

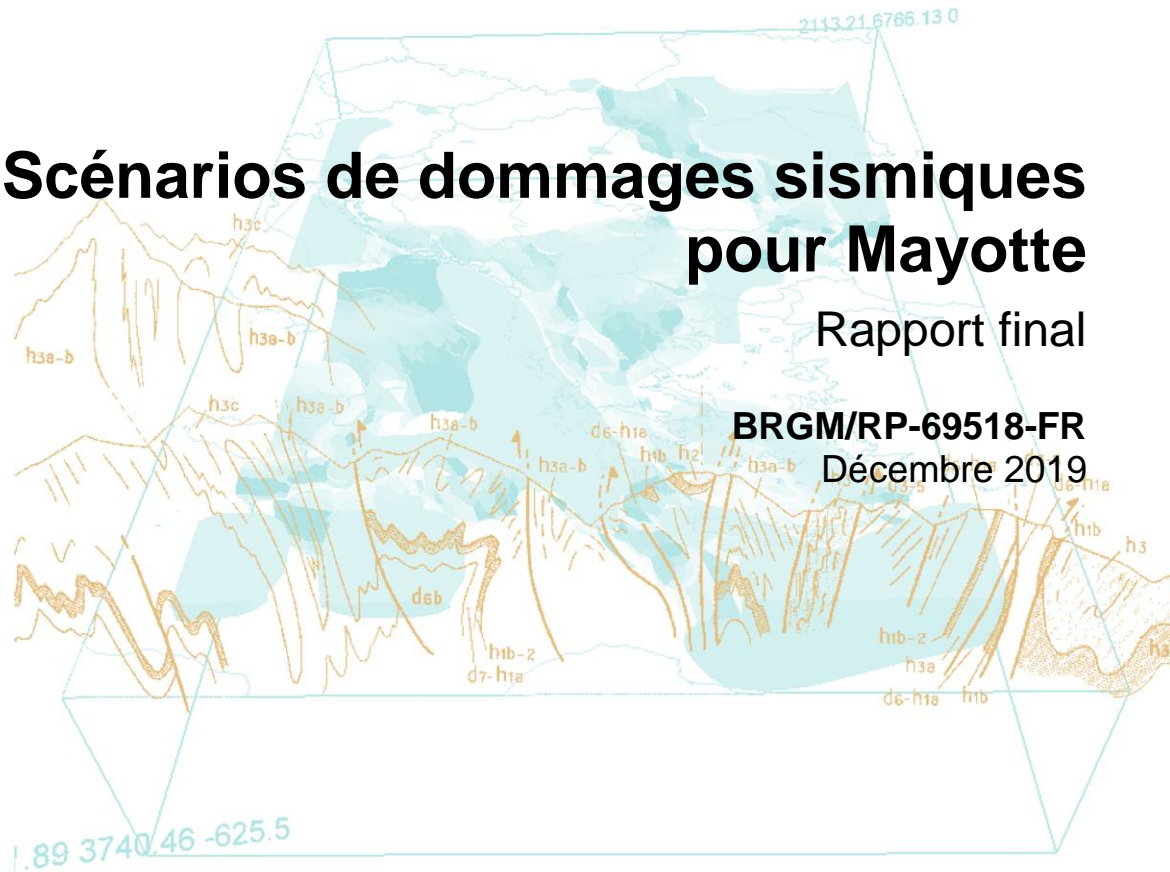


Scénarios de dommages sismiques pour Mayotte

Rapport final

BRGM/RP-69518-FR

Décembre 2019



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Scénarios de dommages sismiques pour Mayotte

Rapport final

BRGM/RP-69518-FR

Décembre 2019

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2019 – convention DGPR

N. Taillefer, C. Negulescu, C. Iasio, D. Bertil, A. Roullé

Vérificateur :

Nom : P Gehl

Fonction : Chef de projet

Date : 20/01/2020

Signature :



Approbateur :

Nom : S Jaffrot

Fonction : Adjoint à la Direction
Risque et Prévention

Date : 25/03/2020

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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés :

Scénario, dommage, sismique, bâti courant, Mayotte

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

N. Taillefer, C Negulescu, C. Iasio, D. Bertil, A. Roullé (2019) – Scénarios de dommages sismiques pour Mayotte. Rapport final. BRGM/RP- 69518 -FR, 63p., 19 fig., 12tabl., 3 ann., 1CD.

Synthèse

Depuis le 10 mai 2018, l'île de Mayotte subit des séismes répétés, dus à une crise sismo-volcanique sans précédent dans l'histoire récente de la région. Cependant, des séismes destructeurs ont déjà frappé l'île, notamment en 1993. Des documents historiques permettent également d'établir que d'autres séismes significatifs plus anciens se sont produits. Par ailleurs, en 2006, un séisme a été nettement ressenti, même s'il n'a pas provoqué de dommages aux constructions.

L'île de Mayotte est située en zone de sismicité modérée, selon la réglementation de 2010 (zone 3 du zonage réglementaire). Une étude en cours au BRGM sur l'aléa régional indique que ce classement n'est pas affecté par l'évolution récente des connaissances sur la sismicité. D'autre part, il existe un microzonage à Mamoudzou, et des études d'aléa local ont été faites pour des sites particuliers.

Depuis la départementalisation, Mayotte relève du droit commun et la réglementation parasismique s'applique. Néanmoins de nombreux bâtiments ont été construits avant, et l'augmentation rapide de la population et l'urbanisation qui en découle ont amené une modification importante du bâti. Le nombre de constructions de fortune, et de maison construites en auto-construction est notoirement élevé.

Au regard du contexte sismique de l'île et des évolutions récentes du bâti, il est nécessaire de disposer de données permettant de réaliser des scénarios de dommages sismiques sur une base actualisée. Ces scénarios pourront être utilisés à des fins de prévention pour illustrer l'impact d'un séisme s'il se produisait sur l'île ou à proximité immédiate, et pour l'appui à la gestion de crise, si on simule des événements majeurs qui peuvent potentiellement toucher fortement à la fois le bâti et l'organisation de la réponse à la catastrophe.

Dans ce but, le BRGM a proposé à la DGPR de réaliser des scénarios de dommages sismiques adaptés à la situation actuelle de l'île. Ils comprennent des données relatives aux caractéristiques de sols et à la vulnérabilité du bâti qui tiennent compte des dernières connaissances. La caractérisation de la vulnérabilité a fait l'objet d'un traitement particulier pour adapter les méthodes indicielles classiques de caractérisation de la vulnérabilité au cas spécifique de Mayotte. *Ces scénarios ne concernent que les bâtiments à usage d'habitation et les résultats présentés sont valides du point de vue statistique. Ils ne doivent donc pas être extrapolés à d'autres constructions ou à des bâtiments particuliers.*

La présente étude permet de pré-calculer un scénario de référence (séisme du 15 mai 2018), et d'identifier les données qui permettraient de simuler un autre scénario sismique à la demande. Cela pourrait être utile pour la prévention, pour simuler une situation probable à des fins pédagogiques, ou pour anticiper les besoins de la gestion de crise. Le jeu de données de référence est proposé dans la plateforme VIGIRISK du BRGM. Le présent rapport en est la justification technique en cas d'utilisation ultérieure, dans les limites de validité exposées ici. Par ailleurs, ces données servent également à alimenter SEISAID Mayotte, l'outil d'évaluation rapide des pertes, déclenché par les alertes sismiques et éditant des bulletins automatiques à destinations des acteurs de la gestion de crise.

Sommaire

1. Introduction et contexte de l'étude	9
1.1. METHODOLOGIE APPLIQUEE.....	9
2. Données sur l'aléa et les effets de site	11
2.1. ALEA SISMIQUE REGIONAL	11
2.1.1. Lois d'atténuations (GMPE) proposées.....	11
2.1.2. Recherche bibliographique	11
2.1.3. Comparaison de GMPE et des PGA de la crise de Mayotte.....	12
2.1.4. Bilan et propositions.....	13
2.2. SEISMES DE REFERENCE	14
2.3. EFFETS DE SITE	15
2.3.1. Effets de site à partir des Atlas RN	15
2.3.2. Effets de site à partir de la carte géologique et basés sur l'expertise	16
3. Données sur les enjeux (bâti courant)	21
3.1. DEMARCHE	21
3.2. SOURCES DE DONNEES SUR LES ENJEUX.....	21
3.2.1. Images satellites et occupation du sol.....	21
3.2.2. Sources statistiques de l'INSEE.....	22
3.2.3. Rapports d'études et de mission de terrain	22
3.3. TYPOLOGIE	27
3.4. ESTIMATION DE LA VULNERABILITE	28
4. Scénarios de dommages	31
4.1. SCENARIOS DE DOMMAGES.....	31
4.1.1. Scénario sismique.....	31
4.1.2. Effets de site	32
4.1.3. Enjeux.....	32
4.1.4. Synthèse.....	33
4.2. RESULTATS.....	36
4.2.1. Scénarios de référence	38
4.2.2. Effet de la localisation de l'épicentre	40
4.2.3. Effet de l'indice de vulnérabilité.....	40

4.2.4. Effet de la carte des amplifications des sols	41
4.2.5. Scénario 1993	42
4.3. DISCUSSION COMPARAISON AVEC LES ENQUETES MACROSISMIQUE.	44
5. Conclusions	45
6. Bibliographie.....	47

Liste des figures

Figure 1 : Méthodologie de simulation des dommages pour différents scénarios sismiques	10
Figure 2 : Localisation de l'essai sismique par rapport à l'île de Mayotte	15
Figure 6 : Niveaux d'effet de site lithologique sur l'île de Mayotte adaptés des six atlas d'aléas naturels édités en 2004.....	16
Figure 8 : Localisation des données géophysiques et géotechniques utilisées pour la classification des sols selon les EC8.....	17
Figure 5 : Carte des effets de site lithologiques détaillée faite sur la base de la carte géologique de 2013.	20
Figure 6 : Illustration des deux approches pour la caractérisation des enjeux.	22
Figure 7 : Evolution des types de bâtiments à Mayotte 1978-2012 (d'après [8])	24
Figure 8 : Evolution de la de construction à Mayotte 1991-2017	25
Figure 9 : Carte de répartition des dommages observés en 1993	26
Figure 10 : Position des épicentres considérés dans les différents scénarios sismiques.....	32
Figure 11 : Classification des dégâts aux bâtiments en maçonnerie (EMS98).....	36
Figure 12 : Intensités calculées à partir des accélérations simulées	39
Figure 13 : Répartition du nombre de bâtiments endommagés	39
Figure 14 : Intensités macrosismiques calculées à partir de l'accélération	43
Figure 15 : Carte du nombre de bâtiments endommagés (Niveau D2 et plus).....	43
Figure 16 : Illustration des différents types de maisons case SIM (source : rapport CraTerre)..	53
Figure 17 : Calcul Armagedom de PGA (cm/s ²) avec effets de site pour le séisme ayant les caractéristiques du Tableau 1	56
Figure 18 : Sensibilité du PGA par rapport à la position de l'épicentre dans l'essai sismique (les deux épicentres utilisées pour les calculs sont sélectionnés en bleu).....	57
Figure 19: Calcul Armagedom de PGA (cm/s ²) avec effets de site pour le séisme ayant les caractéristiques du Tableau 1 avec des effets de site associés classes EC8 : A, B et E.....	58

Liste des annexes

Annexe 1 Caractéristiques techniques des cases SIM	51
Annexe 2 Analyse de sensibilité du calcul de PGA.....	55
Annexe 3 Comparaison des données accélérométriques avec les lois d'atténuation (GMPE) disponibles	51

1. Introduction et contexte de l'étude

Depuis le 10 mai 2018, l'île de Mayotte subit des séismes répétés, dus à une crise sismo-volcanique sans précédent dans l'histoire récente de la région. Cependant, des séismes destructeurs ont déjà frappé l'île, notamment en 1993. Des documents historiques permettent également d'établir que d'autres séismes significatifs plus anciens se sont produits. Par ailleurs, en 2006, un séisme a été nettement ressenti, même s'il n'a pas provoqué de dommages aux constructions.

L'île de Mayotte est située en zone de sismicité modérée, selon la réglementation de 2010 (zone 3 du zonage réglementaire). Une étude en cours au BRGM sur l'aléa régional indique que ce classement n'est pas affecté par l'évolution récente des connaissances sur la sismicité. D'autre part, il existe un microzonage à Mamoudzou, et des études d'aléa local ont été faites pour des sites particuliers.

Depuis la départementalisation, Mayotte relève du droit commun et la réglementation parasismique s'applique. Néanmoins de nombreux bâtiments ont été construits avant, et l'augmentation rapide de la population et l'urbanisation qui en découle ont amené une modification importante du bâti. Le nombre de constructions de fortune, et de maison construites en auto-construction est notoirement élevé.

Au regard du contexte sismique de l'île et des évolution récente du bâti, il est nécessaire de disposer de données permettant de réaliser des scénarios de dommages sismiques sur une base actualisée. Ces scénarios pourront être utilisés à des fins de prévention pour illustrer l'impact d'un séisme s'il se produisait sur l'île ou à proximité immédiate, et pour l'appui à la gestion de crise, si on simule des événements majeurs, qui peuvent potentiellement toucher fortement à la fois le bâti et l'organisation de la réponse à la catastrophe.

Dans ce but, le BRGM a proposé à la DGPR de réaliser des scénarios de dommages sismiques adaptés à la situation actuelle de l'île. Ils comprennent des données relatives aux caractéristiques de sols et à la vulnérabilité du bâti qui tiennent compte des dernières connaissances. La caractérisation de la vulnérabilité a fait l'objet d'un traitement particulier pour adapter les méthodes indicielles classiques de caractérisation de la vulnérabilité au cas spécifique de Mayotte.

Ces scénarios ne concernent que les bâtiments à usage d'habitation et les résultats présentés sont valides du point de vue statistique. Ils ne doivent donc pas être extrapolés à d'autres constructions ou à des bâtiments particuliers.

1.1. METHODOLOGIE APPLIQUEE

La méthode d'estimation des dommages appliquée est celle préconisée par le projet RISK-UE (niveau 0 et niveau 1) [1].

Selon la méthode, un scénario de dommage consiste à :

1. Choisir un scénario sismique (localisation, magnitude, profondeur, type)
2. Calculer la carte d'accélération au sol pour le sol de référence grâce à des lois de propagation (équations de prédiction du mouvement - GMPE)

3. Tenir compte des effets de site conduisant à l'amplification lithologique et topologique locale du mouvement sismique, à partir d'une carte d'effet de site (zonage et valeur d'amplification)
4. En déduire une carte des effets du séisme :
 - a. Soit calculant l'intensité macrosismique, en appliquant une loi accélération/intensité.
 - b. Soit en utilisant une carte d'enjeux, précisant la répartition de types constructifs, et leur vulnérabilité associée, pour calculer des niveaux d'endommagement statistique (nombre de bâtiments endommagés pour un niveau de dommage donné, ou pourcentages de bâtiments endommagés) selon l'échelle macrosismique EMS98.

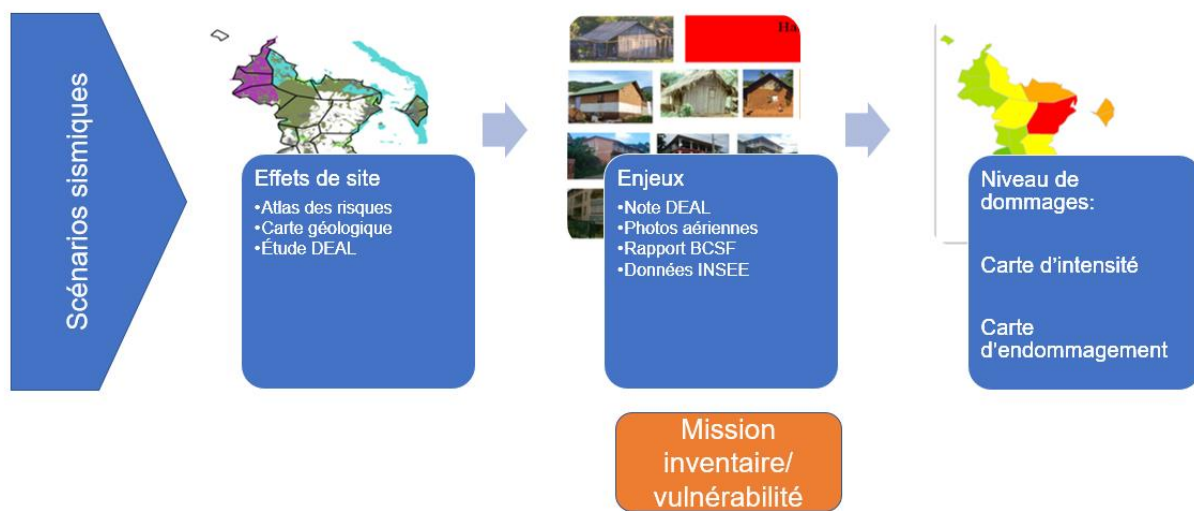


Figure 1 : Méthodologie de simulation des dommages pour différents scénarios sismiques

Les données relatives au bâti et aux effets de site sont intégrées à la plateforme VIGIRISK [2] qui permet de simuler n'importe quel scénario sismique. Les simulations sont réalisées en appliquant l'algorithme Armagedom [3]. Pour les besoins de cette étude, et à titre d'illustration, les scénarios sismiques présentés s'appuient sur les séismes de référence du 15 mai 2018 et de 1993.

2. Données sur l'aléa et les effets de site

2.1. ALEA SISMIQUE REGIONAL

2.1.1. Lois d'atténuations (GMPE) proposées

Il n'existe pas de loi d'atténuation locale spécifique au contexte régional de Mayotte. Afin de déterminer la loi la plus adaptée parmi celles disponibles dans la littérature, il est proposé la démarche suivante :

- Recherche dans la bibliographie de GMPE qui ont été utilisées dans des études d'aléa probabiliste (PSHA) récentes dans la région (Afrique de l'Est) ou dans des milieux volcaniques insulaires. Sélection d'une liste de GMPE potentielle.
- Comparaison des GMPE avec les données accélérométriques existantes (l'essai de Mayotte)

2.1.2. Recherche bibliographique

Il n'existe pas de loi GMPE spécifique à la région des Comores ou de Madagascar. Même pour le Rift Est Africain, les données accélérométriques sont très peu nombreuses.

Lors de l'étude d'aléa sismique mondial GSAHP, Mdizi et al (1999) ont proposé pour le calcul d'aléa l'utilisation de deux lois régionales Jonathan (1996) et Twesigomwe (1997). Ces relations n'ont pas été reprises dans les études récentes. Elles reposent sur trop peu de données, elles utilisent une magnitude de surface M_s et une distance hypocentrale, alors que les lois récentes utilisent M_w et des distances R_{jb} (Joyen & Boore) ou R_{rup} (distance à la rupture).

Pour les parties les plus actives du rift africain, les relations les plus classiques des zones actives crustales sont les relations NGA : Abrahamson & Silva (2008), Boore & Atkinson (2008), Campbell & Bozorgnia (2008), Chiou & Youngs (2008) ou Akkar & Bommer (2010) basées sur des données Européennes et moyenne-orientales.

Les relations Chiou & Young (2014) ou Akkar et al (2014) remplacent Chiou & Youngs (2008) ou Akkar & Bommer (2010) dans les études les plus récentes. La relation Bindi et al (2014) utilisée dans les contextes actifs européens peut être une alternative à Akkar et al (2014).

La relation Pankow & Pechmann (2004) qui est spécifique aux zones crustales d'extension a pu être utilisée parfois (comme pour l'Ouganda, Bwambale et al. (2015)).

Pour certaines zones moins actives du rift Est-africain, on fait appel à des relations de croûte continentale stable, principalement : Atkinson & Boore (2006) ou Pezeshk et al (2011). Poggi et al (2017) n'utilise pas ces relations seules mais en alternance avec des lois de zones actives avec des poids plus ou moins importants selon le niveau d'activité sismique. Pezeshk et al (2011) a été récemment actualisé en Pezeshk et al (2018), mais cette dernière loi n'a pas encore été utilisée en Afrique de l'Est.

L'archipel des Comores est situé en zone d'activité « modérée » mais les lois associées aux zones stables sont essentiellement en domaine continental alors que les Comores sont dans un environnement océanique.

Une seule relation pourrait correspondre à un environnement similaire : Atkinson (2010), qui est une adaptation des paramètres de Boore & Atkinson (2008) pour la région d'Hawaï.

Le tableau ci-dessous fait la synthèse des études régionales et des relations utilisées.

Tableau 1 : Synthèse des lois d'atténuation examinées

	Relation	Domaine	Etude régionale
ab06	Atkinson & Boore (2006)	croûte continentale stable	Poggi et al (2017 - EAR) Marimira et al. (2017 - Zimbabwe)
petal11	Pezeshk et al (2011)	croûte continentale stable	Poggi et al (2017 - EAR)
petal18	Pezeshk et al (2018)	croûte continentale stable	
pp04	Pankow & Pechmann (2004)	domaine actif d'extension	Bwambale et al (2015 -Uganda))
a10	Atkinson (2010)	Hawaï domaine volcanique	insulaire
j96	Jonathan (1996)	Rift Est Africain	Mdizi et al (1999 - GSHAP)
t97	Twesigomwe (1997)	Rift Est Africain	Mdizi et al (1999 - GSHAP)
as08	Abrahamson & Silva (2008)	zone active crustale	Lubkowski et al (2014 - EAR)
ab10	Akkar & Bommer (2010)	zone active crustale	Lubkowski et al (2014 - EAR) Hodge et al. (2015 - Malawi)
aetal14	Akkar et al (2014)	zone active crustale	Poggi et al (2017 - EAR)
ba08	Boore & Atkinson (2008)	zone active crustale	Hodge et al. (2015 - Malawi)
cb08	Campbell & Bozorgnia (2008)	zone active crustale	Lubkowski et al (2014 - EAR) Hodge et al. (2015 - Malawi)
cy08	Chiou & Youngs (2008)	zone active crustale	Ayele (2017 - Ethiopia) Hodge et al. (2015 - Malawi)
cy14	Chiou & Youngs(2014)	zone active crustale	Poggi et al (2017 - EAR)

2.1.3. Comparaison de GMPE et des PGA de la crise de Mayotte

Pour cette comparaison, 7 lois ont été sélectionnées, et comparées aux données d'accélération (PGA pour Peak Ground Accélération) mesurées sur la stations accélérométrique du BRGM :

- 4 lois valables pour les zones crustales actives (Campbell & Bozorgnia (2008), Chiou & Youngs (2008), Akkar et al (2014), Bindi et al (2014))
- 2 lois valables pour les zones continentales stables (Atkinson & Boore (2006), Pezeshk et al (2011))
- 1 loi développée pour une zone volcanique océanique : Atkinson (2010).

Concernant les données PGA pour Mayotte, les données des stations YTMZ et MDZA sont utilisées. La station YTMZ est implantée sur un sol considéré comme du rocher et nous disposons de valeurs de PGA sur des signaux non filtrés entre Magnitude 4.0 et 5.9.

La magnitude est une magnitude locale, M_{lv} , mais qu'on assimile à une magnitude de moment M_w . Nous avons pu comparer nos valeurs de magnitude avec les estimations de magnitude M_w réalisées par GCMT (Global Centroid Moment Tensor Project)¹ : nos 29 séismes de magnitude $M_{lv} > 5.0$ semblent correspondre aux séismes de magnitude $M_w > 4.9$. On supposera ici $M_{lv} = M_w$.

- Pour $M \sim 4.0$ nous avons pu sélectionner 48 séismes de Magnitude M_{lv} entre 4.0 et 4.1 (nous ne sommes pas descendus à 3.9, n'ayant pas traité les PGA non filtrés pour $M < 4.0$) et pour des distances entre 33 km et 55 km
- Pour $M = 5.0$ nous avons pu sélectionner 31 séismes de magnitude entre 4.9 et 5.1 et pour des distances de 34 à 64 km
- Pour $M = 5.9$, nous n'avons que 2 points à 51 et 53 km (pour les stations de MDZA et YTMZ)

Pour les données en dehors de la crise de Mayotte, il y a peu de mesures de PGA exploitables :

- Les séismes du Canal de Mozambique ou de Madagascar sont trop loin (distances supérieures à 400 km)
- Pour des séismes plus proches dans la zone des Comores, nous n'avons pas de localisation fiable ou de magnitude fiable.

Nous avons :

- un séisme de Magnitude 5.0 (GCMT) à 218 km vers Moheli
- un séisme de magnitude supposée 4.0 (estimation BRGM) vers Moheli à 158 km
- un séisme de magnitude supposée 4.0 (estimation BRGM) à 61 km

2.1.4. Bilan et propositions

Aucune des lois étudiées ne donnent satisfaction sur toute la gamme de magnitude entre 4.0 et 5.9 (cf. Annexe 1). On ne peut pas non plus distinguer entre lois spécifiques de zones actives ou lois de zones continentale stable ou zone volcanique. On doit donc proposer un panel de lois des 3 domaines : A10, Petal11, CB08 et CY08. Cette étude quant aux lois d'atténuation est en cours de progrès. Pour des raisons pratiques, nous avons utilisé dans la suite de l'étude la loi d'atténuation Campbell & Bozorgnia (2000) qui donne des valeurs de PGA très proche de la loi CB08, dont la comparaison avec les données mesurées est satisfaisante pour les séismes de magnitude $M_w \geq 5$, à une distance hypocentrale de 30 à 60 km de Mamoudzou.

¹ <https://www.globalcmt.org/>

2.2. SEISMES DE REFERENCE

Le séisme du 15 mai 2018, d'une magnitude $M_I=5.8$ ($M_w=5.9$ selon CGMT) est le plus gros séisme de l'essai en cours. Le BRGM a effectué une localisation à l'aide de ses stations sismologiques présentes à Mayotte, et de stations associées à des réseaux internationaux. Même si les modèles permettant la localisation précise sont encore en discussion, notamment au sein du Réseau de Surveillance Sismologique et Volcanologique de Mayotte (ReVoSiMa), ce sont les paramètres disponibles au moment de l'étude qui ont été employés (localisation BRGM).

Le séisme a été très fortement ressenti. Par ailleurs, plusieurs propriétaires ont déclaré avoir constaté des dommages à leur bâtiment suite au séisme. Une mission du Groupe d'Intervention Macrosismique (GIM) est intervenue en juin pour établir un classent du séisme selon l'échelle macrosismique EMS 98 [4]. De par les caractéristiques de la séquence sismique en essaim, il ne peut cependant pas être établi avec certitude que les dégâts observés sont dus seulement au séisme du 15 mai ou s'ils résultent aussi de l'accumulation de secousses. Le rapport indique également la difficulté dans certains cas de différencier les causes sismiques et les autres causes, notamment les mouvements de fondations dus aux glissements de terrain.

De par son caractère marquant, notamment dans la mémoire collective locale, c'est séisme du 15 mai 2018 qui sert de référence à l'étude. On comparera notamment les résultats des simulations de dommages aux observations de la mission GIM.

Le séisme de 1993 a lui aussi provoqué des dégâts notables aux constructions les plus vulnérables. Des missions post-sismiques ont été réalisées notamment par SOCOTEC dans le cadre de l'attribution de financement pour les réparations ou les reconstructions [5, 6]. A l'époque, il n'y avait pas de station sismologique à Mayotte, et les réseaux internationaux ne permettaient pas une caractérisation fine (Magnitude, épicentre, profondeur). Ce sont les paramètres macrosismiques (intensité, épicentre calculé) de la base de données SisFrance Océan Indien qui ont été retenues. Ce séisme s'est produit à l'ouest de Mayotte, ce qui donne un scénario avec une position d'épicentre différente du scénario de référence. Par ailleurs, en tenant compte de l'évolution de la construction depuis la date de l'évènement, des incertitudes concernant les caractéristiques physiques du séisme, et des biais liés au contexte de la mission d'évaluation des dommages, la comparaison entre les résultats de la simulation du séisme de 1993 et le nombre de bâtiments endommagés selon les décompte de l'époque permettra de vérifier, en ordre de grandeur, la pertinence des données utilisées.

Les deux séismes de référence sont d'intensité relativement modérée, même s'ils ont causé quelques dommages. Il n'est pas possible de caler les simulations avec des données expérimentales pour des séismes plus forts (Magnitude supérieure à 6). Il convient donc de rester prudent sur l'interprétation de résultats pour des scénarios sismiques « catastrophiques ».

La Figure 2 montre la localisation de l'essai sismique par rapport à l'île de Mayotte. Le point sélectionné en jaune correspond au séisme ayant les caractéristiques du plus fort séisme depuis le début de la crise sismique ; le fichier des localisations Seiscomp du BRGM donne les caractéristiques suivantes : magnitude 5.8, longitude 45.75, latitude -12.73, profondeur 10km, et PGA égal à 52.7 mg sur la station YTMZ.

Nota : En 2020, ces localisations ont été revues à l'aide de nouvelles données, et d'un nouveau modèle de vitesse. Néanmoins dans la suite du rapport on garde les localisation 2018-2019 sur lesquelles s'est basée l'étude.

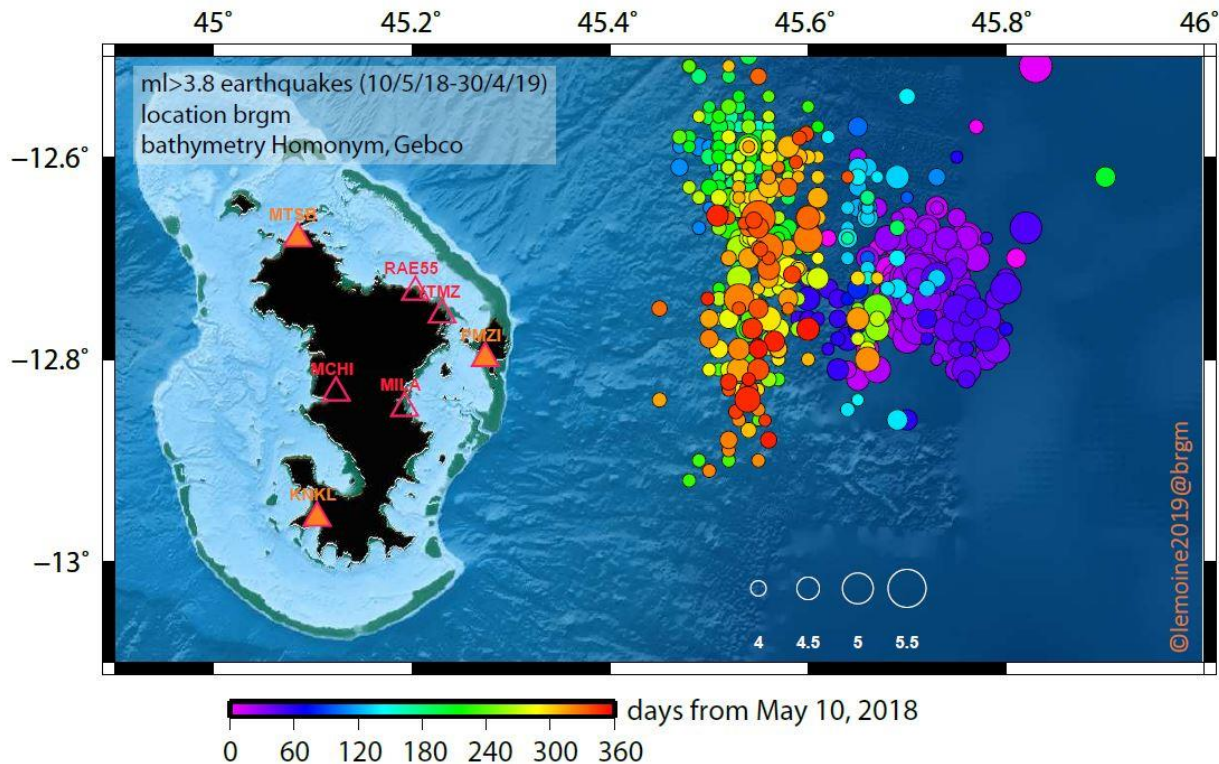


Figure 2 : Localisation de l'essaim sismique par rapport à l'île de Mayotte –localisations 2019 avant révision

2.3. EFFETS DE SITE

Depuis le début des années 2000, de nombreuses études d'aléa sismique local ont montré que le territoire mahorais présentait des formations géologiques superficielles susceptibles de présenter des effets de site lithologiques (par ex. Audru et al., 2002). Il est donc important de prendre cet effet en compte dans les scénarios de dommage.

2.3.1. Effets de site à partir des Atlas RN

Pour tenir compte de ces effets de site, la première approche a consisté à repartir des cartographies disponibles dans les six atlas des aléas naturels édités en 2004 par bassin de risques (Figure 3). Dans ces atlas, la cartographie des effets de site lithologiques 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).

La première étape du travail a consisté à nettoyer et fusionner les données SIG issues des six Atlas pour obtenir une carte homogène au niveau de toute l'île. Les zones ont été fusionnées selon les trois niveaux d'aléa définis dans les atlas à savoir : nul à faible, moyen, fort. Ce travail a nécessité d'homogénéiser les notations utilisées pour les différents niveaux d'aléa. Par ailleurs, faute d'éléments objectifs pour les distinguer, nous avons fusionné les niveaux « nul », « faible à nul » et « faible » de la Figure 3 en une classe unique « nul à faible ».

