –, June 2015, doi: 10.1785/0120140286.

Chiou B, Youngs RR (2008) - An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthq Spectra* 24(1):173–215.

Gutenberg, B., Richter, C., (1942) - Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 32 (3), 163–191.

Lemoine A., Briole P., Bertil D. et al. (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*, Volume 223, Issue 1, October 2020, Pages 22–44, <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa273>.

Mercury N., Lemoine A., Bertil D. et al. (2020) - The 2018-2020 seismo-volcanic crisis, east of Mayotte, Comoros islands: in-depth study of poorly instrumented first months of crisis. Virtual poster V040-0007. AGU Fall meeting, 1-17 Decembre 2020.

Michon, L., (2016) - The Volcanism of the Comoros Archipelago Integrated at a Regional Scale. In: *Active Volcanoes of the Southwest Indian Ocean, Active Volcanoes of the World*. P. Bachelery et al (Eds.).

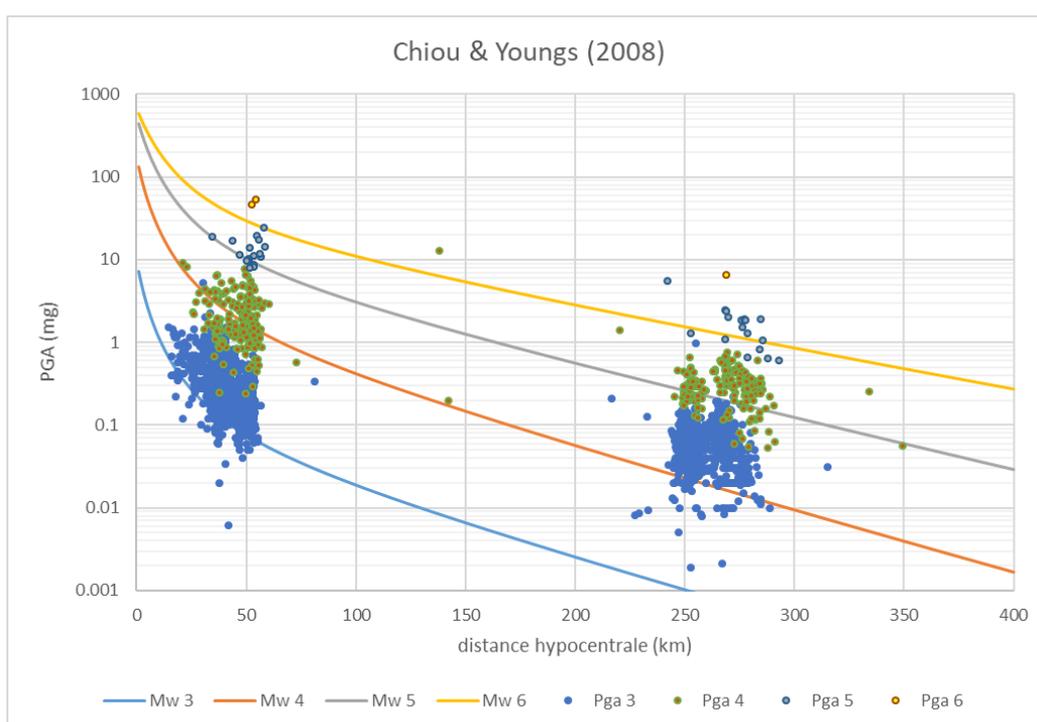
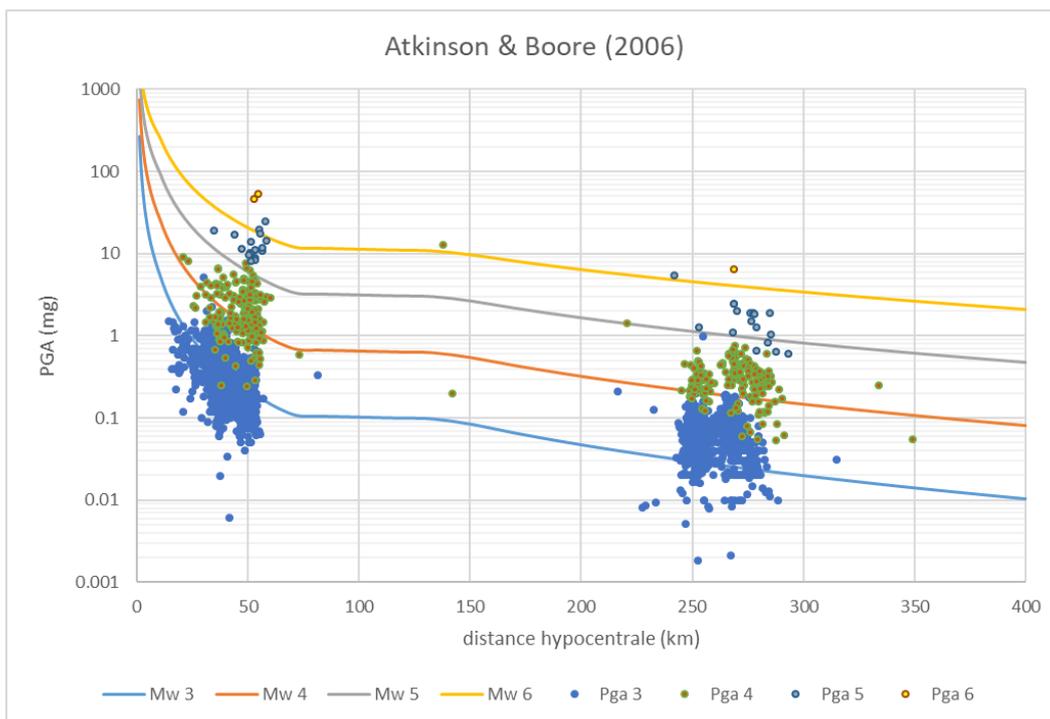
Pezeshk S, Zandieh A, Tavakoli B (2011) - Hybrid empirical ground-motion prediction equations for eastern North America using NGA models and updated seismological parameters. *Bull Seismol Soc Am* 101:1859–1870.

