



HAL
open science

Relations entre les mesures de mouvements du sol et les observations macrosismiques en France : Etude basée sur les données accélérométriques du RAP et les données macrosismiques du BCSF

Chloé Lesueur

► **To cite this version:**

Chloé Lesueur. Relations entre les mesures de mouvements du sol et les observations macrosismiques en France : Etude basée sur les données accélérométriques du RAP et les données macrosismiques du BCSF. Géophysique [physics.geo-ph]. Université de Strasbourg, 2011. Français. NNT : 2011STRA6230 . tel-04344284

HAL Id: tel-04344284

<https://irsn.hal.science/tel-04344284v1>

Submitted on 14 Dec 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre
Institut de Physique du Globe de Strasbourg (UMR 7516)

Thèse en vue de l'obtention du diplôme de
DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE STRASBOURG
Discipline : **Sciences de la Terre et de l'Univers**
Spécialité : **Géophysique**

**Relations entre les mesures de mouvements du sol et
les observations macrosismiques en France : Etude
basée sur les données accélérométriques du RAP et
les données macrosismiques du BCSF**

Chloé Lesueur

Thèse soutenue publiquement le 23 septembre 2011

Composition du Jury:

M. BAUMONT David	IRSN, Fontenay-aux-Roses, France	<i>Examineur</i>
M. CAMELBEEK Thierry	ORB, Bruxelles, Belgique	<i>Rapporteur externe</i>
M. CARA Michel	IPG, Strasbourg, France	<i>Co-directeur de thèse</i>
M. GRANET Michel	IPG, Strasbourg, France	<i>Rapporteur interne</i>
M. GUEGUEN Philippe	ISTerre, Grenoble, France	<i>Rapporteur externe</i>
Mme SCOTTI Oona	IRSN, Fontenay-aux-Roses, France	<i>Co-directrice de thèse</i>
M. DE RUBEIS Valerio	INGV, Rome, Italie	<i>Invité</i>
M. SCHLUPP Antoine	IPG, Strasbourg, France	<i>Invité</i>

RESUME

Une comparaison entre observations macrosismiques et accélérométriques est effectuée pour trois séismes de magnitude $M_w \sim 4.5$ du nord-est de la France et de l'ouest de l'Allemagne, entre 2003 et 2005. Les paramètres scalaires et spectraux (Peak Ground Acceleration /Velocity (PGA et PGV), Cumulate Absolute Velocity (CAV), Arias Intensity (AI), Pseudo Acceleration /Velocity (PSA et PSV)) sont déduits des signaux accélérométriques enregistrés par neuf stations du Réseau Accélérométrique permanent situés entre 29 et 180km des épicentres. Les données macrosismiques sont collectées au travers de témoignages spontanés via le questionnaire internet du Bureau Central Sismologique Français. Les réponses aux questions du formulaire sont par la suite encodées. En plus de l'intensité macrosismique individuelle, l'analyse de la corrélation interne entre les réponses encodées a mis en évidence quatre champs de questions, définis par un sens physique différent : 1) « Mouvements vibratoires des petits objets », 2) « Déplacement et chute d'objets », 3) « Sons entendus », 4) « Ressenti Personnel ». Les plus fortes corrélations entre paramètres macrosismiques et instrumentaux sont observées lorsque les paramètres macrosismiques sont moyennés sur des surfaces circulaires de 10km de rayon autour de chaque station accélérométrique. Les intensités macrosismiques prédites par les relations intensité-PGV publiées s'accordent bien avec les intensités observées, contrairement à celles prédites à partir du PGA. Les corrélations entre les paramètres instrumentaux et macrosismiques pour des intensités comprises entre II et V (EMS-98) montrent que le PGV est le paramètre qui présente les plus fortes corrélations avec tous les paramètres macrosismiques. Les corrélations avec les spectres de réponses (PSA) montrent une claire dépendance en fréquence dans l'intervalle [1-33Hz]. Les composantes horizontales et verticales sont corrélées avec les paramètres macrosismiques entre 1 et 10Hz, gamme correspondant au domaine de fréquences propres de la plupart des bâtiments et au contenu haute énergie du mouvement du sol. Entre 10 et 25Hz une chute de corrélations entre les données macrosismiques et instrumentales est observée jusqu'à 25Hz, fréquence à laquelle les coefficients de corrélation augmentent et approchent le niveau des corrélations obtenues avec le PGA.

ABSTRACT

Comparison between accelerometric and macroseismic observations is made for three $M_w \sim 4.5$ earthquakes of eastern France between 2003 and 2005. Scalar and spectral instrumental parameters are processed from the accelerometric data recorded by nine accelerometric stations located between 29km and 180km from the epicentres. Macroseismic data are based on the French Internet reports. In addition to the individual macroseismic intensity, analysis of the internal correlation between the encoded answers highlights four predominant fields of questions, bearing different physical meanings: 1) “Vibratory Motions of small objects”, 2) “Displacement and Fall of Objects”, 3) “Acoustic Noise”, and 4) “Personal Feelings”. Best correlations between macroseismic and instrumental observations are obtained when the macroseismic parameters are averaged over 10km radius circles around each station. Macroseismic intensities predicted by published PGV-intensity relationships quite agree with the observed intensities, contrary to those based on PGA. The correlations between the macroseismic and instrumental data, for intensities between II and V (EMS-98), show that PGV is the instrumental parameter presenting the best correlation with all macroseismic parameters. The correlation with response spectra, exhibits clear frequency dependence over a limited frequency range [0.5-33Hz]. Horizontal and vertical components are significantly correlated with macroseismic parameters between 1 and 10Hz, a range corresponding to both natural frequencies of most buildings and high energy content in the seismic ground motion. Between 10 and 25Hz, a clear lack of correlation between macroseismic and instrumental data is observed, while beyond 25Hz the correlation coefficient increases, approaching that of the PGA correlation level.

MOTS-CLES

Macrosismicité, mouvement du sol, questionnaires Internet, réseau accélérométrique, PGA, PGV, CAV, Intensité d’Arias, intensité macrosismique, paramètres macrosismiques, corrélations, spectres de réponse

AVANT PROPOS

Trois ans viennent de s'écouler, la fin d'une aventure, une page qui se tourne. Un parcours, des rencontres. Au-delà des aspects techniques et des résultats obtenus, j'aimerais m'arrêter quelques minutes pour prendre le temps de dire merci. Je ne pourrai évidemment pas citer tout le monde mais ces remerciements s'adressent à chaque personne qui de près ou de loin, directement ou indirectement m'a aidée à en arriver là.

Tout d'abord merci aux différents professeurs qui m'ont « ouvert » cette voie (Monsieur Corn, Madame Galceran, Monsieur Modaresi...). Merci aux deux meilleurs profs de géol qu'il m'ait été donné de rencontrer : Julio Goncalves et Nicolas Bellhasen. Merci aux amis d'école d'ingénieurs : Naima, Eva, Clarisse, Daph, Flo, Solène, Marie Laure, et tous les autres.

Parachutée à Strasbourg pour ma thèse, un merci tout particulier à Pierre Warwzyniak de m'avoir intégrée au groupe. Merci aux copains de galère, de soirées égyptiennes, mexicaines, créoles, accents et autres : Julien, Marco, Max, Zac et Indrah, Olivier, Mélanie, Elise, Aurore et Julia, Paul, Séb, Charlotte, Ben & Chris (the best co-bureau ever !!!), Julie, Alexandra, Aude, Vince, Romy, Sheldon, Julien, Basile, Marylin. Merci aussi à Raphaëlle et Jean-Victor. Et tous les autres qui ont un jour partagé un verre, une soirée, une saucisse ou un steak à la fête de la moustache ! Un merci spécial à Florence, Florian et Tony qui ont su être là à un moment crucial fin 2008.

Ces trois ans m'ont beaucoup apporté professionnellement. J'en ressors grandie et enrichie. Je ne regrette pas cette expérience. Merci à Oona. Bien que nous n'ayons pas toujours été d'accord tu as su me pousser, me faire réfléchir et me faire avancer (parfois même dans la douleur). Merci à Michel, pour sa diplomatie, son calme, son enseignement, sa remarquable capacité à arrondir les angles et sa présence un dimanche matin de juillet au labo !!! Merci à Antoine pour ses explications, son énergie et ses millions d'idées. Enfin merci à Christophe pour son aide technique tout au long de la thèse, pour ses astuces et conseils pour m'intégrer au mieux à ma nouvelle vie lorsque je suis arrivée à Strasbourg. Merci aussi à tous les gens de Strasbourg qui m'ont de près ou de loin apporté leur aide tout au long de ces années. Coté IRSN, Merci à Catherine Berge-Thierry de m'avoir donné ma chance. Merci à Stéphane Nechtschein pour sa patience, sa confiance et sa bonne humeur lors de mon stage.

Merci à toute l'équipe du BERSSIN qui m'a supporté, soutenu et aidé pendant ces 4 ans passés à leurs cotés : Céline, Christophe, Stéphane B, Catherine (pour toute ton aide dans tous les domaines), Marc, Hervé, Delphine, Aurélien, Yves, Gérard, Olga, François, Fabian. Merci à David pour le temps et les explications accordés, notamment en septembre pour que je sois prête le jour J. Un merci tout particulier à Maria pour son enseignement de Matlab, pour sa patience et le temps qu'elle m'a accordés. Merci à tous pour votre bonne humeur, vos conseils et votre gentillesse.

Merci à Michel Granet, Thierry Camelbeeck et Philippe Guéguen d'avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse ainsi qu'à David Baumont, et Valerio De Rubeis pour leur participation au Jury.

Enfin mille merci à ma famille celle de sang et celle de cœur, pour le soutien indéfectible, la compréhension et la patience dont ils ont fait preuve. Merci d'avoir cru en moi, même quand moi je n'y croyais pas. Même si ce n'était pas en Palestine pendant mille ans, j'ai sacrément tourné parfois, alors merci Aliam et Lulu pour le guidage !!! Enfin, merci à Pierrot pour tout, passé, présent et à venir.

*Aux anges qui veillent sur moi,
Que je ne vois pas mais que je sais là*

SOMMAIRE

RESUME	1
ABSTRACT	2
MOTS-CLES.....	2
AVANT PROPOS	3
INTRODUCTION	9
1 OBSERVATIONS MACROSISMQUES DU MOUVEMENT DU SOL	11
1.1 L'INTENSITE MACROSISMQUE	11
1.1.1 Les différentes intensités macrosismiques et leurs échelles	11
1.1.2 L'échelle EMS-98	17
1.1.3 Les enquêtes macrosismiques.....	19
1.2 LES ENQUETES MACROSISMQUES EN FRANCE.....	21
1.2.1 Les enquêtes collectives BCSF	22
1.2.2 Les enquêtes individuelles et les SQI	23
1.2.2.1 Définition et attribution des SQI	23
1.2.2.2 Utilisation des SQI dans les intensités collectives BCSF	27
1.2.3 Comparaison entre les SQI et les intensités collectives SisFrance et BCSF	27
1.3 METHODES DE COMPARAISON DES INTENSITES ET DES PARAMETRES INSTRUMENTAUX... ..	28
1.3.1 Les relations Pic d'Amplitude (Peak Ground Motion)-intensité	29
1.3.1.1 Généralités	29
1.3.1.2 Relations PGA-Intensité.....	29
1.3.1.3 Relations PGV-intensité	32
1.3.1.4 Relations PGD-intensité	34
1.3.1.5 Conclusion sur les pics d'amplitude de mouvement du sol.....	34
1.3.2 Relation paramètres spectraux-intensité.....	34
1.3.2.1 Spectre de Fourier en amplitude	34
1.3.2.2 Spectre de réponse	35
1.3.3 Relations autres paramètres instrumentaux-intensité	39
1.3.3.1 Cumulative Absolute Velocity (CAV).....	39
1.3.3.2 Intensité d'Arias (AI)	40
1.3.4 Variabilité dans les mesures d'intensité et de paramètres instrumentaux	41
1.3.5 Conclusion sur les relations paramètres instrumentaux – intensité	43
2 LES DONNEES MACROSISMQUES ANALYSEES DANS LE NORD EST DE LA FRANCE	44
2.1 TRAITEMENT DE TROIS SEISMES DU NORD EST DE LA FRANCE.....	44
2.1.1 Description des données macrosismiques	44
2.1.1.1 Présentation des séismes.....	44
2.1.1.2 Présentation des données individuelles	49
2.1.2 Estimation des paramètres macrosismiques.....	53
2.1.2.1 Encodage des réponses aux questions	54
2.1.2.2 Calcul des matrices de corrélation	54

2.1.2.3 Nouveaux paramètres macrosismiques	56
2.1.2.4 Analyse en composantes principales (ACP).....	59
2.1.3 Conclusion sur les paramètres macrosismiques.....	66
2.2 ETUDE D'EVENTUELS EFFETS REGIONAUX A PARTIR DE L'ETUDE DES SQI.....	66
2.2.1 Intérêt et géologie de la zone d'étude	66
2.2.2 Modélisation des données.....	67
2.2.2.1 Généralité sur la modélisation des données observées.....	67
2.2.2.2 Méthodologie de la modélisation et des comparaisons	68
2.2.2.3 Choix des données	69
2.2.2.4 Analyse critique des données du séisme de Rambervillers (22/03/2003, Mw=4.8).....	72
2.2.2.5 Calcul du modèle moyen des données observées	73
2.2.3 Carte de résidus.....	74
2.2.3.1 Réalisation de la carte de résidus	74
2.2.3.2 Interprétation et Discussions	76
3 COMPARAISON DES PARAMETRES MACROSISMIQUES ET INSTRUMENTAUX	
DU MOUVEMENT DU SOL	76
3.1 DONNEES INSTRUMENTALES.....	76
3.1.1 Présentation du reseau d'accelerometrie permanent.....	76
3.1.2 Instruments et Conditions de site	77
3.1.3 Description et traitement des données instrumentales	78
3.1.4 Estimation des parametres instrumentaux.....	81
3.2 ARTICLE SOUMIS A JOURNAL OF SEISMOLOGY	82
3.2.1 Résumé de l'article	82
3.2.2 Article (Lesueur et al., 2011):.....	88
Abstract	88
Introduction.....	89
Data analysis and pre-processing	90
Associating macroseismic and ground motion parameters.....	97
Discussions	107
Conclusion.....	112
Acknowledgement	113
3.3 ANALYSES COMPLEMENTAIRES	114
3.3.1 Comparaison entre les intensités collectives BCSF et SisFrance, les SQI et les paramètres instrumentaux PGA et PGV.....	114
3.3.2 Etude de la corrélation en prenant la composante horizontale portant le PGA maximum.....	118
3.3.3 Etude de la corrélation avec les Densités spectrales de puissance	120
4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	123
5 REFERENCES	128
6 LISTE DES ABBREVIATIONS	136
7 ANNEXES.....	136

INTRODUCTION

Cette thèse s'effectue à la fois au Bureau Central Sismologique Français (BCSF) et au sein du Bureau d'Evaluation des Risques Sismiques pour la Sûreté des Installations (BERSSIN). Elle est cofinancée par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (dans le cadre des actions soutenues par le GIS-RAP) et par l'IRSN.

Bien que la France métropolitaine soit un pays à sismicité modérée, sans évoquer la possibilité de catastrophe majeure, les séismes y sont susceptibles de sérieusement perturber la vie économique. Le mouvement du sol lors d'un séisme peut être quantifié par des mesures instrumentales et des observations macrosismiques

Les observations macrosismiques sont des effets observés rapportés par les témoins directs du séisme. Consignées depuis l'époque médiévale, ces observations ont permis d'estimer l'intensité des séismes historiques en l'absence de capteurs instrumentaux. Par exemple, le séisme de 1356, ressenti jusqu'en région parisienne et qui détruisit la ville de Bâle, a donné lieu à de nombreux écrits, notamment deux qui décrivent les dégâts et ont permis d'estimer l'intensité de ce séisme : l'*Alphabetum Narrationum*, K. Von Waltenkofen, (1357) et *Le Livre Rouge de Bâle* (Das Rothe Buch von Basel) (1357). De nos jours, les observations macrosismiques sont collectées soit par les autorités d'une commune, soit via des témoignages individuels et spontanés au travers de questionnaires internet.

Les observations instrumentales, quant à elles, sont enregistrées à l'aide de sismomètres depuis la fin du XIX^{ème} siècle. Cancani (1904) avait basé la partie de son échelle concernant les plus hautes intensités sur les pics d'accélération du sol. Ce n'est que depuis les années 1950 que la communauté sismologique dispose d'accéléromètres, dont l'avantage majeur est de ne pas saturer lors des forts séismes, contrairement aux vélocimètres.

Il est impossible de prédire qu'un séisme aura lieu à un endroit et un moment précis. Cependant, pour prévenir les séismes et minimiser au maximum les dégâts (matériels et humains) ainsi que les impacts économiques, il est primordial de pouvoir caractériser et comprendre au mieux les mouvements du sol passés et à venir. Pour cela, la communauté sismologique, depuis les années 50, élabore des lois de comportement et de conversion d'un type d'observations à l'autre afin de pouvoir les comparer.

L'objectif général de cette thèse est de déterminer les relations entre les mesures instrumentales et les effets observables d'un séisme dans le domaine des faibles intensités (inférieures à VI). L'intérêt de cette étude est de permettre de mieux caractériser la variabilité du mouvement du sol, et aussi de savoir si les observations macrosismiques peuvent compléter et/ou supplanter les données instrumentales. A plus grande échelle, cette étude permet d'apporter des informations pour la réalisation éventuelle de « shake maps ».

Au cours de cette thèse, je me suis posé quatre questions principales :

- Les intensités macrosismiques tirées des questionnaires individuels du BCSF sont-elles biaisées par des effets régionaux systématiques?

- Quel(s) paramètre(s) instrumental ou macrosismique traduit le mieux le mouvement du sol ?
- Quelle méthode de traitement est optimum pour comparer les paramètres macrosismiques aux paramètres instrumentaux ?
- L'étude des questionnaires du Bureau Central Sismologique Français permet-elle de montrer que des champs de questions définis sont caractéristiques d'une gamme de fréquence particulière ?

Pour apporter des réponses ou des éléments de réponses à ces questions, ce travail s'articule en trois parties :

- Une première partie concerne les observations macrosismiques du mouvement du sol. Un bilan des différents types d'échelles et intensités macrosismiques, ainsi que des relations existant entre ces observations et les mesures instrumentales du mouvement du sol est effectué.
- Une seconde partie présente les données macrosismiques du nord-est de la France utilisées dans cette étude. Ce chapitre traite de l'estimation des paramètres macrosismiques à partir de corrélations entre les réponses aux questionnaires individuels. Une étude des effets régionaux à partir des intensités individuelles est également réalisée.
- Une troisième partie concerne les comparaisons entre paramètres instrumentaux et paramètres macrosismiques. Elle présente les signaux accélérométriques, leur traitement et, à travers un article et des compléments, présente les résultats des comparaisons macrosismique-instrumental.

1 OBSERVATIONS MACROSISMiques DU MOUVEMENT DU SOL

1.1 L'INTENSITÉ MACROSISMIQUE

1.1.1 LES DIFFÉRENTES INTENSITÉS MACROSISMiques ET LEURS ÉCHELLES

La macrosismologie est la partie de la sismologie relative aux données non-instrumentales des séismes, i.e. les effets sur les personnes, les objets, les bâtiments et l'environnement. En Europe, les premières données macrosismiques ont été collectées au début du 19^{ème} siècle (Cecic and Musson, 2004). L'échelle macrosismique la plus ancienne a été proposée par Holden en 1888. Depuis 1904, les échelles européennes comportent 12 degrés (Cancani, 1904).

L'intensité macrosismique est définie comme la classification de la gravité d'une secousse sismique en fonction des effets observés dans la zone donnée. L'intensité n'est pas définie comme un paramètre continu, mais est estimée sur une échelle macrosismique à partir d'effets observés. Depuis la fin du XVIII^{ème} siècle, de nombreuses échelles macrosismiques se sont succédé dont plusieurs sont encore utilisées de nos jours. La figure présentée en Annexe 1 et tirée de Coburn and Spence (2002) présente un historique de différentes échelles macrosismiques.

Les échelles les plus récentes (l'échelle macrosismique européenne EMS-98 (Grünthal et al., 1998), et l'échelle Medvedev-Sponheuer-Karnik MSK-64 (Medvedev et al., 1964) prennent en compte la vulnérabilité des bâtiments, ce qui n'était pas le cas des premières échelles macrosismiques. Bien souvent, chaque pays utilise son échelle de prédilection pour des raisons historiques ou de continuité dans les catalogues macrosismiques.

Ainsi, les Etats-Unis utilisent l'échelle Mercalli (définie en 1902, modifiée en 1931 pour devenir Mercalli Modified (Wood and Neumann, 1931), puis affinée en 1956) pour établir des « shake maps » (cartes de prédiction de la distribution des intensités pour un séisme sur une région donnée) (Wald et al., 1999a, c).

La Nouvelle Zélande utilise une version locale de l'échelle Mercalli Modifiée (Eiby, 1966) pour ses calculs d'intensité.

Les Italiens, quant à eux utilisent le plus souvent l'échelle Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS, 1912 (Sieberg, 1932)), bien que cette échelle ne prenne en compte la vulnérabilité des bâtiments que de façon sommaire et qualitative (trois classes de types bâtiments : "poor", "good", "very good"). Les Japonais estiment leurs intensités macrosismiques à l'aide de l'échelle d'intensité instrumentale JMA (Japan Meteorological Agency). Cette échelle est relative à des intensités déterminées à partir de mesures instrumentales. Cependant, des équivalences en effets observés (macrosismiques) ont été déterminées. Cette échelle, ainsi que la Mercalli Modifiée, la MSK-64

et la MCS sont représentées de façon synthétique dans les Tableau 1, Tableau 2, Tableau 3 (Landolt-Börnstein, 1984) et Tableau 4 (Sieberg, 1932)

Echelle MSK-64 : Echelle d'après Medwjedjew, Sponheuer and Karnik. Version révisée d'après Mercalli, Cancani and Sieberg et utilisée en Europe	
Intensité	Effets observés
I	Enregistré seulement par les instruments
II	Ressenti seulement par les personnes au repos
III	Ressenti par quelques personnes
IV	Ressenti par beaucoup de personnes ; tremblement de la vaisselle et des fenêtres
V	Balancement des objets suspendus. De nombreuses personnes sont réveillées
VI	Dommages légers aux bâtiments : petites fissures dans les plâtres
VII	Larges fissures dans les plâtres, murs et cheminées
VIII	Fissures dans les murs. Chutes de corniches et dommages aux toitures
IX	Destruction des murs et des toits de certains bâtiments. Glissements de terrain
X	Destruction de nombreux bâtiments. Fissures dans le sol jusqu'à 1m de large
XI	Nombreuses ruptures en surface ; Glissements de terrain dans les régions montagneuses
XII	Changement de relief à grande échelle

Tableau 1: Descriptif abrégé de l'échelle MSK-64 d'après (Landolt-Börnstein, 1984)

Echelle JMA : Echelle d'intensité instrumentale de la Japan Meteorological Agency	
Intensité	Effets observés
I	Non ressenti : trop faible pour être ressenti par les humains ; Enregistré seulement par les instruments.
II	Léger : ressentit seulement par les personnes au repos ou particulièrement attentives aux séismes.
III	Faible : ressenti par la plupart des gens ; léger mouvement des vitres et des portes coulissantes japonaises
IV	Fort : fort tremblements des maisons et des immeubles, basculement des objets instables, et débordement de liquides.
V	Très fort : fissures dans les murs de briques et de plâtre, basculement des lanternes de pierre japonaises, des pierres tombales et d'objets similaires. Dommages aux cheminées et aux entrepôts en argile plâtre. Glissements de terrain dans les régions montagneuses escarpées.
VI	Désastre : destruction de 1 à 30% des maisons de bois japonaises. Larges glissements de terrain. Fissures dans le sol et dans certains champs accompagnés de rejets de boue et d'eau.
VII	Ruine : Destruction de plus de 30% des maisons. Larges glissements de terrain, fissures et failles.

Tableau 2: Descriptif abrégé de l'échelle JMA d'après (Landolt-Börnstein, 1984)

Echelle MMI : Echelle Mercalli modifiée utilisée aux Etats-Unis	
Intensité	Effets observés
I	Non ressenti excepté par quelques personnes dans des conditions favorables
II	Ressenti seulement par les personnes au repos, en particulier dans les étages élevés des immeubles ; balancement éventuel des objets fragiles suspendus
III	Ressenti de manière notable à l'intérieur des bâtiments en particulier dans les étages élevés des immeubles. Beaucoup de gens ne reconnaissent pas le séisme. Balancement léger éventuel des voitures à l'arrêt. Vibration comme lors du passage d'un camion. Durée estimée.
IV	De jour, ressenti par beaucoup de personnes à l'intérieur, par quelques unes à l'extérieur. De nuit quelques personnes sont réveillées. Mouvement de la vaisselle et des portes et fenêtres ; Craquement des murs. Sensation d'un camion lourd qui ferait trembler l'immeuble. Balancement notable des voitures à l'arrêt
V	Ressenti par la majorité des personnes. Beaucoup sont réveillées. Bris de vaisselle, et fenêtres. Quelques fissures dans les plâtres. Basculement des objets instables. Mouvements possibles des arbres, poteaux, et autres objets élançés. Arrêt possible des horloges à balanciers.
VI	Ressenti par tous. De nombreuses personnes sont effrayées et sortent en courant des bâtiments. Mouvement du mobilier lourd. Chute de plâtres et dommages aux cheminées. Légers dommages.
VII	Tout le monde se rue dehors. Dommages négligeables aux bâtiments de fortes structures ; dégâts légers à modérés dans les bâtiments ordinaires bien construits ; dommages considérables aux bâtiments à faible structure (matériaux tout venant, maçonnerie) ; Bris de quelques cheminées ; Ressenti par des personnes au volant.
VIII	Dommages légers aux bâtiments à design spécial. Dommages considérables dans les bâtiments ordinaires avec effondrement partiels ; Chute de murs dans les bâtiments de faible structure. Chute de cheminées de maisons ou d'usine, de colonnes de bâtiments. Basculement du mobilier lourd. Sable et boue éjectés en petites quantités. Changement dans les puits. Les personnes qui conduisent sont gênées.
IX	Dommages considérables dans les bâtiments de fortes structures ; Enormes dommages avec chutes partielles dans les immeubles solides. Immeubles sortis de leurs fondations. Fissures dans les sols. Les tuyaux sous terrain explosent.
X	Destruction de structures solides en bois. Destruction de la plupart des bâtiments en maçonnerie avec fondation. Grosses fissures dans le sol. Rails déformés. Glissements de terrain considérables depuis les rives des fleuves et les pentes escarpées. Ejection de sable et de boue. Projection d'eau sur les rives.
XI	Quelques structures (s'il y en a) en maçonnerie restent debout. Ponts détruits. Grandes fissures dans les sols ; Pipelines sous terrain détruits. Effondrement des sols et glissements de terrain dans les sols meubles. Grosses déformations des rails.
XII	Destruction totale. Vagues vues sur les grandes surfaces. Paysage modifié. Objets projetés dans les airs.

Tableau 3: Descriptif abrégé de l'échelle MM d'après (Landolt-Börnstein, 1984)

Echelle MCS : Echelle donnée par Sieberg (1932) sous le nom « échelle Mercalli-Sieberg » utilisée en Italie	
Intensité	Effets observés
I	Imperceptible; secousse seulement indiquée par les sismomètres.
II	Très légers : ressenti seulement par des personnes isolées, en repos complet, attentives et très sensibles, presque exclusivement dans les étages supérieurs des bâtiments
III	Légers : le tremblement est ressenti à l'intérieur des maisons comme une secousse due au passage d'une voiture rapide par un petit nombre de personnes, même dans un secteur peuplé.
IV	Modérés : peu de personnes ressentent le séisme en plein air. De nombreuses personnes le ressentent à l'intérieur des bâtiments ; tremblements ou vacillement de pièces de mobilier, entrechoquement des verres ou pièces de vaisselle comme lors du passage d'un camion chargé sur une chaussée irrégulière. Des fenêtres vibrent, des fissures éventuelles aux encadrements de portes et à l'encrage des poutres et des planchers, des plafonds craquent. Les liquides sont agités dans les récipients. Impression qu'un objet lourd (sac chargé, meuble) tombe dans le bâtiment, ou oscillation du mobilier lourd comme dans un bateau sur une mer agitée. En dehors de personnes sensibles qui auraient déjà vécu un séisme, il n'y a pas de manifestation de frayeur. Quelques personnes endormies se réveillent.
V	Assez forts : ressenti par de nombreuses personnes en activité pendant la journée, même en plein air ou sur la route. Très généralement ressenti dans les habitations comme une secousse du bâtiment entier. Des plantes ainsi que des branches d'arbustes ou d'arbre sont agitées comme lors d'un vent modéré. Des objets suspendus bougent, des feux de signalisation des lampes suspendues ou des lustres légers oscillent, les sonnettes tintent ; des balanciers d'horloge s'immobilisent ou oscillent plus fortement mais ne se rompent pas. Des horloges à balancier arrêtées peuvent se remettre en marche ; des ressorts d'horloges tintent ; la lumière électrique sursaute ou fonctionne mal à cause de faux contacts ; des tableaux suspendus aux murs se décalent ou heurtent le mur ; de petites quantités de liquide sortent des récipients remplis à ras bord, de petits objets peuvent tomber, de la même façon des objets suspendus aux murs peuvent pencher ; des meubles s'entrechoquer, ouverture de portes, bris de fenêtres. La plupart des personnes endormies se réveillent. Quelques personnes sortent des bâtiments.
VI	Forts : ressenti par tout le monde avec effroi, beaucoup s'enfuient en plein air ; quelques personnes perdent l'équilibre. Les liquides sont assez fortement agités. Des tableaux, des livres et objets semblables tombent des étagères. De la vaisselle est brisée. Des appareils ménagers assez solides, et même des meubles isolés, sont déplacés ou se renversent par endroit ; des petites cloches de chapelles et d'églises, des horloges murales en hauteur peuvent sonner. Quelques dommages légers apparaissent sporadiquement dans des bâtiments de conception solide : fissures, chutes de morceaux de plâtre. Des dommages plus importants peuvent apparaître sur des bâtiments mal construits. Quelques tuiles et parties de cheminées peuvent tomber.
VII	Très forts : dommages considérables au mobilier. Chutes de mobilier lourd. Grosses cloches d'église sonnent. Cours et étendues d'eau s'opacifient. Glissements isolés de portions de rives sableuses et graveleuses. Modification du niveau d'eau dans les puits. Dommages à de nombreuses maisons de conception solide : fissures légères dans les murs, chute de gros morceaux de plâtre et de stuc, chute de briques, glissement général des tuiles. Fractures de beaucoup de cheminées, chute de panneaux de parements, rupture de cheminées défectueuses au niveau du toit. Chute des ornements instables des bâtiments hauts. Dégâts au crépi des maisons à colombages. Quelques effondrements de maisons mal construites.
VIII	Destructifs : tronc entiers déplacés ou brisés. Déplacement du mobilier lourd. Retournement des statues et pierre tombales hors de leurs fondations. Enceintes de pierre solides fracturées et mises au sol. Destruction lourde dans 25% des maisons. Effondrement de maisons isolées, beaucoup deviennent inhabitables. Effondrement fréquent des murs de remplissages des murs à colombage. Endommagement ou déformation des maisons de bois. Effondrement des clochers et des cheminées d'usine. Fractures dans les sols sur les pentes raides et dans des sols humides. Apparition de boue et de fontaine de sable dans les sols humides.
IX	Ravageurs : destruction de la moitié des maisons de pierre, beaucoup s'écroulent, la plupart des maisons est inhabitable. Bris de constructions à colombages et décalage de leurs fondations en pierre avec déformations.
X	Anéantissants : dégâts lourds sur environ ¾ des bâtiments dont la plupart s'écroulent complètement. Des bâtiments et ponts en bois, même bien conçus sont fortement endommagés, certains sont détruits. Des digues et des barrages sont endommagés plus ou moins fortement, des rails de chemins de fer sont tordus et des conduites d'eau ou de gaz sont sectionnées dans le sol ou exhumées du sol. Des fractures et de grandes rides apparaissent dans les chaussées goudronnées ou pavées

XI	Catastrophe : Effondrement de tous les bâtiments de pierre. Les constructions solides et en bois ont pu résister. Effondrement des ponts les plus résistants. Les digues et les quais sont séparés les uns des autres. Déformations importantes des rails. Tuyaux sous terrains sont complètement séparés les uns des autres et deviennent inutilisables. Déformation variable du sol en fonction de sa nature : ouverture de grosses fissures ; ruptures dans les sols humides. Débordement de fluides. Chutes de pierres
XII	Dévastation: Aucune construction humaine ne résiste. Transformation du paysage à grande échelle. Créations de cascades, de lacs stagnants et de rivières.

Tableau 4: Echelle macrosismique donnée par Sieberg (1932) sous le nom de "échelle Mercalli Sieberg"

La Slovénie a, pour sa part, choisi l'échelle MSK-64 (Tertulliani et al., 1999). L'échelle MSK-64 a été actualisée pour devenir l'échelle EMS-98 (Grünthal, 1998) actuellement utilisée en France et au Royaume-Uni depuis quelques années (en remplacement de la MSK-64) (Musson, 2000). En France, l'échelle MSK-1964 est encore utilisée par le BRGM, EDF et l'IRSN pour la base d'intensités macrosismiques historique SisFrance. L'échelle EMS-98 est toutefois préconisée pour les séismes actuels et elle est utilisée, notamment par le BCSF pour sa base de données macrosismiques. L'avantage de l'utilisation de l'échelle EMS-98 est la prise en compte explicite de la vulnérabilité des bâtiments. Cette échelle est de plus en plus largement utilisée en Europe dans une démarche d'harmonisation des intensités, notamment en cas d'occurrence de séismes transfrontalier (Italie, France, Belgique, Royaume Uni...).

Dans les gammes d'intensités faibles (inférieure à VI), où la secousse n'a pas provoqué de dommages aux constructions, les intensités des différentes échelles macrosismiques sont équivalentes. Ceci est présenté par le guide de conversion entre les échelles macrosismiques majeures et l'EMS-98 du Tableau 5 (Musson et al, 2010). Pour cette raison, dans la section 3.2.2, il nous sera possible de comparer nos travaux avec ceux déjà existants, dans une gamme d'intensités inférieures à VI.

RF	EMS-98	MSC	EMS-98	MMI-56	EMS-98	MSK-64	EMS-98	JMA	EMS-98
								0	I
I	I	I	I	I	I	I	I	I	II ou III
II	II	II	II	II	II	II	II	II	IV
III	III	III	III	III	III	III	III	III	IV ou V
IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	V
V	V	V	V	V	V	V	V	VL	VI
VI	V	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VU	VII
VII	VI	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VIL	VIII
VIII	VII ou VIII	VIII	VIII	VIII	VIII	VIII	VIII	VIU	IX ou X
IX	IX	IX	IX	IX	IX	IX	IX	VII	XI
X	X ¹	X	X	X	X	X	X		XII
	XI	XI	XI	XI	XI ¹	XI	XI		
	XII	XII	XII ¹	XII	XII ¹	XII	XII ¹		

Tableau 5: Guide de conversions d'intensité entre chaque échelle macrosismique majeure et l'EMS98 (Musson et al, 2010). RF correspond à l'échelle Rossi-Forel, première échelle « moderne » utilisée en Europe et composée de 10 degrés

Certaines difficultés pour les estimations d'intensités effectuées par le passé, proviennent de la non-homogénéité des échelles entre les différents pays et les changements d'échelle au cours du temps (cf. Annexe 1). Un effort est actuellement tenté pour homogénéiser l'évaluation des intensités macrosismiques sur l'échelle EMS-98. En effet, un groupe de travail a été initié lors de la conférence de l'ESC2010 afin de mettre en place un questionnaire européen qui servirait de base aux questionnaires de chaque pays. Ainsi les questions majeures seraient les mêmes pour chaque pays, et les données macrosismiques seraient homogènes et comparables.

Ces différentes échelles macrosismiques peuvent également être mises en relation pour certaines avec la valeur de l'accélération du sol comme le montrent le Tableau 6 (Sieberg, 1943) et le Tableau 7 (Zacek, 1996).

Degrés de l'échelle MCS	IV	V	VI	VI	VIII	IX	X	XI	XII
PGA min (cm/s²)	1	2.5	5	10	25	50	100	250	500
Moyenne d'après Gassman	1.6	3.4	7.3	16	34	73	160	340	?
PGA max (cm/s²)	2.5	5	10	25	50	100	250	500	?

Tableau 6: Echelle d'intensité MCS en fonction de la valeur du PGA en cm/s² (Sieberg, 1943)

¹ Intensité ainsi définie quand elle est relative à un phénomène qui n'est pas représentatif de la force de la secousse (i.e. ceux dus à la surface de rupture, ou qui atteignent un point de saturation dans l'échelle où les dégâts totaux se réfèrent aux dommages aux bâtiments non parasismiques) (Musson et al, 2009)

MSK-64	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
EMI*	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
MM-56	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
JAPON	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	XI	XII		
URSS	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
PGA moyen en g**	0.002	0.004	0.008	0.015	0.03	0.06	0.13	0.25	0.5	1	2	4
*Echelle macrosismique d'intensité utilisée dans les règles PS 69												
** Il s'agit de la moyenne des accélérations maximales enregistrées lors des tremblements de terre de même intensité. Il faut toutefois insister sur le fait que les valeurs compilées souffrent d'une grande dispersion. Les accélérations indiquées peuvent parfois être multipliées ou divisées par 10 dans le cas d'un séisme particulier.												

Tableau 7: Tableau de correspondance entre différentes échelles d'intensités et les valeurs d'accélération du sol correspondantes d'après Zacek (1996)

1.1.2 L'ÉCHELLE EMS-98

L'échelle macrosismique européenne EMS-98, utilisée dans le cadre de cette étude, comporte douze degrés estimés à partir des dégâts causés aux constructions, en fonction de leur vulnérabilité pour les intensités les plus fortes (au dessus de VI), des effets sur les objets et sur les personnes (en particulier pour les intensités inférieures à VI, en l'absence de dommages aux bâtiments). Ce n'est pas une mesure instrumentale. Elle prend en compte le caractère statistique des effets (aspect quantitatif de l'EMS-98). La proportion faible ou importante d'un effet est un indicateur de la sévérité de la secousse. Il est parfois difficile de transcrire les effets statistiques de l'échelle EMS-98 (beaucoup, un peu, la plupart) en pourcentages. L'EMS-98 applique un faible recouvrement des effets qui n'est pas forcément le choix le plus idéal. Divers indicateurs sont étudiés pour déterminer l'intensité macrosismique. Les observations sur un indicateur peuvent amener à se trouver dans une « zone de recouvrement » (cf. Figure 1). Il faut dans ce cas regarder les autres indicateurs. Si tous les indicateurs mènent à une zone de recouvrement (ce qui est extrêmement rare), un choix d'expert intervient, fréquemment lié à la densité d'information disponible.

Comme pour l'échelle MSK-64, l'intensité EMS-98 est une estimation de l'intensité des secousses au sol. Les avantages majeurs de l'EMS-98 sur les autres échelles macrosismiques sont :

- La prise en compte de la typologie des bâtiments pour une classification de leur vulnérabilité.
- Les degrés (ou niveaux) de dégâts.
- La prise en compte de quantité et de fréquences.

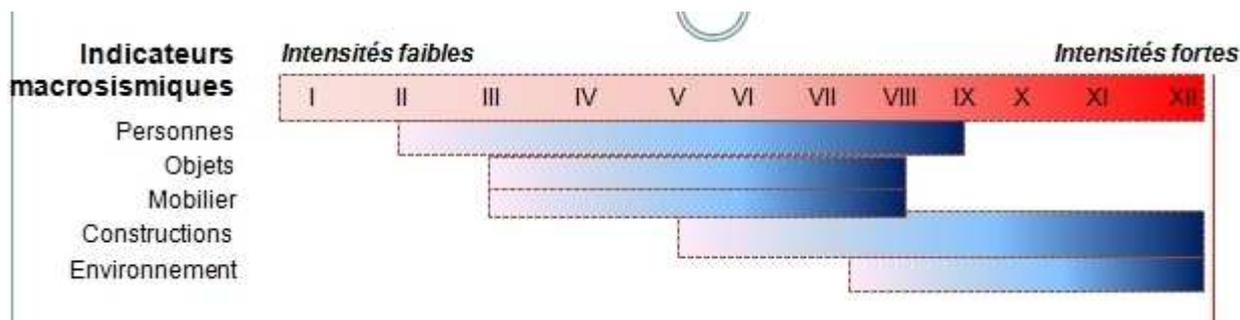


Figure 1: Zones de recouvrement d'intensité des différents indicateurs utilisés pour déterminer l'intensité macrosismique.

La valeur de l'intensité définie est représentative d'un lieu, assez grand pour prendre en compte les effets statistiques, mais pas trop grand pour éviter le lissage des variations locales. Cependant la zone doit être, si possible, non affectée par des spécificités locales. En effet, il est plus difficile de déterminer une intensité macrosismique de façon fiable si une partie de la zone se trouve au rocher et l'autre partie au sédiment. L'échelle recommande d'attribuer des intensités sur des lieux homogènes (par types de sols), et d'attribuer deux intensités si une partie de la commune est au rocher et une autre au sédiment. Dans la réalité, ce n'est pas toujours possible (et rarement effectué). Un interlocuteur collecte toutes les données et en fait une synthèse (voir les paragraphes 1.2.2 et 1.3). Lorsque des localités sont sur deux types de sols différents, l'intensité intègrera des valeurs indicatives, par exemple intensité V-VI (localement V et localement VI), ou V-VII (de V à VII, variation selon les secteurs de V à VII).

Pour la prise en compte de la dimension statistique, l'EMS-98 stipule que l'intensité macrosismique ne doit pas être affectée à un seul bâtiment ou à une rue, mais à des zones géographiques variant de la taille d'un village à celle d'une grande ville européenne. Cependant aucune règle n'est fixée de façon rigide. Il existe dans l'EMS-98, des « trous » reconnus pour une question de discrétisation de l'échelle (problème de frontière).

Lorsque les effets ressentis proviennent de témoignages dans les étages élevés, une correction dans l'attribution de l'intensité est nécessaire pour se ramener au mouvement du sol. De plus, les effets décrits par les témoignages situés au-delà du 5^{ème} étage des bâtiments ne sont pas pris en compte dans la détermination de l'intensité macrosismique. Le Tableau 8 synthétise les différents degrés de l'échelle EMS-98.

Intensité EMS-98	Définition	Description des effets observés
I	Non ressenti	Non ressenti, même dans les circonstances les plus favorables
II	Rarement ressenti	La vibration n'est ressentie que par quelques personnes au repos, en particulier dans les étages supérieurs des bâtiments
III	Faible	Une faible vibration est ressentie à l'intérieur par quelques personnes. Des personnes au repos ressentent un balancement ou un léger tremblement
IV	Largement observé	Le séisme est ressenti à l'intérieur par de nombreuses personnes et par un très petit nombre dehors. Quelques personnes sont réveillées. L'amplitude des vibrations reste modérée. Les fenêtres, les portes et la vaisselle vibrent. Les objets suspendus se balancent.
V	Fort	Le séisme est ressenti à l'intérieur par la plupart des personnes et par un petit nombre dehors. Les personnes endormies se réveillent. Quelques personnes sortent en courant. Les bâtiments entrent en vibration. Les objets suspendus oscillent fortement. La vaisselle, les verres tintent. La vibration est forte. Quelques objets lourds et instables se renversent. Les portes et les fenêtres s'ouvrent ou se ferment.
VI	Dégâts légers	Ressenti par la plupart des personnes à l'intérieur et par beaucoup dehors. De nombreuses personnes sont effrayées dans les bâtiments et courent vers les sorties. Les objets tombent. De légers dégâts apparaissent dans les bâtiments ordinaires : petites fissures dans les plâtres, chutes de petits morceaux de plâtre
VII	Dégâts	La plupart des personnes sont effrayées et courent vers les sorties. Les meubles sont déplacés et de nombreux objets tombent des étagères. Un grand nombre de bâtiments ordinaires sont endommagés : petites fissures dans les plâtres, chutes partielles de cheminées.
VIII	Dégâts importants	Du mobilier peut être renversé. De nombreux bâtiments ordinaires sont endommagés : chutes de cheminées, larges fissures dans les murs et un petit nombre de bâtiments peuvent s'effondrer partiellement.
IX	Destructions	Les monuments sont renversés. De nombreux bâtiments ordinaires s'écroulent partiellement et un petit nombre s'effondrent.
X	Destructions importantes	Un grand nombre de bâtiments ordinaires s'effondrent.
XI	Catastrophe	La plupart des bâtiments ordinaires s'effondrent.
XII	Catastrophe généralisée	Toute structure à l'air libre ou en sous-sol est fortement endommagée ou détruite.

Tableau 8: Version abrégée de l'échelle macrosismique européenne EMS-98 (Grünthal, 1998) ; En gras sont présentés les niveaux d'intensité concernés par cette étude.

1.1.3 LES ENQUÊTES MACROSISMIQUES

Depuis la fin du XIX^{ème} siècle en Europe, les observations macrosismiques sont collectées via des enquêtes collectives ou individuelles. Lorsqu'un séisme est ressenti dans une région, des enquêtes macrosismiques sont déclenchées afin de collecter des données. Ces enquêtes sont généralement déclenchées lorsque la puissance du séisme dépasse un certain seuil, dépendant du pays dans lequel s'est produit le séisme.

Les enquêtes macrosismiques au Royaume Uni (Musson et Henni, 1999), qu'elles soient collectives ou individuelles, sont déclenchées dès que le séisme dépasse une magnitude locale de $ML=3$ (épicerne à terre), ou que la zone de ressenti est suffisamment significative (épicerne offshore). En Italie, les enquêtes sont déclenchées pour un seuil de magnitude locale de $ML=3$ ou pour une intensité maximale supérieure à 5 MCS. Dans les petits pays ou les pays à faible sismicité (Autriche, Slovénie, Hongrie), il se peut que tous les séismes ressentis entraînent le déclenchement d'une enquête (Cecic et Musson, 2004). Concernant la France, une enquête macrosismique est déclenchée dès que la magnitude locale est supérieure à $ML=3,5$ (alerte déclenchée par le LDG).

De manière générale, l'enquête macrosismique est réalisée à l'aide d'un formulaire posant des questions sur le ressenti du séisme. Le plus souvent, le questionnaire est construit autour de l'échelle macrosismique utilisée par le pays déclencheur de l'enquête. Ces formulaires peuvent être soit des questionnaires à choix multiples, soit des questionnaires à réponses libres. Le premier type est plus facile à manipuler car toutes les données sont du même format. La diffusion du questionnaire peut s'effectuer de plusieurs façons en fonction du pays : courrier, presse, site internet, téléphone, e-mail.

Au Royaume Uni, la distribution des questionnaires se fait soit par voie de presse (le témoin remplit le questionnaire qui se trouve dans son quotidien et le renvoie) (Musson, 1992), soit via le site internet du BGS (British Geological Survey²).

En Italie, la collecte de données se fait majoritairement via le site internet de l'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia³). Le questionnaire italien, Annexe 2, est composé de 79 questions distribuées selon 9 des 10 degrés de l'échelle MCS (les degrés II à X sont traités) (Gasparini et al., 1992). Quarante questions sont dédiées aux effets sur les personnes et les objets et dix-neuf aux effets sur les constructions. Comme signalé plus haut, il n'y a que trois classes de construction "poor", "good", "very good". Vingt autres questions traitent des effets sur l'environnement mais elles ne sont pas utilisées pour l'estimation de l'intensité.

Le Centre Sismologique Euro-Méditerranéen (CSEM) a lui aussi développé son questionnaire, non lié à une échelle particulière et disponible en 21 langues sur son site internet⁴. L'Annexe 3 représente les 14 questions du questionnaire en ligne du CSEM.

L'Observatoire Royal de Belgique utilise le questionnaire qui dérive de celui mis au point par David Wald « Did you feel it ? » adapté à l'échelle MMI. Le questionnaire est accessible en français et en ligne sur le site internet de l'ORB⁵ (Annexe 4). Il comporte 22 questions dont 13 concernant le témoin (localisation et expérience du séisme), et 9 questions sur le mobilier et les dommages aux constructions.

Le questionnaire américain « Did you feel it ? », est accessible via le site internet de l'USGS⁶. Composé de 17 questions, il se découpe de façon analogue avec une section sur la localisation du témoin (4 questions), une seconde sur son expérience du séisme (5 questions), une troisième sur

² Site internet du British Geological Survey : www.bgs.ac.uk/

³ Site internet de l'Institut Nazionale di Geofisica e Vulcanologia : www.ingv.it/

⁴ Site internet du centre Sismologique Euro-Méditerranéen : www.emsc-csem.org

⁵ Site internet de l'Observatoire Royal de Belgique : www.seismologie.oma.be/

⁶ Site internet de l'U.S. Geological Survey www.earthquake.usgs.gov/earthquakes/dyfi/

les effets sur les objets (7 questions) et enfin une dernière sur les dégâts observés sur les constructions (Annexe 5).

L'Espagne propose également son questionnaire macrosismique, composé de 17 questions et traduit en 9 langues dont le Français sur le site internet de l'Instituto Geográfico Nacional⁷. Comme pour les autres questionnaires, une partie des questions est réservée à la localisation du témoin et son expérience du séisme (10 questions), et une autre s'attache aux effets sur les objets et aux dommages aux constructions (7 questions). (Annexe 6)

A partir de ces questionnaires, les différents pays attribuent des intensités basées sur leurs propres échelles et forment ainsi des bases de données macrosismiques, accessibles dans la plupart des cas à partir des sites internet des instituts enquêteurs. Il est intéressant de noter que les questionnaires étant assez longs, toutes les questions ne sont pas systématiquement remplies par les témoins.

1.2 LES ENQUÊTES MACROSISMIQUES EN FRANCE

Pour chaque séisme de magnitude supérieure à $ML=3,5$ (ReNaSS) ou $ML=3.7$ (LDG) en France, une alerte est déclenchée par le LDG (Laboratoire de Détection Géophysique) et une enquête macrosismique est déclenchée par le BCSF. L'intensité macrosismique est attribuée par le Bureau Central Sismologique Français⁸ qui collecte des témoignages de personnes ayant ressenti le séisme et les stocke dans une base de données. Ces données sont collectées grâce à des questionnaires de deux types : les questionnaires collectifs et les questionnaires individuels. Au fil du temps les questionnaires ont évolué et plusieurs générations se sont succédé depuis les années 1980 (Tableau 9) :

Génération	Collectif/individuel	Validité
IV	Collectif	04/1986-07/1995
V	Collectif	1996-2000
VI	Collectif	2000-2004
VII	Individuel	01/2000-07/2004
VIII	Collectif	Depuis 2004
IX	Individuel	Depuis 07/2004

Tableau 9: Générations successives de questionnaires du BCSF

Le BCSF analyse chaque questionnaire des deux types et lui attribue un code de fiabilité de 1 à 3 (jugement qualitatif du BCSF, 3 étant le plus fiable) en fonction de la cohérence des réponses. Ils sont ensuite stockés dans une base de données qui recense les séismes de magnitude supérieure à 3,5, ressentis en France. Depuis 1921, date de création du BCSF, plusieurs échelles ont été utilisées (MCS, MSK-64, EMS-98).

⁷ Site internet de l'Instituto Geográfico Nacional avec le questionnaire : www.02.ign.es/ign/main/index.do

⁸ Site internet du Bureau Central Sismologique Français www.franceseisme.fr

1.2.1 LES ENQUÊTES COLLECTIVES BCSF

Ces questionnaires collectifs sont collectés par l'intermédiaire de la mairie, des pompiers ou de la gendarmerie et correspondent à des témoignages à l'échelle de la commune. Ces questionnaires collectifs permettent de disposer d'une représentation statistique des effets à l'échelle de la commune suivant les indicateurs de l'échelle EMS-98. Ils sont constitués de 45 questions relatives au ressenti de la population, aux effets sur les objets, les dommages aux constructions. Les enquêtes collectives pour les séismes étudiés ici ont été réalisées avec le formulaire de génération 6 (Annexe 7). Une intensité macrosismique dite intensité macrosismique communale (ou collective) est attribuée à chaque questionnaire. Elle est relative à l'aire géographique de la commune. Elle est attribuée selon les critères de l'échelle EMS-98 avec une dimension statistique à l'échelle de la commune considérée. Dans le cas de dommages aux bâtiments, l'intensité est principalement déterminée par le niveau de dégâts global en fonction des classes de bâtiments et du type de structures. Le niveau de dégâts des bâtiments est estimé en fonction de leur typologie.

Lorsque les dommages aux bâtiments sont importants, une enquête de terrain est mise en place par le Groupe d'Intervention Macrosismique. Réalisée par plusieurs binômes d'experts visitant la zone épiscopale, cette enquête a pour but d'estimer in situ les différents niveaux de dégâts et de vulnérabilité des bâtiments affectés. Elle comporte une interview des maires des communes considérées ainsi qu'un diagnostic d'échantillons (observation directe des dommages aux constructions). Cette enquête de terrain donne lieu à l'estimation d'intensités macrosismiques communales dans les zones de dégâts. Le rapport BCSF qui inclut ces intensités, est le document technique utilisé par la commission interministérielle CatNat pour statuer sur le classement ou non de la commune en Catastrophe Naturelle. Cette enquête de terrain vient compléter les réponses aux enquêtes collectives classiques.

Le BCSF n'est pas le seul à établir des intensités collectives en France. Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières⁹ (BRGM), attribue également des intensités collectives pour venir compléter la base de données macrosismiques historique SisFrance. Ces intensités sont établies à partir de l'échelle MSK-64, et non sur l'échelle EMS-98. Les intensités des séismes historiques, datant de l'époque où on ne disposait pas d'instruments sont attribuées à partir d'écrits d'archives (les séismes de Bâle en 1356 ou de Bigorre en 1660 par exemple). La base de données est régulièrement mise à jour et les intensités des séismes récents sont attribuées à partir des données collectées par le BCSF au niveau communal. Cette base de données gérée par le BRGM, est construite en copropriété avec l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire et EDF.

⁹ Site internet du Bureau de Recherche Géologique et Minière : www.brgm.fr

1.2.2 LES ENQUÊTES INDIVIDUELLES ET LES SQI

Depuis 2000, en plus des enquêtes collectives, le BCSF a mis en place un questionnaire individuel en ligne sur son site internet. Toute personne ayant ressenti un séisme peut venir témoigner spontanément sur le site. Les données individuelles ainsi collectées sont géolocalisées à l'adresse du témoin, si ce dernier la renseigne. Dans le cas contraire, comme l'indication de la commune est obligatoire pour remplir le questionnaire, le témoignage est alors géolocalisé au centre de la commune, à savoir l'église ou la mairie. Le formulaire comprend une cinquantaine de questions en cohérence avec les observations décrites par l'échelle EMS-98 sur les effets sur les témoins, les objets, l'environnement, les dommages aux constructions mais sans les aspects statistiques. Il est à noter que très peu de personnes témoignent si elles n'ont pas ressenti le séisme. Il est fréquent que les données individuelles soient trop peu nombreuses à l'échelle d'une commune pour remplacer les données collectives et estimer une intensité statistiquement fiable à cette échelle. Cependant, les témoins réussissent généralement assez bien à replacer la secousse vécue dans un niveau d'intensité décrit et défini par l'EMS-98.

1.2.2.1 Définition et attribution des SQI

A chaque formulaire individuel, il a été décidé au BCSF, d'attribuer une valeur d'intensité en utilisant les critères de l'EMS-98. Cependant, l'intensité ainsi définie ne respecte pas scrupuleusement les règles de l'échelle EMS-98 puisque les aspects statistiques sont négligés. Ce témoignage, auquel on associe une intensité individuelle désignée sous le terme SQI « Single Questionnaire Intensity », est stocké de manière confidentielle dans la base de données du BCSF. Son caractère confidentiel est du au fait qu'elle se rapporte au témoignage d'une personne, et qu'un accord entre la CNIL et le BCSF pour la protection des informations personnelles empêche sa libre diffusion.

Les éléments statistiques peuvent être pris en compte si on fait une moyenne des SQI à l'échelle de la commune. On obtient ainsi une « intensité-internet » dont la précision est dépendante du nombre de données sur lequel est effectuée la moyenne.

Les analyses du BCSF montrent les SQI moyennées sur une dizaine d'observations donnent une assez bonne idée de la zone de perception de différents effets et permet une première visualisation des niveaux d'intensité des secousses. L'écart entre intensité communale et SQI moyennée peut parfois atteindre 1 à 2 degrés d'intensité dans certains cas. Néanmoins, les moyennes des SQI à l'échelle de la commune correspondent à une réalité locale qui n'est que très rarement accessible, y compris par les enquêtes de terrain. Cela permet de préciser le détail du mouvement du sol et sa variabilité spatiale.

Cependant, les témoignages individuels sont fortement influencés par la localisation et la sensibilité du témoin (habitude des séismes, sensibilité aux séismes, âge, sexe) entre autres. Ainsi, le BCSF attribue une qualité à la SQI, qui ne dépend pas de la localisation spatiale des

témoignages dans la commune, mais seulement de la pertinence et de la cohérence des réponses entre elles.

L'estimation de la SQI repose sur l'analyse des réponses aux questions sur chaque indicateur. La première indication pour l'estimateur est le choix de l'imagette par le témoin. En effet, en plus des questions, le questionnaire individuel BCSF dispose d'imagettes (Figure 2), correspondant à chaque niveau d'intensité (entre II et XII), parmi lesquelles le témoin va choisir celle qui schématise le mieux la situation qu'il a observée lors du séisme. Ensuite, l'estimateur regarde les réponses aux questions. Chaque niveau de réponse à une question (ex : faible, moyen, fort) est associé à un niveau d'intensité dans la description de l'EMS-98 (exemple : faible vibration, I = III ; faible oscillation des objets, I = III ; chute d'objet, I > V). Chaque formulaire doit avoir une certaine cohérence entre les niveaux d'effets relevés sur les indicateurs, et l'intensité imagette. Cette cohérence permet par la suite de faire ressortir une valeur prédominante de SQI pour l'ensemble du formulaire.

Le BCSF associe à chaque valeur de SQI une qualité sur une échelle de 1 à 3 selon plusieurs critères (peu sûre, moyennement sûre, et sûre).

L'analyste doit, en premier lieu, utiliser la notion de saturation des indicateurs (impossibilité de traduire un niveau inférieur ou supérieur pour une classe d'indicateurs donnée). Dans ce cas des effets relevant d'une autre classe d'indicateurs doivent apparaître dans le témoignage, sinon un doute existe sur les informations contenues dans le questionnaire et la qualité ne peut pas être 3.

Les témoignages individuels sur les dégâts aux bâtiments doivent en particulier être utilisés avec précaution. Ils doivent être cohérents avec les effets sur les personnes et objets correspondant au moins à des effets d'intensité V (forte secousse).

Des effets signalés forts avec peu de réponses aux autres questions du formulaire par ailleurs conduisent également à déclasser la qualité du formulaire et donc de l'estimation. Dans ce dernier cas, l'analyste doit indiquer une valeur moyennement sûre (2) ou peu sûre (1) pour la SQI.

Si la secousse est faible, qu'elle n'a pas inquiété la personne, et qu'aucune oscillation de quelque sorte n'a été observée, il est peu probable que des effets forts sur le mobilier (déplacements, renversements) ou des dégâts aux bâtiments soient observés. Si c'est le cas, le formulaire ne permettra pas d'obtenir une SQI et sera rejeté du traitement (qualité 1 et SQI=0 pour absence de détermination). S'il n'existe qu'une faible cohérence entre les niveaux d'effets, la qualité du formulaire passera d'une qualité sûre (3) à une qualité moyennement sûre (2). De la même façon un témoignage rapportant que le témoin n'a pas lui-même ressenti les effets sera noté 2 au lieu de 3 (moyennement sûr).

La situation du témoin est également prise en compte pour l'attribution des valeurs de SQI. Si les témoignages sont issus des étages 3-4, la valeur SQI finale est diminuée d'un degré, sauf si elle est égale à II afin de se prémunir des effets dus à la hauteur des bâtiments et ramener le témoignage au sol. Pour les 1^{er} et 2^{ème} étages la SQI n'est pas modifiée.

Pour les témoignages issus d'étages supérieurs à 4 ou en sous-sol, il ne sera pas possible d'estimer la SQI (SQI=0). Le formulaire sera conservé dans la base mais avec une qualité 1 (peu

sûre). Ce choix est guidé par les recommandations de l'échelle EMS-98 qui précisent que ces positionnements excluent la prise en compte des témoignages pour déterminer l'intensité. Il en va de même de même pour une localisation à l'extérieure d'un bâtiment, compte tenu dans ce cas, non d'une formulation de l'EMS-98, mais de la faible présence d'indicateurs observables (objets, mobiliers notamment), rendant difficile l'estimation de la SQL.

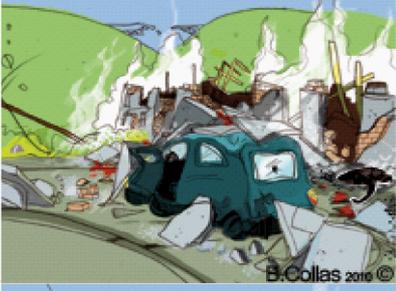
	peu ressenti I=II		dégâts importants I=VIII
	faible I=III		destructions I=IX
	modéré I=IV		destructions importantes I=X
	fort I=V		catastrophe I=XI
	très fort I=VI		catastrophe généralisée I=XII
	sévère I=VII		

Figure 2: Imagettes du questionnaire individuel BCSF.

1.2.2.2 Utilisation des SQI dans les intensités collectives BCSF

L' « intensité-Internet » communale du BCSF est calculée à partir de la moyenne des SQI de qualités 2 ou 3 se rapportant à la même commune. Cette intensité Internet complète, à partir de données indépendantes, celles tirées des formulaires collectifs. Les valeurs d'intensités collectives présentes dans la base de données du BCSF, sont corrigées à partir des moyennes des SQI ainsi déterminées. En plus de son estimation de l'intensité communale prenant en compte les effets sur l'ensemble de la commune, le BCSF dispose de moyennes de SQI souvent réalisées sur moins de 10 témoignages. Ces SQI moyennes deviennent vraiment intéressantes dans le cas où un formulaire collectif signale le séisme comme non ressenti alors qu'un nombre significatif de témoins indique le contraire. Dans ce cas, les SQI sont systématiquement utilisées pour compléter la base de données d'intensités, et une intensité II est attribuée à la commune en accord avec les recommandations de l'EMS-98. Aux faibles distances épacentrales, lorsque le nombre de témoignages individuels dans une commune signalant le séisme comme non ressenti est inférieur à 10, l'information SQI est prise en compte par un R (« ressenti »). Dans le cas où le nombre de témoignages dépasse 10, la valeur moyenne des SQI est inscrite dans la base de données communales du BCSF en association avec les qualités 2 ou 1.

1.2.3 COMPARAISON ENTRE LES SQI ET LES INTENSITÉS COLLECTIVES SISFRANCE ET BCSF

Comme précédemment signalé, il existe deux bases de données macrosismiques en France : la base de données du BCSF contenant les témoignages individuels et collectifs, et la base de données SisFrance. Il est intéressant de comparer les SQI, aux intensités collectives BCSF et SisFrance en fonction de la distance à l'hypocentre du séisme afin de voir s'il existe une grande différence entre elles. Pour cela, j'ai pris le cas du séisme de Rambervillers pour lequel le nombre de témoignages dans chaque base de données est conséquent (10662 SQI, 6240 intensités collectives BCSF et 3954 intensités collectives SisFrance). J'ai calculé, pour chaque jeu de données l'intensité moyenne par fenêtre glissante en distance et tracé les résultats sur la Figure 3.

On remarque la présence d'un écart entre l'évolution de chaque type d'intensité ou SQI en fonction de la distance hypocentrale. A faible intensité (en dessous de III), les intensités SQI sont inférieures aux intensités collectives BCSF et SisFrance. Puis la tendance s'inverse vers l'intensité V. Aux intensités élevées, les intensités collectives de SisFrance sont supérieures aux intensités BCSF d'un peu moins d'un demi-degré, et toutes deux sont supérieures aux SQI d'un degré d'intensité.

Ces écarts peuvent provenir de la manière dont chaque intensité est évaluée. Et bien que les intensités collectives SisFrance aient été évaluées à partir des mêmes questionnaires que le BCSF, ce dernier utilise des données individuelles afin de mieux calibrer les données d'intensités collectives. En conséquence, l'écart est maximum aux faibles distances hypocentrales ainsi qu'aux distances hypocentrales supérieures à 100 km.

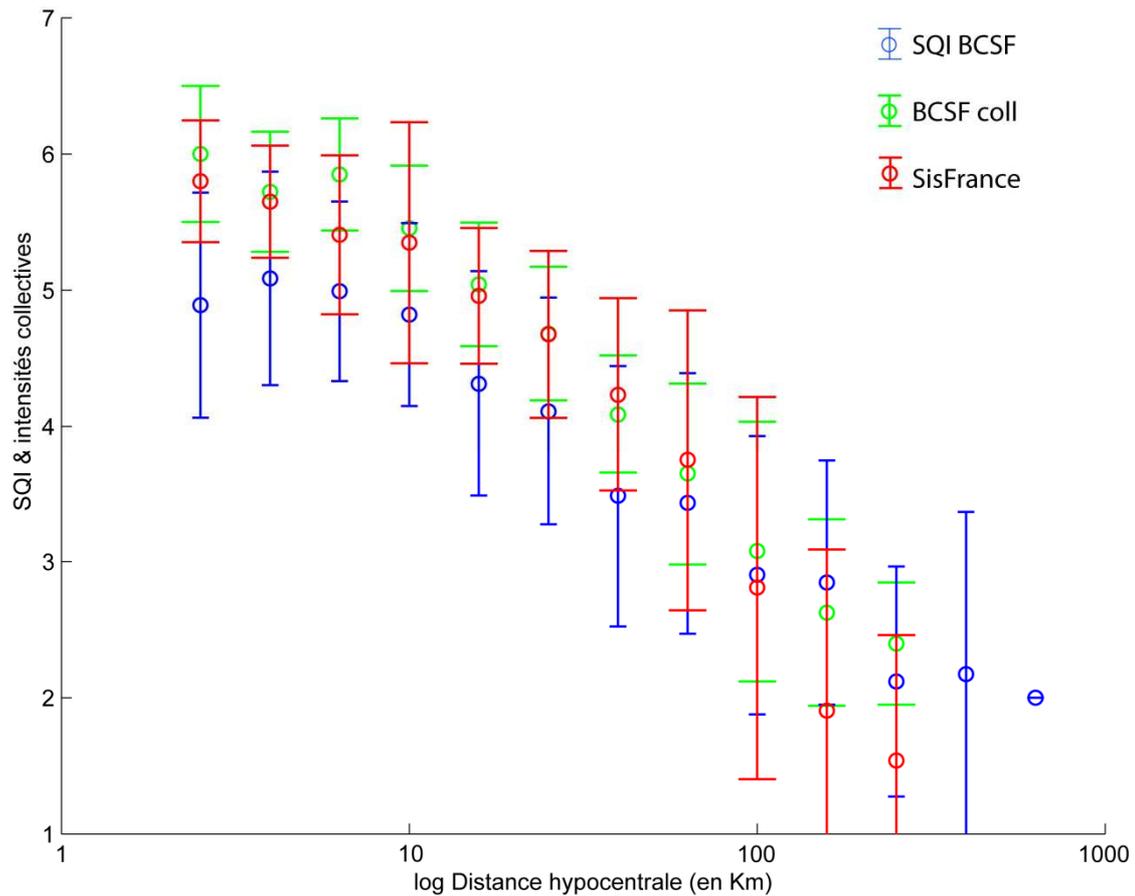


Figure 3: Intensité moyenne estimée par classe de distance hypocentrale pour le séisme de Rambervillers (22/03/2003, $M_w=4.8$, $h=12\text{km}$) à partir des intensités collectives SisFrance et BCSF et SQI. Les barres verticales sont les barres d'erreur à $\pm\sigma$

1.3 MÉTHODES DE COMPARAISON DES INTENSITÉS ET DES PARAMÈTRES INSTRUMENTAUX

Depuis le début du 20^{ème} siècle, les capteurs capables de mesurer le mouvement du sol et ainsi permettre l'accès à des données quantitatives et précises de celui-ci ont été développés. Afin de mieux contraindre et comprendre les mouvements du sol passés et à venir, la communauté sismologique a comparé et relié les données macrosismiques et les données accélérométriques au travers de relations de prédiction d'intensités à partir des mouvements du sol (et vice versa). Les objectifs de ce genre d'études sont variés. A partir des paramètres de mouvements du sol, la prédiction des intensités permet l'établissement de shake maps, cartes de prédictions des dégâts post-sismiques utilisables pour la mise en place des secours (Wald et al, 1999a ; 1999b). Il existe de très nombreux modèles prédictifs reliant les paramètres instrumentaux du mouvement du sol et les intensités. Plusieurs synthèses bibliographiques, visant à réaliser un catalogue des relations existantes, ont été effectuées. Parmi elles, les plus récentes sont celles du BRGM (Auclair, 2009) et du GEM Foundation (Global Earthquake Model Foundation) (Cua et al., 2010) . Les tableaux (Tableau 10 à Tableau 15) proposent un état de l'art non exhaustif de ces relations paramètres instrumentaux-intensités.

1.3.1 LES RELATIONS PIC D'AMPLITUDE (PEAK GROUND MOTION)-INTENSITÉ

1.3.1.1 Généralités

Les différentes échelles d'intensités utilisées coïncident globalement avec une décroissance logarithmique des principaux paramètres instrumentaux, en particulier les pics d'amplitude des mouvements du sol (PGM). C'est donc naturellement que la majorité des relations proposées sont établies entre les PGM (pic d'accélération PGA, de vitesse PGV ou de déplacement PGD) et l'intensité macrosismique. Ces modèles prédictifs peuvent estimer le mouvement du sol à partir de l'intensité (Intensity to Ground Motion Conversion Equation, IGMCE). Elles permettent également d'estimer l'intensité à partir des paramètres de mouvement du sol (Ground Motion to Intensity Conversion Equation, GMICE) notamment pour élaborer des shake maps. En général ce second type d'équation n'est pas réversible, bien que parfois il soit utilisé comme tel. La relation de Faenza et Michelini (2010) est une exception à cette règle. En général, ces relations ne prennent pas en compte le contenu fréquentiel du signal.

La relation établie est souvent de la forme :

$$I = a \cdot \log_{10} PGM + b \quad (1)$$

Où

- a est une constante,
- PGM peut être soit le PGA soit le PGV parfois même le PGD,
- b peut être une constante ou bien une variable b (M, d, S...) dépendant de la magnitude M (M_w, M_s, M_l) de la distance caractéristique d (épicentrale, focale, à la rupture...) et du type de sol S (Rocher ou sédiment).

Atkinson et Sonley (2000) recommandent l'utilisation de la forme où b est une variable dépendant d'autres paramètres dans le cas d'applications en temps réel (cas des shake maps californiennes par exemple).

Souvent ces relations PGM-intensité sont dépendantes des couples magnitude-distance ainsi que du contexte sismotectonique. Ainsi, elles ne sont applicables de façon rigoureuse que dans les régions pour lesquelles elles ont été établies. De ce fait, les relations PGM-intensité bien que présentant souvent de fortes corrélations avec un écart type correct (par exemple, inférieur à un degré d'intensité), sont affectées par une variabilité géographique importante.

1.3.1.2 Relations PGA-Intensité

Le pic d'amplitude ou PGM le plus souvent utilisé est le pic d'accélération du sol, ou PGA. Il a été suggéré par Cancani (1904) et utilisé dans les premières relations dès les années 1950 (Gutenberg et Richter, 1956 ; Hershberger, 1956). Très facilement accessible, puisqu'il

correspond à l'amplitude maximale du signal accélérométrique, le PGA donne accès à la force inertielle imposée aux structures et donc au potentiel destructeur du séisme. Il est en conséquence important de pouvoir l'estimer à partir des données macrosismiques en cas de défaut de mesures instrumentales. Le PGA constitue un des paramètres utilisés par les ingénieurs structure dans le dimensionnement des bâtiments parasismiques notamment.

Cependant, même si de nombreux auteurs comme Gutenberg et Richter (1956), Ambraseys (1974), ou Trifunac et Brady (1975) pour les plus anciens, Worden et al (2001), Faenza et Michellini (2010), Kostov (2005), Boatwright (2001), ou Davenport (2003) pour les plus récents, utilisent l'équation (1) dans sa forme la plus simple, beaucoup s'accordent à dire que c'est un paramètre assez peu adapté à ce genre de corrélation. En effet, le PGA est très variable et est parfois mal corrélé aux effets structuraux. Les corrélations peuvent cependant être améliorées lorsque le PGA est couplé avec un autre paramètre. Ainsi, Souriau (2006) propose de coupler le PGA et la fréquence dominante du signal ; Atkinson et Kaka (2007) proposent d'ajouter la distance focale ; Karim et Yamakazi (2002) ont établi une relation associant le PGA à la distance et la magnitude ; Tselentis et Danciu (2008) ont ajouté à ces deux paramètres supplémentaires le type de sol.

Le Tableau 10 donne de manière non exhaustive les relations PGA-intensité établies par différents auteurs, ainsi que leur domaine d'application, la localisation géographique des données à partir desquelles elles ont été établies, et le type d'intensité utilisé. On notera la large gamme d'intensités prise en compte, ainsi que la variabilité de l'écart type d'une relation à l'autre.

Auteurs	Loc.	Echelle	Type	Validité (PGA en cm/s ²)	Loi	σ
Gutenberg et Richter (1956)	W USA	MMI	coll.	II-IX 1<PGA<300	$I=[\log(\text{PGA})+0.5]*3$	
Hershberger (1956)	W USA	MMI	coll.	III-VIII 1<PGA<300	$I=[\log(\text{PGA})+0.9]/0.429$	
Ambraseys (1974)	EU	MMI	coll.	IV-X 2<PGA<600	$I=[\log(\text{PGA})+0.16]/0.36$	
Tifunac et Brady (1975)	W USA	MMI	coll.	IV-X 7<PGA<1150	$I=[\log(\text{PGA})-0.014]/0.3$	
Murphy et O'Brien (1977)	S EU monde entier	MMI	coll.	IV-VIII 10<PGA<700	$I=[\log(\text{PGA})-0.24*M+0.68*\log(\text{Dépi})-0.88]/0.14$ $I=[\log(\text{PGA})-0.25]/0.25$	
Margottini et al. (1992)	Italie	MSK -64	coll?	IV à VIII 20<PGA<200	$I=[\log(\text{PGA})-0.358]/0.258$	
Koliopoulos et al. (1998)	Grèce	MMI	coll?	IV à VI-VII 25<PGA<200	$I=[\ln(\text{PGA})-0.16]/0.76$	

Wald et al (1999a)	Californie	MMI	coll?	V-VIII 4<PGA<1000	$I=3.66*\log(PGA)-1.66$	1.08
Atkinson et Sonley (2000)	Californie	MMI	coll.	III-IX 4.9< Mw<7.4 1<D<300km 41.2<PGA<363 cm/s ²	$I=-9.32+6.08*\log(PGA)+6.08*0.46*\log(D_{faille})-6.08*0.03*M_w$	1,7
Boatwright et al (2001)	Californie	MMI	tagging intensities (Imm- Itag <1)	V-IX 100<PGA<800	$I=4.36*\log(PGA)-3.88$	
Karim et Yamakazi (2002)	Japon, USA & Taiwan	JMA	IJMA	5.4<Mw<8.3 PGA>10cm/s ²	$I_{JMA} = -0.65 + 0.18M + 1.81 \log_{10} PGA_R$ (eq 14)	0.302
Davenport (2003)	Nvl zélande	MMI	coll.? (approx isoseimal map)	50<PGA<- 100000	$MMI = 1.102 \log_{10}(PGA) + 2.56$	0.46
Marin et al (2004)	France	MSK -64	Coll. (catalogue basé sur SIRENE)	stiff bedrock MI=2.5-5.6 (near field) 3< D<50km	$I=2.3*\log(PGA)+10$	
Kostov (2005)	Europe	EMS -98 MSK -64	coll.	II-X 2<Ms<7.8	$\ln(PGA) = 0.24 I - 3.9$	
Souriau (2006)	France	EMS -98	Coll (only?) approx isoseimal map	II-V	$I=4.81+2.70*\log(PGA)+1.22*\log(D_{foc})$ $I=4.32+2.13*\log(PGA)+1.15*\log(D_{foc})$ $I=5.42+1.34*\log(PGA)-0.03*F_{dominante}$	
Atkinson et Kaka (2006)	Missouri et Californie (USA)	MMI	Ind. (DYFI)	II-IX 0.4<PGA<260	$I=2.315+1.319*\log(PGA)+0.372*[\log(PGA)]^2$	0.93
Atkinson et Kaka (2007)	Center US and Californie	MMI	Ind. (DYFI)	II-IX	si $\log(PGA) \leq 1.69$: $I=2.65+1.39*\log(PGA)$ si $\log(PGA) \geq 1.69$: $I=-1.91+4.09*\log(PGA)$	1.01

Atkinson et Kaka (2007)	Amérique du Nord	MMI	Ind. (DYFI)	II-IX	$\text{si } \log(\text{PGA}) \leq 1.69 : I = 0.69 + 1.39 \log(\text{PGA}) + 0.02 M_w + 0.98 * \log(\text{Dfoc})$ $\text{si } \log(\text{PGA}) \geq 1.69 : I = 3.87 + 4.09 \log(\text{PGA}) + 0.02 M_w + 0.98 * \log(\text{Dfoc})$	0.89
Tselentis et Danciu (2008)	Grèce	MM	coll?	IV-VIII 20<PGA<300	$I = 2.355 + 1.384 * \log(\text{PGA}) + 0.297 * M_w - 0.832 * \log(\text{Dépi}) - 0.108 * S$ $I = 0.946 + 3.563 * \log(\text{PGA})$	0.67 0.73
Faenza et Michellini (2010)	Italie	MCS	coll.? (DBMI04)	Imcs<8 3.9<Mw<6.9	$I_{MCS} = 1.68 \pm 0.22 + 2.58 \pm 0.14 \log \text{PGA}$	0.35
Worden et al (2011)	Californie	MMI	DYFI	MMI=2-8.6 0.07<PGA<800	$\text{Si } \log_{10} \text{PGA} \leq 1.57 \text{ MMI} = 1.78 + 1.55 \log_{10}(\text{PGA})$ $\text{Si } \log_{10} \text{PGA} > 1.57 \text{ MMI} = 3.70 \log_{10}(\text{PGA}) - 1.60$ $\text{Si } \text{MMI} \leq 4.22 \log_{10}(\text{PGA}) = (\text{MMI} - 1.78) / 1.55$ $\text{Si } \text{MMI} > 4.22 \log_{10}(\text{PGA}) = (\text{MMI} + 1.60) / 3.70$	MMI 0.73 PGA 0.39

Tableau 10: Relations PGA-intensités avec les références d'auteurs et de lieu, leur domaine de validité le type d'échelle et d'intensités utilisées

1.3.1.3 Relations PGV-intensité

Le PGV, relatif à la vitesse maximale du sol, est un paramètre qui est souvent considéré comme étant le plus adapté à rendre compte du potentiel destructeur du mouvement sismique (Liu et Zang, 1984) et donc de l'intensité. Il correspond à l'amplitude maximale du signal en vitesse. Il est surtout utilisé pour l'élaboration de shake map, conjointement avec le PGA (Cua et al, 2010). Directement lié à l'énergie transmise à la structure (Mohammadioun et Mohammadioun, 2004), il semble plus approprié que le PGA, (cf. écart-type PGA Tableau 10 et PGV Tableau 11).

Ici encore, la gamme de validité de la plupart de ces relations est très large et l'écart type très variable en fonction des relations, allant parfois jusqu'à des valeurs très importantes de 1.7.

Le Tableau 11 recense les relations PGV-intensité publiées dans la littérature.

Auteurs	Loc.	Echelle	Type	Validité (cm/s)	Loi	σ
Tifunac & Brady (19175)	West USA	MMI	coll.	IV à X PGV=2.3- 75	$I = [\log(\text{PGV}) + 0.63] / 0.25$	
Koliopoulos et al. (1998)	Grèce	MMI	coll.?	IV à VI-VII 1.5<PGV<10	$I = [\ln(\text{PGV}) + 2.54] / 0.75$	
Wald et al	Californie	MMI	coll.	V-IX 4.9<Mw<7.4 1<D<300km 6<PGV<100	$\text{MMI} = 3.47 * \log(\text{PGV}) + 2.35$	0,98

Atkinson & Sonley (2000)	Californie	MMI	coll.	III-IX 4.9< Mw<7.4 1<D<300km	$I=6.81+5.86\log(PGV)+5.86*0.37\log(D_{faille})-5.86*0.26Mw$	1,7
Boatwright et al (2001)	Californie	MMI	tagged int. Imm- Itag <1	V-IX 7<PGV<100	$I=3.38*\log(PGV)+2.03$	
Karim & Yamakazi (2002)	Japon, USA & Taiwan	JMA	IJMA	5.4<Mw<8.3	$I_{JMA} = 3.35 - 0.13M + 1.82 \log_{10} PGV_R$ (eq 15)	0.345 R ² =0.937
Wu et al (2003)	Taiwan	It	?	MI=2-7 5<PGV<80	$I=2.14*\log(PGV)+1.89$	
Kaka & Atkinson (2004)	NE USA	MMI	coll.	II-VIII M=3,6-7,25	$MMI=4,08+1,79*\log(PGV)-0,28*\log(D)$ $MMI=3,96+1,79*\log(PGV)$	0,65 0,72
Atkinson & Kaka (2006)	New Madrid et Californie	MMI	Ind. DYFI	II-IX	$MMI=4,40+1,92\log_{10}(PGV)+0,280[\log_{10}(PGV)]^2$	0,78
Atkinson & Kaka (2007)	N USA	MMI	Ind. DYFI	II-IX	$\log PGV < 0,48$ $MMI=4,37+1,32\log(PGV)$ $\log PGV > 0,48$ $MMI=3,54+3,03\log(PGV)$	0,80 0,80 0,76 0,76
Atkinson & Kaka (2007)	Center US and Californie	MMI	Ind. DYFI	II-IX	$\text{Si } \log PGV < 0,48$ $MMI=4,84+1,32\log(PGV)-0,19Mw+0,26\log(D_{foc})$ $\text{Si } \log PGV > 0,48$ $MMI=4,01+3,03\log(PGV)-0,19Mw+0,26\log(D_{foc})$	
Atkinson & Wald(2007)	Parkfield	MMI	Ind. DYFI	I-VII 2< Mw<8	$PGV(MMI)=3,94+1,22\log_{10}(PGV)$	
Tselentis & Danciu (2008)	Grèce	MMI	coll.?	IV-VIII 1.5<PGV<25	$I=5.582+1.397\log(PGV)-0.787\log(D_{épi})-0.073*S$ $I=3.3+3.358*\log(PGV)$	0.66 1.59
Faenza & Michelini (2010)	Italie	MCS	coll.? DBMI 04	Imcs<8 3.9<Mw<6.9	$IMCS = 5.11 \pm 0.07 + 2.35 \pm 0.09 \log PGV$	0.26
Worden et al (2011)	Californie	MMI	DYFI	2< MMI<8.6 0.0018<PGV<190	$\text{Si } \log_{10} PGV \leq 0.53$ $MMI= 3.78+1.47\log_{10}(PGV)$ $\text{Si } \log_{10} PGV > 0.53$ $MMI=3.16 \log_{10}(PGV)+2.89$ $\text{Si } MMI \leq 4.56$ $\log_{10}(PGA)=(MMI-3.78)/1.47$ $\text{Si } MMI > 4.56$ $\log_{10}(PGA)=(MMI-2.89)/3.16$	MMI 0.65 PGA 0.40

Tableau 11: Relations PGV-intensités avec les références d'auteurs et de lieu, leur domaine de validité le type d'échelle et d'intensités utilisées

1.3.1.4 Relations PGD-intensité

Le troisième pic d'amplitude du mouvement du sol est le PGD qui représente le déplacement maximal du sol. Seuls quelques auteurs ont publié des modèles reliant ce paramètre et l'intensité dont Trifunac et Brady (1975) et Atkinson et Sonley (2000). Les résultats s'avèrent peu concluants et les écart-types très importants (de l'ordre de 2 degrés d'intensité pour Atkinson et Sonley (2000)). Sokolov (2002) suggère que le PGD pourrait être représentatif des gammes d'intensités élevées supérieures à VIII.

1.3.1.5 Conclusion sur les pics d'amplitude de mouvement du sol

Comme remarqué plus haut, les gammes de validité des intensités varient d'une relation à l'autre, aussi bien dans le cas des relations avec le PGA qu'avec le PGV. Il n'est donc pas aisé de déterminer à priori si ces paramètres, PGA comme PGV, sont représentatifs d'une gamme d'intensité spécifique. Cependant, plusieurs auteurs comme Wald et al (1999a), ont conclu de leurs études que chaque pic d'amplitude pouvait être représentatif d'une gamme d'intensité particulière. Ainsi Wald (1999a) montre que pour ses données le PGA est mieux corrélé que le PGV aux faibles intensités (I-V), et que le PGV est plus représentatif de la gamme d'intensités modérées (V-VII). Il est suivi dans cette voie par Chernov et Sokolov (1983), Aptikaev et Shebalin (1988) ainsi que Chernov (1989). Mon étude, est en désaccord avec ces conclusions, puisque la section 3.3.1 montre que, sur une gamme d'intensités comprise entre II et VI, les paramètres macrosismiques définis en section 2.1.2 se corrélaient mieux avec le PGV qu'avec le PGA.

En conséquence, les shake-maps réalisées par David Wald, utilisent soit des relations PGV-intensité soit des relations PGA-intensité en fonction du niveau de PGA.

Je rappelle, que Sokolov (2002) suggère que les PGD sont plus représentatif des intensités au-delà du degré VII.

Cependant, selon Koliopoulos et al, (1998), Boomer et al, (1997), Winter et al, (2007), les pics d'amplitude (PGA, PGV, PGD) ne sont pas toujours directement corrélés avec les dommages structuraux lors de forts séismes et il est donc nécessaire de s'intéresser à d'autres indicateurs.

1.3.2 RELATION PARAMÈTRES SPECTRAUX-INTENSITÉ

1.3.2.1 Spectre de Fourier en amplitude

Le spectre de Fourier donne l'amplitude et la phase du mouvement du sol en fonction des fréquences portées par le signal. L'intensité étant dépendante de l'amplitude, du contenu

fréquentiel et de la durée du signal, Chernov (1989) a proposé une méthode, reprise par la suite par Sokolov et Chernov (1998) pour estimer l'intensité à partir des amplitudes spectrales issues de la gamme de fréquences très étroite sensée être représentative de l'intensité considérée. Quelques auteurs ont établi des relations entre l'intensité et le spectre de Fourier en amplitude : Sokolov (2000 ; 2002), Sokolov et Wald (2002), Chernov et Sokolov (1999).

1.3.2.2 Spectre de réponse

1.3.2.2.1 Le spectre de réponse (d'après Bour, 1993)

Les caractéristiques de la sollicitation sismique sont généralement traduites en spectre de réponse. Le concept de spectre de réponse a été introduit dans le domaine de la sismologie de l'ingénieur par Bénéioff (1934) et Biot (1941). Bien que peu familier à la communauté des sismologues, ce type de spectre est utilisé lors des études de propriété d'amplification des ondes dans le sol, et est très largement adopté pour le dimensionnement des constructions parasismiques (International Association for Earthquake Engineering, 1988).

Dans de nombreux cas, la réponse élastique d'une structure à un mouvement sismique du sol, peut être approchée par le comportement d'un oscillateur mécanique simple à un degré de liberté, dont la période naturelle et l'amortissement sont identiques à ceux de la structure. La taille, la configuration et le matériau de la structure déterminent sa période naturelle. Une sollicitation sismique tendra alors à exciter l'oscillation de ce bâtiment à cette fréquence ou période préférentielle. La vibration de la structure s'accompagnera d'une perte graduelle d'énergie par friction interne libérant de la chaleur. Dans le cas des fortes sollicitations cela conduira à l'endommagement de la structure. Dans le domaine linéaire des petites vibrations, le processus peut être décrit comme celui d'un oscillateur amorti, où la quantité d'amortissement est généralement exprimée en tant que pourcentage de l'amortissement critique. Typiquement en dynamique des structures étudiées en génie parasismique, la fraction d'amortissement critique est faible : 2-8% pour les bâtiments et 5-10% pour les sols.

Le mouvement sismique fait vibrer un oscillateur de période naturelle et d'amortissement fixé. Le mouvement de l'oscillateur de période T est mesuré comme le déplacement relatif $x(t)$ de l'oscillateur par rapport au mouvement du sol. Cette analyse de comportement prend toute son importance dans le cadre d'étude de structures parasismiques, car les contraintes dans les structures sont directement proportionnelles au déplacement relatif entre le sol et un point de la structure. Le maximum d'amplitude de déplacement peut se produire n'importe quand, dépendant du moment auquel la sollicitation est proche de la période T et de la variation d'amplitude de l'excitation avec le temps. Par définition la valeur du spectre de réponse en déplacement à la période T est le déplacement relatif de l'oscillateur. En prenant plusieurs oscillateurs avec différentes périodes naturelles et un même amortissement, le spectre de réponse est décrit point par point. Le spectre de réponse en vitesse est décrit comme la dérivée en temps du spectre de réponse en déplacement. Le spectre de réponse en accélération est décrit, lui, comme la double dérivation du déplacement relatif, additionné de l'accélération absolue du sol.

Si le déplacement relatif de l'oscillateur est supposé sinusoïdal de fréquence angulaire ω , on peut convertir simplement le déplacement en vitesse en multipliant par ω , et en accélération en multipliant par ω^2 . L'histoire temporelle d'un séisme est vraiment compliquée et le déplacement relatif d'un oscillateur simple n'est pas un mouvement sinusoïdal pur, la vitesse et l'accélération ainsi calculées ne sont donc pas de vraie vitesses et accélérations. C'est pourquoi elles sont appelées pseudo-vitesse relative (PSV) et pseudo-accélération absolue (PSA) :

$$PSA = \omega^2 |x(t, \omega, \alpha)|_{\max} = |\ddot{x}(t, \omega, \alpha)|_{\max} \quad (2)$$

$$PSV = |\dot{x}(t, \omega, \alpha)|_{\max} = \frac{PSA}{\omega} \quad (3)$$

Avec ω la fréquence angulaire de l'oscillateur et α son amortissement.

1.3.2.2 Relations intensité-spectre de réponse

Les relations intensité pseudo-spectre en accélération (PSA) ou en vitesse (PSV) présentent l'avantage d'être applicables en tout lieu (Atkinson et Sonley, 2000) contrairement à celle PGM-intensité. Ce paramètre est particulièrement intéressant pour les fortes intensités où la réponse d'une structure à la sollicitation sismique se corrèle bien avec les valeurs spectrales. Le Tableau 12 renvoie les relations établies dans la littérature entre PSA et intensité et le Tableau 13 renvoie les relations PSV-intensité.

Auteurs	Loc.	Echelle	Type	Validité (cm/s ²)	Loi	σ
Atkinson & Sonley (2000)	Californie	MMI	coll.	III-IX	$I=13.40+7.26\log(\text{PSA}/0.5\text{Hz})+7.26*0.38*\log(\text{Dfaille})-7.26*0.47*Mw$	2.0
				Mw	$I=2.19+5.00*\log(\text{PSA}/1\text{Hz})+5.00*0.30*\log(\text{Dfaille})-5.00*0.27*Mw$	1.6
				4.9-7.4	$I=-4.92+5.58*\log(\text{PSA}/2\text{Hz})+5.58*0.40*\log(\text{Dfaille})-5.58*0.15*Mw$	1.8
				D=1-300km	$I=-12.1+6.30*\log(\text{PSA}/5\text{Hz})+6.30*0.46*\log(\text{Dfaille})-6.30*0.03*Mw$	1.9
				PGA=41.2-363cm/s ²	$I=-14.6+6.59*\log(\text{PSA}/10\text{Hz})+6.59*0.56*\log(\text{Dfaille})$	2.0
Kaka & Atkinson (2004)	NE USA	MMI	coll.	II-VIII	$I=3,26+1,81*\log(\text{PSA}_{1\text{Hz}})+0,44*\log(\text{D})$	0.68
					$I=4,14+1,81*\log(\text{PSA}_{1\text{Hz}})$	0.83
					$I=4,08+2,10*\log(\text{PSA}_{5\text{Hz}})-0,67*\log(\text{D})$	0.68
					$I=2,45+2,10*\log(\text{PSA}_{5\text{Hz}})$	0.76
					$I=5,60+2,10*\log(\text{PSA}_{10\text{Hz}})+1,33*\log(\text{D})$	0.68 0.90
$I=2,50+2,10*\log(\text{PSA}_{10\text{Hz}})$						
Atkinson et Kaka (2006)	Missouri et Californie (USA)	MMI	Ind. DYFI	II-IX PSA=0.0 7-160	$I=3.567+1.596\log(\text{PSA}/0.5\text{Hz})+0.255[\log(\text{PSA}/0.5\text{Hz})]^2$	0.86
Atkinson et Kaka (2006)	Missouri et Californie (USA)	MMI	Ind. DYFI	II-IX PSA=0.1 4-370	$I=2.946+1.324*\log(\text{PSA}/1\text{Hz})+0.234*[\log(\text{PSA}/1\text{Hz})]^2$	0.84
Atkinson et Kaka (2006)	Missouri et Californie (USA)	MMI	Ind. DYFI	II-IX 0.66 <PSA<51 0	$I=2.088+1.146\log(\text{PSA}/3.3\text{Hz})+0.328[\log(\text{PSA}/3.3\text{Hz})]^2$	0.87
Atkinson & Kaka (2007)	N USA	MMI	Ind. DYFI	II-IX	si $\log(\text{PSA}/0.5\text{Hz}) \leq 1.00$: $I=5.96+1.29*\log(\text{PSA}/0.5\text{Hz})-0.33*Mw-0.31*\log(\text{Dfoc})$ si $\log(\text{PSA}/0.5\text{Hz}) \geq 1.00$: $I=4.23+3.00*\log(\text{PSA}/0.5\text{Hz})-0.33*Mw-0.31*\log(\text{Dfoc})$	0.72
Atkinson & Kaka (2007)	N USA	MMI	Ind. DYFI	II-IX	si $\log(\text{PSA}/1\text{Hz}) \leq 1.50$: $I=5.15+1.18*\log(\text{PSA}/1\text{Hz})-0.39*Mw+0.04*\log(\text{Dfoc})$ si $\log(\text{PSA}/1\text{Hz}) \geq 1.50$: $I=2.49+2.95*\log(\text{PSA}/1\text{Hz})-0.39*Mw+0.04*\log(\text{Dfoc})$	0.73

Atkinson & Kaka (2007)	N USA	MMI	Ind. DYFI	II-IX	$\text{si } \log(\text{PSA}/3.3\text{Hz}) \leq 1.92$ $I=2.29+1.36*\log(\text{PSA}/3.3\text{Hz})-.20*Mw+0.64*\log(\text{Dfoc})$ $\text{si } \log(\text{PSA}/3.3\text{Hz}) \geq 1.92$ $I=-1.94+3.56*\log(\text{PSA}/3.3\text{Hz})-.20*Mw+0.64*\log(\text{Dfoc})$	0.79
Atkinson & Kaka (2007)	Central USA & Californie	MMI	Ind. DYFI	II-IX	$\text{si } \log(\text{PSA}/0.5\text{Hz}) \leq 1.00 \quad I=3.72+1.29*\log(\text{PSA}/0.5\text{Hz})$ $\text{si } \log(\text{PSA}/0.5\text{Hz}) \geq 1.00 \quad I=1.99+3.00*\log(\text{PSA}/0.5\text{Hz})$	0.86
Atkinson & Kaka (2007)	Central USA & Californie	MMI	Ind. DYFI	II-IX	$\text{si } \log(\text{PSA}/1\text{Hz}) \leq 1.50 \quad I=3.23+1.18*\log(\text{PSA}/1\text{Hz})$ $\text{si } \log(\text{PSA}/1\text{Hz}) \geq 1.50 \quad I=0.57+2.95*\log(\text{PSA}/1\text{Hz})$	0.84
Atkinson & Kaka (2007)	Central USA & Californie	MMI	Ind. DYFI	II-IX	$\text{si } \log(\text{PSA}/3.3\text{Hz}) \leq 1.92 \quad I=2.40+1.36\log(\text{PSA}/3.3\text{Hz})$ $\text{si } \log(\text{PSA}/3.3\text{Hz}) \geq 1.92 \quad I=-0.83+3.56\log(\text{PSA}/3.3\text{Hz})$	0.88
Worden et al (2011)	Californie	MMI	DYFI	MMI 2-8.6 PSA (0.1s)	$\text{Si } \log_{10} \text{PSA} \leq 2.21 \quad \text{MMI}=1.26+1.69 \log_{10}(\text{PSA})$ $\log_{10} \text{PSA} > 2.21 \quad \text{MMI}=4.14 \log_{10}(\text{PSA})-4.15$ $\text{MMI} \leq 4.56 \quad \log_{10}(\text{PSA})=(\text{MMI}-1.26)/1.69$ $\text{si } \text{MMI} > 4.56 \quad \log_{10}(\text{PSA})=(\text{MMI}+4.15)/4.14$	$\sigma(\text{MMI})$ 0.84 $\sigma(\text{PGA})$ 0.46
Worden et al (2011)	Californie	MMI	DYFI	MMI 2-8.6 PSA (0.2s)	$\text{si } \log_{10} \text{PSA} \leq 1.65 \quad \text{MMI}=2.50+1.51 \log_{10}(\text{PSA})$ $\text{si } \log_{10} \text{PSA} > 1.65 \quad \text{MMI}=2.90 \log_{10}(\text{PSA})+0.20$ $\text{si } \text{MMI} \leq 4.98 \quad \log_{10}(\text{PGA})=(\text{MMI}-2.50)/1.51$ $\text{MMI} > 4.98 \quad \log_{10}(\text{PGA})=(\text{MMI}-0.20)/2.90$	$\sigma(\text{MMI})$ 0. 80 $\sigma(\text{PGA})$ 0.51
Worden et al (2011)	Californie	MMI	DYFI	MMI 2-8.6 PSA (0.3s)	$\text{si } \log_{10} \text{PGV} \leq 0.99 \quad \text{MMI}=3.81+1.17 \log_{10}(\text{PSA})$ $\log_{10} \text{PGV} > 0.99 \quad \text{MMI}=3.01 \log_{10}(\text{PGV})+0.99$ $\text{MMI} \leq 4.96 \quad \log_{10}(\text{PGA})=(\text{MMI}-3.81)/1.17$ $\text{MMI} > 4.96 \quad \log_{10}(\text{PGA})=(\text{MMI}-1.99)/3.01$	$\sigma(\text{MMI})$ 0.95 $\sigma(\text{PGA})$ 0.69

Tableau 12: Relations PSA-intensités avec les références d'auteurs et de lieu, leur domaine de validité le type d'échelle et d'intensités utilisées

Auteurs	Loc.	Echelle	Type	Validité (cm/s ²)	Loi	σ
Levret & Mohammadioun (1984)	California ; Friuli(1976); Swabian Alpes(1978); El Asnam (Algérie, 1980)	MSK-64	I	V-IX	(PSV, 5%) log PSV=0,29I-0,91 (PSV, 20%) log PSV=0,30I-1,23	?
Boatwright et al (2001)	Californie	MMI	Imm-Itag <1	Imm V-IX PSV=10-150	PGV=3/4*PSV(rms)	
Karim & Yamakazi (2002)	Japon, USA & Taiwan	JMA	IJMA	5.4<Mw<8.3	I _{JMA} =2.61 – 0.03M +1.92 log10 SI	0.160 R ² =0.98 2

Tableau 13: Relations PSV-intensités avec les références d'auteurs et de lieu, leur domaine de validité le type d'échelle et d'intensités utilisées

1.3.3 RELATIONS AUTRES PARAMÈTRES INSTRUMENTAUX-INTENSITÉ

1.3.3.1 Cumulative Absolute Velocity (CAV)

Utilisée par les ingénieurs structures, c'est une mesure du potentiel destructeur d'un séisme, mis en place par l'EPRI (1988). Elle est directement reliée à l'amplitude du mouvement du sol et à sa durée. Elle peut se calculer de deux manières. Soit de manière classique (équation (4)) soit de manière standardisée (équation (5)). Cette dernière utilise une valeur seuil du PGA afin de stabiliser le CAV.

$$CAV = \int_0^T |a(t)| dt \quad \text{en cm / s ou g / s} \quad (4)$$

$$CAV_{STD} = \sum_{i=1}^N H(PGA_i - 0.025) \int_{i-1}^i |a(t)| dt \quad \text{avec } H(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Le plus souvent utilisé avec des données provenant de pays à forte sismicité et aux intensités élevées comme la Grèce (Tselentis et Danciu, 2008), les différents auteurs comme Campbell et Bozorgnia (2010) s'accordent pour dire que le CAV est un bon paramètre pour les intensités élevées.

Le Tableau 14 donne quelques relations établies entre le CAV et l'intensité.

Auteurs	Loc.	Echelle	Type	Validité (cm/s)	Loi	σ
Cabañas et al. (1997)	Italie	MSK-64	coll.?	V à VII-VIII 60 à 1500	$I = [\log(\text{CAV}, 20\text{cm/s}^2) + 3.54] / 1.24$	
Koliopoulos et al. (1998)	Grèce	MMI	coll.?	VI-VII CAV=50-200	$I = [\ln(\text{CAV}) - 1.97] / 0.51$	
Kostov (2005)	Europe	EMS/ MSK-64	coll.	II-X $2 < M_s < 7.8$ $0.00312 > \text{CAV} < 3.3548$	$\ln(\text{CAV}) = 0.57 I - 6.3$	
Tselentis et Danciu (2008)	Grèce	MMI	coll?	IV-VIII CAV=60 à 500	$I = 3.763 + 1.409 \log(\text{CAV}) - 0.997 \log(\text{Dépi}) - 0.105 S$ $I = -3.765 + 4.406 * \log(\text{CAV})$	0.68 1.85

Tableau 14: Relations CAV-intensités avec les références d'auteurs et de lieu, leur domaine de validité le type d'échelle et d'intensités utilisées

1.3.3.2 Intensité d'Arias (AI)

L'intensité d'Arias (AI), comme le CAV est une mesure du potentiel destructeur d'un séisme. Mise en place par Arias (1970), elle est directement reliée à l'amplitude et à la durée du mouvement sismique.

$$AI = \frac{\Pi}{2g} \int_0^{\infty} a^2(t) dt \text{ en cm/s} \quad (6)$$

Il existe encore peu de relations de prédiction d'intensité à partir des mesures de l'Intensité d'Arias. A l'instar du CAV, cette mesure est surtout utilisée dans les pays à forte sismicité, avec des niveaux d'intensité élevés. Bien que les avis semblent partagés quant à sa qualité de bon évaluateur de l'intensité, c'est un paramètre qui semble prometteur.

Le Tableau 15 donne quelques relations AI-intensité publiées dans la littérature

Auteurs	Loc.	Echelle	Type	Validité (cm/s)	Loi	σ
Margottini et al. (1992)	Grèce	MM	coll.?	IV-VIII AI=0.6-60	$I=5.919+0.844\log(Ia)-0.997\log(\text{Dépi})-0.105S$ $I=4.395+2.040*\log(Ia)$	0.65 1.28
Cabañas et al. (1997)	Grèce	MMI	coll.?	IV à VI-VII AI=0.8-20	$I=[\ln(Ia)+5.2]/1.27$	
Koliopoulos et al. (1998)	Italie	MSK-64	coll?	V à VII-VIII AI=3-150	$I=[\log(Ia)+6.42]/1.5$	
Tselentis et Danciu (2008)	Italie	MSK-64	coll?	V à VII-VIII AI=2-70	$I=[\log(Ia)+2.575]/0.591$	

Tableau 15: Relations AI intensités avec les références d'auteurs et de lieu, leur domaine de validité le type d'échelle et d'intensités utilisées

1.3.4 VARIABILITÉ DANS LES MESURES D'INTENSITÉ ET DE PARAMÈTRES INSTRUMENTAUX

De nombreuses relations paramètres instrumentaux-intensité ont été établies dans la littérature et chaque auteur cherche à comparer ses relations et ses données à celles des autres. Cependant, comme souligné dans le rapport de Cua et al. (2010) dans le cas des GMICE (Ground Motion to Intensity Prediction Equation) et IGMCE comparées par Allen et Wald (2009) et établies par Tselentis et Danciu (2008), Atkinson et Kaka (2007), et Wald et al (1999c), les données sont très variables d'une étude à l'autre. Chaque étude utilise un set de données macrosismiques différent souvent relatif à des régions spécifiques. Parfois, certaines études mélangent des jeux de données de différentes régions afin d'élargir le nombre de données (Faenza et Michelini, 2010 ; Atkinson et Kaka, 2007).

Un certain nombre de facteurs est responsable de la variabilité des paramètres et des relations, et en premier lieu, les différences régionales (géologie, nature des sols). Néanmoins, la nature et la localisation des sources sismiques, ou bien la densité, la répartition de population et en conséquence celle des témoignages entrent aussi en jeu.

La variabilité des données macrosismiques dépend dans un second temps des types d'intensités (collectives ou individuelles) et de l'échelle macrosismique utilisée pour l'étude. Ainsi, en Europe, notamment en Italie, Tselentis et Danciu (2008), et Koliopoulos et al. (1998) utilisent les intensités collectives respectivement sur les échelles MSK-64 et MMI tandis que Faenza et Michelini (2010) utilisent des intensités collectives extraites de la base de données DBMI04 de l'INGV, et exprimées sur l'échelle MCS. Kostov (2005) utilise des données macrosismiques collectives issues de divers pays d'Europe et estimées sur les échelles EMS-98 et MSK-64.

Souriau (2006), quant à elle, utilise des données collectives françaises issues des bases de données SisFrance en MSK-64 et BCSF exprimées sur l'échelle EMS-98.

Aux Etats-Unis, Worden et al (2011) ainsi que Atkinson et Kaka (2007), emploient les intensités individuelles MMI collectées par internet via le questionnaire Did You Feel It ?. Kaka et Atkinson (2004) ainsi que Wald et al (1999c) adoptent des données collectives sur l'échelle MMI et Boatwright et al (2001) choisissent les intensités taggées sur l'échelle MMI. Enfin, au Japon, Karim et Yamakazi, (2002) utilisent l'échelle instrumentale JMA.

Une autre source de variabilité réside dans le traitement des données macrosismiques et la technique de comparaison avec les données instrumentales. En effet, Tselentis et Danciu (2008), Wald et al (1999c), Faenza et Michelini (2010) et Atkinson et Kaka (2007), travaillent avec des données macrosismiques qui se trouvent entre 2 et 3 km des données instrumentales. Plus exactement, Faenza et Michelini associent chaque intensité macrosismique aux paramètres instrumentaux issus d'une station instrumentale se trouvant dans un rayon de 3km. Wald et al (1999c) couplent chaque station instrumentale avec l'intensité macrosismique la plus proche dans un rayon de 2 ou 3km. Atkinson et Kaka (2004) moyennent les intensités par zip code et les couplent à la station instrumentale la plus proche toujours dans un rayon de 3km. Enfin, une autre technique est d'associer les intensités aux stations instrumentales par lecture des contours d'isoseïstes comme Sørensen et al (2007) et Souriau (2006).

Enfin, en plus de la variabilité due aux différences régionales, aux données macrosismiques et à leur technique de comparaison avec les données instrumentales, le type d'instrument utilisé et le traitement des données instrumentales peut varier d'une étude à l'autre. En effet, certaines relations sont établies à partir de données sismiques des années 1970 ou 1980 (Wald et al., 1999b), (Atkinson and Sonley, 2000), pour lesquels les instruments avaient des bandes passantes plus réduites qu'aujourd'hui (généralement 25Hz au maximum tandis que les instruments actuels peuvent avoir une bande passante allant jusqu'à 50 ou 100Hz). De plus, selon les études, que les séismes soient récents ou plus anciens, les instruments utilisés pour enregistrer les mouvements du sol ne sont pas toujours les mêmes. Ainsi, pour son étude Souriau (2006) utilise les données du Réseau Accélérométrique Permanent enregistrées par des accéléromètres. Atkinson, pour plusieurs études (Atkinson and Kaka, 2006 ; Atkinson and Wald, 2007 ; Kaka and Atkinson, 2004) utilise des signaux enregistrés par des sismomètres large-bande, et/ou des vélocimètres. Boatwright et al. (2001), enfin, utilisent des signaux accélérométriques. Des instruments différents peuvent avoir des bandes passantes différentes. De plus, les traitements pour obtenir des accélérogrammes à partir de signaux large bande ou vélocimétriques peuvent entraîner des biais.

Enfin, toutes les études n'utilisent pas le même paramètre instrumental. La plupart des études comparent les intensités aux composantes horizontales des paramètres du mouvement du sol. Néanmoins, toutes ne considèrent pas la même composante du mouvement du sol, en particulier concernant les relations pics d'amplitude du mouvement du sol-intensité. Gutenberg et Richter (1956), Hershberger (1956), Atkinson et kaka (2006 ; 2007) et Davenport (2003) utilisent la résultante des deux composantes horizontales. Trifunac et Brady (1975), Ambraseys (1975),

Murphy et O'Brien (1977), Margottini et al (1992), et Souriau (2006) quant à eux emploient la composante horizontale qui porte le PGM maximum. Enfin, d'autres études comme celle de Koliopoulos et al (1998) utilisent indifféremment l'une ou l'autre des composantes horizontales.

1.3.5 CONCLUSION SUR LES RELATIONS PARAMÈTRES INSTRUMENTAUX – INTENSITÉ

En conclusion, il n'existe pas de paramètre idéal pour estimer l'intensité à partir des mesures instrumentales du mouvement du sol. L'utilisation d'un paramètre ou d'un autre dépendra des objectifs que l'utilisateur cherche à atteindre : relation locale ou globale, domaine de validité des intensités, domaine de validité des paramètres instrumentaux, délai de mise à disposition des intensités calculées (cas notamment des shake map en temps réel). Les comparaisons établies pour nos données entre PGA ou PGV et SQI, ainsi que la comparaison avec les relations existant dans la littérature sont présentées dans la partie discussion de l'article (section 3.2.2). Les comparaisons entre les corrélations obtenues pour le PGA et le PGV avec les intensités collectives SisFrance et BCSF ainsi qu'avec les SQI sont présentées dans la section 3.3.2

2 LES DONNÉES MACROSISMIQUES ANALYSÉES DANS LE NORD EST DE LA FRANCE

2.1 TRAITEMENT DE TROIS SEISMES DU NORD EST DE LA FRANCE

2.1.1 DESCRIPTION DES DONNÉES MACROSISMIQUES

2.1.1.1 Présentation des séismes

Le Nord-est de la France a été choisi comme cadre de mes travaux car cette région permettait d'avoir à la fois un grand nombre de témoignages individuels, et des données accélérométriques. En effet, le nombre de témoignages individuels est plus important que dans les autres régions de France, et la région est dotée d'une dizaine d'accéléromètres.

Notre étude s'est portée sur trois séismes qui ont eu lieu entre 2003 et 2004. Deux d'entre eux se sont produits dans le Nord est de la France et le troisième dans l'ouest de l'Allemagne proche de la frontière française (moins de 30km). Ces trois séismes sont de magnitude de moment M_w proches, et ont eu lieu à des profondeurs du même ordre de grandeur. Cependant les mécanismes focaux des trois séismes diffèrent les uns des autres ainsi que le nombre de témoignages individuels et collectifs, collectés par le BCSF (Tableau 16).

Il est à noter que pour le séisme de Roulans, proche de Besançon, la profondeur retenue est celle déterminée par l'ETH à Zurich (Baer et al., 2005), également obtenue à partir d'observations télésismiques par le LDG ou déduite de la profondeur de l'unique réplique localisée avec des stations temporaires et proches (Cara et al., 2007).

Ces trois séismes ont été enregistrés par neuf des stations du Réseau d'Accélérométrie Permanent dans l'est de la France. Les données instrumentales seront traitées plus loin dans la section 3.1. Ces séismes ont également fait l'objet d'enquêtes collectives et individuelles du BCSF. La Figure 4 présente les témoignages macrosismiques individuels pour les 3 séismes (points bleus), les stations accélérométriques qui les ont enregistrés (triangles rouges) et les épicentres des séismes (étoiles). Les cartes des Figure 5, Figure 6, et Figure 7 présentent la répartition spatiale des SQI en fonction de leur valeur ainsi que les histogrammes de distribution du nombre de témoignages en fonction de la valeur de la SQI correspondante. Il est à noter que les intensités 3 et 4 sont les intensités les plus souvent représentées pour chacun des trois séismes.

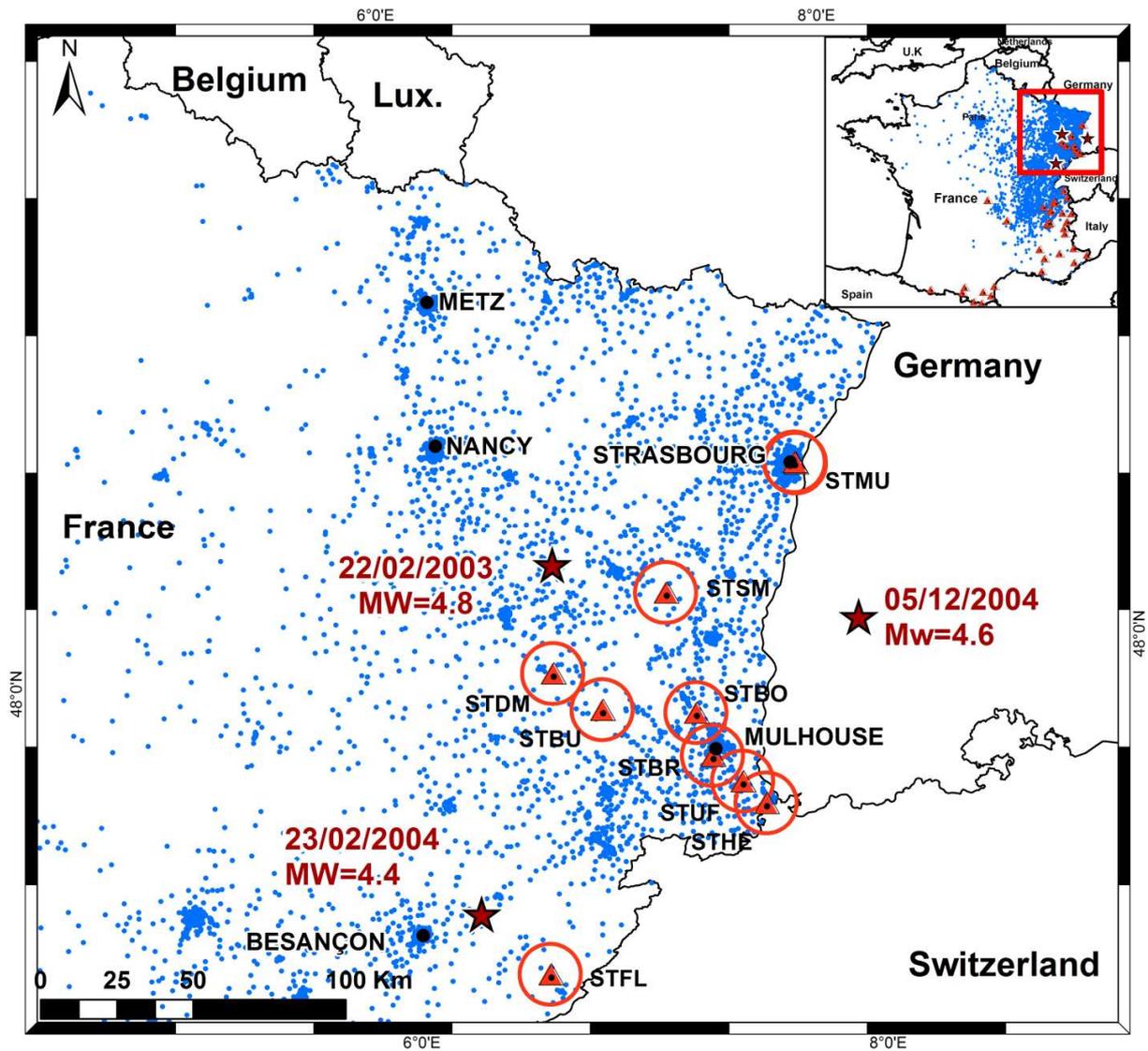


Figure 4: Compilation des données disponibles pour l'étude. Les étoiles rouges représentent les épicentres des séismes. Les points bleus figurent les témoignages individuels collectés pour les trois séismes. Les triangles rouges représentent les stations accélérométriques du RAP qui ont enregistré les séismes et les cercles rouges sont des zones de 10km de rayon autour des stations.

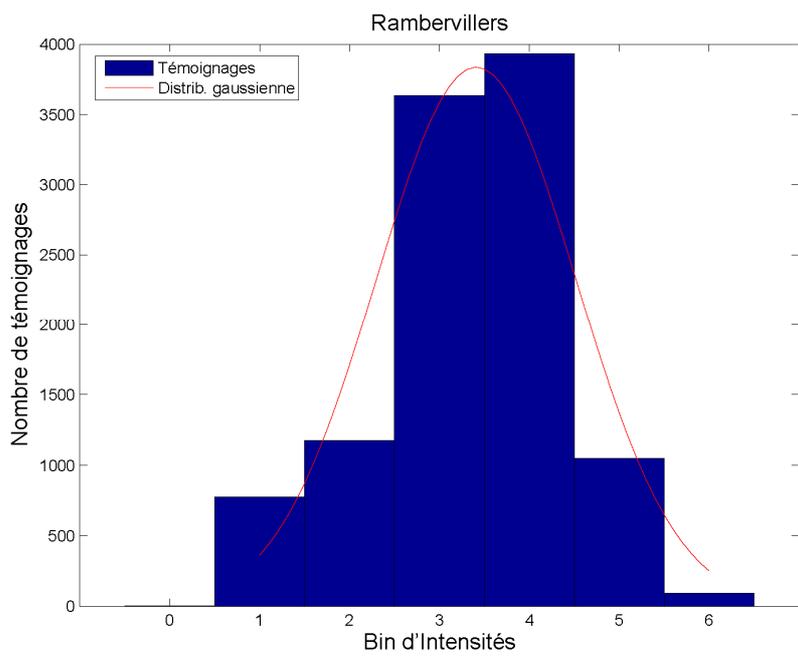
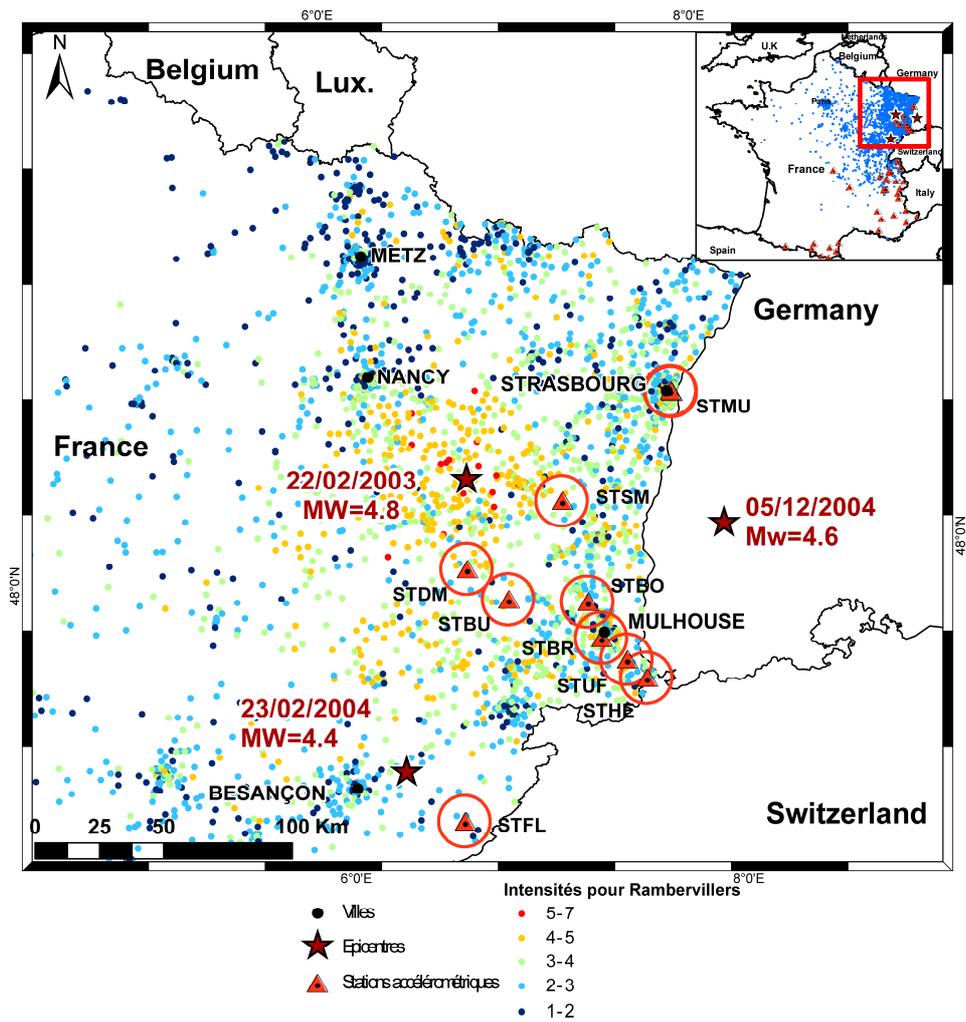


Figure 5: Répartition spatiale des SQI selon leurs valeurs pour le séisme de Rambervillers et histogramme du nombre de témoignage en fonction des valeurs des SQI. Les étoiles rouges représentent les épicentres des séismes. Les points bleus figurent les témoignages individuels collectés pour les trois séismes. Les triangles rouges représentent les stations accélérométriques du RAP qui ont enregistré les séismes et les cercles rouges sont des zones de 10km de rayon autour des stations.

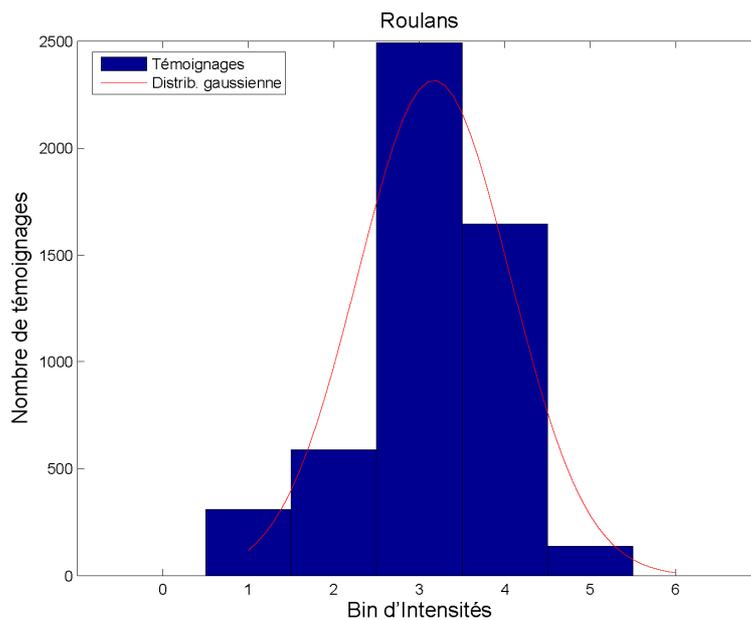
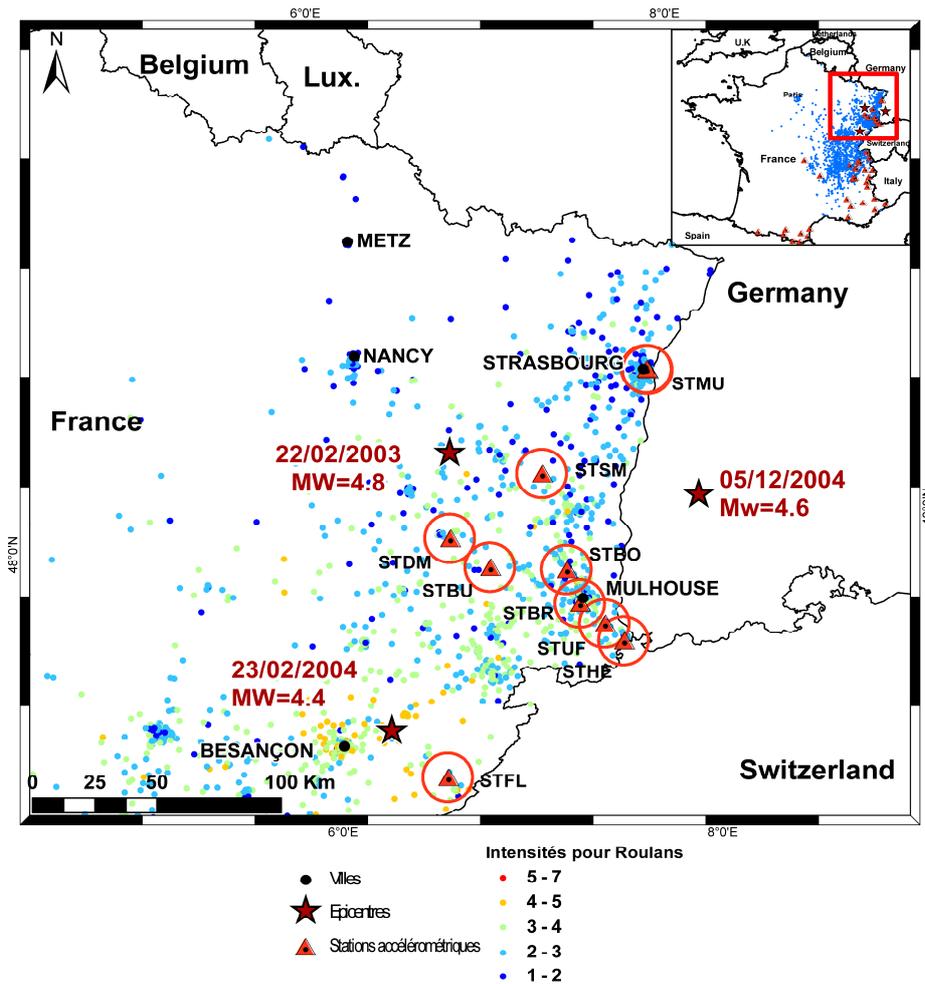


Figure 6: Répartition spatiale des SQI selon leur valeur pour le séisme de Roulans et histogramme du nombre de témoignage en fonction des valeurs des SQ. Les étoiles rouges représentent les épicentres des séismes. Les points bleus figurent les témoignages individuels collectés pour les trois séismes. Les triangles rouges représentent les stations accélérométriques du RAP qui ont enregistré les séismes et les cercles rouges sont des zones de 10km de rayon autour des stations.

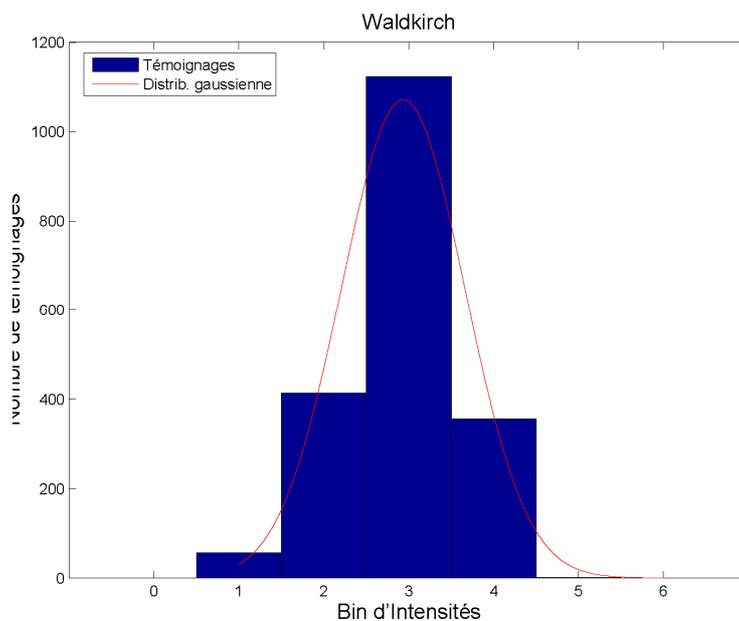
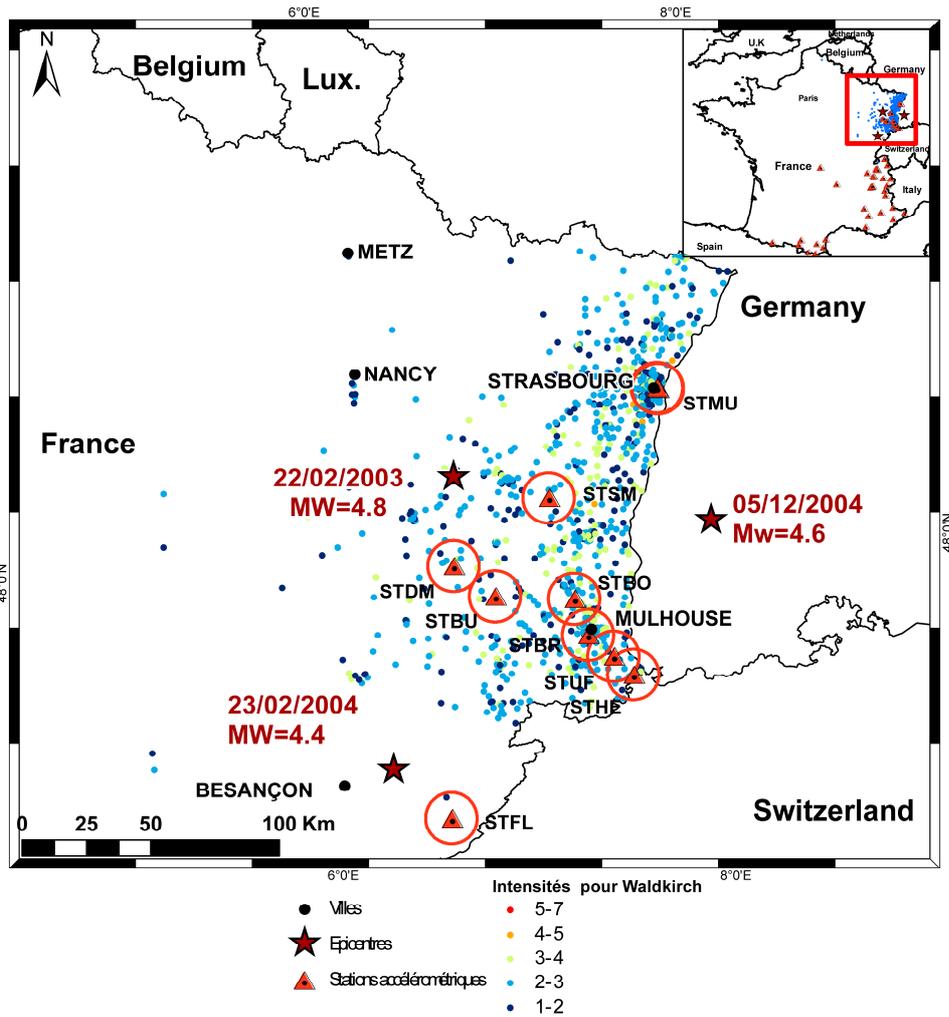


Figure 7: Répartition spatiale des SQI selon leur valeur pour le séisme de Waldkirch et histogramme du nombre de témoignage en fonction des valeurs des SQI. Les étoiles rouges représentent les epicentres des séismes. Les points bleus figurent les témoignages individuels collectés pour les trois séismes. Les triangles rouges représentent les stations accélérométriques du RAP qui ont enregistré les séismes et les cercles rouges sont des zones de 10km de rayon autour des stations.

Le Tableau 16 récapitule les caractéristiques des trois séismes.

Séisme	Rambervillers	Roulans	Waldkirch
Date	22/02/2003	23/02/2004	05/12/2004
Heure	20h41 TU	17h31 TU	01h52 TU
Mw	4.8	4.4	4.6
Profondeur (km)	12	15	9
Type de mouvement	Faille normale	Faille inverse	Faille décrochante
Nombre de témoignages individuels	10662	5175	1945
Nombre de témoignages collectifs	6240	4504	1517
Nombre de témoignage individuel par station (surface circulaire de 10km de rayon autour des stations)			
STHE	103	22	-
STMU	1061	198	488
STSM	56	7	19
STBU	60	16	18
STBO	95	95	63
STDm	165	29	21
STUF	84	58	50
STBR	432	172	-
STFL	15	15	1

Tableau 16: Tableau récapitulatif des caractéristiques des séismes étudiés. Les différentes caractéristiques de magnitude, profondeur et type de faille sont issues de : Delouis et al., 2009 ; Hanned, 2007 ; Cara et al., 2007 ; Baer et al., 2005 ; Brenn et al., 2006

Les données ont été collectées à l'aide des questionnaires collectifs de génération 6 et 8. Ces deux générations de questionnaires sont très peu divergentes l'une de l'autre. La principale différence est l'ajout d'un niveau de réponse dans le questionnaire de génération 8. Les niveaux (fort/faible) de la génération 6 ont été enrichis d'un niveau moyen. Les questionnaires de génération 6 ont été utilisés dans le cas de Rambervillers, et ceux de génération 8 pour les séismes de Roulans et de Waldkirch.

Cependant, les données que j'ai majoritairement utilisées dans cette étude sont les données issues des questionnaires individuels.

2.1.1.2 Présentation des données individuelles

Deux types de questionnaires ont été utilisés pour collecter les données individuelles. Le questionnaire individuel de génération 7, valable jusqu'en juillet 2004 a été utilisé pour le séisme de Rambervillers et Roulans. A partir de juillet 2004, le questionnaire de génération 9 est entré en vigueur et a été utilisé lors du séisme de Waldkirch en décembre 2004. Ces deux questionnaires sont similaires et ne diffèrent que par la possibilité de répondre moyen en plus de

fort ou faible, et par la recombinaison de certaines questions du formulaire de génération 7 en une question.

Les trois séismes étudiés sont de magnitude modérée et ont engendré peu de dégâts aux constructions. Statistiquement, le nombre de dommages aux bâtiments n'est pas significatif pour le but de notre étude, je n'ai donc pas pris en compte les dommages aux constructions.

Les questionnaires de génération 7 et 9 se composent d'une cinquantaine de questions sur les effets sur les témoins, les objets, les sons entendus et les dommages aux bâtiments. Le Tableau 17 présente une synthèse des questions étudiées communes aux questionnaires de génération 7 et 9 : les codes respectifs, les libellés, les réponses possibles des questions ainsi que les codes attribués pour chaque possibilité de réponse. Ce dernier paramètre sera expliqué dans la section 2.1.2. Les questionnaires de générations 7 et 9 complets sont présentés en Annexe 8 et Annexe 9.

La base de données du BCSF recense plus de 21000 témoignages individuels pour les séismes étudiés ici. J'ai effectué des requêtes sous le gestionnaire de base de données Access afin de ne conserver que les données :

- les plus fiables (qualités 2 et 3)
- Géolocalisées si possible à l'adresse, sinon à la commune
- Disposant d'une SQI différente de 0 (c'est-à-dire un témoignage auquel a été attribué une SQI. Tous les témoignages sont consignés dans la base de données du BCSF, mais comme cela a été expliqué précédemment, certains ne peuvent pas se voir attribuer de valeur de SQI. Dans ces cas la valeur attribuée est 0).
- En dessous du 5^{ème} étage (Rez-de-chaussée, 1^{er}-2^{ème} étage et 3^{ème}-4^{ème} étage)

Au total, 17782 témoignages remplissent les critères imposés ci-dessus. Ces données sont situées à des distances épicentrales allant jusqu'à 600km. Cependant, au-delà de 360 km les témoignages deviennent sporadiques (pour Rambervillers, sur 10686 témoignages 10612 se trouvent à moins de 360km de l'épicentre).

Ces trois séismes sont modérés et ont eu lieu à des moments différents de la journée ce qui peut entrer en jeu dans l'écart du nombre de témoignages. Le séisme de Rambervillers a eu lieu un samedi soir du mois de février vers 21h. C'est le séisme le mieux renseigné et il a eu lieu au moment où les gens étaient encore éveillés mais au calme (à table, devant la télé ?...). Le séisme de Roulans, lui a également eu lieu en février mais vers 18h en semaine, au moment de la journée où la population est active, ce qui peut expliquer, conjointement avec une magnitude plus faible, un nombre de témoignages moins important que pour Rambervillers. Le séisme de Waldkirch, quant à lui, s'est produit dans la nuit vers 2h du matin. Il a eu lieu en Allemagne proche de la frontière française. Les données individuelles collectées pour le séisme de Waldkirch ne se situent que sur le territoire français. Les données allemandes sont collectées suivant une procédure différente des données françaises, avec des formulaires d'enquête basés sur l'ancienne échelle macrosismiques MCS. La base de données du BCSF ne comprenant pas les témoignages allemands, le témoignage le plus proche de l'épicentre se trouve à une distance épicentrale de l'ordre de 30km. La combinaison de la localisation de l'épicentre, et de l'heure d'occurrence du séisme peuvent expliquer que, bien que de magnitude plus forte que Roulans, le séisme de Waldkirch a donné lieu à moins de témoignages en France.

Concernant la géolocalisation, 31% des témoins de Rambervillers, 43% de ceux de Roulans et 38% de ceux de Waldkirch sont géolocalisés à la rue ou au numéro (adresse exacte). Plus précisément, pour ces 3 séismes, 4.8%, 12.8% et 11.3% ont indiqué le numéro de leur rue tandis que 26.3%, 30.6% et 27% respectivement ont seulement indiqué le nom de leur rue. Les données personnelles parmi lesquelles l'adresse des témoins, comme cela a été expliqué sont protégées par les accords entre la CNIL et le BCSF. Après six mois, l'information doit être supprimée. Cependant, un code est appliqué à chaque témoignage en fonction de leur géolocalisation afin de conserver l'information une fois l'adresse « perdue » (S pour la géolocalisation à la rue, N pour la géolocalisation au numéro, et T pour la géolocalisation à la ville),

Il est à noter que 98% des témoins qui ont répondu aux questionnaires se trouvaient à l'intérieur des bâtiments.

code G7	code G9	Questions des deux questionnaires	Réponses possibles	encodage
IP1		Le séisme a-t-il été ressenti ?	oui/non	1/-1
IP2	IP1	L'avez-vous personnellement ressenti ?	oui/non	1/-1
IP3		A l'intérieur d'une maison ?	oui/non	1/-1
IP4		A l'intérieur d'un immeuble ?	oui/non	1/-1
	IP7	Dans une maison ou un immeuble ?	maison/immeuble	0,33/0,99
IP5	IP8	Nombre d'étages de l'immeuble ?	nombre d'étages	nombre d'étages
IP6	IP5	A quel étage vous situiez-vous ?	RC/1_2/3_4/5+	0.33/0.66/0.99
IP7		Vous situiez-vous à l'extérieur (en plein air) ?	oui/non	1/-1
	IP4	A l'intérieur ou à l'extérieur ?	à l'intérieur/à l'extérieur	0,33/0,99
IP8	IP6	Activité ?	en sommeil/au repos/en activité assis/en activité debout	0.33/0.49/0.66 /0.99
IP9	IP9	La secousse a été ressentie comme un balancement ?	faible/moyen/fort	0,33/0,66/0,99
IP10	IP10	La secousse a été ressentie comme une vibration ?	faible/moyen/fort	0,33/0,66/0,99
IP11		Le mouvement était ?	Horizontal/vertical	0,33/0,99
IP12	IP11	La secousse vous a réveillé ?	oui/non	1/-1
IP13	IP14	La secousse vous a ?	inquiété/paniqué/terrifié	0.33/0.66/0.99
IP14	IP12	Etes-vous sorti du bâtiment en courant ?	oui/non	1/-1
IP15	IP13	Avez-vous perdu l'équilibre ?	oui/non	1/-1
IO1		Oscillation des objets suspendus (lustres, cadres) ?	faible/moyen/fort	0.33/0.66/0.99
IO2	IO2	Vibration des petits objets (porcelaine, verres, assiettes, bibelots) ?	faible/moyen/fort	0.33/0.66/0.99
IO3	IO3	Tremblement du mobilier léger (chaise, tables de chevet, etc. ?)	faible/moyen/fort	0.33/0.66/0.99
IO4	IO4	Vibration des portes fenêtres, vitres vitrines ?	faible/moyen/fort	0.33/0.66/0.99
IO5	IO5	Craquement des poutres, planchers et meubles ?	faible/moyen/fort	0.33/0.66/0.99
IO6	IO6	Oscillation des liquides dans les récipients ?	oui/non	1/-1
IO7	IO7	Débordement des liquides des récipients pleins ?	oui/non	1/-1
IO8	IO8	Ouverture et fermeture des portes ou fenêtres ?	oui/non	1/-1
IO9	IO9	Bris d'objets (tableaux, verrerie, porcelaine, etc.), vitres ?	oui/non	1/-1
IO10	IO10	Déplacement ou chute de petits objets instables ou mal fixés ?	chute ou déplacement	0.99 /0.33
IO11	IO11	Déplacement ou chute de mobilier léger (lit, chaise, table de chevet) ?	chute ou déplacement	0.99 /0.33
IO12	IO12	Déplacement ou chute de mobilier lourd (armoire, buffet, etc.) ?	chute ou déplacement	0.99 /0.33
IE1		Le grondement ressemblait à un grondement souterrain ou aérien ?	faible/fort	0.33/0.99
IE2		Le grondement ressemblait à un coup de tonnerre, une explosion ?	faible/fort	0.33/0.99
	E2	Le grondement ressemblait à un coup de tonnerre ?	oui/non	1/-1
	E3	Le grondement ressemblait à une explosion ?	oui/non	1/-1

Tableau 17: Synthèse des questions communes des questionnaires de générations 7 et 9

2.1.2 ESTIMATION DES PARAMÈTRES MACROSISMIQUES

Dans la quasi-totalité des études macrosismiques réalisées, le paramètre étudié est l'intensité. Une des principales innovations de mon travail de thèse, en plus de l'étude des SQI, est l'étude détaillée des questionnaires macrosismiques pour en déduire de nouveaux paramètres macrosismiques.

En mettant de côté les dommages aux bâtiments, il reste une trentaine de questions à analyser. L'idée est de réduire ce nombre de questions en un nombre réduit de champs de questions significatifs et donc plus simple à étudier. Initialement, j'ai fait un premier regroupement thématique a priori des questions qui semblaient représentatives de phénomènes physiques similaires (par exemple la vibration des objets, les sons, ...) en cinq champs de questions :

- Champ de questions 1 : Le ressenti personnel émotionnel des gens
 - IP13 : Les personnes ayant ressenti le séisme, ont été inquiétées, effrayées, paniquées ?
- Champ de questions 2 : L'oscillation et le débordement des liquides
 - IO06 : Avez-vous observé une oscillation des liquides dans les récipients ?
 - IO07 : Avez-vous observé un débordement des liquides des récipients pleins ?
- Champ de questions 3 : Les phénomènes physiques dus à des mouvements vibratoires
 - IO01 : Avez-vous observé une oscillation faible ou forte des objets suspendus (lustres, cadres) ?
 - IO02 : Avez-vous observé une vibration faible ou forte des petits objets (porcelaine, verres, assiettes, bibelots) ?
 - IO03 : Avez-vous observé un tremblement faible ou fort du mobilier léger (chaises, tables de chevet) ?
 - IO04 : Avez-vous observé une vibration faible ou forte des portes, fenêtres, vitres et vitrines ?
 - IO05 : Avez-vous observé un craquement faible ou fort des poutres, planchers et meubles ?
- Champ de questions 4 : Les phénomènes physiques dus à des mouvements de grande ampleur
 - IO08 : Avez-vous observé une ouverture ou une fermeture des portes et fenêtres ?
 - IO09 : Avez-vous observé des bris d'objets (tableaux, verrerie, porcelaine, etc.), vitres ?
 - IO10 : Avez-vous observé des déplacements ou chutes de petits objets instables ou mal fixés ?
 - IO11 : Avez-vous observé des déplacements ou chutes de mobilier léger (lit, chaise, tables de chevet) ?
 - IO12 : Avez-vous observé des déplacements ou chutes de mobilier lourd (armoire, buffet, etc.) ?
- Champ de questions 5 : Les effets sonores provoqués par le séisme

- IE01 : Le grondement ressemblait à un grondement aérien ou souterrain fort ou faible ?
- IE02 : Le grondement ressemblait à un coup de tonnerre ou à une explosion forte ou faible ?

Afin de valider et affiner les groupes constitués a priori, j'ai décidé de faire une étude quantitative des questions au travers d'un calcul de corrélations internes entre les réponses aux différentes questions.

2.1.2.1 Encodage des réponses aux questions

Dans le but de calculer ces corrélations, il a été nécessaire d'encoder les réponses aux questions. J'ai choisi d'encoder les différentes réponses possibles entre 1 et -1. Les réponses binaires « oui/non » ont été codées 1 pour oui et -1 pour non. Pour les autres réponses binaires (ou ternaires) « fort/ (moyen)/ faible », j'ai estimé que la réponse était moins catégorique que « oui/non », et j'ai décidé d'encoder respectivement ces questions « 0.99/(0.66)/0.33 ». Lorsqu'il y a plus de trois réponses possibles, la réponse désignant le phénomène le plus fort est encodée « 0.99 », et celle désignant le phénomène le plus faible est codée « 0.33 ». Les autres réponses sont encodées par des valeurs régulièrement espacées entre ces deux valeurs. Les non-réponses sont encodées par « 0 » et les SQI sont encodées par leur propre valeur. Ce choix de codage est bien entendu arbitraire et aurait pu être tout autre. Cependant il est important de noter qu'en changeant les codages de façon homothétique, on ne change pas la valeur de la corrélation. Le Tableau 17 présente les encodages relatifs aux réponses de chaque question.

2.1.2.2 Calcul des matrices de corrélation

La matrice de corrélation calculée entre les réponses aux questions des formulaires permet de savoir quelles réponses aux questions sont corrélées entre elles et avec la SQI. Il devient ainsi possible de regrouper les questions les mieux corrélées entre elles et avec les SQI en champs de questions.

➤ **Définition du coefficient de corrélation :**

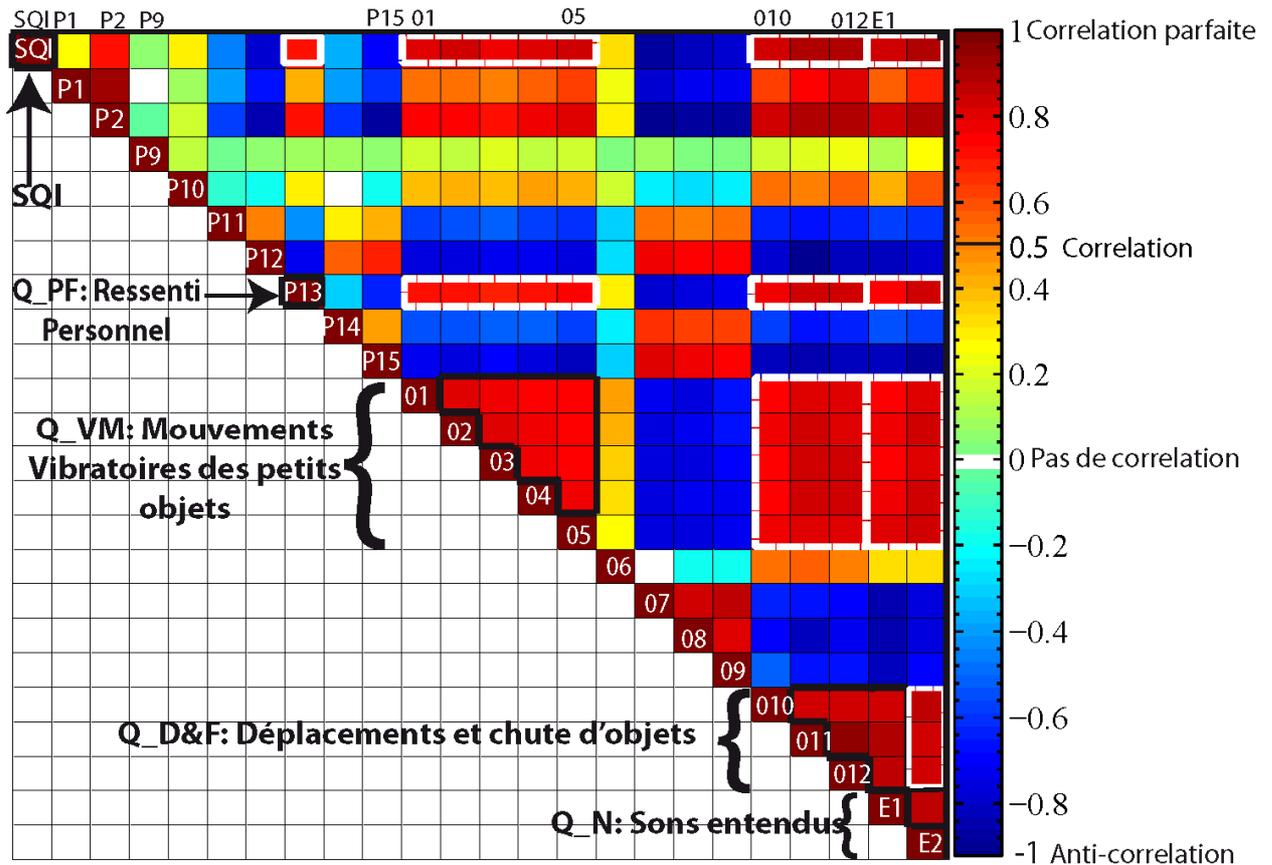
Un coefficient de corrélation R de deux variables aléatoires X et Y, est un nombre compris entre -1 et 1 et qui quantifie le lien existant entre ces deux variables. Il est défini par la formule suivante :

$$R_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (7)$$

Dans le cas de notre étude X et Y sont les réponses à deux questions du formulaire, et N est le nombre de témoins relatif à la paire (X, Y). La somme est restreinte à Xi et Yi simultanément

non nuls. Ainsi, la somme est restreinte au nombre de témoins "ncom" (Figure 8 partie b) ayant répondu simultanément aux deux questions.

Pour chaque séisme on obtient une matrice de corrélation. Certaines questions ne présentent pas d'intérêt pour le regroupement des questions en champs de questions et ne sont par conséquent pas utilisées dans le calcul de la matrice de corrélation. Ainsi, 24 des 30 questions ont été conservées pour le calcul des matrices de corrélation. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente cette matrice de corrélation pour le séisme de Rambervillers. Les figures de corrélation pour Roulans et Waldkirch se trouvent en Annexe 10.



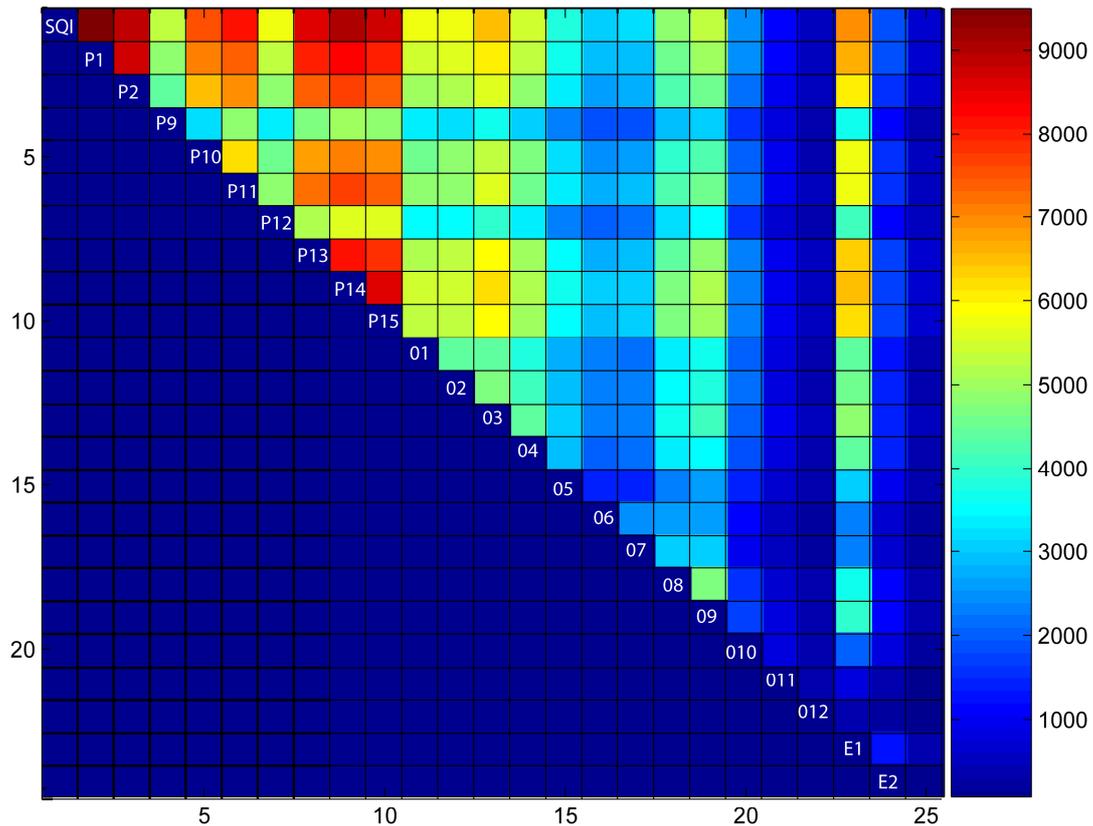


Figure 8 : a) Matrice de corrélation réduite pour le séisme de Rambervillers. Chaque carré correspond à la valeur de la corrélation entre les réponses à deux questions. Les traits pleins noirs délimitent les champs de questions retenus car présentant des corrélations fortes entre les questions,, les traits pointillés blancs délimitent les corrélations entre les différents champs de questions . b) Matrice du nombre de témoignages à partir desquels sont calculées les corrélations entre les réponses aux questions. Chaque carré correspond au nombre de témoignage communs à deux questions.

2.1.2.3 Nouveaux paramètres macrosismiques

Sur la Figure 8, en abscisses et en ordonnées sont représentées les questions (sur la diagonale sont repris les noms des questions). Chaque carré représente la valeur du coefficient de corrélation entre les réponses à deux questions. La couleur représente la valeur de la corrélation. Lorsque la corrélation vaut 1 (rouge), les réponses aux questions sont parfaitement corrélées ; lorsqu'elle vaut -1 (bleue), les réponses aux questions sont parfaitement anti-corrélées ; quand la corrélation vaut 0 (blanc), les réponses aux questions ne sont pas corrélées. D'après Taylor (1997), il faut un nombre de degrés de liberté certain pour pouvoir qualifier les corrélations de significatives. Le nombre de degrés de liberté est défini comme la différence entre le nombre de données et le nombre de paramètres. Comme cela a été dit précédemment, cette étude se caractérise par plusieurs milliers de données. Ainsi le nombre de degrés de liberté est très élevé. Taylor (1997) (cf. Annexe 11) considère qu'une valeur de corrélation de $R_{XY}=0.5$ est significative à partir de 16 degrés de liberté. Dans le cas présent, le nombre de degrés de liberté s'élève à plusieurs milliers, il est donc possible de dire qu'à partir de $R = 0.5$, les réponses de deux questions sont significativement corrélées, et hautement corrélées à partir de $R=0.6$.

Dans cette étude, je ne m'intéresse pas aux anticorrélations. En effet, les trois séismes sont des événements modérés pour lesquels les questions P14 (ou P12 pour le questionnaire de génération 9), P15, O08 et O09 (sorti du bâtiment en courant, perte d'équilibre, ouverture et fermeture des portes et fenêtre, bris d'objet et de fenêtres) ne sont pas adaptées (voir Tableau 17). De plus, deux des trois séismes ont eu lieu en journée, rendant la question P12 (témoins réveillés par la secousse) inappropriée. En outre, certaines questions sont relatives à des observables comme la présence de liquides (O06 et O07), il n'est cependant pas évident que les témoins aient été en présence de ces observables. Enfin, une majorité de réponses « non » (encodées -1) alors que la secousse est forte, conduira à un coefficient de corrélation négatif.

Concernant le nombre de témoignages communs à partir desquels sont calculées les corrélations, plusieurs choses sont à noter. Tout d'abord toutes les questions n'ont pas le même taux de réponses. En effet, les questions P1 (avez-vous ressenti le séisme ?) et P13 (le séisme vous a paniqué, inquiété ou effrayé ?), par exemple, ont un taux de réponse très important (respectivement 10571 et 8617), tandis que les questions O12 et E2 sont moins renseignées (respectivement 1566 et 5583 témoignages). De plus, les questions O10, O11, O12, relatives aux chutes et déplacement d'objets (notamment mobilier), bien que correctement renseignées (respectivement 7458, 3297 et 1566 témoignages), ne le sont pas toutes pour chaque questionnaires, et le sont moins que les questions P1 ou P13. Ces raisons expliquent que le nombre de témoignages « ncom » entre les questions O10, O11 et O12 et les autres questions ne dépassent pas 3000 témoignages. Cependant, cela n'affecte pas la validité des corrélations puisque plusieurs milliers de questions sont utilisées pour les calculer (voir début de ce paragraphe).

J'ai calculé les matrices de corrélation en discriminant les témoins en fonction de leur localisation dans les bâtiments (rez-de-chaussée, 1^{er}-2^{ème} étage, 3^{ème}-4^{ème} étage). Les coefficients de corrélation sont similaires quelque soit l'étage où se trouvent les témoins, prouvant ainsi que la localisation des témoins dans les bâtiments n'influençait pas le calcul des corrélations. De plus, en accord avec l'échelle EMS-98 (Grünthal, 1998), aucun témoin situé au dessus du 4^{ème} étage n'a été pris en compte dans cette étude.

La Figure 8, permet de mettre en évidence quatre groupes de questions qui possèdent une forte corrélation interne (tirets noirs sur la Figure 8), et dont les réponses sont fortement corrélées avec la SQI (tirets blancs sur la première ligne de la matrice de corrélation). Ces quatre groupes sont également fortement corrélés entre eux (groupes entourés par les tirets blancs), cependant chaque groupe possède un sens physique différent. Comme cela avait été pressenti a priori, les questions étant représentatives d'un même phénomène physique sont fortement corrélées entre elles et peuvent être regroupées dans un même champ de questions. Cependant quelques changements ont été apportés par rapport aux groupes définis a priori. Les quatre champs de questions déduits des matrices de corrélation des trois séismes sont les suivants :

- Q_VM (Vibratory Motion) : IO01 à IO05 : Mouvements vibratoires des petits objets ($0.7 \leq R_{XY} \leq 0.9$)

- IO01 : Avez-vous observé une oscillation faible ou forte des objets suspendus (lustres, cadres) ?
 - IO02 : Avez-vous observé une vibration faible ou forte des petits objets (porcelaine, verres, assiettes, bibelots) ?
 - IO03 : Avez-vous observé un tremblement faible ou fort du mobilier léger (chaises, tables de chevet) ?
 - IO04 : Avez-vous observé une vibration faible ou forte des portes, fenêtres, vitres et vitrines ?
 - IO05 : Avez-vous observé un craquement faible ou fort des poutres, planchers et meubles ?
- Q_D&F (Displacement and Fall) : IO10 à IO12 : Chute et déplacements d'objets ($0.8 \leq R_{XY} \leq 0.9$)
- IO10 : Avez-vous observé des déplacements ou chutes de petits objets instables ou mal fixés ?
 - IO11 : Avez-vous observé des déplacements ou chutes de mobilier léger (lit, chaise, tables de chevet) ?
 - IO12 : Avez-vous observé des déplacements ou chutes de mobilier lourd (armoire, buffet, etc.) ?
- Q_N (Noises) : IO10 à IO12 : Sons entendus (corrélation globale pour Roulans et Rambervillers entre 0.6 et 0.8, plus faible pour Waldkirch)
- IE01 : Le grondement ressemblait à un grondement aérien ou souterrain fort ou faible ?
 - IE02 (génération 7) : Le grondement ressemblait à un coup de tonnerre ou à une explosion forte ou faible ?
 - IE02 (génération 9) : Le grondement ressemblait à un coup de tonnerre ?
 - IE03 (génération 9) : Le grondement ressemblait à une explosion ?
- Q_PF (Personal Feeling) : IP13 (génération 7) ou IP14 (génération 9) : Ressenti émotionnel de la secousse par les témoins ($0.7 \leq R_{XY} \leq 0.85$ en interne et avec les autres champs de questions).

Le quatrième groupe ne comprend qu'une question dont les réponses sont bien corrélées avec la SQI et les réponses aux questions des autres champs de questions. Cependant, sa signification physique étant différente des celle des autres groupes, j'ai décidé d'en faire un « groupe » à part, bien qu'il ne soit composé que d'une seule question.

Dans la suite de l'étude, les quatre champs de questions ainsi que la SQI seront appelés paramètres macrosismiques.

2.1.2.4 Analyse en composantes principales (ACP)

Le nombre de nos données macrosismiques étant très important il paraissait intéressant, en plus des corrélations internes, de faire une analyse en composantes principales. Cette technique issue de la statistique multivariée, vise à modéliser un système de données complexes. Elle consiste à réduire un jeu de données, en transformant des variables liées entre elles (ou « corrélées » en statistiques) en nouvelles variables très peu voir pas corrélées les unes des autres. Chaque composante principale est une combinaison linéaire des variables d'origine. Toutes les composantes principales sont orthogonales entre elles et forment une base orthogonale dans l'espace des données.

Cette approche est à la fois géométrique et statistique. Elle permet dans le même temps, une représentation des variables dans un nouvel espace géométrique selon des directions d'inertie maximales et une recherche d'axes indépendants expliquant le mieux la variabilité ou variance des données.

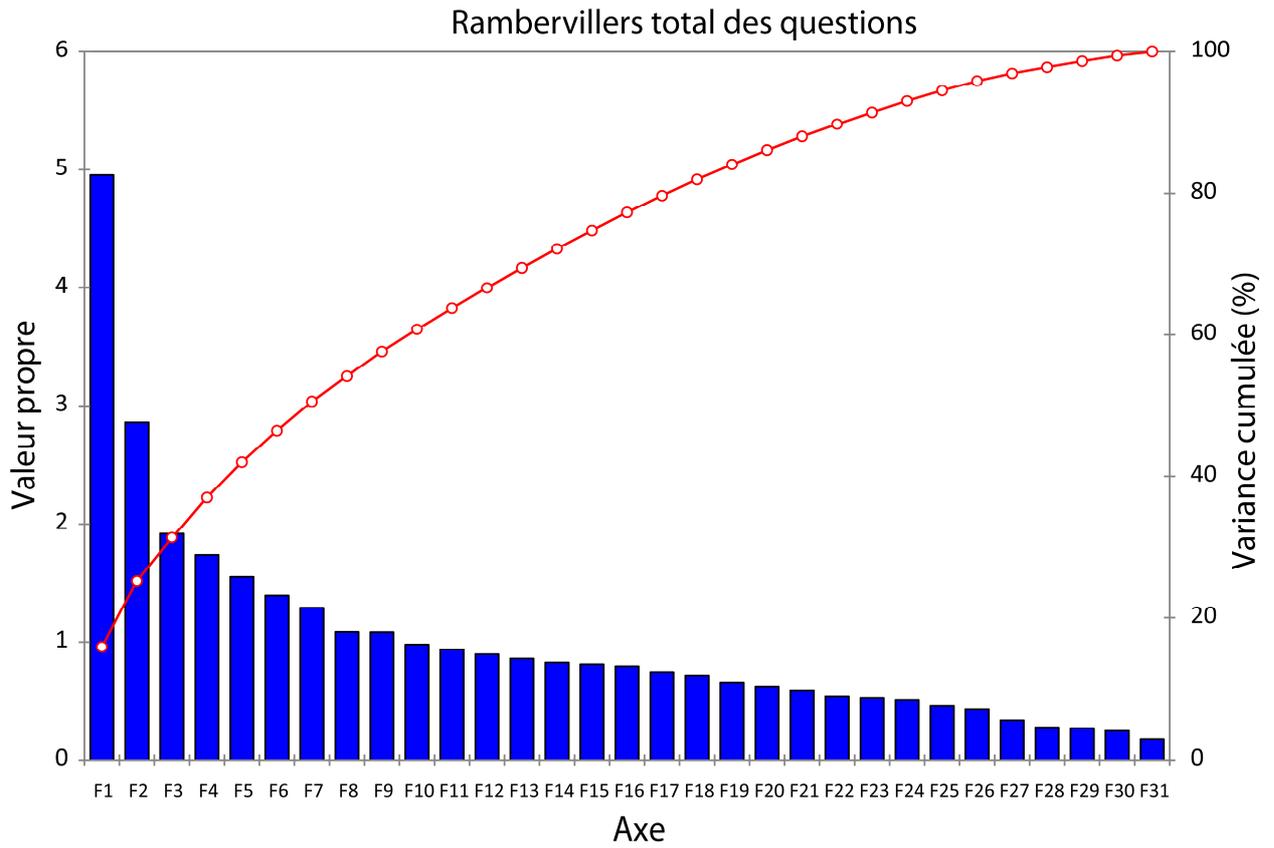
J'ai utilisé cette technique à la fois sur chaque séisme et sur les 3 séismes confondus. Dans ce dernier cas, je n'ai conservé que les questions identiques ou équivalentes d'une génération de questionnaire à l'autre.

Tout d'abord les données encodées précédemment sont normalisées par leur écart type. Cette normalisation est généralement effectuée dans le cas où les différentes données n'auraient pas la même unité. J'ai ensuite calculé les composantes principales, les coordonnées des variables d'origine dans le nouvel espace ainsi que les pourcentages des variances expliquées (cf. Figure 9) par chaque composante principale. D'après le critère de Kaiser (1960), les valeurs propres inférieures à la valeur unitaire ne doivent pas être considérées. En l'appliquant sur le Tableau 18 (exemple de des trois séismes confondus), seules les huit premières valeurs propres du tableau sont conservées. En statistique, il est couramment considéré que les composantes principales à considérer dans un système sont celles dont la variance cumulée explique 60% de la variance du système. Or, sur la Figure 9, 8 ou 9 composantes principales expliquent environ 60% de la variance du système, ce nombre de composantes correspondant au résultat trouvé avec le critère de kaiser.

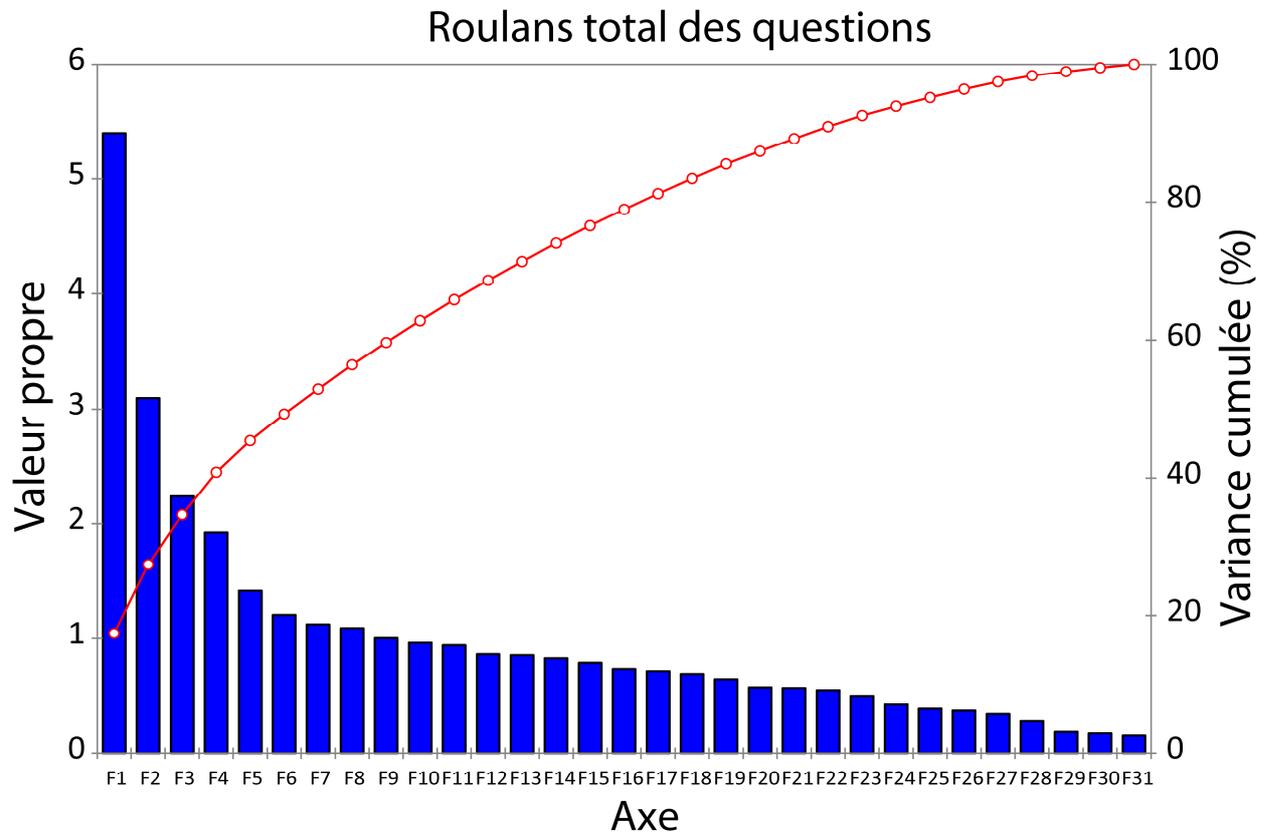
L'interprétation possible de ce résultat est que ce système est trop complexe pour être entièrement expliqué par un petit nombre de composantes principales. En effet, les observations macrosismiques dépendent de manière générale d'un grand nombre de paramètres (distance épacentrale, conditions de sites, sensibilité du témoin dans les faibles intensités etc. ...).

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	% cumulé
F1	4,669	17,292	17,292
F2	2,581	9,558	26,850
F3	1,802	6,673	33,522
F4	1,615	5,983	39,505
F5	1,455	5,388	44,894
F6	1,226	4,540	49,433
F7	1,146	4,245	53,678
F8	1,030	3,814	57,493
F9	0,953	3,531	61,023
F10	0,902	3,342	64,366
F11	0,875	3,241	67,606
F12	0,806	2,986	70,592
F13	0,791	2,929	73,521
F14	0,742	2,747	76,268
F15	0,693	2,567	78,836
F16	0,650	2,407	81,242
F17	0,630	2,334	83,576
F18	0,603	2,234	85,810
F19	0,564	2,088	87,898
F20	0,545	2,018	89,917
F21	0,515	1,906	91,823
F22	0,497	1,841	93,664
F23	0,449	1,663	95,327
F24	0,437	1,618	96,946
F25	0,346	1,280	98,226
F26	0,253	0,938	99,164
F27	0,226	0,836	100,000

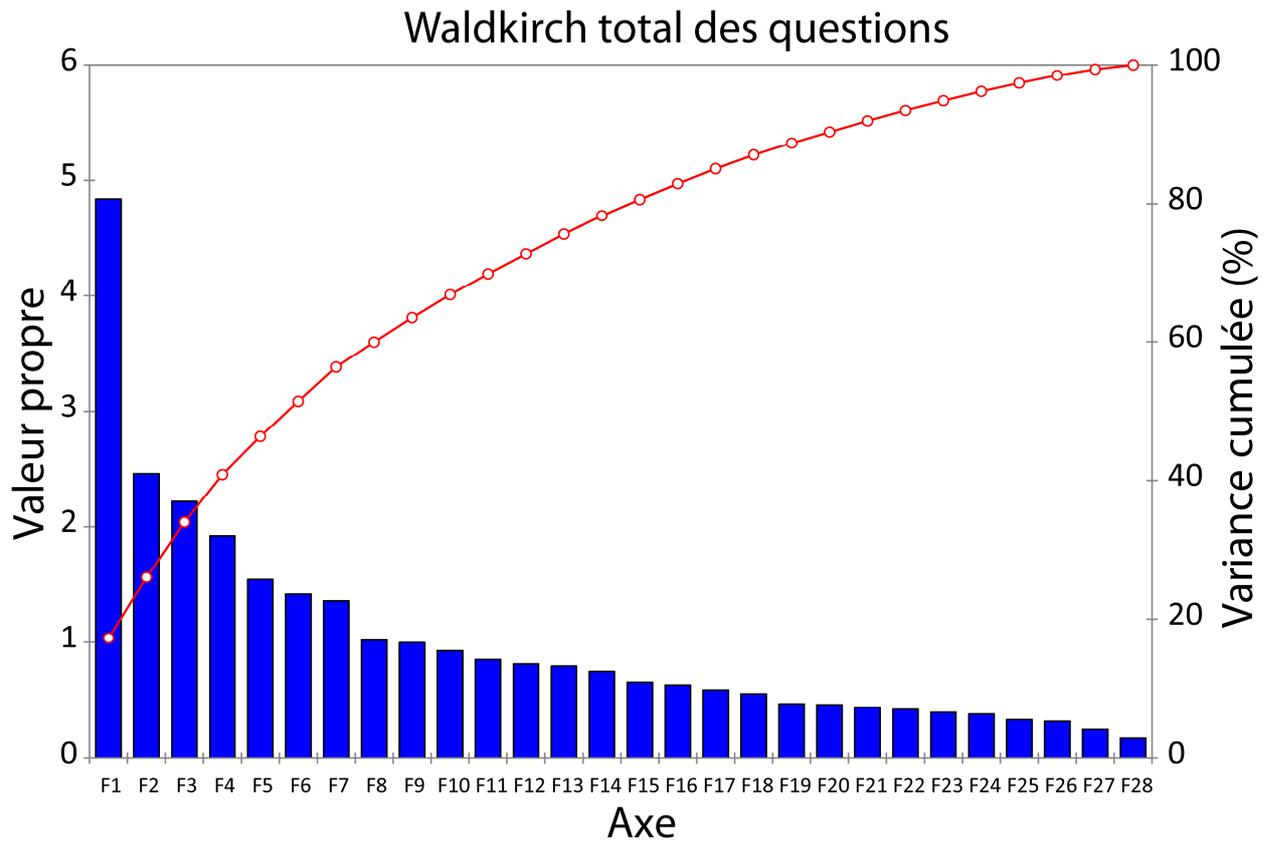
Tableau 18: Tableau récapitulatif des valeurs propres et du pourcentage de la variabilité expliquée par chaque valeur propre et par toutes les valeurs propres (variabilité cumulée) pour tous les séismes confondus



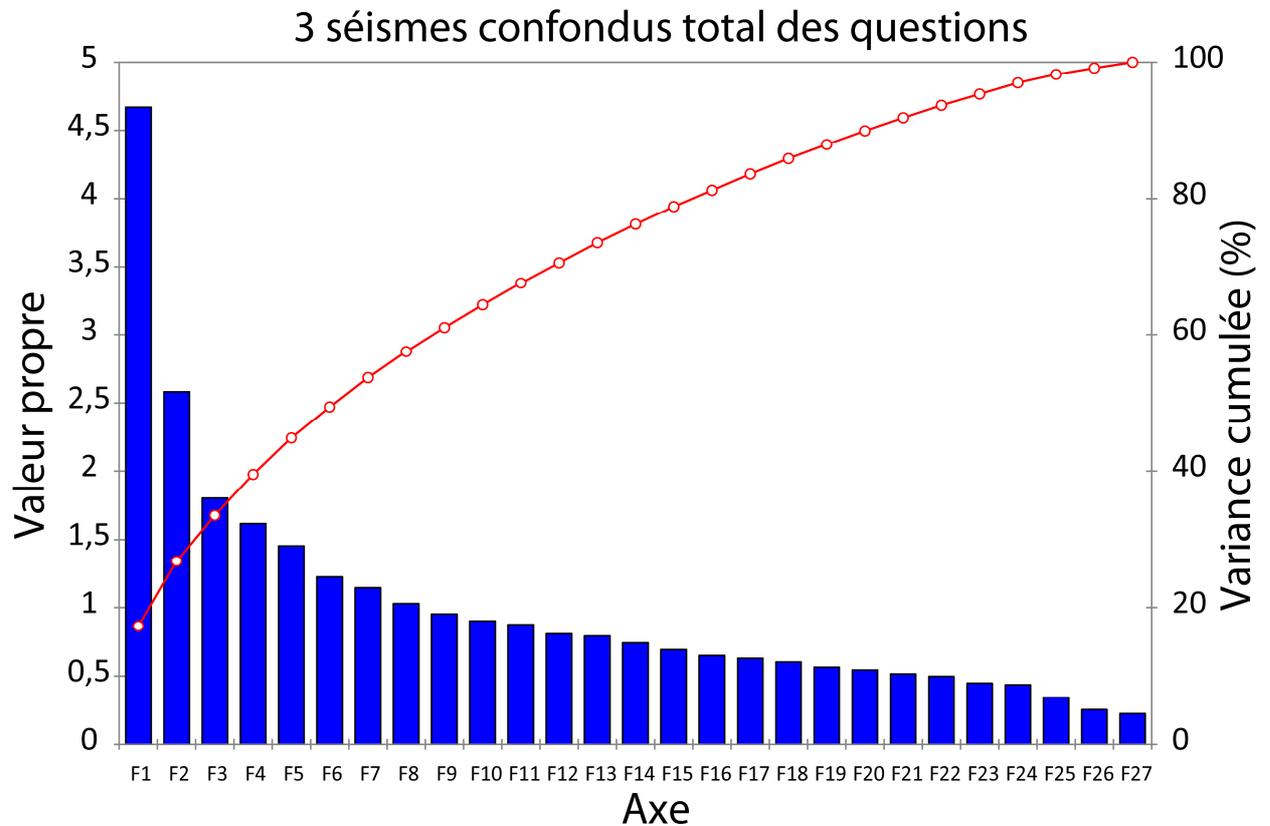
a)



b)



c)



d)

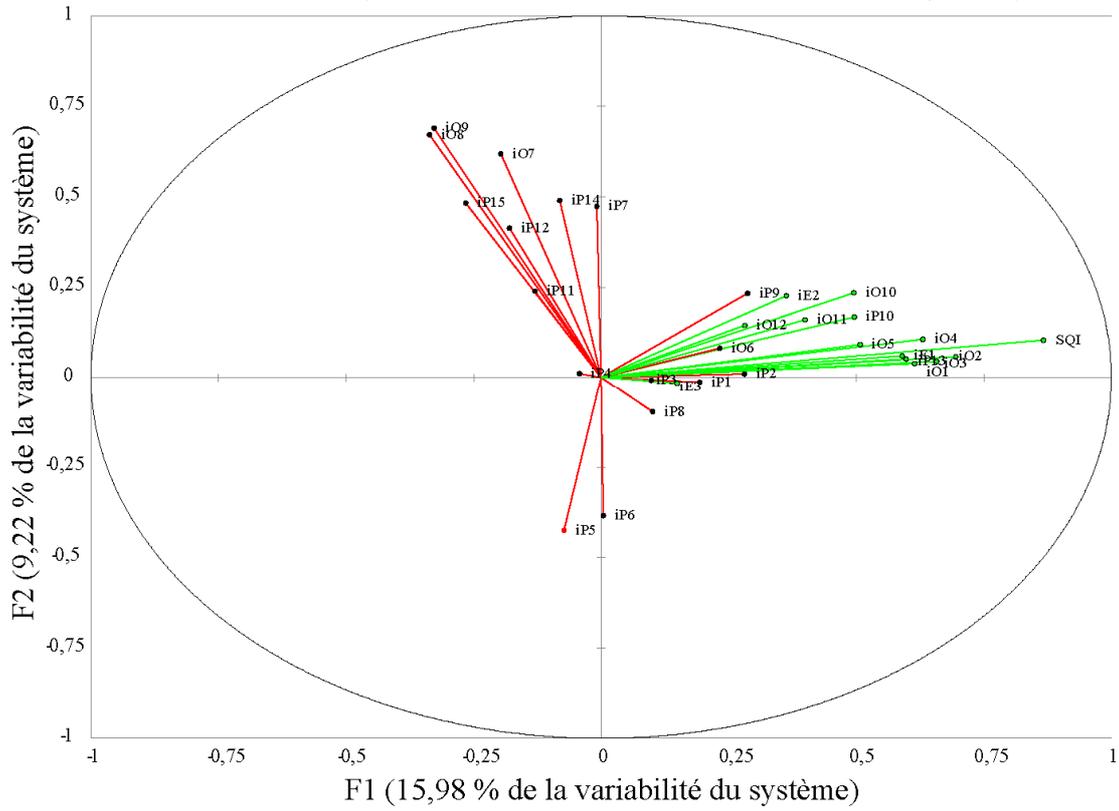
Figure 9: Pourcentage de variance expliquée pour chaque séisme et pour les 3 séismes confondus. Chaque barre bleue présente la valeur propre d'un axe de l'analyse. La courbe rouge représente le pourcentage de la variance cumulée expliquée par les différents facteurs (le premier facteur explique 20% de la variance)

Cependant, il est possible de tirer des conclusions de cette analyse quant aux corrélations des questions entre elles. Pour cela, il suffit de représenter les vecteurs propres des questions sur les axes principaux. Lorsque les vecteurs ont un angle faible entre eux, les variables sont corrélées. Plus l'angle est petit, meilleure est la corrélation. Sur la Figure 10, sont présentées en vert les questions à partir desquelles sont réalisés les champs de questions. Les questions non utilisées dans les champs de questions sont représentées en rouge. Il apparaît que les questions SQI, IP13 (IP14 pour Waldkirch), O01, O02, O03, O04, O05, O10, O12, E1 et E2 (E3 aussi dans le cas de Waldkirch) (en vert sur la Figure 10) sont corrélées entre elles. Cette corrélation est en accord avec les résultats présentés précédemment dans la section 2.1.2. De plus, les questions O01, O02, O03, O04 et O05 présentent de très faibles angles entre elles, montrant ainsi qu'elles sont très fortement corrélées et confirmant le choix de les regrouper dans un seul champ de questions. On peut émettre l'hypothèse d'après la Figure 10 et la règle du coude que le premier axe pourrait représenter l'intensité EMS-98, car son module est très proche de la longueur de l'axe.

Il est également remarquable que les questions qui présentaient des anticorrélations, et notamment des anticorrélations fortes entre elles sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, sont regroupées (en rouge sur la Figure 10).

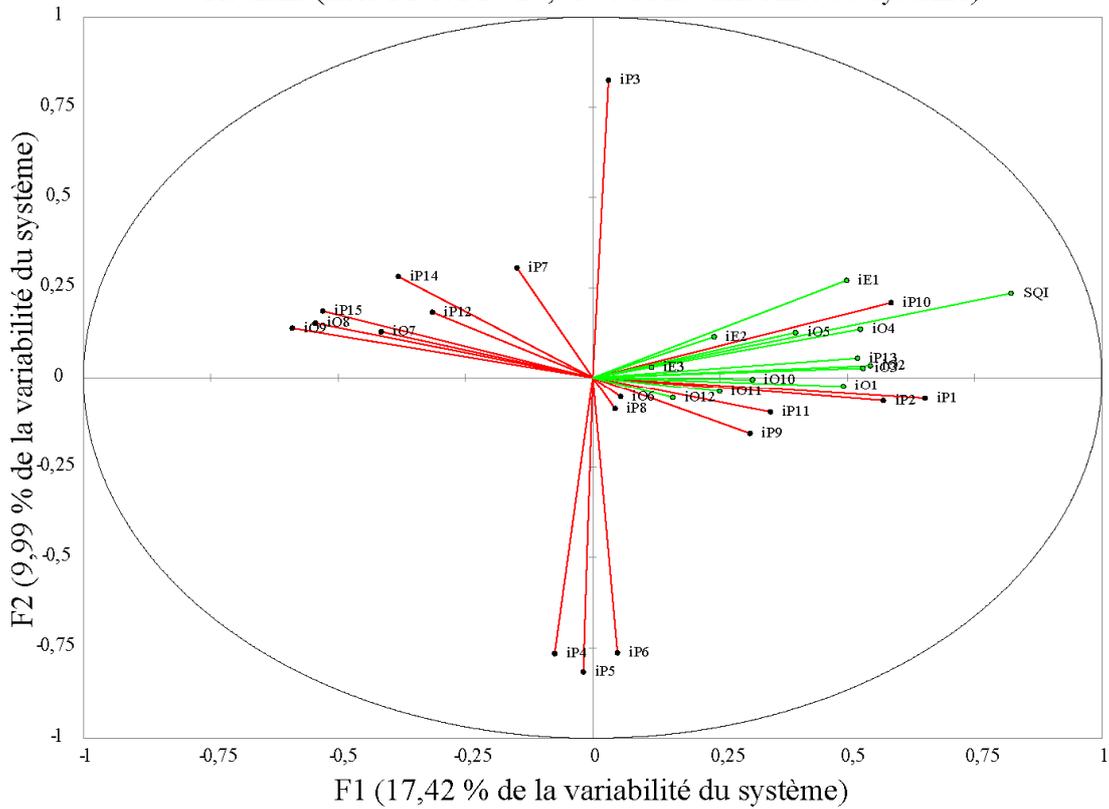
Notons également, que les questions représentées en vert sur la Figure 10, ne se trouvent pas dans le même quadrant de la figure pour le séisme de Waldkirch (quadrant du bas à droite) que pour les autres séismes (quadrant du haut à gauche). De plus, toujours pour le séisme de Waldkirch, les questions E2 et E3, relatives aux sons entendus, ne se trouvent pas dans le même quadrant que les autres questions (quadrant du bas à gauche) signifiant une faible corrélation avec la SQI. Cela peut s'expliquer par le fait que le questionnaire utilisé dans le cas du séisme de Waldkirch diffère du précédent notamment dans les questions du son. En effet, la question E2 du questionnaire de génération 7 est séparée en deux questions distinctes dans le questionnaire de génération 9 (cf. Tableau 17). De plus, le séisme de Waldkirch a eu lieu la nuit contrairement aux deux autres induisant peut être une perception différente et donc une façon de répondre différente de la part des témoins. En outre, les premiers témoignages pour le séisme de Waldkirch se trouvent à une trentaine de kilomètres de l'épicentre. Ce n'est pas le cas des deux autres séismes et cela peut avoir une influence sur le ressenti et les observations des témoins et en conséquence sur l'ACP.

Rambervillers (axes F1 et F2 : 25,21 % de la variabilité du système)

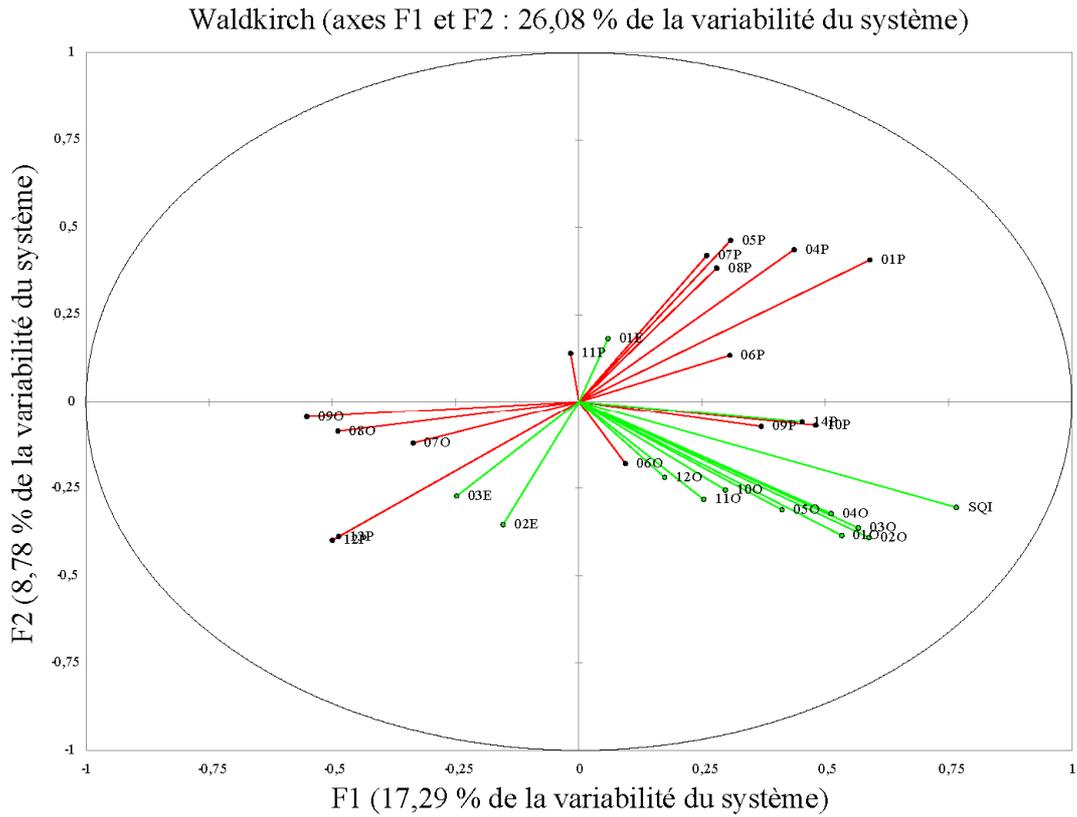


a)

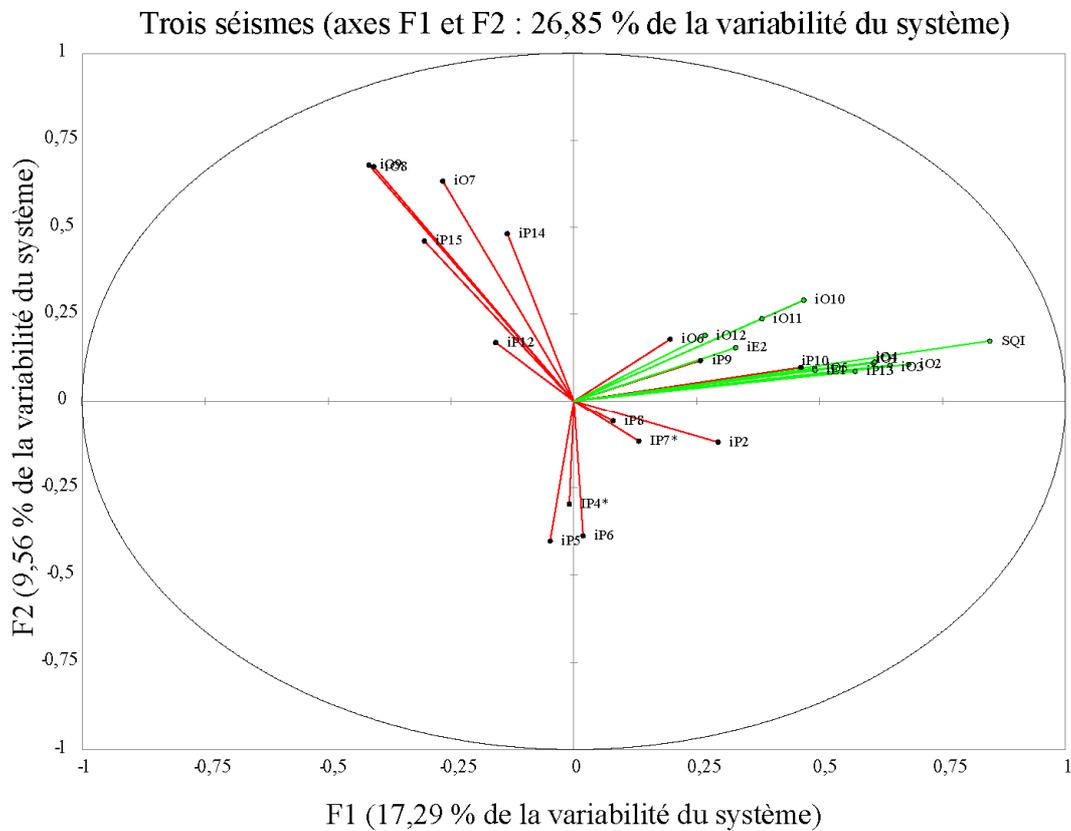
Roulans (axes F1 et F2 : 27,41 % de la variabilité du système)



b)



c)



d)

Figure 10: Analyse en composantes principales selon les deux premières composantes principales pour chacun des trois séismes et pour les trois séismes confondus. Les vecteurs verts représentent les questions conservées pour les champs de questions après l'étude des corrélations entre les réponses aux questions du formulaire BCSF.

2.1.3 CONCLUSION SUR LES PARAMÈTRES MACROSISMIQUES

Les questionnaires macrosismiques du BCSF ont été étudiés de deux manières différentes afin d'en tirer le maximum d'information. L'étude des corrélations a permis de mettre en évidence quatre champs de questions présentant une forte corrélation interne et une forte corrélation avec la SQI. Cette étude de corrélations a permis de confirmer et d'affiner le tri et le regroupement réalisés a priori en première étude des questionnaires.

En complément de l'étude des corrélations, l'Analyse en Composantes Principales de données macrosismiques, ne nous a pas permis d'identifier un nombre restreint de questions qui régiraient la majeure partie du système. Cette étude nous a permis de constater que le système des réponses aux questionnaires macrosismiques est un système extrêmement complexe qui ne peut pas dépendre d'un petit nombre de paramètres. L'influence de la sensibilité des témoins, les conditions de site, la distance à l'épicentre, etc. sont autant de paramètres qui influencent la modélisation de ce système. De plus, a posteriori, elle nous a permis de confirmer les résultats trouvés via les calculs de corrélation, et les regroupements a priori.

Le choix des regroupements par champs de questions, bien que le plus objectif possible, peut être discutable car toutes les questions sélectionnées apparaissent fortement corrélées entre elles. Il aurait pu être possible de regrouper toutes ces questions en un seul champ de questions à comparer aux données instrumentales en plus de la SQI, cependant le choix du regroupement par signification physique semble le plus pertinent.

Il est important de noter aussi que la forte corrélation entre les groupes de questions et la SQI, confirme le fait que la SQI est un indicateur robuste des effets observés d'un séisme.

2.2 ETUDE D'ÉVENTUELS EFFETS REGIONAUX À PARTIR DE L'ÉTUDE DES SQI

2.2.1 INTÉRÊT ET GÉOLOGIE DE LA ZONE D'ÉTUDE

Comme cela a déjà été précisé, les SQI sont attribuées à chaque questionnaire en fonction des effets sur les objets, du ressenti des personnes et des dégâts aux constructions. Elles sont en conséquence représentatives de la force du séisme et des dégâts qu'il a occasionnés à l'endroit des témoignages. La région à laquelle nous nous intéressons est couverte par plus de 21000 témoignages, et présente une richesse et une complexité géologique importantes comme le montre l'extrait de la carte géologique au 1/50000^{ème} du BRGM de la Figure 11. En effet, cette région se caractérise par plusieurs complexes géologiques connexes, de formation différentes. Les complexes majeurs sont le Fossé Rhénan, (plaine constituée de dépôts quaternaires) qui sépare deux régions montagneuses les Vosges (à l'ouest) et la Forêt Noire (à l'est) (affleurement du socle, formations magmatiques). Au sud, se trouve le début de l'Arc du Jura, troisième région montagneuse. À l'ouest et au nord des Vosges affleurent des formations trias et enfin jurassiques.

L'exercice suivant vise à vérifier que les données que nous allons utiliser pour l'étude des corrélations paramètres instrumentaux-macrosismiques ne sont pas biaisées par des effets régionaux ou de sites. Ces effets s'ils existent, traduisent la variabilité du mouvement du sol pouvant être dus à plusieurs facteurs : la géologie (Figure 11), la topographie, de même que des effets locaux liés à la nature des sols, éventuellement des effets de sources et notamment la directivité.

J'ai donc étudié la répartition spatiale des SQI et leur comportement par rapport à un modèle d'atténuation valable dans la région d'étude.

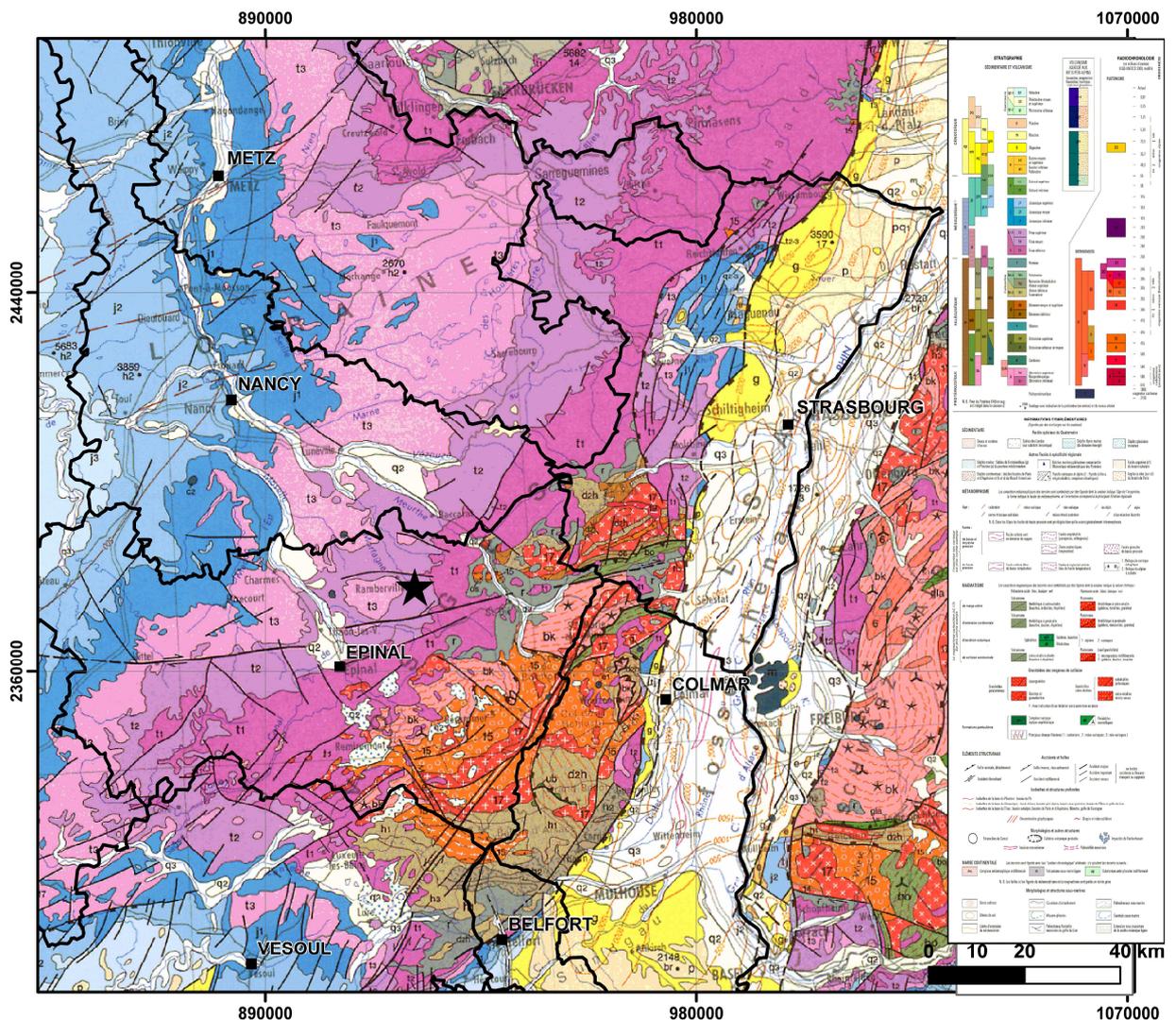


Figure 11: Carte géologique au 1/5000 du BRGM de la zone d'étude.

2.2.2 MODÉLISATION DES DONNÉES

2.2.2.1 Généralité sur la modélisation des données observées

Afin de comprendre si les données utilisées sont biaisées par des effets régionaux dans la zone d'étude, j'ai comparé les SQI observées et les SQI prédites par un modèle moyen d'atténuation avec la distance hypocentrale, établi à partir des données observées.

Pasolini et al. (2011) répertorient les différentes sources d'effets régionaux et se concentre sur les effets de directivité de la source comme pilotes des effets régionaux observés lors du séisme de l'Aquila de 2009. Les effets régionaux ont également été étudiés par De Rubeis et al (2009), à partir de l'étude des sons entendus par les témoins lors de plusieurs séismes dans la région de Rome. Cette étude établit que certaines régions présentent des effets régionaux systématiques (résidus positifs ou négatifs) pour plusieurs séismes étudiés. Je me suis inspirée de la méthodologie de ce travail afin de mettre en évidence les effets régionaux dans ma zone d'étude. Pour cette étude, sur les trois séismes, j'ai réalisé un calcul de résidus entre les données observées et les données prédites à partir d'un modèle élaboré sur les données observées.

Cette comparaison a pour but d'apporter des éléments de réponse à la question suivante :

- Les données observées dans la zone d'étude sont-elles biaisées par des effets régionaux ?

2.2.2.2 Méthodologie de la modélisation et des comparaisons

Le modèle élaboré sur nos données n'a pas vocation à être une relation d'atténuation de l'intensité précise, il s'agit plutôt d'un outil permettant d'arriver à la finalité qu'est le calcul des différences entre les SQI observées et prédites où :

$$\Delta SQI = \frac{(SQI_{obs} - SQI_{mod})}{\sigma_{mod}} \quad (8)$$

Avec SQI_{obs} et SQI_{mod} les SQI respectivement observées et modélisées et σ_{mod} l'écart type lié au modèle.

Les calculs et les raisonnements pour cette partie de l'étude sont réalisés en distance hypocentrale et non plus en distance épacentrale afin de tenir compte des effets non négligeables de la profondeur à proximité de l'épicentre, en accord avec les modèles d'atténuation existants dans la littérature.

Le but de cette modélisation est d'avoir un modèle qui s'adapte au mieux aux données observées. Pour cela, j'ai suivi la méthodologie suivante. J'ai calculé une moyenne des intensités par fenêtres glissantes en distance. La courbe moyenne résultante est ensuite modélisée au mieux par régression linéaire en déterminant deux coefficients α et β , ainsi qu'un écart type associé à la modélisation $\sigma_{modèle}$. Les valeurs de SQI prédites à l'aide du modèle sont ensuite comparées aux données observées. Enfin, j'ai calculé un résidu normalisé par l'écart type du modèle ($\sigma_{modèle}$) pour chaque valeur de SQI. Ces résidus sont ensuite moyennés sur des carrés de dix km de côté afin de voir si une tendance se dégage.

2.2.2.3 Choix des données

➤ **Données à disposition**

Les données sont conservées sur une distance appelée "distance de complétude". Cette distance correspond à la distance à partir de laquelle le nombre de témoignages commence à diminuer au lieu d'augmenter avec la distance. On estime alors que le nombre de témoignages n'est plus complet et n'est donc plus statistiquement significatif. La distance de complétude est variable en fonction du séisme étudié (voir Tableau 19 et Figure 12, Figure 13, Figure 14). Cependant, sur la Figure 12, la Figure 13, et la Figure 14, on notera que les pics de nombres de témoignages sont représentatifs des villes importantes, entraînant un nombre de témoignages plus important.

	Rambervillers	Roulans	Waldkirch
Nombre de témoignages individuels	10662	5175	1945
Distance de complétude (km)	100	200	30
Nombre de témoignages sur la distance de complétude	7943	3605	1318

Tableau 19: Nombre de témoignages et distance de complétude pour les séismes étudiés

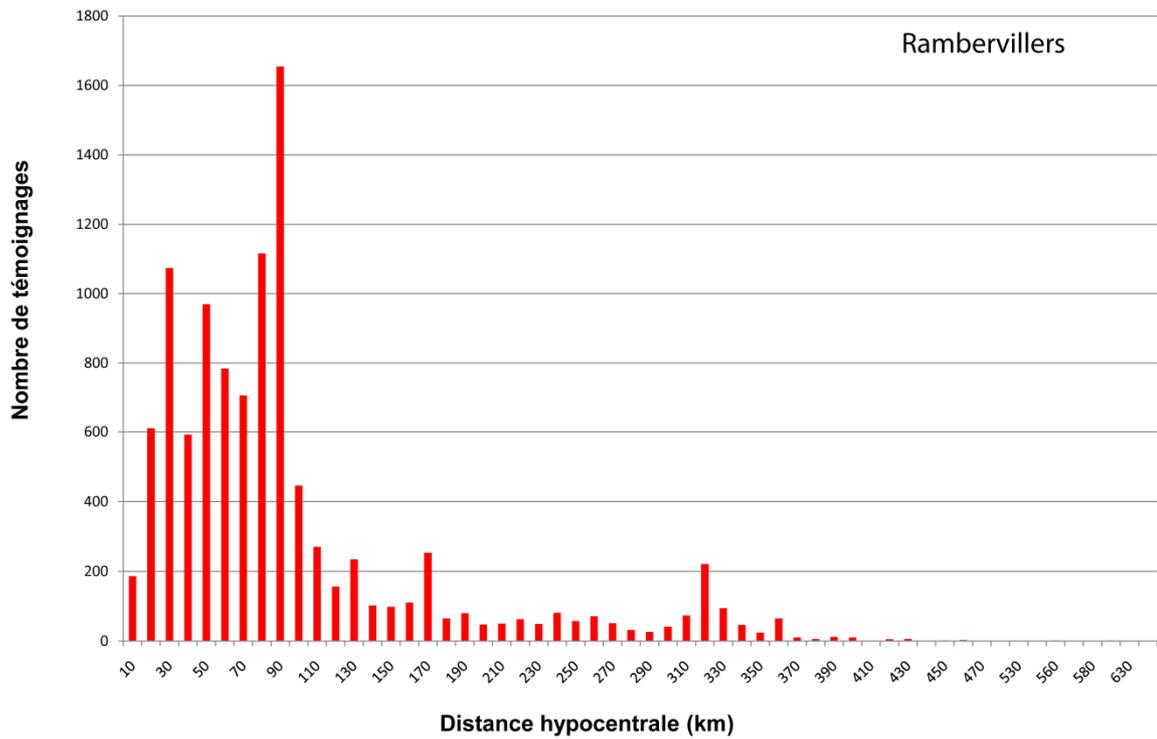


Figure 12: Nombre de témoignages en fonction de la distance hypocentrale pour le séisme de Rambervillers

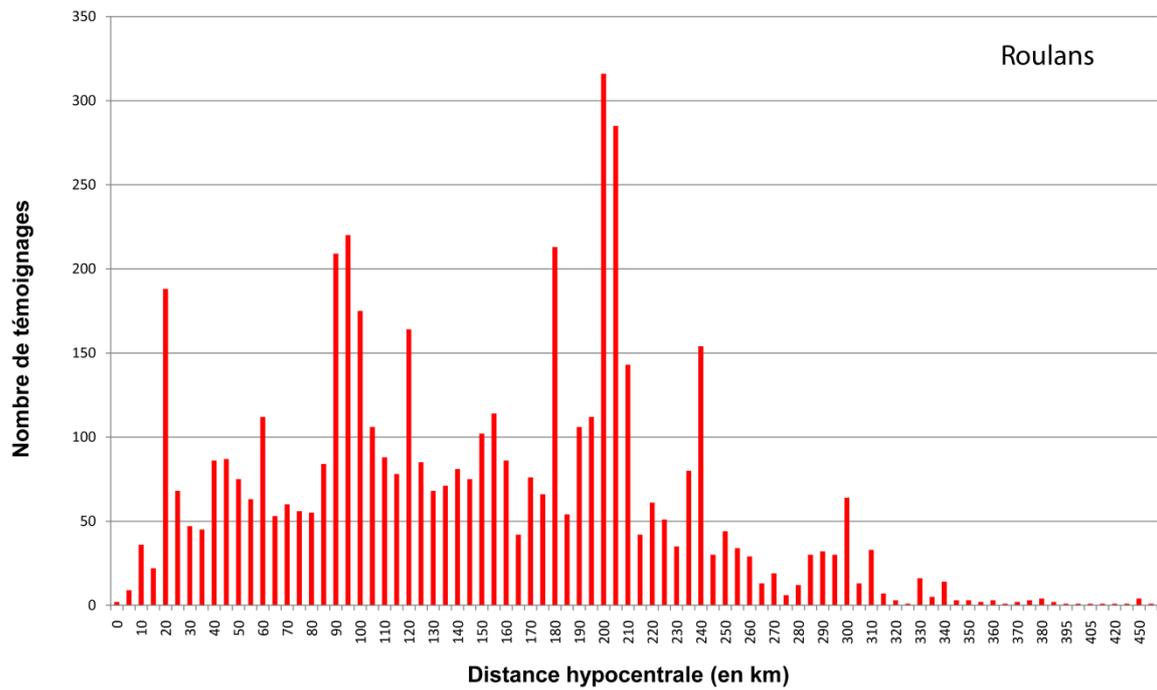


Figure 13: Nombre de témoignages en fonction de la distance hypocentrale pour le séisme de Roulans

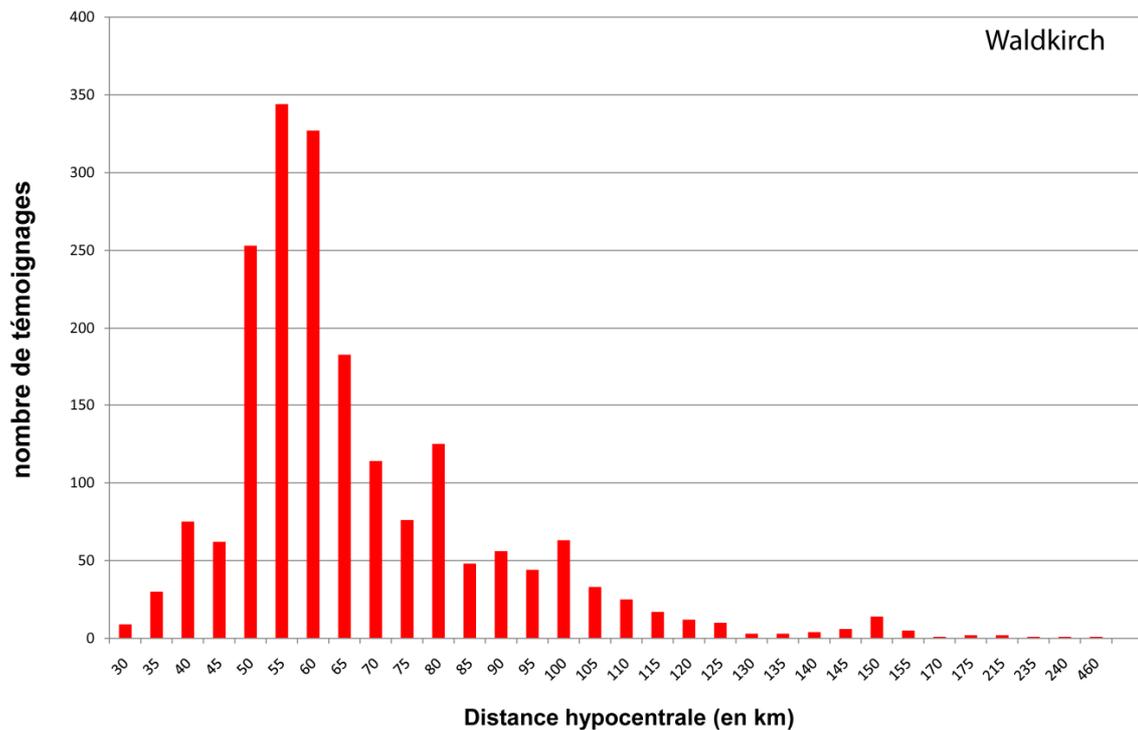


Figure 14: Nombre de témoignages en fonction de la distance hypocentrale pour le séisme de Waldkirch

Afin de ne pas donner trop de poids aux SQI qui « tireraient les données vers le bas » et biaiserait les résultats, j’ai décidé de regrouper les SQI par commune (en fonction du numéro d’INSEE). Les SQI sont moyennées par commune puis la valeur de cette moyenne est arrondie à la demi-intensité la plus proche. La méthodologie décrite plus haut est donc appliquée sur le jeu de données agrégé par communes et non sur les SQI de façon individuelle.

Sur les cartes, les résidus sont représentés par des cercles plus ou moins bleus ou rouges et plus ou moins grands en fonction de la valeur des moyennes des résidus dans chaque zone.

- $\Delta SQI > 0 \rightarrow SQI_{obs} > SQI_{mod}$: les SQI prédites par le modèle sont inférieures à celles observées \rightarrow le cercle est rouge, plus la valeur absolue est grande plus le cercle est grand
- $\Delta SQI < 0 \rightarrow SQI_{obs} < SQI_{mod}$: les SQI prédites par le modèle sont supérieures à celles observées \rightarrow le cercle est bleu, plus la valeur absolue est grande plus le cercle est grand

Remarque : Lorsque le carré de 10km sur lequel est réalisée la moyenne des résidus contient un nombre de données inférieur à 5, ce nombre n’est pas considéré comme significatif et la moyenne n’est alors pas calculée.

➤ Conclusions sur le choix des données

Dans la section 2.2.2.4, ne sera présenté que le cas du calcul de résidus pour le séisme de Rambervillers, avec le modèle basé sur les données observées pour les raisons suivantes.

Le séisme de Waldkirch disposait de trop peu de données dans la zone de complétude pour avoir une modélisation correcte. La pente de la courbe de modélisation des données est presque plate prédisant une intensité épiscopale de 2.8. Cette valeur n’est pas réaliste et n’est pas

en accord avec l'intensité épiscopale de 6 proposée dans la base de données SisFrance. Cette modélisation entraîne donc la prédiction de données peu fiables voir erronées et donc des résidus biaisés. Les résultats obtenus avec l'étude du séisme de Roulans n'apportent rien de plus que l'étude du séisme de Rambervillers, et ne permet pas de tirer de conclusions significatives quand à la mise en évidence d'effet régionaux au travers de l'étude des SQI. Les conclusions obtenues pour le séisme de Rambervillers peuvent être appliquées au séisme de Roulans.

2.2.2.4 Analyse critique des données du séisme de Rambervillers (22/03/2003, Mw=4.8)

Les SQI que nous utilisons présentent un léger biais lorsqu'on s'intéresse aux très faibles intensités. En effet, un certain nombre de SQI sont de niveau 1 (non ressenti dans l'échelle EMS98) et ont tendance à biaiser la distribution. Ce phénomène se remarque notamment lorsqu'on s'intéresse à la skewness¹⁰ et à la Kurtosis¹¹ de la distribution.

Sur la Figure 15, il apparaît clairement que la skewness n'est pas nulle et que la distribution est biaisée. Jusqu'à 200km (zone dans laquelle se trouve la distance de complétude choisie pour ce séisme), la skewness est négative et distribution est étalée vers la gauche. Au-delà de 200km en revanche, la skewness est positive et la distribution est alors étalée vers la droite.

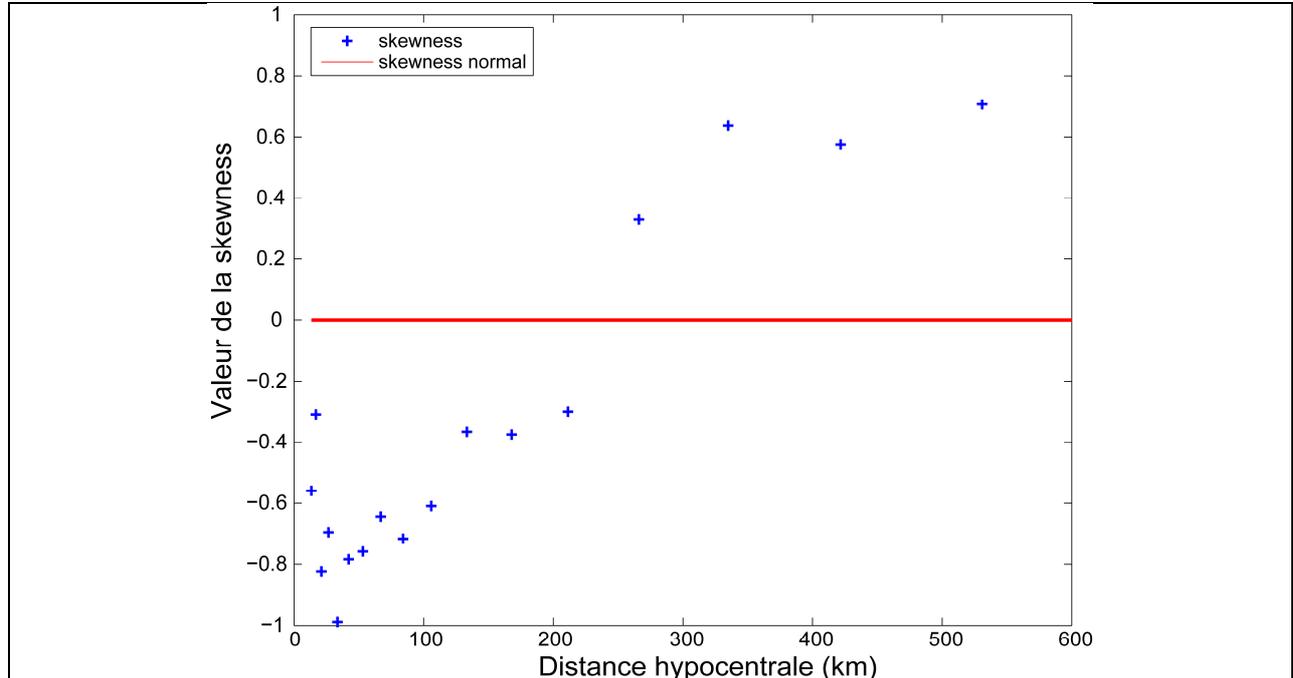


Figure 15:Skewness de la distribution des SQI agrégées par commune en fonction de la distance hypocentrale pour le séisme de Rambervillers. La ligne rouge présente la valeur de la skewness d'une distribution normale. Dans le cas présent les valeurs de la skewness en fonction de la distance hypocentrale montrent les données sont biaisées.

¹⁰ Skewness : mesure de l'asymétrie de la densité de probabilité. Dans le cas d'une distribution où les données ne sont pas biaisées la skewness est nulle

¹¹ Kurtosis (coefficient d'aplatissement) : mesure la disposition des masses autour de leur centre (hors effet de dispersion). Dans le cas d'une distribution où les données ne sont pas biaisées la kurtosis est égale à 3.

La Figure 16 montre que la kurtosis pour les SQI agrégées par commune de Rambervillers est différente de la valeur 3. Jusqu'à 100 km environ (la distance de complétude ici choisie), la kurtosis est supérieure à 3, la distribution est donc pointue en sa moyenne. Au-delà elle oscille entre 2 et 3,5 c'est-à-dire qu'elle est tantôt pointue en sa moyenne tantôt aplatie en sa moyenne. Cette mesure prouve de nouveau l'existence d'un biais dans les données.

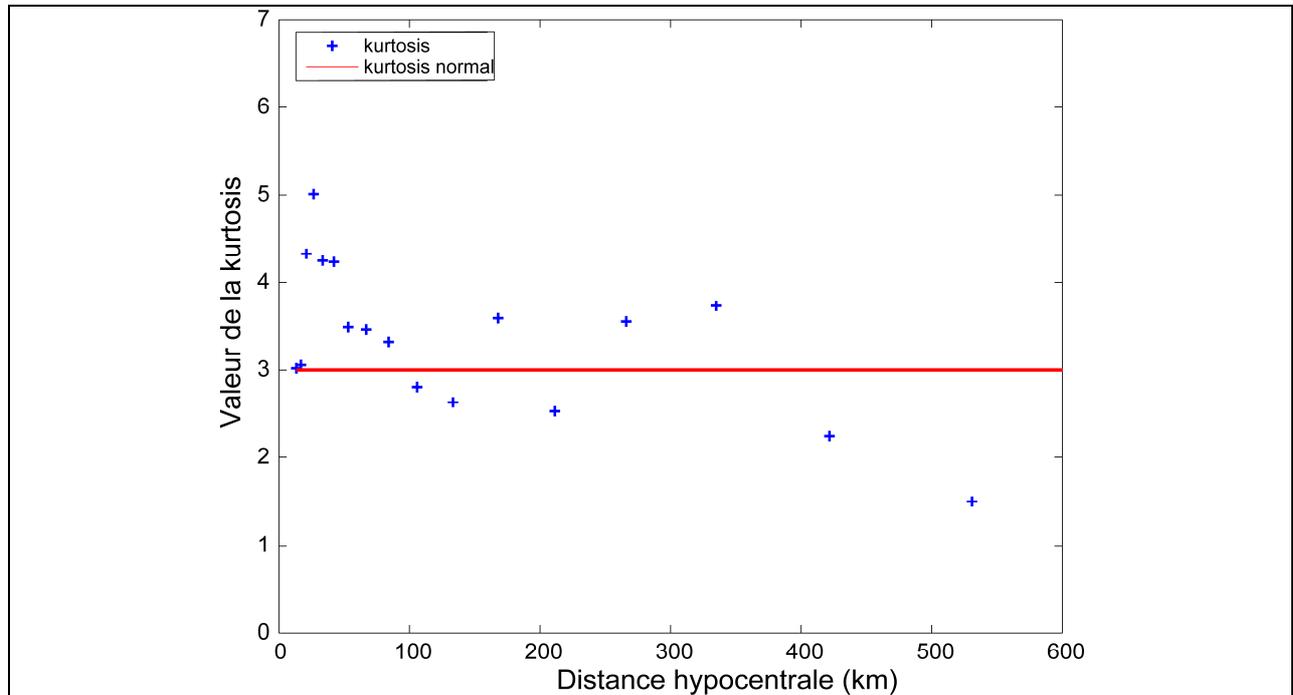


Figure 16: Kurtosis de la distribution des SQI agrégées par communes en fonction de la distance hypocentrale pour le séisme de Rambervillers. La ligne rouge présente la valeur de la kurtosis d'une distribution normale. Dans le cas présent les valeurs de la kurtosis en fonction de la distance hypocentrale montrent les données sont biaisées.

Il est possible de déduire de ces deux figures que sur la distance de complétude du séisme de Rambervillers (100km), la distribution de nos données est « tirée vers le bas » par les SQI de faible intensité.

2.2.2.5 Calcul du modèle moyen des données observées

Avec plus de 8000 témoignages, le séisme de Rambervillers est le mieux renseigné des trois séismes étudiés. Les SQI observées s'échelonnent entre I (non ressenti) et VII (en zone épiscopale). Lorsqu'elles sont agrégées par commune les valeurs s'échelonnent de I à VI. Le modèle ajusté au mieux à la courbe moyenne des SQI agrégées par communes suit l'équation (11). Ce modèle est assez proche de la courbe moyenne des SQI (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

$$SQI_{\text{mod}} = -2.077 \log(R) + 13.6 \quad \text{avec} \quad \sigma_{\text{mod}} = 0.1456 \quad (9)$$

La Figure 17 présente à la fois les valeurs des SQI agrégées par commune (croix rouges), la courbe moyenne des SQI agrégées par commune (courbe noire), et le modèle global pour les SQI

agrégées par commune ajustée au mieux à la courbe moyenne (courbe bleue). Grâce au modèle de l'équation (9) et à partir des SQI agrégées par commune observées, des SQI agrégées par commune sont prédites et des cartes de résidus peuvent être réalisées.

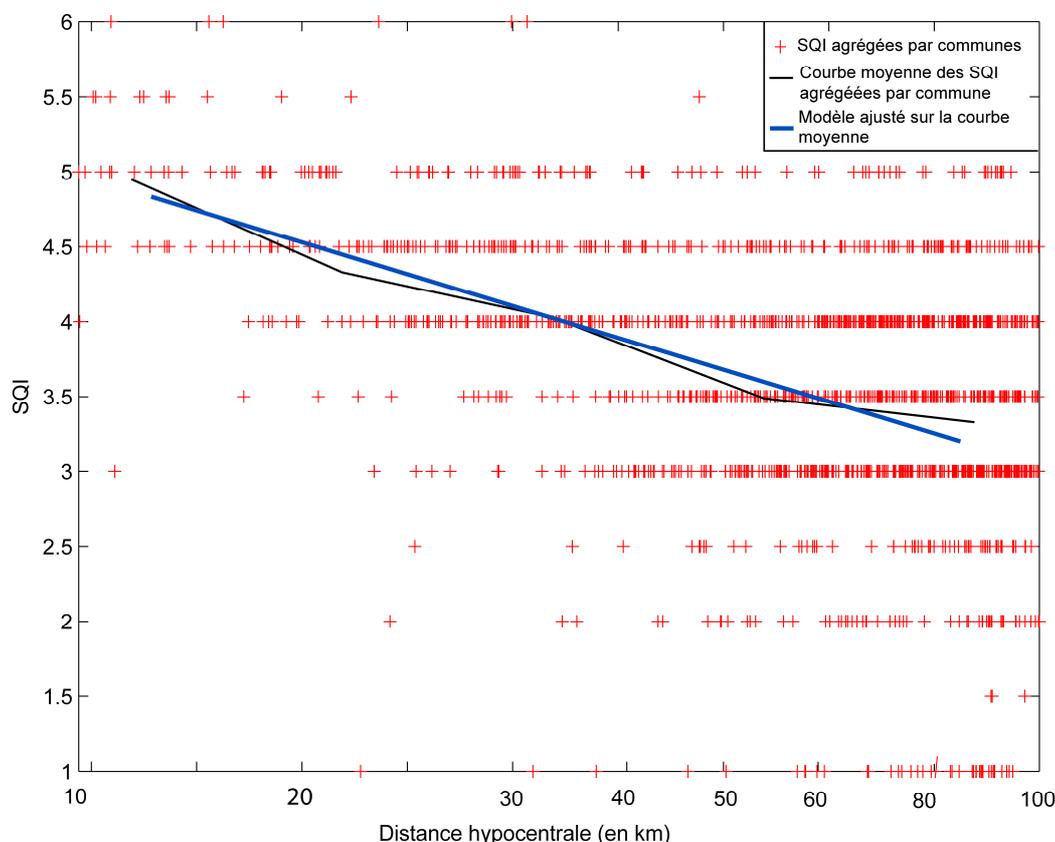


Figure 17 : SQI observées, moyenne et modèle pour le séisme de Rambervillers. La courbe bleue représente le modèle ajusté sur la courbe moyenne (noire) des SQI agrégées par commune observées (croix rouges).

2.2.3 CARTE DE RÉSIDUS

2.2.3.1 Réalisation de la carte de résidus

Une fois le modèle défini, la différence entre les SQI agrégées par commune observées et prédites par le modèle est ensuite calculée puis normalisée par l'écart type au modèle (σ_{mod}) et moyennée sur des carrés de 10km de côté. La Figure 18 présente la carte des résidus sur fond de carte géologique au 1/5000^{ème} du BRGM. Les étoiles noires figurent les épicentres des séismes de Rambervillers (au centre de la carte) et de Waldkirch (à l'Est de Colmar). L'épicentre de Roulans n'est pas visible. Les principales villes de la région d'étude ont également été reportées. Les résidus sont compris entre -2 et 1.5 σ . Les résidus négatifs sont en dégradés de bleu selon la valeur et les positifs en dégradés de jaune à rouge. Les maxima des résidus sont représentés par des cercles plus grands afin de faciliter la visualisation.

L'étude de la carte permet de montrer qu'il apparait des résidus qui semblent spatialement organisés: les résidus positifs les plus importants se trouvent au sud de la carte tandis que les résidus les plus négatifs se trouvent majoritairement au nord de la carte. D'un point de vue

général, les résidus positifs supérieurs à 0.5σ se trouvent au sud de l'épicentre tandis que les résidus négatifs inférieurs à -0.5σ sont répartis au nord de l'épicentre. Les résidus compris entre -0.5σ et 0.5σ ne présentent pas de répartition particulière. De plus, l'étude des témoignages sur des cercles de 10km montre que seule la station STBR peut être soumise à un effet régional puisqu'elle se trouve dans une zone avec un résidu positif compris entre 1 et $1,5\sigma$. Les autres stations accélérométriques, en considérant la zone de 10km autour de chacune d'elles (non représentée ici pour plus de clarté de la figure) ne semblent pas soumises à des effets de site. L'étude des résidus des SQI agrégées par commune ne semble pas permettre ici de mettre en évidence les effets régionaux. .

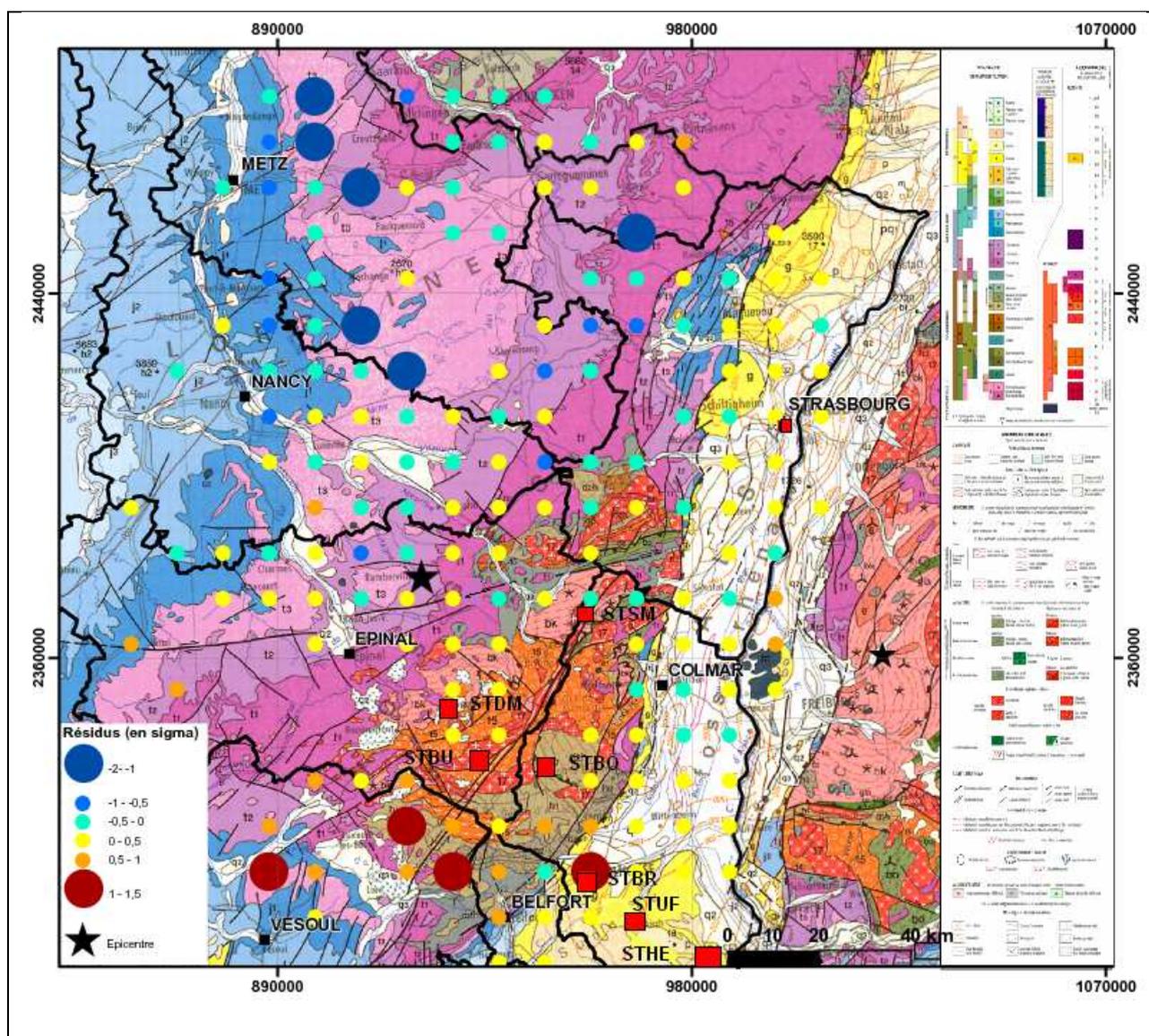


Figure 18: Carte de répartition des résidus $(SQI-SQImod)/\sigma_{mod}$ pour le séisme de Rambervillers. Les cercles jaune à rouge sont les résidus positifs tandis que les cercles bleus figurent les résidus négatifs. Les stations accélérométriques sont figurées par des carrés rouges à bordure noire. Pour la clarté de la figure les cercles de 10km autour des stations n'ont pas été représentés.

2.2.3.2 Interprétation et Discussions

Les résidus entre données observées et prédites par le modèle semblent spatialement organisés mais il reste difficile de faire le lien entre les résidus et la géologie. Concernant l'étude dans les cercles de 10km autour des stations accélérométriques, la plupart des témoignages (à plus de 90%) se trouvent sur le même type de couche géologique dans un même cercle, y compris dans le cercle autour de STBR. Malgré le fait que la zone autour de STBR semble entachée d'un effet régional positif (les données prédites sont 1 à $1,5\sigma$ supérieures aux données observées), il n'est pas possible de conclure de déterminer les effets de sites dans ce cercle.

Enfin, un modèle élaboré par régression linéaire dans les données observées peut être une modélisation trop simplifiée compte tenu des nombreux facteurs pouvant entrer en compte dans la mise en évidence d'effets régionaux (propagation de l'onde, topographie, nature du sol...).

Il n'est donc pas possible dans l'état actuel des données de conclure de façon fiable sur la présence d'effets régionaux, Les résultats de De Rubeis et al, (2009) ont été obtenus en utilisant une méthode au départ similaire à celle que j'utilise, (moyenne par fenêtre glissantes, modélisation par régression loglinéaire en distance) mais une méthode de krigeage sophistiquée a ensuite été appliquée pour effectuer une interpolation spatiale et obtenir un champ résiduel. De plus, De Rubeis et al disposaient d'un nombre conséquent de séismes bien renseignés d'un point de vue macrosismique, à partir desquels une méthode de stacks (« addition ») a pu être appliquée et ainsi donner des résultats fiables et affinés. Il nous faudrait donc un nombre de données macrosismiques plus important et l'application d'une méthode de krigeage avec éventuellement l'élaboration d'un modèle plus complexe qui prendrait d'autres paramètres en compte (par exemple un modèle de forme quadratique). Cependant dans l'état actuel des choses le nombre de données macrosismiques est un facteur limitant dans la phase de stacks.

3 COMPARAISON DES PARAMETRES MACROSISMIQUES ET INSTRUMENTAUX DU MOUVEMENT DU SOL

3.1 DONNEES INSTRUMENTALES

3.1.1 PRÉSENTATION DU RESEAU D'ACCELEROMETRIE PERMANENT

Le Gis-RAP (Réseau Accélérométrique Permanent)¹², est un groupement d'intérêt scientifique dont la principale mission est de :

- mettre en place un réseau d'enregistrement du mouvement du sol, dans une gamme de fréquences allant approximativement de 0.05 Hz (période de 20 secondes) à 50 Hz sans saturer pour des accélérations « fortes » de l'ordre de 1 g,
- constituer une base de données accessible à tous,
- favoriser les synergies entre les différents acteurs impliqués dans l'analyse de l'aléa et du risque sismique.

En 2010, le Réseau Accélérométrique Permanent est constitué de 144 stations installées dans les régions les plus actives de France Métropole, aux Antilles et maintenant en Nouvelle-Calédonie et à Mayotte. Ces stations mesurent l'accélération du sol dans une gamme allant de 1 micro-g à 1 g et dans une bande passante allant de 0,05 Hz à 50 Hz. Elles constituent l'épine dorsale du RAP. La Figure 19 présente les diverses stations du réseau RAP.

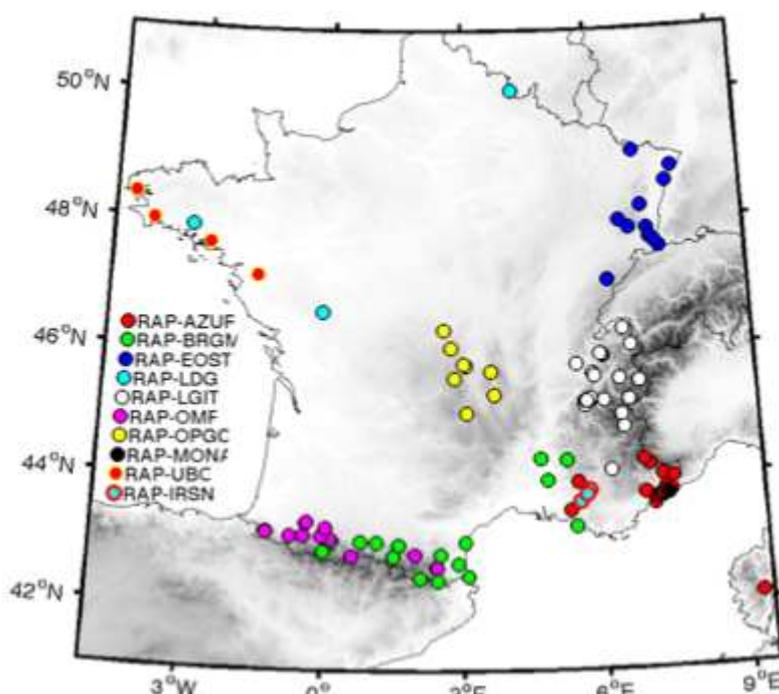


Figure 19: Réseau Accélérométrique Permanent en France Métropolitaine en 2010 (d'après le site internet du RAP¹⁰)

3.1.2 INSTRUMENTS ET CONDITIONS DE SITE

De nombreuses stations accélérométriques du RAP ont enregistré les 3 séismes. Cependant pour les stations se trouvant à grande distance (par exemple les stations des Alpes), les signaux étaient souvent très bruités et donc inexploitable. Après analyse des différents signaux accélérométriques, j'ai retenu neuf stations ayant enregistré les séismes de façon exploitable Rambervillers et Roulans. Sept d'entre elles ont enregistré le séisme de Waldkirch.

¹² www-rap.obs.ujf-grenoble.fr

Ces stations sont présentées sur la Figure 4. Chaque station retenue présentait également de nombreux témoignages macrosismiques aux alentours. Les stations qui ont enregistré les séismes sont de deux types : quatre sont des CMG-T et cinq sont des Episensor.

Une étude a été menée dans le cadre d'un groupe technique du RAP par le CETE de Nice, afin de déterminer les conditions de site sous les stations du RAP (Régnier et al. 2010).

Les conditions de sites sont déterminées grâce à des mesures d'H/V, de vitesse des ondes S VS₃₀, et lorsqu'ils sont disponibles des forages à proximité des stations. Cette détermination est réalisée en accord avec l'Eurocode 8. Certaines classifications peuvent être discutables, et c'est pourquoi nous proposons une classification plus simple basée sur la différence rocher/sédiment, à partir de la classification de Régnier et al (2010) et des cartes géologiques au 50000^{ème} du Bureau de Recherches Géologiques et Minières. La classification de Régnier et al (2010) ainsi que la mienne sont présentées dans le Tableau 20.

Station RAP	Localisation	Lat.	Long	Alt (m)	Type d'Instrument	Classification EC8 (Régnier et al 2010)	Classification Lesueur
STMU	Strasbourg-Musée	48,584	7,765	135	CMG-5T	A-B	Sédiment B
STSM	Rauenthal (Echery)	48,22	7,16	580	Episensor	A	Rocher A
STDM	Dommartin-lés-Remiremont	48	6,644	400	CMG-5T	E	Sédiment E
STBU	Bussang	47,885	6,851	610	CMG-5T	E	Sédiment E
STBO	Bollwiller	47,86	7,26	240	Episensor	A	Rocher A
STFL	Fournets-Luisans	47,112	6,562	910	CMG-5T	A	Rocher A
STUF	Uffheim	47,649	7,444	275	Episensor	B	Sédiment B
STBR	Brunstatt	47,73	7,32	250	Episensor	B	Sédiment E
STHE	Hésingue	47,58	7,54	275	Episensor	E	Sédiment E

Tableau 20: Caractéristiques des stations accélérométriques du RAP utilisées dans la présente étude : localisation, types d'instruments et conditions de site .La classification EC8 est d'après Régnier et al (2010). Ma classification est établie à partir de la classification EC8 et de l'étude des cartes géologiques du BRGM.

3.1.3 DESCRIPTION ET TRAITEMENT DES DONNÉES INSTRUMENTALES

Les signaux accélérométriques enregistrés par les neuf stations du RAP sont des signaux trois composantes : deux horizontales (directions Nord-Sud et Est-Ouest) et une verticale (Figure 20).

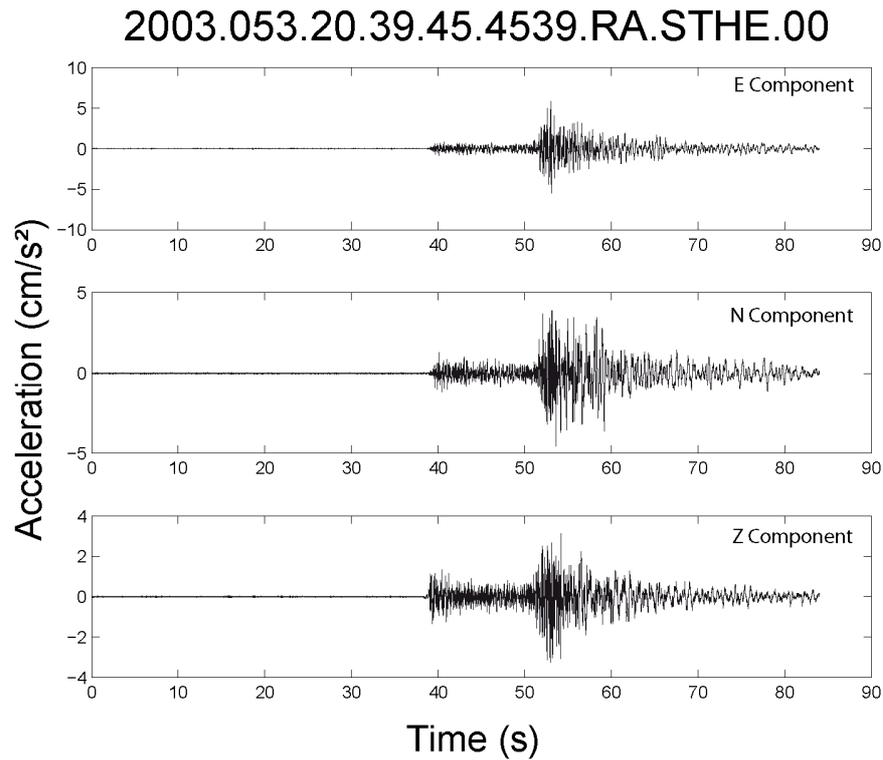


Figure 20: Exemple de signal accélérométrique trois composantes enregistré par la station STHE lors du séisme de Rambervillers (22/02/2003, $M_w=4.8$, $h=12$ km), à une distance épiscopentrale de 110km.

Bien que ces signaux soit d'excellente qualité et très peu bruités, un filtrage a été nécessaire afin de retirer la dérive instrumentale. Pour cela j'ai appliqué un filtre Butterworth passe haut de fréquence de coupure 0.5Hz. Puis j'ai intégré ces signaux afin d'obtenir des signaux trois composantes en vitesse. J'ai ensuite calculé le spectre de Fourier (Figure 21) et le spectre de réponse en accélération (Figure 22).

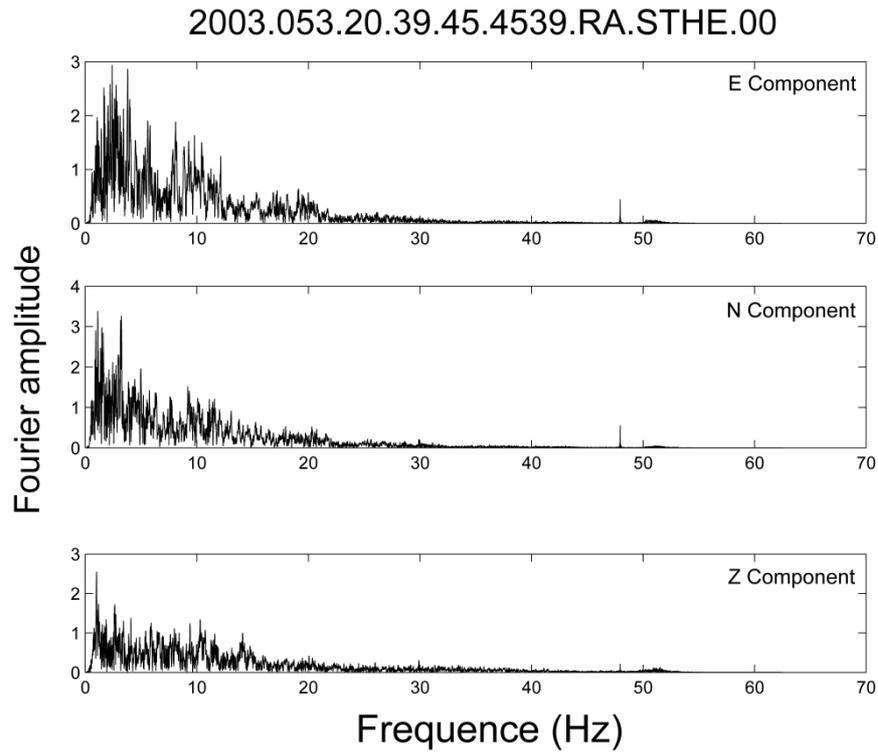


Figure 21: Exemple de spectre de Fourier pour un signal enregistré à la station STHE lors du séisme de Rambervillers, à une distance épacentrale de 110km.

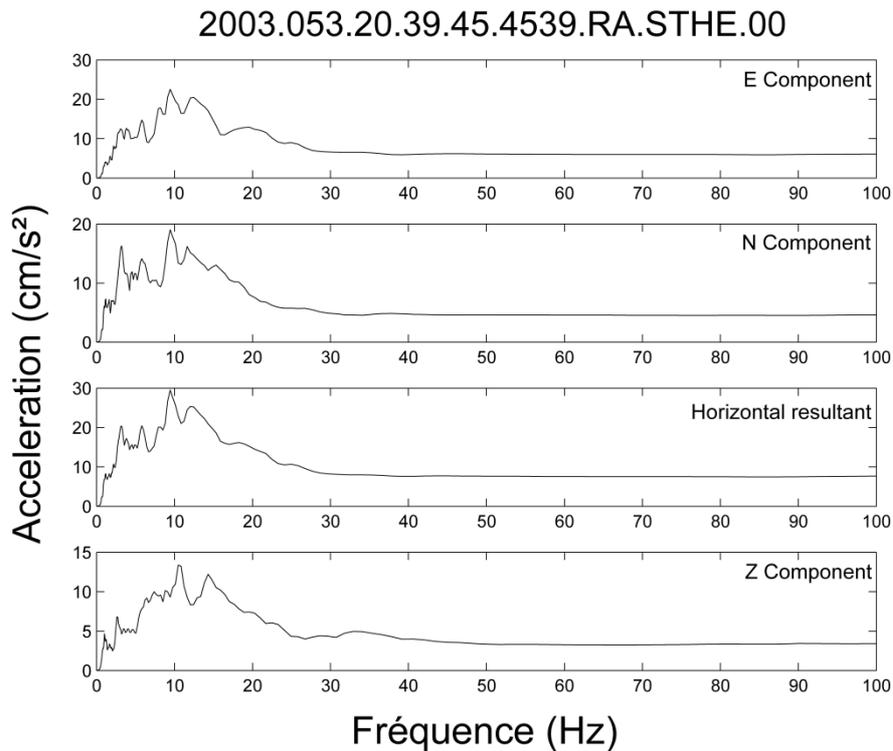


Figure 22: Exemple de spectre de réponse 3 composantes et résultante des deux composantes horizontales pour un signal enregistré à la station STHE lors du séisme de Rambervillers, à une distance épacentrale de 110km.

Cette dernière mesure, est généralement utilisée en ingénierie des structures, notamment dans le dimensionnement des ouvrages à caractère parasismique. Sa définition se trouve dans la section 1.3.2.2.1. Pour mémoire, le spectre de réponse s'apparente à la réponse qu'aurait un oscillateur à un degré de liberté (représentant une structure ou un bâtiment) sous une sollicitation sismique

(un accélérogramme). La période naturelle et l'amortissement de l'oscillateur sont identiques à ceux de la structure. Dans notre cas, j'ai considéré un oscillateur à un degré de liberté avec un amortissement de 5%.

3.1.4 ESTIMATION DES PARAMETRES INSTRUMENTAUX

A partir de ces nouveaux signaux et des signaux accélérométriques, j'ai déterminé plusieurs paramètres instrumentaux. Les deux premiers paramètres instrumentaux scalaires (PGA et PGV) sont classiquement utilisés par la communauté sismologique. Nous n'avons pas étudié le PGD car nos gammes d'intensité étaient trop faibles pour que ce paramètre soit significatif. De plus, le PGD est obtenu en intégrant deux fois l'accélération, ce qui induit un biais non négligeable, dû au bruit et à la gamme de fréquences, à nos valeurs de déplacement. Les deux autres paramètres (AI et CAV), sont surtout utilisés par les ingénieurs structure pour caractériser le potentiel destructeur d'un séisme (voir section 1.3.3).

Le Peak Ground Acceration (PGA) est l'accélération maximum du sol. Elle représente l'amplitude maximum de l'accélération et se lit sur l'accélérogramme.

Le Peak Ground Velocity (PGV) est la vitesse maximum du sol. Elle représente l'amplitude maximum de la vitesse et se lit sur le signal en vitesse.

La Vitesse Cumulée absolue (CAV pour Cumulative Absolute Velocity) est un paramètre calculé directement à partir de l'accélération en suivant les équations (4) et (5) de la section 1.3.3.1 :

Il existe deux façons de calculer le CAV. La façon classique (équation (4)) et une manière standardisée (équation (5)). (Bozorgnia et al, 2010). La valeur standardisée inclus une valeur seuil en accélération afin d'exclure les faibles accélérations non susceptibles de causer des dommages. Cependant, nos valeurs d'accélération sont presque toutes inférieures au seuil de 0.025g définie par l'EPR (Bozorgnia et al, 2010), rendant ainsi le calcul du CAV standardisé inutile. Les valeurs de CAV classiques ici calculées peuvent être fortement influencées par une série temporelle de longue durée contenant des accélérations (non dommageables) de faibles amplitudes rendant ainsi le paramètre relativement instable.

L'Intensité d'Arias, développée dans les années 1970 (Arias, 1969-1970), permet de mesurer le potentiel destructeur d'un séisme à partir de l'énergie des mouvements du sol dissipée par une famille de structures de fréquences propres variables. Comme le CAV, ce paramètre intègre la durée, l'amplitude et le contenu fréquentiel du signal. Il se calcule grâce à l'équation (6) de la section 1.3.3.2.

Cependant, l'AI est également influencée par le même phénomène que le CAV, ainsi à nos niveaux d'accélération les deux paramètres peuvent être instables. Cependant, j'ai choisi d'étudier leur corrélation avec les paramètres macrosismiques.

En plus de ces quatre paramètres scalaires, j'ai calculé le pseudo-spectre de réponse en accélération et en vitesse des signaux accélérométriques, respectivement PSA (Pseudo-

Acceleration Spectra) et PSV (Pseudo-Velocity Spectra), à partir des relations (2) et (3) de la section 1.3.2.2.1 :

Le PSA et le PSV ne diffèrent que du facteur ω . Par la suite nous allons étudier les corrélations entre les paramètres instrumentaux et macrosismiques. Comme expliqué précédemment, une homothétie ne change pas la valeur d'une corrélation. Ainsi, les corrélations seront les mêmes pour le PSA et le PSV. En conséquence, j'ai conservé le PSA pour la suite de l'étude.

J'ai estimé pour chaque station et chaque séisme cinq paramètres instrumentaux. Quatre sont appelés scalaires dans la suite de l'étude car ils sont ponctuels, bien que de nature très différente puisque les deux derniers sont des valeurs intégrales : PGA, PGV, CAV, AI. Le dernier paramètre, le PSA, sera appelé paramètre spectral car sa valeur change en fonction de la fréquence.

Dans la littérature, il existe deux façons de comparer les paramètres macrosismiques aux paramètres horizontaux du mouvement du sol. En effet, il est possible d'utiliser :

- La composante horizontale qui porte le PGA maximum et estimer les paramètres instrumentaux horizontaux à partir de cette composante
- La résultante des deux composantes horizontales.

Dans le second cas, la résultante horizontale est la norme euclidienne des deux composantes horizontales :

$$Rés H = \sqrt{(Ecomponent)^2 + (Ncomponent)^2} \quad (10)$$

J'ai testé les deux approches et choisi de privilégier l'approche par résultante horizontale. Ainsi, il s'agit de l'approche présentée dans l'article soumis au Journal of Seismology (paragraphe 3.2.2). Les résultats avec l'approche de la composante horizontale portant le plus fort PGA seront présentés dans la partie étude complémentaires paragraphe 3.3.2.

3.2 ARTICLE SOUMIS À JOURNAL OF SEISMOLOGY

3.2.1 RÉSUMÉ DE L'ARTICLE

Cette partie est composée d'un article soumis au Journal of Seismology (Lesueur et al., 2011). Il reprend les principaux résultats obtenus au cours de ces trois ans d'étude en présentant notamment la dépendance des corrélations à la fréquence.

Après une présentation des données accélérométriques et macrosismiques collectées sur trois séismes de l'Est de la France et de l'ouest de l'Allemagne, de magnitude $M_w \sim 4.5$, une étude de corrélation interne des réponses aux questions du formulaire macrosismique du BCSF a permis de mettre en évidence quatre paramètres macrosismiques. Ces paramètres, relatifs aux

« mouvements vibratoires des petits objets », aux « chutes et déplacements d'objets », aux « sons entendus » et au « ressenti personnel des témoins », viennent s'ajouter au paramètre macrosismique SQI (intensité macrosismique attribuée à chacun des questionnaires individuel sur l'échelle EMS-98). Cette partie de l'étude est reprise dans la section 2.1. La seconde partie de l'article présente les signaux accélérométriques et le traitement subi par ces derniers pour obtenir les paramètres de nocivité. Ce traitement est décrit plus en détail dans les sections 3.1.3 et 3.1.4. Enfin la troisième partie de l'article présente les résultats obtenus lors de l'étude des corrélations entre ces cinq paramètres macrosismiques et les paramètres instrumentaux (PGA, PGV, Intensité d'Arias, CAV et spectre de réponse). La partie *Single or statistically averaged macroseismic observations?* de l'article explique la méthodologie choisie pour comparer les paramètres instrumentaux aux paramètres macrosismiques, à partir de tests effectués sur les intensités macrosismiques. Plusieurs méthodes de regroupement ou d'isolation des intensités SQI ont été testées : moyenne arithmétique ou pondérée des SQI sur des cercles de 10 km autour des stations accélérométriques, mode, médiane, SQI la plus proche et intensité collective BCSF la plus proche de la station accélérométrique dans un rayon de 3km. Chacune de ces méthodes a été testée en calculant des corrélations avec les paramètres instrumentaux, représentées par la Fig VI de l'article. Les meilleurs résultats de corrélation sont obtenus lorsque les paramètres macrosismiques sont moyennés sur des surfaces circulaires de 10km de rayon autour des stations accélérométriques. La figure montre d'ailleurs que pour les deux types de moyenne des SQI (pondérée et arithmétique), le coefficient de corrélation est équivalent avec le PSA vers 7Hz à celui obtenu avec le PGV. Cela indiquerait que cette fréquence est caractéristique du PGV. Les résultats les plus importants se trouvent dans la partie *Correlations between the macroseismic and ground motion parameters*, Cette partie présente les résultats de corrélation entre les paramètres macrosismiques et les paramètres instrumentaux pour les trois séismes confondus. Ces corrélations représentent le taux de ressemblance entre les courbes représentant en chaque station pour chaque séisme, les paramètres macrosismiques et instrumentaux. La Figure 23 illustre ce taux de ressemblance pour les paramètres SQI et PGV.

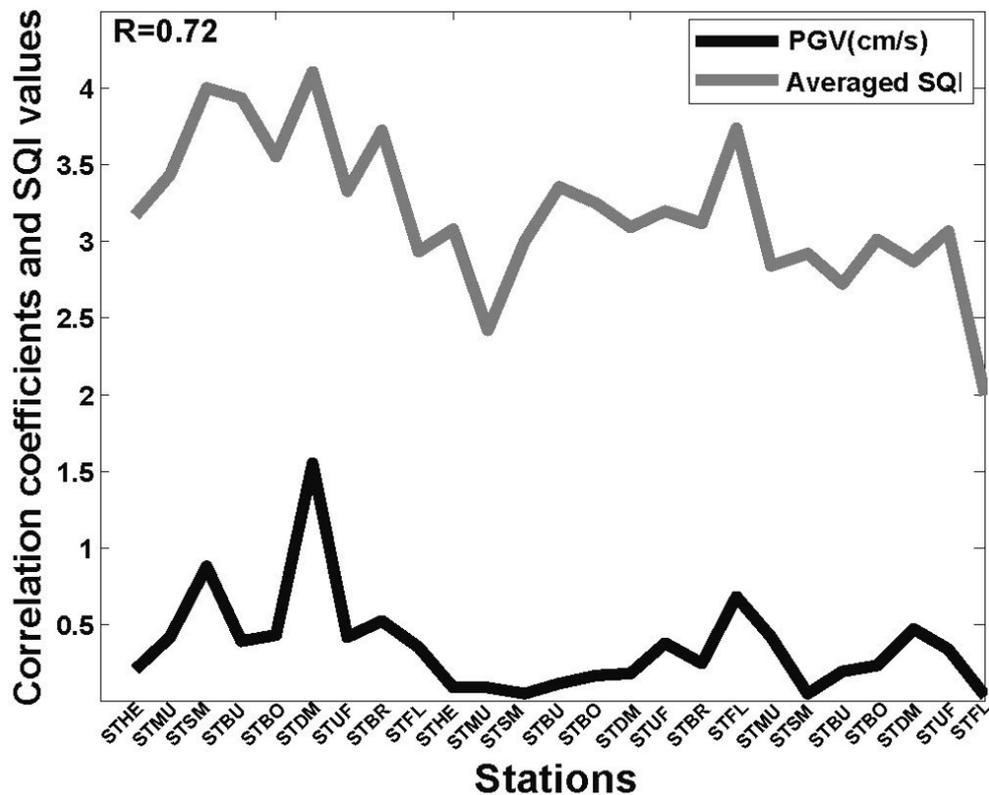


Figure 23: Signification de la corrélation à partir d'une paire de paramètres instrumentale (PGV) et macrosismique ($\langle SQI \rangle$). LA courbe grise représente la moyenne des SQI sur les cercles de 10km autour de chaque station accélérométrique pour chacun des 3 séismes La courbe noire représente le PGV horizontal correspondant au PGV du signal horizontal portant le maximum du PGA (voir section 3.3.1) à chaque station Une régression linéaire entre les $\langle SQI \rangle$ et les PGV donnent la corrélation de $R=0.72$, montrée sur la Figure 29: Corrélation entre les paramètres macrosismiques et la composante horizontale du mouvement du sol qui porte le PGA maximum. Corrélations des paramètres macrosismiques avec le PSA (à gauche) et avec les paramètres scalaires du mouvement du sol (à droite) Figure 29.

Chaque point sur les courbes a) et b) de la Figure 24 correspond au taux de ressemblance entre les deux paramètres correspondant à la corrélation.

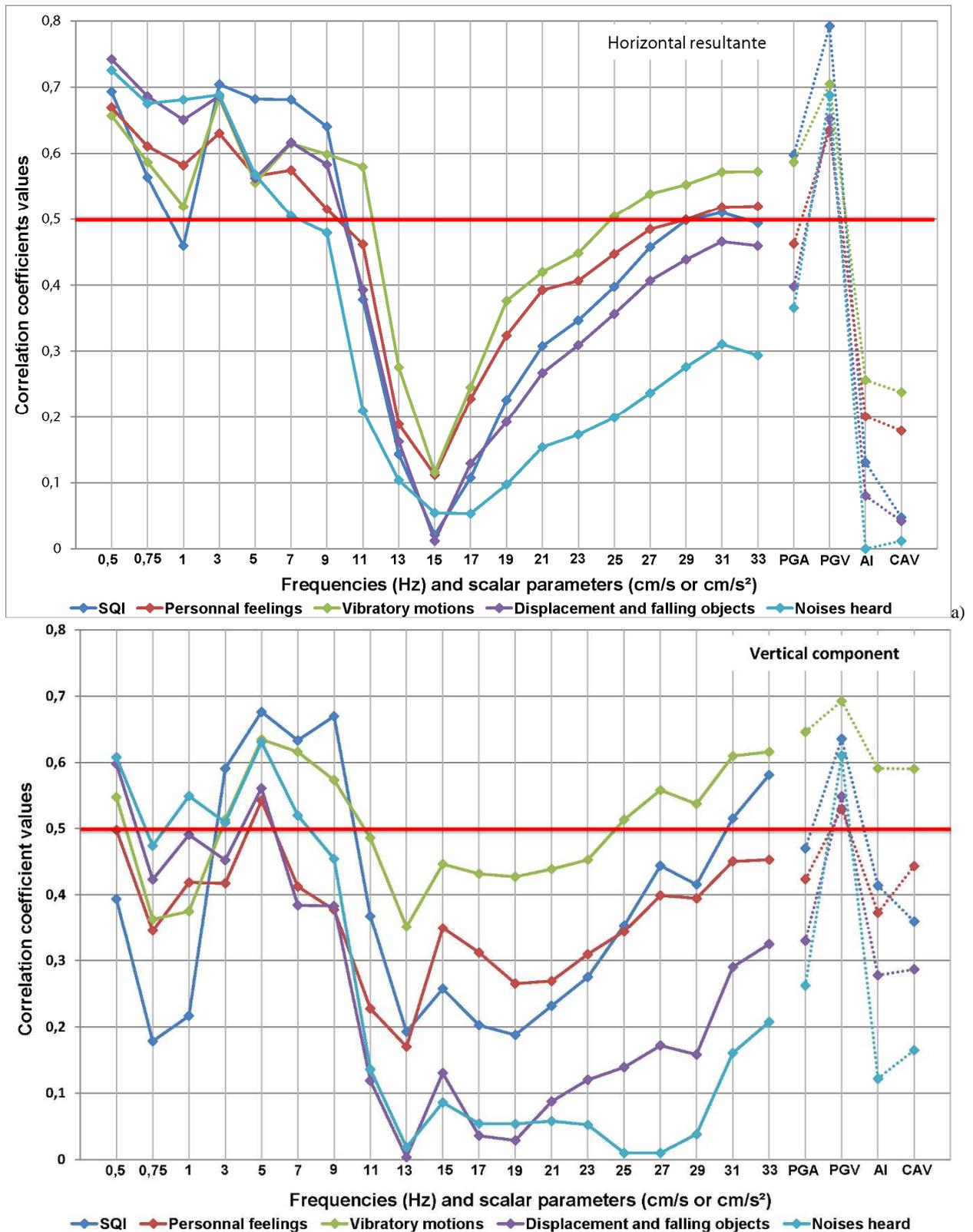


Figure 24: Coefficient de corrélation R entre les paramètres instrumentaux et macrosismiques dans des cercles de 10km autour des stations accélérométriques pour les trois séismes confondus. a) Corrélations avec la résultante des deux composantes horizontales. b) Corrélations avec la composante verticale. La partie droite de la figure montre les coefficients de corrélation entre les paramètres macrosismiques et les paramètres instrumentaux scalaires (PGA, PGV, AI, CAV). La partie gauche de la figure montre les coefficients de corrélation entre les paramètres macrosismiques et les spectres de réponse entre 0.5 et 33Hz. La ligne rouge est la corrélation seuil de $R=0.5$ à partir de laquelle la corrélation devient significative.

Sur la partie droite des figures, les corrélations entre les paramètres macrosismiques et instrumentaux pour nos niveaux d'intensité compris entre II et V sur l'EMS-98, à la fois pour la composante verticale et la résultante horizontale, montrent que le PGV est le paramètre instrumental qui présente les plus fortes corrélations quelque soit le paramètre macrosismique; la plus forte corrélation étant obtenue avec les SQI ($R > 0.7$). En revanche, le CAV et l'intensité d'Arias ne présentent pas de corrélation avec le macrosismique. Cela peut s'expliquer par le fait que ces deux indicateurs sont généralement utilisés dans le cadre de pays à sismicité importante. Concernant le CAV, la mesure classique ici utilisée n'est pas stable, cependant la mesure standardisée ne peut être utilisée car le seuil d'accélération à partir duquel elle est définie n'est pas atteint par nos signaux. Bien qu'il n'y ait pas de seuil d'accélération minimum pour l'Intensité d'Arias, cette mesure est entachée de la même instabilité que le CAV.

Concernant le côté gauche des figures, les corrélations avec les spectres de réponse présentent une claire dépendance en fréquence sur une gamme de fréquences allant de 1 à 33Hz. Les composantes verticales et horizontales sont significativement corrélées avec le macrosismique entre 3 et 10 Hz, bien que la résultante horizontale présente de meilleures corrélations que la composante verticale. Cette gamme de fréquences est celle qui contient le maximum de l'énergie du mouvement sismique. Elle est aussi caractéristique des fréquences propres de la plupart des bâtiments. De plus, 98% des témoins ayant répondu aux questionnaires se trouvaient à l'intérieur des bâtiments. Ainsi, ces fortes corrélations pourraient être expliquées par une amplification du mouvement du sol par les bâtiments. Cependant, cette hypothèse est difficilement vérifiable par son opposé. En effet, les paramètres macrosismiques, y compris les SQI dans nos gammes d'intensités sont liés à des paramètres observables (vibrations des petits objets, mouvement du mobilier), qui ne le sont pas lorsque les témoins se trouvent à l'extérieur des bâtiments. En conséquence, il est seulement possible d'émettre l'hypothèse que les bâtiments amplifient le mouvement du sol. Entre 10 et 25Hz, une chute drastique des corrélations entre paramètres macrosismiques et instrumentaux est observée pour la résultante horizontale du mouvement du sol. Le même phénomène est observé pour la composante verticale, mais la chute de corrélation est moins drastique, ce qui pourrait laisser sous entendre que les témoins sont plus sensibles au mouvement vertical entre 10 et 25Hz qu'au mouvement horizontal. Une explication possible à ce phénomène est le couplage de la diminution d'énergie du signal sismique au dessus de 10Hz (voir Figure 21 et Figure 22), avec la perte de sensibilité des témoins par rapport au mouvement sismique, à cause d'un haut niveau de bruit anthropique autour de 15Hz. L'absence éventuelle d'amplification due aux bâtiments peut également expliquer cette diminution de corrélation. Enfin au-delà de 25Hz, les valeurs de corrélation remontent pour revenir à des valeurs de corrélation significatives au-delà de 30 Hz pour certains paramètres macrosismiques : les SQI moyennes et les mouvements vibratoires pour les deux composantes, le ressenti personnel en plus pour la résultante horizontale. Une hypothèse avancée pour cette remontée des corrélations est que les fréquences au delà de 25Hz seraient caractéristiques d'harmoniques de la fréquence de résonance des bâtiments. Cela entrainerait comme dans le cas des fréquences de résonances en dessous de 10Hz, une amplification du mouvement du sol due aux bâtiments. Une autre hypothèse serait celle de se trouver dans le domaine de fréquences de vibration des petits objets. Ces corrélations avec les paramètres spectraux permet également de conclure qu'aucun

paramètre macrosismique, en dehors éventuellement des petits objets, n'est caractéristique d'une fréquence particulière.

Dans la discussion, ces intensités macrosismiques observées sont comparées à celle prédites à partir de nos PGA et PGV (Fig. VII), par des relations paramètres de mouvement du sol-intensité publiées par différents auteurs. Contrairement aux données obtenues à partir des relations PGA-intensités, les intensités obtenues à partir des relations PGV-intensité s'accordent assez bien avec les intensités observées, ce qui est confirmé par la Figure 25. Cette dernière montre la concordance entre le jeu de données observées (SQI vs PGV) pour cette étude et les jeux de données utilisés dans d'autres études.

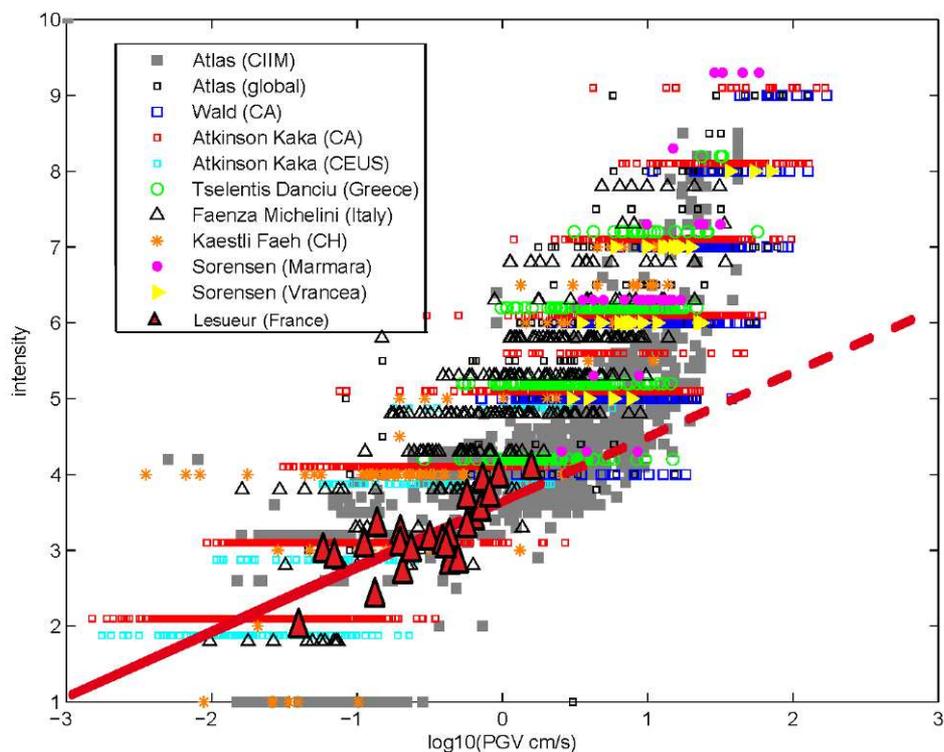


Figure 25 : Compilation des jeux de données PGV-intensités utilisés dans la présente étude (triangles rouges) et dans d'autres études publiées dans la littérature (D'après Cua et al, 2010)

Remarque :

La partie b de Fig. VII montre que les intensités observées se trouvent systématiquement en dessous des droites de prédiction PGA-intensités. Cela est confirmé par la Figure 26, où les données observées dans cette étude (triangles rouges) se trouvent décalé vers le bas par rapport à la tendance des jeux de données utilisés dans d'autres études.

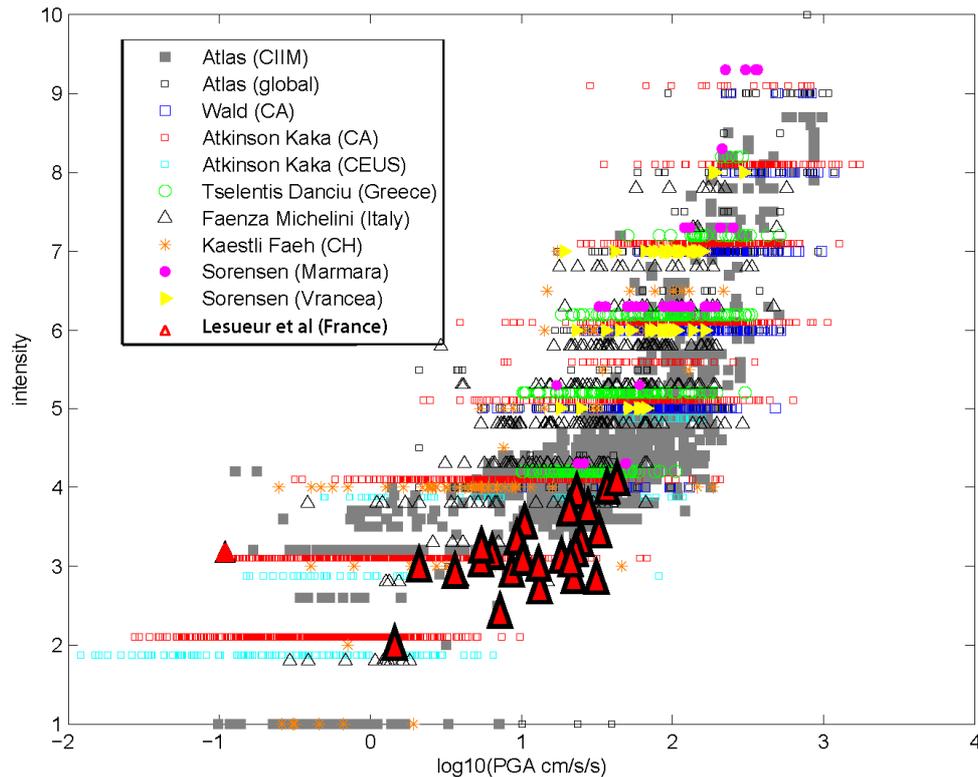


Figure 26: Compilation des jeux de données intensités-PGA utilisés dans la présente étude (triangles rouges) et dans d'autres études publiées dans la littérature (D'Après Cua et al, 2010)

3.2.2 ARTICLE (LESUEUR ET AL., 2011):

Linking ground motion measurements and macroseismic observations in France: a case study based on the RAP (accelerometric) and BCSF (macroseismic) databases

Abstract

Comparison between accelerometric and macroseismic observations is made for three Mw~4.5 earthquakes of eastern France between 2003 and 2005. Scalar and spectral instrumental parameters are processed from the accelerometric data recorded by nine accelerometric stations located between 29km and 180km from the epicentres. Macroseismic data are based on French Internet reports. In addition to the individual macroseismic intensity, analysis of the internal correlation between the encoded answers highlights four predominant fields of questions, bearing different physical meanings: 1) "Vibratory Motions of small objects", 2) "Displacement and Fall of Objects", 3) "Acoustic Noise", and 4) "Personal Feelings". Best correlations between macroseismic and instrumental observations are obtained when the macroseismic parameters are averaged over 10km radius circles around each station. Macroseismic intensities predicted by published PGV-intensity relationships quite agree with our observed intensities, contrary to those based on PGA. The correlations between the macroseismic and instrumental data, for intensities between II and V (EMS-98), show that PGV is the instrumental parameter presenting the best correlation with all the macroseismic

parameters. The correlation with response spectra, exhibits clear frequency dependence over limited frequency ranges. Horizontal and vertical components are significantly correlated with the macroseismic parameters between 1 and 10Hz, a range corresponding to both natural frequencies of most buildings and high energy content in the seismic ground motion. Between 10 and 25Hz, a clear lack of correlation between macroseismic and instrumental observations is observed while beyond 25Hz, the correlation coefficient increases, approaching that of the PGA correlation level.

Keywords: Macroseismic intensity, Peak Ground Motion, response spectra, correlation, on-line questionnaire, strong motion network

Introduction

Many relationships have been established between macroseismic intensities and ground motion parameters. Before 1999, most of them were based on macroseismic intensities related to a city, or a zip code area (e.g. Murphy and O'Brien 1977, Trifunac and Brady 1975 or Gutenberg and Richter 1956, Wald 1999a). Since the early 2000, intensities based on individual testimonies are more and more used, thanks to the numerous earthquake witnesses answering internet questionnaires. Wald et al (1999a-c) promoted this new approach based on the internet questionnaire "Did you feel it?". Similar procedures are now implemented in several countries (Musson and Henni 1999; De Rubeis et al. 2009; Atkinson and Wald 2007; Cecic and Musson 2004).

The way macroseismic intensities are commonly estimated depends on the source of data: collective intensities (Souriau 2006; Trifunac and Brady 1975, Wald et al 1999a), tagged intensities (Boatwright et al. 2001), and intensities from individuals (Atkinson and Kaka 2007). It also depends on the processing method: isoseismal interpolation (Souriau 2006; Boatwright et al. 2001; Dewey et al. 1995), averaging intensity over a zipcode area (Wald 1999; Atkinson and Kaka 2006). In the present paper we analyse a large set of individual macroseismic data collected by the Bureau Central Sismologique Français - BCSF. In this study different processing methods are explored. Concerning the instrumental data, we use accelerometric data recorded by the French Accelerometric Permanent Network (RAP)*¹³.

Part of our goal is to determine the best method when processing internet intensities and associating them with instrumental ground motion data. We also propose a more in-depth comparison between macroseismic observations and ground motion parameters by examining groups of answers from the questionnaires (named hereafter macroseismic parameters). The aim of this comparison is double: 1) check if macroseismic parameters other than the intensity may be better correlated with instrumental parameters and 2) analyse the frequency range where the correlation is maximum.

In the following, we first analyse the answers to the BCSF macroseismic questionnaires and we review the way accelerometric records are processed to estimate the engineer indicators

¹³ www.rap.obs.ujf-grenoble.fr

of the ground motion, namely: “Peak Ground Acceleration” - PGA, “Peak Ground Velocity”- PGV, “Cumulative Absolute Velocity”- CAV, “Arias intensity”- AI, “Pseudo-Spectral Acceleration”-PSA, and “Pseudo-Spectral Velocity”- PSV. In the second part of the paper, we test different ways of associating ground motion observations and macroseismic parameters and compute correlation coefficients for each of them.

Data analysis and pre-processing

Nine RAP stations located at distances less than 180 km from the epicentres recorded three earthquakes which occurred in the north east of France between 2003 and 2004 (Fig. 1): Rambervillers, 02/22/2003, $M_W=4.8$; Roulans 02/23/2004, $M_W=4.4$; and Waldkirch 12/05/2004, $M_W=4.6$. A large number of testimonies, either collective (i.e. by the city officers) or individual (i.e. by inhabitants), were collected by BCSF within this distance range (Table I and Fig. 1).

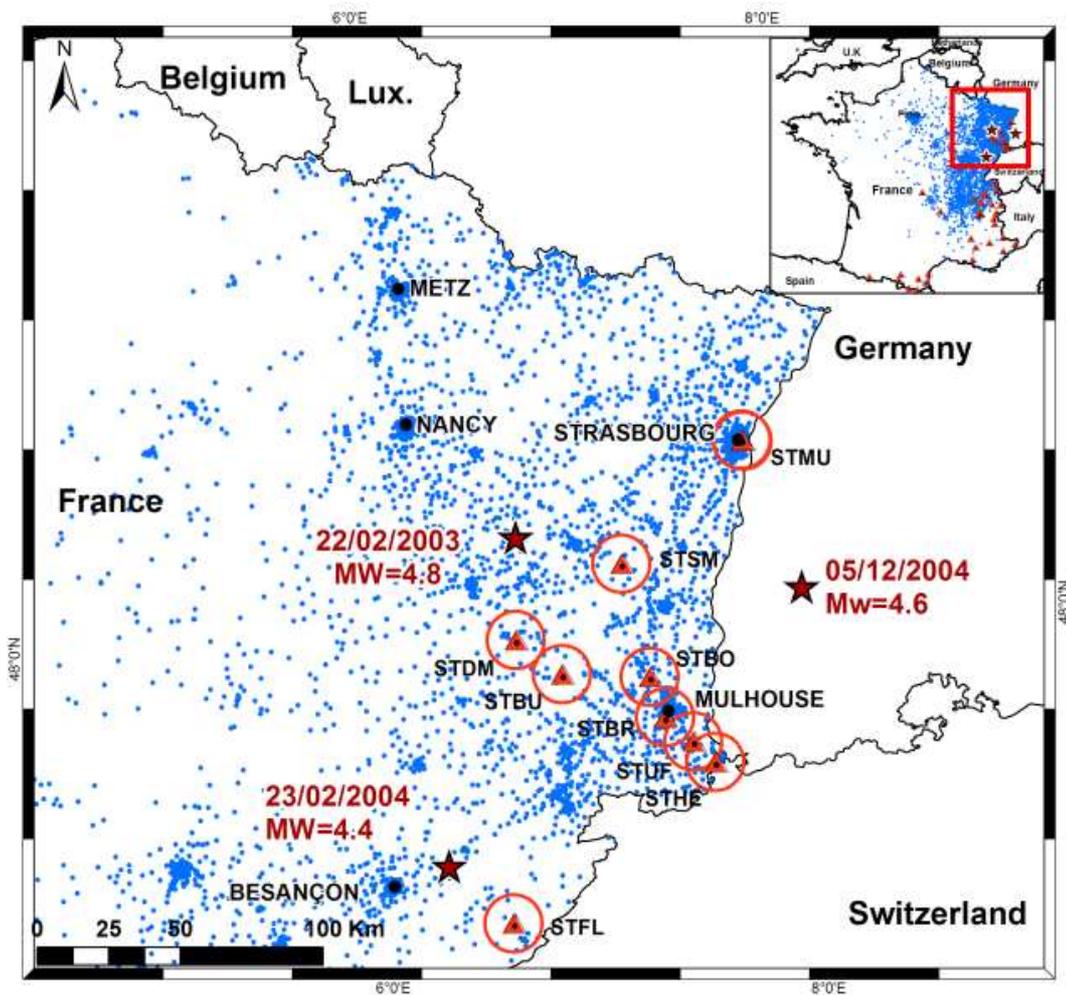


Fig. 1: Map of the study area. Red stars show the epicenters of the Rambervillers (22/02/2003), Roulans (23/02/2004) and Waldkirch (05/12/2004) earthquakes. Blue dots indicate the location of the individual testimonies. The red triangles show the location of the of the 9 accelerometric stations, and the red circles are drawn with a 10km radius around each station

Earthquake	Rambervillers	Roulans	Waldkirch
Date	22/02/2003	23/02/2004	05/12/2004
Time	20h41 TU	17h31 TU	01h52 TU
Mw	4.8	4.4	4.6
Depth (km)	12	15	9
Focal mechanism	normal slip	reverse slip	strike slip
Individual testimonies	10662	5175	1945
Individual testimonies over 10km radius circles around station			
STHE	103	22	-
STMU	1061	198	488
STSM	56	7	19
STBU	60	16	18
STBO	95	95	63
STDM	165	29	21
STUF	84	58	50
STBR	432	172	-
STFL	15	15	1

Table 1: Source parameters and number of testimonies for the three earthquakes and 10km around each station. Depth, focal mechanisms and magnitude are from Delouis et al. (2009), Hanned (2007), Cara et al. (2007), Baer et al. (2005) and Brenn et al. (2006). The number of individual testimonies comes from the BCSF database

Estimating macroseismic parameters:

Two types of observations, based on individual and collective questionnaires, are available in France. Collective questionnaires are processed independently by both BCSF and the “Bureau de Recherches Géologiques et Minières” (BRGM), following the EMS-98 macroseismic scale (Grünthal 1998; Cara et al. 2005) for the former office and the MSK-64 macroseismic scale (Medvedev and Sponheuer 1969) for the latter. The collective questionnaires are filled in by the city officers and concern the observed effects over the whole city zone. Consequently, a statistical description of effects is available. Individual questionnaires are collected by BCSF since 2000 through an online questionnaire*¹⁴. They are filled in by individuals. Only when damages to buildings occur, is a field survey conducted to complete the information collected on the website. The answers to the individual questionnaires reflect what a single person feels or sees in his/her close environment. For intensities lower than V, the only difference between the individual and collective questionnaires lies in the description of personal feelings. Otherwise there is no difference for the most objective observations related to the effects on objects and furniture. The intensity value estimated for each individual questionnaire is hereafter referred to as, the Single Questionnaire Intensity (SQI), and it is referred to as intensity <SQI>, when processed in a statistical way by grouping the SQI values.

¹⁴ www.franceseisme.fr

For assessing one SQI value, answers to each question of the form is first converted into an intensity value, or to the range of intensities which is the most likely according to the description of the EMS-98 degree. For example, SQI=III for a weak vibration or oscillation of an object; SQI≥V for a report on “Fall of Objects” etc. Inspection of all the SQI values attached to a single form then allows the analyst to issue his final SQI value by taking the median of the SQIs related to each filled-in question on the form. When the person answering the questionnaire is located on the 3rd or 4th floor, the final SQI is reduced by one degree, according to the EMS-98 rules. Only SQI fulfilling minimum quality criteria are eventually kept in the BCSF data basis. These SQI quality criteria are mainly based on the coherency of answers to the different questions. Furthermore, except for intensity level II, it is considered as unreliable and is not kept in the data basis when the SQI value comes from the answer to one question only. Note that the answers related to a questions field may cover overlapping intensity ranges. For example, questions related to personal feelings cover intensities between II and VIII, effects on objects cover the range [III-VII], effects on furniture cover the range [III-VIII], and effects on buildings are restricted to intensities larger or equal to V according to the EMS-98 rules.

Individual questionnaire have slightly changed between 2003 and 2004. Thus two different versions of the individual questionnaire are analysed here. Individual questionnaires (Cara et al. 2007*¹⁵) include fifty questions covering effects felt by people, effects on objects, damages on structures, and acoustic noises. The questions related to damages on structures are not considered in this study because damages were negligible for the three earthquakes investigated here.

When a witness gives his/her address, an accurate localization of his/her report is made. If not, the testimony is located at the centre of the city (church or city hall). Unfortunately, most of the witnesses do not give their complete address. Only 31% of the Rambervillers testimonies 43% for the Roulans and 38% for Waldkirch are accurately located. More precisely, for these three earthquakes, 4.8%, 12.8% and 11.3% of witnesses gave the street number of their house, while 26.3%, 30.6% and 27% of them, respectively, only indicate the street name.

To facilitate the analysis of the macroseismic questionnaires, the 30 questions which are relevant for evaluating intensities lower than V have been grouped into a smaller number of questions fields. Our first idea was to gather the questions into groups having similar physical meanings, such as the different kind of vibration of small objects for example. In order to gather the questions in a more objective way, we then computed the internal correlation coefficient between answers to the different questions after encoding them between 1 and -1. Binary answers such as “yes/no” were encoded “1/-1”. Ternary answers such as “strong/medium/weak” were encoded “0.99/ 0.66/0.33” respectively. When a question calls for

¹⁵ http://www.seisme.prd.fr/donnees/publi/2003-2005/OBS_SISMO_2003-05_W.pdf, pp177-178

more than three possible answers, the effects are regularly encoded between 0.99 and 0.33. "No answers" is encoded 0, and the SQL values [I-VI] are encoded 1 to 6.

Internal correlation between the encoded answers to a pair of question X and Y has been evaluated by computing the correlation matrix:

$$R_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

Where, X_i and Y_i are the answers of the witness "i" and N is the number of testimonies related to the pair (X, Y). Questions of no interest for grouping the questions related to the ground motion, such as those related to the location of the witnesses for example, have been removed from the computation of the correlation matrix. At the end, 24 out of 30 questions have been kept for computing the correlation coefficients R_{XY} . Note that any linear transformation applied to the series of answers related to one question does not change the values of the correlations coefficients R_{XY} .

code G7	code G9	Questions of both questionnaires	Possible answers	encoding
P1		The Earthquake was felt ?	yes/no	1/-1
P2	P1	Did you personally felt it?	yes/no	1/-1
P3		Were you inside a house?	yes/no	1/-1
P4		Were you inside a building?	yes/no	1/-1
	P7	Were you inside a house or inside a building?	house/ building	0,33/0,99
P5	P8	Number of floor of the building?	number of the floor	number of floor
P6	P5	At what floor were you?	RC/1_2/3_4/5+	0.33/0.66 /0.99
P7		Were you outdoor?	yes/no	1/-1
	P4	Were you inside or outside	Inside/outside	0,33/0,99
P8	P6	Activity ?	sleeping/ awaken at rest/ sitting activity/ standing activity	0.33/0.49 /0.66/0.99
P9	P9	The quake was felt like a sway?	strong/medium/weak	0,99/0,66 /0,33
P10	P10	The quake was felt like a vibration?	strong/medium/weak	0,99/0,66 /0,33
P11		the movement was ?	Horizontal/vertical	0,33/0,99
P12	P11	The quake woke me up?	yes/no	1/-1
P13	P14	The quake made me feel?	worried/frightened/ terrified	0.33/0.66 /0.99
P14	P12	I run out the building?	yes/no	1/-1
P15	P13	I lost my balance	yes/no	1/-1
O1		Oscillation of small hung up objects (frames, ceiling light)	strong/medium/weak	0.99/0.66 /0.33
O2	O2	Vibration of small objects (porcelain, glasses, plates, bibelots)?	strong/medium/weak	0.99/0.66/0.33
O3	O3	Tremble of light furniture (chair, night tables, etc?)	strong/medium/weak	0.99/0.66/0.33
O4	O4	Vibration of doors, windows, etc?	strong/medium/weak	0.99/0.66/0.33
O5	O5	Crack of beam, floor and furniture?	strong/medium/weak	0.99/0.66/0.33
O6	O6	Oscillation of liquids in containers?	yes/no	1/-1
O7	O7	Overflowing of liquids in full containers?	yes/no	1/-1
O8	O8	Opening and shutting windows and doors?	yes/no	1/-1
O9	O9	Breakage of objects (frames, glass, porcelain, etc), windows?	yes/no	1/-1
O10	O10	Moving or fall of instable or badly hung up objects?	Moving or fall	0.33/0.99
O11	O11	Moving or fall of light furniture (bed, chair, night table)?	Moving or fall	0.33/0.99
O12	O12	Moving or fall of heavy furniture (cupboard, buffet, etc)?	Moving or fall	0.33/0.99
E1		The rumble looked like an underground or aerial rumble?	strong/weak	0.99/0.33
E2		The rumble looked like a clap of thunder, an explosion?	strong/weak	0.99/0.33
	E2	The rumble looked like a clap of thunder?	yes/no	1/-1
	E3	The rumble looked like an explosion?	yes/no	1/-1

Table II: Synthesis of the two generations of macroseismic BCSF questionnaires. The 2 first columns gives the question code, the third column gives the questions, the fourth column gives the possible answers and the last column shows the way answers are encoded between -1 and 1.

Some questions can be put aside for several reasons. We deal with three moderate earthquakes, for which questions P14 (or P12 for Gen 9 form), P15, O08 and O09 (run out the building, lost balance, opening and closing doors and windows, breakage of object and windows) are not relevant (see Table 2).

Moreover, two out of the three earthquakes occurred during day time making question P12 (people awaken by the quake) inappropriate. Furthermore, some questions are related to

visual observations such as presence of liquids (006 and 007) but it is not obvious that people reporting were in presence of the observables. A majority of "no" answer (quoted -1) while the shaking is strong, leads to a negative correlation coefficient.

Whether the witnesses are located on the ground floor, the 1st -2nd floor or the 3rd-4th floor, we have checked the correlation coefficients R_{XY} are similar, showing that location of the witnesses inside the building has no influence on the computation of the correlations. Furthermore, note that the testimonies from witnesses located higher than the 4th floor were not taken into account (EMS-98 recommendations, Grünthal 1998).

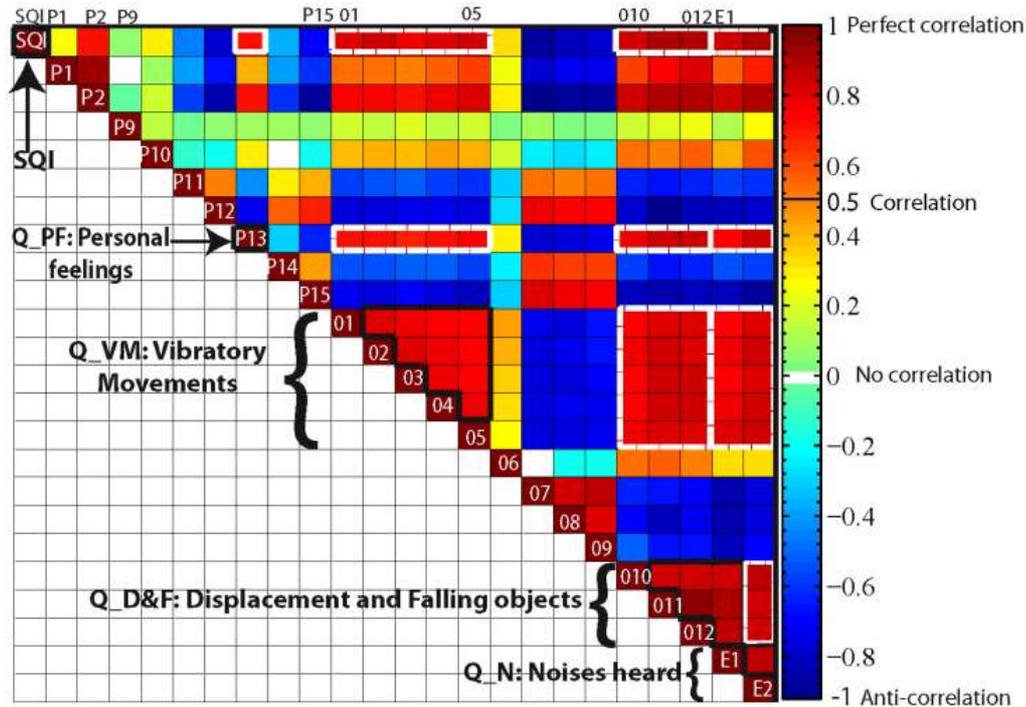


Fig. II: Internal correlation matrix for the 10662 individual questionnaires collected after the Rambervillers, 2003 earthquake. Each square represents the correlation coefficient between the answers to a pair of questions. Three groups appear with high internal correlation: Q_VM , $Q_D\&F$ and Q_N . The item Q_PF is correlated with the three groups. Note that the items of the 3 groups together with Q_N are all correlated with the Single Questionnaire Intensity SQI (1). The matrices for the Waldkirch, 2004, and Roulans, 2004, earthquakes present very similar patterns

Based on the correlation matrix shown in Fig.II, groups of questions for which the answers are highly correlated between them, and are also well correlated with the SQI , can be identified. The final grouping of questions has been made when they are both mutually correlated and physically related to some possible common source of shaking (e.g. effects on small and heavy objects are not in the same groups). Four questions fields having distinct physical meanings and with mutually correlated answers may be proposed:

- Q_VM : Vibratory motions ($0.7 < R < 0.9$)
- $Q_D\&F$: Displacement and fall of Objects ($0.8 < R < 0.9$)
- Q_N : Acoustic Noises ($0.6 < R < 0.8$)
- Q_PF : Witness' personal feeling (correlation coefficient with other groups $0.7 < R < 0.85$)

The fourth "group" (Q_PF), restricted to a single question, has been kept isolated due to its very different nature, dealing with the subjective manner a witness feels the earthquake. Note also that the answers to the questions belonging to these four groups present a high

correlation with the SQI values, not surprisingly since macroseismic intensity is an overall figure of all the reported effects. Thereafter, these four question fields, together with SQI, are referred to as the five “macroseismic parameters”. The questions P1 and P2, (Was the quake felt? Did you personally feel it?), are also well correlated with these five groups, but they are not associated with a question field since they do not add any information on the ground shaking itself. Note furthermore that there are very few “no” answers to question P1, and P2 bears more information on the quality of the report than on the shaking itself.

Estimating the ground motion parameters

Records from the nine RAP stations located in the East of France are the basis of our instrumental observations. The Rambervillers and Roulans earthquakes are recorded by the nine stations while only seven recorded the Waldkirch 2004 earthquake. In order to remove the low-frequency noise which could cause spurious signal in velocity estimates, the records were filtered with a 2-order Butterworth high-pass filter with a 0.5 Hz cut off frequency. An example of 3-component RAP accelerograms is displayed on Fig.III, together with the three component Fourier spectra and three component velocity spectra. In this study horizontal PGA, PGV, PSA, PSV, CAV and AI ground motion parameters are estimated on the basis of the Euclidian norm of the two horizontal components of motion:

$$\text{Horizontal Resultant} = \sqrt{(\text{Ecomponent})^2 + (\text{Ncomponent})^2} \quad (2)$$

Although CAV, CAV_{STD} and AI are mainly used by structural engineers to characterize the destructive potential of an earthquake, an attempt is made here to explore their correlation with macroseismic parameters for lower levels of intensity. The following definitions of CAV (normal and standardized) (Campbell and Bozorgnia, 2010) and AI are computed:

$$CAV = \int_0^T |a(t)| dt \text{ in cm/s or g/s units} \quad (3)$$

$$CAV_{STD} = \sum_{i=1}^N H(PGA_i - 0.025) \int_{i-1}^i |a(t)| dt \quad \text{with } H(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$AI = \frac{\int_0^{\infty} a^2(t) dt}{2g} \text{ in cm/s units} \quad (5)$$

As our PGA values are mainly below 0.025g we could not compute CAV_{STD} (Campbell and Bozorgnia 2010). Thus, the CAV values compute here using the classical formulation may be overly influenced by a time series of long duration that contained small-amplitude (non damaging) accelerations, making this parameter quite instable.

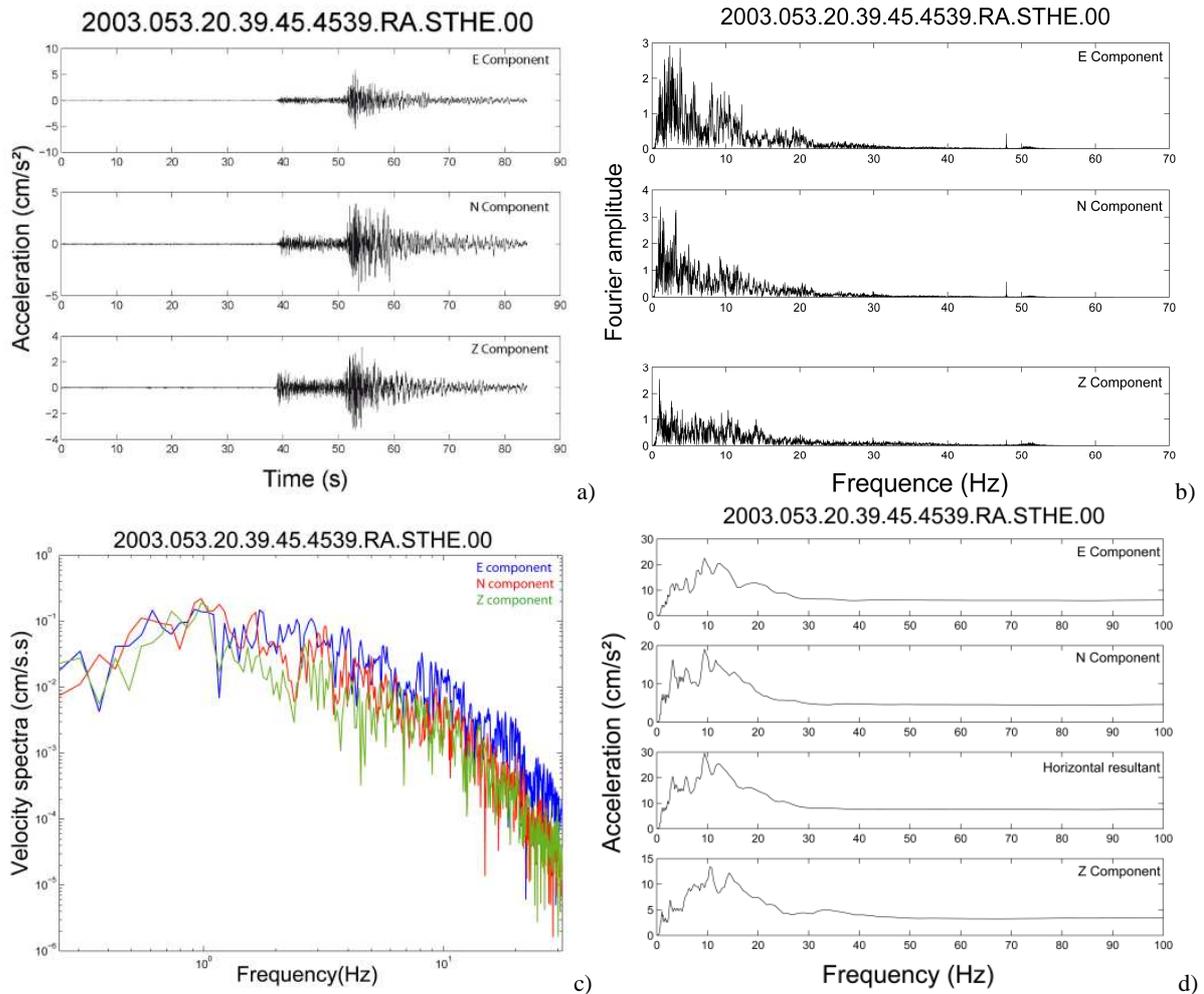


Fig. III: Example of instrumental observation of the ground motion (Rambervillers earthquake at the RAP station STHE): a) Three component accelerometric records, b) three component Fourier Spectra, c) three component velocity spectra and d) three component response spectra and Euclidian Norm horizontal resultant of response spectra of STHE

Associating macroseismic and ground motion parameters

Single or statistically averaged macroseismic observations?

Associating macroseismic and instrumental observations at sites where instrumental and high quality macroseismic data are both available is rarely possible. Indeed, the density of accelerometric stations is often much lower than the density of testimonies in a populated area, and the reverse may be true in less inhabited areas. In order to address the sensitivity of macroseismic and instrumental parameter association, first we compared the closest collective and individual macroseismic observation within a distance less than 4km from the accelerometric station. In order to get statistically more robust estimates of the macroseismic parameters, we tested a second approach that considered averages of the macroseismic parameters taken inside circular surfaces around each station.

In an ideal case, the first approach should only consider accelerometric stations and testimonies located on sites with identical geological conditions. Witnesses should also be located on the ground floor in order to minimize the effect of oscillation of the building.

Unfortunately, such a situation is not frequent and we had to extend our search of closest testimonies by relaxing some of the above conditions. In decreasing order of priorities, we kept the testimonies: 1) located on the same geological layer as the accelerometric station (compulsory); 2) as completely filled in as possible; 3) as close as possible to the station; 4) located if possible on the ground floor, if not 1st-2nd floor, but not 3rd-4th floor; 5) located at the street address and, if not, at the city centre. Similar approach with collective intensities was followed by Wald (1999a; 1999b; 1999c) who decided, for example, to compare instrumental parameters with the nearest intensity observation within 3km of the station but without precise consideration of soil condition.

In our study, a simple classification of site conditions, can be proposed based on a sediment/rock distinction and taking into account both Régnier et al. (2010) site conditions fixed according to the Eurocode 8 and the geological information from the BRGM 50 000th map (Table III). Except for station STSM, reports are mostly located on the same soil as the station; this makes the above condition 1) fulfilled for most sites.

RAP Station	Location	Lat	Long	Alt (m)	Instrument type	Classification EC8 (Régnier et al 2010)	Classification Lesueur
STMU	Strasbourg-Musée	48,584	7,765	135	CMG-5T	A-B	Sediment B
STSM	Raenthal (Echery)	48,22	7,16	580	Episensor	A	Rock A
STDM	Dommartin-lés-Remiremont	48	6,644	400	CMG-5T	E	Sediment E
STBU	Bussang	47,885	6,851	610	CMG-5T	E	Sediment E
STBO	Bollwiller	47,86	7,26	240	Episensor	A	Rock A
STFL	Fournets-Luisans	47,112	6,562	910	CMG-5T	A	Rock A
STUF	Uffheim	47,649	7,444	275	Episensor	B	Sediment B
STBR	Brunstatt	47,73	7,32	250	Episensor	B	Sediment E
STHE	Hésingue	47,58	7,54	275	Episensor	E	Sediment E

Table III: RAP accelerometric stations used in this study: locations and instruments and site conditions.

In the second approach we have considered circular surfaces that contain a statistically significant number of testimonies. A minimum of 15 testimonies was chosen in the second approach. To be sure that the arithmetic mean was furthermore the best estimator, we have compared the arithmetic mean of the SQI with their weighted mean, the mode and the median. By visual inspection of histograms of the number of testimonies versus SQI in each circle (Fig.IV) and, more quantitatively, by applying a Chi-square test to the distribution, we conclude that a unimodal, Gaussian hypothesis is a reasonable representation of the distribution of SQIs. Comparing the arithmetic mean and the weighted mean for the Rambervillers earthquake (Table IV), it appears that the arithmetic mean and the weighted mean rounded to the half intensity values are identical. We will furthermore see that the values of the correlation coefficients computed with the arithmetic means $\langle \text{SQI} \rangle$ shows very little difference with those computed with the SQI weighted mean. Thus we only present here the results for the arithmetic mean as indicator of intensity within each circle.

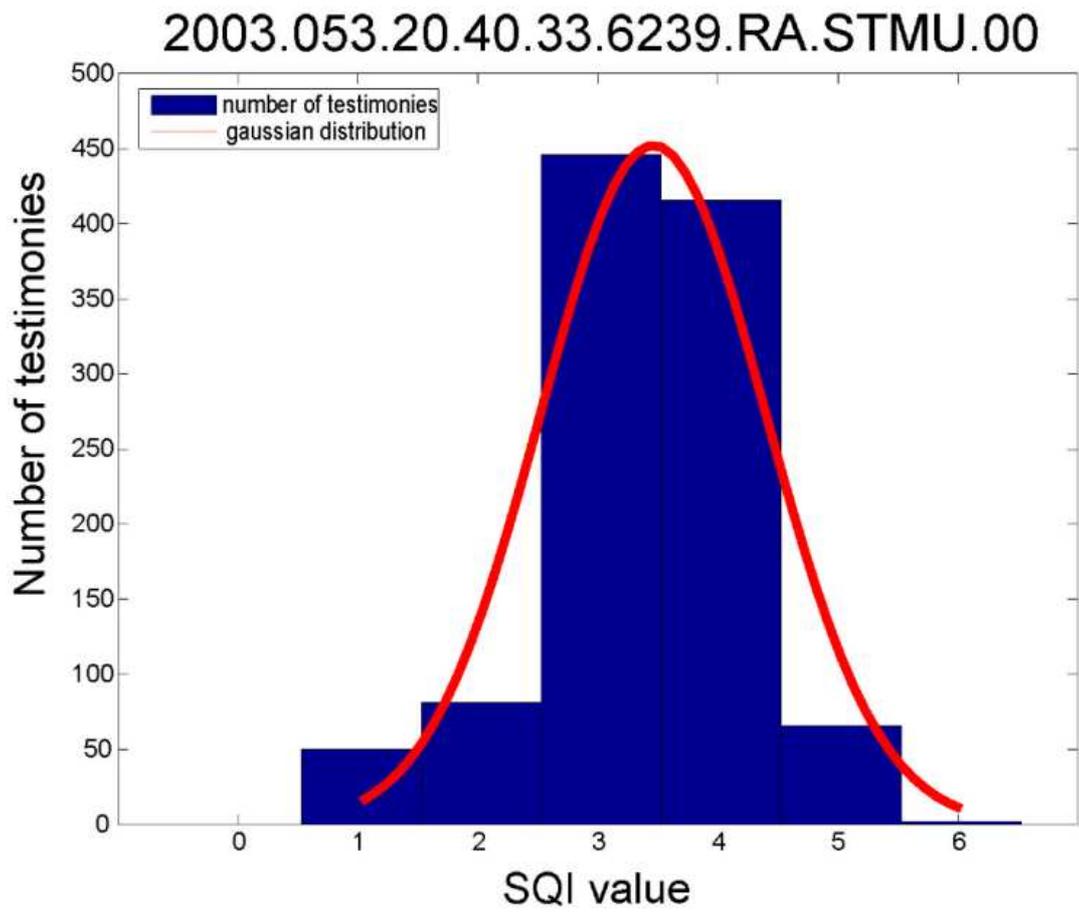


Fig. IV: Distribution of the number of testimonies versus SQI (station STMU and Rambervillers Earthquake). The red curve shows the superimposed Gaussian distribution fitting the histogram

Rambervillers									
	STHE	STMU	STSM	STBU	STBO	STDM	STUF	STBR	STFL
<SQI>Mean	3,162	3,433	3,991	3,933	3,547	4,095	3,325	3,712	2,933
SQI weighted mean	3,128	3,352	3,857	3,783	3,450	3,982	3,265	3,988	2,933
Mode	3	3	4	4	4	4	3	4	3
Median	4	5	4	3,5	3,5	2	3	3	3
Roulans									
	STHE	STMU	STSM	STBU	STBO	STDM	STUF	STBR	STFL
<SQI>Mean	3,068	2,409	3,000	3,344	3,242	3,086	3,193	3,108	3,733
SQI weighted mean	3,046	2,404	3,000	3,313	3,221	3,069	3,158	3,076	3,667
Mode	3	3	3	3	3	3	3	3	4
Median	3	4	4	4	4	4,5	3	4	4
Waldkirch									
	STMU	STSM	STBU	STBO	STDM	STUF	STFL		
<SQI>Mean	2,841	2,921	2,722	3,008	2,857	3,060	2,000		
SQI weighted mean	2,824	2,895	2,722	2,968	2,857	3,060	2,000		
Mode	3	3	2	3	3	3	2		
Median	3	4	4	4	4	3	2		

Table IV: Different ways tested for averaging the SQI (Single Questionnaire Intensity) values: arithmetic mean (<SQI>), weighted mean, mode and median

The size of the circles surrounding each station was fixed to 10 km. This choice guarantees:

- A reasonable number of data, with the exception of stations STSM for the Roulans earthquake (7 reports) and STFL (1 report) for Waldkirch earthquake.
- A low (<0.2) standard deviation of the mean SQI values as measured by:

$$SDOM = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

Where N is the number of SQI data in each circle, and σ is their standard deviation.

Independence of the data sets (for a radius > 10 km several circles intersect each other).

The same 10 km radius circle was used to for averaging the four other macroseismic parameters.

In order to know which of the two above approaches is the most appropriate for associating macroseismic and ground motion parameters we have computed linear regressions (Fig.V) between the horizontal resultant of ground motion parameters (recorded at 9, 9 and 7 stations for Rambervillers, Roulans and Waldkirch earthquakes, respectively), and (i) the nearest SQI, (ii) the nearest collective intensity, (iii) the average $\langle \text{SQI} \rangle$, (iv) the weighted mean and (v) the mode or the median. With a 23 degrees of freedom series, parameters are considered as significantly correlated when $R=0.5$ and highly correlated when $R \geq 0.6$ (Taylor 1997). Table V and Fig.VI shows much better correlations for the 10 km radius-averaging approach than for the closest report approach. Note also that for this latter approach the correlation coefficients are higher with the BCSF collective intensities based on some statistics relying on city officers than with the closest SQI based on single questionnaires. Finally, correlations with the arithmetic averages are better than for other averaging processes. This reinforces our choice for the arithmetic mean proposed above.

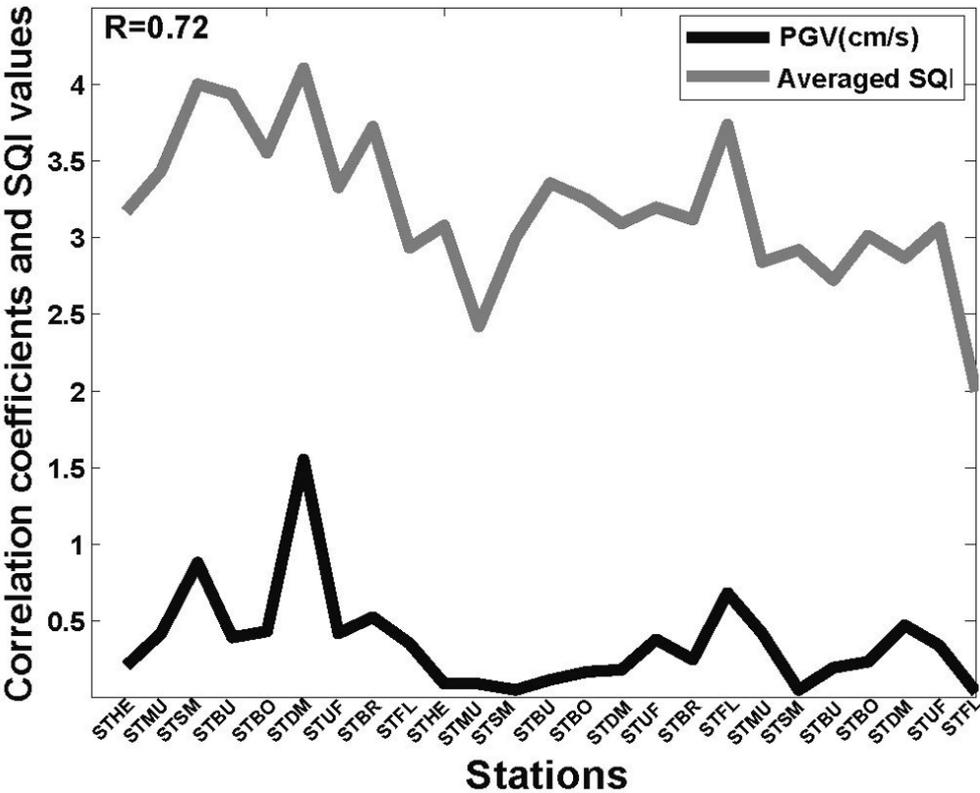


Fig. V: Meanings of the correlation between a pair of instrumental (PGV) and macroscopic ($\langle \text{SQI} \rangle$) parameters. The grey curve represents $\langle \text{SQI} \rangle$ averaged over 10km radius around each station for each of the 3 earthquakes. The black curve represents the horizontal PGV corresponding to the horizontal signal carrying the maximum horizontal PGA). A linear regression analysis between $\langle \text{SQI} \rangle$ and PGV gives us the spatial correlation coefficient R shown in Fig. VI to Fig. VIII ($R=0.72$ here).

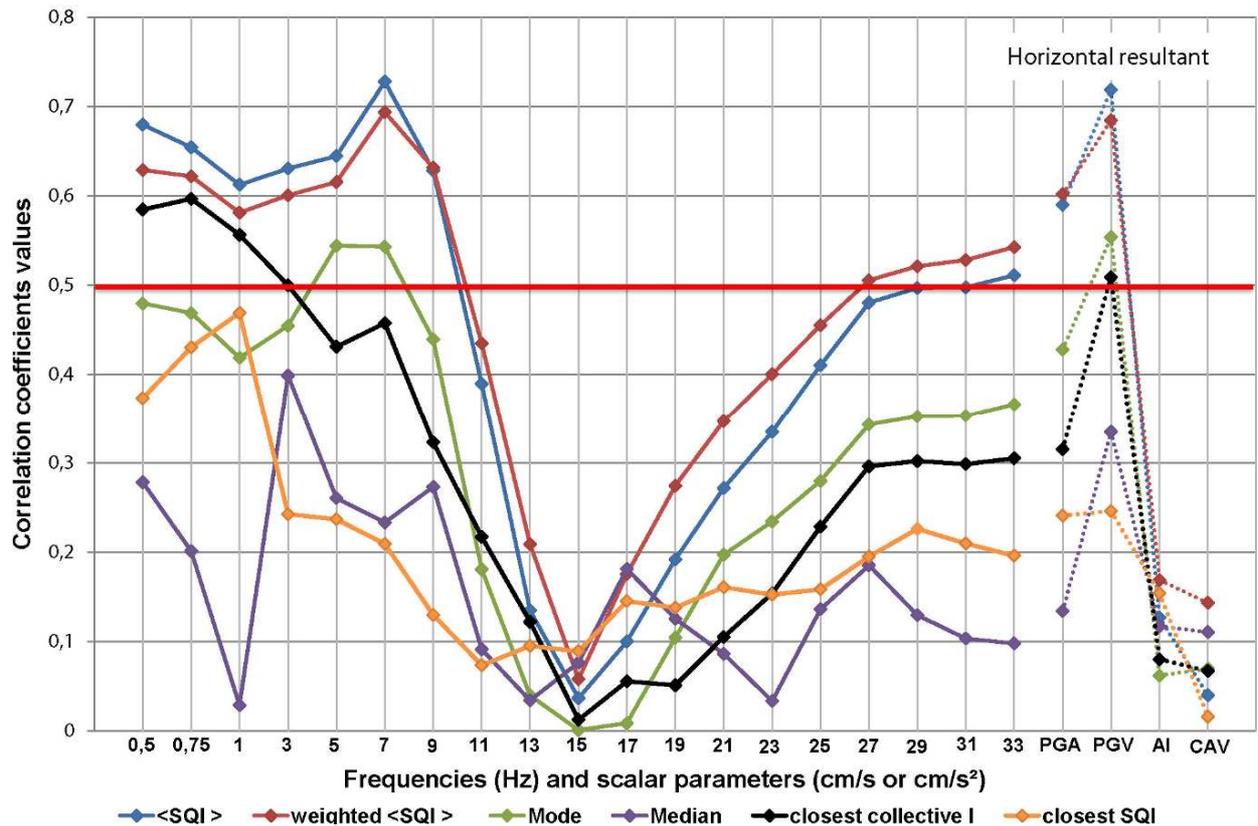


Fig. VI: Correlation between the horizontal ground motion resultant parameters and the different types of SQI averages: the arithmetic mean, the weighted mean, the mode and the median taken from a 10km radius around accelerometric stations. Black and orange curves curve represent the correlation between instrumental parameters and respectively the closest collective intensity and the closest SQI. The left part of the figure displays the correlation coefficients with the response spectra between 0.5 and 33 Hz. The right part of the figure displays the correlations with the scalar parameters PGA, PGV, AI and CAV.

	Frequency (Hz)	R (average 10km radius with horizontal component carrying max PGA)					R (average 10km radius with horizontal resultant of both horizontal components)					R (closest individual testimony to the station)					R (closest collective testimony)
		SQI	Q_PF	Q_VM	Q_D&F	Q_N	SQI	Q_PF	Q_VM	Q_D&F	Q_N	SQI	Q_PF	Q_VM	Q_D&F	Q_N	I
HORIZONTAL PSA	0.5	0.68	0.68	0.62	0.69	0.68	0.69	0.67	0.66	0.74	0.73	0.37	0.07	0.06	0.58	0.30	0.58
	0.75	0.65	0.65	0.57	0.72	0.70	0.56	0.61	0.59	0.69	0.68	0.43	0.06	0.00	0.58	0.30	0.60
	1	0.61	0.63	0.56	0.70	0.74	0.46	0.58	0.52	0.65	0.68	0.47	0.06	0.02	0.52	0.29	0.56
	3	0.63	0.61	0.60	0.64	0.59	0.70	0.63	0.68	0.69	0.69	0.24	0.02	0.17	0.61	0.19	0.50
	5	0.64	0.55	0.51	0.52	0.52	0.68	0.57	0.56	0.56	0.57	0.24	0.11	0.12	0.59	0.22	0.43
	7	0.73	0.45	0.56	0.47	0.48	0.68	0.57	0.62	0.62	0.51	0.21	0.09	0.31	0.65	0.32	0.46
	9	0.63	0.41	0.54	0.42	0.40	0.64	0.52	0.60	0.58	0.48	0.13	0.26	0.33	0.55	0.29	0.32
	11	0.39	0.36	0.51	0.25	0.14	0.38	0.46	0.58	0.39	0.21	0.07	0.28	0.29	0.34	0.18	0.22
	13	0.13	0.09	0.22	0.04	0.05	0.14	0.19	0.28	0.16	0.10	0.09	0.11	0.25	0.04	0.31	0.12
	15	0.04	0.01	0.06	0.11	0.10	0.02	0.11	0.12	0.01	0.05	0.09	0.02	0.12	0.04	0.19	0.01
	17	0.10	0.11	0.18	0.01	0.03	0.11	0.23	0.25	0.13	0.05	0.15	0.03	0.25	0.09	0.24	0.06
	19	0.19	0.20	0.27	0.03	0.06	0.23	0.32	0.38	0.19	0.10	0.14	0.02	0.22	0.17	0.22	0.05
	21	0.27	0.22	0.28	0.05	0.11	0.31	0.39	0.42	0.27	0.15	0.16	0.02	0.18	0.25	0.21	0.11
	23	0.33	0.28	0.37	0.15	0.14	0.35	0.41	0.45	0.31	0.17	0.15	0.02	0.25	0.31	0.25	0.15
	25	0.41	0.36	0.45	0.24	0.17	0.40	0.45	0.50	0.36	0.20	0.16	0.01	0.25	0.37	0.24	0.23
	27	0.48	0.41	0.49	0.30	0.23	0.46	0.48	0.54	0.41	0.24	0.19	0.03	0.26	0.43	0.27	0.30
	29	0.50	0.41	0.49	0.31	0.26	0.50	0.50	0.55	0.44	0.28	0.23	0.02	0.28	0.44	0.31	0.30
31	0.50	0.41	0.50	0.31	0.26	0.51	0.52	0.57	0.47	0.31	0.21	0.00	0.28	0.43	0.31	0.30	
33	0.51	0.43	0.52	0.32	0.27	0.49	0.52	0.57	0.46	0.29	0.20	0.02	0.29	0.43	0.30	0.31	
VERTICAL PSA	0.5	0.39	0.50	0.55	0.60	0.61	0.39	0.50	0.55	0.60	0.61	0.55	0.18	0.44	0.29	0.40	0.52
	0.75	0.18	0.35	0.36	0.42	0.47	0.18	0.35	0.36	0.42	0.47	0.46	0.20	0.58	0.19	0.03	0.36
	1	0.22	0.42	0.37	0.49	0.55	0.22	0.42	0.37	0.49	0.55	0.50	0.15	0.53	0.22	0.03	0.36
	3	0.59	0.42	0.51	0.45	0.51	0.59	0.42	0.51	0.45	0.51	0.37	0.04	0.00	0.13	0.37	0.64
	5	0.68	0.54	0.63	0.56	0.63	0.68	0.54	0.63	0.56	0.63	0.46	0.03	0.07	0.35	0.42	0.49
	7	0.63	0.41	0.62	0.38	0.52	0.63	0.41	0.62	0.38	0.52	0.44	0.11	0.05	0.18	0.40	0.46
	9	0.67	0.38	0.57	0.38	0.45	0.67	0.38	0.57	0.38	0.45	0.40	0.40	0.20	0.43	0.44	0.37
	11	0.37	0.23	0.49	0.12	0.14	0.37	0.23	0.49	0.12	0.14	0.22	0.45	0.11	0.23	0.20	0.13
	13	0.19	0.17	0.35	0.00	0.02	0.19	0.17	0.35	0.00	0.02	0.16	0.32	0.29	0.17	0.20	0.08
	15	0.26	0.35	0.45	0.13	0.09	0.26	0.35	0.45	0.13	0.09	0.36	0.25	0.21	0.27	0.22	0.04
	17	0.20	0.31	0.43	0.04	0.05	0.20	0.31	0.43	0.04	0.05	0.17	0.28	0.25	0.17	0.11	0.07
	19	0.19	0.27	0.43	0.03	0.05	0.19	0.27	0.43	0.03	0.05	0.05	0.20	0.28	0.17	0.02	0.13
	21	0.23	0.27	0.44	0.09	0.06	0.23	0.27	0.44	0.09	0.06	0.01	0.23	0.30	0.20	0.05	0.08
	23	0.27	0.31	0.45	0.12	0.05	0.27	0.31	0.45	0.12	0.05	0.01	0.06	0.27	0.20	0.09	0.02
	25	0.35	0.34	0.51	0.14	0.01	0.35	0.34	0.51	0.14	0.01	0.01	0.07	0.29	0.13	0.19	0.06
	27	0.44	0.40	0.56	0.17	0.01	0.44	0.40	0.56	0.17	0.01	0.09	0.06	0.29	0.20	0.20	0.12
	29	0.42	0.39	0.54	0.16	0.04	0.42	0.39	0.54	0.16	0.04	0.15	0.02	0.23	0.20	0.18	0.15
31	0.52	0.45	0.61	0.29	0.16	0.52	0.45	0.61	0.29	0.16	0.17	0.04	0.29	0.35	0.21	0.24	
33	0.58	0.45	0.62	0.32	0.21	0.58	0.45	0.62	0.32	0.21	0.21	0.04	0.26	0.44	0.19	0.30	
SCALAR	PGA H	0.59	0.49	0.58	0.38	0.34	0.60	0.46	0.59	0.40	0.37	0.24	0.03	0.19	0.60	0.29	0.32
	PGA Z	0.47	0.42	0.65	0.33	0.26	0.47	0.42	0.65	0.33	0.26	0.48	0.13	0.05	0.27	0.35	0.21
	PGV H	0.72	0.57	0.60	0.56	0.55	0.79	0.64	0.70	0.65	0.69	0.25	0.01	0.27	0.46	0.34	0.51
	PGV Z	0.64	0.53	0.69	0.55	0.61	0.64	0.53	0.69	0.55	0.61	0.31	0.24	0.23	0.31	0.27	0.55
	AIH	0.13	0.19	0.24	0.08	0.02	0.13	0.20	0.26	0.08	0.00	0.15	0.11	0.15	0.34	0.18	0.08
	AIZ	0.41	0.37	0.59	0.28	0.12	0.41	0.37	0.59	0.28	0.12	0.10	0.03	0.30	0.24	0.10	0.12
	CAV H	0.04	0.18	0.23	0.03	0.01	0.05	0.18	0.24	0.04	0.01	0.02	0.43	0.21	0.00	0.14	0.07
	CAV Z	0.36	0.44	0.59	0.29	0.16	0.39	0.49	0.54	0.25	0.10	0.21	0.03	0.07	0.38	0.06	0.17

Table V: Correlation coefficient between instrumental parameters and, macroseismic parameters: averages made within 10km-radius circles around each station (1st and 2nd parts of the table), closest to station individual parameters (3rd part of the table), and the closest to station collective intensity (4th part of the table). The 3 earthquakes are taken together to compute the correlation coefficient. Colours indicate the threshold: white for $R \leq 0.5$ (not correlated), light grey for $0.5 \leq R < 0.6$ (correlated) and dark grey for $R \geq 0.6$ (highly correlated).

Correlations between the macroseismic and ground motion parameters

In order to determine which macroseismic parameter best represents the ground motion, correlation coefficients have been computed between, on the one hand, the scalar and frequency dependent instrumental parameters (PGA, PGV, CAV, and AI, PSA, PSV) and, on the other hand, the five macroseismic parameters (SQI, “Vibratory Motions of Small Objects”, Q_D&F “Displacement and Fall of Objects”, Q_N “acoustic noises” and Q_PF “personal feelings”). Because low-intensity macroseismic effects are likely to mainly reflect the natural frequencies of the witnesses’ environment, the oscillator response spectra seems more appropriate than the Fourier spectra when looking at the frequency dependence of the macroseismic parameters. Correlations computed for PSA and PSV are similar since these two response spectra only differ by a frequency factor, so that only correlations with PSA are displayed here.

As shown in Fig.VIIa for the horizontal resultant, PGV clearly exhibits the highest correlation among the scalar parameters. With a value above $R=0.6$ for the five macroseismic parameters, the largest correlation is obtained with the averaged macroseismic intensity $\langle SQI \rangle$ ($R=0.8$). The correlation between PGA and $\langle SQI \rangle$ is slightly smaller ($R=0.6$) but, interestingly, this latter one is very close to the correlation with “Vibratory motion of small objects” (group Q_VM). Finally let us note that the correlations for AI and CAV are very low ($R<0.3$). This may be attributed to an intrinsic instability of measuring CAV and AI below 0.025g acceleration level.

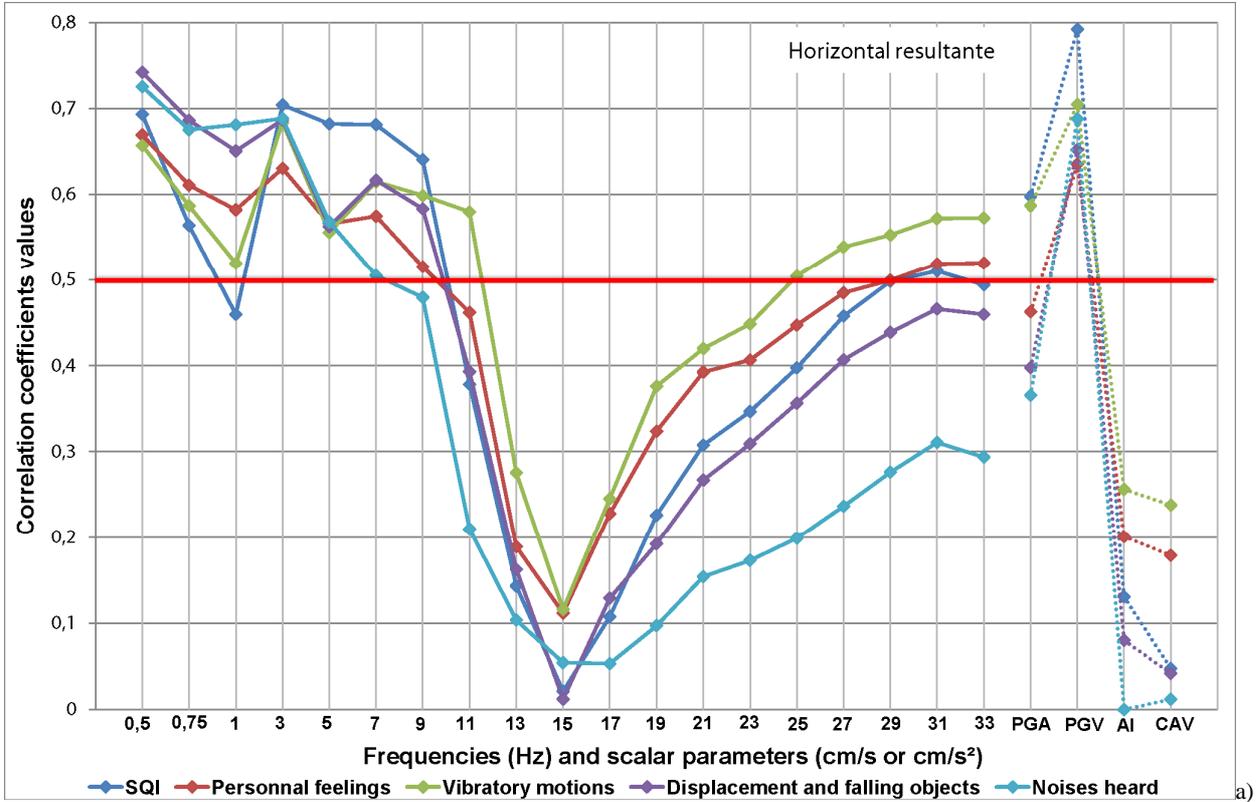
Looking now at the variation of correlation with frequency, the most striking effect is a clear loss of correlation between 10 and 25 Hz. At high frequency, correlations rise. They reach $R=0.5$ for $\langle SQI \rangle$ and personal feelings, and they are near $R=0.6$ for the “Vibratory Motions of Small Object”, which is close to the PGA correlation value. At frequencies lower than 5 Hz, correlation is higher than 0.5 for all macroseismic parameters. However one notices a drop of correlation at 1Hz, particularly for $\langle SQI \rangle$. Surprisingly, at this frequency, the highest correlation is obtained for the “Acoustic Noise” ($R=0.7$), the second highest correlation being obtained for the “Displacement and Fall of objects”.

The same correlations have also been computed with the horizontal signal component bearing the maximum PGA. The same pattern was observed, but the correlations are smaller than with the horizontal resultant, and there is no drop of correlation around 1Hz for $\langle SQI \rangle$. The main difference between these two types of horizontal motions, is that only $\langle SQI \rangle$ and the “Vibratory Motion of Small Objects” show a strong correlation ($R=0.5$) above 25Hz.

For the vertical component, (Fig.VIIb) the highest correlations are found below 10 Hz and above 25 Hz as for the horizontal case but the loss of correlation between 10 and 25 Hz is less pronounced than for the horizontal resultant, except for the “Acoustic Noise” and the “Displacement and fall of objects”. As for the horizontal case, PGV is the scalar parameter presenting the best correlation with all the macroseismic parameters. The highest correlation with the scalar instrumental parameters on Fig.VIIb is between the «Vibratory Motions of

Small Objects» and PGV (R=0.69). The second and third highest correlations are obtained for <SQI> (R=0,64) and the “Acoustic Noise” (R=0,61), respectively. Interestingly, the drop of correlation for «Vibratory Motions of small objects» in the frequency band 10Hz-25Hz is much less severe than for the horizontal resultant. It reaches a value slightly above R=0,6 at 31-33 Hz, a value close to the correlation with PGA. The other scalar macroseismic parameters exhibit poor correlations with PGA, CAV and AI.

Concerning the frequency dependence of the correlations with the vertical component (Fig.VIIb left), <SQI> is well correlated with the response spectra between 3 and 9 Hz and beyond 30 Hz only. The other macroseismic parameters are correlated with the response spectra at 0.5Hz and around 5Hz. The frequency range where the macroseismic and ground motion parameters are correlated is thus narrower for the vertical than for the horizontal motion below 10Hz.



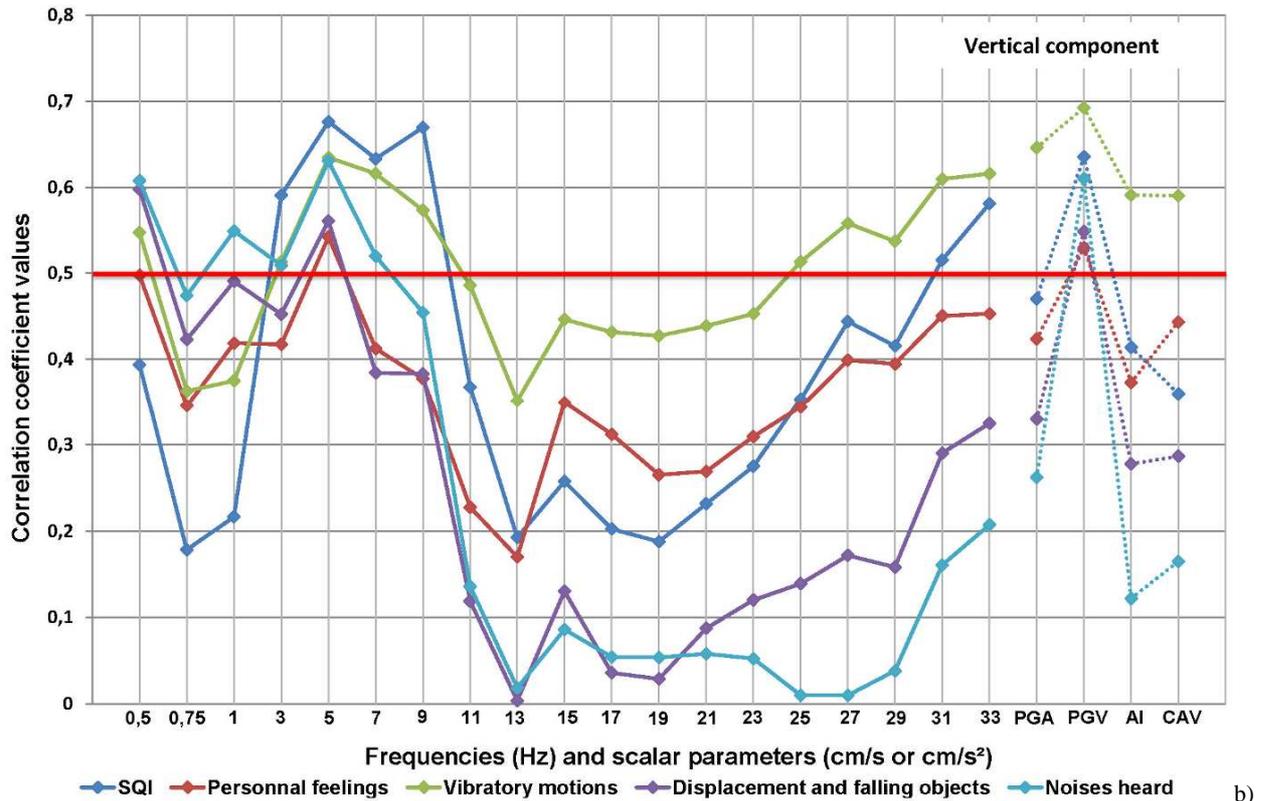


Fig. VII: Correlation coefficient R between instrumental parameter and the average macroseismic parameters in 10km-radius surface around each station for the three earthquakes taken together. a) Correlations with horizontal resultant of both horizontal components. b) Correlations with the vertical component. The right part of the figure shows the coefficient between the macroseismic parameters and the scalar instrumental parameters. The left part of the figure shows the correlation with the spectral responses. See Table 4 for the correlation values. The red line $R=0.5$ represents the threshold for significant correlation

Relationships between PGV and $\langle SQI \rangle$

PGV and PGA are the most often used indicators in the relationships between macroseismic intensity and ground motion indicators. In the literature, the intensity-ground motion relationships are most of the time derived from the horizontal resultant (Atkinson and Kaka, 2006). As we have seen from our data, the correlation coefficients are higher with the horizontal resultant than with the vertical component.

Several relationships can be extracted from the linear regression equations associated with the correlation coefficient R of Table V. Taking the pair of parameters ($\langle SQI \rangle$ - horizontal resultant PGV) having the highest correlation ($R=0.79$), we have the following equation valid for the east of France, and intensity range [II-V], EMS-98:

$$I = 0.9041(\pm 0.3270) \times PGV_{res} - 2.8(\pm 0.185) \quad (7)$$

with $\sigma_{RMS} = 0.2252$

It is established from the BCSF SQI values averaged over 10km radius circle around each of nine accelerometric stations shown in Fig.I and for epicentral distances between 30 and 180km.

Discussions

Relationships between macroseismic intensity and PGA or PGV published by different authors are compared with our observed intensities <SQI> in Fig.VIII (Table VI). These relationships have been established either with magnitudes similar to those considered here (Atkinson and Kaka 2006; Atkinson and Kaka 2007; Kaka and Atkinson 2004) or based on larger set of magnitudes with an intensity range between II and VI (Souriau 2006; Atkinson and Wald 2007; Wald 1999c).

Accelerometric Parameter	Author	Publication year	Data location	Macroseismic scale	Intensity Prediction Relationships
PGA	Wald et al	1999c	California	MMI	$I = 2.20 * \log(\text{PGA}) + 1$
PGA	Souriau	2006	France	EMS-98	$I=4.81+2.70*\log(\text{PGA})+1.22*\log(\text{Dfoc})$ $I=4.32+2.13*\log(\text{PGA})+1.15*\log(\text{Dfoc})$
PGA	Atkinson & Kaka	2006	Missouri & California (USA)	MMI	$I=2.315+1.319*\log(\text{PGA})+0.372*[\log(\text{PGA})]^2$
PGA	Worden et al	2011 (submitted)	California	MMI	$\text{MMI}= 1.78+1.55 \log_{10}(\text{PGA})$ if $\log(\text{PGA}) \leq 1.57$ $\text{MMI}=3.70 \log_{10}(\text{PGA})-1.60$ if $\log(\text{PGA}) > 1.57$ $\log_{10}(\text{PGA})=(\text{MMI}-1.78)/1.55$ if $\text{MMI} \leq 4.22$ $\log_{10}(\text{PGA})=(\text{MMI}+1.60)/3.70$ if $\text{MMI} > 4.22$
PGV	Wald et al	1999c	California	MMI	$I = 2.10 * \log(\text{PGA}) + 3.40$
PGV	Kaka & Atkinson	2004	NE America	MMI	$\text{MMI}=4.08+1.79*\log(\text{PGV})-0.28*\log(\text{D})$ $\text{MMI}=3.96+1.79*\log(\text{PGV})$
PGV	Atkinson & Kaka	2006	New Madrid and California	MMI	$\text{MMI}=4.40+1.92*\log(\text{PGV})+0.280*[\log(\text{PGV})]^2$
PGV	Atkinson & Wald	2007	Parkfield	MMI	$\text{PGV}(\text{MMI})=3.94+1.22*\log(\text{PGV})$
PGV	Worden et al	2011 (submitted)	California	MMI	$\text{MMI}= 3.78+1.47 \log_{10}(\text{PGV})$ if $\log(\text{PGV}) \leq 0.53$ $\text{MMI}=3.16 \log_{10}(\text{PGV})+2.89$ if $\log(\text{PGV}) > 0.53$ $\log_{10}(\text{PGA})=(\text{MMI}-3.78)/1.47$ if $\text{MMI} \leq 4.56$ $\log_{10}(\text{PGA})=(\text{MMI}-2.89)/3.16$ if $\text{MMI} > 4.56$

Table VI: Intensity prediction equations from different authors applied on our PGA and PGV data, and used in Fig.VIII

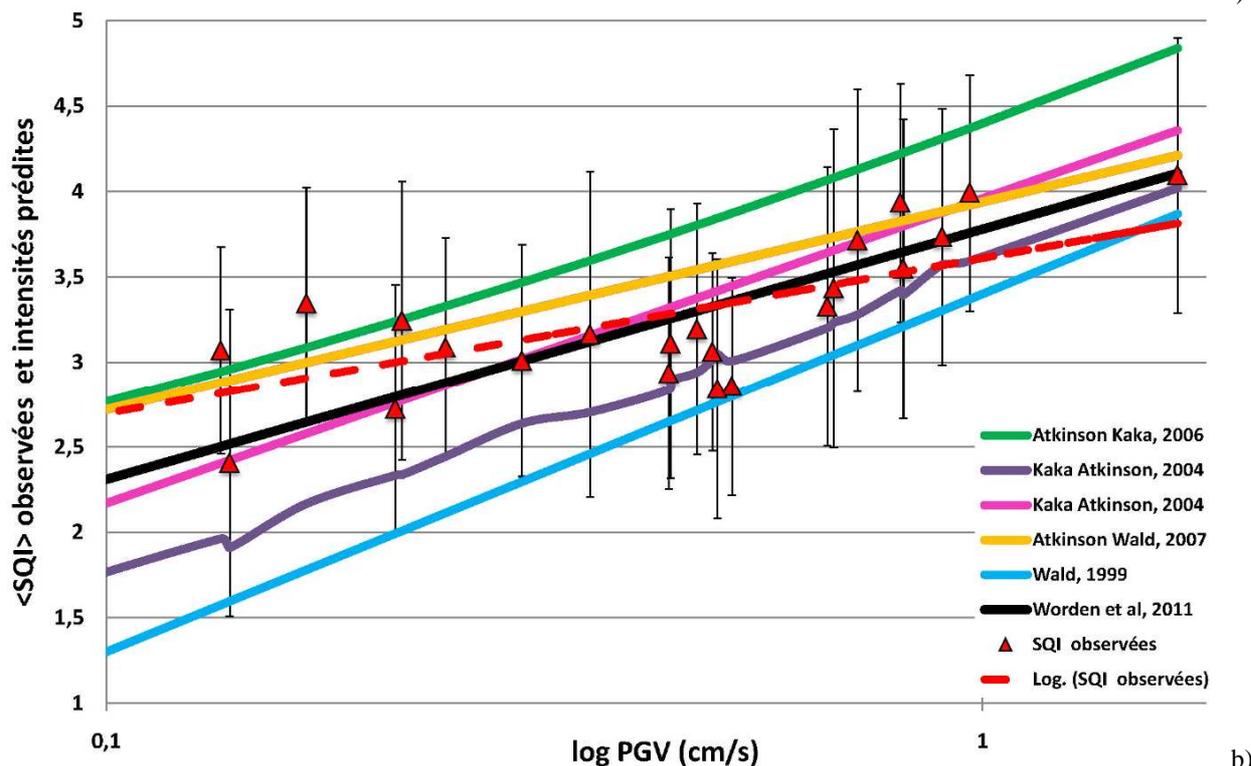
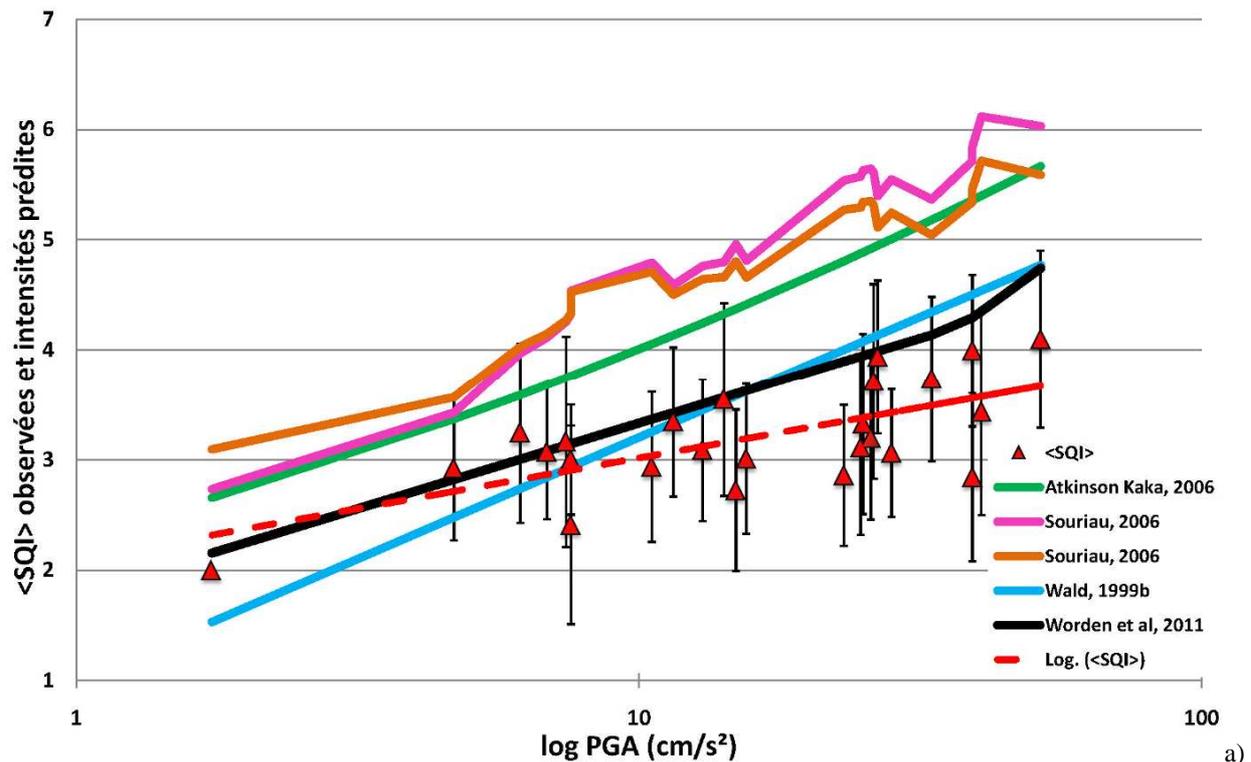


Fig. VIII: Intensities predicted from our PGA (a) and PGV (b) according to (Table 6) the equations of a) Souriau (2006), Atkinson and Kaka (2006) and Wald et al. (1999c), and b) Atkinson and Kaka (2006), Kaka and Atkinson (2004), Atkinson and Wald (2007), and Wald (1999). On both graphs, the red triangles are the observed local Intensities with their standard deviations, within each 10km radius circles around accelerometric stations for the three earthquakes taken together.

To check if the RAP signals can be compared with lower frequency accelerograms often used in published studies, a stability test has been made by applying a low-pass filter to the signals with a 25Hz cut-off frequency. Fig.IX shows that the unfiltered and the low-pass filtered PGA

and PGV are respectively spread along the bisector. PGA and PGV computed on the RAP signal data are thus comparable to the published ones.

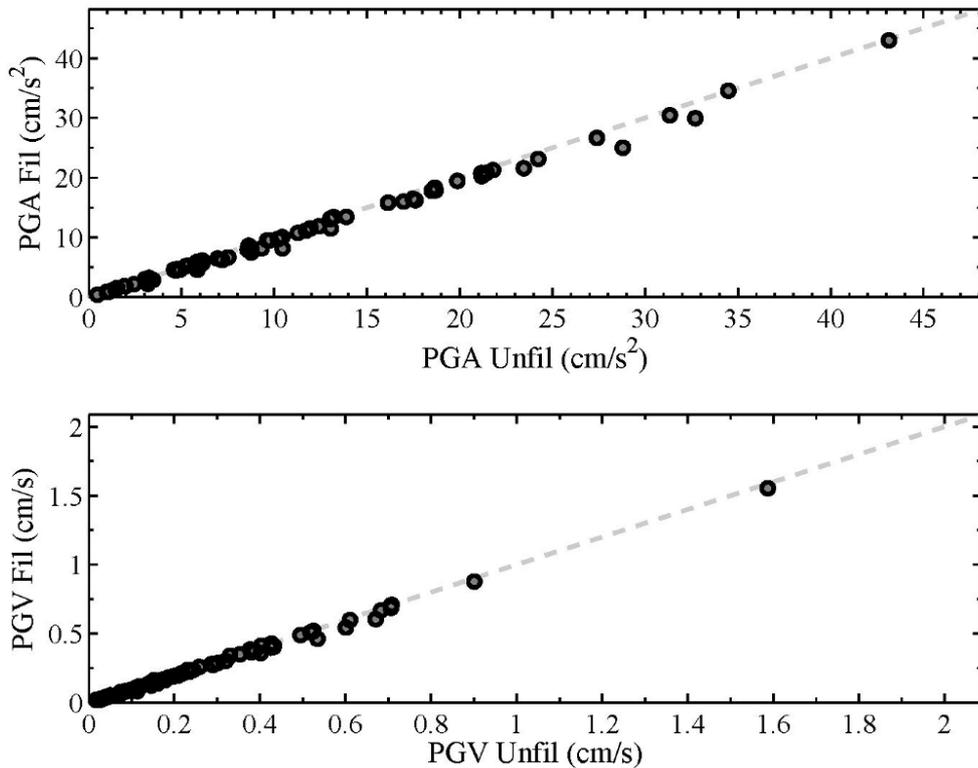


Fig. IX: Top figure, low-pass filtered PGA versus Unfiltered PGA. Bottom figure: filtered PGV versus unfiltered PGV for all station of the three earthquakes (grey dots).

Fig.VIIIa shows that $\langle \text{SQI} \rangle$ intensities are below most of intensities predicted from PGA, except that of Wald et al. (1999). Notice that because Souriau (2006) requires specifying the epicentral distance for each recording the curve corresponding to her relationship is irregular in our plot mixing up observations from three earthquakes. Furthermore, the slope of the intensity versus PGA trend is smaller in our case than for the other authors. This could be due to the differences in the data sets and data processing: Souriau (2006) analysed a larger set of observations composed of 20 earthquakes located over the whole French metropolitan territory; intensities used are either BCSF EMS-98 or BRGM MSK-64 SisFrance collective intensities and isoseismal smoothing was applied to make the intensity data less erratic. As shown in Fig.X, even if they are larger than our $\langle \text{SQI} \rangle$ and closer to the intensities predicted by the equation of Souriau (2006), SisFrance and BCSF collective intensities are still smaller than those predicted by Souriau (2006). Neither the PGA values predicted from intensities by different authors, nor the slope of the published relationships are thus in agreement with our $\langle \text{SQI} \rangle$ - PGA observations in the east of France.

Agreement is much better when comparing intensities with PGV (Fig. VIIIb). Indeed, Atkinson and Kaka (2006), Atkinson and Wald (2007), Kaka and Atkinson (2004) and Wald et al. (1999) equations for PGV fit quite well our data within their standard deviations, in particular Atkinson and Wald (2007). However our $\langle \text{SQI} \rangle$ versus PGV slope is slightly smaller than the published ones.

Thus surprisingly, it appears that PGV rather than PGA, as intuitively expected for the lower intensity levels considered, is the ground motion parameter presenting the best correlation with $\langle SQI \rangle$.

Concerning the CAV and AI, published prediction equations poorly fit our data confirming thus our conclusion made from the correlation analysis (Table V and Fig.VIII).

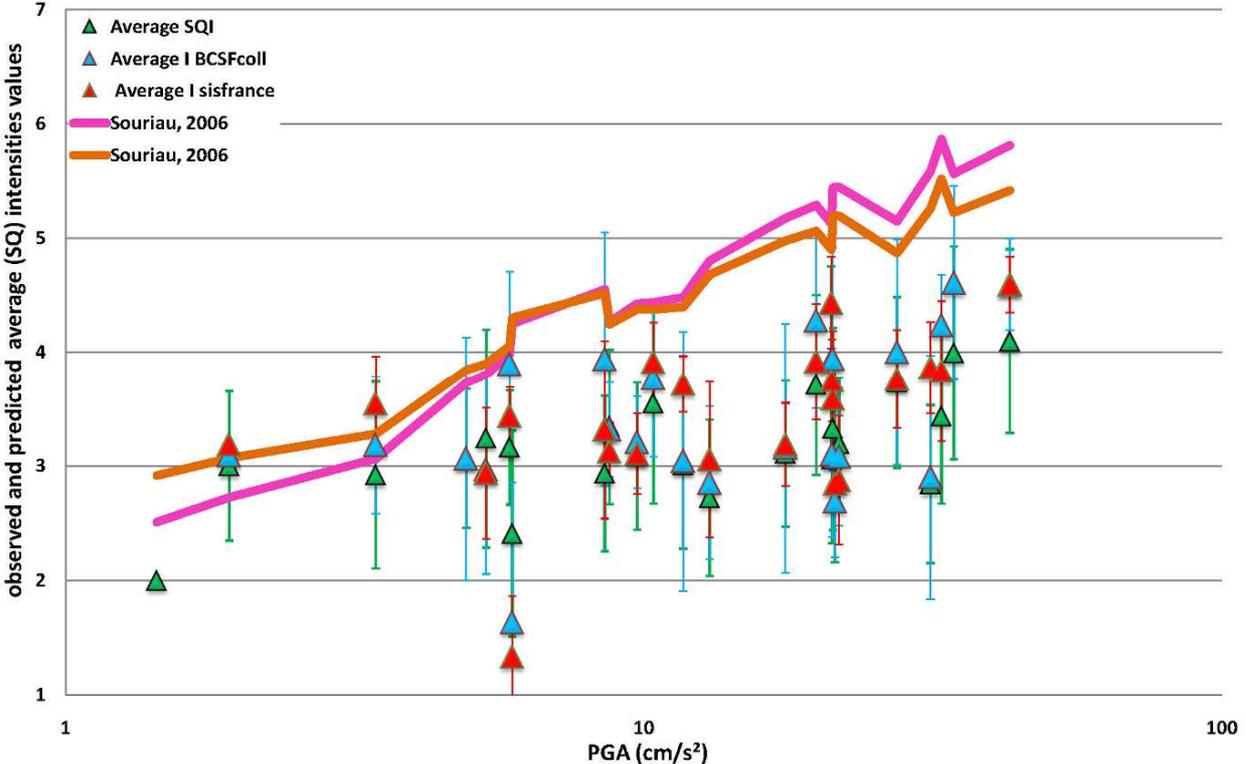


Fig. X: Comparison between the collective BCSF, SisFrance and $\langle SQI \rangle$ intensities versus PGA, for the three earthquakes considered and intensities predicted by Souriau (2006) from our PGA data.

Finally, concerning our rather small slope in the PGV-intensity plots, it is interesting to look at the compilation of relationships made by Cua et al (2010) (Fig.XI). Despite a large variability of intensity values published in the literature, this figure clearly shows that there is a change in the trend of data around $I=V$. At lower intensities, the intensity/PGV slope is smaller than above intensity V. Our intensity values $\langle SQI \rangle$ related to 9 circular areas of 10 km radius and limited to intensities between II and V are compatible with the apparent small intensity/PGV slope in Cua et al's (2010) figure. The other important conclusion possibly drawn from Fig.11 is that the PGV-Intensity relationship given in the present paper cannot be extrapolated to intensities larger than V. It remains valid only at a low level of seismic shaking.

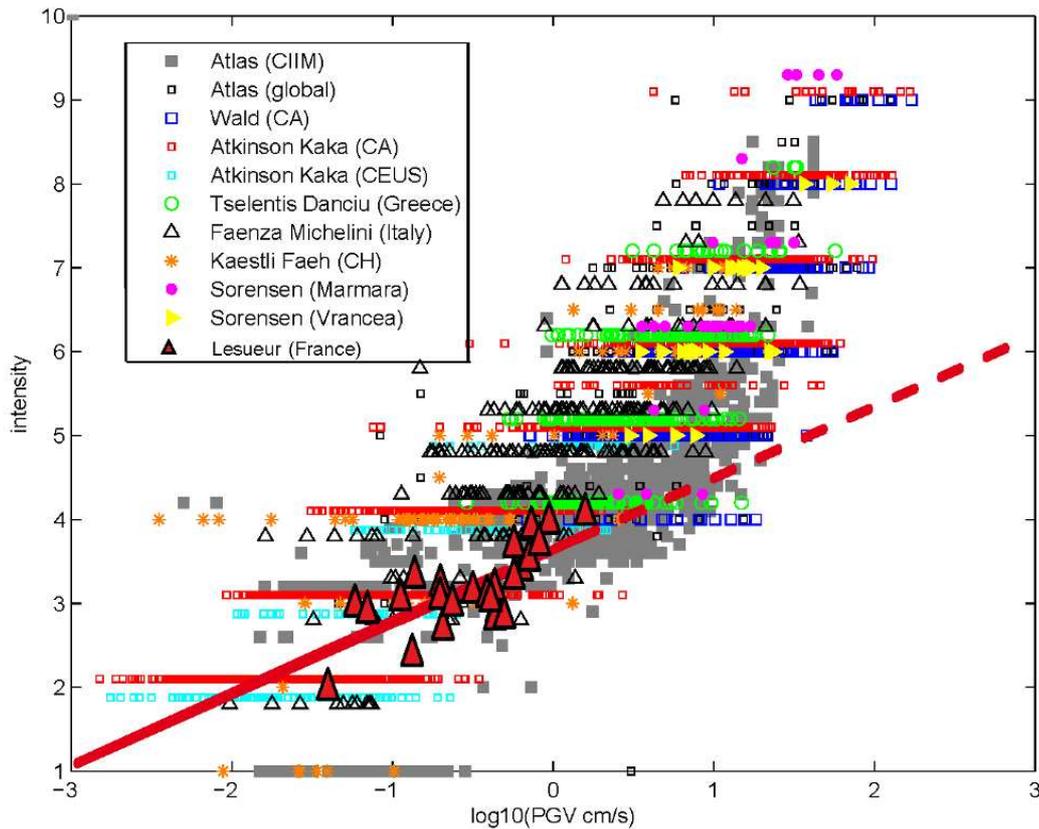


Fig. XI: Compilation of intensities used over the world to compute the intensity-ground motion parameters equations. The red triangles are our data with horizontal resultant of the PGV.

Looking now at the frequency dependence of the correlation between the macroseismic and ground motion parameters displayed in Fig.VI, it is first important to note that 98.2% of the witnesses who answered the BCSF questionnaires used in the present paper were located inside buildings. The overall high correlations observed at frequencies lower than 10Hz on Fig.7a and b, are likely to reflect the natural frequencies of the buildings. Indeed, a compilation of natural frequencies of typical building in Grenoble, France, shows for example that the fundamental mode of vibration of typical masonry buildings corresponds to frequencies lower than 8 Hz (Michel 2007). At frequencies lower than 1 Hz, it is also interesting to notice that the answer to the questions field “Displacement and Fall of objects” presents a rather high correlation with the horizontal motion, while it is lower than the “Vibratory motions of small objects” at higher frequencies. The increase of correlation at high frequencies is particularly clear for the “Vibratory Motions of small objects“. This could be related to higher frequencies of vibration when small objects, like glasses and plates stored on shelves are shaken. This could be also related to any effects induced by the high frequency peak of acceleration on the witnesses’ environment.

The drastic loss of correlation for all macroseismic parameters between 10 and 25 Hz is more difficult to explain. It may be due to the combined effect of increased anthropogenic noise in a urban environment this frequency range (Hunaidi and Tremblay 1997) and the low level of energy in the ground motion above 10 Hz (Fig.3b). A good site to look at the anthropogenic noise is STMU station in the centre of the city of Strasbourg which presents a strong

anthropogenic noise around 15Hz. Applying a 10Hz-20Hz pass-band filter to the STMU records of the three earthquakes we have estimated the signal-to-noise ratio on the filtered signal by comparing the amplitude before and after the first P-arrival. The signal-to-noise ratio varies from 100 for the Waldkirch earthquake which occurred during the night, at 2:52 a.m. local time, when the anthropogenic noise was at its minimum; to a factor 2 in the worst case of the Roulans Earthquake occurred at 6:31 p.m. local time, when the anthropogenic noise was high. The low signal-to-noise ratio at STMU only concerns the Roulans event, one out of the 25 data points in the computation of the correlation coefficients, so that is very unlikely that such a strong loss of correlation on the horizontal resultant around 15Hz could only be due to the strong increase of anthropogenic noise at the noisiest stations.

In any case, except for the slight difference between the frequency behaviour of the five macroseismic parameters, such as the “Vibratory motions of small objects” as compared with the “Displacement and fall of objects”, none of them can be considered as strongly representative of a single frequency range. The macroseismic intensity $\langle \text{SQI} \rangle$ follows the same overall frequency dependence as the four more objective macroseismic “questions field” parameters. This fact strengthens the idea that macroseismic intensity provides robust means of estimating the ground motion parameter PSA (below 10 Hz), PGV and, to a lesser extent, PGA, at least for the data set considered in this study.

The reasons why the “Acoustic Noise” parameter presents frequency dependence quite similar to the other macroseismic parameters, $\langle \text{SQI} \rangle$ in particular, remains an open question. One could expect that “Acoustic Noise” is heard above 20 Hz and thus that the correlation with the response spectra should grow at high frequency. Such is not the case since the correlation remains below $R=0.3$ for both the horizontal and the vertical components above 30 Hz (Fig.7). Surprisingly, the maximum correlation is observed at low frequency, below 10Hz. Its maximum $R>0.7$ is observed below 1 Hz with the horizontal components. What is thus the origin of the heard noises? Indirect noises converted through a non-linear process from the seismic motion in the immediate environment of the witnesses?

Conclusion

The relationship between macroseismic and ground motion parameters (scalar and spectral) is presented for three earthquakes of magnitude $4.4 < M_w < 4.8$ in the East of France. We propose an encoding scheme to analyze the answers to the questions of the individual macroseismic BCSF questionnaires. Internal correlations of each encoded question led us to define four macroseismic parameters: “«Vibratory Motions of Small Objects», “Displacement and Fall of Objects, “Acoustic Noises” and “Personal Feelings”. Not surprisingly, these macroseismic parameters are also well correlated with the SQI (Single Questionnaire Intensity) parameter attached to each testimony.

Correlation between these five macroseismic and several ground motion parameters depends on the strategy used. Individual macroseismic parameters show a systematically stronger correlation with the ground motion parameters when they are averaged over a surface around the accelerometric station than when only the closest testimony is considered. Smoothing of the macroseismic parameters by averaging, i.e. removing the subjectivity inherent to a single questionnaire, seems thus to guarantee robust values of the macroseismic parameters for comparison with ground motion parameters.

Concerning the scalar ground motion parameters, PGV is that presenting the highest correlation with the macroseismic parameters. Horizontal PGA is well correlated with the averaged $\langle \text{SQI} \rangle$ and the “Vibratory motion of small objects” but not with the other macroseismic parameters. The vertical PGA exhibits a significant correlation only with the “vibratory motions”. CAV and Arias intensity, commonly used by structural engineers are not pertinent indicators for such low levels of ground motion (intensity values used in this study range between II and V in the EMS-98 scale).

Concerning the pseudo-spectral parameter (PSA), the horizontal PSA shows better correlation with the macroseismic parameters than the vertical PSA. PSA exhibits a high correlation in particular for the intensity $\langle \text{SQI} \rangle$ ($R \sim 0.7$ for 0.5Hz and between 1Hz and 10Hz). The “Acoustic Noise” and “fall and displacement of objects” macroseismic parameter also shows a high correlation in this low frequency range. An explanation for these high correlations may be that this frequency range corresponds to the natural frequencies of buildings which could amplify the seismic ground motion. Around 15Hz, a loss of correlation is observed for all the macroseismic parameters more pronounced for the horizontal PSA than for the vertical one. Absence of correlation in this frequency range may be a combination of the decrease of the energy signal above 10Hz and the existence of a high level of anthropogenic noise which could have made individuals less sensitive to the low level of seismic energy. Above 25 Hz the correlation of PSA with the “Vibratory Motion of Small Object” and the intensity $\langle \text{SQI} \rangle$ rises and reaches a level close to the correlation with PGA.

Acknowledgement

Macroseismic data are provided by the Bureau Central Sismologique Français and accelerometric data are provided by the French Accelerometric Network. We are thankful for Fabian Bonilla, from IRSN-IFSTTAR who helped us with the instrumental data processing in the beginning of the study. Maria Lancieri, from IRSN, provided invaluable assistance in programming in Matlab and in the statistic part of the study.

3.3 ANALYSES COMPLÉMENTAIRES

3.3.1 COMPARAISON ENTRE LES INTENSITÉS COLLECTIVES BCSF ET SISFRANCE, LES SQI ET LES PARAMÈTRES INSTRUMENTAUX PGA ET PGV.

L'article précédent montre que le PGV et le PGA sont les paramètres instrumentaux qui présentent les meilleures corrélations avec les SQI. Dans la plupart des études qui comparent les intensités macrosismiques et les pics de mouvement du sol (PGA et PGV), les intensités collectives sont majoritairement utilisées. Par exemple, Souriau (2006) utilise les données collectives du BCSF et de SisFrance pour établir ses lois PGA-intensités. Dans ce paragraphe, nous allons comparer les PGA et PGV de cette étude avec les intensités SQI que j'ai utilisées et les données collectives du BCSF et de SisFrance.

Cette comparaison a été réalisée dans les cercles de 10km autour des stations accélérométriques du RAP. J'ai calculé les moyennes des intensités de chaque type dans ces cercles puis nous les avons tracées en fonction du PGA et du PGV correspondants. La méthodologie complète est expliquée dans la section 3.2. J'ai ensuite calculé des corrélations entre les trois types d'intensité et les paramètres du mouvement du sol PGA et PGV par régression linéaire.

Pour chacun des séismes de Rambervillers et Roulans, nous avons 9 valeurs d'intensité, en revanche pour Waldkirch seulement 6 valeurs d'intensité sont disponibles. Comme expliqué dans la section 3.2.2, le nombre de données pour chaque séisme est trop faible pour être statistiquement significatif. Ainsi, pour chaque jeu de données, les 3 séismes sont mélangés. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** regroupe les valeurs d'intensités moyennes de chaque type autour de chaque station accélérométrique. 23 données en tout sont disponibles pour les intensités BCSF collectives, et SisFrance, soit 21 degrés de liberté (23 données – 2 paramètres = 21). Dans le cas des SQI, nous avons 23 degrés de liberté car 25 données et toujours 2 paramètres.

	STHE	STMU	STSM	STBU	STBO	STDm	STUF	STBR	STFL
RAMBERVILLERS									
SQI	3,162	3,433	3,991	3,933	3,547	4,095	3,325	3,712	2,933
BCSF-coll	3,8947	4,2353	4,6071	4,4	3,7667	4,5938	3,9394	4,2763	3,9375
SisFrance	3,4375	3,8333	4,9	4,4333	3,913	4,5938	3,5893	3,9167	3,3182
ROULANS									
SQI	3,068	2,409	3,000	3,344	3,242	3,086	3,193	3,108	3,733
BCSF-coll	3,0625	1,6333	3,0909	3,3182	2,9667	3,2059	3,08	3,1591	4
SisFrance	2,9	1,3333	3,1875	3,125	2,9375	3,1071	2,875	3,1875	3,7632
WALDKICH									
SQI		2,841	2,921	2,722	3,008	2,857	3,060		2,000
BCSF-coll		2,9	3,1818	2,85	3,0417	2,6875	3,0972		
SisFrance		3,8636	3,5455	3,0556	3,7188	2,8438	3,75		

Tableau 21: Tableau récapitulatif des valeurs des trois types d'intensités pour les trois séismes sur des surfaces de 10km autour des stations accélérométriques.

La Figure 27 et la Figure 28 représentent les intensités moyennes respectivement individuelles (point verts), collectives BCSF (points bleus), collectives SisFrance (points rouges) sur des surfaces de 10 km autour des stations, en fonction respectivement des PGA et des PGV correspondants. Les droites représentent les droites de corrélation des données (droite verte pour les données individuelles, bleue pour les données collectives BCSF et rouge pour les données SisFrance).

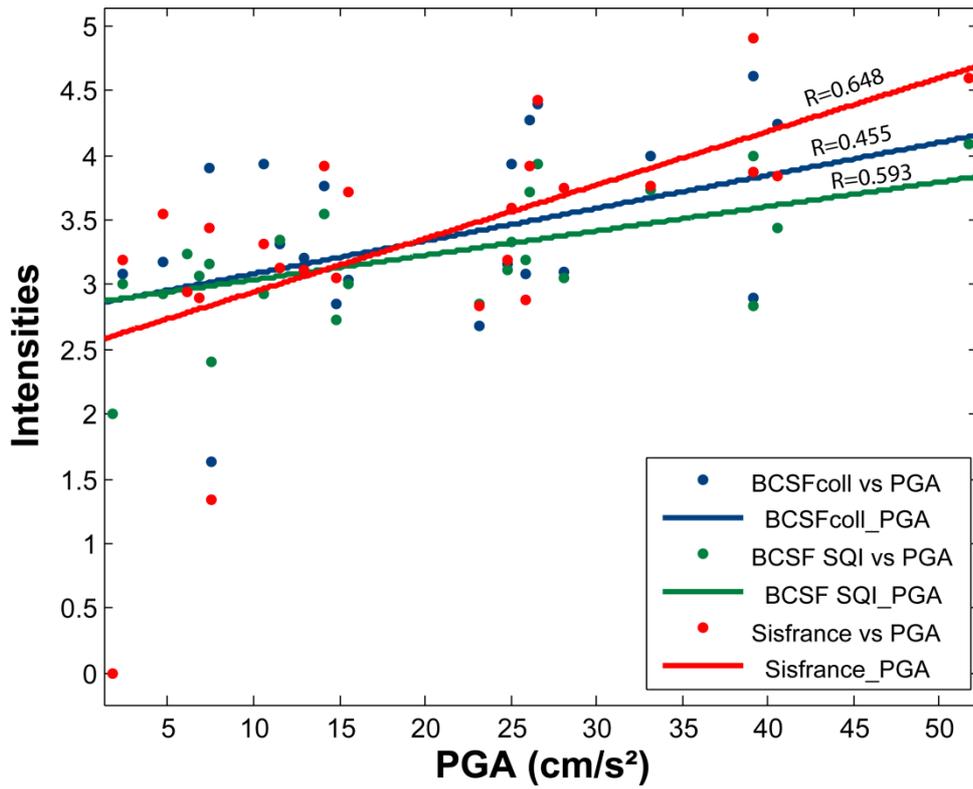


Figure 27: Intensités collectives BCSF (BCSFcoll), SisFrance, et SQR en fonction du PGA 10km autour des stations accélérométriques avec droites de corrélation entre les intensités et les PGA

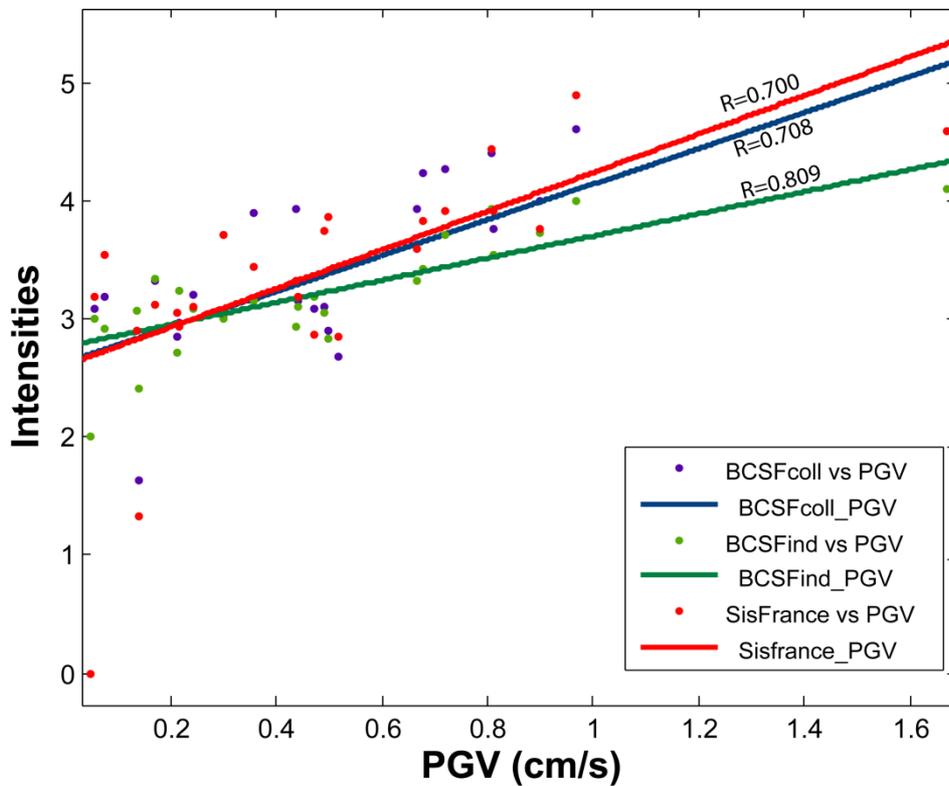


Figure 28: Intensités collectives BCSF (BCSFcoll), SisFrance, et SQR (BCSF SQR) en fonction du PGV 10km autour des stations accélérométriques avec droites de corrélation entre les intensités et les PGV

D'après le tableau de Taylor (1997) de l'Annexe 11, pour des degrés de libertés compris entre 20 et 25, deux variables sont considérées comme significativement corrélées à partir d'une corrélation R proche de 0.5 et hautement corrélées à partir d'une valeur de R proche de 0.6.

Dans le cas de la Figure 28 données d'intensité (quelles qu'elles soient) et PGV sont hautement corrélées (dans tous les cas, $R > 0.7$). La meilleure corrélation est obtenue avec les SQI. Les données collectives donnent des valeurs de corrélation du même ordre de grandeur. Pour un PGV donné, les intensités collectives semblent plus faibles que les SQI dans les gammes d'intensités inférieures à 3, puis plus fortes pour des données supérieures à 3. Les données collectives semblent équivalentes jusqu'à l'intensité 4 où les intensités SisFrance sont légèrement plus élevées que les données BCSF pour les mêmes valeurs de PGV. Notons également que les pentes de courbes des données collectives sont plus fortes que celle des SQI.

Dans le cas de la Figure 27, les intensités collectives SisFrance et les SQI sont hautement corrélées avec le PGA. En effet, la valeur de R est proche de 0.6 dans le cas des SQI, et supérieure à 0.6 dans le cas des intensités SisFrance. La valeur de corrélation est proche de 0.5 avec les intensités collectives du BCSF, ces dernières peuvent donc être considérées comme corrélées avec le PGA. La meilleure corrélation est obtenue avec les données SisFrance (cela peut être dû à la façon dont le BRGM attribue les intensités, différemment du BCSF.) Contrairement à la Figure 27, dans le cas des faibles intensités (inférieures à 3), les intensités SQI et collectives du BCSF sont équivalentes pour une même valeur de PGA, tandis que les intensités SisFrance sont inférieures aux deux autres types d'intensité. Cependant pour les intensités supérieures à 3.5, pour une même valeur de PGA, les intensités collectives SisFrance et BCSF sont supérieures aux SQI. Néanmoins, contrairement au cas de la Figure 27, dans des gammes d'intensités de 4-5, les intensités communales ne sont plus équivalentes et présentent un écart d'un demi-degré d'intensité. Cette différence pourrait être due à la façon dont les intensités sont évaluées dans les deux organismes, BCSF et BRGM. Remarquons également, dans la même gamme d'intensités (4-5) un écart d'environ un degré d'intensité entre les intensités SisFrance et les SQI, les SQI étant inférieures aux intensités collectives. Cet écart se retrouve lors de la comparaison des intensités SQI et des intensités collectives en fonction de la distance hypocentrale. Cette différence pourrait trouver une explication dans le fait que lorsqu'on s'éloigne de l'épicentre du séisme le nombre de témoignages individuels menant à une faible SQI est plus important et pourrait ainsi tirer les SQI moyennes sur les cercles de 10km vers des valeurs plus faibles.

Les deux figures montrent que les corrélations sont meilleures entre les SQI moyennes et les paramètres de mouvement du sol en particulier avec le PGV. Ce résultat est cohérent avec celui tiré de la Fig. VII qui démontre que les données observées se corrélaient mieux avec les PGV qu'avec les PGA quel que soient les équations de prédiction utilisées.

3.3.2 ETUDE DE LA CORRÉLATION EN PRENANT LA COMPOSANTE HORIZONTALE PORTANT LE PGA MAXIMUM

Dans la littérature, pour étudier les corrélations entre intensités et paramètres du mouvement du sol, la plupart des auteurs utilisent les composantes horizontales des signaux instrumentaux. Cependant, comme l'explique la section 1.3.4, toutes les études n'utilisent pas la même stratégie. Communément, la communauté sismologique utilise soit la composante horizontale qui porte le paramètre du mouvement du sol (en général il s'agit du PGA) le plus fort (Souriau, 2006 ; Ambraseys, 1974), soit la résultante des deux composantes horizontales (Atkinson et Kaka, 2007 ; Davenport, 2003 ; Gutenberg et Richter, 1956), soit enfin indifféremment l'une ou l'autre des composantes horizontales (Koliopoulos et al, 1998).

Lors de cette étude j'ai testé les deux premières possibilités. Les corrélations entre paramètres macrosismiques et résultante horizontale des mouvements du sol suivent la même tendance que celles avec la composante horizontale qui porte le maximum du PGA. La Figure 29 présente les corrélations entre les paramètres macrosismiques et la composante horizontale du mouvement du sol qui porte le maximum du PGA. Cette figure est à comparer avec la Fig. VII a) de la section 3.2.2. Toutes deux donnent des résultats similaires, bien que les corrélations avec la résultante horizontale du mouvement du sol présentent des corrélations un peu plus élevées, en particulier celles avec le PGV ($R=0.8$ contre 0.7 pour la composante portant le PGA maximum). Une exception est faite cependant pour la chute de corrélation avec les $\langle \text{SQI} \rangle$ autour de 1Hz, qui ne se produit pas avec la composante horizontale portant le PGA maximum. La différence majeure entre ces deux figures réside dans l'augmentation des corrélations au-delà de 25Hz. Seuls les sons entendus ne présentent pas de forte remontée de corrélation. Les corrélations entre les sons et les paramètres instrumentaux sont presque identiques entre la résultante horizontale et la composante horizontale qui porte le PGA maximum. En revanche, les corrélations avec la composante verticale sont inférieures aux corrélations avec la résultante horizontale et la composante horizontale qui porte le maximum du PGA. A haute fréquence, on pourrait s'attendre à voir les sons mieux corrélés avec la composante verticale du mouvement du sol à cause de l'effet de membrane produit par le mouvement vertical ce qui n'est pas le cas. Nous n'avons cependant actuellement pas d'explication à ce phénomène.

Comme pour les corrélations avec la résultante horizontale du mouvement du sol (Fig. VII a), le PGV est le paramètre scalaire qui présente les meilleures corrélations avec un coefficient supérieur à 0.5 pour tous les paramètres macrosismiques, notamment avec les $\langle \text{SQI} \rangle$ ($R > 0.7$). Le PGA est également très bien corrélé avec les $\langle \text{SQI} \rangle$ ($R \sim 0.6$), le plus intéressant restant la valeur de corrélation très proche de celle des PSA avec les vibrations des petits objets (groupe Q_VM).

Pour les corrélations avec le paramètre spectral PSA, nous retrouvons de fortes valeurs de corrélation en dessous de 10Hz, (des fréquences inférieures à 5Hz), et la chute des corrélations

entre 10 et 25Hz. De même, à hautes fréquences, les corrélations des paramètres macrosismiques avec le PSA approchent la valeur de corrélation obtenue avec le PGA.

Les corrélations entre le CAV ou l'AI et les paramètres macrosismiques sont aussi faibles ($R < 0.3$).

A part à basse fréquence et pour le PGV, les corrélations des bruits entendus et des chutes et déplacements d'objets avec les paramètres instrumentaux sont faibles. Comme pour la Fig. VII a), cela peut être expliqué par le fait que les séismes sont modérés ($\langle SQI \rangle < IV$) et les données étudiées à des distances épacentrales supérieures à 30km, pour lesquelles ces effets ne sont pas dominants et peuvent être cachés par d'autres effets macrosismiques.

En conclusion, les corrélations entre les paramètres macrosismiques et la composante horizontale qui porte le maximum du PGA sont très proches de celles obtenues avec la résultante horizontale. Les points de différence majeurs sont l'absence de chute de corrélation de la SQI autour de 1Hz, ainsi que la remontée des valeurs de corrélations beaucoup moins importante à haute fréquence pour les corrélations calculées avec la composante horizontale qui porte le maximum du PGA.

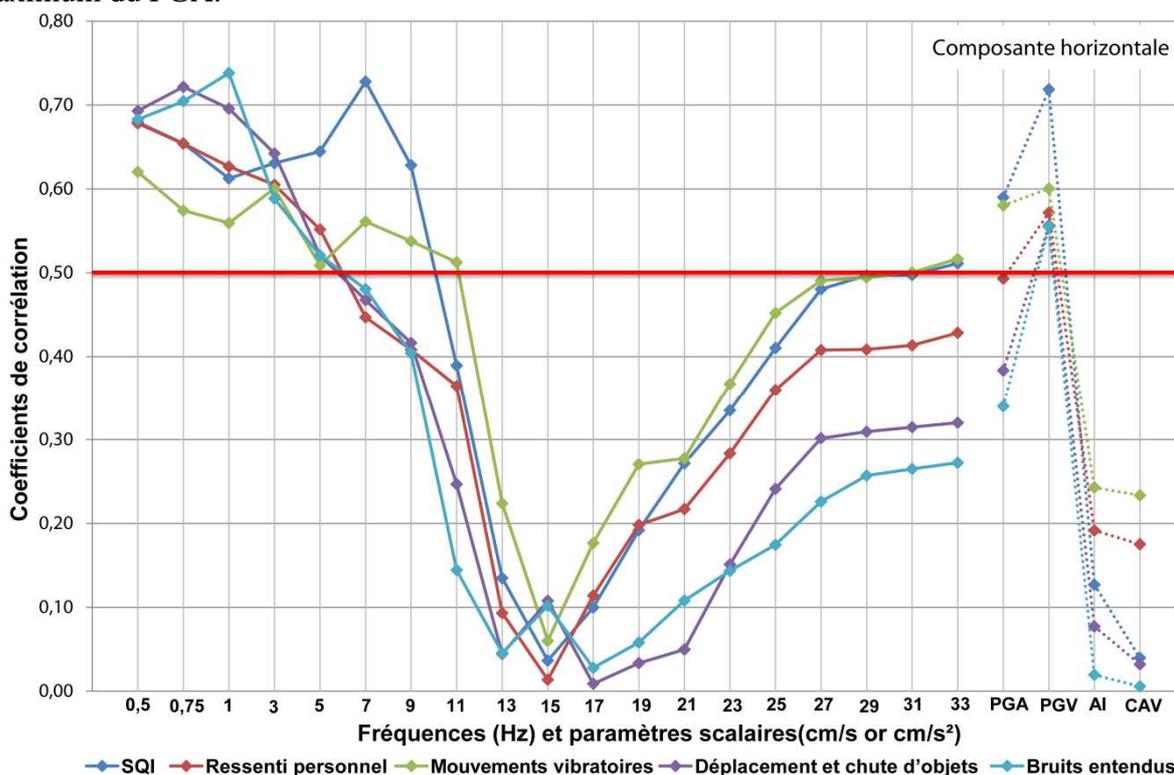


Figure 29: Corrélation entre les paramètres macrosismiques et la composante horizontale du mouvement du sol qui porte le PGA maximum. Corrélations des paramètres macrosismiques avec le PSA (à gauche) et avec les paramètres scalaires du mouvement du sol (à droite)

3.3.3 ETUDE DE LA CORRÉLATION AVEC LES DENSITÉS SPECTRALES DE PUISSANCE

Dans le but d'avoir accès au mouvement du sol de façon plus sélective en fréquences et ainsi éviter le lissage dû à l'oscillateur dans les corrélations avec le spectre de réponse, j'ai étudié les corrélations entre les paramètres macrosismiques et les densités spectrales de puissance. Ces densités spectrales de puissance se calculent à partir du spectre de Fourier, calculé sur des fenêtres glissantes, et en sont donc proches dans la forme. L'idée de cette partie de l'étude est de vérifier si les bonnes corrélations en dessous de 10Hz sont réellement dues à un filtrage des bâtiments. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente pour la station STHE le signal accélérométrique, le spectre de Fourier, le spectre d'accélération et la densité spectrale de puissance.

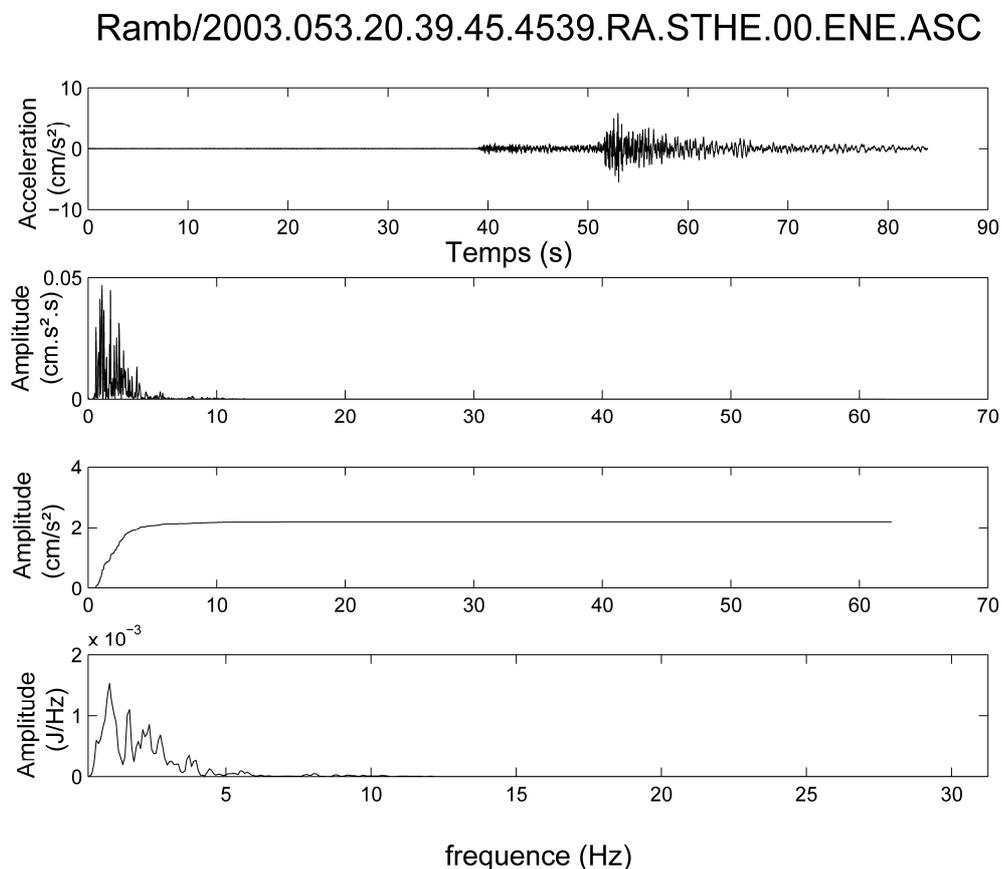


Figure 30: Pour la station STHE, signal accélérométrique enregistré lors du séisme de Rambervillers, spectre de Fourier, spectre d'accélération et densité spectrale de puissance

La moyenne des densités spectrales de puissance a été réalisée sur des fenêtres glissantes (longueur de 20 échantillons (0.12Hz)) avec recouvrement. Les corrélations entre paramètres macrosismiques et densité spectrale de puissance ont ensuite été calculées et les résultats sont présentés dans la Figure 31 pour la résultante horizontale et dans la Figure 32 pour la composante verticale.

Notons que les corrélations sont moins lissées que dans le cas des corrélations avec les spectres de réponse. Dans le cas de la résultante horizontale, les corrélations sont fortes dans la gamme de

fréquence 1.5-6Hz après laquelle les corrélations chutent drastiquement comme dans le cas des corrélations avec le spectre de réponse. Notons le pic de corrélation avec la SQI à 6Hz.

Dans le cas des corrélations avec la composante verticale de la densité spectrale de puissance, l'allure générale des corrélations est la même que dans le cas des corrélations avec le spectre de réponse. Notons cependant le pic de corrélation pour tous les paramètres macrosismiques entre 3.5 et 4Hz, et notamment pour les chutes et déplacements d'objets ($R > 0.7$).

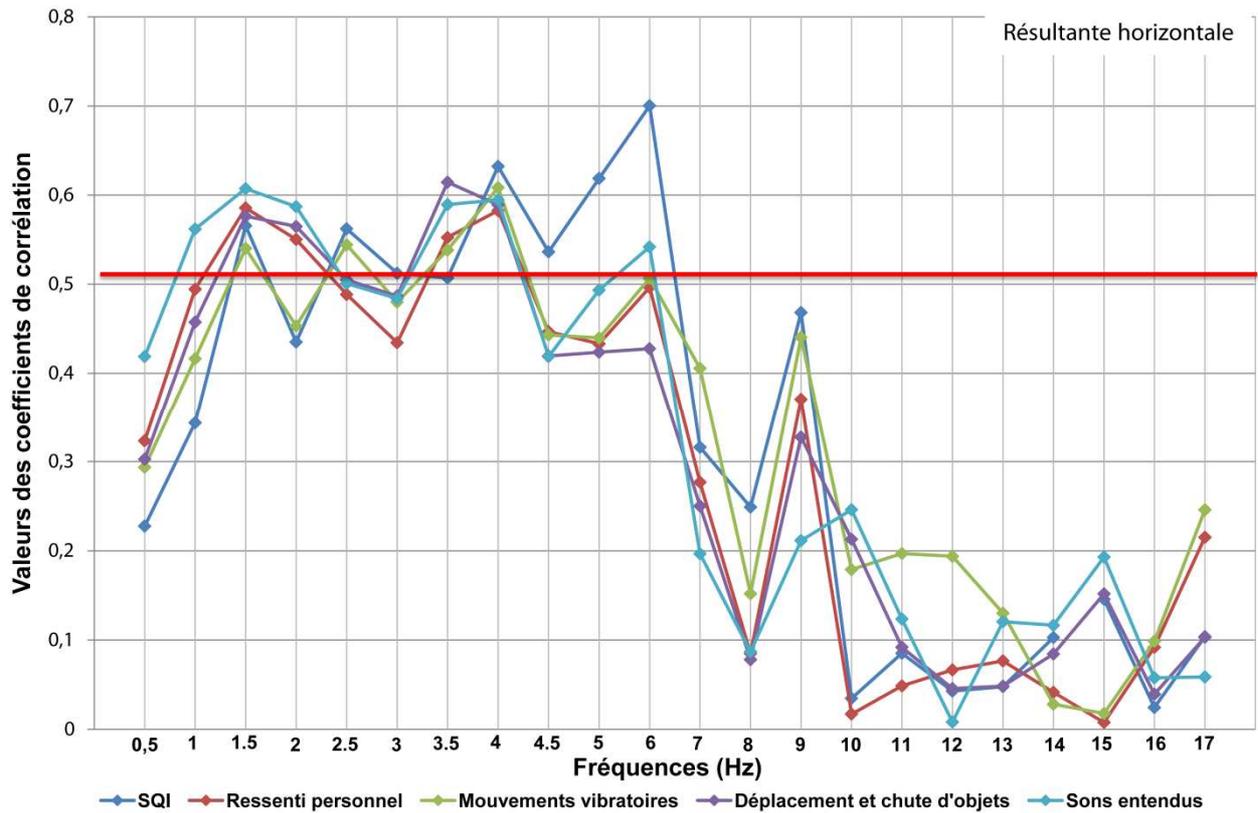


Figure 31: Corrélations entre les paramètres macrosismiques et la résultante horizontale de la densité spectrale de puissance

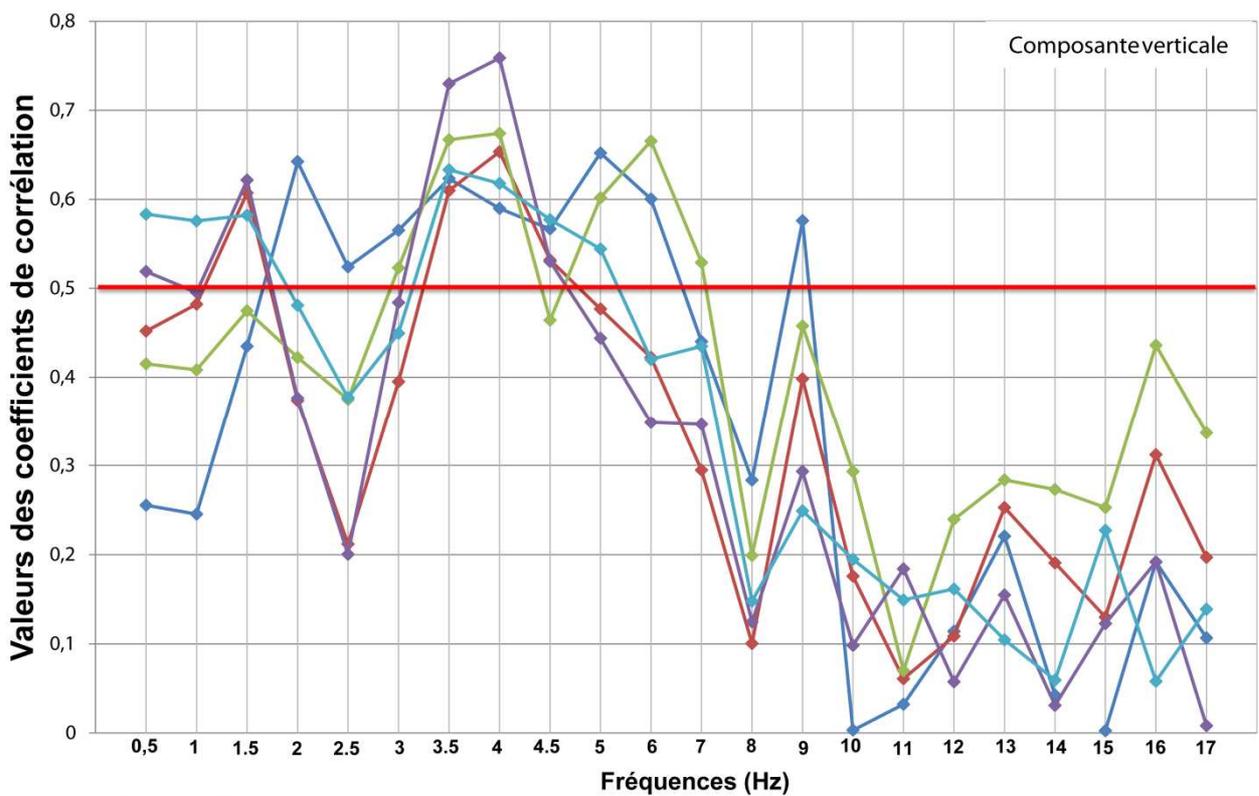


Figure 32: Corrélations entre paramètres macrosismiques et la composante verticale de la densité spectrale de puissance

Rappelons que le PGV se trouve à basse fréquence (aux alentours de 1 Hz par exemple sur la Fig. III c. Ainsi, les corrélations avec la densité spectrale de puissance, fortes entre 3 et 6Hz tant pour la résultante horizontale que pour la composante verticale, nous permettent d'émettre l'hypothèse que

- non seulement les mouvements du sol peuvent être amplifiés par les bâtiments (corrélations entre 0.5 et 9Hz avec le spectre de réponse),
- mais les fortes corrélations entre les paramètres spectraux et les paramètres macrosismiques font écho aux fortes corrélations entre le PGV et les paramètres macrosismiques, en particulier avec la SQI, phénomène que l'on retrouve ici pour la résultante horizontale aux alentours de 6Hz.

Ainsi les corrélations fortes en dessous de 10Hz peuvent s'expliquer à la fois par l'amplification du mouvement du sol par les bâtiments dans leur gamme de fréquences de résonances (en dessous de 10Hz pour la plupart (Michel, 2007) et par l'influence du PGV aux fréquences auxquelles il se trouve .

4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude comparative des paramètres macrosismiques et instrumentaux pour trois séismes du Nord-est de la France de magnitude de moment $M_w \sim 4.5$ a été réalisée. Elle a permis de répondre ou de donner des éléments de réponses aux quatre questions principales posées : Les intensités macrosismiques tirées des questionnaires individuels du BCSF permettent-elle de faire apparaître des effets régionaux systématiques ? Quel(s) paramètre(s) instrumental ou macrosismique traduit le mieux le mouvement du sol ? Quelle méthode de traitement est optimum pour comparer les paramètres macrosismiques aux paramètres instrumentaux ? L'étude des questionnaires du Bureau Central Sismologique Français permet-elle de montrer que des champs de questions définis sont caractéristiques d'une gamme de fréquence particulière ?

L'originalité de cette étude est double. Elle propose en premier lieu une méthode d'investigation objective et aisément reproductible. Elle a également permis de mettre en évidence quatre nouveaux paramètres macrosismiques ainsi qu'une intensité relative à un questionnaire macrosismique qui diffère de l'intensité communale couramment utilisée.

L'étude des résidus d'intensités entre les SQI agrégées par commune observées et modélisées par une régression linéaire dans l'est de la France, pour le séisme de Rambervillers notamment, a montré, le nombre de données et la méthodologie employée ici ne permettent pas une mise en évidence fiable des effets régionaux pouvant biaiser les données.

L'étude détaillée des corrélations des réponses aux questions des formulaires macrosismiques individuels du BCSF, a permis de confirmer la pertinence de quatre champs de questions en plus de l'intensité SQI associée à chaque questionnaire : le ressenti personnel, les mouvements vibratoires des petits objets, les déplacements et chutes d'objets ainsi que les sons entendus. Ces quatre paramètres macrosismiques possèdent une bonne corrélation interne et sont bien corrélés avec la SQI. L'étude des corrélations avec les paramètres instrumentaux du mouvement du sol a indiqué que les corrélations les plus fortes sont obtenues lorsque les paramètres macrosismiques sont moyennés sur des surfaces de 10 km autour des stations accélérométriques. Les corrélations obtenues avec la résultante horizontale des paramètres instrumentaux sont supérieures à celles obtenues avec la composante horizontale portant le maximum de l'accélération du sol.

Parmi les paramètres scalaires, le PGV est le paramètre qui présente les plus fortes corrélations (jusqu'à $R \sim 0.8$ pour la SQI) avec la moyenne des paramètres macrosismiques dans des cercles de 10 km entourant chaque station accélérométrique, tant pour la résultante horizontale que pour la composante verticale du mouvement. En revanche le CAV et l'intensité d'Arias ne sont pas des indicateurs pertinents dans le domaine des faibles intensités ($I < VI$).

Les relations entre le PGA et les intensités macrosismiques, publiées dans la littérature avec des séismes de magnitudes similaires aux nôtres prédisent des intensités supérieures aux valeurs moyennes de SQI observées dans des cercles de 10 km autour des stations accélérométriques. Celles prédites à partir des valeurs de PGV sont en bien meilleur accord avec celles que nous observons, mais dont la pente SQI/PGV est légèrement plus faible. Cette pente est proche de celle observable pour les faibles intensités sur la compilation des données mondiales de Cua et al. (2010). Cet accord confirme que le PGV est un indicateur robuste du mouvement du sol bien corrélé aux observations macrosismiques dans le domaine des faibles intensités.

En ce qui concerne les caractéristiques spectrales du mouvement du sol, la corrélation avec les paramètres macrosismiques présente une variation claire avec la fréquence, en particulier pour la composante horizontale. Cette corrélation est maximum en dessous de 10Hz et présente une forte chute entre 10 et 25 Hz. A haute fréquence, au delà de 25 Hz, la corrélation redevient significative (supérieure à 0.5) et atteint une valeur proche de celle obtenue avec le PGA pour la SQI et l'indicateur « vibrations des petits objets ». Une tendance similaire est observée pour la composante verticale. Une forte corrélation à basse fréquence (entre 3 et 10Hz) est suivie par une chute des corrélations moins drastique que dans le cas de la résultante horizontale entre 10 et 25Hz. Plusieurs hypothèses sont proposées pour expliquer cette dépendance en fréquence. A basse fréquence, le mouvement du sol serait amplifié par les bâtiments dans leur gamme de fréquence de résonance (entre 1 et 10Hz). Cette hypothèse est renforcée par le fait que 98% des témoins qui ont répondu au questionnaire du BCSF se trouvent à l'intérieur des bâtiments. Au-delà de 10Hz, une combinaison entre la perte d'énergie du signal et une diminution de la sensibilité des témoins du au bruit anthropique urbain plus important autour de 15Hz pourrait contribuer à la perte de corrélation. Il est possible d'envisager aussi que ces fréquences ne soient plus caractéristiques des fréquences de résonance des bâtiments et qu'en conséquence ces derniers n'amplifient plus le mouvement du sol. Enfin au-delà de 25Hz, le domaine de fréquence de vibration des petits objets, celui du PGA, et la possibilité d'être dans un mode de résonance

harmonique des bâtiments pourrait expliquer le regain de corrélation aux hautes fréquences. Il est également possible de supposer que les témoins soient particulièrement sensibles aux hautes fréquences.

En dehors des vibrations des petits objets, paramètre qui présente une corrélation supérieure à 0.5 au delà de 25Hz, l'étude des corrélations avec le paramètre spectral montre que les paramètres macrosismiques définis par regroupement des champs de question ne sont pas caractéristiques d'une fréquence particulière.

Cette étude a apporté des résultats intéressants et jusque là inédits car non encore étudiés. Cependant, de nombreuses perspectives peuvent s'ouvrir dans ce domaine. Ainsi, il serait intéressant par la suite, à la fois de :

- Reprendre l'étude des effets régionaux.
 - o Tout d'abord, il faudrait avoir un nombre de données macrosismiques (et donc un nombre de séismes) plus important afin de pouvoir étudier les effets de sites dans les cercles de 10km. Il faudrait également appliquer aux données une méthode de krigeage et stacker les données des différents séismes afin de mettre en évidence un éventuel biais dans les données par des effets régionaux.
 - o Il pourrait également être intéressant d'affiner la modélisation des données en utilisant par exemple un modèle quadratique. Cependant, ces paramètres ne dépendent pas du modélisateur et il est possible que le nombre de témoignages obtenus pour les séismes qui ont eu lieu dans la zone d'étude ne soit pas assez important.
 - o Cette étude des effets régionaux pourrait être effectuée sur une autre région comme les Pyrénées et les Alpes, bien que de façon général la population des ces régions soit moins encline à répondre aux questionnaires (habitude des séismes, population moins réceptive au témoignage sur internet, site internet moins bien connu...)
 - o Enfin, dans le cas où les SQI permettraient une mise en évidence des effets régionaux, il serait intéressant de regarder :
 - quelle est la dépendance au modèle utilisé pour prédire les SQI, en comparant les résultats obtenus avec un modèle basé sur les données observées et ceux obtenus avec un modèle tiré de la littérature
 - quelle est la dépendance au séisme en comparant les résultats obtenus pour un même modèle sur des séismes différents (mécanisme au foyer différent par exemple comme Rambervillers et Roulans).
- Etendre la gamme d'intensité comprise entre II et V dans cette étude:
 - o Dans des régions françaises comme par exemple les Pyrénées où les témoignages individuels sont assez nombreux et des signaux accélérométriques sont disponibles.
 - o Dans des régions à forte sismicité comme les Antilles ou l'Italie où les séismes sont nombreux bien instrumentés et bien renseignés. Dans le cas des Antilles il

pourrait être intéressant de mettre en place un système de témoignage individuel (à l'heure actuelle la plupart des témoignages sont collectifs). Cette thématique est actuellement au cœur d'un projet mené par le BRGM.

- Dans des régions à plus faible sismicité, comme la Belgique où les intensités sont globalement faibles mais avec une bonne instrumentation et un nombre de témoignages important.

- Faire évoluer les questionnaires macrosismiques

Le nombre de questions du questionnaire individuel BCSF est très important ce qui peut décourager certains témoins, et par conséquent engendrer une perte d'information. Le questionnaire est d'une part, établi à partir de l'échelle EMS-98 et suit les différentes observations décrites dans celle-ci, et est d'autre part adapté à tout niveau de séisme. Il semble donc délicat de supprimer purement et simplement des questions. Cependant, d'après mon étude et ma connaissance à la fois du questionnaire et de la base de données contenant les réponses, je proposerais de rendre obligatoire la réponse aux questions qui composent les champs de questions déterminés ici. Il s'agirait de rendre obligatoire la réponse à 12 questions laissant la possibilité aux témoins de répondre ou non aux autres questions. Il est évident que certains témoins refuseront de répondre aux questions obligatoires et le nombre de témoignages pourrait s'en voir diminuer. Cependant cette méthode permettrait d'augmenter la fiabilité et la robustesse des témoignages et donc de la base de données du BCSF.

En parallèle, cette évolution des questionnaires macrosismiques est au cœur des problématiques macrosismiques à l'échelle européenne, puisqu'elle fait l'objet d'un workshop initié lors de la conférence ESC2010. Actuellement une ébauche de questionnaire se met en place afin d'être testée comme base de questionnaire dans les différents pays européen dans l'optique de pouvoir partager, comparer et harmoniser les bases de données en cas de séisme notamment transfrontalier.

- Mise au point d'un panel de témoin fixe autour des stations accélérométriques

Cette méthode est déjà utilisée en Italie (Sbarra et al, 2010), et il serait intéressant de la développer en France où nous disposons d'un réseau de stations accélérométriques permanent notamment à proximité des habitations dans des villes comme Grenoble ou Strasbourg. Il s'agirait en fait de constituer un panel de témoins fixe, idéalement dans un premier temps à proximité des stations mais qui pourrait ensuite s'étendre. Chaque témoin de ce panel serait sollicité par mail à chaque séisme et devrait répondre au questionnaire macrosismiques qu'il ait ou non ressenti l'évènement. Cela permettrait d'avoir un réseau de témoignages fiable et robuste, commun à chaque séisme et permettant ainsi de limiter les incertitudes et d'affiner et fiabiliser les études.

- Densifier le réseau instrumental dans l'est de la France

Il pourrait être intéressant de densifier le réseau accélérométrique et/ou sismométrique dans l'est de la France de façon permanente dans l'idéal, par exemple par l'installation de capteurs chez des particuliers ou dans des bâtiments cibles (mairies, écoles, gendarmeries). La mise en place d'un

tel dispositif restant évidemment très onéreux, il pourrait être remplacé par la mise en place systématique d'un réseau temporaire après chaque séisme afin d'étudier la variabilité locale du mouvement du sol. Couplé à un nombre important de témoignages autour de ces stations temporaires (par exemple au travers d'un panel de témoins systématique déterminés), l'étude de ces signaux permettrait une meilleure appréhension de la variabilité locale du mouvement du sol. Mieux connue, cette dernière pourrait permettre l'accès à une meilleure prédiction des mouvements du sol.

- Rechercher des explications aux phénomènes non expliqués

Il serait important de rechercher l'explication définitive et de vérifier les hypothèses concernant la chute des corrélations autour de 15Hz.

Enfin, les sons entendus présentent une excellente corrélation avec les paramètres instrumentaux, en dessous de 10Hz et avec le PGV. S'agit-il de bruits induits par la structure dans laquelle se trouvent les témoins? Il serait intéressant de comprendre cette étrange corrélation.

A plus grande échelle, ce travail de thèse pourrait être utilisé pour apporter des informations dans le cadre de réalisation éventuelles de shake maps en France.

5 RÉFÉRENCES

Ambraseys NN (1974) The correlation of intensity with ground motions. In: *Advancements in Engineering Seismology in Europe*, Trieste

Aptikaev FF, Shebalin NV (1988) The correlation between macroseismic effects and dynamic parameters of ground motion. In: *Investigations of seismic hazard (Problems of engineering seismology, 29)*, Nauka Publishing House, Moscow, pp. 98–108 (en russe)

Arias A (1970) *Seismic design for nuclear power plants*, chapter A measure of earthquake intensity. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp 438-483

Atkinson GM, Kaka SI (2006) *Relationships between Felt Intensity and Instrumental Ground Motion for New Madrid ShakeMaps*. Technical Report, Department of Sciences, Carleton University, Ottawa, Canada K1S5B6.

Atkinson GM, Kaka SI (2007) *Relationships between Felt Intensity and Instrumental Ground Motion in the Central United States and California*. *Bull Seismol Soc Am* 90(2):497–510.

Atkinson GM, Sonley E (2000) *Empirical relationships between Modified Mercalli intensity and response spectra*. *Bull Seismol Soc Am* 90:537–544

Atkinson GM, Wald DJ (2007) "Did You Feel It?" Intensity Data: A Surprisingly Good Measure of Earthquake Ground Motion. *Seismol Res Lett* 78(3):362–368.

Allen TI, Wald DJ (2009) *Evaluation of ground-motion modeling techniques for use in Global ShakeMap: a critique of instrumental ground-motion prediction equations, peak ground motion to macroseismic intensity conversions, and macroseismic intensity predictions in different tectonic settings*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1047 114, Golden, USA.

Auclair S, avec la collaboration de Rey J, (2009) *Corrélation : indicateurs de mouvements du sol/intensité. Vers l'acquisition conjointe de données instrumentales et macrosismiques*. Rapport final. BRGM/RP-57785-FR

Baer M, Deichmann N, Braunmiller J, Husen S, Fäh D, Giardini D, Kästli P, Kradošfer U, Wiemer S, (2005) *Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2004*. *Eclogae Geol Helv* 98:407-418.

Bakun W, Scotti O (2006) *Regional intensity attenuation model for France and the estimation of magnitude and location of historical earthquakes*. *Geophys J Int*, 164:596-610.

Benioff H, (1934) The physical evaluation of the seismic destructiveness. Bull Seism Soc Am 4:398-403

Biot MA (1941) A mechanical analyser for the prediction of earthquakes stresses. Bull Seism Soc Am 31:151-171

Bommer JJ, Udias A, Cepeda JM, Hasbun JC, Salazar WM, Suarez A, Ambraseys NN, Buforn E, Cortina J, Madariaga R, Mendez P, Mezcua J, Papastamatiou D (1997) A new digital accelerograph network for El Salvador. Seism. Res. Let. 68(3):426–37.

Boatwright J, Thywissen K, Seekins LC (2001) Correlation of ground motion and Intensity for the 17 January 1994 Northridge, California, earthquake. Bull Seismol Soc Am 91(4):739–752.

Bour M (1993) Simulation de forts mouvements du sol à partir de petits séismes utilisés comme des fonctions de green empiriques. PhD Thesis, Université Louis Pasteur, Strasbourg

Brenn N, Stange S Brüstle W, Henk A, Stribny B (2006) Das Beben von Waldkirch am 5.12.2004, poster, Albert Ludwigs Universität, Freiburg, Allemagne.

Cabañas L, Benito B, Herraiz M (1997) An approach to the measurement of the potential structural damage of earthquake ground motions. Earthquake Eng Struc 26(1):79-92

Campbell K, Bozorgnia Y (2010) Analysis of Cumulative Absolute Velocity (CAV) and JMA Instrumental Seismic Intensity (IJMA) Using the PEER-NGA Strong Motion Database, PEER Report 2010/102 Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.

Cancani A (1904). Sur l'emploi d'une double échelle sismique des intensités, empirique et absolue. In: Proceedings of the 2nd international conference of seismology, 24-28 Juillet 1903, Special volume II(Annexe A-10) :281-283.

Cara M, Schlupp A, Sira C (2007) Observations sismologiques : Sismicité de la France en 2003, 2004, 2005, Bureau Central Sismologique Français, ULP/EOST-CNRS/INSU.

Cara M, Brüstle W, Gisler M, Kästl P, Sira C, Weihermüller C, Lambert J (2005) Transfrontier macroseismic observations of the $M_I = 5.4$ earthquake of February 22, 2003 at Rambervillers, France. J Seismol 9:317–328.

Cecic I., Musson R. (2004) Macroseismic surveys in theory and practice. Nat Hazards 31(1):39-61.

Chernov YK (1989). Strong Ground Motion and Quantitative Assessment of Seismic Hazard, Fan Publishing House, Tashkent (en russe).

Chernov YK, Sokolov VY (1983) Some relations between ground motion parameters and felt intensity of the earthquakes. In: Problems of engineering seismology 24, Nauka Publishing House, Moscow, pp. 96–111 (en russe)

Chernov YK, Sokolov VY (1999) Correlation of seismic intensity with Fourier acceleration spectra, Phys. Chem. Earth (A) 24:523–528

Coburn A, Spence J (2002) Earthquake protection. John Wiley & Son, Ltd, 2nd edition

Cua G., Wald D. J., Allen T. I., Garcia D., Worden C.B, Gerstenberger M., Lin K., and Marano K. (2010) “Best Practices” for Using Macroseismic Intensity and Ground Motion-Intensity Conversion Equations for Hazard and Loss Models in GEM1, GEM Technical Report 2010-4, GEM Foundation, Pavia, Italy.

Das Rothe Buch Von Basel (Le livre rouge de Bâle) (1357)

Davenport PN (2003) Instrumental measures of earthquake intensity in New Zealand. In Proceedings of 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering, Christchurch, February 2003.

Delouis B, Charlet, J, Vallee M, (2009) A method for rapid determination of Moment Magnitude M-w for moderate to large earthquakes from the Near-Field spectra of strong-motion records MWSYNTH). Bull Seismol Soc Am, 99:1827-1840.

De Rubeis V, Sbarra P, Sorrentino D, Tosi P (2009) Web based macroseismic survey: fast information exchange and elaboration of seismic intensity effects in Italy. In: Proceedings of the 6th International ISCRAM Conference, Gothenburg, Sweden.

Dewey J W, Glen Reagor B., Dengler L., Moley K. (1995) Intensity distribution and isoseismal maps for the Northridge, California earthquake of January 17, 1994. Open-File report 95–92, U.S. Geological Survey, p 5.

Eiby, G. A. (1966). The Modified Mercally scale of earthquake intensity and use in new Zealand. New Zeal J Geol Geop 9(1-2):122-124

Electrical Power Research Institute (EPRI), 1988. A Criterion for Determining Exceedance of the Operating Basis Earthquake, Report No. EPRI NP-5930, EPRI, Palo Alto, California

Faenza L, Michelini A (2010) Regression analysis of MCS intensity and ground motion parameters in Italy and its application in ShakeMap. *Geophys J Int* 180:1138-1152

Gasparini C, De Rubeis V, Tertulliani A (1992) A Method for the Analysis of Macroseismic Questionnaires. *Nat Haz* 5:169-177

Grünthal G (1998) European Macroseismic Scale 1998 EMS-98. *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie* vol.15, Luxembourg.

Gutenberg B, Richter CF (1956) Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. *Bull Seismol Soc Am*, 46:105–145.

Hanned A (2007) La séquence de répliques du séisme de Rambervillers du 22 Février 2003. Master thesis, Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg.

Hershberger J (1956) A comparison of earthquake accelerations with intensity ratings. *Bull. Seism. Soc. Am.* 46: 317

Hinsken S, Ustaszewski K, Wetzel A (2007) Graben width controlling syn-rift sedimentation: the Palaeogene southern Upper Rhine Graben as an example. *Int J Earth Sci* 96: 979-1002

Holden ES (1888) Note on earthquake intensity in San Francisco. *Am J Sci* 35(210):427-431.

Hunaidi O, Tremblay N (1997) Traffic-induced building vibration in Montréal. *Can J Civ Eng*, 24:736-753.

International Association for Earthquake Engineering (1988) Earthquake resistant regulations, a word list. Gakujutsu Bunken Fukyu-Kai editor (Association for Science Documents Information), Tokyo

Kaka SI, Atkinson GM (2004) Relationships between instrumental ground-motion parameters and modified Mercalli intensity in eastern North America. *Bull Seismol Soc Am* 94(5):1728–1736.

Karim KR, Yamazaki F (2002) Correlation of jma instrumental seismic intensity with strong motion parameters. *Earthquake Eng Struc*, 31:1191-1212

Koliopoulos PK, Margaritis BN, Klimis NS (1998) Duration and energy characteristics of Greek strong motion records. *J Earthquake Eng* 2:(3) 391-417

Kostov KM (2005) Site specific estimation of cumulative absolute velocity. In: proceedings of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18), Beijing, Chine

Landolt-Börnstein GVG (1984) Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. Volume 2a

Lesueur C, Cara M, Scotti O, Schlupp A, Sira C (2011) Linking ground motion measurements and macroseismic observations in France: a case study based on the RAP (accelerometric) and BCSF (macroseismic) databases. J Seism (submitted)

Liu HX, Zhang Q (1984) Ground-motion features and earthquake destructiveness. in: Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 881-888

Margottini C, Molin D, Serva L (1992) Intensity versus ground motion - a new approach using italian data. Eng Geol 33(1) :45-58

Medvedev SV. Sponheuer W. (1969) Scale of seismic intensity. Proc. World Conf. Earthquake Engr. A-2, 4th, Santiago, Chile, pp 143–153.

Michel C (2007) Vulnérabilité Sismique de l'échelle du bâtiment à celle de la ville. Apport des techniques expérimentales in situ. Application à Grenoble. PhD Thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble I.

Michel C, Guéguen P, Lestuzzi P, Bard P-Y (2010) Comparison between seismic vulnerability models and experimental dynamic properties of existing buildings in France, Bulletin of Earthquake Engineering, 8(6) : 1295-1307

Michel C, Guéguen P, El Arem S, Mazars J, Kotronis P (2010) Full Scale Dynamic response of a RC building under weak seismic motions using earthquake recordings, ambient vibrations and modeling. Earthq. Engng and Struct. Dyn., 39:419–441

Mohammadioun B, Mohammadioun G (2004) The Relationship between Macroseismic Intensity and the Physical Parameters of Ground Motion. APAT (Agency for Environmental Protection and Technical Services). 6p

Murphy JR, O'Brien LJ (1977) The correlation of Peak Ground Acceleration Amplitude with seismic intensity and other physical parameters. Bull Seismol Soc Am 67(3):877–915.

Musson RMW (1992) Routine Macrosismic Monitoring in the UK. In: Proceedings of the Second AB workshop on macroseismic methods, October 15-18 1990

Musson RMW (2000) Intensity-based seismic risk assessment. *Soil Dyn Earthq Eng*, 20(5-8):353-360.

Musson RMW, Henni PHO (1999) From questionnaires to intensities - Assessing free-form macroseismic data in the UK. *Phys Chem Earth Pt A* 24(6):511–515.

Musson RMW, Grünthal G, Stucchi M (2010) The comparison of macroseismic intensity scales. *J Seismol* 14 (2): 413-428

Pasolini C, Albarello D, Gasperini P, D'Amico V Lollo B (2008) The attenuation of seismic intensity in Italy, part II: modeling and validation, *Bull Seism Soc Am* 98:692–708

Regnier J, Laurendau A, Duval AM, Gueguen P (2010) From heterogeneous set of soil data to VS profile - Application on the French permanent accelerometric network (RAP) sites. In: *Proceeding 14EECE Ohrid, Macedonia Republic, August 30th-September 3rd 2010*.

Sbarra P, Tosi P, De Rubeis V, (2010), Web-based macroseismic survey in Italy: method, validation and results. *Nat Hazards* 54:563-581

Sieberg A (1932) *Handbuch der Geophysik, Band IV, Erdbeben, Die Erdbeben*, 527-686, tabelle 102, p552

Sieberg A (1943) *Experience and lessons on the origin, prevention and elimination of earthquakes damages*, Publishing House *Litse*, Sofia.

Sokolov VY, Chernov YK (1998) On the correlation of seismic intensity with Fourier amplitude spectra, *Earthquake Spectra* 14: 679-694

Sokolov VY (2000) Macroscopic intensity as a function of Fourier amplitude spectra: a tool to evaluate the regional and local peculiarities of the intensity distribution. *Proceedings of XXVII General Assembly of the European Seismological Commission, Lisbon, September 10–15*, 373–377.

Sokolov VY (2002) Seismic intensity & Fourier acceleration spectra: revised relationship. *Earthquake Spectra* 18:161-187

Sokolov VY, Wald DJ (2002) Instrumental intensity distribution for the Hector Mine, California & the Chi-Chi, Taiwan, earthquakes: comparison of two methods. *Bull. Seism. Soc. Am.* 92:2145–2162

Sørensen MB, Stromeyer D, Grünthal G (2007) Deliverable 4.1: Generation of area-specific relationships between ground motion parameters (PGA, PGV) at certain sites, magnitude M and distance R to the causative fault and site intensities in terms of EMS-98; Databank of intensity data points and related parameters. Seismic eArly warning For EuRoPe, GFZ Potsdam 19

Souriau A (2006) Quantifying felt events: A joint analysis of intensities, accelerations and dominant frequencies. *J Seismol* 10(1):23–38.

Taylor JR (1997) *Error Analysis: The study of uncertainties in Physical*, 2nd Ed, University Science Book, Sausalito.

Tertulliani A, Cecic I, and Godec M (1999) Unification of macroseismic data collection procedures: A pilot project for border earthquakes assessment. *Nat Haz*, 19(2-3):221-232

Trifunac MD, Brady AG (1975) On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. *Bull Seismol Soc Am* 65(1):139–162.

Tselentis GA, Danciu L. (2008) Empirical relationships between Modified Mercalli intensity and engineering ground-motion parameters in Greece. *Bull Seismol Soc Am* 98:1863-1875

Von Waltenkofen K, (1357) *Alphabetum Narratorium*

Wald DJ, Quitoriano V, Heaton TH, Kanamori H, Scrivner CW, Worden CB (1999) TriNet "Shakemaps": Rapid generation of Peak Ground Motion and Intensity maps for earthquakes in Southern California. *Earthquake Spectra* 15(3):537–555.

Wald DJ, Quitoriano V, Heaton TH, Kanamori H (1999) Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California, *Earthquake Spectra* 15(3):557–564.

Wald DJ, Quitoriano V, Dengler LA, Dewey JW (1999) Utilization of the internet for rapid Community intensity Maps. *Seismol Res Lett* 70(6):680–697

Winter Th, Comte JP, Mompelat JM, Aochi H, Auclair S, Barras AV, Bertil D, Bes de Berc S, Bourdon E, Chauvet M, Dominique P, Douglas J, Lemoine A, Negulescu C, Ollagnier S, Pericat J, Roullé A, Sedan O (2007) Mission post-sismique aux Antilles : Premiers enseignements sur le séisme du 29 novembre 2007. Rapport BRGM BRGM/RP -56070-FR, 103 p, 65 fig, 2 tab

Wood HO, Neumann F (1931) Modified Mercalli intensity scale of 1931 *Bull Seismol Soc Am* 21:277-283

Worden CB, Gerstenberger MC, Rhoades DA, Wald DJ (2011) Probabilistic relationships between ground-motion parameters and Modified Mercalli Intensity. Submitted to Bull Seismol Soc Am

Wu YM, Teng TI, Shin TC, and Hsiao NC (2003) Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, and intensity in Taiwan. Bull Seismol Soc Am 93(1) :386-396

Zacek M (1996) Construire parasismique : risques sismiques, conception parasismique des bâtiments, réglementation, Editions Parenthèses, Marseille.

6 LISTE DES ABBREVIATIONS

PGA: Peak Ground Acceleration

PGV: Peak Ground Velocity

AI: Arias Intensity

CAV: Cumulative Absolute Velocity

CAV_{STD}: Standardized Cumulative Absolute Velocity

SQI: Single Questionnaire Intensity

<SQI>: SQI averaged over circular surfaces around accelerometric stations

7 ANNEXES

ANNEXE 1

Historique des échelles macro-sismiques

EVOLUTION HISTORIQUE DES ECHELLES D'INTENSITE SISMIQUE

1783	Domenico Pignatoro grades seismic shocks for Italian earthquakes	«slight--> violent»
1828	Egen uses grades of perceived shaking for geographical mapping of a single event	scale 1-6
18th-19th Century: Personal intensity scales (used by authors as a shorthand for their own investigations)		
1874	<u>Michele Stephano de Rossi</u>	10 pt scale
1878	<u>François Forel</u>	10 pt scale
1883	<u>Rossi-Forel Intensity Scale (R-F)</u>	10 pt scale
1883	<u>Giuseppe Mercalli</u> (Level 4 and 5 R-F scale combined and level 10 divided in 2)	10 pt scale to describe higher intensities
1880s to 1915 : attempts to define Absolute Intensity Scales based on Acceleration		
1888	E.S. Holden: 1st «Absolute scale of Earthquake intensity» based on acceleration (irregular values) for Californian Earthquakes	
1900	Prof. Omori: Absolute intensity scale for Japan; 7 grades based on shaking table studies	7 pt scale
1904	Cancani : Acceleration values added to Mercalli scale, regular, exponential values 1-10, plus 2 additional acceleration values for possible higher level, 11 and 12	12 pt scale
1912	<u>Mercalli Cancani Sieberg (MCS)</u> (2 degrees added by Cancani, description added by Sieberg)	12 pt scale
1931	<u>Wood and Neumann --> Modified Mercalli (MM)</u> For use in United States and for more modern building types	12 pt scale
1956	<u>Charles Richter --> Modified Mercalli (MM-1956)</u> Masonry used as an indicator of intensity. 4 grades of masonry proposed	12 pt scale
1930s-1970s : Regional Intensity Scales (Different scales for different regions in the world)		
	Europe: MCS (1912)	
	USA: MM (1931)	
	Japan: JMA (based on 7 point Omori Scale, 1900)	
	USSR: Soviet Scale (1931) 12 point scale similar to MCS	
	China: Chinese scale (1956) 12 point scale similar to Soviet Scale and MM	
1964	<u>Medvedev Sponhuer Karnik (MSK)</u> To standardized intensity assessment internationally and provide damage functions for vulnerability assessment	12 pt scale
1976	<u>MSK Revisions (MSK-76)</u>	12 pt scale
1992	Publication of the European Macroseismic Scale EMS-92 for review	12 pt scale
1996	Formal adoption in ESC of the EMS	12 pt scale
1998	<u>European Macroseismic Scale EMS-98</u>	12 pt scale

Annexe 1: Historique et évolution des échelles macrosismiques d'après Coburn and Spence(2002)

ANNEXE 2

Questionnaire macrosismique italien

Date and time of earthquake

Locate the earthquake from the list, if you don't find it complete boxes *Earthquake not in list*.

Select an earthquake from the list
 Earthquake not in list

Choose dd / mm / yyyy - hh R mn

Earthquake not felt and i've unable to say any effects

Describe your experience

Shaking

Did you feel fear?

Did i rush outside? (if inside a building)

Balance

Animal upset during the earthquake or a few minutes before

Hanging objects

China and glassware

Small objects

Doors and windows

Liquid in containers

Pictures, vases and books

Furniture

Plants and trees

Acoustic effect: rumble

When was the acoustic effect heard?

Where did the acoustic effect come from?

Other observed peculiar effect

Damage or effects to the building

Structure of the building

Building

Description of the damage in detail

Walls

Roof tiles

Chimneys

Where you were

Region (*)

Province (*)

Commune(*)

Fraction

Place of observation (*)

Street address

Civic number

Floor (*)

Total number of floors

What were you doing

If the observation occurred outside indicate the location (for example, 100m east of Parco delle Vittorie; at 25'km of Salaria street).

Personal information (optional)

Surname

Name

Age

Sex

Email

Phone number

Subscriber code only for subscriber

I dati provenienti dai questionari sono utilizzati esclusivamente dall'INGV per migliorare la conoscenza degli effetti sul territorio conseguenti ad un evento sismico. Questi dati sono tutelati dall'INGV come qualsiasi utilizzo illecito da parte di terzi. Le informazioni opzionali del compilatore sono mantenute esclusivamente dall'INGV nel rispetto della privacy (D.Lgs. 196/2003). Per eventuali richieste di rimozione dal database scrivere a haisentitoilterremoto@ingv.it.

Annexe 2: Questionnaire macrosismique italien

ANNEXE 3

Questionnaire macrosismique du CSEM

Choisissez votre langue	Français/ Allemand/ Grec/ Hongrois/ Italien/ Monténégrin/ Polonais/Portugais/ Roumain/ Russe/ Slovaque/ Espagnol/ Turquie
Si vous n'avez PAS ressenti vous même le séisme mais désirez rapporter l'expérience d'un tiers (famille ou ami), veuillez cocher cette case et saisir les questions 1, 2 et 5. Cette information reste utile pour nos études	
Combien de fois avez-vous ressenti un séisme ?	C'était la première fois/ Quelques fois/ souvent
Section A : Où étiez-vous ?	
A l'heure du séisme où étiez-vous ?	Dehors/ au RdC/ à l'étage (lequel)/ véhicule à l'arrêt/ Véhicule en mouvement/ autre
Dans quelle position étiez-vous ?	En train de marcher/ debout/ assis/ à genoux : allongé/ endormi/ autre
Section B : Secousse et bruit	
Comment décririez-vous les secousses ?	Pas de secousses/ à peine perceptible/ faible mais immanquable/ modéré/ fort/ très fort
C'était...	Je ne sais pas/ tremblements/ balancements/ mouvements saccadés/ Accoups/ mouvements de roulement
Qu'est-ce qui décrirait le mieux le bruit que vous avez entendu ?	Pas de bruit/ faible/ modéré/ fort
C'était...	Je ne sais pas/ grondement/ grognement/ explosion/ autres
Section C : Les effets sur les personnes et les animaux	
Qu'est qui décrirait le mieux la réaction des gens autour de vous ?	Je ne sais pas si d'autres l'ont remarqué/ Personne ne l'a remarqué/ Seulement une ou deux personnes l'ont remarqué/ seuls quelques personnes l'ont remarqué/ beaucoup l'ont remarqué/ la plupart des gens l'ont remarqué/ tout le monde l'a remarqué/ Les gens à l'intérieur l'ont remarqué mais pas ceux à l'extérieur/ les personnes à l'étage l'ont remarqué mais pas ceux au RdC
(Seulement pour les séismes de nuit) Le séisme vous a-t-il réveillé ?	Je ne dormais pas/ oui/ non
Est ce que les autres personnes où vous étiez se sont réveillées ?	Je ne sais pas/ non/ oui/ quelques unes/ oui la plupart/ oui tous
Etait-il difficile de se tenir debout ou de marcher ?	Je n'étais pas debout/ non/ oui
Qu'est-ce qui décrirait le mieux votre réaction ?	Pas de réaction/ petite réaction/ excité mais pas alarmé/ alarmé mais pas effrayés/ quelques peu effrayés/ vraiment effrayés
Est ce que les gens étaient effrayés ?	Je ne sais pas/non/ oui, quelques personnes/oui la plupart des personnes/ oui tout le monde
Les animaux autour de vous étaient ils effrayés ?	Pas d'animaux autour de moi (Je ne sais pas)/ non/ oui les animaux domestiques/ oui les animaux de la ferme
Section D : Les effets sur les objets, les constructions, ...	
Est-ce que les évènements suivants se sont produits ?	
Les petits objets se sont déplacés ou sont tombés ?	Pas/ peu/ beaucoup/ tout
Les livres ou objets similaires se sont déplacés ou sont tombés	Pas/ peu/ beaucoup/ presque tout
Les livres ou objets similaires se sont déplacés ou sont tombés	
Le mobilier s'est déplacé	-/ léger seulement/ lourd seulement
Les fenêtre/portes ont vibré	

Les objets accrochés se sont balancés	
Les tableaux se sont mis de biais	
Le mobilier s'est renversé	
Les horloges à balancier se sont arrêtées	
Les plantes d'intérieur se sont secouées ou balancées	
Les arbres/ buissons se sont secoués ou balancés	
Les liquides ont éclaboussé ou se sont renversé	
Y a-t-il eu des dommages sur la construction où vous étiez (maison, immeuble, rue) ?	Oui/ non
S'il y a eu des dommages, en quoi était faite la construction ?	Brique/ Pierre/ Bois/ Béton/ Renforcé/ autre (préciser)
Usage (maison, école, église, bureau, etc)	
Nombre d'étages	
Est ce que les choses suivantes se sont passées ou vous étiez ?	
Petites fissures dans les murs	
Larges fissures dans les murs	
Une ou plusieurs vitres se sont fissurées	
Beaucoup de vitres se sont fissurées ou se sont brisées	
Du plâtre est tombé des murs/ plafond en petits morceaux	
Des pierres/ardoises/parties de la cheminée sont tombées	
Petites fissures dans les murs en pierres ou briques	
Grosses fissures dans les murs en pierres ou briques	
La maçonnerie est tombée des murs	
Les murs libres se sont effondrés, partiellement ou complètement	
Le conduit de cheminée s'est effondré, partiellement ou complètement	
Les murs de la maison se sont effondrés, partiellement ou complètement	
La construction est sortie de ses fondations	
Y a-t-il eu des dégâts naturels là où vous trouviez, par exemple, des glissements de terrain, des fissures, etc... ?	Oui (précisez) / non/ je ne sais pas/
Avez-vous d'autres commentaires sur les effets du séisme ?	

Annexe 3: Questionnaire macrosismique individuel disponible sur le site internet du Centre Sismologique Euro-Méditerranéen¹⁶

ANNEXE 4

Questionnaire macrosismique de l'observatoire royal de Belgique

Où étiez-vous au moment du tremblement de terre ?	
Pays	
Rue, adresse	
Ville (REQUIS)	
Votre situation quand le séisme s'est produit	
Où étiez-vous pendant le tremblement de terre ?	A l'intérieur d'un bâtiment/ à l'extérieur d'un bâtiment/ dans un véhicule à l'arrêt/ dans un véhicule en mouvement
Si vous étiez à l'intérieur précisez le type de construction ou de structure	Pas une construction/ maison unifamiliale/immeubles à appartements/ Bâtiment à usage professionnel ; école/ Mobile home avec fondations permanentes : caravane ou véhicule récréatif sans fondations/ autres (précisez)
Si vous connaissez l'étage où vous vous trouviez, précisez svp	
L'avez-vous senti ? (Si vous dormiez, vous a-t-il réveillé ?)	Oui/non
Dormiez-vous ?	Non/ oui et je ne me suis pas réveillé / je me suis réveillé
D'autres personnes à proximité l'ont-elle senti ?	Je ne sais pas (personne à proximité)/Personne/quelques uns l'ont senti/ la plupart l'ont senti/ tout le monde ou presque l'a senti
Votre expérience du séisme	
Comment décririez-vous la force de la secousse ?	Non senti/ faible/ légère/ modérée/ forte/ violente
Combien de secondes a duré la secousse ?	
Votre réaction	Pas de réponse (je ne me souviens pas) / Non senti/ faible réaction/ excitation/ inquiété/ effrayé/ paniqué
Qu'avez-vous fait ?	Je n'ai rien fait/ je me suis déplacé vers une porte/ je me suis protégé/ je me suis précipité dehors/ autre (précisez)
Etait-il difficile de tenir debout ou de marcher ?	Pas de réponse (je n'ai pas essayé)/ Non/ oui, équilibre difficile/ oui je suis tombé/ oui j'ai été plaqué au sol
Effets du séisme sur le mobilier et les constructions	
Avez-vous remarqué des vibrations/ balancement des portes ou des objets suspendus	Pas de réponse (je n'ai pas regardé) / non /Oui/ oui léger balancement/ oui fort balancement
Avez-vous entendu des craquements ou d'autres sons ?	Pas de réponse (je n'ai pas fait attention)/ Non/oui Faibles sons / oui sons forts
Les objets posés ont-ils vibré, basculé ou sont-ils tombés des étagères ?	Pas de réponse (pas d'étagère)/ Non/ entrechocs légers/ entrechocs forts/ quelques uns se sont renversés ou sont tombés/ beaucoup sont tombés/ presque tous sont tombés
Les cadres accrochés au mur ont-ils bougé ?	Pas de réponse (pas de cadres) : Non/ oui mais ils ne sont pas tombés/ oui et quelques uns sont tombés
Le mobilier et les appareils ménagers ont-ils glissé, basculé ou ont été déplacés ?	Pas de réponse (pas de meubles)/ Oui/ non
Les meubles lourds (frigo, machine à laver) ont-ils été affectés ?	Pas de réponse (pas de meubles lourds)/ Non/ oui certains contenus sont tombés/ oui déplacés de quelques cm/ oui déplacés d'un ou plusieurs mètres / oui renversés

Est-ce que les murs isolés et les clôtures ont été endommagés ?	Non / oui quelques fissures/ oui chute partielle de quelques uns/ oui chute totale de quelques uns
Si vous étiez à l'intérieur, la construction a-t-elle subi des dommages (cochez ce que vous avez observé)	
Pas de dommages	
Petites fissures dans les murs	
Quelques larges fissures dans les murs	
De nombreuses fissures larges dans les murs	
Fissures dans les cheminées	
Une ou plusieurs fêlures dans les fenêtres	
De nombreuses fenêtres fêlées ou certaines brisées	
Morceaux de maçonneries tombés des murs	
Vieilles cheminées : dommages majeurs ou chutes	
Cheminées modernes : dommages majeurs ou chutes	
Murs extérieurs inclinés ou complètement effondrés	
Séparation des porches, balcons et autres parties annexes accolées aux bâtiments	
Construction déplacée de sa fondation	
Si vous connaissez le type de construction (bois, brique...) et/ ou la hauteur (ou le nombre d'étages) du bâtiment pouvez-vous l'indiquer :	

Annexe 4: Questionnaire macrosismique Belge, inspiré du Did you feel it Americain et disponible sur le site internet de l'Observatoire Royal de Belgique¹⁷

ANNEXE 5

Questionnaire macrosismique Américain Did You Feel it ?

Votre localisation géographique quand le séisme s'est produit	
Pays	
Région	
Ville	
Heure du séisme	
Votre situation quand le séisme s'est produit	
L'avez-vous senti ?	Oui/non
Si vous dormiez, vous a-t-il réveillé ?	Oui/non
Quelle option décrit le mieux votre situation physique durant le séisme ?	A l'intérieur d'un bâtiment/ à l'extérieur d'un bâtiment/ dans un véhicule à l'arrêt/ dans un véhicule en mouvement
Dormiez-vous ?	Non/ j'ai dormi malgré le séisme/ je me suis réveillé
Les autres l'ont-ils senti ?	Personne/quelques uns l'ont senti/ la plupart l'ont senti/ tout le monde ou presque l'a senti
Votre expérience du séisme	
Comment décririez-vous la force de la secousse ?	Non senti/ faible/ moyenne/ modérée/ forte/ violente
Environ combien de secondes a duré la secousse ?	
Votre réaction	Non senti/ faible réaction/ excitation/ inquiété/ effrayé/ paniqué
Qu'avez-vous fait ?	Je n'ai rien fait/ placé dans les embrasures de porte/ baissé sous quelque chose/ je me suis précipité dehors/ autre
Etait-il difficile de tenir debout ou de marcher ?	Non/ oui
Effets du séisme	
Avez-vous remarqué des vibrations/ balancement des portes ou des objets suspendus	Oui/ oui léger balancement/ oui fort balancement
Avez-vous entendu des craquements ou d'autres sons ?	Non/oui Faibles sons / oui sons forts
Les objets posés ont-ils vibré, basculé ou sont-ils tombés des étagères ?	Non/ faible vibration/ forte vibration / quelques uns se sont renversés ou sont tombés/ beaucoup sont tombés/ presque tous sont tombés
Les tableaux accrochés au mur ont-ils bougé ?	Non/ oui mais ils ne sont pas tombés/ oui et quelques uns sont tombés
Le mobilier et les appareils ménagers ont-ils glissé, basculé ou ont été déplacés ?	Oui/ non
Le gros électroménager (frigo, machine à laver) a-t-il été affecté ?	Non/ oui certains contenus sont tombés/ oui déplacés de quelques cm/ oui déplacés d'un ou plusieurs mètres / oui renversés
Est-ce que les murs non porteurs et les clôtures ont été endommagés ?	Non / oui quelques fissures/ oui chute partielle de quelques uns/ oui chute totale de quelques uns
Avez-vous observé des dommages aux bâtiments (cochez ce que vous avez observé)	
Pas de dommages	
Petites fissures dans les murs	
Quelques larges fissures dans les murs	
Chute de morceau de plafond ou de fixations de lustres	

Fissures dans les cheminées
Une ou plusieurs vitres fissurées
Beaucoup de fenêtres fissurées et quelques unes cassées
Chutes de briques et pierres de maçonnerie des murs
Vieilles cheminées fortement endommagées ou tombées
Cheminées modernes fortement endommagées ou tombées
Effondrement partiel ou total des murs extérieurs
Séparation des porches, balcons et autres parties annexes accolées aux bâtiments
Bâtiments définitivement sorti de ses fondations

Annexe 5: Questionnaire macrosismique individuel did you feel it? utilisé aux Etats Unis et disponible sur le site internet de l'USGS¹⁸

¹⁸ <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/dyfi/>

ANNEXE 6

Questionnaire macrosismique Espagnol

Questions	Possibilités de réponses
Dans quelle langue voulez vous répondre à ce questionnaire ?	Espagnol/Aran/Catalan/Basque/Français/ Galicien/Anglais/portugais/Valencien
Date du séisme	
Où étiez-vous lors du séisme ?	
Pays	Espagne/ Portugal/ France/ autre
Province/région	liste de provinces dépendant du pays précédemment cité
Département	liste de départements appartenant à la région précédemment cité
Commune	liste de communes appartenant au département précédemment cité
Code postal	
Vous situiez-vous ?	A l'extérieur/ dans un immeuble (nb d'étage) à l'étage (num de l'étage)/ dans un véhicule/ autre
Etiez-vous	En mouvement/ immobile/ endormi
Avez-vous ressenti le séisme ?	Oui/non
Avez-vous entendu du bruit ?	Oui/non
A quelle heure ?	HH :MM
Si vous en avez-ressenti plusieurs	Indiquez quand
Comment décririez-vous le mouvement pendant le séisme ?	Aucun mouvement/très faible/faible/modéré/fort/violent (+observations possibles)
Comment décririez-vous votre réaction ?	Aucune/très peu de réaction/agitation/plutôt effrayé/ très effrayé/ extrêmement effrayé
Etait-il difficile de se tenir debout ?	Je n'étais pas debout/ non/ oui
Combien de personnes autour de vous ont ressenti le séisme ?	
A l'intérieur des bâtiments	Je ne sais pas/ personne/quelques uns, la majorité non/ la majorité, quelques uns non/ tous/ personne ne dormait
A l'extérieur des bâtiments	
D'autres personnes effrayées se sont-elles précipitées dehors ?	
Combien se sont réveillées ?	
Effets observées sur les objets	
Lampes suspendues	Je ne sais pas/ rien/ oscillations/ fortes oscillations
Liquides dans un récipient	
Objets sur les étagères (précisez)	Je ne sais pas/ rien/ vibration/ ils ont bougé fortement / quelque uns sont tombés ou se sont renversés/ beaucoup sont tombés/ Presque tous sont tombés
Tableaux sur les murs	Je ne sais pas/ rien/ vibration/ ils ont bougé/ quelques uns sont tombés
Portes et fenêtres	Je ne sais pas/ rien/ vibration/ oscillation si ouvertes/ ouverture et fermeture
Meubles et appareils	Je ne sais pas/ rien/ vibration/ déplacement/ renversements
Dégâts	
Où vous étiez y a-t-il eu des dégâts sur les bâtiments ?	Je ne sais pas /oui /non

Cochez si observé	
	Petites fissures dans les murs
	Plusieurs grandes fissures dans les murs
	Plusieurs grandes fissures dans les murs
	Du plâtre est tombé des murs /plafonds en gros morceaux
	Du plâtre est tombé en gros morceaux
	Une ou plusieurs fenêtres se sont fissurées
	Beaucoup de fenêtres se sont fissurées ou brisées
	Fissures sur les cheminées
	Dégâts importants sur les vieilles cheminées
	Dégâts importants sur les cheminées modernes
	Chute de vieilles cheminées
	Chute de cheminées modernes
	Chute de tuiles ou plafonds
	La maçonnerie est tombée des murs
	Murs effondrés
	Séparation des vérandas, balcons ou autres ralingues aux bâtiments
	L'édifice s'est déplacé de sa fondation de façon permanente
	Si vous avez observé d'autres dégâts ou que vous souhaitez apporter plus d'information sur les dégâts antérieurs
	Si vous avez remarqué un impact sur l'environnement ou que vous souhaitez apporter des précisions, vous pouvez le faire ci-après

Annexe 6: Questionnaire macrosismique individuel espagnol accessible depuis le site internet de l'Instituto Geográfico Nacional¹⁹

¹⁹ <http://www.02.ign.es/ign/layoutIn/geofisicaCuestionarioMacrosismico.do>

ANNEXE 7

Questionnaire BCSF collectif

ANNEXE 8

Questionnaire BCSF individuel génération 7

Sur la commune de Id_GéoFla:

adresse: Lieu: Code Dpt.:

Nom_Témoïn: Questionnaire rempli le

Prénom_Témoïn: long:

Email_Témoïn: Commune:

TelContact: Réf: Idsej: Qualité:

Intensité EMS98: Qualité EMS98 par image:

Qualité 1 (non pris en compte dans les calculs d'intensités): graves erreurs ou incohérences reconnues dans le formulaire / témoignage au dessus du 5e étage ou en sous-sol, sur poutres, tour de radio, bâtiments monumentaux (cathédrale etc.) / témoignage extérieur / témoignage en voiture / témoignage non ressenti personnellement / Bâtiment E, F

Qualité 2: quelques erreurs ou contradictions: Bâtiment D

Qualité 3: formulaire sans anomalie particulière.

SEISME DU **Heure** **ip 16:** **ip 17:**

le séisme a-t-il été ressenti ? ip 1: 0/1: médioprofonde, à compter de l'année 2002 et pour les séismes superficiels (moins de 60 km) à 2 heures du midi, TU+2

avez-vous personnellement ressenti ? ip 2: 0/1: à l'intérieur d'une maison

à l'intérieur d'une maison ip 3: 0/1: à l'intérieur d'un immeuble

à l'intérieur d'un immeuble ip 4: 0/1: à l'extérieur (plein air):

nombre d'étage ip 5: > 3e étage

à l'étage ip 6: < 3e étage

à l'extérieur (plein air): ip 7: Faible For.

activité ip 8: Faible For.

J'ai ressenti la secousse comme un balancement: ip 9: (assis/débout) 4 4 5+ 5+

J'ai ressenti la secousse comme une vibration: ip 10: (repos, som.) 3 3 5+ 5+

le mouvement était ip 11:

la secousse m'a réveillée(e) ip 12:

la secousse m'a inquiété ip 13: inqui 4 3 eff. 5 4 pan. 6 5

je suis sortie(e) du bâtiment en courant ip 14: de 5 à 7 de 5 à 7

j'ai perdu l'équilibre ip 15: (int.) de 6 à 8 de 6 à 8 (ext.) de 7 à 9 de 7 à 9

Type	situation	réaction
domestique	IA1: à l'intérieur d'un bâtiment	IA3: <input type="text"/>
élévage	IA2: à l'extérieur d'un bâtiment	IA4: <input type="text"/>
Type du bâtiment	IC1: Type de construction: (A) matériaux tout venant, (B) maçonnerie pierre de taille, (C) béton armé, (D) structure en bois, (E) acier, (F) construction parasismique	IC2: <input type="text"/>
date de construction avant 1945		IC3: <input type="text"/>
dommages aux parties non porteuses du bâtiment		IC4: <input type="text"/>
poivres, poteaux, murs poteaux, poutres et autres armées, etc.)		IC5: 5 6+ 5 6+ 6 7+ 7 8+ 7 8+ 7 8+
fissures fines ou superficiales		IC6: 6+7+ 7 8+ 8 9+ 9 10+ 9 10+
fissures larges et profondes		IC7: 5 6+ 5 6+ 6 7+ 7 8+ 7 8+
chute de petits morceaux de plâtre ou d'un élément haut mal scellé		IC8: 6 7 6 7+ 7 8+ 8 9+ 8 9+ 8 9+
chute de gros morceaux de plâtre ou de revêtement		IC9: 6+7+ 7 8+ 8 9+ 9 10+ 9 10+
écroulement de morceaux de cloisons, murs, pignons		IC10: <input type="text"/>
dommages à la structure du bâtiment		IC11: 6 6+ 6 7+ 7 8+ 8 9+ 9 10+ 10 11+
poivres, poteaux, murs poteaux, poutres et autres armées, etc.)		IC12: 7 8+ 8 9+ 9 10+ 10 11+ 11 12 12 12
fissures fines ou superficiales		IC13: 6 7+ 7 8+ 8 9+ 9 10+ 10 11+ 11 12
fissures larges et profondes		IC14: 7 8+ 8 9+ 9 10+ 10 11+ 11 12
fissures aux joints de poutres, poteaux, angles de murs		IC15: 8 9+ 9 10+ 10 11+ 11 12
chute de mortier aux joints de murs ou dalles armées		IC16: 7 8+ 8 9+ 9 10+ 10 11+ 11 12
flambeage, torsion de poteaux		IC17: 7 8+ 8 9+ 9 10+ 10 11+ 11 12
déplacement de poutres (toits ou planchers)		IC18: 8 9+ 9 10+ 10 11+ 11 12
effondrement de quelques poteaux ou d'un étage		IC19: <input type="text"/>
effondrement quasi total des structures		IC20: 6 6+ 6 7 7 8+ 8 9+ 8 9+
dommages aux toitures et cheminées		IC21: 6 7+ 7 8 8 9+ 9 10+ 9 10+
cheminées		IC22: 6 7+ 7 8 8 9+ 9 10+ 9 10+
chute de couronne ou de partie de cheminée		IC23: 7 8+ 8 10 8 10 9 10+ 10 11+ 11 12
chute de cheminée (cassée au ras du toit)		IC24: <input type="text"/>
Toitures		IC25: 6 7+ 7 8 8 9+ 9 10+ 9 10+
chute de tuiles, d'ardoises		IC26: 7 8+ 8 10 8 10 9 10+ 10 11+ 11 12
effondrement		IC27: 7 8+ 8 10 8 10 9 10+ 10 11+ 11 12

oscillation des objets suspendus (lustres, cadres) IO1: 3 2 5+ 4+

vibration des petits objets (porcelaine, verres, assiettes, bibelots,...) IO2: 3 2 5+ 4+

tremblement du mobilier léger (chaise, table de chevet, etc.) IO3: 3 2 5+ 4+

vibration des portes, fenêtres, vitres, vitrines IO4: 4 3 5+ 4+

croaquements des poutres, planchers et meublé IO5: 4 3 5+ 4+

oscillation des liquides dans les récipients IO6: 4 3

déformement des liquides des récipients pleins IO7: 5+ 4+

ouverture et fermeture de portes ou fenêtres IO8: 5+ 4+

bris d'objets (tableaux, verre, porcelaine, etc.), vitres IO9: 5+ 4+

Déplacements, chutes de IO10: 5 4 5+ 4+

peut-être instables ou mal fixés IO11: 6 5 7+ 6+

mobilier léger (lit, chaise, table de chevet, etc.) IO12: 7 6 8+ 7+

mobilier lourd (armoires, buffet, etc.) IO13:

le grondement ressemblait à : EI1:

grondement souterrain ou aérien EI2:

un coup de tonnerre, une explosion EI3:

autre (précisez dans la case observ.)

OBSERVATION ip 18:

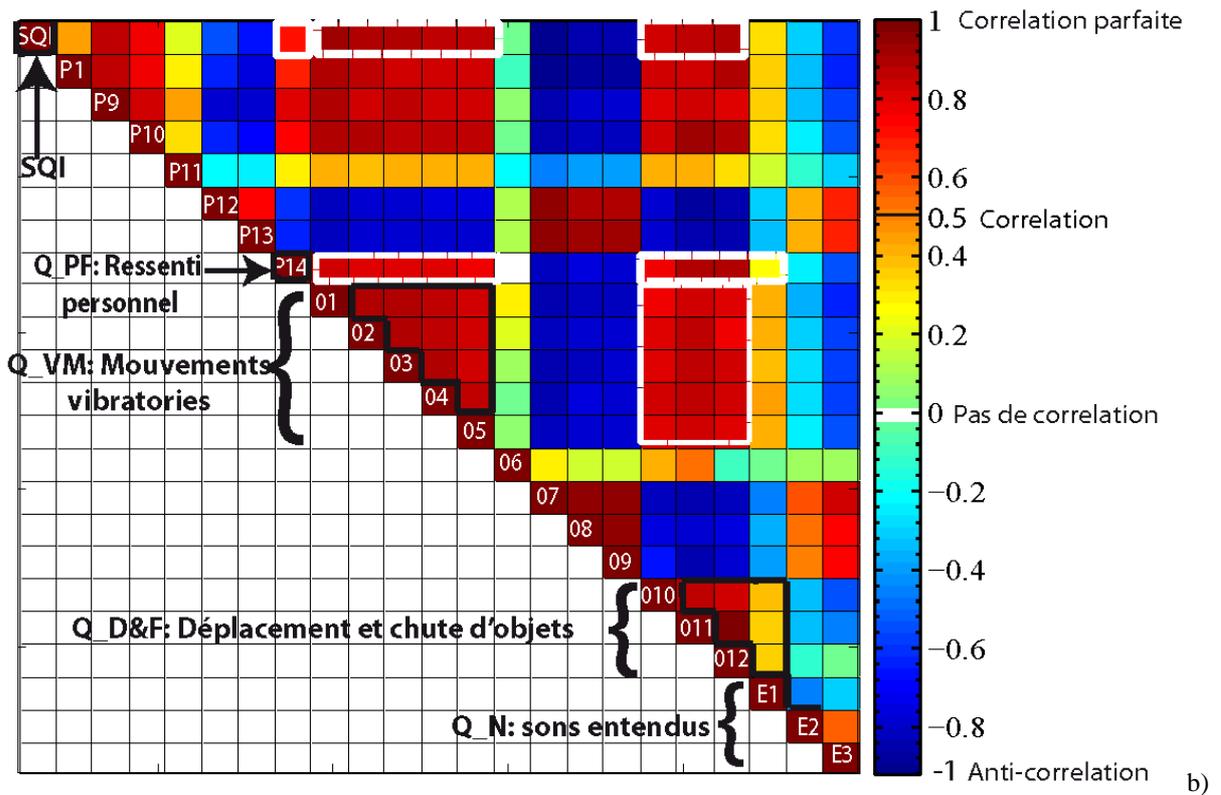
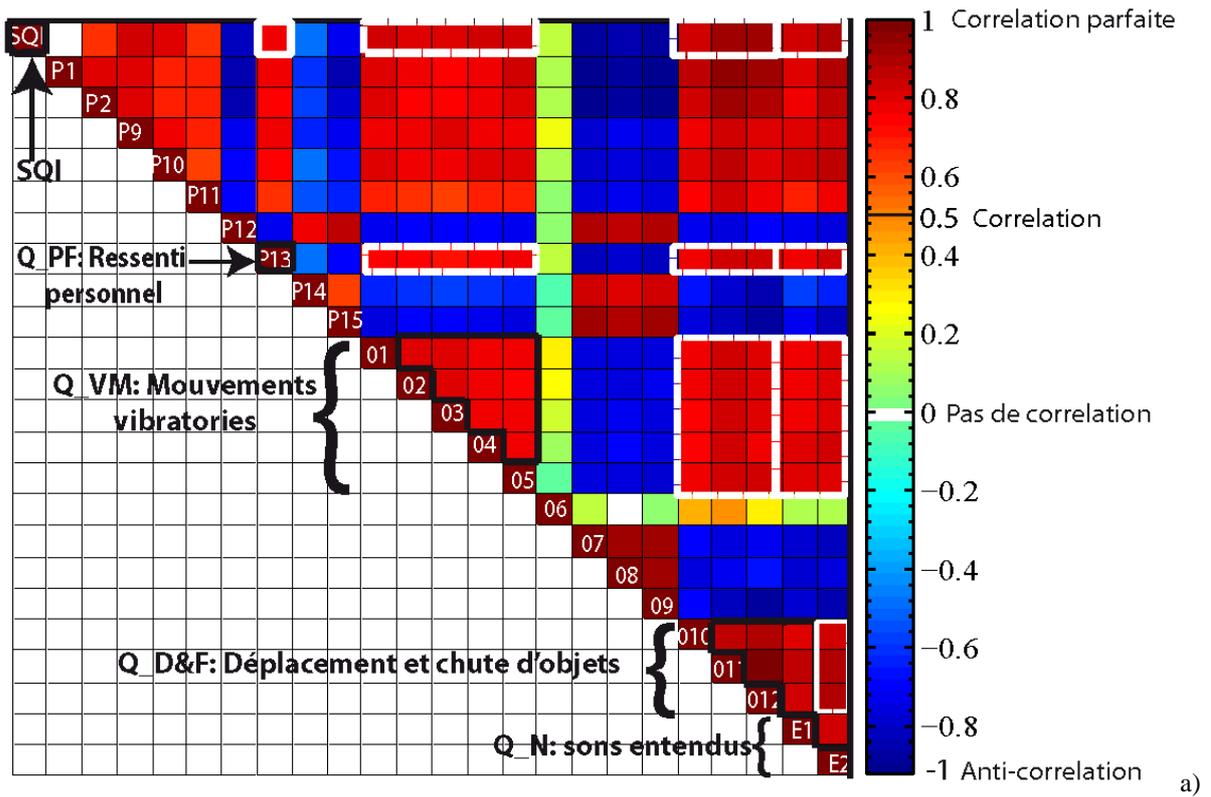
Annexe 8: Questionnaire de génération 7 utilisé pour les séismes de Rambervillers et de Roulans

ANNEXE 9

Questionnaire macrosismique BCSF individuel génération9

ANNEXE 10

Matrices de corrélation réduites pour Roulans et Waldkirch



Annexe 10: Matrice de corrélation réduite pour les séismes de Roulans (a) et de Waldkirch (b)

ANNEXE 11

Tableau de probabilités pour les coefficients de corrélation (Taylor, 1997)

N	r ₀										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
3	100	94	87	81	74	67	59	51	41	29	0
4	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
5	100	87	75	62	50	39	28	19	10	3.7	0
6	100	85	70	56	43	31	21	12	5.6	1.4	0
7	100	83	67	51	37	25	15	8	3.1	0.6	0
8	100	81	63	47	33	21	12	5.3	1.7	0.2	0
9	100	80	61	43	29	17	8.8	3.6	1	0.1	0
10	100	78	58	40	25	14	6.7	2.4	0.5		0
11	100	77	56	37	22	12	5.1	1.6	0.3		0
12	100	76	53	34	20	9.8	3.9	1.1	0.2		0
13	100	75	51	32	18	8.2	3.0	0.8	0.1		0
14	100	73	49	30	16	6.9	2.3	0.5	0.1		0
15	100	72	47	28	14	5.8	1.8	0.4			0
16	100	71	46	26	12	4.9	1.4	0.3			0
17	100	70	44	24	11	4.1	1.1	0.2			0
18	100	69	43	23	10	3.5	0.8	0.1			0
19	100	68	41	21	9	2.9	0.7	0.1			0
20	100	67	40	20	8.1	2.5	0.5	0.1			0
25	100	63	34	15	4.8	1.1	0.2				0
30	100	60	29	11	2.9	0.5					0
35	100	57	25	8	1.7	0.2					0
40	100	54	22	6	1.1	0.1					0
45	100	51	19	4.5	0.6						0
	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	
50	100	73	49	30	16	8	3.4	1.3	0.4	0.1	
60	100	70	45	25	13	5.4	2.0	0.6	0.2		
70	100	68	41	22	9.7	3.7	1.2	0.3	0.1		
80	100	66	38	18	7.5	2.5	0.7	0.1			
90	100	64	35	16	5.9	1.7	0.4	0.1			
100	100	62	32	14	4.6	1.2	0.2				

Annexe 11 : Le pourcentage de probabilités $Prob_N(|r| \geq r_0)$ que N mesures de deux variables non corrélées donne un coefficient de corrélation avec $|r| \geq r_0$, en fonction de N et r_0 (Les vides indiquent des probabilités inférieures à 0.05%) (D'après Taylor, 1997)