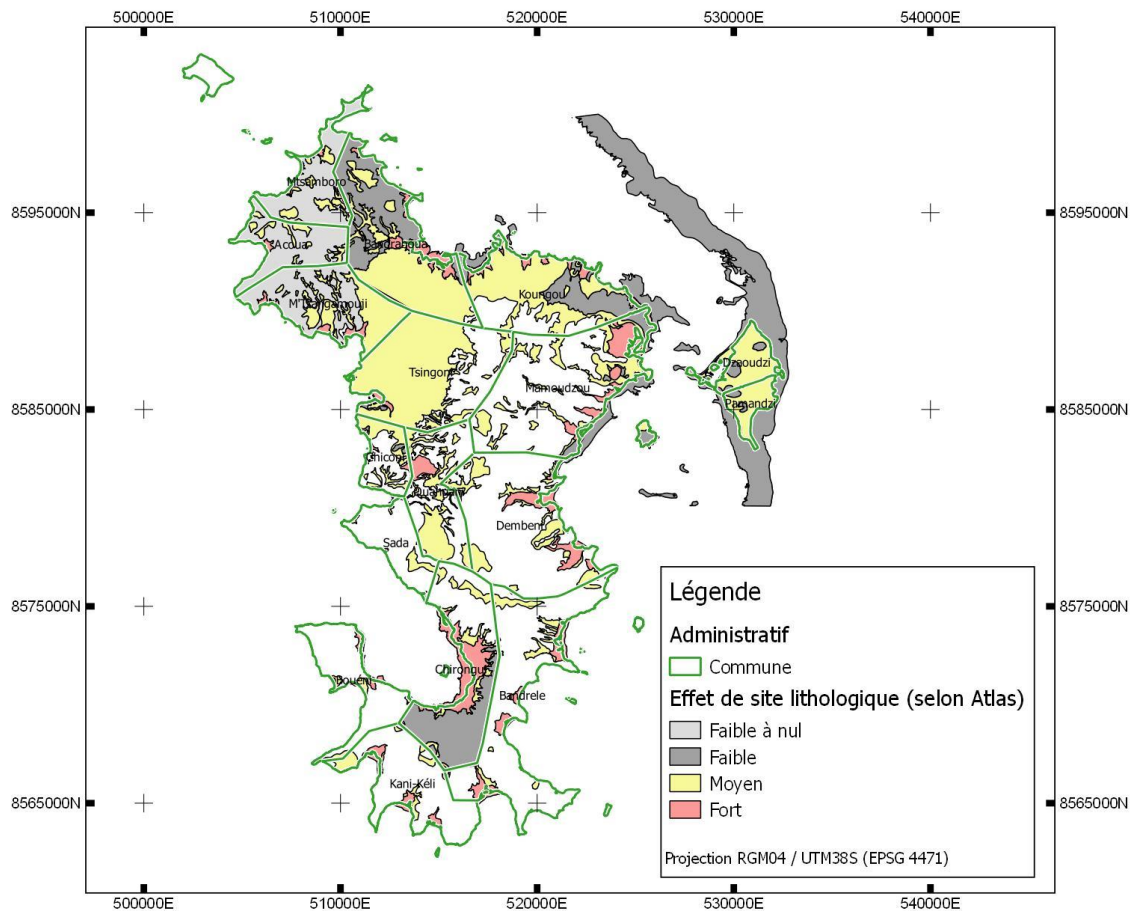


Figure 3 : Niveaux d'effet de site lithologique sur l'île de Mayotte adaptés des six atlas d'aléas naturels édités en 2004. Les zones blanches correspondent à des zones d'effet de site nul.

La seconde étape du travail a consisté à attribuer un coefficient d'amplification forfaitaire à chacun des niveaux d'aléa ainsi définis. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les coefficients de sol S des classes de sol EC8. Les tests de sensibilité réalisés sur le séisme du 15 mai 2018 entre PGA estimés et PGA observés sur les stations sismologiques (cf résultats en Annexe 2) ont permis de fixer les correspondances suivantes entre niveau d'effet de site et coefficient d'amplification :

- Effet de site faible à nul : $S=1$ correspondant à une classe de sol A ;
- Effet de site moyen : coefficient $S=1,35$ correspondant à une classe de sol B ;
- Effet de site fort : coefficient $S=1,8$ correspondant à une classe de sol E.

2.3.2. Effets de site à partir de la carte géologique et basés sur l'expertise

La cartographie de l'aléa sismique local issue des Atlas d'aléas naturels montre une grande partie de l'île non couverte par les effets de site lithologiques. Or l'amélioration des connaissances sur les formations superficielles issue des études de site réalisées depuis 2002 (liste des références dans le chapitre **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et de la nouvelle carte géologique de l'île réalisée en 2013 et orientée vers la cartographie des formations superficielles (Lacquement et al., 2013 et Nehlig *et al.*, 2013) montre 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. Suite à ce constat, nous avons établi une nouvelle carte des

effets de site lithologiques sur la base de la carte géologique de 2013 et des données issues des 27 études d'aléa sismique local existantes (Figure 4).

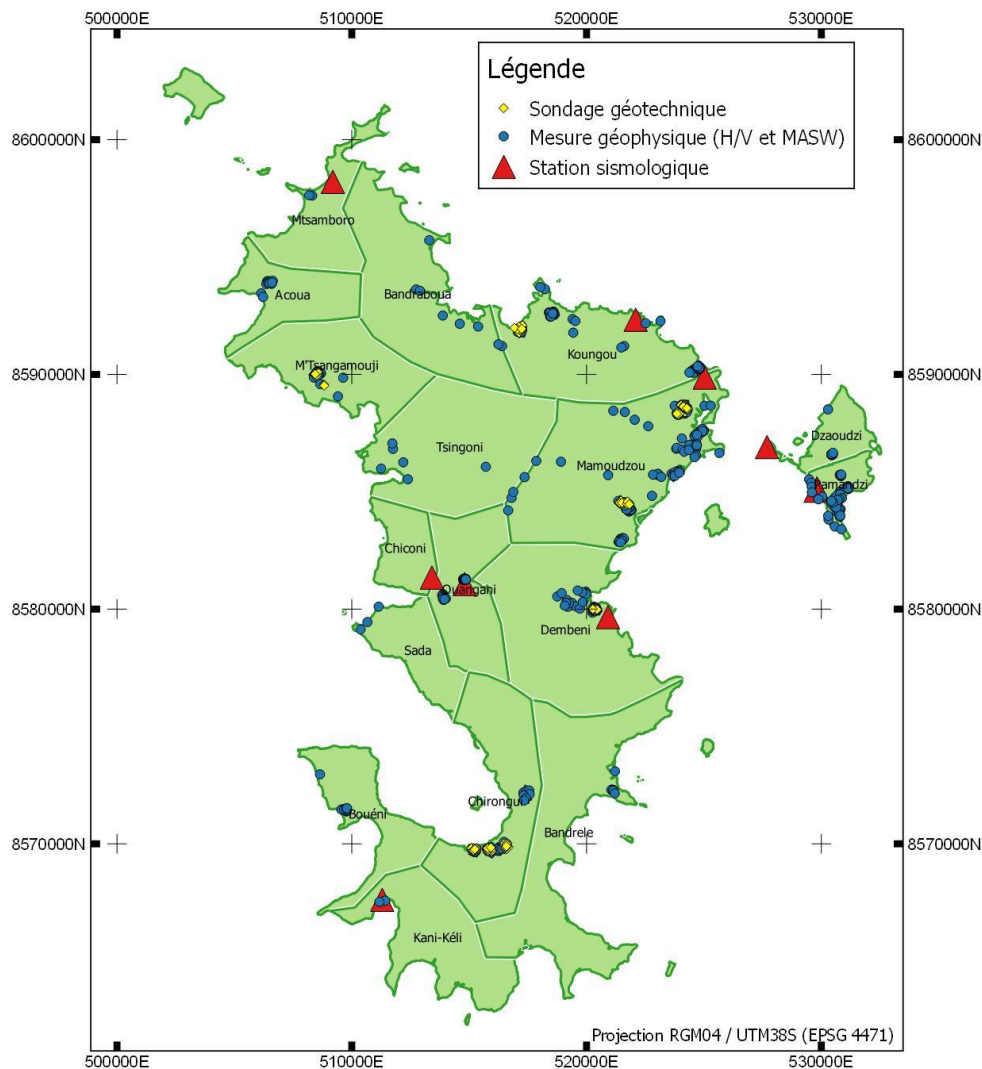


Figure 4 : Localisation des données géophysiques et géotechniques utilisées pour la classification des sols selon les EC8.

Pour chaque lithologie de la carte géologique de 2013, nous avons défini une classe de sol EC8 pour chaque formation géologique en suivant la méthodologie établie pour les scénarios départementaux (2008) pour les scénarios de niveau 1 (N1). Cette classification finale est décrite dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Classes de sol EC8 attribuées aux différentes formations géologiques décrites dans la carte géologique de Mayotte (Lacquement et al., 2013)

Notation	Description	Données source	Classe de sol EC8
X	Remblais anthropiques	Carte géologique 2013 Rapport RC-52052-FR Rapport RC-52142-FR Rapport RC-52438-FR Rapport RC-53831-FR Rapport RP-55151-FR Rapport RP-68294-FR	Similaire à l'encaissant

Fz	Alluvions indifférenciés	Carte géologique 2013 Rapport RC-52437-FR Rapport RP-54467-FR Rapport RP-54470-FR Rapport RC-57925-FR Rapport RP-58025-FR Rapport RP-61170-FR Rapport RP-62972-FR Rapport RP-68294-FR	C
Fy	Alluvions anciennes indifférenciées	Carte géologique 2013	C (par analogie à Fz)
C	Colluvions	Carte géologique 2013 Données des stations sismologiques de Mtsamboro MTSB et Kani-Kéli KNKL Rapport RC-52437-FR Rapport RP-53832-FR Rapport RP-56431-FR Rapport RC-57925-FR Rapport RP-57715-FR Rapport RP-61170-FR Rapport RP-61593-FR Rapport RP-62972-FR Rapport RP-63836-FR Rapport RP-68294-FR	E pour les polygones proches de la côte (en bas du profil d'altération, proches des formations Fz). C pour les autres polygones
E	Eboulis	Carte géologique 2013 Rapport RP-61170-FR	C
Ec	Dépôts d'éroulement	Carte géologique 2013	C (par analogie aux alluvions Fz et aux colluvions C)
Cb	Colluvions à blocs	Carte géologique 2013	C (par analogie aux colluvions C)
BGI	Brèches et panneaux glissés	Carte géologique 2013	C (par analogie aux alluvions Fz et aux colluvions C)
Sb	Sables	Carte géologique 2013	C (par analogie aux alluvions Fz)
A'β	Allotérites de laves basiques et intermédiaires	Carte géologique 2013 Données de la station sismologique de Coconi R1EE2 Rapport RP-61170-FR	C
A'βPfe	Allotérites de laves basiques et intermédiaires à grenailles ferrugineuses	Carte géologique 2013	C (par analogie aux allotérites A'β)
A'φ	Allotérites de phonolites	Carte géologique 2013	C (par analogie aux allotérites A'β)
Aβ	Isaltérites de laves basiques et intermédiaires	Carte géologique 2013 Données de la station sismologique d'Iloni MILA Rapport RC-52437-FR Rapport RP-53975-FR Rapport RP-54960-FR Rapport RP-57715-FR Rapport RP-61170-FR Rapport RP-62965-FR Rapport RP-62972-FR Rapport RP-68294-FR	C
Aβpx	Isaltérites de basaltes à pyroxène	Carte géologique 2013	C (par analogie aux isaltérites Aβ)
Aφ	Isaltérites de phonolites	Carte géologique 2013 Rapport RC-52052-FR Rapport RP-57715-FR Rapport RP-68294-FR	C
Ascβ	Isaltérites de cônes de scories	Carte géologique 2013	C (par analogie aux isaltérites Aβ)
AC	Isaltérites de cinérites et alluvions	Carte géologique 2013 Données de la station sismologique de Chiconi MCHI Données du projet de révision de l'aléa sismique local sur Mayotte (DEAL, en cours de traitement)	C
ABGI	Isaltérites de brèches et panneaux glissés	Carte géologique 2013	C (par analogie aux isaltérites Aβ)
Formations volcaniques laviques (toutes)		Carte géologique 2013	A
Formations volcano-		Carte géologique 2013	A

clastiques (toutes)		Données des stations sismologiques de Pamandzi PMZI, Dzaoudzi MDZA et Mamoudzou YTMZ Rapport RP-53975-FR Rapport RP-54470-FR Rapport RP-54471-FR Rapport RP-57715-FR Rapport RP-58025-FR Rapport RP-61170-FR Rapport RP-63175-FR Rapport RP-68294-FR	<i>Il est à noter que certaines données indiquent la présence locale d'effets de site sur ces formations mais, en l'absence de données suffisantes et fiables pour distinguer ces zones, nous avons préféré conserver la classe de sol EC8 A sur l'ensemble des polygones concernés.</i>
------------------------	--	---	--

Le zonage selon la classification EC8 finale est présenté sur la Figure 5. La cartographie ainsi proposée montre que la partie centrale de l'île qui n'était initialement pas considérée comme susceptible de présenter un effet de site est désormais classée en classe de sol C. De la même façon, la zone dite au « rocher » (classe de sol A) est beaucoup plus réduite par rapport à la carte faite à partir des atlas, et pratiquement tout le pourtour de l'île correspondant à des colluvions est considéré comme un sol de classe E.

Donc, pour le set de données « optimales » pour un scénario de risque sur l'île de Mayotte, nous recommandons l'utilisation de cette nouvelle carte des effets de site. Toutefois, des travaux sont actuellement en cours dans le cadre d'un projet de révision de l'aléa sismique local mené par le BRGM pour le compte de la DEAL. Cette étude pourrait, à terme, nous amener à réviser la carte des effets de site lithologiques. Une analyse poussée des enregistrements issus de la crise sismo-volcanique de 2018-2019 pourrait notamment nous mener à réviser les coefficients d'amplification associés aux différentes classes de sol (actuellement, nous utilisons les coefficients forfaitaires issus des règles parasismiques françaises, à savoir $S=1$ pour la classe A, $S=1,5$ pour la classe C et $S=1,8$ pour la classe E).

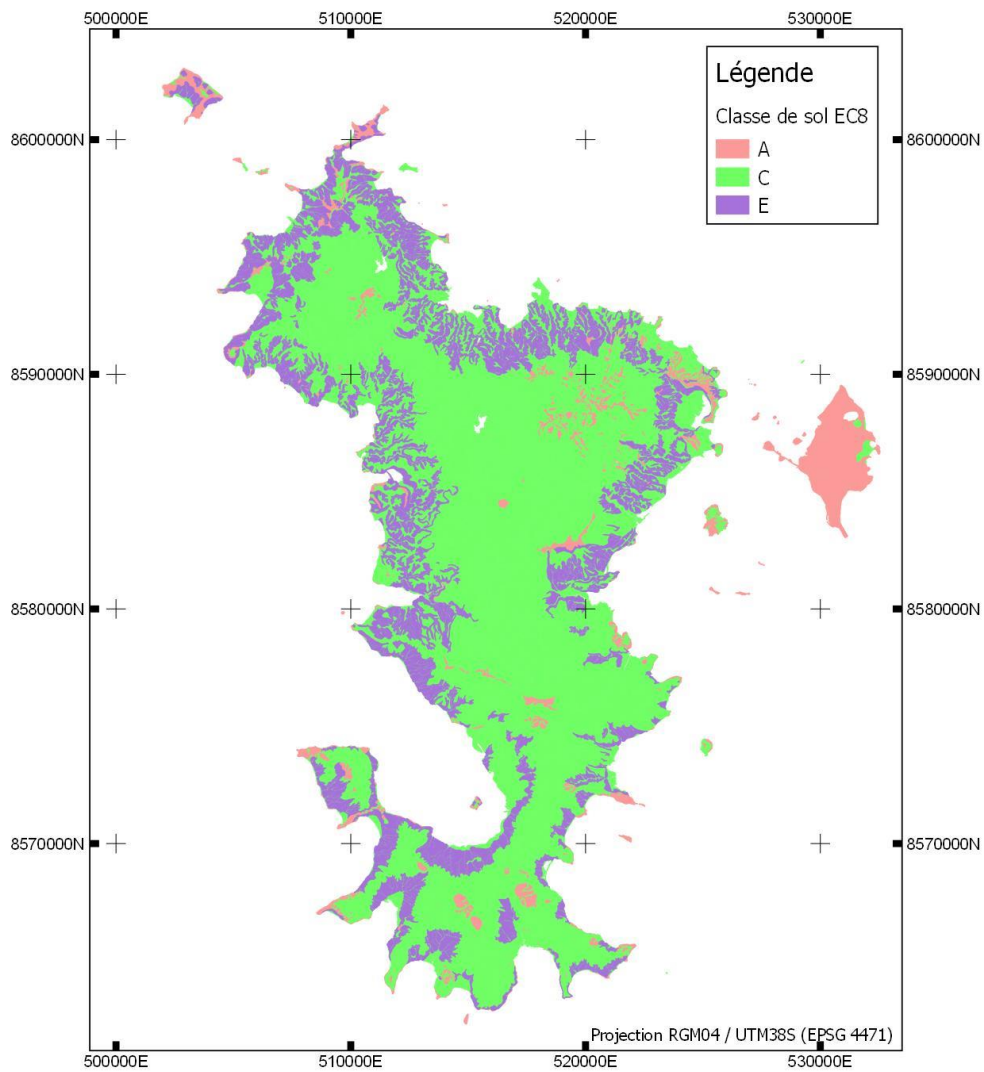


Figure 5 : Carte des effets de site lithologiques détaillée faite sur la base de la carte géologique de 2013.

3. Données sur les enjeux (bâti courant)

3.1. DEMARCHE

La méthode d'estimation des dommages appliquée est celle préconisée par le projet RISK-UE (niveau 0 et niveau 1) [1]. Elle repose sur une description statistique des bâtiments courants, et une estimation de la vulnérabilité moyenne des enjeux selon une typologie valable pour toute l'île.

La démarche suivie a consisté à :

- Récolter les données sur les bâtiments (images satellites, photos, données INSEE, rapports publics) et des inventaires de terrain : types constructifs, répartition, âge, nombre d'étage,
- Réaliser des ensembles homogènes,
- Élaborer une typologie des bâtiments à partir de leurs caractéristiques probables, déduites de rapports d'études spécialisées, de photos de terrain, et d'inventaires de construction réalisés sur le terrain en avril 2019,
- D'associer un indice de vulnérabilité selon la méthode RISK-UE, en s'adaptant au contexte local.

3.2. SOURCES DE DONNEES SUR LES ENJEUX

3.2.1. Images satellites et occupation du sol

Ces images permettent de définir des zones urbanisées et la densité de la construction. Deux niveaux d'analyse ont été retenus :

- Un niveau grossier en ne tenant compte que des limites communales, et des données des recensement INSEE relatives aux constructions,
- Un niveau plus fin basé sur l'identification de zone d'urbanisation de densité connue, à partir de photos aériennes.