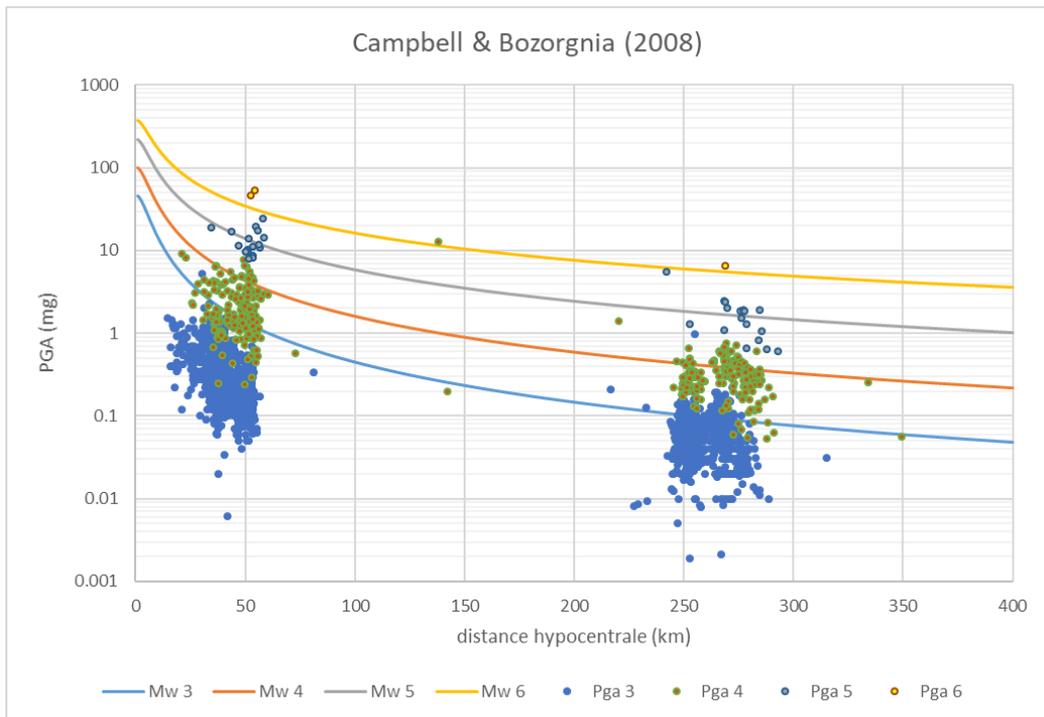
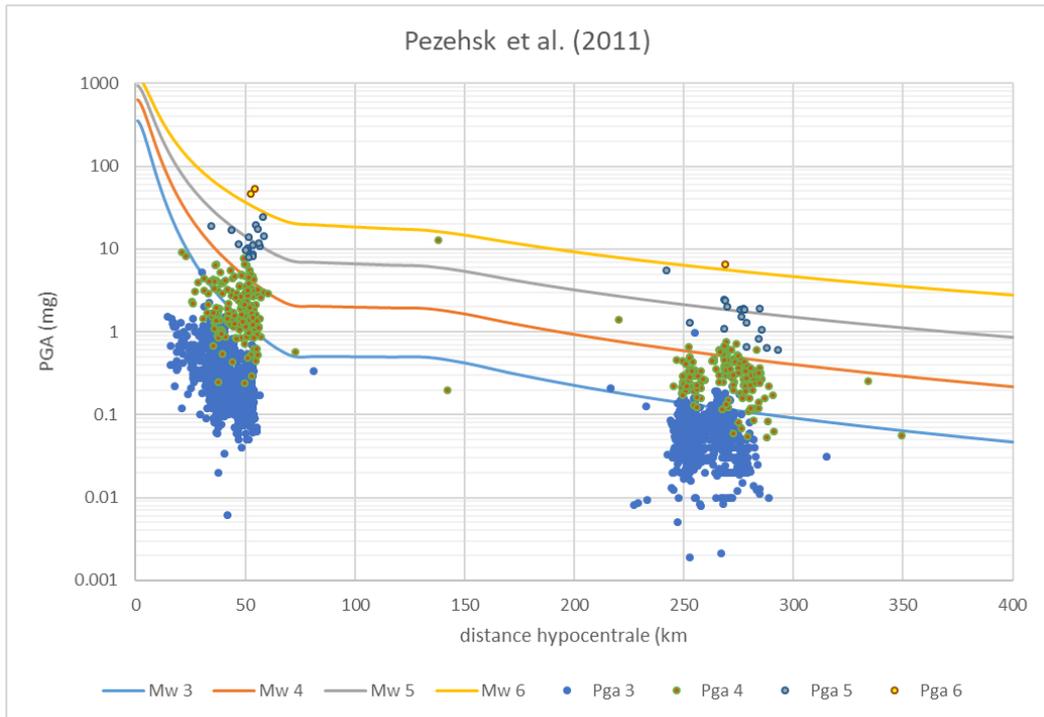
Sira C., A. Schlupp, M. Bontemps et al. (2018) - Essaim sismique à l'est de Mayotte. Analyse pour la période du 10 mai au 15 juin 2018, Note préliminaire du BCSF-RENASS, BCSF-RENASS2018-R4, 62 pages, 4 tableaux, 47 Fig., 5 annexes.

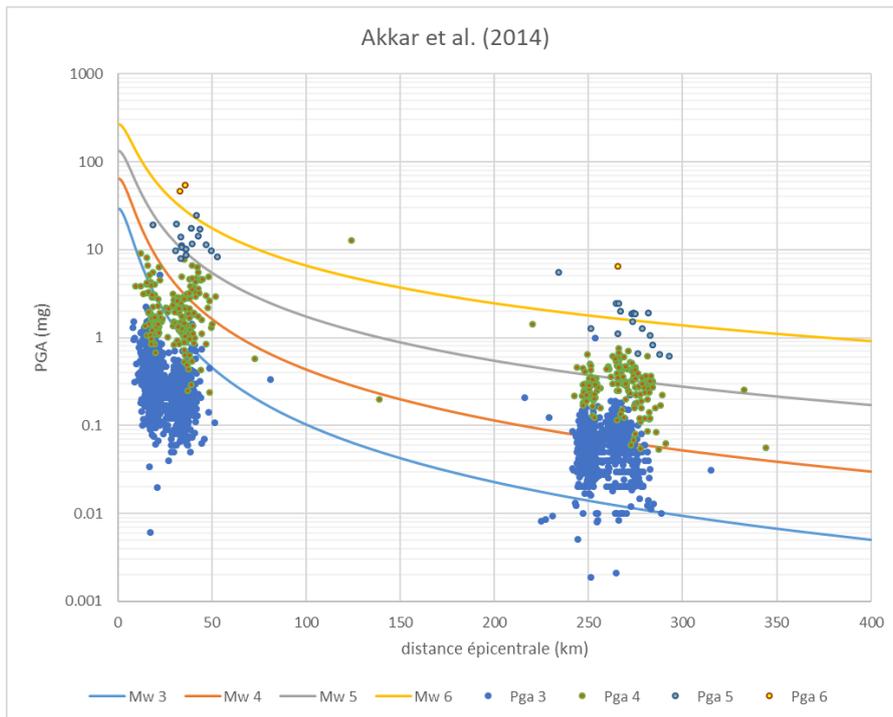
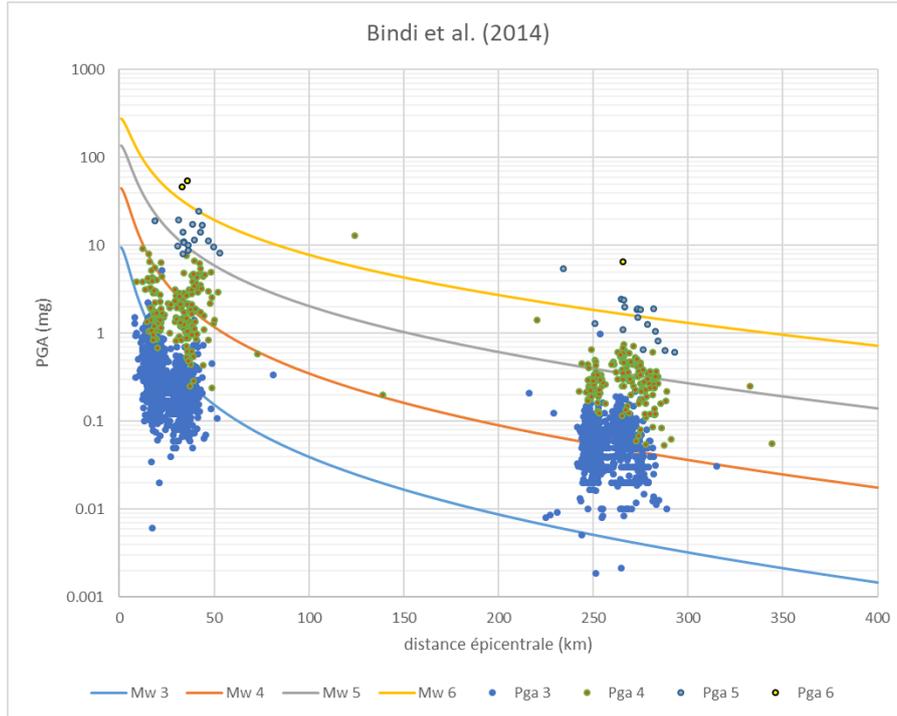
Annexe 1

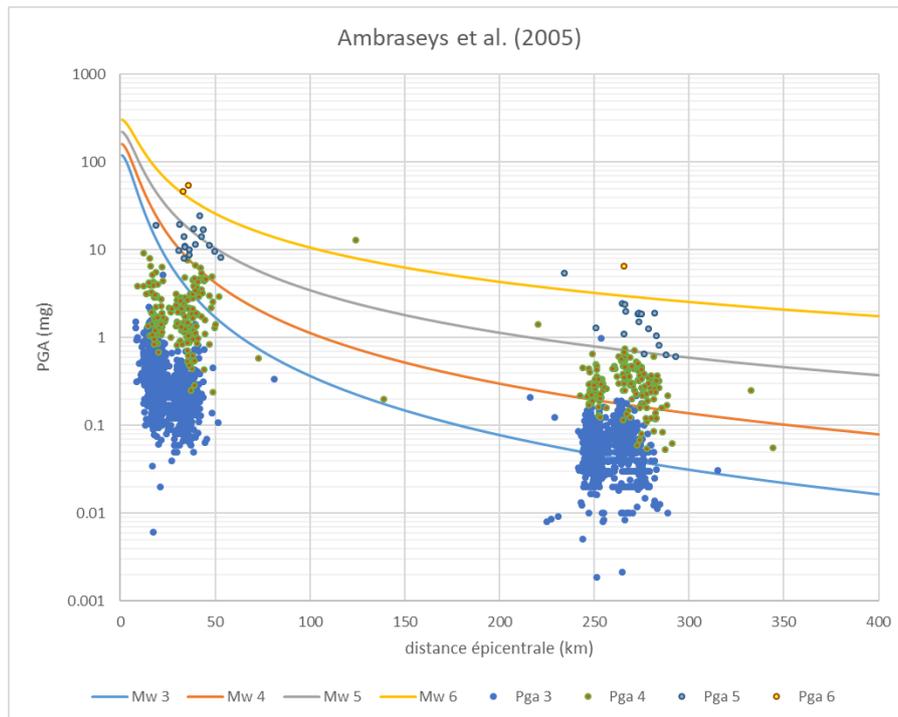
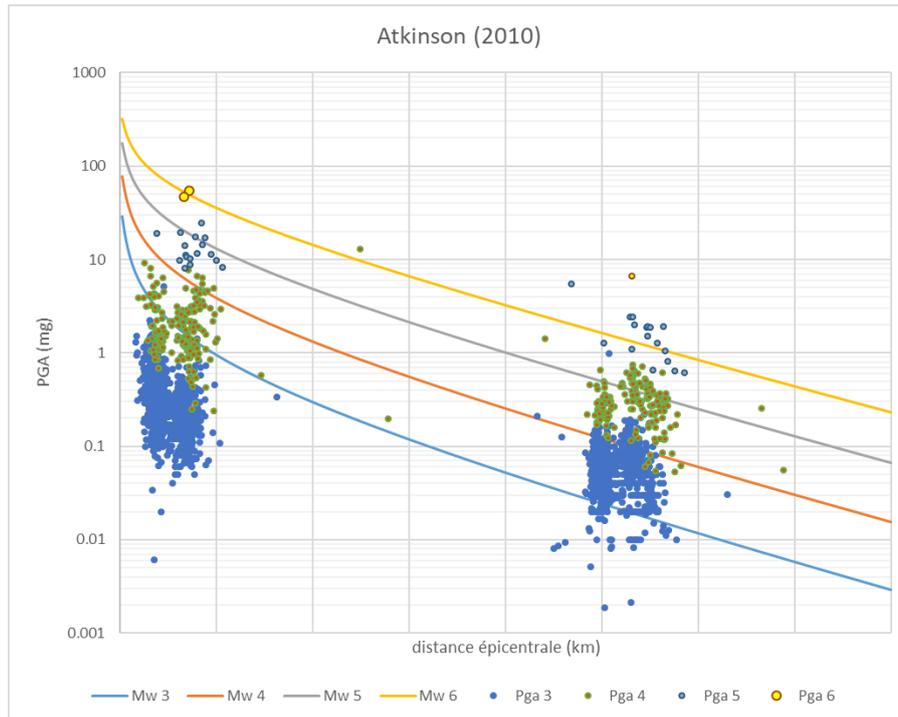
Comparaison des données accélérométriques avec les lois d'atténuation (GMPE) sélectionnées

Les graphiques suivant permettent la comparaison entre les lois d'atténuation et les données mesurées. Il s'agit de graphiques PGA (en milli-g)/distance (km).





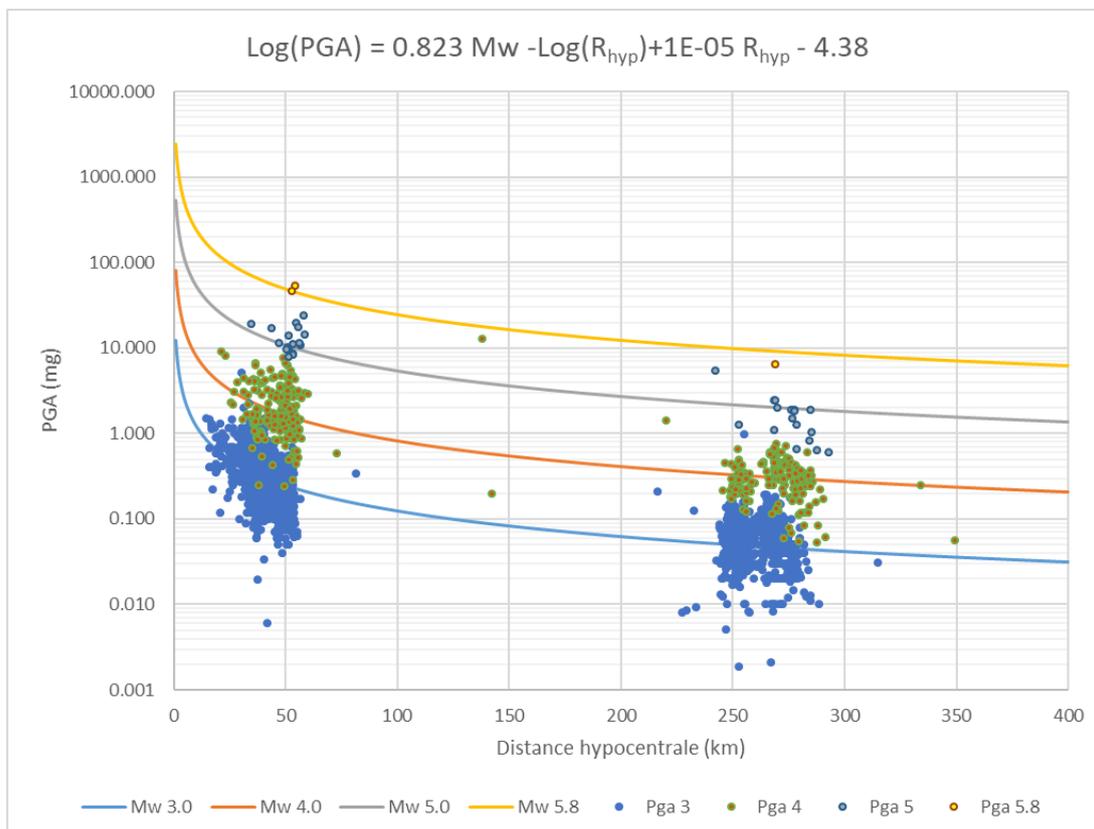
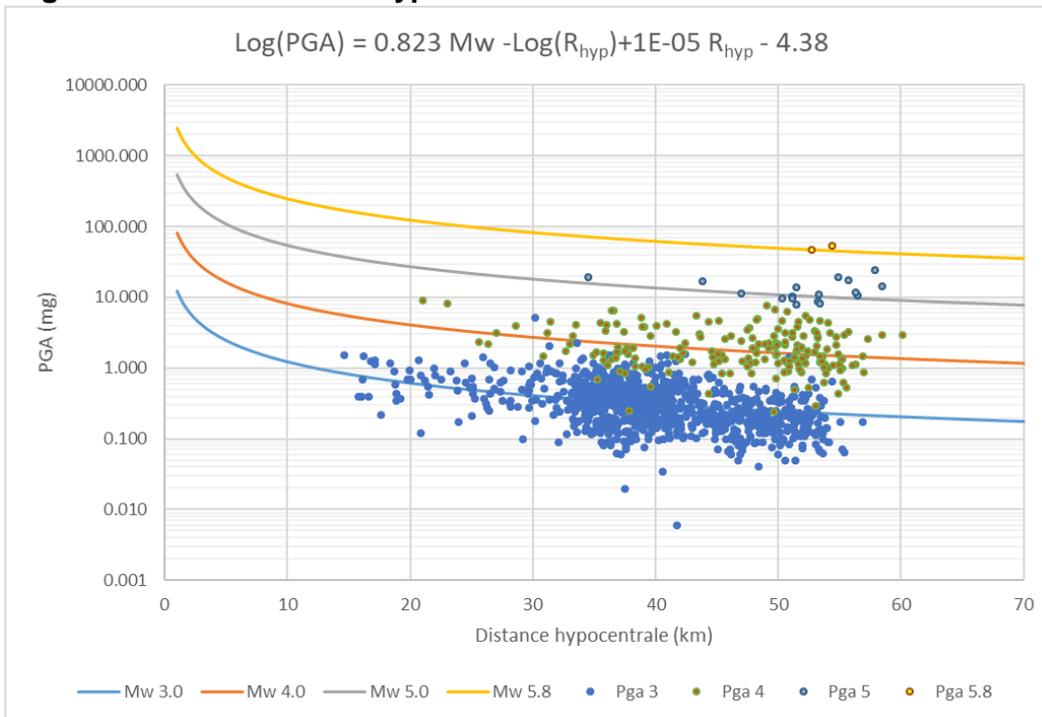




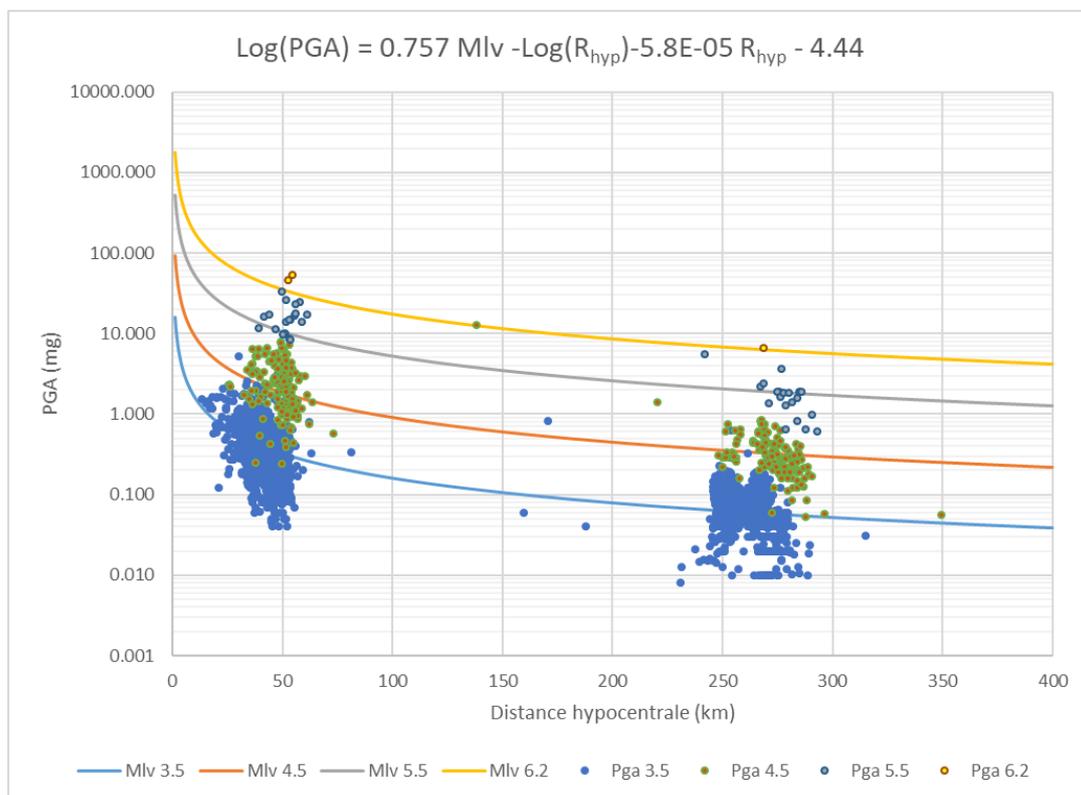
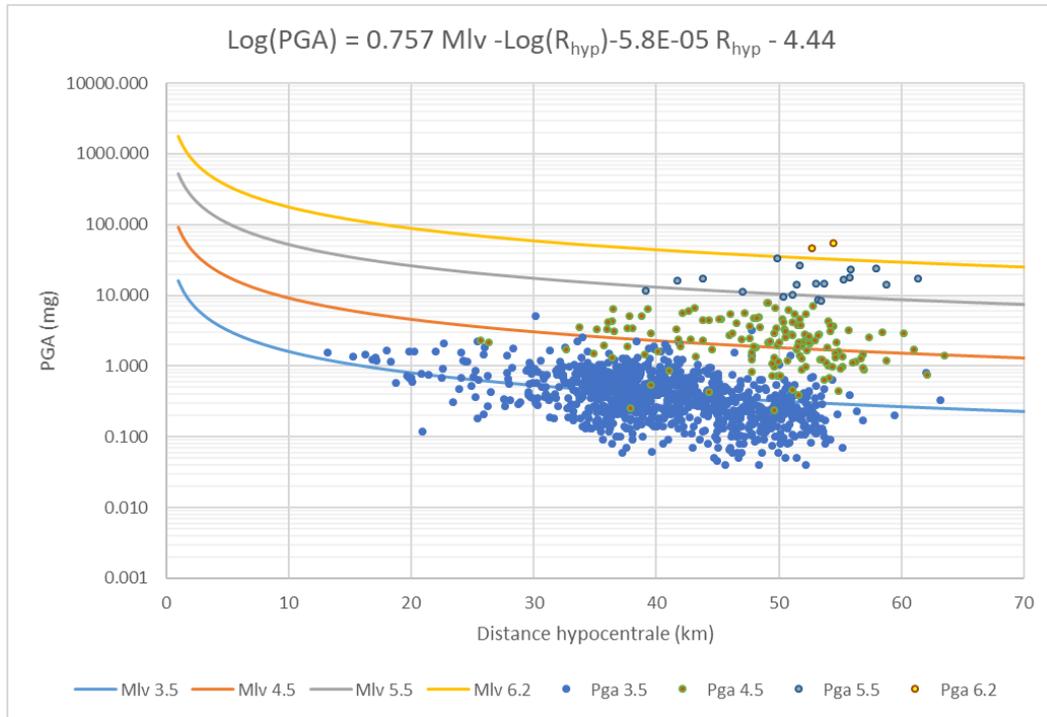
Annexe 2

Comparaison des données accélérométriques avec les relations $\text{Log(PGA)}=f(M,R)$

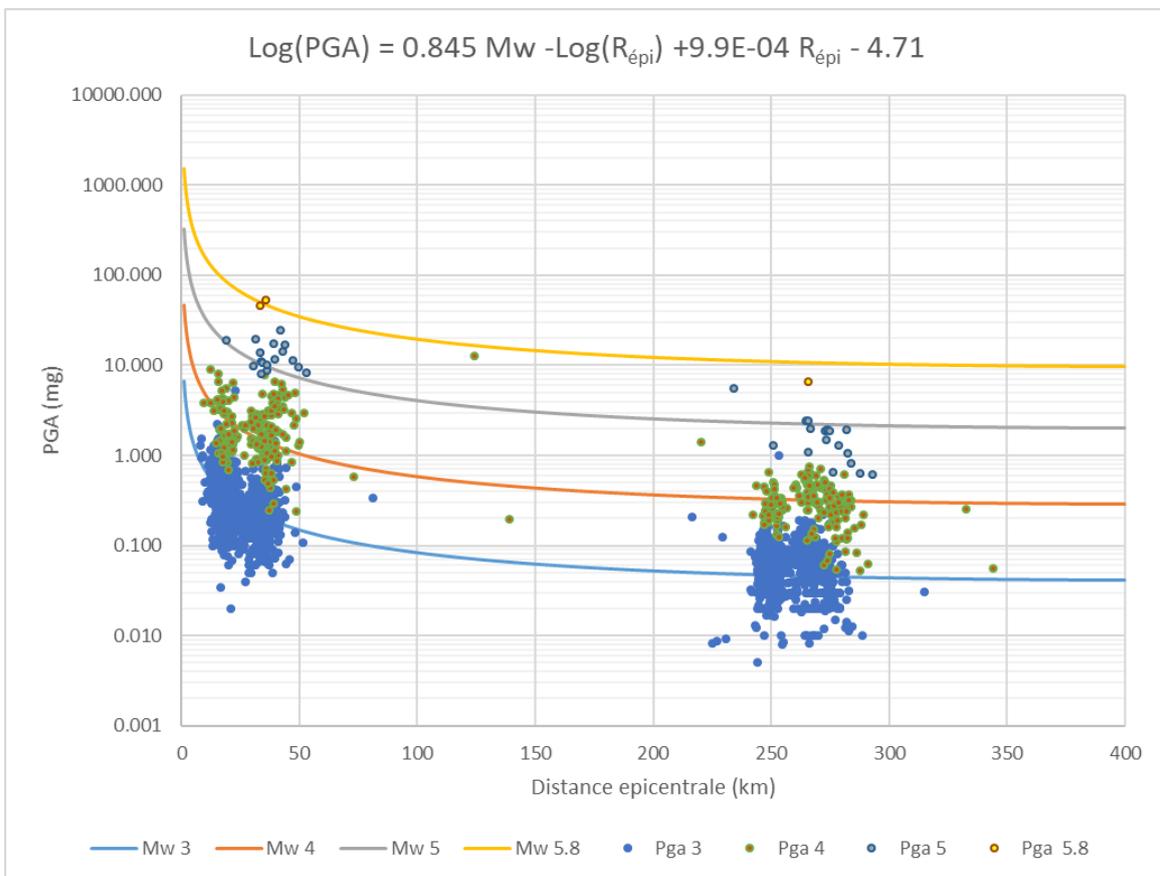
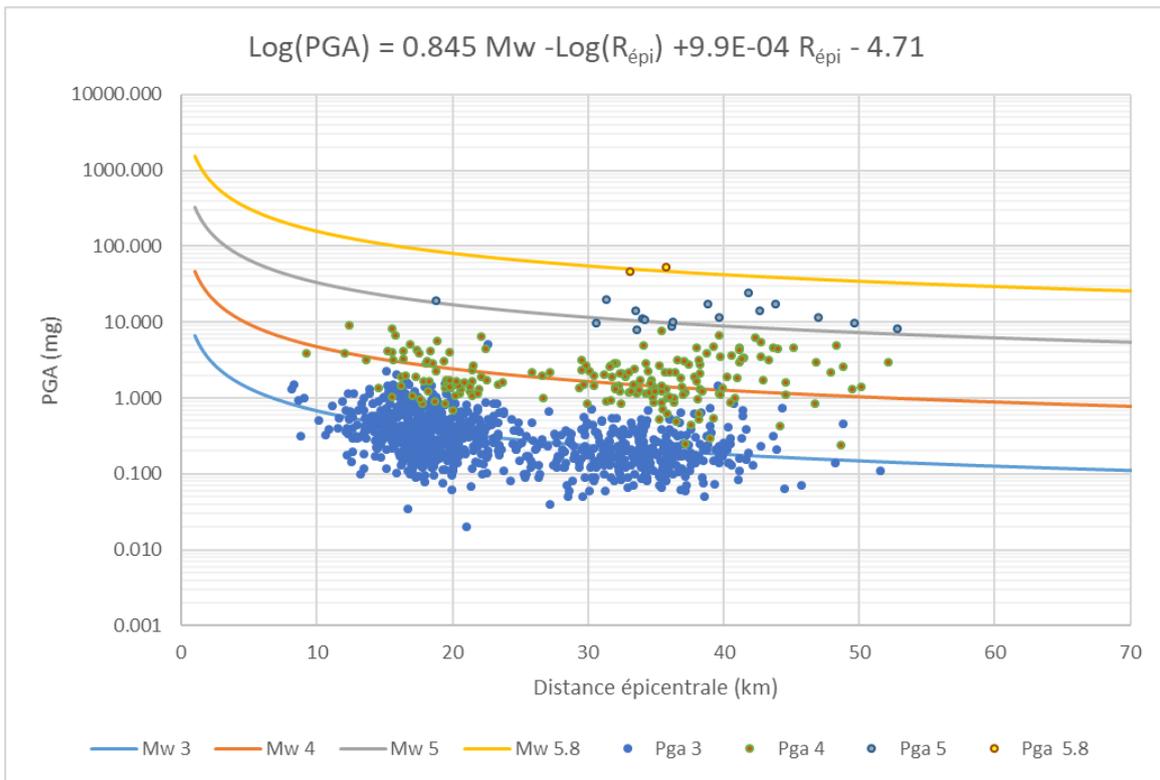
Pour Magnitude Mw et Distance hypocentrale



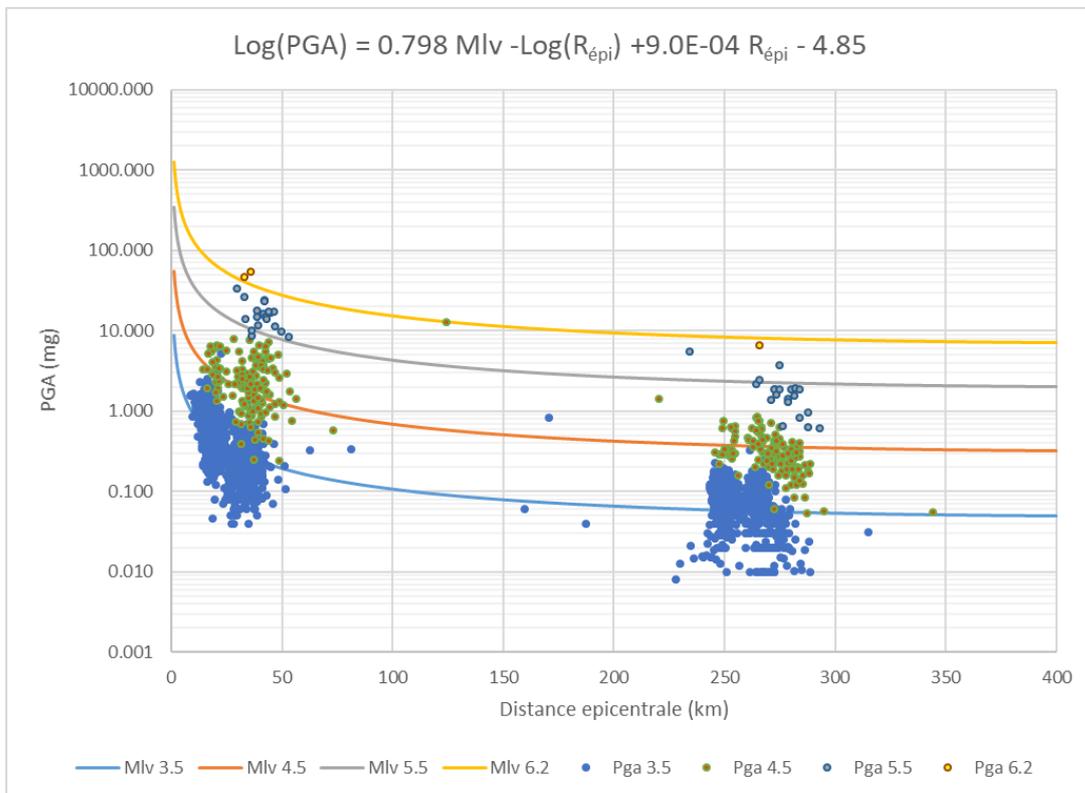
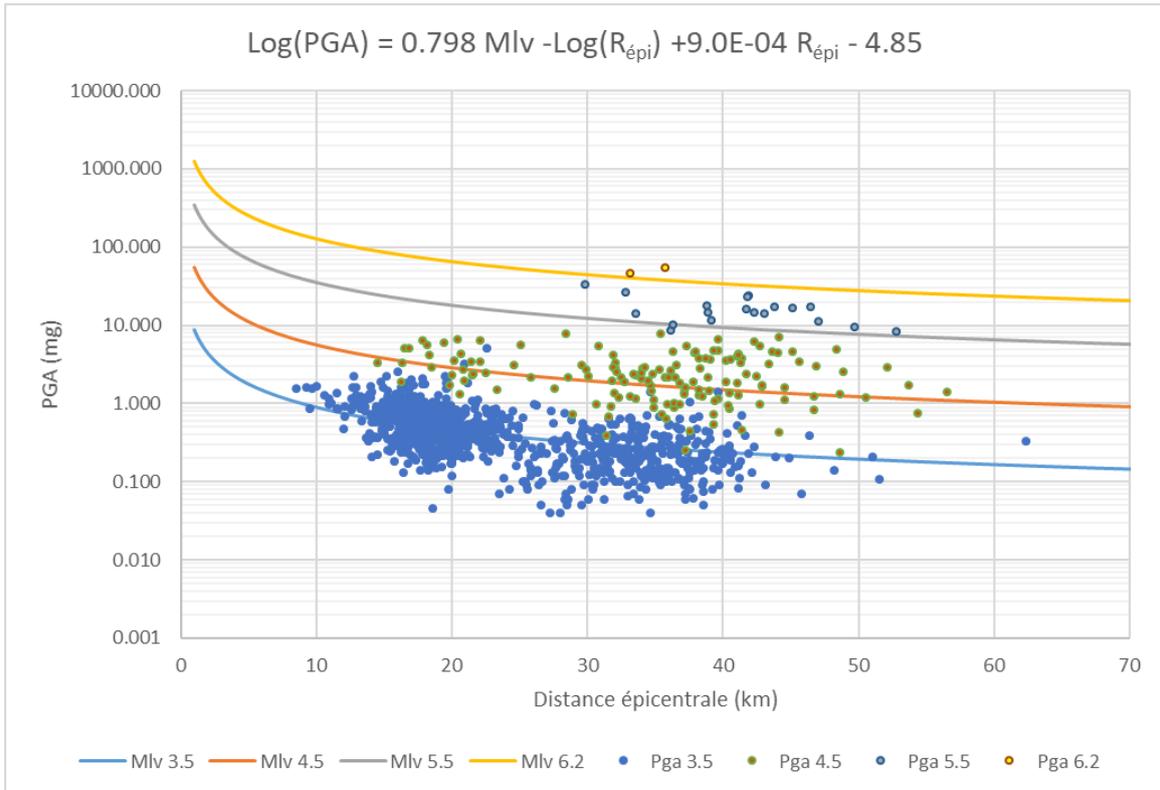
Pour Magnitude M_{lv} et Distance hypocentrale



Pour Magnitude Mw et Distance épacentrale



Pour Magnitude M_{lv} et Distance épicentrale



Annexe 3

Abaques Intensité/magnitude/distance

Intensités EMS98*		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X, XI, XII
dégâts potentiels	bâtiments vulnérables	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	modérés	quelques effondrements partiels	nombreux effondrements partiels	nombreux effondrements	effondrements généralisés
	bâtiments peu vulnérables	aucun	aucun	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	modérés	effondrements partiels	effondrements nombreux à généralisés
perception humaine		non ressenti	très faible	faible	modérée	forte	brutale	très brutale	sévère	violente	extrême

Intensité pour site au rocher, Magnitude Mw, distance hypocentrale

Mw/Rhypo	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5	5.2	5.4	5.6	5.8	6	6.2
10	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.8	5.3	5.9	6.5	7.1	7.8	8.4	9.0
20		2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.4	6.0	6.6	7.2	7.9
30			2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.3	5.9	6.6	7.2
40			2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7	4.8	5.5	6.1	6.7
50				2.1	2.3	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1	5.7	6.4
60					2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.7	4.8	5.4	6.1
70					2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.2	5.8
80					2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9	5.6
90						2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.4
100						2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.6	4.8	5.2
110						2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.8	5.0
120						2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9
130							2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6	4.8
140							2.1	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.9
150							2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8
160							2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8
170							2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.5	4.7
180							2.0	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7
190								2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6
200								2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6
210								2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6
220								2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5
230								2.1	2.3	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5
240								2.0	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5
250								2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.4
260								2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4
270								2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4
280									2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4
290									2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.3
300									2.1	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3

Intensité pour zone à effet de site fort, Magnitude Mw, distance hypocentrale

Mw/Rhypo	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5	5.2	5.4	5.6	5.8	6	6.2
10	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.2	5.8	6.4	7.0	7.7	8.3	8.9	9.6	10.2	10.8
20	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.9	5.3	5.9	6.5	7.2	7.8	8.4	9.0	9.7
30	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.8	5.2	5.9	6.5	7.1	7.7	8.4	9.0
40	2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.4	6.0	6.6	7.3	7.9	8.5
50	2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0	5.6	6.3	6.9	7.5	8.2
60		2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.3	6.0	6.6	7.2	7.9
70			2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1	5.7	6.3	7.0
80			2.0	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7	4.9	5.5	6.1	6.7
90				2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.3	5.9	6.5
100				2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1	5.7	6.4
110				2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0	5.6	6.2
120					2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.7	4.8	5.4	6.1
130					2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.3	5.9
140					2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.6	4.8	5.2	5.8
150					2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1	5.7
160					2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0	5.6
170					2.0	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7	4.9	5.5
180					2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6	4.8	5.4	6.0
190					2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.3	5.9
200					2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.8	5.2	5.9
210					2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.1	5.8
220					2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1	5.7
230					2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0	5.6
240					2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9	5.6
250					2.0	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7	4.9	5.5
260						2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.7	4.8	5.4
270						2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.4
280						2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.3
290						2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.8	5.2
300						2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.2

Intensités EMS98*		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X, XI, XII
dégâts potentiels	bâtiments vulnérables	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	modérés	quelques effondrements partiels	nombreux effondrements partiels	nombreux effondrements	effondrements généralisés
	bâtiments peu vulnérables	aucun	aucun	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	modérés	effondrements partiels	effondrements nombreux à généralisés
perception humaine		non ressenti	très faible	faible	modérée	forte	brutale	très brutale	sévère	violente	extrême

Intensité pour site au rocher, Magnitude Mw, distance épacentrale

Mw/Repi	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5	5.2	5.4	5.6	5.8	6	6.2
10	2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1	5.7	6.4	7.0	7.7	8.3
20			2.1	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.6	4.9	5.3	5.9	6.6	7.2
30				2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.6	4.9	5.3	5.9	6.6
40					2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.7	4.8	5.5	6.1
50					2.0	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.2	5.8
60						2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7	4.9	5.5
70						2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.9	5.3
80						2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1
90							2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	5.0
100							2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.7	4.8
110							2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9
120							2.1	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.6	4.8
130							2.0	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8
140							2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.8
150							2.0	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	4.7
160								2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7
170								2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.7
180								2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7
190								2.1	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6
200								2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6
210								2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6
220								2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.6
230								2.1	2.3	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.3	4.6
240								2.0	2.3	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.3	4.5
250								2.0	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	4.0	4.3	4.5
260								2.0	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5
270								2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5
280								2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5
290								2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5
300								2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5

Intensité pour zone à effet de site fort, Magnitude Mw, distance épacentrale

Mw/Repi	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5	5.2	5.4	5.6	5.8	6	6.2
10	2.8	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	5.0	5.6	6.2	6.9	7.5	8.2	8.8	9.5	10.1
20	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1	5.8	6.4	7.1	7.7	8.4	9.0
30	2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1	5.8	6.4	7.1	7.7	8.4
40		2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.9	5.4	6.0	6.6	7.3	7.9
50			2.0	2.2	2.5	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0	5.7	6.3	7.0
60				2.1	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.8	5.4	6.0	6.7
70				2.0	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.2	5.8	6.5
80				2.0	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0	5.6	6.3
90					2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.7	4.8	5.5	6.1
100					2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.9	5.4	6.0
110					2.0	2.3	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.3	4.6	4.8	5.2	5.9
120					2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1	5.8
130					2.0	2.2	2.5	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0	5.7
140						2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9	5.6
150						2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.7	4.9	5.5
160						2.1	2.4	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6	4.8	5.4
170						2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.4
180						2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.9	5.3
190						2.1	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.6	4.9	5.3
200						2.0	2.3	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.3	4.6	4.8	5.2
210						2.0	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.2
220						2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1
230						2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1
240						2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1
250						2.0	2.2	2.5	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.0
260						2.0	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0
270							2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0
280							2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	5.0
290							2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	5.0
300							2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7	4.9

Intensités EMS98*		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X, XI, XII
dégâts potentiels	bâtiments vulnérables	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	modérés	quelques effondrements partiels	nombreux effondrements partiels	nombreux effondrements	effondrements généralisés
	bâtiments peu vulnérables	aucun	aucun	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	modérés	effondrements partiels	effondrements nombreux à généralisés
perception humaine		non ressenti	très faible	faible	modérée	forte	brutale	très brutale	sévère	violente	extrême

Intensité pour site au rocher, Magnitude Mlv, distance hypocentrale

Mlv/Rhypo	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5	5.2	5.4	5.6	5.8	6	6.2	6.4	6.6
10	2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.7	5.0	5.5	6.1	6.7	7.3	7.8	8.4
20			2.0	2.3	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.7	5.0	5.5	6.1	6.7	7.3
30				2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.7	4.9	5.4	6.0	6.6
40					2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.7	5.0	5.5	6.1
50						2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3	4.6	4.8	5.2	5.7
60						2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.7	4.9	5.4
70							2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3	4.6	4.8	5.2
80							2.0	2.3	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.7	5.0
90								2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.4	3.7	3.9	4.2	4.4	4.7	4.8
100								2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3	4.6	4.8
110								2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.8
120								2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.4	4.7
130									2.1	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.4	4.6
140									2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3	4.6
150									2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5
160									2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5
170									2.0	2.2	2.5	2.7	2.9	3.2	3.4	3.7	3.9	4.2	4.4
180										2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.4	3.7	3.9	4.2	4.4
190										2.1	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.4
200										2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3
210										2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3
220										2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3
230										2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2
240											2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.4	3.7	3.9	4.2
250											2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.4	3.7	3.9	4.2
260											2.1	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1
270											2.1	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1
280											2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1
290											2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1
300											2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0

Intensité pour zone à effet de site fort, Magnitude Mlv, distance hypocentrale

Mlv/Rhypo	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5	5.2	5.4	5.6	5.8	6	6.2	6.4	6.6
10	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.8	5.0	5.3	6.1	6.7	7.3	7.9	8.5	9.0	9.6	10.2
20	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.8	5.0	5.6	6.1	6.7	7.3	7.9	8.5	9.0
30	2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.7	4.9	5.5	6.1	6.6	7.2	7.8	8.4
40		2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.8	5.0	5.6	6.2	6.7	7.3	7.9
50			2.1	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.3	4.6	4.8	5.2	5.8	6.4	6.9	7.5
60			2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.7	4.9	5.5	6.1	6.6	7.2
70				2.1	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.4	4.6	4.9	5.2	5.8	6.4	6.9
80				2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.8	5.0	5.6	6.1	6.7
90					2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.4	3.7	3.9	4.2	4.4	4.7	4.8	5.4	5.9	6.5
100					2.1	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.8	4.1	4.3	4.6	4.8	5.2	5.8	6.4
110					2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.8	5.0	5.6	6.2
120					2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.7	4.9	5.5	6.0
130						2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.4	3.7	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9	5.3	5.9
140						2.1	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.4	4.6	4.9	5.2	5.8
150						2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3	4.6	4.8	5.1	5.7
160						2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.8	5.0	5.6
170						2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.7	4.9	5.5
180							2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.4	3.7	3.9	4.2	4.4	4.7	4.8	5.4
190							2.1	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.4	4.6	4.9	5.3
200							2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3	4.6	4.8	5.2
210							2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3	4.6	4.8	5.1
220							2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.8	5.0
230							2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.7	4.9
240							2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.7	4.9
250								2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.4	3.7	3.9	4.2	4.4	4.7	4.8
260								2.2	2.4	2.7	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.4	4.6	4.9
270								2.1	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.4	4.6	4.9
280								2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3	4.6	4.8
290								2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3	4.6	4.8
300								2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.8

Intensités EMS98*		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X, XI, XII
dégâts potentiels	bâtiments vulnérables	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	modérés	quelques effondrements partiels	nombreux effondrements partiels	nombreux effondrements	effondrements généralisés
	bâtiments peu vulnérables	aucun	aucun	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	modérés	effondrements partiels	effondrements nombreux à généralisés
perception humaine		non ressenti	très faible	faible	modérée	forte	brutale	très brutale	sévère	violente	extrême

Intensité pour site au rocher, Magnitude Mlv, distance épacentrale

Mlv/Repi	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5	5.2	5.4	5.6	5.8	6	6.2	6.4	6.6
10			2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9	5.5	6.1	6.7	7.3	7.9
20					2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0	5.6	6.2	6.8
30						2.1	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.7	4.9	5.5	6.2
40							2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.1	5.7
50							2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.6	4.8	5.4
60								2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.1
70								2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9
80								2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9
90									2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.8
100									2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8
110									2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7
120									2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7
130									2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3	4.6
140										2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6
150										2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5
160										2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5
170										2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5
180										2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5
190										2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.4
200										2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.4
210										2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4
220										2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4
230										2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3
240										2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.3
250										2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.3
260											2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3
270											2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3
280											2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3
290											2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3
300											2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3

Intensité pour zone à effet de site fort, Magnitude Mlv, distance épacentrale

Mlv/Répi	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5	5.2	5.4	5.6	5.8	6	6.2	6.4	6.6
10	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7	4.9	5.4	6.0	6.7	7.3	7.9	8.5	9.1	9.7
20		2.1	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.7	4.9	5.5	6.2	6.8	7.4	8.0	8.6
30			2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9	5.5	6.1	6.7	7.3	8.0
40				2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.1	5.7	6.3	6.9	7.5
50				2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.3	6.0	6.6	7.2
60					2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.1	5.7	6.3	6.9
70					2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9	5.5	6.1	6.7
80					2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.3	5.9	6.5
90						2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.1	5.7	6.3
100						2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0	5.6	6.2
110						2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9	5.5	6.1
120						2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.4	6.0
130						2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.3	5.9
140							2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.8	5.2	5.8
150							2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.1	5.7
160							2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.0	5.6
170							2.1	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.7	4.9	5.6
180							2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9	5.5
190							2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7	4.9	5.4
200							2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7	4.9	5.4
210							2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.3
220							2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.3
230							2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.3
240							2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.8	5.2
250								2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.8	5.2
260								2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	4.8	5.2
270								2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.8	5.1
280								2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.1
290								2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.1
300								2.1	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1

Annexe 4

PGA observés pour les séismes de magnitude $M_{lv} \geq 5.0$

Colonnes du tableau :

Idseiscomp : identifiant BRGM du séisme

Temps origine/longitude/latitude/profondeur : localisation associée

Mw_u : Magnitude de moment unifiée du catalogue de sismicité

Mlv : Magnitude locale sur composante verticale

Mlh : Magnitude locale sur composante horizontale

Mb_{usgs} : Magnitude d'onde de volume données dans les catalogue de l'USGS

Mw_{GCMT} : Magnitude de moment calculée par GCMT

Dist hypo YTMZ: distance hypocentrale (en km) par rapport à la station YTMZ (Mamoudzou)

Dist epi YTMZ: distance épacentrale (en km) par rapport à la station YTMZ (Mamoudzou)

YTMZ/MDZA/CAB/MOIN/GGLO : PGA en mg sur les stations (maximum sur une des composantes horizontales).

Loi Intensité Magnitude pour Mayotte

Idseiscomp	Temps Origine	Longit	Latitu	Pr	Mw	Mlv	Mlh	mb	MW	dist l	dist c	YTN	MD	CA	MO	GGI
brgm2018jhng	13/05/2018 04:28:04	45.505	-12.781	41	4.7	5.2	4.9	4.6		51	30	5.2	7.3	1.2	0.7	
brgm2018jkcz	14/05/2018 14:41:44	45.566	-12.755	39	5.2	5.7	5.4	5.1	5.2	53	36	18.6	14.4	2.8	2.0	
brgm2018jmas	15/05/2018 15:48:10	45.561	-12.769	41	5.6	6.0	5.8	5.8	5.9	54	36	54.0	46.6	6.5		
brgm2018jmpps	15/05/2018 23:24:02	45.539	-12.781	41	4.2	4.5	4.4			53	34	2.3	5.4	0.8		
brgm2018jodp	16/05/2018 19:32:48	45.533	-12.774	39	4.1	4.7	4.3	4.3		51	33	4.1	5.8	0.5		
brgm2018jqt	18/05/2018 05:58:56	45.673	-12.754	29	4.6	5.0	4.8	4.3		56	48	3.4	5.6	0.8		
brgm2018jtft	19/05/2018 14:19:03	45.506	-12.859	40	4.2	4.5	4.4			51	32	4.2	7.9	0.8		
brgm2018jtsz	19/05/2018 21:00:03	45.526	-12.861	41	5.0	5.4	5.2	4.9	4.9	53	34	11.1	9.8	2.0		
brgm2018juou	20/05/2018 08:01:29	45.583	-12.808	30	5.3	5.8	5.5	5.3	5.4	49	39	9.2	9.8	3.6		
brgm2018jvvz	21/05/2018 00:47:15	45.537	-12.804	39	5.4	5.9	5.6	5.5	5.5	52	34	7.8	15.1	3.8		
brgm2018jvwg	21/05/2018 00:54:52	45.537	-12.781	40	4.4	4.8	4.6	4.6		52	33	4.6	7.4	0.8		
brgm2018jvwo	21/05/2018 01:04:18	45.535	-12.781	41	4.4	4.9	4.6	4.5		53	33	7.5	14.7	0.9		
brgm2018jyox	22/05/2018 12:37:09	45.545	-12.781	45	5.1	5.7	5.3	5.1	5.0	56	34	10.7	19.6	2.4	1.9	
brgm2018kasi	23/05/2018 16:40:39	45.613	-12.693	0	4.2	4.8	4.4	4.4		42	42	4.2	7.9	0.6	0.5	
brgm2018kbpj	24/05/2018 04:23:59	45.566	-12.801	45	4.7	5.2	4.9	4.8		58	37	5.4	8.7	1.6	1.1	
brgm2018kdnn	25/05/2018 05:36:13	45.552	-12.737	33	4.3	4.9	4.5			48	35	3.2	5.3	0.7	0.5	
brgm2018kdnu	25/05/2018 05:43:53	45.547	-12.816	37	4.8	5.3	5.0	4.6		51	35	7.9	7.1	1.0	0.7	
brgm2018kdnp	25/05/2018 06:36:04	45.530	-12.803	40	5.1	5.5	5.3	5.0	5.1	52	33	26.1	33.5	2.2	1.6	
brgm2018kdvi	25/05/2018 09:32:47	45.564	-12.767	39	5.0	5.5	5.2	5.2	5.0	53	36	8.8	14.1	2.4	1.9	
brgm2018kelb	25/05/2018 17:29:24	45.585	-12.762	35	4.3	4.8	4.5	4.4		52	38	2.5	5.3	0.5	0.3	
brgm2018keza	26/05/2018 00:32:40	45.616	-12.768	0	4.9	5.5	5.1	5.0	4.9	42	42	16.2	11.7	1.4	1.9	
brgm2018khvy	27/05/2018 14:23:29	45.556	-12.824	42	4.5	5.1	4.7	4.7		55	36	3.2	5.3	1.2	0.6	
brgm2018khww	27/05/2018 14:51:54	45.601	-12.776	40	4.5	4.9	4.7	4.3		57	40	6.9	17.0	1.7	0.9	
brgm2018kkgx	28/05/2018 22:12:36	45.618	-12.767	5	4.8	5.3	5.0	4.7		42	42	9.3		2.1	1.0	
brgm2018klpx	29/05/2018 15:53:37	45.607	-12.809	30	4.4	5.0	4.6	4.7		51	41	6.2	7.1	0.6	0.5	
brgm2018kmrq	30/05/2018 05:54:04	45.598	-12.817	40	5.2	5.7	5.4	5.0	5.1	57	40	26.0	22.2	2.4	3.0	
brgm2018kmtt	30/05/2018 06:52:08	45.593	-12.749	36	4.3	4.8	4.5	4.3		53	39	4.3	10.8	1.1	0.6	
brgm2018knmi	30/05/2018 16:21:39	45.620	-12.811	39	4.7	5.2	4.9	4.6		58	43	6.5	5.3	0.8	0.5	
brgm2018knry	30/05/2018 19:11:21	45.613	-12.812	37	4.6	5.1	4.8	4.7		56	42	4.5	7.5	2.0	1.2	
brgm2018kodv	31/05/2018 01:10:16	45.628	-12.825	37	4.6	5.3	4.8	4.8		57	44	6.3	3.1	0.7	1.1	
brgm2018kqds	01/06/2018 03:24:11	45.612	-12.812	5	4.8	5.2	5.0	4.7		42	42	15.7	12.3	1.3	1.1	
brgm2018kqec	01/06/2018 03:35:53	45.647	-12.781	29	4.9	5.1	5.1	4.7		54	45	31.1	32.2	1.9	1.1	
brgm2018kqhr	01/06/2018 05:25:10	45.593	-12.838	35	4.4	5.1	4.6			53	40	8.0	12.9	0.8	0.6	
brgm2018kqii	01/06/2018 05:44:14	45.616	-12.808	39	4.7	5.2	4.9	4.8		57	42	12.1	8.9	0.7	0.6	
brgm2018kqjk	01/06/2018 06:17:02	45.600	-12.798	37	4.6	5.0	4.8	4.5		55	40	9.7	9.3	1.0	0.6	
brgm2018kqlh	01/06/2018 07:14:42	45.594	-12.820	32	4.6	5.3	4.8	4.7	5.0	51	40	16.6	20.5	1.9	1.0	
brgm2018kqnt	01/06/2018 08:28:22	45.616	-12.831	33	4.6	5.1	4.8	4.6		54	43	10.2	7.2	1.0	0.6	
brgm2018ksew	02/06/2018 06:15:54	45.588	-12.830	34	4.4	5.0	4.6	4.3		52	40	3.4	6.1	0.8	0.8	
brgm2018ksfs	02/06/2018 07:42:28	45.620	-12.813	40	5.0	5.3	5.2	4.7		58	43	14.3	11.6	1.5	1.1	
brgm2018ktbk	02/06/2018 17:39:25	45.631	-12.781	29	4.8	5.2	5.0	4.7		52	43	17.7	8.6	0.9	0.8	
brgm2018kttt	03/06/2018 02:36:54	45.616	-12.809	38	4.7	5.1	4.9	4.5		57	42	7.8	5.4	0.8	0.6	
brgm2018ktut	03/06/2018 03:25:50	45.610	-12.821	37	4.7	5.1	4.9	4.6		56	42	7.0	7.0	1.0	0.6	
brgm2018kuah	03/06/2018 06:13:44	45.612	-12.818	40	5.1	5.5	5.3	5.0	5.1	58	42	24.4	17.6	1.9	1.9	
brgm2018kwuv	04/06/2018 18:52:02	45.595	-12.778	40	4.8	5.3	5.0	4.8		56	40	12.0	18.6	1.6	0.9	
brgm2018kwvv	04/06/2018 19:53:34	45.613	-12.805	37	5.1	5.6	5.3	4.9	5.0	56	42	23.2	14.7	1.9	1.6	
brgm2018kwzs	04/06/2018 21:20:30	45.646	-12.788	32	5.2	5.6	5.4	4.9		55	45	16.6	14.8	3.7	1.9	
brgm2018kyyj	05/06/2018 22:55:30	40.887	-11.891	3	4.8	5.2	5.0	5.1		482	482	0.3		7.0	0.7	
brgm2018kyyp	05/06/2018 23:02:46	45.640	-12.837	30	4.8	5.3	5.0	4.9	5.1	54	45	15.7	11.1	1.4	0.8	
brgm2018kztn	06/06/2018 09:37:04	45.636	-12.841	3	4.7	5.1	4.9	4.9	4.9	45	45	15.4	10.8	1.4	0.9	
brgm2018llhs	12/06/2018 17:17:18	45.638	-12.889	40	5.2	5.6	5.4	5.3	5.4	61	46	17.4	14.1	1.4	1.0	
brgm2018lvzr	18/06/2018 13:43:02	45.705	-12.895	30	4.7	5.2	4.9	5.0	5.1	61	54	7.8	7.3	0.7	0.3	
brgm2018mfpd	23/06/2018 19:45:46	45.626	-12.917	30	4.9	5.3	5.1	4.9	5.0	55	46	11.3	18.4	0.9	0.7	
brgm2018mjcb	25/06/2018 17:41:29	45.709	-12.849	8	4.9	5.5	5.1	5.2	5.3	53	53	8.3	9.7	0.8	0.6	
brgm2018mlxg	27/06/2018 06:40:55	45.653	-12.853	0	4.9	5.6	5.1	5.1	5.2	47	47	11.4	17.1	1.3	0.6	
brgm2018qiie	21/08/2018 05:48:01	41.469	-10.725	61	5.1	5.4	5.3	5.0		473	469	0.1		5.5		
brgm2018vuvz	07/11/2018 06:04:25	45.414	-12.764	31	4.7	5.0	4.9	4.9		37	20	9.5		0.5		
brgm2019apwa	09/01/2019 16:10:01	45.542	-12.794	40	4.7	5.1	4.9	4.9		52	34	6.6		1.8		
brgm2019gbgo	28/03/2019 01:40:08	45.386	-12.756	28	4.6	5.0	4.8	4.6		33	17	23.9				
brgm2019gqoa	05/04/2019 10:28:09	45.401	-12.788	29	5.0	5.1	5.2	5.1		35	19	19.1		1.3		
brgm2019lptl	15/06/2019 03:45:08	45.534	-12.821	39	5.0	5.1	5.2	4.8		51	34	8.0		1.1		
brgm2020abaj	01/01/2020 13:18:49	45.563	-12.800	36	5.0	5.5	5.2	4.6		51	36	10.1			0.7	
brgm2020adbe	02/01/2020 16:00:33	45.558	-12.802	36	5.2	5.3	5.4	5.0	5.1	51	36	8.4			1.1	
brgm2020fqrm	21/03/2020 06:42:38	44.900	-12.373	48	5.4	5.7	5.6	5.0		74	56	18.5		6.9		0.3



Centre scientifique et technique
Direction des Risques et de la Prévention
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France - Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr