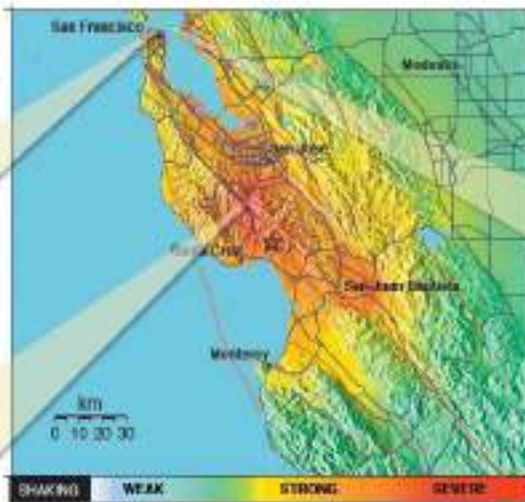


Université de Nice Sophia Antipolis
Parcours Sciences de la Terre et de l'Environnement

Rapport de stage

Licence 3

**ShakeMap dans le Sud-est de la France :
Quelle atténuation choisir ?**



Auteur

Mamadou Saliou Aliou DIALLO

Responsables de stage

Françoise COURBOULEX

David AMBROIS

Anne DESCHAMPS

GEOAZUR, SOPHIA ANTIPOLIS

21/03/2018

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

ABSTRACT

INTRODUCTION

I-	CONTEXTE DU STAGE.....	5
II-	CONTEXTE TECTONIQUE ET SISMIQUE DU SUD-EST DE LA FRANCE.....	7
III-	L'OUTIL SHAKEMAP.....	8
	III-1. Définition et utilité.....	8
	III-2. Paramètres de calcul.....	9
IV-	METHODOLOGIE.....	11
	IV-1. Présentation des données et outils.....	11
	IV-2. Expérimentation d'autres GMPEs.....	14
	1- Présentation des GMPEs.....	14
	2- Les indices de comparaison.....	15
	3- Phase d'expérimentation.....	15
V-	RESULTATS ET INTERPRETATION.....	19
	V-1. Résultats.....	19
	V-2. Interprétation des résultats.....	21
	V-3. Choix de la GMPE.....	22
	CONCLUSION.....	24
VI-	ANNEXE.....	25
VII-	BIBLIOGRAPHIE.....	27
	1- Références citées.....	27
	2- Ouvrages consultés.....	27
	3- Web.....	27

REMERCIEMENTS

Je déclare mes sincères reconnaissances et mes vifs remerciements à Mr AMBROIS David, Mme COURBOULEX Françoise et Mme DESCHAMPS Anne pour la disponibilité et la sollicitude qu'ils ont manifestées à mon égard tout au long de ce stage.

ABSTRACT

Although Western Europe is considered to be a zone of moderate seismicity, the devastating and unpredictable nature of some earthquakes that have shaken it in the past attracts the attention of seismologists. Particularly south-eastern France, characterized by the alpine orogeny, is a region where demographic and industrial development increases vulnerability.

In order to prevent seismic risk in the region, the Geoazur Observatory Center is equipped with a monitoring system to automatically locate earthquakes and determine their characteristics. This system is complemented by the ShakeMap tool which allows map representation the extent of damage of any earthquake with a magnitude equal or more than 3. The shaking intensity (PGA) represented on the shakemap is calculated from the data from the stations and also from a mitigation relationship called GMPE (Ground Motion Prediction Equation). This equation makes possible to estimate the movements of the soil at the points situated between the stations.

The Akkar and Boomer 2007 equation currently used by Geoazur provides an amplified estimate of recorded shaking. During this internship the objective was to find a GMPE more adapted to the region by performing a series of simulations of about thirty GMPEs, sorted out of hundreds according to the conformity of their parameters to the region. Simulations are made using applications and computer software to generate figures through which we make a comparative study of GMPEs based on 2 indices: the visual and RMS (Root Mean Square).

From this methodology, we have distinguished different types of GMPEs of which only one, composed of 3 models satisfies the desired characteristics. A more in-depth simulation of these 3 laws allowed us to distinguish one of them by the quality of these predictions and to propose it for future calculations of shakemaps.

INTRODUCTION

La multiplication et la densification des réseaux sismologiques dans la plupart des régions du monde permettent aux observatoires sismologiques de calculer rapidement la localisation et la magnitude des séismes. Dans le sud-est de la France, à terre, on identifie ainsi tous les séismes de magnitude 1.8 ou plus en temps quasi réel. Cependant cette information seule ne permet pas d'avoir une estimation des vibrations à la surface du sol en chaque point. Or ce sont ces vibrations qui causent des dégâts aux bâtiments et des pertes en vies humaines. Une vision cartographique de la valeur des vibrations en chaque point permettrait d'avoir une estimation rapide des dommages potentiels suite à un séisme et ainsi de pouvoir prévoir une intervention plus ciblée sur le terrain. C'est dans ce cadre que l'outil ShakeMap a été développé : il permet d'évaluer l'étendue des effets d'un séisme, de prédire une carte des intensités autour de l'épicentre et les dommages potentiels qu'il a pu engendrer.

La production des cartes à travers ShakeMap peut se faire de façon automatique, déclenchée par tout séisme ayant une certaine valeur (à partir de magnitude = 3 pour Géoazur) dans une région où est installé le système ShakeMap. En quelques minutes après le séisme, ces cartes sont mises à la disposition du public, de la communauté scientifique et des responsables de secours afin de faciliter la communication et la réponse aux urgences. Produire de telles cartes et atteindre un tel progrès a été difficile car l'outil, pour être efficace s'appuie sur les données de stations sismologiques qui doivent être mises à disposition en temps quasi réel. Il demande aussi des ressources informatiques importantes qui sont plus accessibles à la sismologie actuellement. En plus, les équations adéquates mettant en relation mouvements du sol et intensité des dommages n'ont été développés que récemment (*Wald et al., 2000*).

Le Pôle observatoire de Géoazur, équipe avec laquelle je suivrai mon stage sous la direction de COURBOULEX Françoise et AMBROIS David, est l'organisme chargé de réaliser ce travail dans le Sud de la France. Le pôle observatoire sismologique de Géoazur dispose sur le terrain d'un réseau de sismomètres et d'accéléromètres pour surveiller la sismicité de la région. Il utilise actuellement la relation d'atténuation d'Akkar et Boomer (2007) pour générer les cartes <<shakemap>>.

Mais l'équipe s'est rendue compte que cette relation surestimait de manière importante les mouvements du sol enregistrés.

L'objectif de mon stage a été de tester d'autres relations d'atténuation afin de sélectionner celle qui est la plus adaptée à la région du sud-est de la France.

La rédaction de ce présent rapport sera consacrée à la définition du contexte de stage, à l'étude du contexte géologique et sismique de la région, la description de l'outil shakemap en identifiant son utilité et ses paramètres de calcul. Ensuite la description de la méthodologie suivie pour traiter le sujet et les résultats auxquels nos démarches ont abouties. Enfin une conclusion pour situer la continuité de notre présent travail.

I- CONTEXTE DU STAGE

L'acquisition des données sismiques dans la région du sud de la France est assurée par un réseau de sismomètres et d'accéléromètres permanents. Ces systèmes enregistrent en temps réel les vibrations du sol et permettent la localisation et la détermination de la magnitude des séismes en quelques minutes.

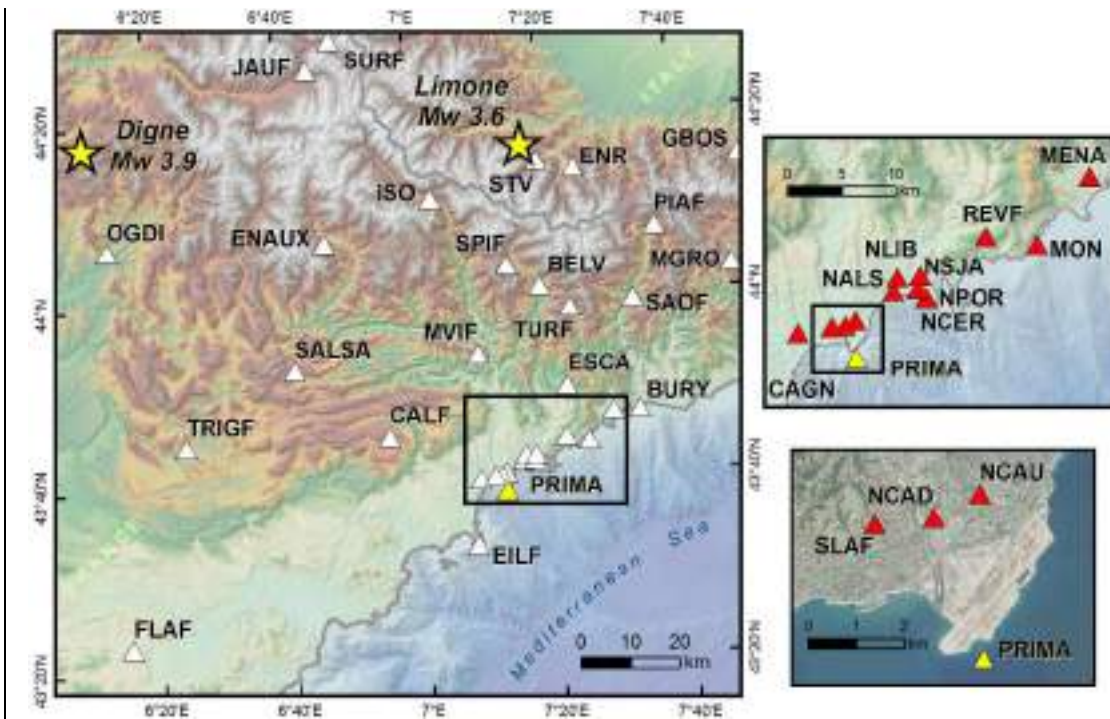


Figure 1. Cartes (zoom successifs) des stations sismologiques permanentes du sud-est de la France gérées par l'observatoire sismologique de Géoazur. Stations large bande à terre (triangles blancs), station sous-marine (triangle jaunes), stations accélérométriques (triangles rouges). Etoiles jaunes : localisation de deux séismes récents (utilisés dans ce stage).

Lorsque le séisme détecté atteint une magnitude égale à 3, l'outil shakemap se déclenche automatiquement et génère une carte représentant l'intensité des secousses engendrées durant le séisme (**fig 2**). Dans les endroits où on ne dispose pas de stations, l'intensité des mouvements du sol est estimée à l'aide d'une relation d'atténuation construite à partir des données réelles acquises dans différentes régions du monde. Cette relation d'atténuation est appelée GMPE (Ground Motion Prediction Equation).

L'équipe Pôle observatoire de Géoazur utilise actuellement la relation d'atténuation d'Akkar et Boomer (2007) dans cette procédure. Mais il a été constaté que cette relation surestimait les mouvements du sol de manière importante. Sa prédiction n'est pas conforme aux données enregistrées par les stations (**figure 3**).

En effet, on remarque sur cette figure que jusqu'à 70km l'estimation correspond quasiment aux secousses enregistrées par les stations, mais à partir de 80km l'écart entre estimation et valeurs réelles se dessine nettement. Toutefois, sur quelques stations situées entre 100 et 110km nous observons une cohérence entre prédictions et mesures réelles. Ces stations sont très probablement situées sur des zones à effets de sites aux environs de la ville de Nice.

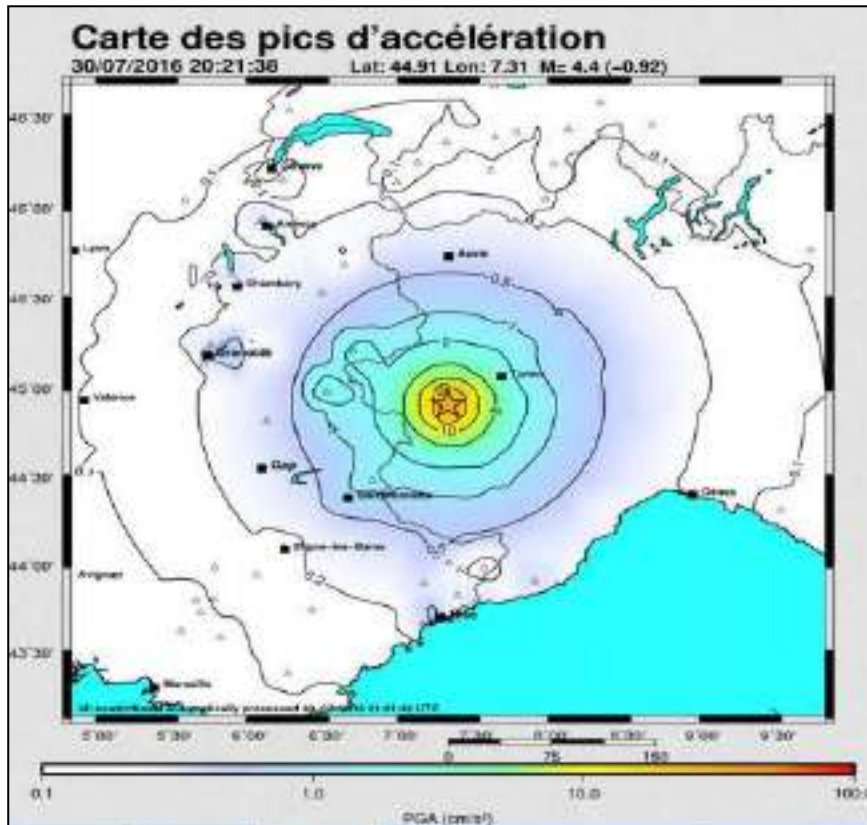


Figure 2. Carte shakemap du séisme oca2016oxbl (Magnitude = 4.5) situé en Italie. Les courbes correspondent au PGA (en cm/s^2) dont les valeurs diminuent en fonction de la distance par rapport à l'épicentre. Les couleurs représentent l'intensité parasismique et évoluent de l'orange (autour de l'épicentre) au blanc. Les fortes valeurs de PGA et les couleurs les plus proches du rouge indiquent les endroits où le séisme a été le plus ressenti. L'aspérité des courbes et l'irrégularité des couleurs caractérisent les effets de site.

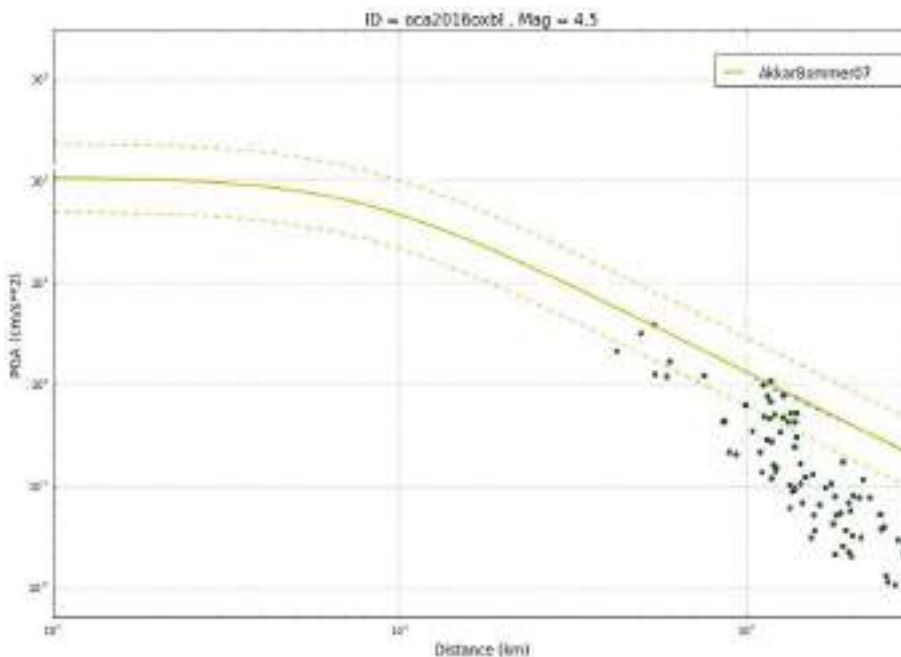


Figure 3. Résultats de l'estimation de PGA du séisme oca2016oxbl (Magnitude = 4.5) à partir de la loi Akkar et Bommer 2007. L'axe des abscisses représente la distance (en km) et l'axe des ordonnées, les valeurs de PGA ('en cm/s^2) prédites et mesurées. La distance et le PGA varient de façon logarithmique. La courbe correspond aux valeurs de PGA prédites par la GMPE, les lignes en pointillés sa marge d'erreur et les points noirs représentent les mesures enregistrées par les stations.

Il existe des centaines de GMPEs avec des auteurs différents dont elles portent généralement le nom. Chaque GMPE est conçue pour une région déterminée de la Terre, avec ses paramètres et ses particularités. Quelques unes font exception : elles sont conçues pour fonctionner dans toutes les régions du monde tout en ayant des zones de prédilection. Alors, parmi ces relations d'atténuation disponibles, laquelle choisir ? L'objectif du stage sera donc de tester ces relations afin de sélectionner une qui est plus adaptée au Sud-est de la France.

II- CONTEXTE TECTONIQUE ET SISMIQUE DU SUD-EST DE LA FRANCE

La région d'étude est située dans la partie sud des Alpes françaises entre le massif cristallin de l'Argentera et le bassin océanique ligurien (**figure 4**). Les déformations localisées dans la partie Ouest de la région alpine méditerranéenne résultent principalement de la convergence entre les plaques africaine et eurasienne il y'a 100 millions d'années et l'ouverture du bassin océanique ligurien (*DeMets et al., 1994*). La jonction entre le sud des Alpes et le bassin ligurien est une région géologiquement complexe où trois (3) unités géologiques se joignent :

- *L'unité des massifs cristallins* ; ces massifs magmatiques et métamorphiques paléozoïques constituent le sous-bassement des sédiments des chaînes subalpines (**Carole Petit, 2017**).
- *Les unités sédimentaires de la partie sud des massifs subalpins*, où les arcs de Nice et Castellane se chevauchent ; ces deux arcs sont des séries de plis et de failles qui ont affecté les sédiments du Mésozoïque jusqu'au Paléogène et qui surmontent les évaporites du Trias supérieur (**Perez, 1975 ; Laurent, 1998**).
- *Le bassin océanique ligurien*.

L'Europe de l'Ouest est considérée comme une région à sismicité modérée. Néanmoins, à cause de la vulnérabilité de la plupart de ses villes, des séismes ont causé d'importants dégâts sociaux et matériels dans le passé (le séisme ligurien avec une magnitude de 6,4 causa la mort de 600 personnes en 1887). En plus, des investigations sur la paléosismicité en Europe indiquent que des régions à activité sismique modérée de nos jours ont révélé une forte sismicité dans le passé (*Camelbeeck et al., 2000*). La sismicité actuelle dans la zone de jonction entre la partie sud des Alpes françaises et le bassin ligurien est l'une des plus actives parmi les régions ouest-européennes avec des magnitudes qui s'élèvent jusqu'à 6 au moins. La démographie et le développement industriel sont d'autres facteurs qui augmentent la vulnérabilité de cette région.

La localisation et l'estimation de la magnitude et de la fréquence des séismes est la base de la prédiction du risque sismique (*Larroque et al., 2001*).

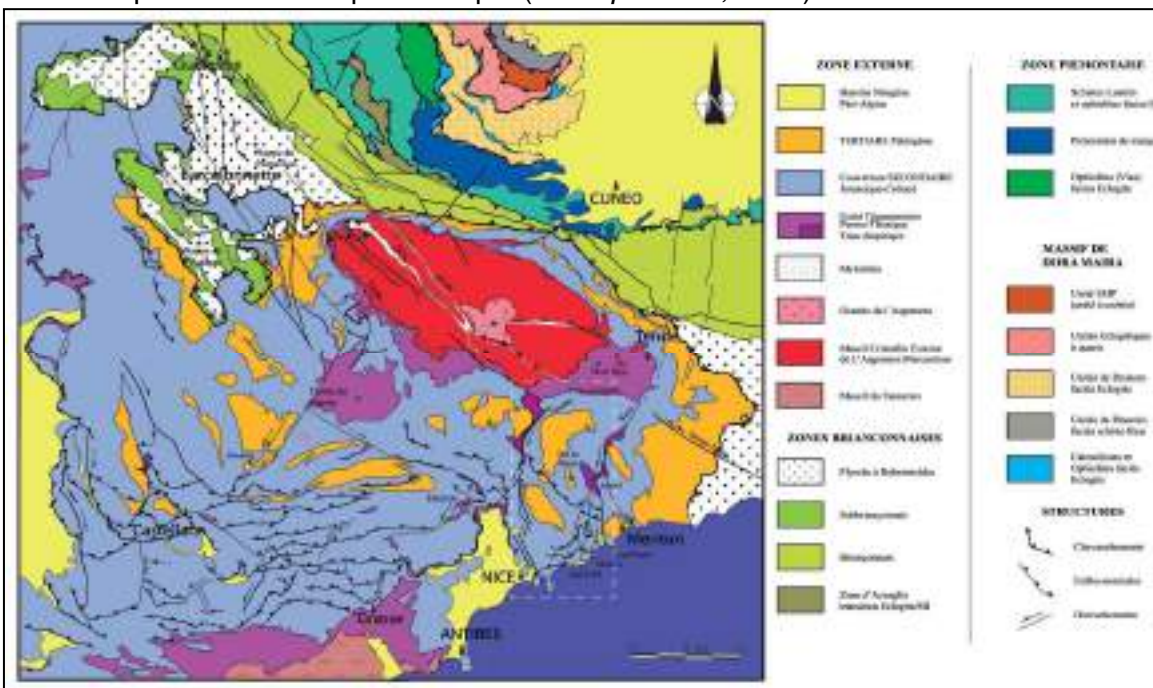


Figure 4. Carte géologique et tectonique du Sud-est de la France.

III- L'OUTIL SHAKEMAP

III-1. Définition et utilité

ShakeMap est un outil utilisé pour représenter sur une carte l'ampleur et l'étendue des dégâts enregistrés pendant un séisme. Il fournit des cartes en temps quasi réel du mouvement du sol et de l'intensité des secousses durant un séisme de magnitude notable (**figure 5**). ShakeMap est un logiciel autonome et fonctionne conjointement avec des systèmes de traitement sismique régionaux comme SeisComp et Antelope qui assurent l'acquisition des données sismiques, la détection des séismes et leurs paramètres dont dépend la réalisation des cartes shakemaps.

La génération d'une shakemap est automatique. Dans les deux premières minutes suivant le séisme, des paramètres de mouvement du sol sont disponibles à partir du composant du réseau le plus proche, et en quelques minutes, la plupart des stations proches de la source y contribuent. Une contribution plus complète est disponible dans les 10 à 15 premières minutes de l'événement. Les cartes initiales sont faites avec les premières données disponibles, et elles sont mises à jour automatiquement au fur et à mesure que d'autres données sont acquises. Les mouvements du sol sont convertis en intensité sismique qui est codée en couleur pour montrer les dommages potentiels et le niveau des secousses perçues à tous les endroits. Des cartes supplémentaires fournissent des informations sur des fréquences spécifiques des ondes, qui peuvent être utilisées pour anticiper la réponse pour la construction des différents types de bâtiments dans la région (*Wald et al., 2000*).

La distribution des secousses d'un séisme, qu'elle soit exprimée en accélération ou intensité maximale, fournit aux responsables une augmentation significative de l'information au-delà de la magnitude et de l'épicentre. Les cartes en temps réel fournissent une occasion immédiate d'évaluer la portée d'un événement, de déterminer quelles zones ont subi les plus fortes intensités et les impacts probables (**figure 5**). Ces cartes trouveront certainement une utilité supplémentaire pour soutenir la prise de décisions concernant la mobilisation des ressources, le secours aux victimes et l'évaluation des dégâts.

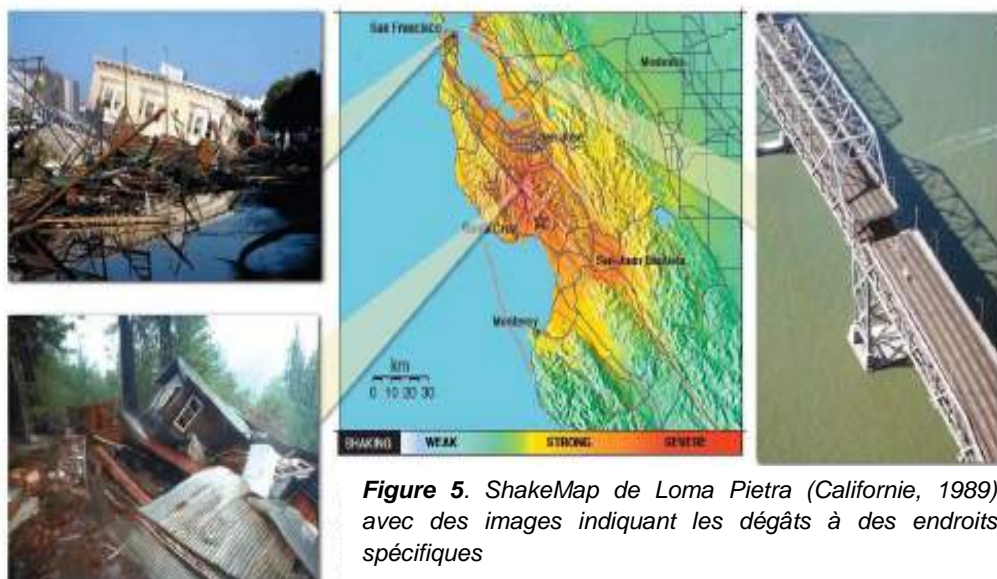


Figure 5. ShakeMap de Loma Pietra (Californie, 1989) avec des images indiquant les dégâts à des endroits spécifiques

III-2. Paramètres de calcul

a- Les données sismiques

Les mouvements du sol, la localisation du séisme et sa magnitude sont déterminés en utilisant toutes les stations disponibles dans la région. Cette procédure est automatique et est assurée à Géoazur par le système SeisComp. S'il y avait des stations à chacun des dizaines de milliers de points de grille, alors la création des cartes shakemaps serait relativement simple. Bien entendu, les stations ne sont pas disponibles pour tous ces points et, dans de nombreux cas, elles peuvent être situées à des dizaines de kilomètres de la station d'observation la plus proche.

b- GMPE (Ground Motion Prediction Equation)

Les GMPEs, encore appelées relations (équations) d'atténuation ou modèle empirique de prédiction permettent d'estimer les secousses du sol enregistrées lors d'un séisme d'une certaine magnitude (*Douglas, 2017*). Pour la réalisation d'une carte shakemap, les mouvements du sol (PGA) aux points où une station n'est pas disponible (où le PGA n'est pas directement mesuré) sont estimés à l'aide d'une équation d'atténuation appelée GMPE adaptée à la région (*Cauzzi et al., 2014*).

Comme nous l'avons indiqué précédemment, chaque GMPE a ses paramètres et ses particularités propres. La relation d'atténuation d'Akkar et Bommer 2007 nous permettra d'illustrer les paramètres principaux d'une GMPE.

Equation d'Akkar et Boomer (2007)

$$\text{Log } y = b_1 + b_2M + b_3M^2 + (b_4 + b_5M) \log \sqrt{(R_{jb})^2 + b_6^2} + b_7S_S + b_8S_A + b_9F_N + b_{10}F_R$$

Où y est en cm/s^2 ; $b_1 = 1.647$; $b_2 = 0.767$; $b_3 = -0.074$; $b_4 = -3.162$; $b_5 = 0.321$; $b_6 = 7.682$; $b_7 = 0.105$; $b_8 = 0.020$; $b_9 = -0.045$; $b_{10} = 0.085$; M est la magnitude du séisme et varie entre 2.7 et 7.4; R est la distance épacentrale. Cette équation s'applique sur trois catégories de terrain et trois mécanismes de failles (*Douglas, 2017*):

- Sol mou : $S_S = 1$; $S_A = 0$
- Sol cohérent : $S_S = 0$; $S_A = 1$
- Roche : $S_S = 0$; $S_A = 0$
- Faille Normale : $F_N = 1$; $F_R = 0$
- Faille de Décrochement : $F_N = 0$; $F_R = 0$
- Faille Inverse : $F_R = 1$; $F_N = 0$

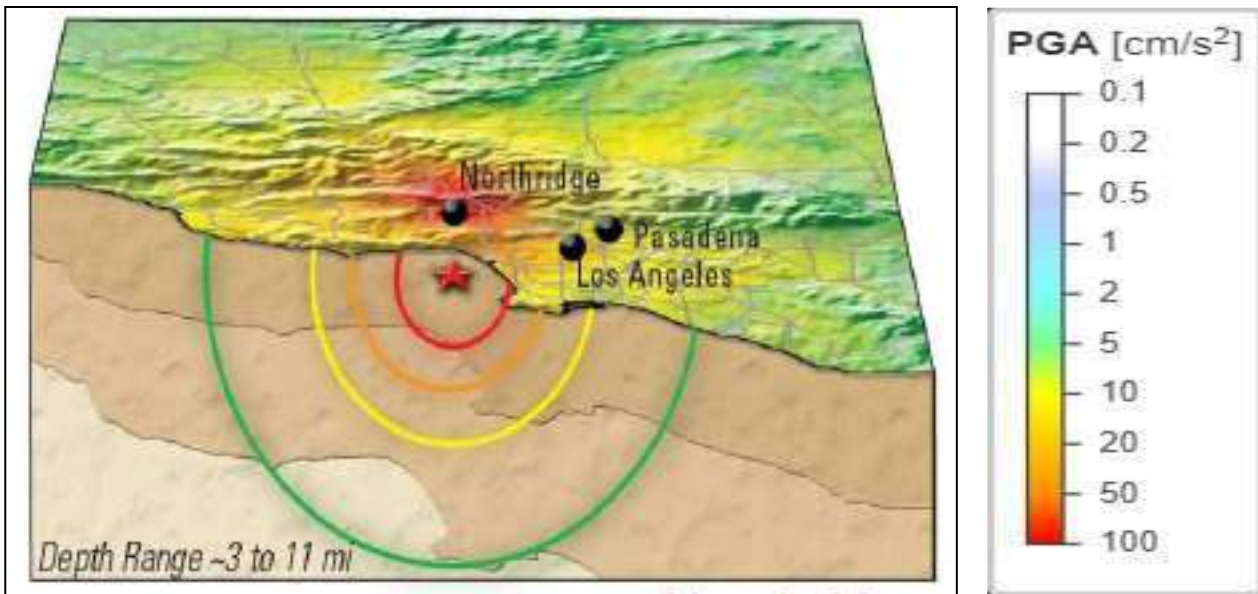
c- PGA (Peak Ground Acceleration)

Le PGA, accélération maximale du sol est un paramètre caractérisant les mouvements du sol soumis à des ondes sismiques. Ce paramètre dépend de la magnitude, mais aussi de la géologie et de la distance épacentrale. Plus le PGA est grand, plus les dommages sont importants et il est exprimé en %g ou en cm/s^2 (**figure 6**).

L'estimation des mouvements du sol doit se faire en continu sur la carte : elle s'appuie sur les mesures là où il y a des stations, puis l'interpolation de ces mesures à l'ensemble de la carte. La procédure nécessite plusieurs étapes. La première étape consiste à créer une grille grossière, uniformément espacée de « stations fantômes » en utilisant la relation d'atténuation empirique qui dépend de la magnitude et de la distance épacentrale.

Ensuite, Ces stations fantômes sont utilisées pour estimer les secousses dans les zones éloignées des stations existantes. Ces estimations, combinées à des stations réelles (également corrigées pour les conditions approximatives du site rocheux), sont ensuite interpolées sur une grille à échelle précise représentant les mouvements des roches. Les amplitudes de ces stations sont ensuite mises à l'échelle en fonction des conditions du site et sont ensuite cartographiées pour produire la carte shakemap finale (Wald et al., 2000).

Le PGA et l'intensité macrosismique sont les 2 paramètres représentés sur une carte shakemap et c'est eux qui permettent de quantifier les mouvements du sol et les conséquences que le séisme a provoqué durant son passage. Le PGA est exprimé en cm/s^2 et varie de 0,1 à 100. Plus il est grand, plus le séisme est violent. L'intensité macroscopique est exprimée en chiffres romains et varie de I à XII sur l'échelle adoptée en France. I est pour un séisme non perceptible et XII, pour une catastrophe généralisée.



6a

6b

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

* Localisation du séisme:

 Intensité moyenne communale issue des témoignages internet (donnée préliminaire)

 niveau d'intensité théorique attendu sur la zone

Données macroscopiques: ICCP-REMA22 (ICCT-UM333 / CNRS-Université de Strasbourg)
 *EUS-98: Günthal, G., 1998, European Macroseismic Scale 1998
 Cahiers du Centre Eurostat de Géodynamique et de Sismologie.

6c

Figure 6. Carte shakemap du séisme (6a) de Northridge (Californie, 1994) accompagnée de l'échelle de PGA en cm/s^2 (6b) et de l'échelle d'intensité (6c).

IV- METHODOLOGIE

IV-1. Présentation des données et outils

1- **Les données** sont subdivisées en 2 catégories : les données sismiques et les paramètres de ShakeMap.

- *Les données sismiques* : Les données sismiques sont les informations caractéristiques de chaque événement.

Notre étude est basée sur l'analyse de 12 événements sismiques qui se sont produits dans le Sud de la France et ses environs (entre 6 et 9 de longitude, et 43 et 45 de latitude). Ces séismes ont une magnitude comprise entre 3 et 5, et se sont produits dans l'intervalle du 07 Avril 2014 au 18 Février 2018 (**figure 7**).

Nous avons distingué les caractéristiques de chaque événement, à savoir le temps d'occurrence, la localisation (position géographique et profondeur) et la magnitude. Ces données sont fournies automatiquement par le système Seiscomp3. Ce système permet également de déclencher automatiquement le calcul du PGA et de générer la shakemap de tout séisme localisé dans le Sud-est de la France avec une magnitude ≥ 3 .

- *Les paramètres de ShakeMap* : Ce sont des paramètres régionaux intégrés lors de la configuration de l'outil ShakeMap. A savoir, la fonction bias et la carte $V_{s,30}$.

La fonction *bias* est un paramètre important pour générer les shakemaps et apprécier l'adaptabilité d'une GMPE à une région. Elle permet de corriger automatiquement la magnitude calculée du séisme afin de conformer au maximum l'estimation de la GMPE aux valeurs enregistrées par les stations. La valeur du bias doit être aussi faible que possible ; l'idéal est qu'elle soit nulle. Alors, dans ce cas la magnitude du séisme enregistrée par les stations est identique à la magnitude de shakemap.

La carte $V_{s,30}$ est la vitesse des ondes S dans les premiers 30m de profondeur. Elle caractérise les effets de sites lithologiques et permet de calculer les facteurs d'amplification. Cette carte est déduite des pentes topographiques selon le principe suivant : les endroits à faible pente topographique sont caractérisés par les sédiments, donc zone à effet de sites ; et les endroits à pente forte sont caractérisés par un terrain rocheux, donc zone sans effet de sites. A Nice, les facteurs d'amplification varient de 1 à 1,6.

Ainsi, le temps d'occurrence du séisme, sa localisation, sa magnitude, le bias et la carte $V_{s,30}$ sont les paramètres sur lesquels nous nous sommes focalisés pour analyser les PGA et les cartes shakemaps afin de proposer une meilleure GMPE.

Tableau récapitulatif des 12 événements sismiques majeurs de la région d'étude

N°	Date	Temps d'occurrence	Localisation			M _L seiscomp	M _L shakemap	ID
			Lat.	Lon.	Prof. (Km)			
1	07-04-2014	19h26mn59s	44.90	6.69	2.77	5.0	4.2	oca2014guwu
2	25-07-2016	02h27mn44s	43.80	7.60	5.12	3.5	2.97	oca2016omon
3	30-07-2016	20h21mn38s	44.95	7.20	5.57	4.5	3.7	oca2016oxbl
4	03-09-2016	19h14mn54s	43.97	7.53	4.40	3.63	3.29	oca2016rixw
5	18-09-2016	03h00mn11s	44.64	7.29	1.03	3.13	2.36	oca2016sjcg
6	18-09-2016	17h07mn55s	44.64	7.28	1.34	3.26	2.51	oca2016skef
7	09-11-2016	15h35mn11s	44.29	6.15	3.75	3.62	2.98	oca2016wbbi
8	10-11-2016	02h45mn46s	44.29	6.17	4.28	3.96	3.24	oca2016wbxl
9	10-11-2016	02h48mn13s	44.29	6.17	3.67	3.96	3.25	oca2016wbxn
10	11-11-2016	05h38mn55s	44.65	7.05	2.94	3.53	2.7	oca2016wdyq
11	08-04-2017	09h52mn34s	44.27	7.28	5	3.63	2.96	oca2017gvzh
12	18-02-2018	04h47mn22s	43.57	6.63	7	3.5	2.99	oca2018dkbq

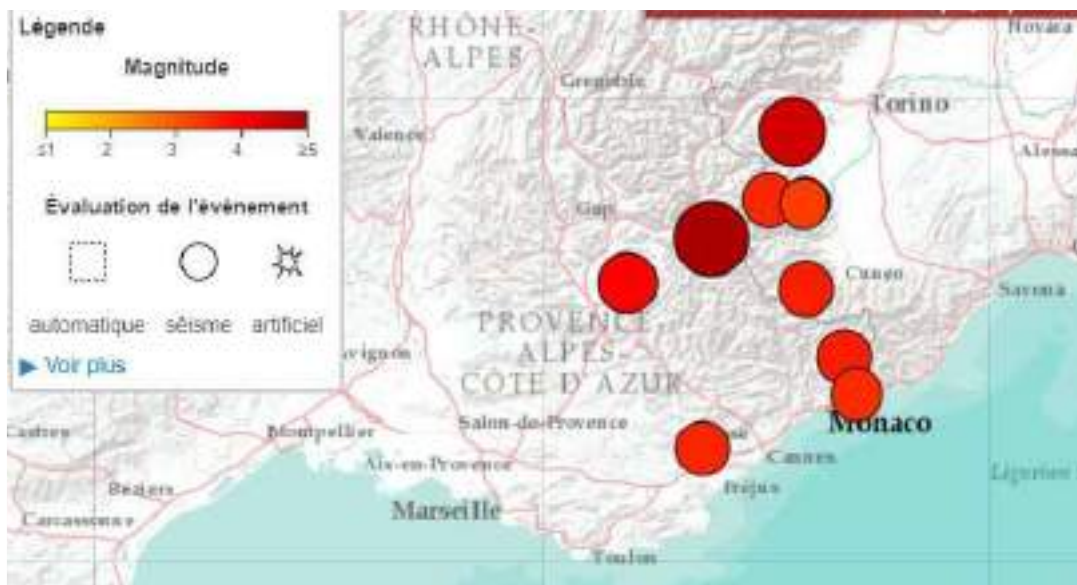


Figure 7. Localisation des 12 événements sismiques, certains sont situés au même endroit donc superposés sur cette carte. Les cercles plus sombres sont les séismes à plus forte

2- Les outils

Afin de mener notre travail à bien, nous avons eu recours au langage de programmation **Python** accompagné de certaines bibliothèques en ligne auxquelles il nous donne accès, et l'application web **Jupyter**.

a- Python



Python est un langage de programmation permettant de communiquer avec l'ordinateur à l'aide d'une suite d'instructions appelée programme. Plusieurs critères nous ont motivé à utiliser ce langage parmi d'autres, à savoir :

- *La portabilité* ; Python est un langage compatible avec tous les systèmes d'exploitation (windows, linux,...).

- Python est un langage *interprété* : les instructions qui lui sont envoyées sont transcrites au fur et à mesure de leur lecture. Il est facilement modifiable et pas besoin de le compiler.
- Sous licence *libre*. Ce qui lui donne une grande simplicité et facilité d'accès.
- Surtout, python possède de nombreuses *bibliothèques* en ligne, particulièrement dans le domaine de la sismologie.

Parmi ces bibliothèques nous avons spécifiquement utilisé :

✓ **Openquake**



C'est de cette librairie que nous avons importé toutes les GMPEs testées.

✓ **Obspy**



obsypy est une boîte à outils python pour la sismologie qui permet l'écriture et la lecture de données sous plusieurs formats. Cet outil nous a permis la lecture de nos données sismiques.

✓ **Matplotlib**



Matplotlib est une bibliothèque destinée à tracer des figures à 2D. C'est à travers elle que nous avons produit nos figures :

b- Jupyter



Jupyter est une application web permettant de programmer en ligne, de créer et de partager des documents contenant du code sur le net. Cette application permet d'explorer et d'analyser nos données. C'est à travers l'interface de programmation de Jupyter que nous avons directement importé les informations issues des bibliothèques (**figure 8**).

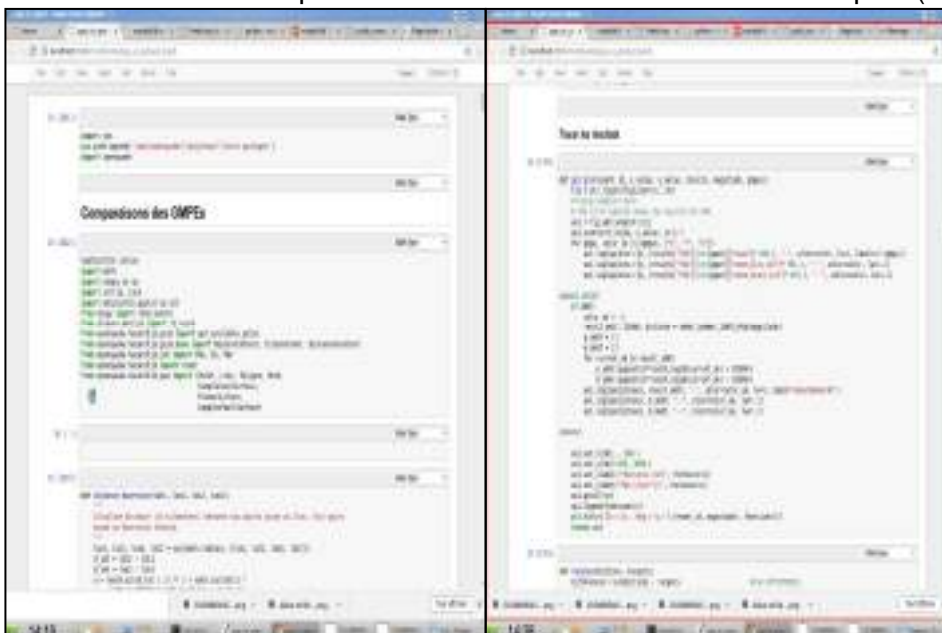


Figure 8. Extraits du programme python utilisé pour faire les simulations. Il est ouvert sur l'interface web Jupyter

IV-2. Expérimentation d'autres GMPEs

1- Présentation des GMPEs à tester

Comme nous l'avons indiqué dans la partie contexte du stage, nous avons répertorié des centaines de GMPEs. Chaque GMPE est conçue pour une région déterminée de la Terre, avec ses paramètres et ses particularités. Quelques unes font exception : elles sont conçues pour fonctionner dans toutes les régions du monde tout en ayant des zones de prédilection.

Les équations que nous avons testées obéissent aux critères suivants :

- être universelle ou conçue pour une partie de l'Europe voisine de la France ;
- ne dépendre que des paramètres suivants : la magnitude, le rake, le R_{jb} et le $v_{s,30}$.

De toutes les GMPEs disponibles, une trentaine obéissent aux critères ci-dessus. Toutes ont été testées ; quatre lois, plus représentatives ont été adoptées pour être étudiées de plus près. Ces lois sont :

a- Akkar et Bommer 2010

La loi Akkar et Bommer 2010 s'applique aux régions de l'Europe et du Moyen-Orient. Elle est adaptée pour les séismes de magnitude comprise entre 5 et 7.6.

b- Boore et Al 2014

La loi Boore et al 2014 est une loi universelle avec pour zone de prédilection la Californie. Elle s'applique aux séismes de magnitude comprise entre 3 et 7.9.

c- Kotha et al 2016 Italy

Cette loi utilise la carte $V_{s,30}$ pour caractériser les effets de site dans un intervalle de 90 à 2000m/s. Mais majoritairement entre 200 à 600m/s.

La loi Kotha et al 2016 Italy est recommandée pour les séismes de magnitude comprise entre 4 et 7.6 ; pour une profondeur <35 km et une distance <300 km.

d- Bindi et Al 2017

La loi Bindi et al 2017 est une loi universelle s'appliquant pour les séismes à faible profondeur et de magnitude comprise entre 3 et 7.9.

Une description plus détaillée de ces lois et de leurs paramètres figure en annexe.

2- Les indices de comparaison

Afin d'apprécier les GMPEs les unes par rapport aux autres, nous avons utilisé 2 indices de comparaison :

- *Le visuel* : Cela consiste à observer à l'œil nu le comportement de la GMPE en fonction de la distance et de la magnitude. L'observation de l'allure de la courbe par rapport aux données des stations permet, à titre indicatif, de distinguer si c'est une loi adaptée à la région ou non. Cet indice nous a permis de séparer les GMPEs qui fonctionnent le moins à celles qui fournissent de meilleurs résultats afin de choisir parmi ces dernières, à l'aide d'un autre indice plus informatif, la meilleure.
- *Le RMS (Root Mean Square)* : Le RMS est une moyenne quadratique dont la mesure permet d'apprécier les différences entre valeurs prédites par un modèle ou un estimateur et les valeurs effectivement observées. Le RMS est la racine carrée de la moyenne des erreurs au carré. Soit Y_t les valeurs prédites par le modèle et y_t les valeurs effectivement observées, le RMS se calcule selon la formule suivante :

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{(\sum_{t=1}^n (Y_t - y_t)^2)}{n}}$$

Le RMS est une valeur positive qui, si elle est nulle signifie que les valeurs prédites correspondent exactement aux valeurs observées. Plus le RMS est faible plus la prédiction est satisfaisante, donc dans notre cas la GMPE est jugée adaptée.

3- Phase d'expérimentation

Le but de chaque simulation effectuée est de réaliser une figure représentant le PGA observé sur les stations et celui prédit par la GMPE en fonction de la distance. L'expérimentation s'est déroulée en 3 phases :

a- Test séparé :

La procédure consiste à coder une à une les GMPEs à tester, ensuite observer et analyser le comportement de chacune par rapport aux valeurs de PGA enregistrées par les stations. Chaque loi est ainsi expérimentée pour chaque événement sismique (une loi par événement pour tous les événements). Cette procédure nous permet d'évaluer individuellement les GMPEs (**figure 9**).

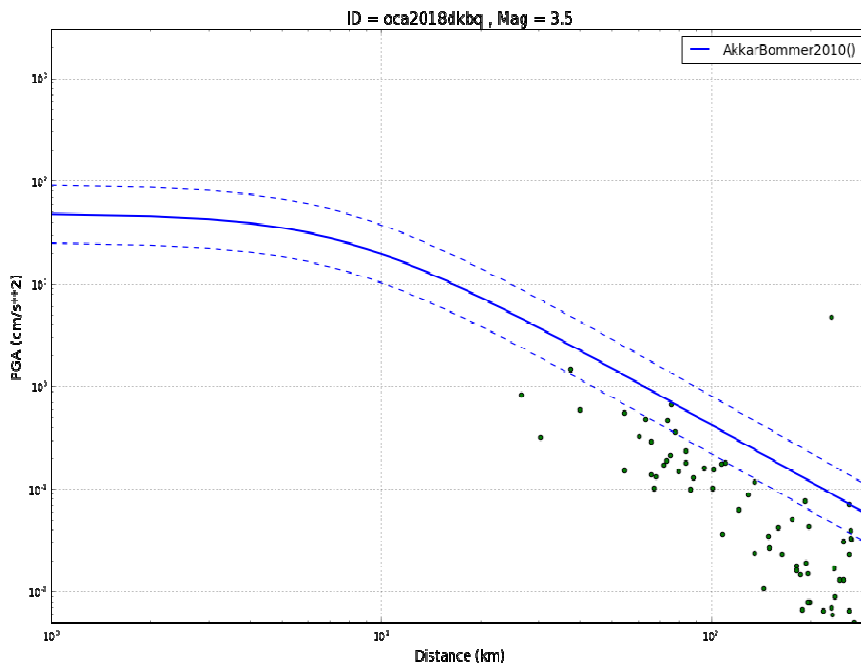


Figure 9. Simulation de la loi Akkar et Bommer 2010 sur le séisme du Var (de magnitude 3.5). L'axe des abscisses correspond à la distance épacentrale (en km) et l'axe des ordonnées les valeurs de PGA (en cm/s^2). La courbe bleue entourée de 2 courbes en pointillés (marge d'erreur de la loi) représente les valeurs prédites et les points noirs, les valeurs enregistrées par les stations. Excepté quelques points situés dans la marge d'erreur de la courbe, nous remarquons que la majorité des points sont situés au dessous de la courbe, ce qui implique que la loi amplifie nettement les secousses enregistrées. Quant au point situé à l'écart au dessus de la courbe, probablement elle est localisée dans une zone à effets de sites.

b- Test groupé :

Après avoir analysé une à une les GMPEs, nous testons simultanément plusieurs lois afin d'avoir une vue d'ensemble et distinguer, à l'aide des indices de comparaison, les caractéristiques de chacune les unes par rapport aux autres. La procédure consiste à coder plusieurs lois par événement pour tous les événements (**figure 10**).

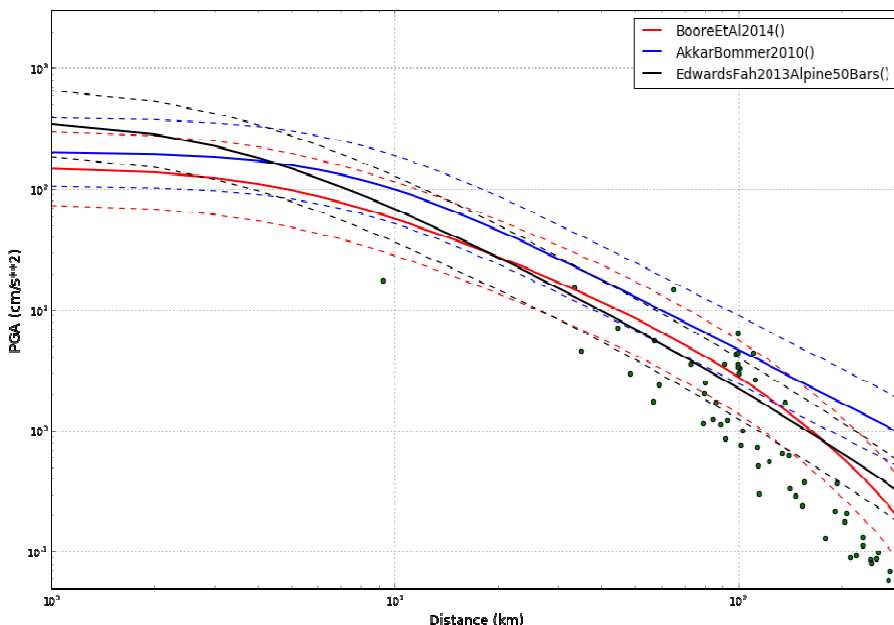


Figure 10. Simulation groupée des lois Boore et al 2014 (courbe en rouge), Akkar et Bommer 2010 (courbe en bleu) et Edwards Fah 2013 Alpine 50 Bars (courbe en noir). L'axe des abscisses correspond à la distance épacentrale (en km) et les ordonnées, les valeurs de PGA. Les 3 courbes représentent les prédictions et les points noirs indiquent les valeurs observées aux stations. En faisant une comparaison visuelle entre ces 3 lois selon l'allure des courbes l'écart entre la courbe de prédiction de chaque loi et les secousses enregistrées par les stations, nous pouvons conclure que la loi Boore et al 2014 fournit une meilleure estimation tandis que Akkar et Bommer 2010 est la moins satisfaisante.

c- Simulation des GMPEs en fonction de la magnitude :

Afin d'avoir une vue globale de l'allure des GMPEs en fonction de la magnitude, nous avons expérimenté chaque loi sur un groupe d'événements sismiques de magnitudes différentes codés simultanément.

Des 12 événements sismiques majeurs de la région, nous avons choisis 5 séismes de magnitude : 3.1 ; 3.5 ; 3.96 ; 4.5 et 5. Avec un pas d'à peu près 0.5, représenter ces séismes sur une même figure accompagnés des prédictions d'une équation d'atténuation nous permet d'étudier les caractéristiques de cette équation en fonction de la magnitude (figure 11).

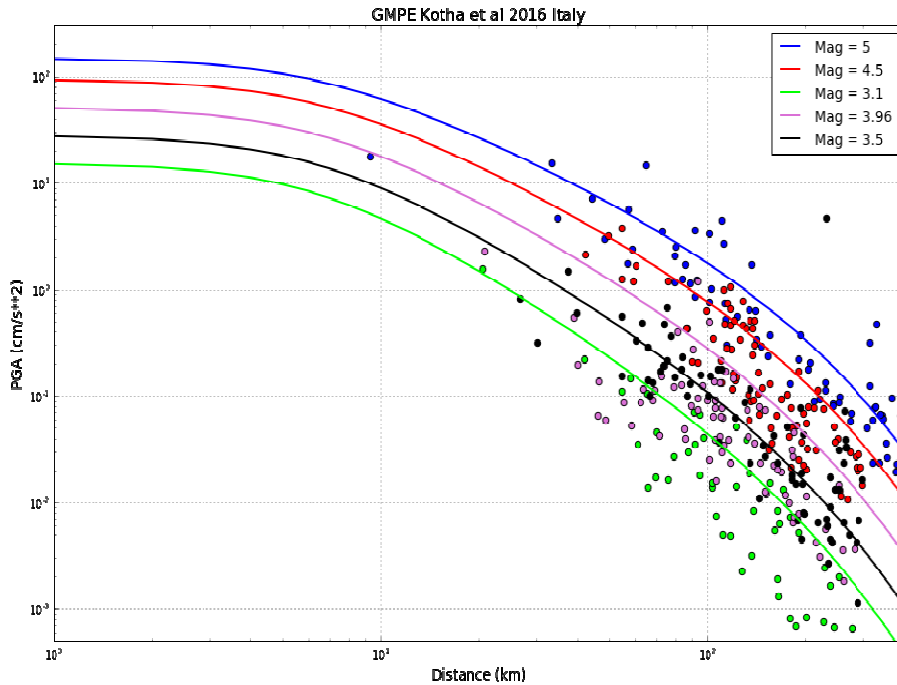


Figure 11. Simulation de la loi Kotha et al 2016 Italy sur 5 événements sismiques de magnitude 5 ; 4.5 ; 3.1 ; 3.96 et 3.5. La courbe et les points de mêmes couleurs correspondent respectivement aux prédictions à partir de la loi et les valeurs enregistrées aux stations pour le même événement. Par exemple, la courbe bleue et les points bleus sont respectivement l'estimation des secousses de l'événement de magnitude 5 et les valeurs enregistrées par les stations durant le même événement. Nous remarquons que l'allure de la loi est toujours la même pour toutes les magnitudes et que le pas entre les magnitudes choisies étant quasiment le même (0.5), l'écart entre les courbes est aussi sensiblement le même.

d- Comparaison des GMPEs en fonction du RMS

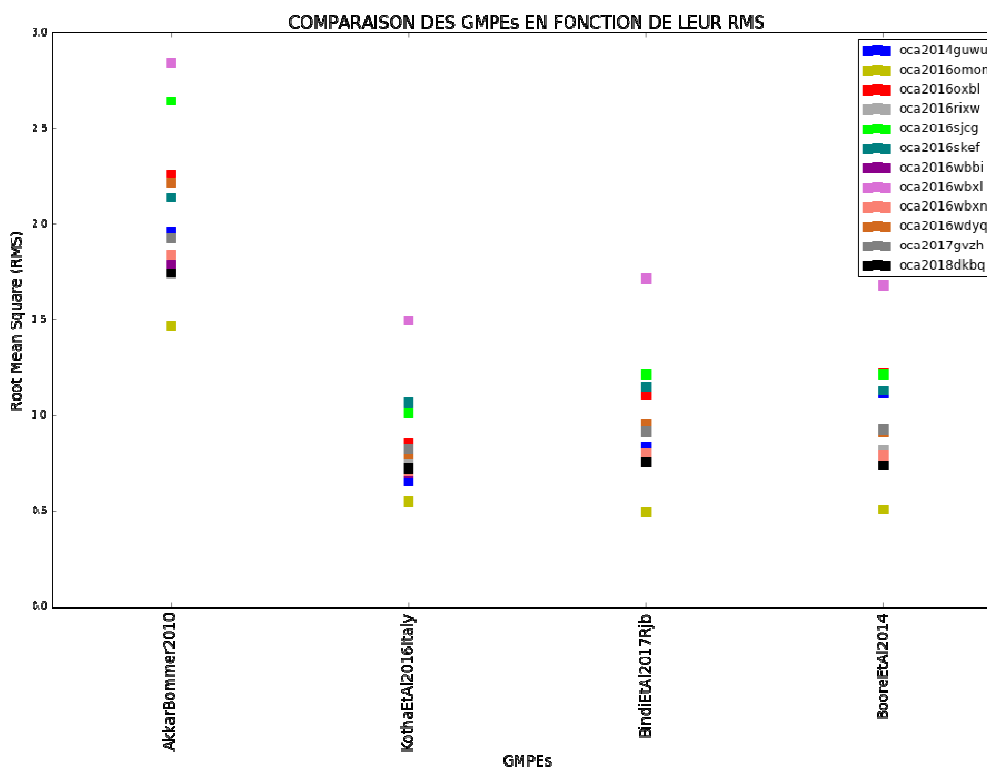


Figure 12. Comparaison des GMPEs en fonction du RMS. L'axe des abscisses représentent les GMPEs à comparer et l'axe des ordonnées les valeurs de RMS. Les carrés en couleur correspondent chacun à l'un des 12 événements sismiques, caractérisés sur la légende par leur ID. Un carré au dessus d'une loi indique le RMS de cette loi suite à l'estimation faite sur l'événement sismique caractérisé par cette couleur.

En analysant la figure ci-dessus, nous constatons que :

- le séisme **oca2016omon** caractérisé par le carré jaune a enregistré le plus faible RMS pour toutes les GMPEs simulées ;
- le séisme **oca2016wbxl** caractérisé par le carré rose a enregistré le plus grand RMS pour toutes les GMPEs simulées ;
- pour tous les événements, **Akkar et Bommer 2010** a fourni le plus fort RMS ;
- pour le séisme oca2016omon, **Bindi et al 2017** a fourni le plus faible RMS, mais pour tous les autres événements **Kotha et al 2016 Italy** a fourni le plus faible. Nous éluciderons ces observations dans les lignes qui suivent.

e- Calcul de la moyenne des RMS

Afin de départager les GMPEs fournissant des résultats sensiblement identiques, nous avons procédé au calcul de la moyenne de leurs RMS. En effet, durant le test chaque équation d'atténuation fournit un RMS pour chaque événement. Donc déterminer la moyenne des RMS de chaque loi portant à confusion revient à calculer la moyenne arithmétique de ses 12 RMS (**figure 13**).

Nous avons calculé la moyenne sur toute la distance (entre 0 et 300km), ensuite entre 0 et 100 km, 100 et 200 km, 200 et 300 km.

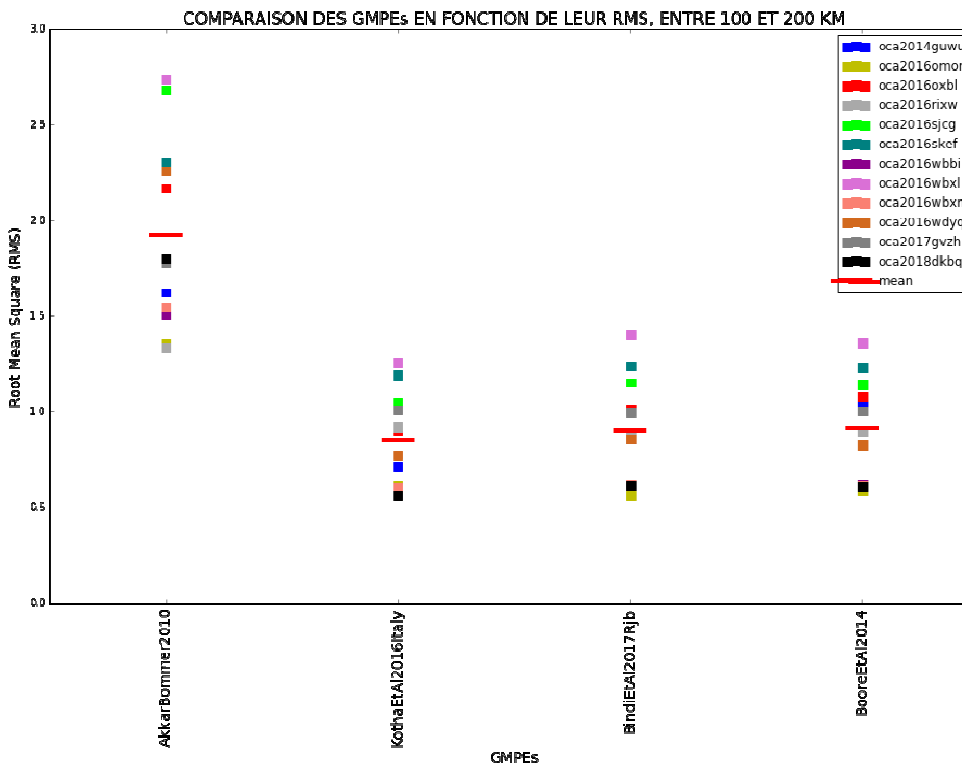


Figure 13. Comparaison des GMPEs en fonction de la moyenne de leur RMS. L'axe des abscisses représentent les GMPEs à comparer et l'axe des ordonnées les valeurs de RMS. La ligne rouge indique la moyenne du RMS de chaque loi. Les carrés en couleur correspondent chacun à l'un des 12 événements sismiques, caractérisés sur la légende par leur ID. Un carré au dessus d'une loi indique le RMS de cette loi suite à l'estimation faite sur l'événement sismique caractérisé par cette couleur.

V- RESULTATS ET INTERPRETATION

V-1. Résultats

L'analyse des valeurs de PGA et des cartes shakemaps obtenues à partir de l'atténuation d'Akkar et Bommer 2007 nous a permis de constater que sur certaines stations situées aux alentours de Nice on enregistre un effet de site important. Les effets de site ont pour conséquence de détériorer la qualité des résultats de l'estimation. Ainsi, lors de l'expérimentation nous avons supprimé ces stations du système.

Comme défini dans la méthodologie, la simulation des GMPEs une à une a mis en évidence 3 types, selon leur décroissance en fonction de la distance. Cette décroissance se caractérise par la variation de la pente de la courbe.

- **Les GMPEs à décroissance irrégulière** : Elles se caractérisent par des courbes à pente relativement forte dans les premières distances, ensuite la pente s'adoucit en tendant vers une forme rectiligne. Enfin elle adopte une décroissance brusque et la pente se raidit de nouveau (**figure 14**). Dans la première partie de la courbe, c'est-à-dire à petite distance, l'estimation semble plutôt conforme aux valeurs observées sur les stations, mais dès que la pente commence à s'adoucir les résultats se détériorent en devenant de plus en plus incohérents.

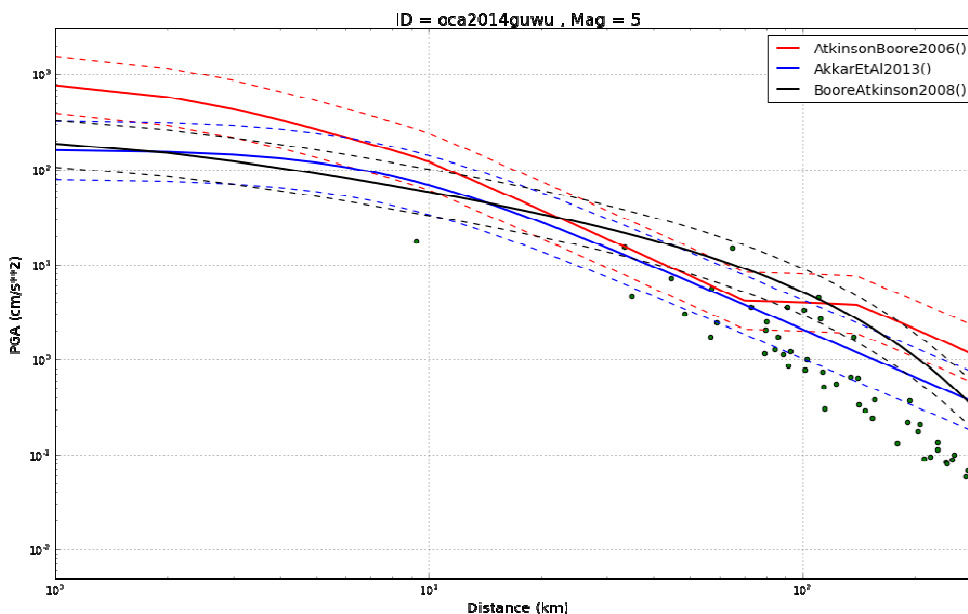


Figure 14. Caractéristiques d'une GMPE à décroissance irrégulière. L'axe des abscisses correspond à la distance épacentrale et l'axe des ordonnées, les valeurs de PGA. Les points noirs représentent les secousses enregistrées par les stations. La courbe rouge représentant la simulation de la loi d'Atkinson et Boore 2006 caractérise le comportement des GMPEs à décroissance irrégulière.

- **Les GMPEs à décroissance régulière avec adoucissement de la pente en fonction de la distance** : Plus on s'éloigne de l'épicentre, plus les prédictions fournies par ces types de lois s'écartent des valeurs enregistrées par les stations sismiques (**figure 15**). On conclue que le modèle empirique d'atténuation s'atténue moins vite que l'onde réelle.

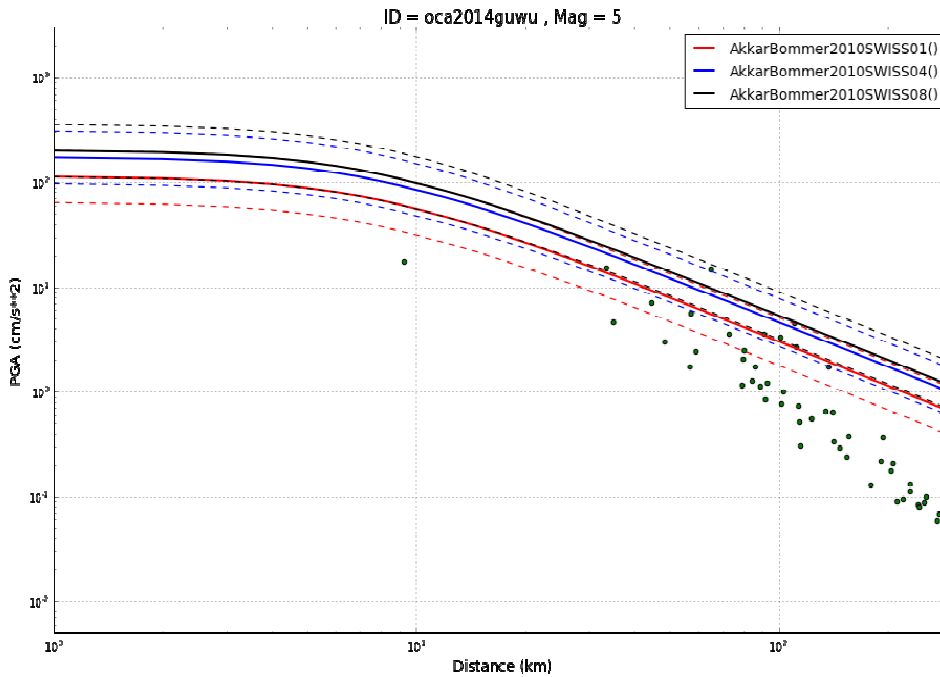


Figure 15. Simulation de la loi Akkar et Bommer 2010 Swiss. L'axe des abscisses correspond à la distance épacentrale et l'axe des ordonnées, les valeurs de PGA. Les points noirs représentent les secousses enregistrées par les stations. A partir de 40km, nous observons l'écart entre estimation et valeurs réelles s'accroître en fonction de la distance.

- **Les GMPEs à décroissance régulière avec raidissement de la pente en fonction de la distance :** Ces GMPEs ont la particularité de générer une courbe qui décroît à la même allure que les valeurs de PGA enregistrées par les stations (**figure 16**). On conclue que le modèle empirique s'atténue aussi vite que l'onde réelle. L'avantage qu'un tel comportement donne à ces lois est que, même si l'estimation qu'elles fournissent paraît amplifiée par rapport aux données des stations, il est toujours possible d'ajuster la magnitude lors de la configuration de ShakeMap afin que les prédictions soient conformes aux valeurs mesurées.

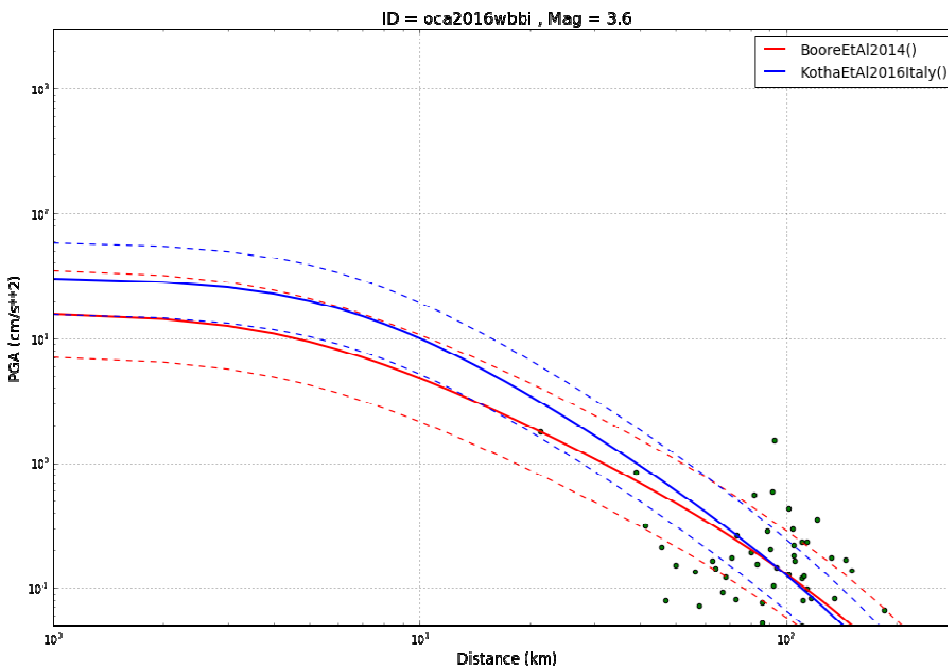


Figure 16. Simulation des lois Boore et al 2014 (courbe rouge) et Kotha et al 2016 Italy (courbe bleue). L'axe des abscisses indique la distance épacentrale et l'axe des ordonnées les valeurs de PGA. Les courbes correspondent aux valeurs de PGA prédites et les points noirs, les valeurs enregistrées sur les stations. On peut observer que les prédictions ont même allure de décroissance que les

V-2. Interprétation des résultats

Comme indiqué dans la méthodologie, les indices de comparaison utilisés pour évaluer les GMPEs sont le visuel et le RMS. Utilisé surtout lors des travaux préliminaires, l'observation des figures à l'œil nu nous a permis de distinguer et d'écarter les lois les moins satisfaisantes parmi la multitude de GMPEs à tester et de mieux nous focaliser sur les plus concluantes. Le calcul du RMS que nous avons effectué ensuite confirmera notre attitude, car ces lois affichent le plus souvent des RMS nettement supérieurs à 1, voire 2.

Toutefois, malgré les résultats peu probants de la loi d'Akkar et Bommer 2010, nous l'avons conservé tout au long de notre expérimentation. En effet cette loi est très souvent utilisée en France (Beauval et al, XXX). Nous avons voulu ainsi confronter cette loi à nos propres résultats par des illustrations.

Lors de tous nos essais, les « **GMPEs à décroissance régulière avec raidissement progressif de la pente** » ont fourni les prédictions les plus probantes. Elles sont au nombre de 3 : Bindi et al 2017, Kotha et al 2016 Italy, Boore et al 2014. Il est à prévoir que la loi la mieux adaptée soit issue d'entre elles (**figure 17**). C'est pour nous en assurer que nous avons procédé au test groupé comme indiqué ci-haut. En simulant ces 3 GMPEs simultanément, nous avons constaté que :

- Utilisées pour le même événement, une loi peut être mieux adaptée qu'une autre dans les petites distances, mais le cas s'inverse à partir d'une certaine distance ;
- Une loi peut fournir les prédictions les plus logiques pour un séisme de faible magnitude, mais qu'une autre est meilleure pour un séisme de plus grande magnitude ;
- Une loi peut générer les prédictions les plus cohérentes pour un événement, mais être moins performante qu'une autre pour un autre événement sismique.

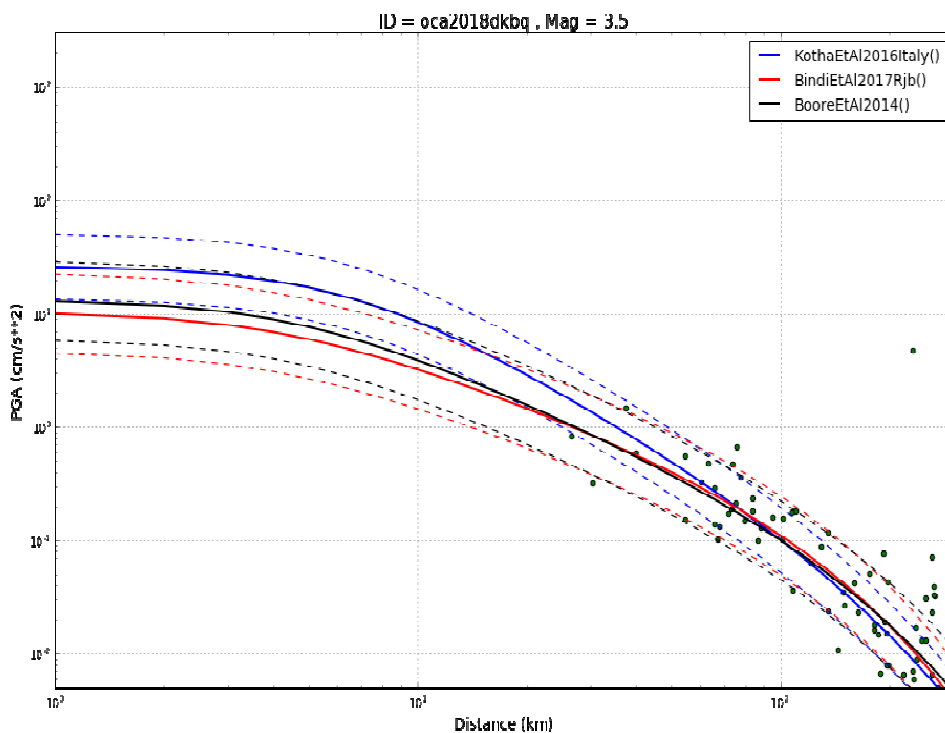


Figure 17. Simulation des « GMPEs à décroissance régulière avec raidissement progressif de la pente ». L'axe des abscisses indique la distance épacentrale et l'axe des ordonnées les valeurs de PGA. Les courbes correspondent aux valeurs de PGA prédites et les points noirs, les valeurs enregistrées sur les stations. Nous observons que ces 3 lois ont quasiment même allure et elles s'atténuent aussi vite que les secousses réelles. Nous constatons également que les prédictions de ces 3 lois sont assez proches les unes des autres pour rendre malaisée toute comparaison visuelle.

V-3. Choix de la GMPE

A partir du calcul de la moyenne des RMS (**figure 13**), nous observons que la loi d'atténuation Kotha et al 2016 Italy enregistre la plus faible valeur ; cela signifie que cette loi a fourni les prédictions les plus cohérentes aux secousses enregistrées pour la majorité des événements sismiques majeurs de la région. Parmi ces événements auxquels Kotha et al 2016 Italy a donné de meilleures prédictions figure le séisme de Barcelonnette (magnitude = 5) qui a enregistré la plus forte magnitude. Le but d'une shakemap étant de prévenir les dégâts, il serait plus judicieux de choisir une loi qui est adaptée à une plus forte magnitude qu'à une faible magnitude.

Pour finir, nous avons constaté que de tous les séismes sur lesquels nous nous sommes basé pour faire ce test, le séisme Digne (magnitude = 3.96) a toujours enregistré les plus mauvaises prédictions pour toutes les lois. Toutefois, parmi toutes ces prédictions, celles fournies par Kotha et al 2016 Italy sont les meilleures.

Par conséquent, en tenant compte de ces critères nous choisissons la GMPE Kotha et al 2016 Italy comme étant la mieux adaptée pour la région du Sud-est de la France (**figure 18**).

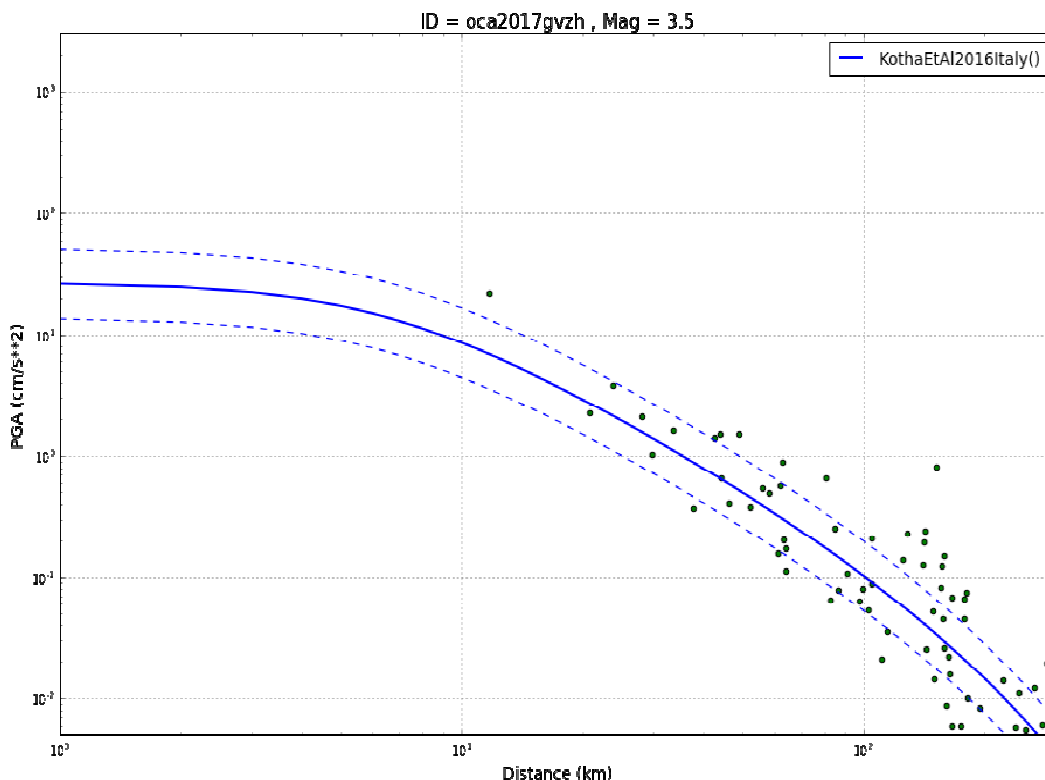


Figure 18. Simulation de la loi Kotha et al 2016 Italy. L'axe des abscisses correspond à la distance épacentrale et l'axe des ordonnées aux valeurs de PGA. La courbe bleue représente l'estimation et les points noirs correspondent aux secousses du sol enregistrées par les stations.

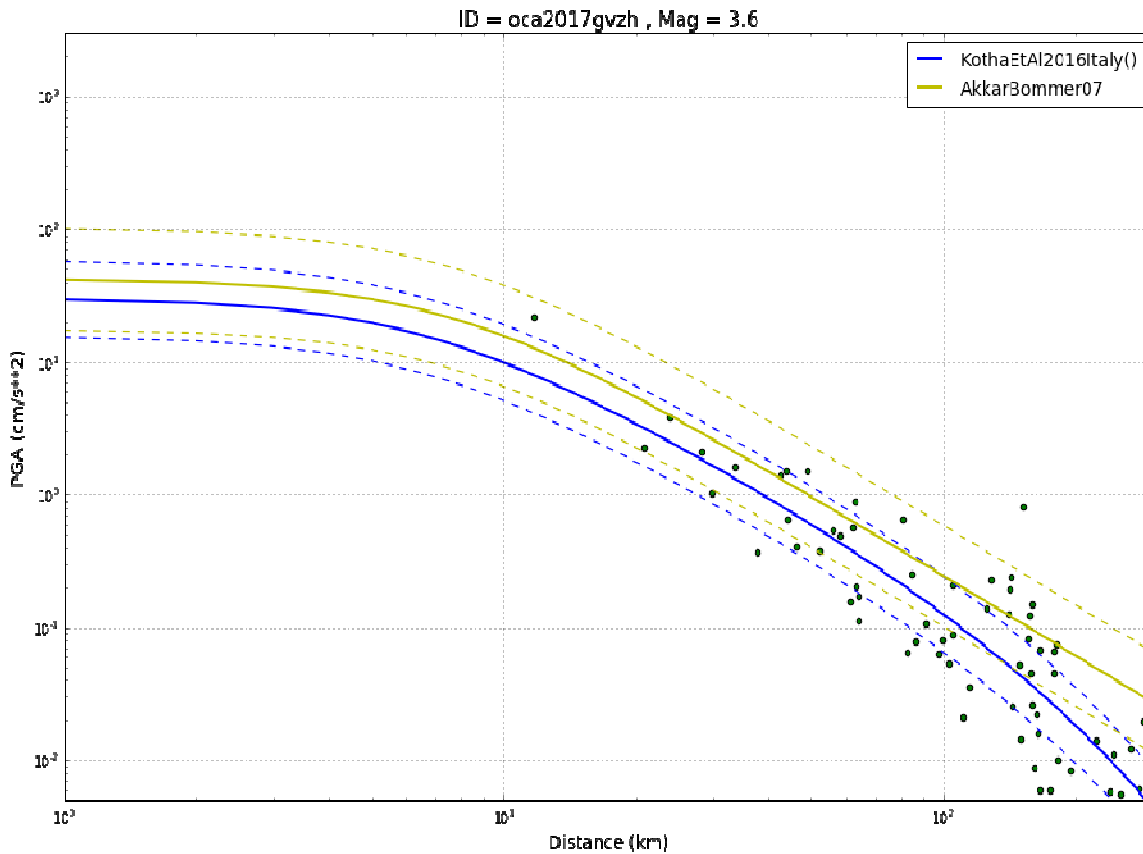


Figure 19. Simulation de la loi Kotha et al 2016 Italy et la loi Akkar et Bommer 2007. L'axe des abscisses correspond à la distance épacentrale et l'axe des ordonnées aux valeurs de PGA. La courbe bleue représente l'estimation fournie par Kotha et al 2016 Italy, la courbe jaune l'estimation de la loi AKKar et Bommer 2007 et les points noirs correspondent aux secousses du sol enregistrées par les stations. Nous constatons ici l'écart entre ces 2 lois et juger à l'œil nu celle qui paraît être mieux conforme aux secousses réelles.

CONCLUSION

L'utilité du modèle empirique d'atténuation étant de générer des cartes shakemap, une fois le choix validé il s'ensuit d'intégrer la loi choisie dans l'outil ShakeMap à la place de celle Akkar et Bommer 2007. Le contexte géologique restant inchangé, la reconfiguration de l'outil ne nécessitera aucune autre procédure.

La loi d'Akkar et Bommer 2010, malgré son renom auprès de la communauté scientifique n'a fourni à aucun moment de notre expérimentation des résultats plus probants que la loi Kotha et al 2016 Italy ni des 2 autres d'ailleurs. Peut être, étant antérieure à ces 3 lois, sa renommée était déjà entièrement faite avant que celles-ci ne soient mis à jour.

Nous considérons Kotha et al 2016 Italy comme la GMPE la mieux adaptée pour la région du Sud-est de la France, mais afin de fournir des prédictions plus parfaites, l'idéal aurait été qu'il y ait possibilité d'intégrer simultanément 2 lois dans l'outil ShakeMap. Configuré selon que chacune des lois fonctionne automatiquement dans ses conditions de prédilection. Dans notre cas par exemple, configurer le système de telle sorte que :

- Boore et al 2014 soit utilisée dans les 50 premiers Km pour tout séisme de magnitude comprise entre 3 et 4.5 ; ensuite, à partir de 50 km Kotha et al 2016 Italy prend automatiquement le relais ;
- Kotha et al 2016 Italy assure entièrement (du point de vue distance) la prédiction de tout séisme de magnitude >4.5.

VI- ANNEXE

1- Loi Akkar et Bommer 2010

$$\text{Log } y = b_1 + b_2M + b_3M^2 + (b_4 + b_5M)\log(R_{jb}^2 + b_6^2)^{1/2} + b_7S_S + b_8S_A + b_9F_N + b_{10}F_R$$

où y représente le PGA, il est en cm/s^2 . $b_1 = 1.04159$; $b_2 = 0.91333$; $b_3 = -0.08140$;

$b_4 = -2.92728$; $b_5 = 0.28120$; $b_6 = 7.86638$; $b_7 = 0.08753$; $b_8 = 0.01527$; $b_9 = -0.04189$;

$b_{10} = 0.08015$; $\delta_1 = 0.2610$ (intra-event) et $\delta_2 = 0.00994$ (inter-event)

La loi utilise 3 catégories de mécanismes au foyer :

La loi utilise 3 catégories de sites :

- | | |
|--|--|
| - Sol mou : $S_S = 1$; $S_A = 0$; | - Faille normale : $F_N = 1$; $F_R = 0$; |
| - Sol rigide : $S_A = 1$; $S_S = 0$; | - Faille de décrochement : $F_N = 0$; $F_R = 0$; |
| - Rocheux : $S_S = 0$; $S_A = 0$. | - Faille inverse : $F_R = 1$; $F_N = 0$. |

2- Loi Kotha et al 2016 Italy :

Cette loi s'écrit : $\ln Y = e_1 + F_D + F_M + \delta B_S$

$$F_D = [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \ln \frac{\sqrt{R^2 + h^2}}{R_{ref}} + (c_3 + \Delta c_{3,r})(\sqrt{R^2 + h^2} - R_{ref})$$

$$F_M = b_1(M - M_h) + b_2(M - M_h)^2 ; \text{ si } M < M_h$$

$$= b_3(M - M_h) ; \quad \text{ si } M \geq M_h$$

$$\delta B_S = (g_1 + \Delta g_{1,r}) + (g_2 + \Delta g_{2,r}) \ln V_{S,30}$$

où Y représente le PGA; il est en m/s^2 . $M_h = 6.75$; $M_{ref} = 5.5$ et $R_{ref} = 1 \text{ km}$; $b_1 = -0.363$; $b_2 = -0.195$; $b_3 = -0.406$; $c_1 = -1.121$; $c_2 = 0.272$; $c_3 = -0.00395$; $h = 6.390$; $\Delta c_{3,r} = -0.00326 \pm 0.00079$; $g_1 = 1.407$; $g_2 = -0.234$; $\Delta g_{1,r} = -0.360 \pm 0.258$; $\Delta g_{2,r} = 0.063 \pm 0.045$; $\tau = 0.350$ (inter-event) ; $\varphi_0 = 0.451$ (intra-event) ; $\varphi_{S2S} = 0.330$ (site-to-site) et $\delta = 0.657$ (total).

3- Bindi et al 2017

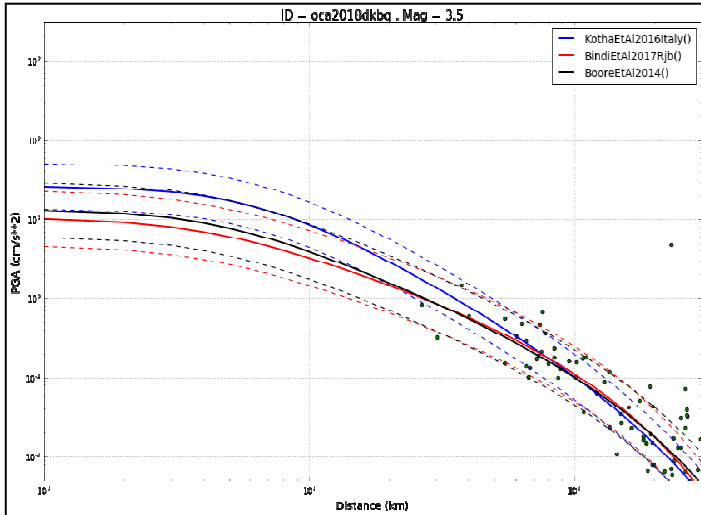
$$\ln Y = e_1 + F_D + F_M + F_S. \quad F_D = [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \ln \frac{\sqrt{Rjb^2 + h^2}}{R_{ref}} + c_3(\sqrt{Rjb^2 + h^2} - R_{ref})$$

$$F_M = b_1(M - M_{ref}) + b_2(M - M_{ref})^2 ; \quad \text{ si } M < M_h$$

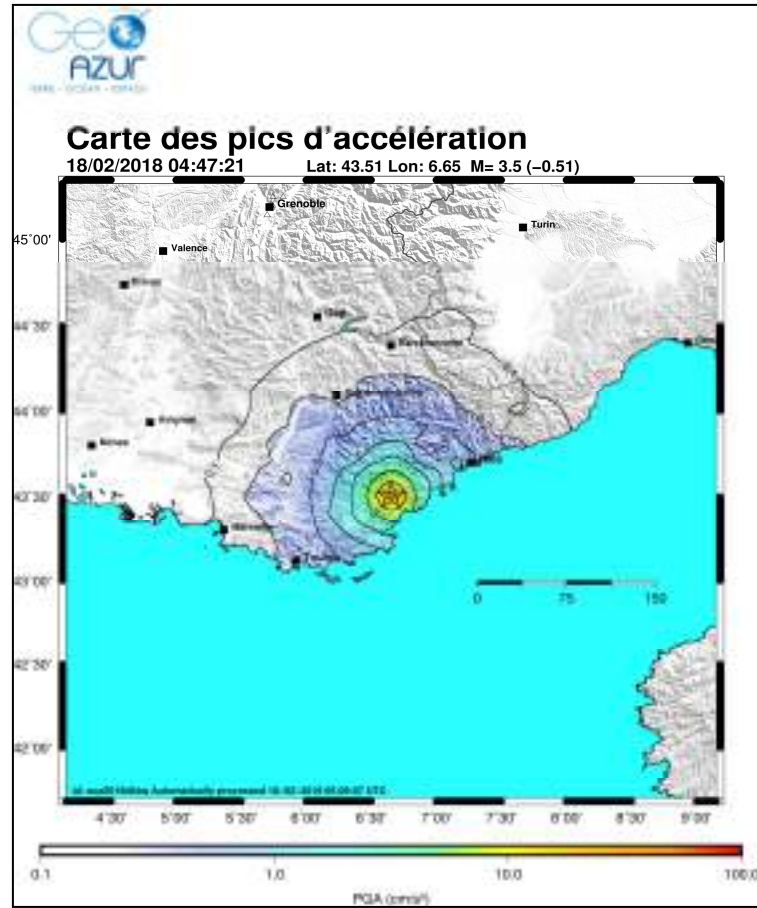
$$= b_3(M - M_h) + b_1(M_h - M_{ref}) + b_2(M_h - M_{ref})^2 ; \quad \text{ si } M \geq M_h$$

où Y représente le PGA; il est exprimé en m/s^2 . $R_{ref} = 1$; $M_{ref} = 4.5$ et $M_h = 6.5$;

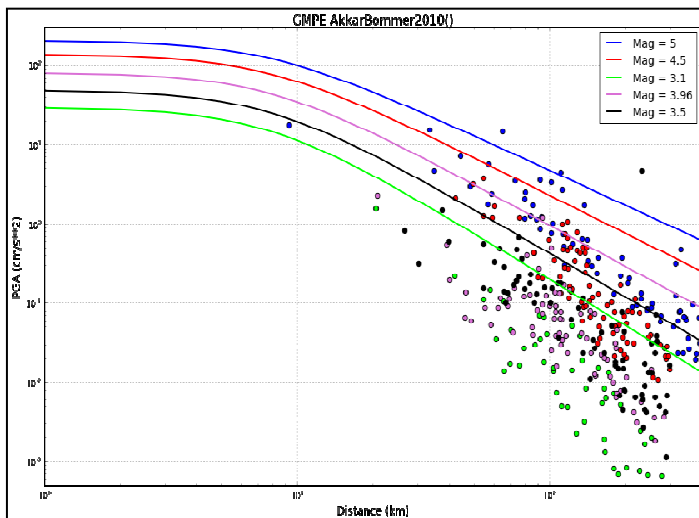
$e_1 = 0.635138$; $b_1 = 1.241105$; $b_2 = -0.13181$; $b_3 = -0.32192$; $c_1 = -0.93085$; $c_2 = 0.143762$; $c_3 = -0.01088$; $h = 3.875582$; $S_A = -0.60915$.



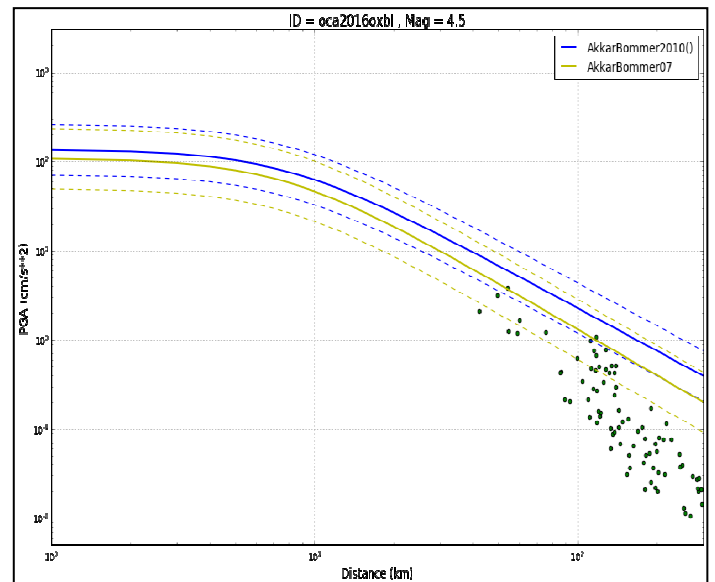
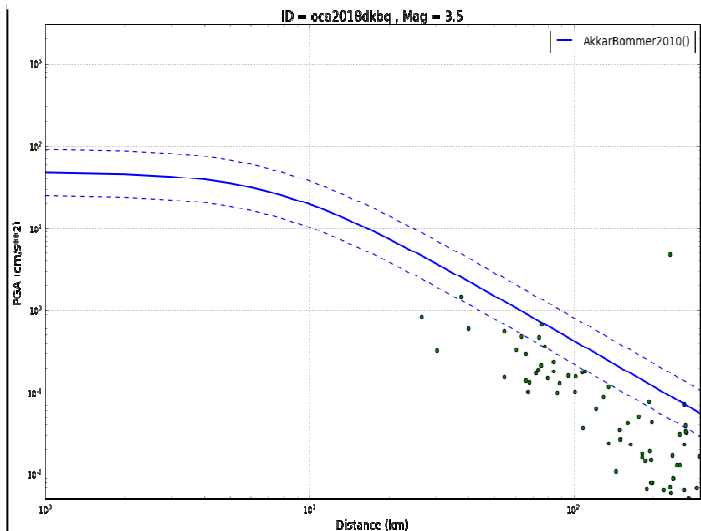
Estimation du PGA du séisme du Var (magnitude = 3.5) produit le 18/02/2018



Carte shakemap du séisme du var (3.5) le 18/02/2018



Simulation de la loi Akkar et Bommer 2010 sur 5 événements sismiques de différentes magnitudes



Simulation des lois Akkar et Bommer 2007 et 2010

Estimation du PGA du séisme du var (3.5) produit le 18/02/2018 à l'aide de Akkar et Bommer 2010

VII- BIBLIOGRAPHIE

VI-1. Références citées

1. Camelbeeck et al. *Geomorphic evidence of active faulting in slow deformation area: the example of the Lower Rhine Embayment*. Han sur Lesse. 2000. p31-34
2. Cauzzi et al. *Updated predictive equations for broadband (0.01 to 10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records*. Bull. Earthq. Eng. 2014
3. DeMets et al. *Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions*. Geophys. Res. Letters. 1994. p91-94
4. Douglas John. *Ground motion prediction equations 1964_2017*; University of Strathclyde. 2017. p186.
5. Larroque et al.; *Active and recent deformation at the Southern Alps-Ligurian basin junction*; Netherlands Journal of Geosciences/Geologie en Mijimbouw 80 (3-4). 2001. p255-272.
6. Laurent O. *Modalités de la structuration d'un prisme de front de chaîne : l'exemple de l'arc de Castellane (chaînes subalpines Méridionales, France)*. PhD Thesis, Univ. Nice-Sophia Antipolis. 1998. p280.
7. Perez. *La zone limite entre l'arc de Nice et l'arc de la Roya (Alpes Maritimes)*. Bull. Soc. Géol. de France, 7,930-938. 1975
8. Petit Carole; *Géologie de la France* ; 2017
9. Wald et al. *ShakeMap manual*. USGS Advanced National Seismic System. 2001. p7-44
10. Wald et al. *ShakeMap, a tool for earthquake response*; U.S. Geological Survey Golden, CO 80401; 2003. p1-3.

VII-2. Ouvrage consulté

1. M. Beyreuther, R. Barsch, L. Krischer, T. Megies, Y. Behr and J. Wassermann. *ObsPy: A Python Toolbox for Seismology* 2010

VII-2. Web

1. <http://earthquake.usgs.gov/shakemap/>
2. <http://sismoazur.oca.eu/new/>
3. <http://www.franceseisme.fr/>
4. <http://www.earthquake.usgs.gov>
5. <https://openclassrooms.com/courses/apprenez-a-programmer-en-python>
6. <https://storage.globalquakemodel.org/>
7. <https://github.com/obspy/obspy/wiki>
8. <https://www.python.org/>
9. <https://matplotlib.org/>
10. <http://jupyter.org/>