La première approche est rapide et permet d'exploiter les données sur les bâtiments disponibles au niveau communal. En revanche, des effets de site locaux, qui se manifestent à une échelle plus petite (le sol n'a pas des caractéristiques homogènes sur tout le territoire de la commune), ne peuvent être pris en compte correctement car les bâtiments sont supposés être répartis de façon homogène sur tout le territoire de la commune, ce qui n'est pas le cas en réalité (limitation des zones urbanisées, topographie, accès, morphologie des communes).

Dans la seconde approche, un optimum a été recherché afin de limiter le nombre de zones caractérisant les enjeux (polygones ayant une densité et des types constructifs homogènes) sans dégrader l'effet des conditions de sol locales (cartographie issue des atlas des risques naturels).

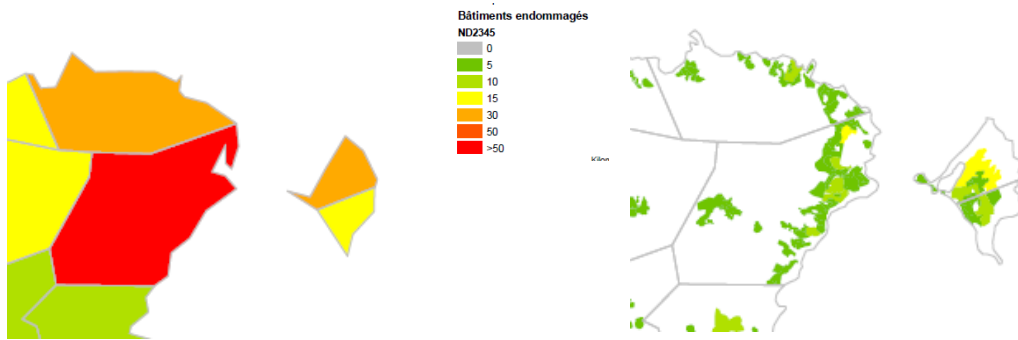


Figure 6 : Illustration des deux approches pour la caractérisation des enjeux : à gauche échelle communale, à droite échelle infracommunale. On note l'impact de la détermination des zones réellement urbanisées.

3.2.2. Sources statistiques de l'INSEE

L'INSEE² publie les données issues des recensements pour tous les départements français, ainsi que des synthèses selon les critères des enquêtes. Concernant le logement, l'INSEE fait la différence entre le logement en dur (structure en béton ou maçonnerie) et la maison individuelle en tôle. Pour les données 2013, 63% des logements étaient du type « logements en dur » et 37 % en tôle [7].

L'INSEE répertorie aussi 5 défauts graves des logements (absence d'eau courante, de baignoire ou douche, de W.-C., de cuisine, d'électricité ou électricité dégradée). Ils ne renseignent pas sur le comportement de la structure en cas de séisme, mais donnent une idée du niveau de précarité du logement. 43% des logements en dur ne présentent aucun de ces défauts, alors que seuls 66% des logements en tôle cumulent plus de 4 de ces défauts. La catégorie « logements en dur » recouvre cependant une grande diversité de constructions, allant de la maison réalisée en auto-construction à l'immeuble construit selon les règles parasismiques.

D'autres données de l'INSEE ont été analysées dans le rapport du BCSF, examiné ci-après.

3.2.3. Rapports d'études et de mission de terrain

Le rapport de mission macrosismique du BCSF

Ce rapport [4] rassemble les éléments ayant permis de déterminer l'intensité macrosismique associée à la crise sismique de 2018. Il contient des éléments de description des dommages constatés sur place, mais aussi, des éléments de contexte, tirés de l'exploitation des données INSEE par commune (2017). La référence est donc une population de 256 500 habitants, et 64 650 bâtiments dont 40 000 en dur soit 64%. On note donc une progression de la catégorie « bâtiments en dur » entre 2013 et 2017, qui correspond à l'évolution connue du marché de la construction (lutte contre l'habitat insalubre).

Le BCSF propose 6 catégories de bâtiments qui permettent de raffiner l'analyse, et dont la répartition par commune est donnée dans le Tableau 3. On note que la proportion d'immeubles collectifs est très faible.

Tableau 3 : Répartition des types de bâtiments par commune

Commune	Population 2017	NB total bâtiments	NB bâtiments en dur	Habitat de fortune (%)	Maison terre ou bois (%)	Case traditionnelle (%)	Immeuble (%)	Maison en dur (%)	Autre (%)
ACOUA	5 192	1 889	1 521	18,6%	0,8%	0,0%	0,7%	79,8%	0,0%
BANDRABOUA	13 989	3 678	2 169	39,2%	0,9%	0,1%	0,6%	58,4%	0,6%
BANDRELE	10 282	2 890	1 798	39,3%	3,4%	0,1%	0,1%	62,1%	0,0%
BOUENI	6 189	2 327	1 939	15,8%	0,4%	0,3%	0,0%	83,3%	0,2%
CHICONI	8 295	2 860	2 199	20,5%	2,4%	0,1%	0,0%	76,9%	0,1%
CHIRONGUI	8 920	2 823	2 060	25,9%	1,1%	0,0%	0,0%	73,0%	0,0%
DEMBENI	15 848	3 327	1 688	42,2%	2,2%	0,1%	0,1%	45,8%	0,0%
DZAOUZI									
LABATTOIR	17 831	3 931	2 439	37,4%	0,3%	0,3%	0,0%	62,0%	0,0%
KANI KELI	5 507	1 910	1 596	15,8%	0,4%	0,3%	0,0%	83,6%	0,0%
KOUNGOU	32 156	7 059	3 372	51,1%	0,3%	0,6%	0,0%	47,7%	0,2%
MAMOUDZOU	71 437	15 511	7 693	49,0%	1,3%	0,1%	0,7%	48,8%	0,1%
MTSAMBORO	7 705	2 563	2 192	12,9%	1,4%	0,0%	0,2%	85,3%	0,1%
MTSANGAMOUJI	6 432	2 371	1 891	20,2%	0,0%	0,0%	0,0%	79,7%	0,0%
QUANGANI	10 203	2 572	1 443	40,9%	2,3%	0,0%	0,0%	56,6%	0,2%
PAMANDZI	11 442	2 704	1 878	31,1%	0,4%	0,1%	0,1%	69,3%	0,0%
SADA	11 156	2 617	2 163	5,0%	0,0%	0,0%	0,0%	95,0%	0,0%
TSINGONI	13 934	3 617	2 002	5,3%	0,0%	0,0%	0,0%	94,7%	0,0%
total	256 518	64 649	40 043	34,1%	1,1%	0,1%	0,2%	64,1%	0,1%

On retiendra pour la suite de l'étude cette répartition des types de construction par commune. Les dommages observés donneront aussi des éléments de comparaisons pour les scénarios de dommage, même si la proportion de bâtiments endommagés par rapport au parc en 2018 est faible.

La note de la DEAL

La note du 5 mai 2018 [8], fait un état des connaissances disponibles à la DEAL sur les typologies de bâtiments. Elle contient des éléments chiffrés, des évolutions temporelles, et des photos. Les données chiffrées reprennent la base de 65 000 bâtiments (INSEE RIL 2017). Les catégories suivantes sont proposées :

- Bâti précaire (25 000), regroupant l'habitat de fortune et les cases traditionnelles
- Bâti en dur (40 000) :
 - Les maisons de type case SIM (cf. Annexe 2) en briques de terre crue, réparties en 3 générations
 - La 1ère génération (1979-1984) avec seulement un chaînage horizontal : 3 000 cases
 - La 2^{ème} génération (1985-1990) avec des raidisseurs verticaux et en angle : 5 000 cases
 - La 3^{ème} génération (1991-2006) avec harpage et chainages : 10 000 cases
 - Les autres constructions :
 - Les immeubles (moins de 200)
 - Les autres maisons en maçonnerie de blocs (22 000) avec système poteau poutre en béton

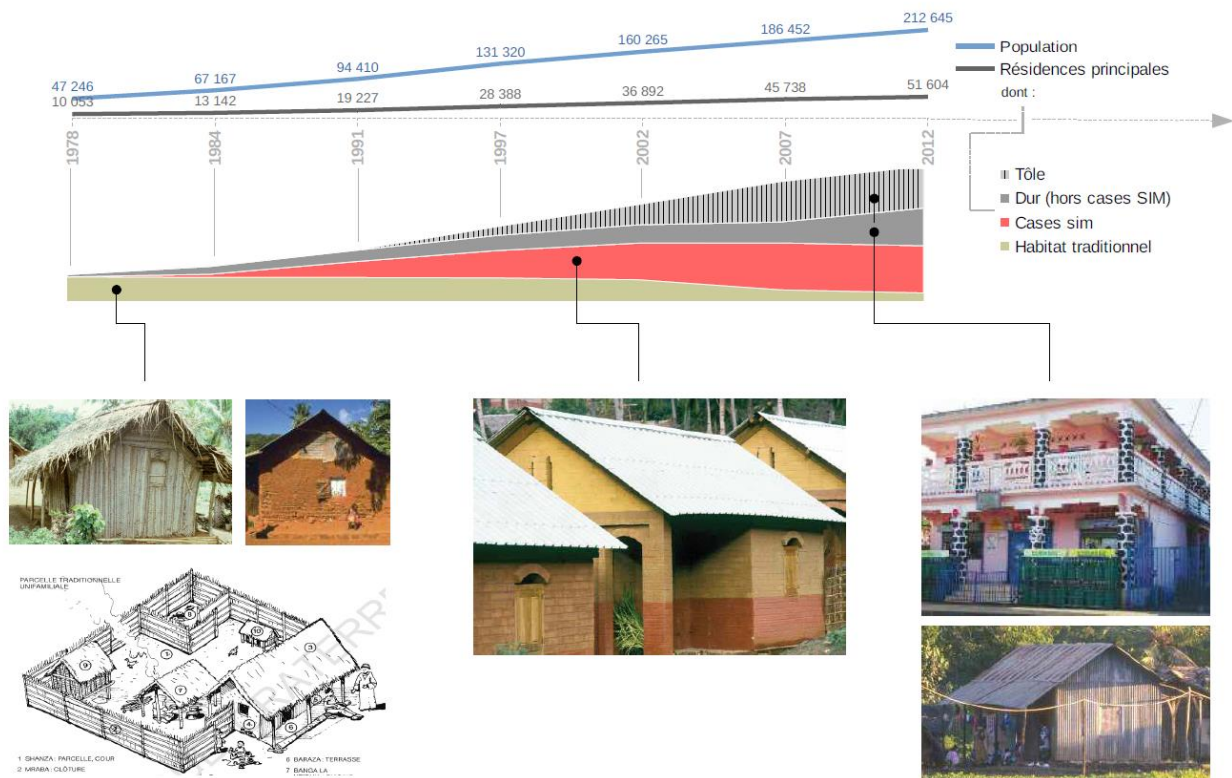


Figure 7 : Evolution des types de bâtiments à Mayotte 1978-2012 (d'après [8])

Ces éléments chiffrés permettent d'estimer une évolution temporelle des constructions, qui est utile en particulier lors de la simulation du séisme de 1993.

Tableau 4 : Evolution temporelle du nombre et des types de constructions

Année	1991	2012	2017
Population	94 410	212 645	256 649
Nb residences principales	19 227	51 604	64 459
% construction en tôle	-	30	34
% construction en dur	25	50	64
% maisons traditionnelles	75	20	2
% immeubles	0,05	0,10	0,20
Nb construction en tôle	-	15 481	21 916
Nb construction en dur	4 797	25 750	41 125
Nb maisons traditionnelles	14 420	10 321	1 289
Nb immeubles	10	52	129

Le graphique de la Figure 7 montre l'évolution de la construction entre 1991 et 2017. On note l'explosion du nombre de bâtiments pour absorber l'augmentation de la population, le fort développement de l'habitat précaire et la généralisation des maisons en durs.

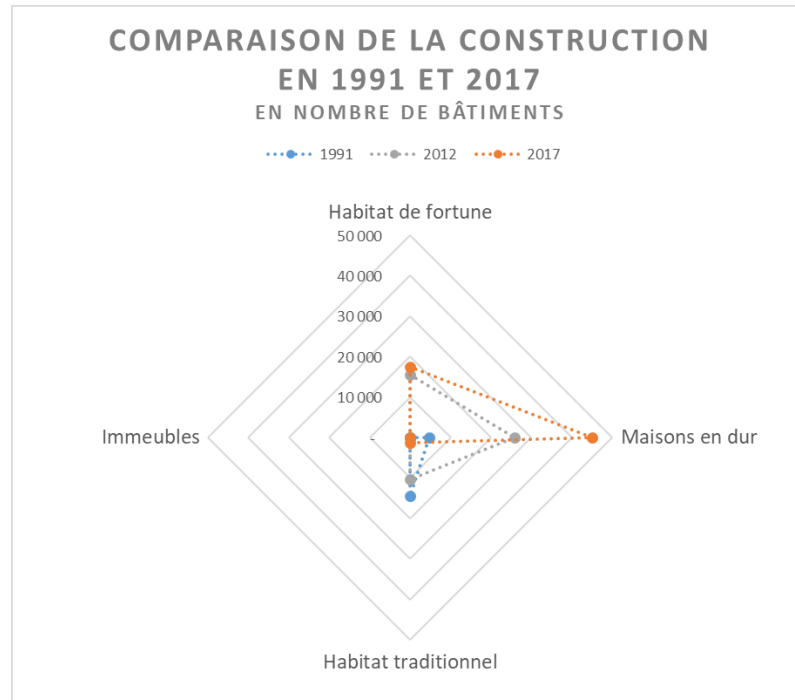


Figure 8 : Evolution de la de construction à Mayotte 1991-2017

Selon la note [8], 80% des bâtiments ont un seul niveau et 17% deux niveaux. Les bâtiments de 4 niveaux et plus sont très rares et exclusivement situés à Mamoudzou et Koungou.

La typologie proposée, associée à des données quantitatives répond aux besoin de la présente étude.

Les rapports post-sismique de 1993

Le séisme de 1993 a provoqué des dégâts aux constructions précaires. Il a été classé en séisme d'intensité VI selon l'échelle MSK. Un rapport détaillé de SOCOTEC [5] liste les constructions ayant fait l'objet d'une déclaration de dommages.

Selon le rapport, l'essentiel des dommages était de niveau D1 à D2 (fissures fines). Les maisons ayant subi des dommages plus graves présentaient des malfaçons importantes, et un effet de site (topographie, sol). Pour les maisons de type case SIM (estimées à 11 000 à l'époque), les dommages sont plus fréquents pour la première génération que pour les suivantes. Par ailleurs, les facteurs expliquant les dommages sont des insuffisances de fondation, des effets de sites locaux, le manque de chaînage vertical (1^{ère} et 2^{ème} génération), la faiblesse de la résistance des briques et l'incompatibilité de comportement des briques et du béton.

Nota : Mayotte était classée en zone de sismicité I en 1993, selon le zonage en vigueur à l'époque (PS69)

Le Programme Europact 1995 [6] a financé les reconstructions et réparations, et le rapport associé contient aussi des données chiffrées :

- 113 cases ont été reconstruites
- 1 210 ont fait l'objet de réparations légères (bouchage de fissures).

La carte ci-dessous, extraite du rapport, localise les maisons endommagées.

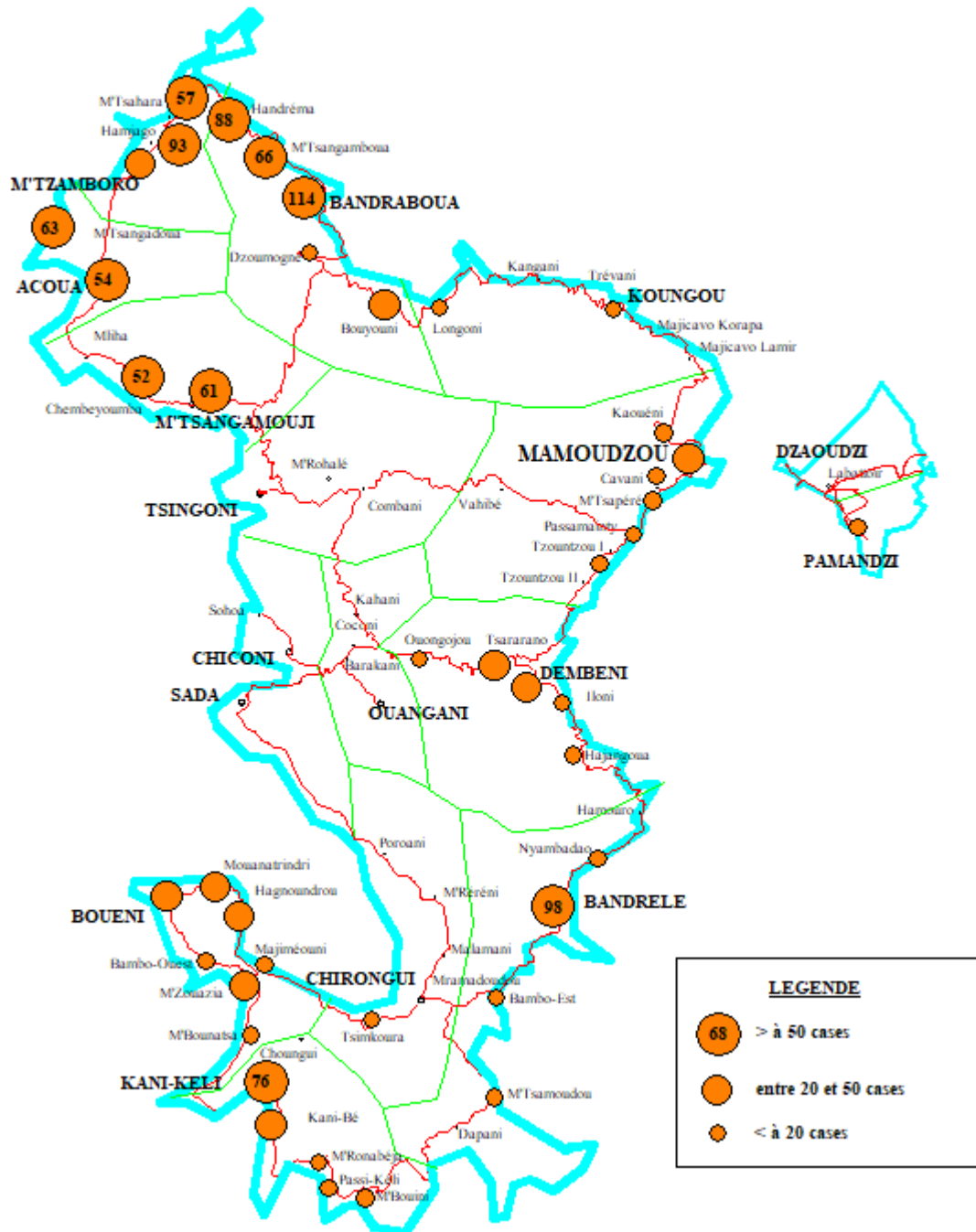


Figure 9 : Carte de répartition des dommages observés en 1993

En recoupant les informations de la note de la DEAL [8], on peut estimer qu'il y avait à l'époque environ 20 000 bâtiments pour 100 000 habitants (cf. Tableau 4).

Etant donné que le rapport a été établi dans un contexte d'indemnisation des dégâts, de l'absence d'état de référence avant le séisme, et de la difficulté pratique de déterminer la cause des dommages constatés (sismique ou non), il est probable qu'un biais dans le nombre de construction impactée existe. Le rapport mentionne d'ailleurs des problématiques de ce genre résultant en un nombre de déclarations exceptionnellement élevé dans certaines communes.

On retiendra pour la suite de l'étude la répartition des dommages observés en 1993 par commune. Ces données constituent des éléments de comparaison pour les scénarios de dommage. On notera aussi la forte vulnérabilité des maisons de type case SIM de 1^{ère} et 2^{ème} génération) et qui présentent des facteurs de vulnérabilité spécifiques.

3.3. TYPOLOGIE

En s'appuyant sur les catégories proposées par la DEAL [8], les types constructifs suivants retenus:

- Type 1 : bâti précaire : de qualité très médiocre, mais constitué de matériaux légers. L'implantation dans des sites très exposés (mouvement de terrain, inondation) est courante.
- Type 2 : les maisons traditionnelles et les case SIM sans chaînage vertical:
 - Type 2.1 : Les maisons de type case SIM en briques de terre crue, de 1^{ère} génération (1979-1984) avec seulement un chaînage horizontal,
 - Type 2.2 : Les maisons de type case SIM en briques de terre crue, de 2^{ème} génération (1985-1990) avec des raidisseurs verticaux et en angle,
 - Type 2.3 : les maisons traditionnelles en brique de terre crue, ou en bois ou en adobe.
- Type 3 : les maisons en dur:
 - Type 3.1 : Les maisons d'un ou plusieurs niveaux, majoritairement en maçonnerie chaînée,
 - Type 3.2 : Les maisons de plusieurs niveaux, en système poteau poutre en béton, avec dalle et remplissage,
 - Type 3.3 : Les maisons de type case SIM en briques de terre crue, de 3^{ème} génération (1991-2006) avec harpage et chaînages.
- Type 4 : les bâtiments collectifs. Compte-tenu de leur faible nombre, un seul type sera retenu, supposé avoir 4 étages ou plus, et faisant appel à une structure poteau poutre en béton avec remplissage et présentant un premier niveau transparent (garage, commerce). Certaines photos de terrain montrent aussi la présence de bâtiments construits avec des voiles béton moins vulnérables. Les caractéristiques retenues pour le type « bâtiment collectif » sont donc conservatrices, mais au vu du faible nombre de bâtiments concernés, cela semble avoir peu d'influence sur les résultats de l'étude.

Cette typologie présente les avantages suivants :

1. D'avoir des types relativement faciles à différencier sur les images satellites et les observations visuelles rapides,
2. Offrir des points de comparaisons avec des données quantitatives (INSEE, DEAL),

3. Refléter la diversité et l'évolution des techniques constructives locales.

3.4. ESTIMATION DE LA VULNERABILITE

Les indices de vulnérabilité de la méthode RISK-UE ont été développés pour le bâti européen. On l'applique ici à un contexte différent. Des adaptations, sur les modèles des études réalisées selon cette méthode aux Antilles, et calées sur le retour d'expérience de séismes passés, ont été apportées. Pour Mayotte, un croisement des résultats de simulations avec les données de dommages issues des missions post-sismiques de 1993 [5] et 2018 [4] permettra de vérifier la pertinence des valeurs retenues.

L'indice de vulnérabilité (V_i) associé à chaque type est composé, selon la nomenclature Risk-UE :

- D'une valeur V_i^* relative au type constructif :
 - Type RC3.1 pour les bâtiments à portique béton et remplissage (type 3.2 et type 4) : 0.402
 - Type RC2 pour les bâtiments à voile béton (type 4) : 0.386
 - Type M3.4 pour les maisons en maçonnerie non chaînée et dalle de béton (type 2.1 et 2.2) : 0.616
 - Type M4 pour les maisons avec chaînages (type 2.3) : 0.451
 - Type W pour les maisons précaires en bois et en tôle : 0.447 à 0.84
- De paramètres aggravants, qui impliquent une majoration de l'indice de vulnérabilité :
 - Pour les structures en béton (Types 3.2 et 4):
 - L'absence d'application de code parasismique : +0.16 (par défaut pour les bâtiments construits avant 2000), pour les bâtiments de type 4 après 2000, on ne considèrera pas de majoration
 - L'irrégularité en plan (+0.04) et en élévation (+0.04)
 - L'insuffisance de joint parasismique : (+0.04)
 - La pente du terrain (+0.02) ou la construction en bord de falaise (+0.04)
 - Pour les structures en maçonnerie (Types 2.1, 2.2, 3.1 et 3.3):
 - Une mauvaise maintenance : +0.04
 - Un nombre de niveau supérieur à 3 : +0.02
 - Des faiblesses constructives (liaison) : +0.04
 - L'irrégularité en plan (+0.04) et en élévation (+0.02)
 - Une configuration en agrégats de bâtiments : +0.04
 - Des niveaux décalés entre mitoyens sans joints : +0.04
 - Des fondations de niveaux décalés : +0.04
 - La pente du terrain (+0.02) ou la construction en bord de falaise (+0.04)
- De paramètres favorable, qui impliquent une minoration de l'indice de vulnérabilité :
 - Pour les structures en béton (Types 3.2 et 4):
 - Le faible nombre de niveaux (-0.04) pour le type 3.2
 - Pour les structures en maçonnerie (Types 2.1, 2.2, 2.3, et 3.1):
 - Un bon état de maintenance (-0.04) pour le type 2.3
 - Des dispositions constructives favorables (-0.04) pour le type 2.3

Des valeurs moyennes probables de l'indice de vulnérabilité sont données pour chaque type de construction, reflétant une répartition réaliste des facteurs aggravants, à l'échelle de l'île.

Pour les Cases SIM (type 2.1 à 2.2 et 3.3) la valeur maximale de l'indice correspond au cas de constructions implantées sur terrain en pente et avec des extensions alors que la valeur minimale correspond à une construction en site plat non modifiée.

Pour les types 3 et 4, les valeurs maximales tiennent compte des facteurs aggravants que sont les irrégularités en plan et en élévation et l'absence de joint parasismique entre blocs.





Pour le type 1, il est très difficile d'estimer la vulnérabilité. Une maison à structure bois bien construite et d'un seul niveau est très peu vulnérable ; en revanche une maison en adobe ou en maçonnerie grossière l'est beaucoup plus. L'habitat de fortune est léger, mais sans disposition constructives adaptées au séisme ; il est par ailleurs souvent situé dans des sites en pente. Néanmoins, le besoin de résister aux vents violents en zone tropicale confère à ces constructions une certaine résistance aux efforts horizontaux. Il a été retenu de conserver une valeur haute de la vulnérabilité (0.85).

Pour évaluer l'impact de la variation de la vulnérabilité sur les résultats de scénarios de dommages, deux simulations (une avec la valeur minimale et une avec la valeur maximale) sont faites pour chaque scénario. Pour pallier la difficulté de déterminer précisément avec des données à l'échelle macro quelle valeur d'indice est la plus appropriée, les deux simulations donnent une plage de variation du résultat avec une bonne fiabilité.

A noter que les principaux dommages suite au séisme de 1993 ont concerné des types de maison dont l'indice de vulnérabilité maximal est compris entre 0.67 et 0.85 ; il est probable que les dommages ont surtout affecté des constructions qui auraient eu un indice de vulnérabilité de valeur maximale car les rapports font état de facteurs aggravants, notamment au niveau de la topographie. Pour la séquence sismique de 2018, peu de dégâts aux maisons individuelles ont été recensés, les photos du rapport font état de maisons de type 1, 2 ou 3 avec facteurs aggravants, donc des indices de vulnérabilité maximaux dans la plage 0.65-0.85 également. Il faut cependant noter que pour un certain nombre de cas l'existence de dommages antérieurs au séisme sont identifiés ou suspectés.

Le tableau de synthèse des différents types et de leur indice de vulnérabilité est donné ci-dessous.

Tableau 5 : Types de bâtiments et indices de vulnérabilité proposés

Photo	Type et description	Vi, min	Vi,max	Vi retenu	% bâtiments
	Type 1 : Habitat de fortune	0.45	0.84	0.85	27%
	Type 2 : Maisons traditionnelles et bois, SIM1 et SIM2	0.67	0.74	0.74	2%
	Type 3 : Maisons en dur, SIM3	0.46	0.67	0.65	71%
	Type 4 : Immeubles	0.39	0.68	0.58	0.2%

4. Scénarios de dommages

4.1. SCENARIOS DE DOMMAGES

Différents scénarios combinant un évènement sismique simulé, des configurations des sol et d'enjeux sont définis pour :

- Fournir des résultat pré-calculés pouvant servir d'entrée pour la prévention ou la préparation de crise ;
- Etudier la sensibilité des résultats aux paramètres clés (description des enjeux, effets de site, position des séismes) ;
- Fournir une base « validée » permettant un calcul rapide des dommages en cas de survenue d'un séisme, dès connaissance de ses caractéristiques (épicerne, magnitude).

4.1.1. Scénario sismique

Un scénario sismique est défini par un évènement (magnitude, épicerne, profondeur) et des lois de propagation choisies pour modéliser au mieux le contexte régional.

Il n'existe pas aujourd'hui de loi spécifique au contexte Mahorais qui fasse consensus. Deux lois génériques sont retenues, une pour l'atténuation de l'accélération avec la distance et l'autre pour la conversion accélération/intensité :

- loi d'atténuation Campbell et Bozorgnia 2000 (Normal et Strike-slip) [9], voir le §2.1 pour la justification de ce choix,
- loi de conversion Accélération/intensité d'Attkinson et Sonly 2000 [10].

Le type de loi pourra être modifié pour des simulations ultérieures, par exemple si les données en cours d'acquisition et les études concernant l'essai permettent de trouver une loi mieux adaptée.

D'autre part, chaque scénario simule un évènement sismique choisi. 4 configurations sont étudiées :

- le séisme historique de 1993, à l'ouest de Mayotte, avec les enjeux de l'époque (estimés)
- le séisme du 15 mai 2018, M=5.8, avec les enjeux de 2018
 - avec sa localisation réelle selon l'estimation du BRGM (profondeur 10km)
 - avec un épicerne situé au niveau de l'épicerne du séisme de 1993
 - avec un épicerne au plus près de Mamoudzou, position la plus proche de l'île selon les localisation du BRGM.

La première configuration fournit des résultats permettant de vérifier la validité des modèles et hypothèses. En jouant le séisme de 1993, avec des données réalistes sur les enjeux, on peut comparer les dommages simulés et les dommages constatés dans les missions post-sismiques. Le séisme de 1993 n'a pas fait l'objet de mesures sismologiques précises puisqu'il n'y avait pas de station proche à l'époque. Sa magnitude a été estimée à 5.3. Pour les besoins de la présente étude, la valeur M=5.8 similaire au séisme de référence de 2018 a été gardée, même si elle est surestimée.

Les trois simulations d'un séisme de magnitude $M=5.8$ permettent d'estimer la sensibilité des résultats (dommages) en fonction de la localisation du séisme. La dernière fournit un scénario majorant, utile à la préparation de crise. Il n'est pas possible en l'état actuel des connaissances des failles de justifier d'un séisme de magnitude supérieure à 5 à terre. Par ailleurs, le séisme de référence a probablement une origine tectonique et volcanique. La composante tectonique nécessite la présence d'une structure géologique compatible avec l'occurrence d'un tel séisme (longueur de faille active). Ramener son épicerne en bordure de l'essaim n'est pas justifié par la présence de structure géologique puisqu'elles n'ont pas été identifiées, mais permet une étude de variabilité dans un domaine de variation réaliste.

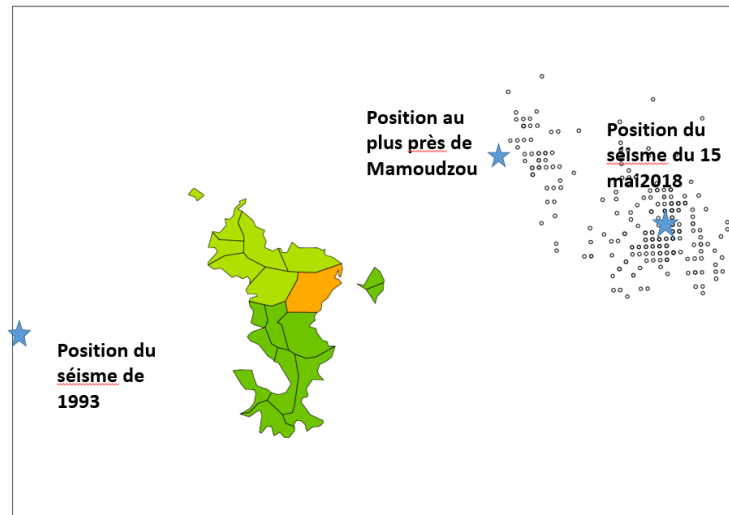


Figure 10 : Position des épicentres considérés dans les différents scénarios sismiques

4.1.2. Effets de site

Les effets de sites sont issus de l'interprétation de la carte géologique, en associant une classe de sol selon l'Eurocode 8 à chaque formation. Il en résulte une carte d'effet de site (cf partie 2.3).

4.1.3. Enjeux

Deux échelles de simulation sont employées. La première considère les données sur les bâtiments à l'échelle communale (Tableau 3). Cela permet d'évaluer la vulnérabilité à l'échelle de l'île et de prendre en compte des évolutions globales (populations de 1993/population de 2017). En revanche, le territoire d'une commune peut s'étendre sur des sols de différentes classes, donc avec des effets de site variables. Au sein du territoire, des zones urbanisées et des zones rurales ont des densités de construction très différentes. Le croisement enjeu/classe de sol est donc approximatif. Les résultats de simulations seront donc peu pertinents à l'échelle de la commune, mais par effet de moyenne, exploitables à l'échelle de l'île : nombre global de bâtiments endommagés, sensibilité aux hypothèses, tendances.

Un deuxième niveau de simulation (infra-communale) a été réalisé en considérant les limites des zones urbanisées dans les communes, et en considérant une répartition des types de bâtiments par quartier. Un quartier a donc une emprise délimitée, une densité de population homogène et une répartition des types de bâtiment donnée. Dans ce cas, le croisement entre la carte d'effet de site et la carte des enjeux est plus précise, les bâtiments étant situés sur des sols dont la classe est réaliste. Les résultats de dommages par communes sont donc plus pertinents à cette

échelle, ce qui permettra une analyse différenciée du risque. Ce niveau d'analyse n'est pertinent que si les caractéristiques de la construction sont connues avec une bonne précision, donc pour simuler l'état actuel.

4.1.4. Synthèse

Le tableau ci-dessous donne le résumé des caractéristiques des différents scénarios simulés.

Tableau 6 : Récapitulatif des différentes simulations

N°	Scénario sismique	Echelle	Effets de site	Enjeux	But
A1	Séisme du 15 mai (localisation BRGM)	Communale, répartition des types de bâtiments par commune	Forfaitaire	Vulnérabilité $V_{i,min}$	Sensibilité à la valeur d'indice de vulnérabilité
A2	Séisme du 15 mai (localisation BRGM)			Vulnérabilité V_i	
A3	Séisme du 15 mai (localisation BRGM)			Vulnérabilité $V_{i,max}$	
B3	Séisme du 15 mai (localisation au plus près de Mamoudzou)			Vulnérabilité $V_{i,max}$	Sensibilité à la position du séisme, scénario majorant
C3	Séisme du 15 mai (localisation 1993)			Vulnérabilité $V_{i,max}$	Sensibilité à la position
D3	Séisme de 1993 ($M_l=5.8$, localisation 1993, population 1993)			Vulnérabilité $V_{i,max}$	Vérification
E3	Séisme du 15 mai (localisation BRGM)			Infra-communale, répartition des types de bâtiments par polygones urbanisés	Etude spécifique
A3,infra	Séisme du 15 mai (localisation BRGM)	Vulnérabilité $V_{i,max}$			
E3,infra	Séisme du 15 mai (localisation BRGM)	Vulnérabilité $V_{i,max}$			

4.2. RESULTATS

Les résultats principaux et des comparaisons sont présentés ci-dessous. Ces résultats sont décrits en degrés de dommages selon la définition donnée par EMS98.





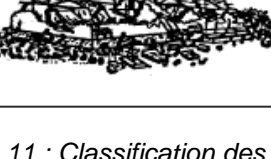
Classification des dégâts aux bâtiments en maçonnerie	
	<p>Degré 1: Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structural, légers dégâts non structuraux)</p> <p>Fissures capillaires dans très peu de murs. Chute de petits débris de plâtre uniquement. Dans de rares cas, chute de pierres descellées provenant des parties supérieures des bâtiments.</p>
	<p>Degré 2: Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)</p> <p>Fissures dans de nombreux murs. Chutes de grands morceaux de plâtre. Effondrement partiel des cheminées.</p>
	<p>Degré 3: Dégâts sensibles à importants (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants)</p> <p>Fissures importantes dans la plupart des murs. Les tuiles des toits se détachent. Fractures des cheminées à la jonction avec le toit; défaillance d'éléments non structuraux séparés (cloisons, murs pignons).</p>
	<p>Degré 4: Dégâts très importants (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)</p> <p>Défaillance sérieuse des murs; défaillance structurale partielle des toits et des planchers.</p>
	<p>Degré 5: Destruction (dégâts structuraux très importants)</p> <p>Effondrement total ou presque total.</p>

Figure 11 : Classification des dégâts aux bâtiments en maçonnerie (EMS98)

Le Tableau 12 donne les éléments de synthèse globaux.

Dans la suite on dénomme bâtiments endommagés les bâtiments pour lesquels un niveau de dommage supérieur ou égal au niveau D2 (fissures dans les éléments structuraux) est estimé.

Les niveaux de dommages D4 n'ont quasiment pas été observés, et au regard de la méthode utilisée pour la simulation n'ont pas de pertinence du point de vue statistique (queues de distribution).

Tableau 7 : Synthèse globale des dommages par simulation

N°	Scénario sismique	Description enjeux	Distance épicentre de MDZ	% D0	nD≥2	nD≥3
A1	Seisme du 15 mai (localisation BRGM). Effets de site forfaitaire	Echelle communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi,min.	53km	99,6%	30	2
A2	Seisme du 15 mai (localisation BRGM). Effets de site forfaitaire	Echelle communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi,retenue	53km	97,3%	209	18
A3	Seisme du 15 mai (localisation BRGM) Effets de site forfaitaire	Echelle communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi,max.	53km	97,3%	213	18
B3	Seisme du 15 mai (localisation au plus près de Mamoudzou) Effets de site forfaitaire	Echelle communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi,max.	32km	93,4%	646	68
C3	Seisme du 15 mai (localisation 1993) Effets de site forfaitaire	Echelle communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi,max.	53km	95,6%	382	35
D3	Seisme M15.8, localisation de 1993, population de 1993 Effets de site forfaitaire	Echelle communale. Population 1993. Vulnérabilité Vi,max.	52km	96,5%	86	7
A3,infra	Seisme du 15 mai (localisation BRGM) Effets de site forfaitaire	Echelle Infra-communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi,max.	53km	97,3%	205	17
E3	Seisme du 15 mai (localisation BRGM) Etude spécifique des effets de site	Echelle Communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi,max.	53km	96%	392	36
E3,infra	Seisme du 15 mai (localisation BRGM) Etude spécifique des effets de site	Echelle Infra-communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi,max.	53km	96,1%	283	25

%D0 : pourcentage de bâtiments non endommagés, nD≥2 : nombre de bâtiments dont le niveau de dommages est supérieur à D2 (compris), nD≥3 : nombre de bâtiments dont le niveau de dommages est supérieur à D3 (compris)

4.2.1. Scénarios de référence

Il s'agit du scénario rejouant le séisme le plus fort de la crise sismo-volcanique en cours, c'est-à-dire celui du 15 mai 2018, avec le jeu de données préconisé concernant les effets de site et les enjeux. On considère les résultats obtenus par les scénarios A2, A2,infra et E2,infra, pour tenir compte de la sensibilité des résultats à la démarche.

<p>Scénario de référence</p> <p>Séisme du 15 mai 2018</p> <p>M=5.8</p>	<p>Population totale : 250 000hab,</p> <p>Nombre de bâtiments : 64 460</p> <p>Epicentre à 50km à l'est de Mamoudzou, M=5.8</p>
	<p>Intensité macrosismique estimée à partir de l'accélération : III-IV</p> <p>Nombre total de bâtiment endommagés : 200 à 300</p> <p>Nombre de bâtiments ayant des dégâts structuraux modérés et/ou forts : 20 environ.</p> <p>Communes les plus touchées : Mamoudzou, Dzaoudzi, Pamandzi, Koungou, Dembeni.</p>

Les valeurs d'accélération simulées sont comparables à celles mesurées sur la station YTMZ à Mamoudzou.

L'intensité estimée à partir de l'accélération III-IV est plus faible que celle conclue par le rapport de mission du BCSF [4], intensité V-VI selon les communes et les endroits. On note cependant une intensité V-VI dans un quartier de Mamoudzou, qui correspond à une zone de forte amplification.

Si on considère la répartition des bâtiments endommagés, on note que Mamoudzou, Koungou, Dembeni, Dzaoudi et Pamandzi sont les communes les plus touchées, en particulier là l'amplification locale est marquée. La simulation calcule 200 bâtiments ayant un niveau de dommage D2 ou supérieur (1500 si on prend en compte le niveau D1), le rapport du BCSF [4] indique 63 bâtiments visités et 1000 déclarations de sinistres. Les ordres de grandeurs semblent bien respectés.

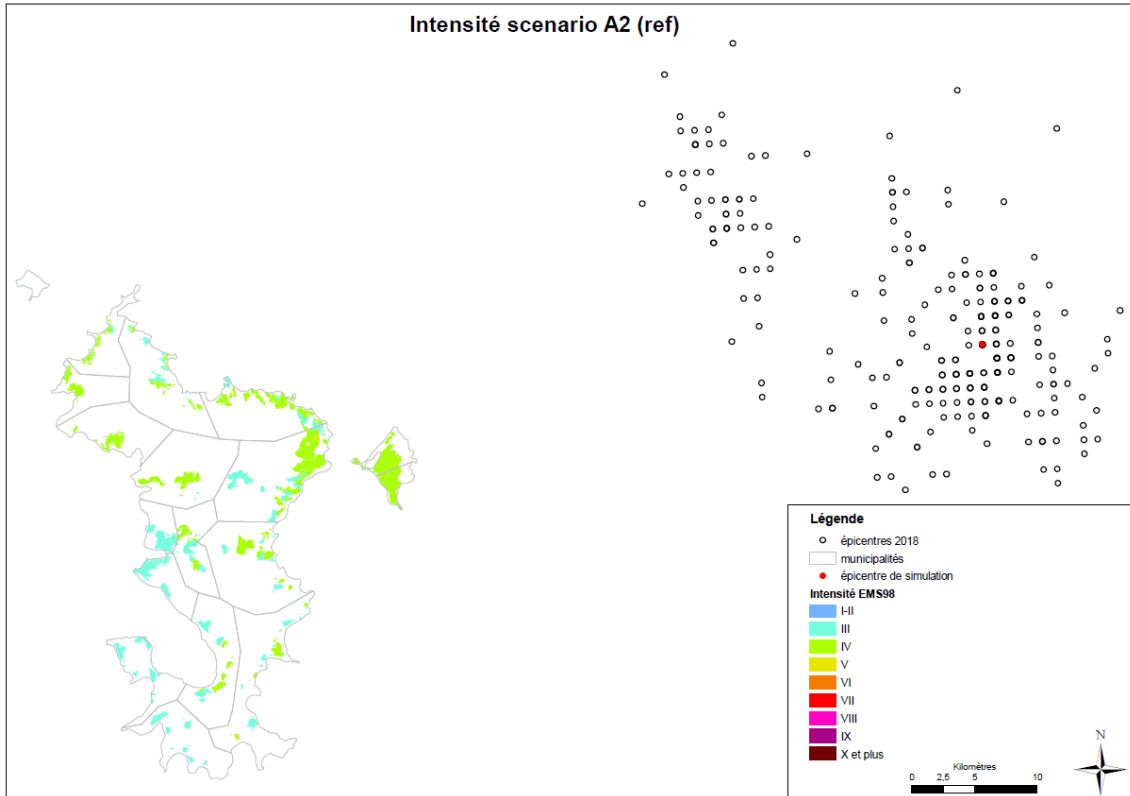


Figure 12 : Intensités calculées à partir des accélérations simulées

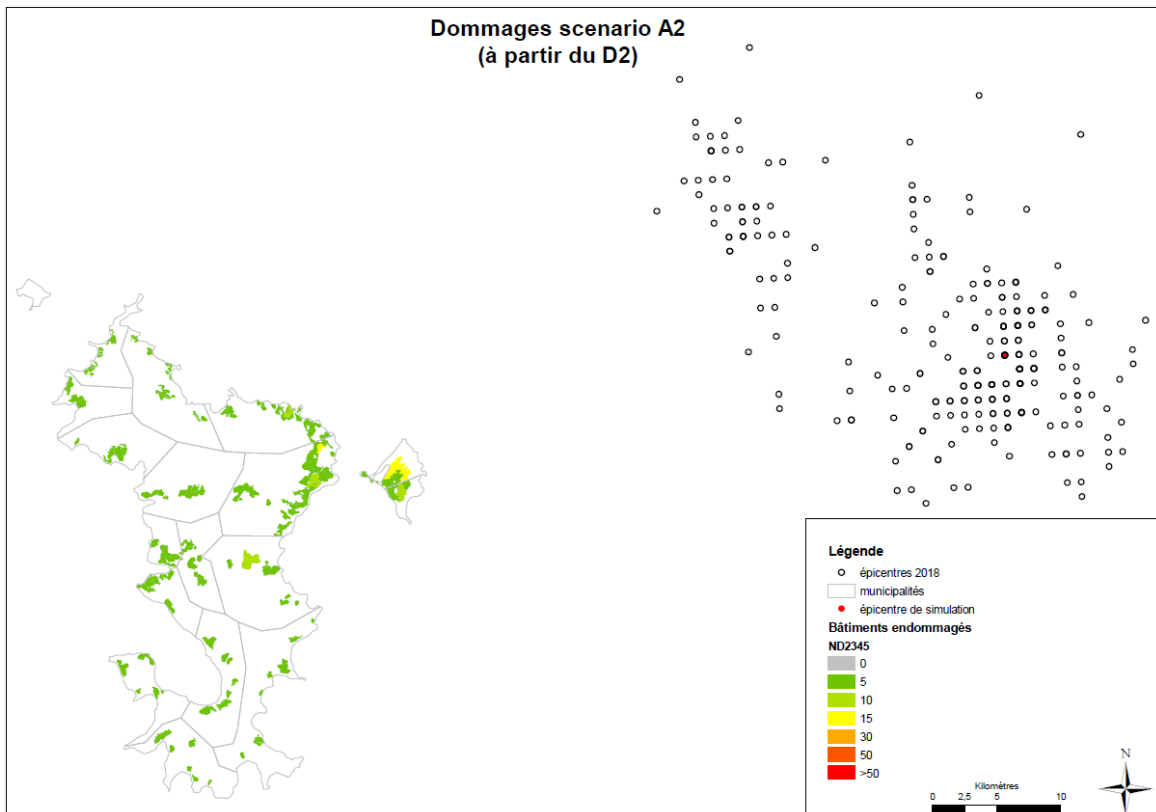


Figure 13 : Répartition du nombre de bâtiments endommagés

4.2.2. Effet de la localisation de l'épicentre

L'effet de la position de l'épicentre peut être obtenu en comparant les scénarios A3, B2, et C2. Entre les scénarios A3 et B2, l'épicentre est rapproché d'une vingtaine de kilomètres de Petite Terre. A magnitude et profondeur constante, le nombre de bâtiments endommagés augmentent significativement, puisque les accélérations à terre sont plus fortes, notamment dans les zones les plus densément peuplées.

Tableau 8 : Effet de la localisation de l'épicentre

N°	Scénario sismique	Distance épicentre de MDZ	% D0	nD≥2	nD≥3
A3	Seisme du 15 mai (localisation BRGM) Effets de site forfaitaire	53km	97,3%	213	18
B3	Seisme du 15 mai (localisation au plus près de Mamoudzou) Effets de site forfaitaire	32km	93,4%	646	68
C3	Seisme du 15 mai (localisation 1993) Effets de site forfaitaire	53km	95,6%	382	35

La comparaison des scénarios A3 et C3 révèle que l'épicentre est situé à une distance constante de Mamoudzou. Globalement l'ordre de grandeur du nombre de bâtiments endommagé à l'échelle de l'île est comparable, du fait du poids prépondérant de la commune de Mamoudzou, mais la répartition des dommages entre commune est différente.

4.2.3. Effet de l'indice de vulnérabilité

Comme l'indique la partie 3.4, l'estimation de l'indice de vulnérabilité des bâtiments est assez difficile. Le cas de l'habitat de fortune est particulièrement sensible. Les simulations A1, A2 et A3 permettent d'avoir une idée de la sensibilité des résultats pour la plage de variation de la valeur l'indice de vulnérabilité envisagée pour chaque type de bâtiments. Pour ce scénario sismique qui ne produit pas d'accélération à terre trop préjudiciable aux constructions, l'impact sur les résultats en terme de nombre de bâtiments endommagés est faible entre la valeur retenue et la valeur maximale du fait que la valeur retenue est très proche de la valeur maximale, sauf pour le type immeuble, peu représenté. Si on observe la plage totale de variation, pour les scénarios sismiques considérés, l'impact est assez sensible, un ordre de grandeur environ. Pour des scénarios faisant intervenir des séismes forts à terre, donc conduisant à des accélérations fortes et des dommages élevés, on pourrait avoir une différence plus nette entre les résultats obtenus avec la valeur minimale et la valeur maximale de l'indice de vulnérabilité.

Tableau 9 : Effet de la valeur de l'indice de vulnérabilité

N°	Description enjeux	Distance épicentre de MDZ	% D0	nD≥2	nD≥3
A1	Echelle communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi,min.	53km	99,6%	30	0
A2	Echelle communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi,retendue	53km	97,3%	209	18
A3	Echelle communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi,max.	53km	97,3%	213	18

Compte tenu de la typologie du bâti, il convient de garder en tête la prépondérance des constructions de type maison en dur, avec ou sans chaînages sur le résultat global de l'impact des séismes. Une étude complémentaire centrée sur ce type de bâti et considérant de façon prospective l'effet de mesures de réduction de vulnérabilité permettrait d'estimer l'efficacité de mesures de prévention en terme de réduction des risques à l'échelle de l'île.

4.2.4. Effet de la carte des amplifications des sols

Comme l'indique la partie 2.3, la carte des effets de site forfaitaires a été affinée pendant le projet avec les données provenant de la carte géologique et l'interprétation d'un expert. Les résultats sont présentés dans le Tableau 8. Nous constatons une forte hausse en termes des nombres de bâtiments pour les indicateurs nD≥2 et nD≥3, passant de presque 200 bâtiments pour le scénario A3 échelle communale à presque 400 pour le même scénario mais en prenant en compte les nouveaux effets de site. Cela s'explique par le fait que dans la nouvelle carte, l'étendue des zones des effets de site a été largement élargie et les valeurs d'amplification aussi.

En ce qui concerne le scénario A3 à échelle infra-communale, la différence entre le nombre des bâtiments pour l'indicateur nD≥2 est grande aussi (d'approximativement 200 bâtiments pour les effets de site forfaitaires à approximativement 280 pour la nouvelle carte des effets de site), mais moins importante que pour le calcul à l'échelle de la commune. Cela s'explique par le fait que le calcul de l'échelle infra-communale attribue aux enjeux la valeur de l'accélération (respectivement de l'intensité) de manière plus précise que le calcul à l'échelle communale. Cela démontre encore une fois l'utilité des inventaires et de la caractérisation des enjeux à des échelles plus petites que l'échelle communale.

Tableau 10 : Effet de la carte des amplifications des sols

N°	Description enjeux	Distance épicentre de MDZ	% D0	nD≥2	nD≥3
A3	Echelle communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi,max.	53km	97,3%	213	18
E3	Echelle communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi, retenue	53km	96%	392	36
A3,infra	Echelle Infra-communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi, max.	53km	97,3%	205	17
E3,infra	Echelle Infra-communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi, max.	53km	96,1%	283	25

4.2.5. Scénario 1993

Le scénario du séisme de 1993, considérant un séisme majorant (M5.8) permet d'étudier la fiabilité du modèle (rétro-scénario) en rejouant le séisme historique tout en tenant compte de l'évolution de la construction. Etant donné les approximations et hypothèses considérées, seuls les ordres de grandeurs sont pertinents. Il est utile de comparer à l'échelle de l'île le nombre de bâtiments endommagés pour différents niveaux de dommages, et les observations post-sismiques des rapports [5] et [6].

Scénario historique Séisme de 1993 M=5.8	Population totale (estimée) : 94 000hab, Nombre de bâtiments (estimé) : 19 000 Epicentre à 50km à l'ouest de Mamoudzou, M=5.8 (surestimée)
	Intensité macrosismique estimée à partir de l'accélération : IV-V Nombre total de bâtiment endommagés : 86 avec le niveau D2 (673 avec le niveau D1) Nombre de bâtiments très endommagés (effondrements partiels ou total) : 0 Communes les plus touchées : M'Tsamboro, Acoua, Mamoudzou, M'Tsangamoudji, Brandaboua

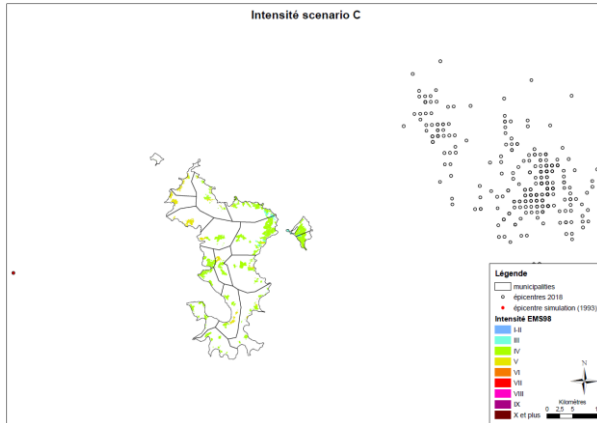


Figure 14 : Intensités macrosismiques calculées à partir de l'accélération

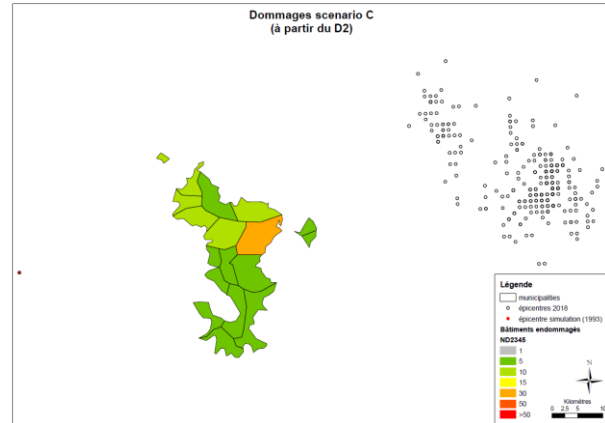


Figure 15 : Carte du nombre de bâtiments endommagés (Niveau D2 et plus)

La carte d'intensité à l'échelle infra-communale permet de conclure à un niveau IV à V selon l'échelle EMS98 en fonction des zones, une intensité IV MSK ayant été retenue dans les rapports d'étude post-sismiques. On peut noter que les zones urbanisées de M'Tsamboro, Acoua, M'Tsangamoudji, Brandaboua, Ouangani et Chirongui présentent une intensité plus élevée, qui se retrouve aussi dans le nombre de sinistres déclarés (Figure 9).

La répartition des dommages par commune ne semble pas directement comparable étant donné le niveau d'incertitudes, en particulier sur la répartition du nombre de bâtiments par commune à cette date. On peut cependant aussi suspecter une sur-représentation de la commune de Brandélé dans les déclarations de dommages de l'époque, à moins que des caractéristiques locales du bâti expliquent une vulnérabilité accrue. Au niveau de l'île, la simulation conclut qu'aucun bâtiment n'a été très endommagé, alors que les rapports de l'époque indiquent une centaine de reconstructions, d'autant plus que le séisme simulé est supposé être surestimé. Il y a là un décalage significatif qui amène à la conclusion que les hypothèses globales et les données disponibles ne permettent pas de simuler avec fiabilité le niveau d'endommagement du séisme historique. Par contre, la présentation de la carte d'intensité simulée est pertinente et semble bien reproduire la variabilité locale.

La comparaison entre les simulations C3 et D3, dans lesquels seul le nombre de bâtiments varie, illustre l'impact de l'évolution de l'urbanisation et de la construction. Le ratio entre le nombre de bâtiments en 2018 et en 1993 est de 3,3 alors que le ratio de dommages simulés est de 4.4. En 1993, l'habitat de fortune n'est quasiment pas représenté. La vulnérabilité du type habitat de fortune a donc un impact sur le résultat global.

Tableau 11 : Effet de l'urbanisation

N°	Description enjeux	Distance épicentre de MDZ	% D0	nD≥2	nD≥3
C3	Echelle communale. Population 2019. Vulnérabilité Vi,max.	53km	95,6%	382	35
D3	Echelle communale. Population 1993. Vulnérabilité Vi,max.	52km	96,5%	86	7

4.3. DISCUSSION COMPARAISON AVEC LES ENQUETES MACROSISMIQUE

En comparant les simulations A3, A3,infra et D3 avec les rapports de missions post sismiques [4], [5] et [6], il est possible de vérifier la validité du modèle et d'en préciser les limites.

Les conclusions de la comparaison sont synthétisées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 12 : Evaluation de la validité de laméthode et des données des scénarios de dommages

	Concordance	Discordances
Scénario du 15 mai 2018	Nombre de bâtiments endommagés	Intensités sous-estimées
Scénario de 1993	Intensités cohérentes	Nombre de bâtiments endommagés
Conclusions	Modèles et données bien calibrés pour la situation actuelle.	Hypothèses et données relatives aux constructions peu fiables, mais modèles globaux satisfaisants au premier ordre.

Au regard des résultats obtenus, il apparait que la répartition du bâti et la vulnérabilité soient correctement représentés, malgré les incertitudes expliquées dans le présent rapport. Si on s'intéresse aux résultats au niveau de l'île, les simulations à l'échelle communale offrent une précision suffisante. Pour visualiser des effets plus locaux, notamment dus aux effets de site, la description des enjeux à l'échelle infra-communale est plus pertinente.

5. Conclusions

Au regard du contexte sismique de l'île et des évolution récente du bâti, il est nécessaire de disposer de données permettant de réaliser des scénarios de dommages sismiques sur une base actualisée. Ces scénarios pourront être utilisés à des fins de prévention pour illustrer ce que produirait un séisme s'il se produisait sur l'île ou à proximité immédiate, et pour l'appui à la gestion de crise, si on simule des évènements majeurs, qui peuvent potentiellement impacter fortement à la fois le bâti et l'organisation de la réponse à la catastrophe.

Dans ce but, le BRGM a proposé à la DGPR de réaliser des scénarios de dommages sismiques adaptés à la situation actuelle de l'île. Ils comprennent des données relatives aux caractéristiques de sols et à la vulnérabilité du bâti qui tiennent compte des dernières connaissances. La caractérisation de la vulnérabilité a fait l'objet d'un traitement particulier pour adapter les méthodes indicielles classiques de caractérisation de la vulnérabilité au cas spécifique de Mayotte.

La validité de la présente étude est limitée par les conditions suivantes :

Les scénarios simulés ne concernent que les bâtiments à usage d'habitation et les résultats présentés sont valides du point de vue statistique. Ils ne doivent donc pas être extrapolés à d'autres construction ou à des bâtiments particuliers.

Les lois d'atténuation et les estimations de PGA ne sont valides que pour une gamme de séismes restreinte, typiquement une magnitude M_w comprise entre 5 et 6 et une distance hypocentrale de 50 km environ. Pour des évènements de magnitude plus importante (non constaté à ce jour dans les archives historiques), il est possible que des effets de saturation se produisent, et que les résultats de dommages soient sous-estimés.

Les séismes de magnitude inférieure à 5, aux distances hypocentrales considérées, ne sont pas suffisamment puissants pour générer un nombre de bâtiments endommagés (bâti courant) suffisant pour qu'une approche statistique soit pertinente.

La présente étude permet de pré-calculer un scénario de référence (séisme du 15 mai 2018), et d'identifier les données qui permettraient de simuler un autre scénario sismique à la demande. Cela pourrait être utile pour la prévention, pour simuler une situation probable à des fins pédagogiques, ou pour anticiper les besoins de la gestion de crise.

La comparaison des résultats de simulations pour le scénario de référence avec les données collectées par la mission d'estimation de l'intensité macrosismique présente une bonne cohérence globale.

Le jeu de données et de paramètres recommandé pour réaliser des estimations de dommages sont les suivants.

Loi d'atténuation (GMPE) : Campbell et Bozorgnia 2000 (Normal et Strike-slip)

Loi-accélération/intensité : Atkinson et Sonly 2000

Description des enjeux : échelle infra-communale, indices de vulnérabilité $V_{i,max}$ (Tableau 5)

Description des effets de site : carte d'effets de site révisée

Le jeu de données de référence est proposé dans la plateforme VIGIRISK du BRGM. Le présent rapport en est la justification technique en cas d'utilisation ultérieure, dans les limites de validité exposées ici. Par ailleurs, ces données servent également à alimenter SEISAID Mayotte, l'outil d'évaluation rapide des pertes, déclenché par les alertes sismiques et éditant des bulletins automatiques à destinations des acteurs de la gestion de crise.

Cette étude ouvre des perspectives d'approfondissement du risque sismique à Mayotte. Par exemple, une étude plus détaillée des maisons individuelles, en fonction de leurs facteurs de vulnérabilité propres seraient intéressante. En recalculant des scénarios spécifiques on peut aussi évaluer l'impact de la mise en œuvre de la réglementation parasismique sur la baisse du niveau de dommages. Une autre piste d'étude consiste à essayer de déterminer les impacts de secousses répétées, telle que celles de l'essai en cours sur la vulnérabilité. Enfin, des scénarios prospectifs peuvent être imaginés, en tenant compte de scénarios d'évolution de la population, des zones urbanisées et des constructions.

6. Bibliographie

- [1] RISK-UE (2003), RISK-UE WP4 Handbook. Vulnerability of current buildings - an advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Zoran V. Milutinovic & Goran S. Trendafiloski, September, 2003.
- [2] Caterina Negulescu, Audrey Hohmann, Agnes Tellez-Arenas , and Farid Smai, VIGIRISKS- A web platform for storing, sharing and executing scientific workflows for Natural Risk Assessment: part1 – data, approaches and case studies, Geophysical Research Abstracts Vol. 21, EGU2019-16030, 2019 EGU General Assembly 2019, <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-16030.pdf>
- [3] O Sedan, C Negulescu, M Terrier, A Roullé, T Winter, D Bertil, (2013), Armagedom—a tool for seismic risk assessment illustrated with applications, J Earthquake Eng, 17 (2013), pp. 253-281, 10.1080/13632469.2012.726604
- [4] BCSF-RENASS (2018) - Note macrosismique préliminaire - Essaim sismique à l'est de Mayotte : Analyse pour la période du 10 mai au 15 juin 2018.
- [5] Potin, J. (1993) – Etat des observations des désordres sismiques du 2 décembre 1993 à l'île de Mayotte, Socotec Réunion, 1993
- [6] Europact (1995) - Aide aux populations victimes du séisme à Mayotte, Rapport d'opération suite à la visite du 14 au 21 janvier 1995- Programme Europact, 9 février 1995
- [7] Données INSEE (2018), disponibles sur le site www.insee.fr, consultées en 2018
- [8] DEAL Mayotte, 2018 – Note à la DGPR « Estimation des « typologies constructives » du bâti à Mayotte » du 5 juin 2018.
- [9] Campbell, K. W. , and Bozorgnia, Y. (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 and 10.0 s, Earthquake Spectra 24, 139–171.
- [10] Atkinson, G. and Sonley, E. (2000) “Empirical relationships between modified Mercalli intensity and response spectra,” Bulletin of the Seismological Society of America 90, 537–544.
- [11] EMS98, Grunthal, G. (1998) European Macroseismic Scale, vol. 15, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg.
- [12] CraTerre (1999) - Mayotte Filière blocs de terre comprimée, typologie des éléments constructifs.

Références de la partie « Effets de site lithologiques »

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

NF En 1998-1 (2005) - Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments (P06-030-1), AFNOR.

AFPS (1993) - Guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique.

Auclair S., E. Vanoudheusden, J. Rey, A. Roullé, J.-C. Audru et G. Euchel (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., J.-F. Desprats, G. Euchel, O. Jossot, C. Mathon, J.-L. Nédellec, J.-P. Rançon, O. Sedan et N. Zornette, avec la collaboration de S. Guillobez (Cirad), de P. Daniel et de B. Haie (Météo-France) (2004) - Atlas des aléas naturels à Mayotte, Communes de Chiconi, Ouangani, Sada et Chirongui. Rapport BRGM/RP-52662-FR, 121 p., 68 figures ou photos, 4 tableaux, 54 cartes et 8 annexes.

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-Sedan et N. Zornette, avec la collaboration de P. Stollsteiner (Antéa), de S. Guillobez (Cirad), de P. Daniel et de B. Haie (Météo-France) (2004) - Atlas des aléas naturels à Mayotte, Communes de Mamoudzou, Koungou, Dzaoudzi et Pamandzi. Rapport BRGM/RP-53037-FR, 83 p., 65 figures ou photos, 4 tableaux, 28 cartes et 12 annexes.

Audru J.C., G. Euchel, J.-F. Desprats, O. Jossot, C. Mathon, J.-L. Nédellec, O. Sedan, avec la collaboration de S. Guillobez (Cirad), de P. Daniel et de B. Haie (Météo-France) (2004) - Atlas des aléas naturels à Mayotte, Communes de Brandrélé et Dombéni. Rapport BRGM/RP-53678-FR, 99 p., 78 figures ou photos, 3 tableaux, 36 cartes et 8 annexes.

Audru J.C., B. Auber, J.-F. Desprats, N. Frissant, O. Jossot, C. Mathon, D. Moiriat, J.-L. Nédellec, O. Sedan et N. Zornette, avec la collaboration de S. Guillobez (Cirad), de P. Daniel et de B. Haie (Météo-France) (2004) - Atlas des aléas naturels à Mayotte, Communes de Bandaboua et Tsingoni. Rapport BRGM/RP-53116-FR, 90 p., 65 figures ou photos, 4 tableaux, 30 cartes et 8 annexes.

Audru J.C., B. Auber, J.-F. Desprats, G. Euchel, O. Jossot, C. Mathon, J.-L. Nédellec, O. Sedan et N. Zornette, avec la collaboration de S. Guillobez (Cirad), de P. Daniel et de B. Haie (Météo-France) (2004) - Atlas des aléas naturels à Mayotte, Communes de Mtsambororo, Acoua et Mtsangamouji. Rapport BRGM/RP-53194-FR, 98 p., 78 figures ou photos, 3 tableaux, 36 cartes et 8 annexes.

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.

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.

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, avec la collaboration de S. Guillobez (Cirad), de P. Daniel et de B. Haie (Météo-France) (2004) - Atlas des aléas naturels à Mayotte, Communes de Bouéni et Kani Kéli. Rapport BRGM/RP-55077-FR, 86 p., 78 figures ou photos, 3 tableaux, 30 cartes et 8 annexes.

Lacquement F., Nehlig P., Bernard J. (2013) – Carte géol. France (1/30 000), feuille Mayotte (1179). Orléans : BRGM. Notice explicative par Nehlig P., Lacquement F., Bernard J., Audru J.-C., Caroff M., Deparis P., Jaouen T., Pelleter A.-A., Perrin J., Prognon C., Vittecoq B., 74 p.

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.

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.

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 Dembéni (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. Eucher et A. Bitri (2006) – Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Futur lycée de Dembéni (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 Eucher 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) – Evaluation 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.

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.

Sedan O., Terrier M., Negulescu C., Winter T., Douglas J., Roullé A., Rohmer J., S. Bès-De-Berc, C., De Martin F., Arnal C., Dewez T., Fontaine M. (2008) - Scénario départemental de risque sismique- Méthodologie et processus de réalisation. Rapport BRGM/RP-55415-FR, 455p, 96 fig., 45 tabl., 25 annexes

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

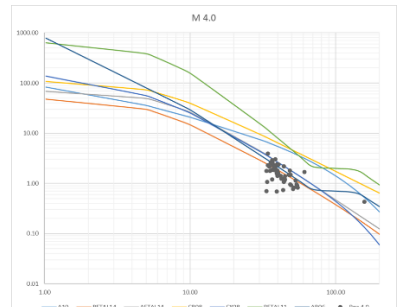
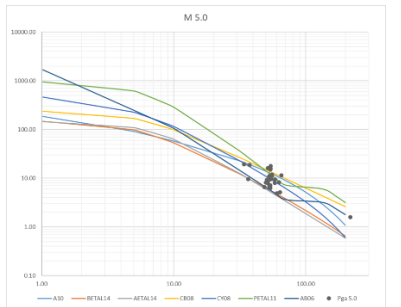
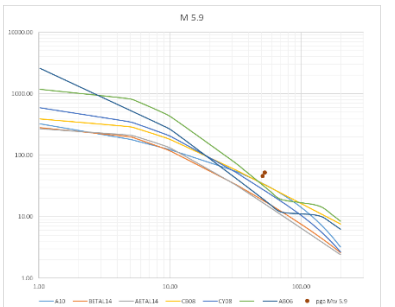
Vermeersch F., S. Auclair, E. Vanoudheusden, J. Rey, A. Roullé, A. Bitri et C. Cluzet (2008) – Étude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques. Futur lycée de Dembéni, site de Tsararano (Mayotte). Rapport BRGM/RP-56431-FR, 52 p., 13 fig., 6 tabl., 3 annexes.

Annexe 1

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

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

Tableau 13 : Comparaison des mesures avec les lois d'atténuation

Magnitude 4	Magnitude 5	Magnitude 5.9
		
<p>4 lois donnent des valeurs cohérentes (en valeur moyenne) : les lois de zone active CY08, Aetal14 et Beta14 et la loi de zone continentale stable AB06. Les autres données des valeurs de PGA trop fortes.</p>	<p>Les données sont plus dispersées, les 7 lois peuvent coller. Il y aurait plus de données sur la partie supérieure et donc on peut supposer une meilleure correspondance pour A10, Petal11, cb08 et cy08.</p>	<p>Toutes les lois sélectionnées donnent des valeurs plus faibles que les 2 points de mesure PGA. Les valeurs les plus proches sont obtenus pour A10, Petal11, CB08.</p>

Annexe 2

Caractéristiques techniques des cases SIM

La SIM (Société Immobilière de Mayotte) est un constructeur majeur à Mayotte depuis 1977. Le nombre de bâtiments qu'elle a construits est très important à l'échelle de l'île. Elle a de plus contribué à l'évolution des techniques constructives locales (matériaux locaux, techniques « industrialisées »). Les artisans impliqués dans les chantiers ont acquis des techniques qu'ils ont réutilisées ultérieurement dans d'autres chantiers.

Le rapport « Mayotte Filière blocs de terre comprimée, typologie des éléments constructifs » (CraTerre, 1999) donne des détails constructifs sur les maisons de type cases SIM.

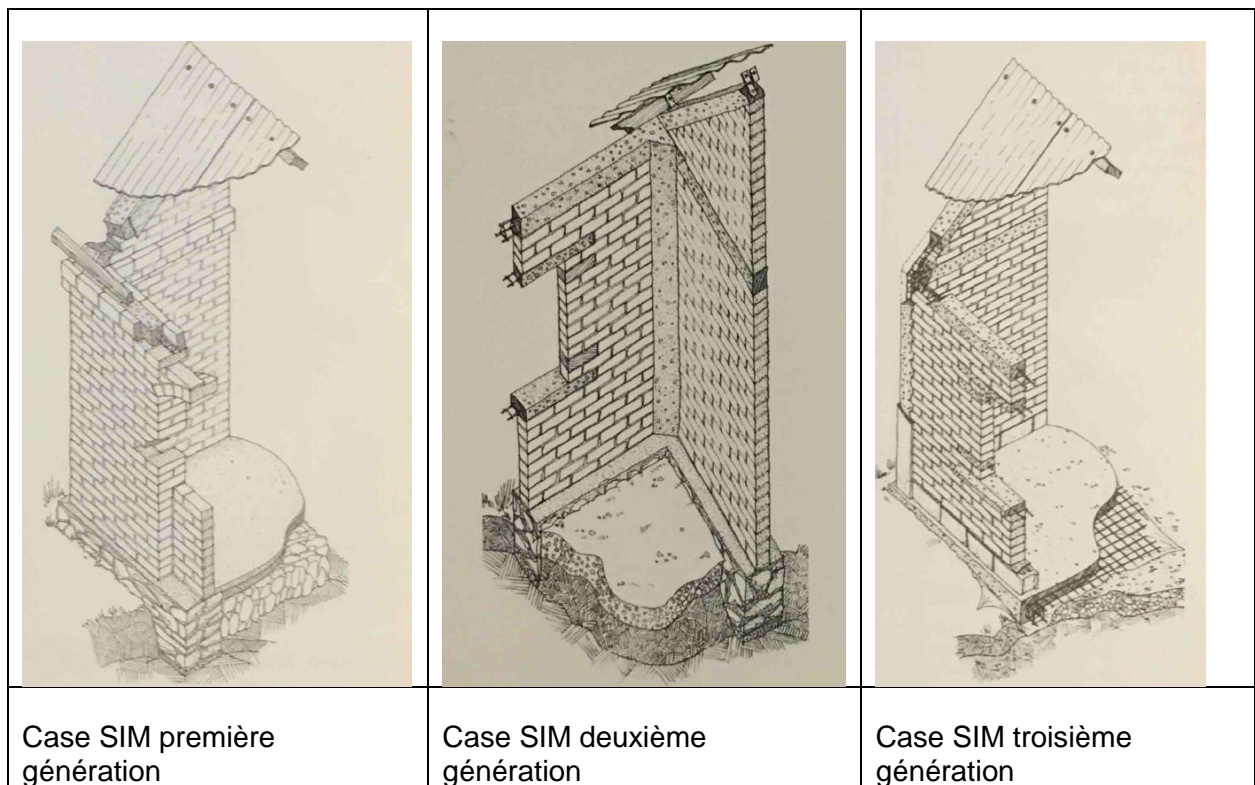


Figure 16 : Illustration des différents types de maisons case SIM (source : rapport CraTerre)

Le point commun de ces constructions est le recours à des briques de terre crue, dont la capacité de résistance est faible (compression). Les trois types de maisons ont un comportement sismique très différent :

- Le type 1 comprend des murs en briques de terre sans chaînage vertical. Néanmoins, le chaînage horizontal supérieur et le chaînage de rampant contribuent à une certaine homogénéité et le nombre de niveaux est faible. Par contre, la toiture ne peut pas jouer le rôle de diaphragme car elle n'est pas contreventée. L'assise est de bonne qualité.

Le type 2 reprend les caractéristiques du type 1 mais avec des chaînages verticaux, en appliqué côté intérieur dont l'efficacité est sujette à caution, et des linteaux/ appuis de fenêtre en béton armé. Un dallage remplace l'assise en pierre. Les fixations des solives sont scellées dans le chaînage de rampant. Le comportement au séisme est probablement assez similaire au type 1, malgré quelques améliorations.

- Le type 3 comprend un dallage formant radier, des chaînages verticaux avec harpage, et l'utilisation d'armatures de chaînage 3 et 4 barres. Les liaisons entre armatures semblent plus travaillées. La charpente ne forme toujours pas diaphragme. La vulnérabilité globale est plus faible que les types précédents, par l'effet des chaînages.

La technique alliant brique de terre et chaînage pose la question du mode de ruine. En particulier il est probable qu'une rupture en compression de la maçonnerie intervienne assez tôt, ce qui n'est pas le cas pour la maçonnerie classique.

Tableau 14 : Avantages et inconvénient des types de maisons SIM pour le comportement sismique

Type de maison SIM	Avantage	Inconvénient
Type 1	Toiture légère 1 seul niveau	Pas de chaînages verticaux Pas d'effet diaphragme
Type 2	Toiture légère 1 seul niveau	Chaînages verticaux peu efficaces Pas d'effet diaphragme
Type 3	Toiture légère Chaînages efficaces	Pas d'effet diaphragme Deuxième ou troisième niveau possibles

Dans l'optique d'une identification des types de bâtiments par une enquête visuelle lors d'une mission terrain, il convient de noter les caractéristiques suivantes :

- Type 1 : linteaux en arc, planelles en saillie au niveau du chaînage supérieur
- Type 2 : harpage des angles (pas de chaînage vertical), linteaux droits
- Type 3 : chaînages d'angles visibles

Dans la pratique la différenciation entre types 1 et 2 peut être délicate, surtout avec des variations architecturales (forme des fenêtre), mais l'impact d'une confusion est limité car leurs comportements sismiques sont proches, donc les vulnérabilités associées aussi. Par souci de simplicité, les types 1 et 2 pourront être rassemblés.

Annexe 3

Analyse de sensibilité du calcul de PGA

Le calcul de PGA pour le séisme de magnitude 5.8, avec les caractéristiques dans le Tableau 1 et avec les effets de site calculés à partir des atlas, donne des valeurs entre 15 et 35 cm/s² (Figure 3). Ces valeurs sont inférieures à la valeur maximale enregistrée (voir Tableau 1, c.a.d 52.7mg). La loi d'atténuation utilisée est Campbell and Bozorgnia 2000 Normal and Strike-slip (c'est par ailleurs celle qui donne de valeurs de PGA les plus grandes).

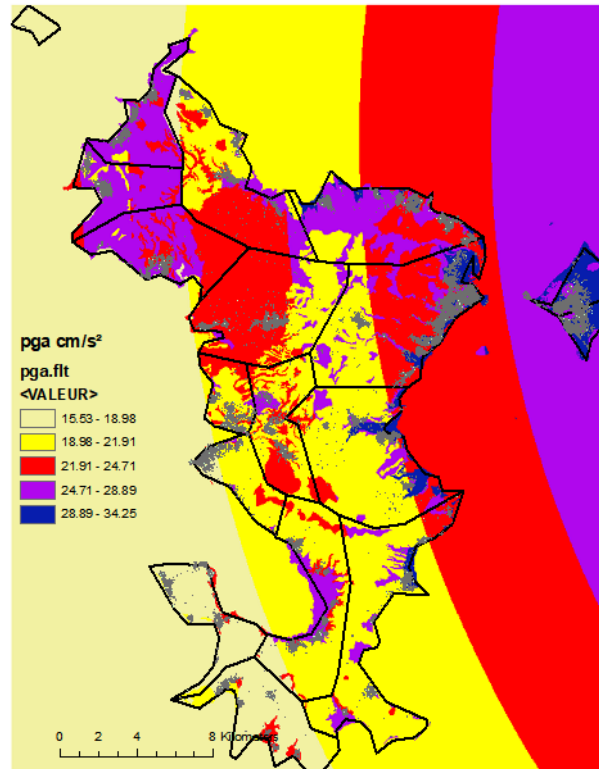


Figure 17: Calcul Armagedom de PGA (cm/s²) avec effets de site pour le séisme ayant les caractéristiques du Tableau 1

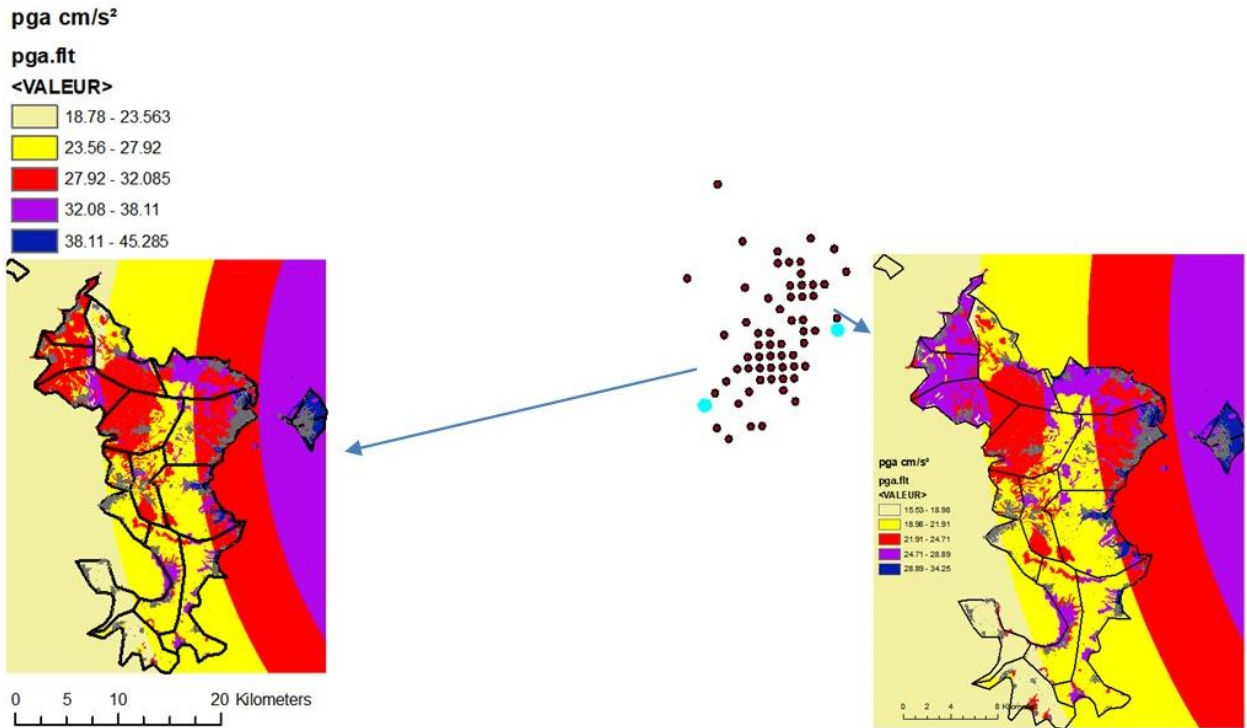


Figure 18 : Sensibilité du PGA par rapport à la position de l'épicentre dans l'essai sismique (les deux épicentres utilisés pour les calculs sont sélectionnés en bleu)

Les valeurs du PGA varient fortement en fonction de la position de l'épicentre dans l'essai; en gardant toutes les autres caractéristiques du séisme identiques, et en variant la position de l'épicentre du côté Est de l'essai (par exemple, celui correspondant au séisme de magnitude 5.8) vers celui correspondant à une localisation côté Ouest de l'essai, nous obtenons une valeur de PGA d'approximativement 45 cm/s², qui sont plus proche des valeurs enregistrées. Les intensités calculées par Armagedom correspondant à la Figure 5 sont de l'ordre 4.5.

En gardant les caractéristiques du séisme du 15 mai 2018 de magnitude 5.8 et son épicentre (Tableau 1), mais en attribuant cette fois ci les effets de site à des classes EC8 (faible =A, moyenne =B, forte =E ayant un coefficient d'amplification forfaitaire de 1, 1.35 et respectivement 1.8) nous obtenons des valeurs de PGA de même ordre de grandeur (observé 52.7 mg vs calculé 51.38 mg) avec ceux enregistrées.

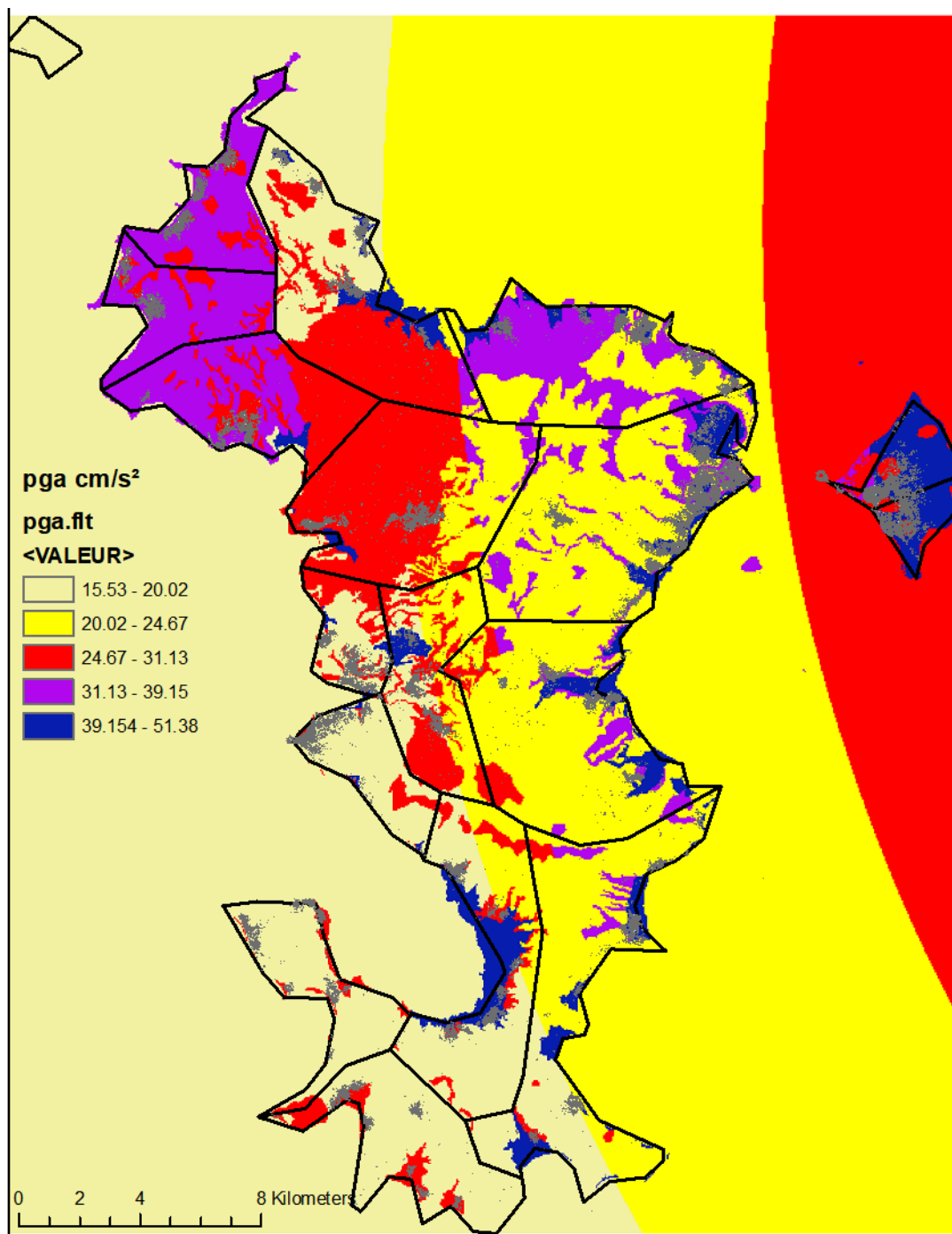


Figure 19: Calcul Armagedom de PGA (cm/s²) avec effets de site pour le séisme ayant les caractéristiques du Tableau 1 avec des effets de site associés classes EC8 : A, B et E.



Centre scientifique et technique
Direction risques et prévention
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr