



Analyse d'intensités macrosismiques : influence des conditions de site

Aline DECHAMP* — Bruno HERNANDEZ* — Marc NICOLAS*

* CEA/DAM/Laboratoire de Détection et de Géophysique, BP 12, 91680 Bruyères-le-Châtel, France.

aline.dechamp@cea.fr

RÉSUMÉ. Dans le cadre du projet ANR-QSHA (Quantitative Seismic Hazard Assessment), un des objectifs concerne les recommandations en terme d'effets de site dans les études d'aléa sismique et de réalisations de cartes macrosismiques. Pour quantifier l'impact des effets de site sur l'intensité, deux approches sont abordées. La première consiste à utiliser les données de la base SISFRANCE, où les valeurs d'intensité sont attribuées sur l'ensemble de la commune. Avec cette méthode, nous obtenons des résultats contrastés suivant les échelles d'observation. Avec la seconde approche, la recherche est focalisée sur des données originales, afin de retrouver des informations détaillées. Une comparaison est effectuée avec la géologie, en utilisant plusieurs séismes de différentes périodes. Les zones étudiées présentent un taux de sismicité relativement important en vue de pouvoir croiser les informations (quantité et qualité des données) d'événements sismiques espacés dans le temps mais géographiquement proches.

ABSTRACT. In QSHA project (Quantitative Seismic Hazard Assessment), one of the main objective deals with site effects recommendation in seismic hazard studies and also shaking maps realisation. To quantify site effects impacts on intensity values, we use two methods. One consists of using SISFRANCE database, which contains intensity values attributed at the whole city (average value). With that approach, results are contrasted, depending on the observations scale. The second method focuses our investigation on original data, to found detailed information. Obtained data are compared to geological condition, using different earthquakes on various periods. Studied areas show relatively high seismicity rates to be able to cross information on seismic events spaced out in time scale but geographically nearby (Amount and Quality of data).

MOTS-CLÉS : Informations macrosismiques, intensités, effets de site, sources historiques.

KEYWORDS: macroseismic information, intensities, site effects, historical data.

1. Introduction

Le projet QSHA, centré sur le risque sismique en France métropolitaine, vise à développer les connaissances sur la source sismique, la propagation des ondes au travers de simulations de mouvements sismiques, mais également sur les estimations semi-empiriques et la quantification des incertitudes (en terme d'effets de site, de cartes de dégâts). Dans ce cadre, le CEA participe à la thématique sur les recommandations en terme d'effets de site dans la réalisation rapide de cartes de dégâts ou cartes d'effets ressentis. Ces cartes s'appuient sur des valeurs d'intensité qui traduisent des dégâts/effets observés ou ressentis lors d'événements sismiques. Ce type d'informations est contenu dans les bases macrosismiques. Les effets de site sont, en général, étudiés à partir de données accélérométriques traduisant le mouvement sismique, ce qui limite le champ d'utilisation à des données récentes (période instrumentale). Sachant qu'en France métropolitaine, les principaux séismes ayant créés des dégâts notables sont antérieurs à la période instrumentale, les observations macrosismiques sont des sources

pouvant apporter des informations sur les événements les plus forts. Le but de ce travail est donc d'étudier ces bases, afin de montrer si des effets de site peuvent y être mis en évidence. Des observations seront réalisées à différentes échelles (grande échelle régionale, et échelle locale). Les informations sont croisées à la géologie.

2. Présentation des catalogues macrosismiques (intensités communales, informations individuelles)

Les données macrosismiques sont accessibles sous forme d'intensités communales (souvent déduites de questionnaires d'enquêtes collectifs pour les séismes post-1920, ou une unique observation dans une commune pour les séismes antérieurs), ou d'intensités individuelles (déduites de questionnaires d'enquête individuelle pour des séismes très récents (>2000), ou de documents décrivant des effets à un lieu précis (archives, documents, ..).

SISFRANCE contient la totalité des données relatives à la macrosismicité (épicentres en France ou à proximité des frontières de l'hexagone) depuis les premiers signes de témoignages jusqu'à aujourd'hui (lacunes des années 2004 à 2006). Le BCSF rassemble des données qui découlent de l'interprétation des questionnaires remplis après chaque séisme (depuis 1921). Avant tout disponibles en ligne, les questionnaires peuvent également être distribués à la population à l'initiative du BCSF, si une enquête plus approfondie est requise.

Afin de comparer les intensités communales à la géologie pour mettre en évidence d'éventuels effets de site au sein d'une commune, on devra considérer la formation sur laquelle la majorité du bâti est situé, comme représentative de la commune. Ainsi, pour une zone urbanisée construite à 90% sur une formation calcaire et 10% sur des alluvions, l'intensité communale sera considérée comme une donnée au rocher. On conviendra aisément que pour une ville conséquente, la probabilité que le bâti soit situé sur différentes formations géologiques soit plus grande qu'au sein d'un petit village.

L'approche basée sur les intensités individuelles vise à retrouver l'information source qui témoigne de l'effet du séisme (destruction d'un édifice, dégâts, effets sur les personnes, ...). Ce type d'information est recherché dans les références bibliographiques en lien dans Sisfrance, ou autres documents historiques (comptes rendus de l'Académie des Sciences, articles de presse, archives). Elle peut aussi correspondre à une intensité individuelle « équivalente », traduite des questionnaires d'enquête.

3. Etude de différentes zones

3.1. Régions d'étude sélectionnées

Les régions sont sélectionnées de façon à privilégier les informations sur les dégâts (intensités élevées, moins subjectives), la quantité d'informations, provenant de séismes de contextes tectoniques semblables et d'époques différentes (biais/temps), la présence de séismes récents pour avoir des informations de bonne qualité et plus exhaustives géographiquement. Ainsi, ont été retenues :

- La région de Nice, une des régions les plus actives en terme d'aléa sismique en France métropolitaine.
- La partie ouest des Pyrénées, zone la plus active en France métropolitaine avec un taux moyen de 2 événements avec $M_L > 5$ sur une surface de 10 000 km², sur une période de dix ans.
- Les Vosges et le fossé rhénan. Cette région a connu des séismes récents de $M_L > 5$ pour lesquels le BCSF a réalisé des enquêtes macrosismiques. (Informations individuelles geo-référencées).

3.2. Région niçoise (bassin liguro-provençal)

Le poinçonnement de l'arc alpin par la péninsule italienne, dû au rapprochement des plaques africaine et eurasiennne, induit une sismicité importante dans le bassin ligure. L'accident principal du bassin est un système

chevauchant profond, dont le front se terminerait au niveau de la série salifère du bassin ligure (à 30 km au large de la côte et à environ 3 km de profondeur). C'est le long de cette structure que les séismes historiques les plus destructeurs de la mer ligure ont eu lieu. Notre choix s'est focalisé sur les trois séismes suivants : (tableau. 1).

Appellation	Date	Intensité épicentrale	Magnitude*	Prof (en km)
Ligure Imperia	23/02/1887	X	6,1	3
Golfe de Gênes	19/07/1963	VII-VIII	5,9	20
Nice	25/02/2001	VII	5,1	16

Tableau 1. Principales caractéristiques des séismes étudiés. (*)= Magnitude locale M_L du LDG pour les séismes postérieurs à 1962 et magnitude estimée à partir des intensités pour les séismes antérieurs [Nicolas et al., 2000]

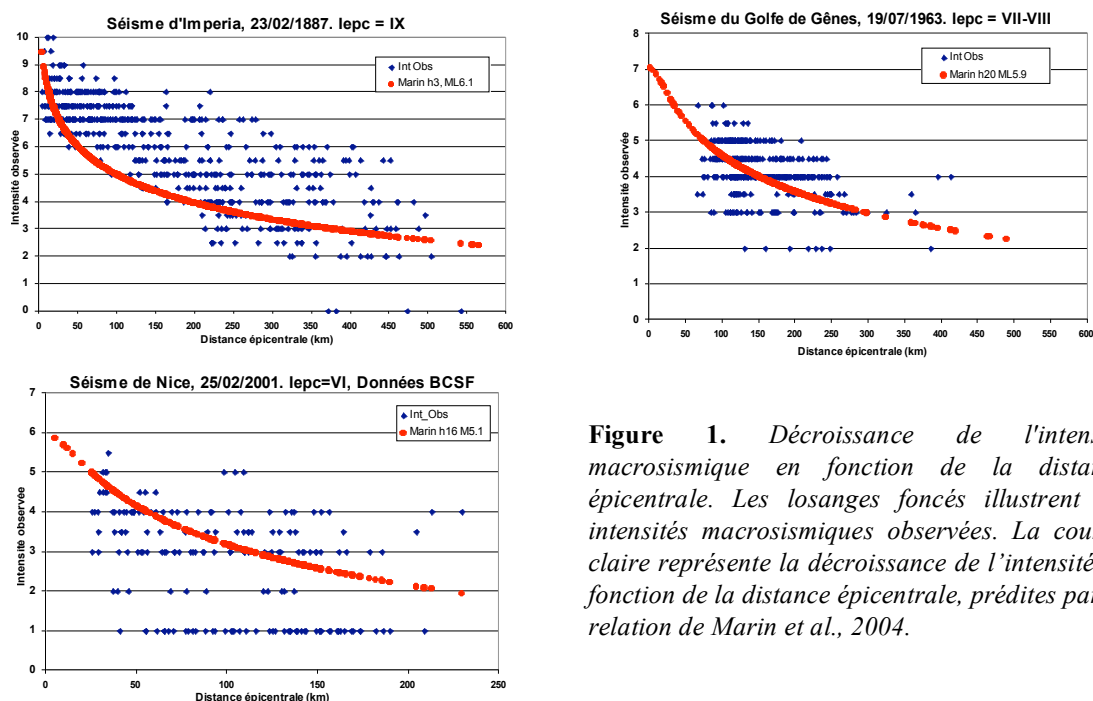


Figure 1. Décroissance de l'intensité macrosismique en fonction de la distance épicentrale. Les losanges foncés illustrent les intensités macrosismiques observées. La courbe claire représente la décroissance de l'intensité en fonction de la distance épicentrale, prédites par la relation de Marin et al., 2004.

La décroissance théorique de l'intensité avec la distance épicentrale est régulière. Les graphiques (figure 1) et les cartes (figure 2) illustrent globalement ce schéma classique de décroissance de l'intensité, mais montrent aussi une grande variabilité dans les données pour des distances identiques (jusqu'à 5 degrés pour le séisme d'Imperia). Cette variabilité peut être due aux incertitudes des témoignages (subjectivité) mais peut également traduire des effets de site.

Il n'y a pas de variabilité marquée entre les valeurs d'intensité de la vallée du Var et celles relevées de part et d'autre de cette vallée (figure 2), alors que le remplissage sédimentaire de la vallée pourrait entraîner une amplification du mouvement sismique.

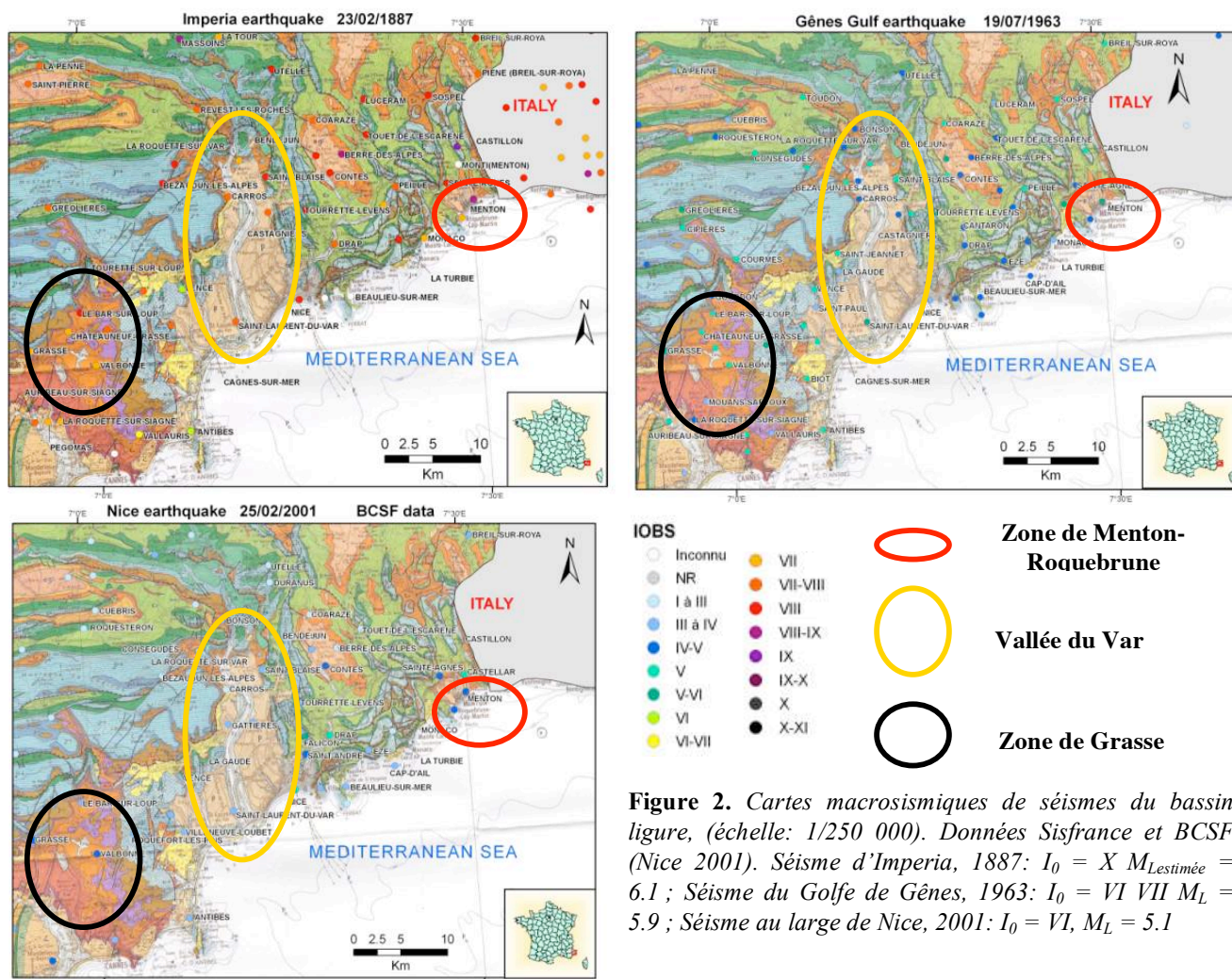


Figure 2. Cartes macrosismiques de séismes du bassin ligure, (échelle: 1/250 000). Données Sisfrance et BCSF (Nice 2001). Séisme d'Imperia, 1887: $I_0 = X$ $M_{Lestimée} = 6.1$; Séisme du Golfe de Gênes, 1963: $I_0 = VI$ $M_L = 5.9$; Séisme au large de Nice, 2001: $I_0 = VI$, $M_L = 5.1$

Les deux villes limitrophes Menton et Roquebrune, situées à une même distance épiscopentrale devraient se voir attribuer une intensité similaire, pour chaque événement. Au contraire, un écart entre les intensités observées et attendues par une relation empirique [Marin et al., 2004] est plus important à Menton qu'à Roquebrune (figure 3 a et b). En 1887, l'intensité à Menton s'écarte de près de 3 degrés de l'intensité « théorique », alors que celle attribuée à Roquebrune ne s'écarte que de 1 degré. La valeur VIII-IX attribuée à Menton apparaît anormalement forte comparée aux valeurs des communes alentour. Les dégâts y sont beaucoup plus prononcés qu'à Vintimille en Italie, commune pourtant située plus proche de l'épicentre. A Roquebrune, seule l'école du village a particulièrement souffert [Laurenti, 1998]. Monaco, situé sur du rocher dur, subit également des dégâts minimes dans l'ensemble ($I=VII$), par rapport aux autres localités. Pour le séisme de 1963, l'écart est de 2 degrés entre Menton et Roquebrune. Par contre, pour le séisme de 2001, au large de Nice, les intensités ne divergent que de ½ degré entre les deux communes, et il est impossible d'émettre une hypothèse quant à la pertinence de ces observations étant donné les degrés IV-V et V. Les effets observés à Menton, ville située principalement sur des formations sédimentaires d'épaisseurs parfois importantes, auraient tendance à être amplifiés, par les conditions de site. Ces observations sont à nuancer avec le fait que les intensités utilisées sont des données communales et qu'il n'est pas exclu que l'observation associée ait été réalisée sur une partie de la commune ne concordant pas avec la géologie prédominante.

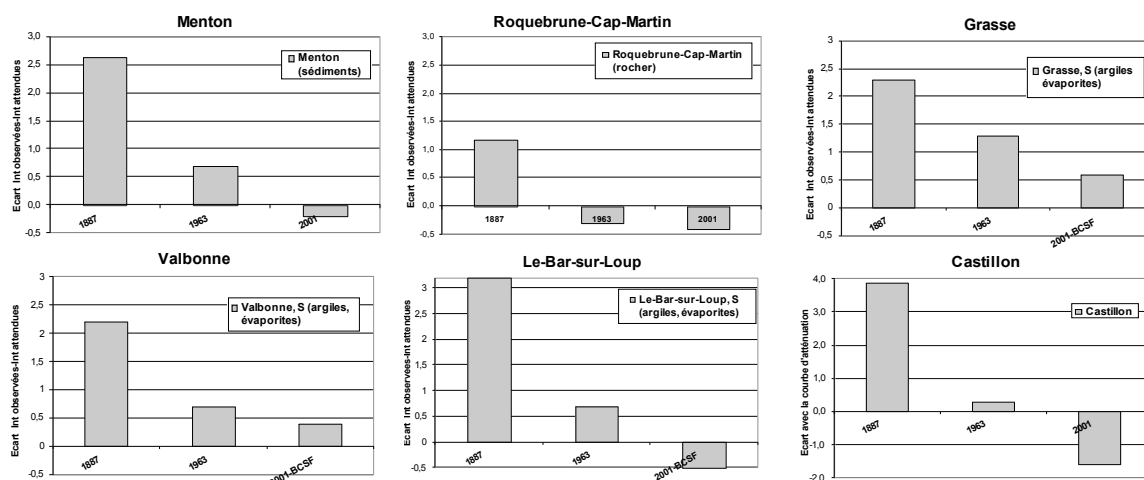


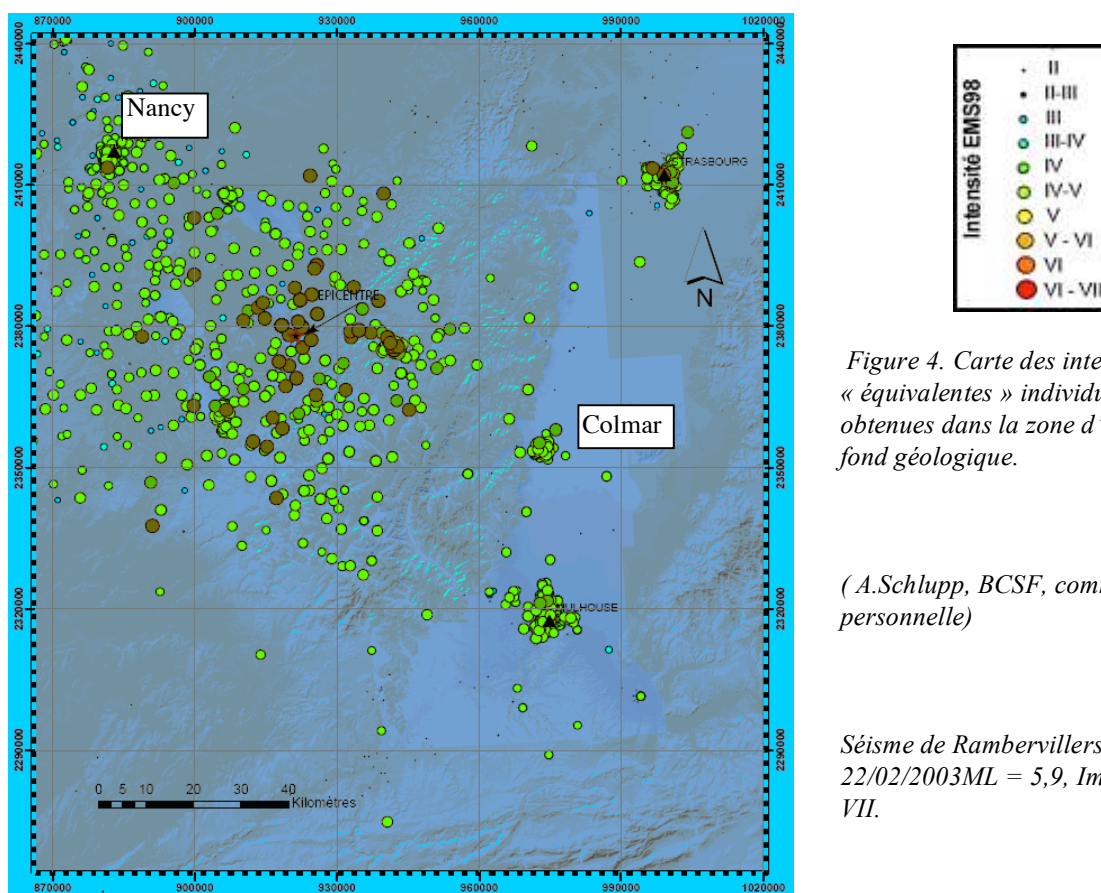
Figure 3. Histogrammes représentant les écarts entre les intensités observées et prédites par la relation de Marin et al., 2004 pour la commune de Menton (a), Roquebrune-Cap-Martin (b), Grasse (c), Valbonne (d), Bar-sur-Loup(e) et Castillon (f).

La zone de Grasse et ses environs (Valbonne, Bar-sur-Loup), est située sur une formation triasique prédominante, composée d'argiles et d'évaporites, matériaux susceptibles d'amplifier le mouvement sismique. Les figures 5 c, d et e montrent le même ordre de grandeur d'amplification des intensités pour chacun des trois séismes. Notons toutefois que, pour le séisme de 2001, les faibles degrés d'intensité sont difficilement quantifiables, la marge d'erreur étant quasiment aussi importante que la valeur d'intensité elle-même. La géologie de premier ordre met ici en évidence des intensités anormalement fortes qui pourraient traduire la présence d'effets de site.

Pour le séisme de 1887, l'intensité la plus élevée (IX) sur le territoire français est attribuée à Castillon, associée au meilleur facteur de qualité dans Sisfrance. Cette valeur dépasse de plus de 3 degrés l'intensité attendue par la relation empirique d'atténuation (figure 3 f). En 1963, l'intensité observée est en accord avec la valeur prédite par la relation Marin et al., 2004. En 2001, le séisme n'a pas été ressenti ou très peu alors que les villes proches de Castillon l'ont ressenti. A priori, cet ensemble d'observations paraît contradictoire. En réalité, la localisation du village de Castillon, en 1887, ne correspond pas à la position actuelle (sur la carte géologique de 1979). Sur les cartes du cadastre napoléonien (1896), Castillon est situé sur un relief topographique marqué, formé d'éboulis, de cavités remplies par un matériel argileux [Laurenti, 1998]. Lors du séisme d'Imperia, la vibration du sol a pu entraîner l'excitation de l'argile et ainsi faciliter la destruction du rocher l'entourant et des fondations des bâtiments posées sur ce dernier. Cet élément local couplé avec la position topographique du village peut expliquer l'intensité anormalement élevée répertoriée à Castillon en 1887. Le village a ensuite été reconstruit plus bas, sur un matériel plus homogène et dur, [Laurenti, 1998]. Ce changement local de géologie explique l'absence d'amplification pour les séismes récents.

3.3. Région des Vosges et du fossé rhénan

Cette région du nord-est est la région française où les séismes récents sont les plus nombreux (trois séismes récents qui ont fait l'objet d'enquêtes macrosismiques collectives et individuelles poussées). D'un point de vue géologique, on trouve le substratum rocheux des Vosges à l'ouest, à la topographie parfois accidentée avec des variations de relief importantes (cours d'eau, vallées glaciaires). Alors qu'à l'est, se situe le fossé rhénan, large vallée sédimentaire de 300 km de long (rift ouest-européen).



Dans le cadre de cet article, seule l'étude sur le séisme de Rambervillers du 22 février 2003 est illustrée (figure 4). Cette carte des intensités « équivalentes » individuelles ne montre pas à priori d'effets de site spectaculaires autour de l'épicentre. Néanmoins, à plus grande échelle, dans la région de Nancy, à environ 55 km au nord-ouest de l'épicentre, les intensités individuelles sont majoritairement de degrés IV, IV-V et quelques valeurs à V. Au sud-est de l'épicentre, dans la région de Colmar, située à la même distance épacentrale, les intensités présentent des valeurs plus élevées qu'à Nancy (majoritairement V et quelques V-VI). La région de Nancy est située sur un substratum rocheux, appartenant au massif hercynien, entrecoupé de petites vallées d'alluvions. Colmar est, quant à elle, située au fond du bassin rhénan, sur une épaisseur sédimentaire parfois importante. Cette configuration géologique couplée aux observations macrosismiques montre que la région de Colmar subit ici un effet d'amplification du mouvement sismique d'échelle régionale. La ville de Strasbourg, située encore plus loin de l'épicentre, illustre également des valeurs d'intensité individuelles plus fortes qu'à Nancy et même Colmar. Cette ville semble également subir un effet de site à grande échelle lié au fossé rhénan.

3.4. Région pyrénéenne

Les Pyrénées résultent de la convergence approximativement nord-sud des plaques Ibérie et Eurasie faisant suite à une phase d'extension liée à l'ouverture du golfe de Gascogne. La faille nord pyrénéenne marque la limite des deux plaques et c'est le long de cette structure que la majorité des séismes ont lieu. Notre étude se focalise sur des séismes ayant eu lieu dans des zones géographiquement et tectoniquement proches : Bigorre 1660 ($M_{L\text{estimée}}=5,9$), vallée d'Ossau 1924 ($M_{L\text{estimée}}=4,9$), Arette 1967 ($M_L=5,3$), Arudy 1980 ($M_L=5,7$).

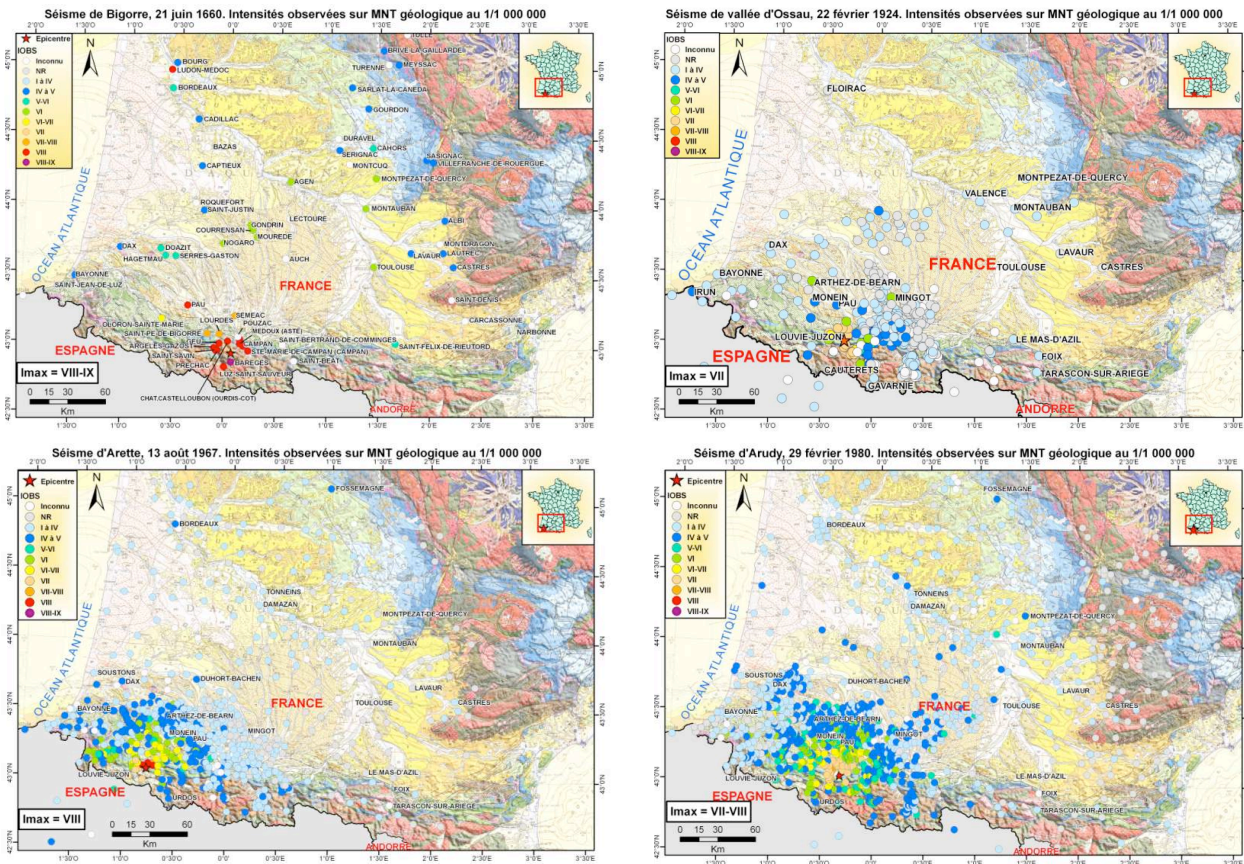


Figure 5. Cartes macrosismiques de séismes des Pyrénées occidentales, sur fond géologique. (échelle : 1/ 1 000 000) Séisme de Bigorre, 1660 : $I_0 = VIII-IX$ $M_{Lestimée} = 5,9$; Séisme de Vallée d'Ossau, 1924 : $I_0 = VII$ $M_{Lestimée} = 4,9$; Séisme d'Ossau-Arudy, 1980 : $I_0 = VII-VIII$ $M_L = 5,7$; Séisme d'Arette, 1967 : $I_0 = VIII$, $M_L = 5,3$

La figure 5 met en évidence que la majorité des observations suite à ces séismes assez importants, sont réalisées principalement dans des zones de remplissage sédimentaire, notamment pour les séismes historiques anciens. Ces observations ne signifient néanmoins pas forcément que les effets ressentis ont été plus forts dans ces zones sédimentaires, mais peut-être seulement que les fonds de vallées étaient davantage peuplés à l'époque du séisme. Néanmoins, on observe un alignement des intensités le long des grandes plaines alluviales du bassin d'aquitaine. Les valeurs y semblent, à grande échelle, plus importantes dans les vallées qu'alentour. Les valeurs d'intensités faibles sont représentées jusqu'à des distances épacentrales très importantes, y compris pour les séismes anciens (beaucoup plus que pour les séismes des Alpes-maritimes)

Malgré une magnitude inférieure au séisme d'Arudy 1980 ($M_L=5,7$), les intensités macrosismiques dans la zone épacentrale à la suite du séisme d'Arette 1967 ($M_L=5,3$), sont plus fortes. Ce phénomène est à relier à la faible profondeur de la source en 1967, qui engendre plus de dégâts à l'épicentre. Le terme de magnitude influe sur l'allure de l'atténuation du mouvement sismique, qui est beaucoup plus lente quand la magnitude est élevée (Arudy 1980).

En champ proche, malgré le fort contraste entre le substratum pyrénéen et les formations quaternaires à faible relief, il n'a pas été possible de montrer clairement une corrélation entre les intensités attribuées à une commune et la géologie de surface [Dechamp, 2006].

4. Conclusion

Cette étude menée dans le cadre du projet ANR-QSHA montre que les informations macrosismiques tendent de plus en plus à constituer une source d'informations potentielles très importantes aux moyens d'observations qualitatives, en complément des données instrumentales bien calibrées (accélérométrie notamment). Elle a d'abord mis en évidence les limites actuelles de l'utilisation des bases macrosismiques (biais de l'échelle temporelle, des contraintes de recherche de documents originaux, du recoupement d'informations, ...). Il a néanmoins permis d'aboutir à des conclusions intéressantes dans le cadre du projet. A grande échelle, les observations macrosismiques informent sur l'allure de l'atténuation du mouvement sismique, apparaissant différente d'une région à l'autre. Avec les seules données utilisées, l'atténuation du mouvement sismique semble la moins forte dans le bassin rhénan, puis dans les Pyrénées et enfin dans le sud-est. En champ proche, elle montre l'importance du geo-référencement de l'observation (exemple de Castillon) et de la connaissance fine des conditions de site, mais aussi toute la difficulté qui en résulte pour pouvoir réellement parler d'effets de site. Ce travail a également permis d'appréhender la grande variabilité qui existe dans la décroissance de l'intensité en fonction de la distance épacentrale, surtout en champ proche. Le calcul des écarts entre les valeurs communales et les valeurs théoriques calculées à partir de la relation de Marin et al., 2004 ne permet pas d'aboutir à des résultats globaux cohérents avec la nature géologique des sites. Seuls quelques résultats notables ont été obtenus sur certaines zones du sud-est, où les intensités sont liées à la géologie de premier ordre. Cette étude montre aussi l'importance d'accéder à des valeurs d'intensités assez élevées (supérieure à IV-V), en champ proche, pour s'affranchir des trop importants biais contenus dans les degrés inférieurs.

Ce travail n'est que les prémices des efforts qu'il faudra entreprendre, lors des prochains mouvements sismiques modérés ou forts, pour coupler les analyses macrosismiques (témoignages individuels et intensités communales) avec les données accélérométriques de sites proches, pour proposer des interprétations quantitatives sur les observations macrosismiques et plus largement sur la connaissance de l'aléa.

5. Bibliographie

BCSF (Bureau Central Sismologique Français), www.seisme.prd.fr.

Cartes géologiques consultées et utilisées sous Arcmap : carte au 1/1 000 000 (France) ; carte au 1/250 000 (NICE, n°40) ; cartes au 1/50 000 (n°230, 342, 921-947, 972, 973, 999, 1030, 1031, 1051, 1052, 1053, 1071, 1072).

A. Dechamp, 2006. Analyse et estimation d'intensités macrosismiques : influence de la géologie. Rapport de stage de Master 2, UJF Grenoble1.

A. Laurenti, 1998. *Les tremblements de terre des Alpes-maritimes ; Histoire et Sensibilisation*. Serre Editeur, 175p.

S. Marin, J-P. Avouac, M. Nicolas, A.Schlupp, 2004. "A probabilistic approach to seismic hazard in metropolitan France", *Bull. Seism. Society. Am.*, 94, No. 6.

M. Nicolas et S. Bottard, 2000. Atténuation de l'intensité macrosismique et magnitude des séismes historiques localisés en France, Document CEA/DIF/DASE/LDG (°00RRBE00086).

Sisfrance, base de la macrosismicité française, www.sisfrance.net.

Sources historiques sur les différents séismes : plans du cadastre napoléonien (1871), archives, articles, ...