

Faisabilité et test d'une base de données des intensités macrosismiques historiques extrapolées pour les communes métropolitaines (phase 1)

Rapport final

BRGM/RP-62941-FR

Décembre 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2012 et 2013 (Convention DGPR – BRGM n° 2200626840)

J. Rey

Avec la collaboration de

S. Auclair, J. Douglas et J. Lambert

Vérificateur :

Nom : O. BOUC

Date : 03/12/2013

Signature :



Approbateur :

Nom : G. GRANDJEAN

Date : 03/04/2014

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : Intensité macrosismique, sismicité historique, risque sismique, SisFrance, krigeage, interpolation, métropole

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

Rey J., avec la collaboration de **S. Auclair, J. Douglas et J. Lambert** (2013) – Faisabilité et test d'une base de données des intensités macrosismiques historiques extrapolées pour les communes métropolitaines (phase 1). Rapport final. BRGM/RP-62941-FR, 78 p., 40 fig., 2 tabl., 1 annexe.

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'information des citoyens sur les risques majeurs est un droit inscrit dans le code de l'environnement (article L.125-2). Des informations sur les caractéristiques des risques et les mesures de prévention et de sauvegarde sont ainsi diffusées dans un dossier départemental sur les risques majeurs établi par le préfet, ainsi que dans un document d'information communal sur les risques majeurs établi par le maire.

En vue de cette information préventive, il est en particulier important de mettre à disposition des données scientifiques accessibles sur l'exposition d'un territoire vis-à-vis du risque sismique, et notamment sur la sismicité historique. En complément de la base de données sur la macrosismicité historique SisFrance (www.sisfrance.net, BRGM/IRSN/EDF), il serait utile de mettre en place une base de données permettant de faire état d'un niveau d'intensité macrosismique présumée occasionnée lors de séismes historiques insuffisamment documentés. Chaque commune du territoire français serait ainsi mieux informée de son exposition à l'aléa sismique.

Le BRGM, dans le cadre de l'action C.9 de la Convention DGPR – BRGM n°2200626840, a mené une étude visant à établir dans un premier temps la faisabilité d'une telle base de données. La présente étude constitue la première phase de ce projet global.

Une étude bibliographique succincte a été réalisée afin de recenser les principales méthodes pour la réalisation de cartes d'iso-valeurs d'intensités macrosismiques, dites cartes d'isoséistes. Les principaux avantages et inconvénients de chacune d'entre elles ont été recensés. Au final, un code de calcul permettant d'établir les cartes d'isoséistes de façon automatique en interpolant les observations d'intensités de la base de données SisFrance par une méthode de krigeage a été retenu. Ce code a été testé pour huit séismes historiques du territoire français caractéristiques de quatre régions représentatives de la sismicité du territoire métropolitain : massif pyrénéen, Alsace-Vosges, massif alpin et Grand Ouest. Une étude de sensibilité complète a ensuite été réalisée afin d'estimer l'influence des paramètres d'entrée et de calcul du code.

Les différences entre une estimation manuelle et un calcul automatique des intensités ont été enfin évaluées de façon qualitative puis quantitative pour ces huit séismes représentatifs du territoire métropolitain, anciens ou récents. Cette méthode permet ainsi d'obtenir des courbes relativement fiables, comparables au premier ordre avec les cartes établies manuellement. Elle constitue un compromis acceptable pour obtenir automatiquement, et ainsi rapidement, des courbes d'isoséistes.

Certaines améliorations devront cependant être apportées au code de calcul pour en améliorer l'efficacité. Par exemple des poids pourraient être accordés aux observations selon le code de qualité de celles-ci. Les données erronées ou aberrantes pourraient par ailleurs être « filtrées » en amont, ce qui permettrait d'obtenir

des cartes d'isoséistes plus lisibles et plus facilement comparables à celles qui seraient réalisées manuellement.

Les perspectives de continuation dans une seconde phase sont enfin évoquées. Il est parfaitement possible d'envisager de réaliser pour l'ensemble des séismes de la base de données SisFrance des cartes automatiques d'isoséistes, en métropole ainsi que dans les DROM si les tests sont concluants. Ensuite un traitement par un logiciel spécifique (SIG) pourrait permettre de superposer l'ensemble des cartes obtenues afin d'obtenir pour une commune les intensités relatives à tous les séismes ayant potentiellement affecté son territoire.

Des perspectives d'évolutions sont ainsi proposées en ce sens et pourront faire l'objet de développements lors des prochaines phases de ce projet.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Méthodes d'interpolation des intensités macrosismiques pour établir les cartes d'isoséistes	11
2.1. INTENSITÉS ET ISOSÉISTES.....	11
2.2. ÉTABLISSEMENT MANUEL DE CARTES D'ISOSÉISTES.....	11
2.3. RELATIONS D'ATTÉNUATION.....	12
2.3.1. Définition	12
2.3.2. Shakemaps	13
2.4. INTERPOLATIONS AUTOMATIQUES.....	16
2.4.1. Définition	16
2.4.2. Interpolations classiques	16
2.4.3. Interpolations élaborées	17
2.4.4. Shakemaps de séismes historiques	20
2.4.5. Krigeage.....	22
3. Sélection de séismes historiques représentatifs.....	25
3.1. CRITÈRES DE SÉLECTION DES SÉISMES	25
3.2. SÉISMES SÉLECTIONNÉS.....	26
3.2.1. Zone Pyrénées.....	26
3.2.2. Zone Alsace-Vosges	28
3.2.3. Zone Alpes.....	30
3.2.4. Zone Grand-Ouest	32
3.3. INTENSITÉS UTILISÉES	34
4. Test du code de krigeage	37
4.1. PRÉSENTATION DU CODE TESTÉ.....	37
4.2. AMÉLIORATIONS ET TESTS DE SENSIBILITÉ.....	37
4.2.1. Correction des bugs	37
4.2.2. Mode de représentation des résultats	38
4.2.3. Tests de sensibilité.....	38

4.3. RÉSULTATS OBTENUS	51
4.4. COMPARAISON AVEC LES ISOSÉISTES ÉTABLIES MANUELLEMENT	61
4.4.1. Comparaisons qualitatives	61
4.4.2. Comparaisons quantitatives	66
4.5. BILAN SUR LA MÉTHODE ET AMÉLIORATIONS POSSIBLES	69
4.5.1. Bilan sur l'utilisation du code	69
4.5.2. Améliorations possibles du code de calcul	70
5. Conclusion et perspectives	71
6. Bibliographie	73
Annexe 1 - Échelle d'intensité MSK.....	75

Liste des figures

Figure 1 - Carte d'intensité produite pour le séisme du 30 décembre 2012. Les cercles représentent les données d'intensités pris en compte et les triangles les stations sismiques (Bertil et al., 2013).	15
Figure 2 - Intensités ressenties lors du séisme du 5 décembre 2004 recensées dans la base de données SisFrance (Rey et Dewez, 2008)	18
Figure 3 - Interpolation des intensités du séisme du 5 décembre 2004 à partir des intensités ressenties (Rey et Dewez, 2008)	19
Figure 4 - Carte d'intensités produite pour le séisme du 2 février 1428 (Bertil et al., 2013).....	20
Figure 5 - Carte des isoséistes pour le séisme du 2 février 1428 (Banda et Correig, 1984).....	21
Figure 6 - Carte manuelle des isoséistes du séisme du 21 juin 1660 (www.sisfrance.net)	26
Figure 7 - Carte manuelle des isoséistes du séisme du 29 février 1980 (www.sisfrance.net)	27
Figure 8 - Carte manuelle des isoséistes du séisme du 12 mai 1682 (www.sisfrance.net)	28
Figure 9 - Carte manuelle des isoséistes du séisme du 22 février 2003 (www.sisfrance.net)	29
Figure 10 - Carte manuelle des isoséistes du séisme du 19 février 1822 (www.sisfrance.net)	30
Figure 11 - Carte manuelle des isoséistes du séisme du 15 juillet 1996 (www.sisfrance.net)	31

Figure 12 - Carte manuelle des isoséistes du séisme du 6 octobre 1711 (www.sisfrance.net).....	32
Figure 13 - Carte manuelle des isoséistes du séisme du 28 septembre 1935 (www.sisfrance.net).....	33
Figure 14 - Test de sensibilité portant sur le choix du pas d'échantillonnage (taille des cellules de la grille de restitution des résultats). Exemples de cartes générées avec six pas variant de 0.01° à 0.5° pour le séisme du 21/06/1660.	40
Figure 15 - Test de sensibilité portant sur le choix du pas d'échantillonnage (taille des cellules de la grille de restitution des résultats). Exemples de cartes générées avec six pas variant de 0.01° à 0.5° pour le séisme du 15/07/1996.	40
Figure 16 - Tests de sensibilité du paramètre « profondeur » pour le séisme d'Epagny du 15/07/1996. Les isoséistes obtenues pour des profondeurs de 1 km, 7 km et 25 km sont présentées en zone épiscopale (en haut) et à grandes distances (en bas).	44
Figure 17 - Tests de sensibilité du paramètre 'a' pour le séisme d'Epagny du 15/07/1996. Les isoséistes obtenues pour des valeurs de 'a' de 0.1 ; 10 ; 1 000 et 100 000 sont présentées.....	46
Figure 18 - Test de sensibilité :ajout de deux intensités IV pour des localités avec intensités non renseignées dans SisFrance pour le séisme du 21/06/1660, avec un pas de calcul de 0.01°. A gauche la carte des isoséistes de référence (59 points) et à droite la carte modifiée (61 points).....	47
Figure 19 - Test de sensibilité : ajout des points d'intensité nulle (séisme non ressenti) pour le séisme du 29/02/1980, avec un pas de 0.05°	48
Figure 20 - Test de sensibilité portant sur la quantification de deux intensités à grande distance (Poitiers et Barcelone) pour le séisme de Bigorre du 21/06/1660. A gauche, carte des isoséistes de référence (intensité indéterminée et donc non utilisée pour ces deux villes) et à droite, carte des isoséistes en considérant une intensité de III-IV pour ces deux lieux (pas 0.01°).....	49
Figure 21 - Test portant sur le retrait de points d'intensités pour le séisme d'Epagny du 15/07/1996. A gauche, carte d'isoséistes de référence (648 points d'observation), au centre carte d'isoséistes pour un cas simulé avec 124 points d'observation et à droite carte d'isoséistes pour un autre cas simulé avec 54 points d'observation.	51
Figure 22 - Exemple de résultats obtenus pour le séisme du 21/06/1660 (pas de 0.05°) : à gauche la carte des intensités interpolées de façon continue et les isolignes correspondantes, à droite une carte d'isoséistes représentées par des intensités entières.....	52
Figure 23 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 21/06/1660 (Pyrénées).....	53
Figure 24 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 29/02/1980 (Pyrénées).....	54
Figure 25 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 12/05/1682 (Vosges).....	55
Figure 26 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 22/02/2003 (Vosges).....	56
Figure 27 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 19/02/1822 (Alpes).....	57

Figure 28 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 15/07/1996 (Alpes).....	58
Figure 29 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 06/10/1711 (Grand-Ouest).....	59
Figure 30 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 28/09/1935 (Grand-Ouest).....	60
Figure 31 - Comparaison des cartes d'isoséistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isoséistes établies manuellement dans SisFrance (à droite) pour le séisme de Bigorre du 21/06/1660.....	62
Figure 32 - Comparaison des cartes d'isoséistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isoséistes établies manuellement dans SisFrance (à droite) pour le séisme du 29/02/1980	62
Figure 33 - Comparaison des cartes d'isoséistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isoséistes établies manuellement dans SisFrance (à droite) pour le séisme du 12/05/1682	63
Figure 34 - Comparaison des cartes d'isoséistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isoséistes établies manuellement dans SisFrance (à droite) pour le séisme du 22/02/2003	63
Figure 35 - Comparaison des cartes d'isoséistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isoséistes établies manuellement dans SisFrance (à droite) pour le séisme du 19/02/1822	64
Figure 36 - Comparaison des cartes d'isoséistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isoséistes établies manuellement dans SisFrance (à gauche) pour le séisme d'Epagny du 15/07/1996	64
Figure 37 - Comparaison des cartes d'isoséistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isoséistes établies manuellement dans SisFrance (à droite) pour le séisme du 06/10/1711	65
Figure 38 - Comparaison des cartes d'isoséistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isoséistes établies manuellement dans SisFrance (à droite) pour le séisme du 28/09/1935	65
Figure 39 - Carte des différences entre les classes d'intensité établies de façon automatique et manuelle pour le séisme de Bigorre du 21/06/1660.....	67
Figure 40 - Carte des différences entre les classes d'intensité établies de façon automatique et manuelle pour le séisme d'Epagny du 15/07/1996.	68

Liste des tableaux

Tableau 1 - Temps de calcul (en secondes) et volume des fichiers générés (en Ko) pour deux séismes et pour six pas d'interpolation croissants	42
Tableau 2 - Différences de classes d'intensités établies de façon automatique et manuelle pour les 8 séismes traités (pourcentage en fonction du nombre de points total de la grille).	66

1. Introduction

L'information des citoyens sur les risques majeurs est un droit inscrit dans le code de l'environnement (article L.125-2). Des informations sur les caractéristiques des risques et les mesures de prévention et de sauvegarde sont ainsi diffusées dans un dossier départemental sur les risques majeurs établi par le préfet, ainsi que dans un document d'information communal sur les risques majeurs établi par le maire.

En vue de cette information préventive, il est en particulier important de mettre à disposition des données scientifiques accessibles sur l'exposition d'un territoire vis-à-vis du risque sismique. La connaissance des séismes historiques, outre leur intérêt pour la compréhension du phénomène sismique et l'évaluation de l'aléa sismique, contribue à entretenir la mémoire des séismes passés et à transmettre la culture du risque. La base de données sur la macrosismicité historique SisFrance (www.sisfrance.net, BRGM/IRSN/EDF) permet notamment de connaître, par commune, l'intensité macrosismique des séismes historiques, dès lors que ces événements ont donné lieu à une description des effets sur la commune visée. Ainsi cet outil est, entre autres, déjà fréquemment utilisé à l'échelle locale à des fins de communication et de développement d'une culture du risque sismique des citoyens.

Cette base de données ne recense donc pas toutes les communes du territoire ayant subi un tremblement de terre au cours des temps. Ainsi, il peut être utile d'offrir des informations complémentaires à celles contenues dans la base SisFrance, en particulier pour les communes peu renseignées historiquement, qui peuvent (faussement) paraître des localités à l'abri des séismes.

Pour fournir cette information complémentaire, il apparaît utile de mettre en place une future base de données permettant de faire état d'un niveau d'intensité présumée occasionnée lors de séismes historiques insuffisamment documentés. Chaque commune du territoire français serait ainsi mieux informée sur son exposition au risque sismique.

Dans un premier temps, la présente étude, commandée au BRGM par la DGPR dans le cadre de l'action C.9 de la Convention DGPR – BRGM n° 2200626840, fournit des éléments pour évaluer la faisabilité d'une telle base de données.

Dans le présent rapport des méthodes d'estimation de cartes d'isoséistes sont dans un premier temps évaluées (chapitre 2). Suite à cette analyse, une méthode spécifique d'interpolation par krigeage est retenue et testée sur huit séismes représentatifs (chapitre 3) et les résultats sont analysés à l'issue d'une étude de sensibilité (chapitre 4). Les améliorations possibles de cette méthode et les perspectives pour la réalisation de la suite de l'étude (phase 2) sont enfin listées (chapitre 5).

2. Méthodes d'interpolation des intensités macrosismiques pour établir les cartes d'isoséistes

2.1. INTENSITÉS ET ISOSÉISTES

L'intensité macrosismique est la quantification des effets d'un séisme en un point particulier de la surface du sol à partir d'une estimation statistique des effets engendrés en ce lieu sur les personnes, les constructions et l'environnement. Elle est quantifiée par des échelles d'intensité (MSK 64, EMS 98, ...). L'intensité ressentie en un lieu suite à un séisme reflète ainsi les mouvements du sol qui sont eux-mêmes liés à la propagation des ondes sismiques. Ces mouvements sismiques sont différents selon la distance du lieu d'observation mais peuvent également être amplifiés (ou atténués) localement en raison d'effets locaux spécifiques, on parle alors « d'effets de site ». Par ailleurs l'intensité est en général « moyennée » au niveau d'une localité et une valeur unique est souvent évaluée pour l'ensemble d'un territoire communal.

Le principal travail pour estimer des intensités relatives à un séisme donné en tout lieu du territoire est d'établir au préalable une carte dite d'isoséistes. L'isoséiste est une courbe englobant un même niveau d'intensité macrosismique. Les isoséistes sont d'autant plus fiables que la densité de données d'observations ponctuelles est importante.

Ainsi, une fois que ces courbes sont dessinées pour différents degrés, on peut émettre une valeur d'intensité à toutes les localités situées dans la zone correspondante à ce degré et ce, même si aucune observation n'est encore répertoriée pour une ou plusieurs localités intégrant la zone en question. Par ailleurs en dehors des zones dans lesquelles l'événement a été ressenti, des intensités nulles peuvent être considérées.

Au final, en tous points du territoire, une estimation de l'intensité liée au séisme considéré, qu'elle soit issue d'une observation réelle ou d'une interpolation, est possible en utilisant directement ce type de cartes.

Il existe différentes méthodes pour établir ces cartes. Ces méthodes sont développées ci-dessous, de la plus simple à la plus complexe.

2.2. ÉTABLISSEMENT MANUEL DE CARTES D'ISOSÉISTES

Dans le cadre de SisFrance de telles cartes d'isoséistes ont été déterminées manuellement pour tous les séismes importants du territoire métropolitain. Ainsi plus de 100 cartes d'isoséistes de séismes d'intensités épacentrales supérieures à VI ont été établies par Jérôme Lambert (Lambert, 2004) et sont disponibles sur le site internet de SisFrance (www.sisfrance.net). A titre d'exemples, on peut voir sur les Figure 7 à Figure 13 les courbes d'isoséistes déterminées pour certains séismes importants survenus en France depuis le XVII^{ème} siècle.

Dans le cas de séismes anciens pour lesquels on ne dispose pas de beaucoup de données, de telles courbes apportent une information importante pour un grand nombre de localités (sur l'exemple d'un séisme majeur tel le séisme de Remiremont de 1682 cela représente presque un quart du territoire métropolitain).

Ces courbes sont ainsi établies « à dire d'expert » et la pondération des différentes observations est implicitement prise en compte dans le travail. Les indices de qualité sont pris en considération : quand un point semble douteux et que son indice de fiabilité est incertain (par exemple indice de fiabilité C, voir paragraphe 3.3) il est souvent tout simplement ignoré. Si l'indice est bon (A) les courbes sont dans la mesure du possible ajustées pour tenir compte de cette donnée. Cependant les choix ayant conduit à établir ces cartes ne sont pas référencés. Cela représenterait en effet un travail considérable de justifier et annexer à la carte en elle-même tous les choix de l'expert pour le tracé de chaque ligne d'isoséistes. De plus chaque expert peut dessiner des cartes différentes selon sa connaissance des données et son expérience et ces cartes sont ainsi par nature subjectives, ce qui en constitue la principale limite. L'expérience de la personne qui établit ces cartes est ainsi un élément primordial pour estimer la pertinence de ce type de travaux. Enfin, une autre limite importante des évaluations manuelles des cartes d'isoséistes est que ce travail est très consommateur en temps et ne peut être généralisé facilement à un grand nombre de séismes.

2.3. RELATIONS D'ATTÉNUATION

2.3.1. Définition

Une seconde méthode pour établir des cartes d'isoséistes consiste à utiliser les relations d'atténuation décrivant la diminution de l'intensité macrosismique selon la distance à l'épicentre.

Ces relations sont généralement de la forme $I = I_0 - a \log(d)$ avec I , intensité au site (ce qu'on recherche), I_0 intensité épiscopentrale, d distance épiscopentrale et a un coefficient déterminé empiriquement.

Pour tenir compte des caractéristiques réelles des séismes considérés le paramètre I_0 est souvent remplacé par une estimation de l'intensité selon différents paramètres tels la magnitude du séisme et sa profondeur. On obtient alors des relations empiriques dont les coefficients sont déterminés en utilisant les données disponibles pour un territoire donné.

Pour la France, on peut citer par exemple la relation d'atténuation en intensité de Levret *et al.* (1994) :

$$I = 2.27.M - 3.36 \log(D_f) - 1.09$$

Avec I , intensité au site (ce qu'on recherche), M , magnitude macrosismique, D_f distance focale.

Quand la localisation de l'épicentre est déterminée, ainsi que les caractéristiques du séisme considéré il est ensuite aisé de calculer en tous points une intensité estimée. Cette intensité dépend pour ce type de relation simple uniquement de la distance du site à l'épicentre. Les isoséistes sont ensuite directement établies selon cette procédure.

Lorsque ces isoséistes sont déterminées à partir de relations d'atténuation en intensité telle la loi de Levret *et al.* (1994), leur nature isotrope produit des isoséistes circulaires en général peu représentatives des observations. En effet, l'atténuation dépend de nombreux facteurs en particulier en champ proche, qu'il s'agisse de la géométrie et de la dynamique de la rupture sismique (directivité et mécanisme au foyer) ou encore des structures géologiques pouvant par exemple faciliter ou non la propagation des ondes sismiques selon des directions privilégiées. De même, la nature des sols peut modifier sensiblement l'intensité ressentie dans deux localités voisines mais situées sur des sols différents.

Il est ainsi possible de raffiner les relations d'atténuation en ajoutant des paramètres ayant une influence sur les mouvements sismiques, et par conséquence sur les intensités, tels la nature des sols, le mécanisme de rupture, la directivité des effets (Bossu *et al.*, 2000). Ceci demande cependant un long travail d'analyse et une base de données importante et fiable. De plus ce type de relation est développé régionalement, les ondes ne se propageant pas de la même façon dans toutes les régions françaises en particulier en raison de natures de socle très différentes.

2.3.2. Shakemaps

Une solution alternative à l'utilisation de relation d'atténuation consiste à prendre en compte les observations d'intensités suite à un séisme. C'est le principe de l'outil « Shakemap » développé par l'USGS. En particulier cet outil, qui vise à établir des cartes du mouvement sismique en temps réel, a été utilisé et adapté pour la zone Pyrénées à l'occasion du projet INTERREG SisPyr (2009-2012). Pour une description complète du principe de fonctionnement de l'outil et des adaptations réalisées pour la zone Pyrénées, on se reportera au rapport de Bertil *et al.* (2013).

D'une façon simplifiée, cet outil permet d'établir des cartes du mouvement sismique (accélérations, vitesses, déplacements ou intensités) par itération en mixant des analyses de simulation utilisant des relations empiriques d'atténuation des mouvements avec la distance et des données concrètes collectées en temps réel. Ces données peuvent être de nature instrumentale et donc quantitative (accélérations, vitesses, déplacements maximaux ou spectres de réponse provenant des réseaux locaux) ou plus qualitative (collecte des intensités relevées en ligne par des particuliers par exemple).

En particulier des cartes du mouvement sismique, exprimé sous forme d'intensités, sont générées par cet outil. Dès que l'épicentre et la magnitude sont évalués par les réseaux d'observation, l'outil calcule une carte des intensités estimées à l'aide de relations empiriques telles des relations d'atténuation adaptées au contexte local. Des cartes d'isoséistes sont ainsi produites « en aveugle » et donnent une information de

premier ordre. Des effets de site locaux peuvent être également pris en compte à ce stade. Une carte de la nature des sites est en effet utilisée en entrée de l'outil et celui-ci calcule les mouvements sismiques en utilisant des relations d'atténuations tenant compte du type de sol. Ceci permet d'affiner grandement les mouvements sismiques simulés.

Ensuite, des intensités sont estimées à partir des accélérations enregistrées par les réseaux instrumentaux. Ces intensités sont complétées par les observations collectées par le Bureau Central Sismologique Français (BCSF) sur internet. Le logiciel recalcule alors les cartes d'intensités en tenant compte de toutes ces informations. Au fur et à mesure que des informations parviennent à l'outil (le nombre de témoignages en ligne augmente ainsi classiquement en fonction du temps), ce dernier affine la carte obtenue par itérations successives.

Un exemple de carte produite dans le cadre du projet INTERREG SisPyr est présenté sur la Figure 1 ci-dessous.

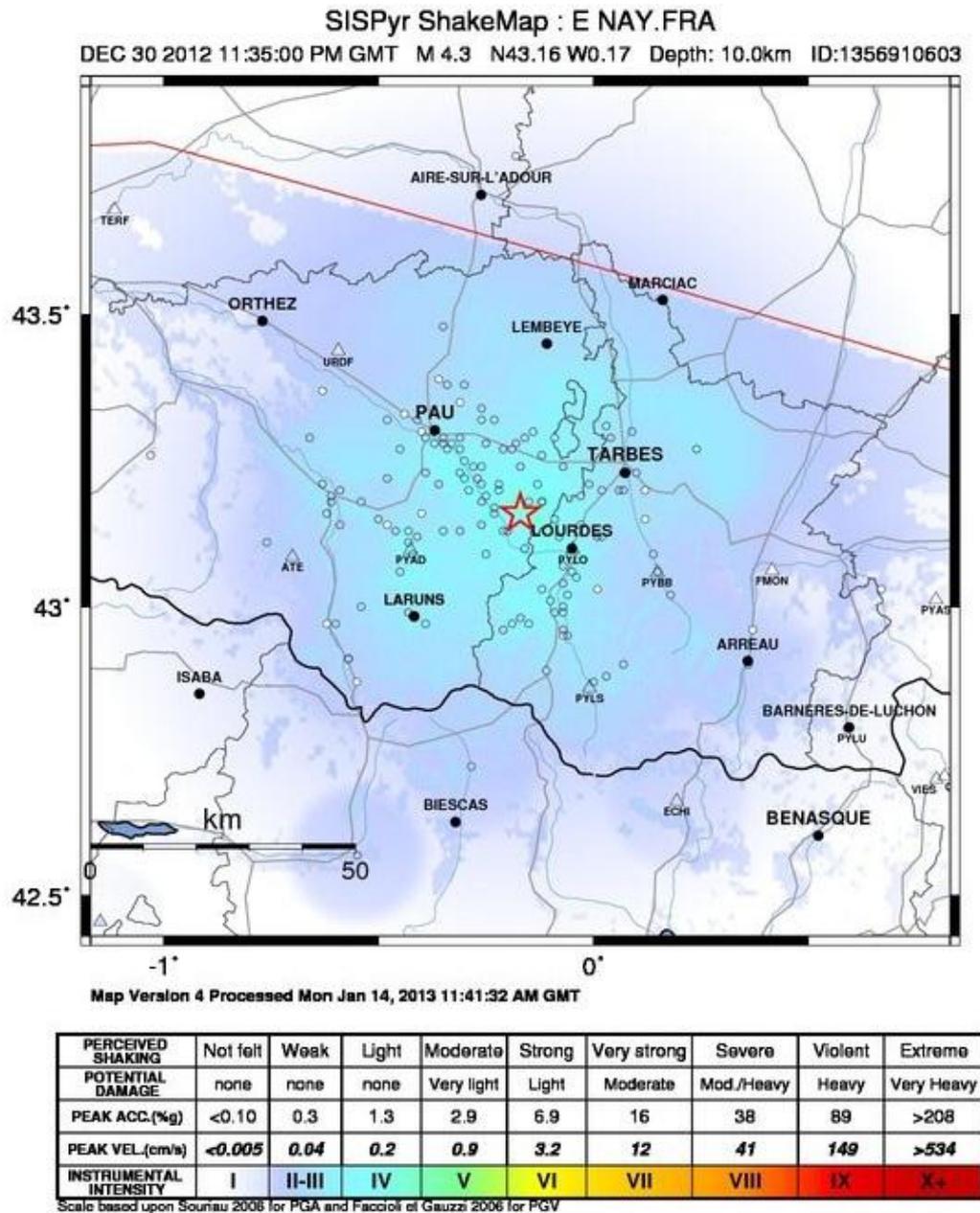


Figure 1 - Carte d'intensité produite pour le séisme du 30 décembre 2012. Les cercles représentent les données d'intensités pris en compte et les triangles les stations sismiques (Bertil et al., 2013).

2.4. INTERPOLATIONS AUTOMATIQUES

2.4.1. Définition

En analyse numérique, l'interpolation est une opération mathématique permettant de construire une courbe à partir de la donnée d'un nombre fini de points, ou une fonction à partir de la donnée d'un nombre fini de valeurs. La solution du problème d'interpolation passe par les points prescrits, et, suivant le type d'interpolation, il lui est demandé de vérifier des propriétés supplémentaires.

L'interpolation doit être distinguée de l'approximation de fonction, qui consiste à chercher la fonction la plus proche possible, selon certains critères, d'une fonction donnée. Dans le cas de l'approximation, il n'est en général plus imposé de passer exactement par les points donnés initialement. Ceci permet de mieux prendre en compte le cas des erreurs de mesure (source : Wikipédia).

Ainsi pour le cas des isoséistes automatiques c'est une interpolation qui doit être réalisée et non pas une approximation de fonction : on juge que les intensités relevées sont justes et que la carte résultante doit prendre en compte ces données sans les modifier. La méthode d'interpolation consiste uniquement à « combler les blancs » entre les points d'observation mais pas à réinterpréter globalement les données observées. C'est une différence importante par rapport aux isoséistes établies manuellement. En effet lorsque qu'on établit manuellement des cartes d'isoséistes, des données peuvent être volontairement ignorées, majorées ou minorées parce qu'elles semblent aberrantes par rapport aux données voisines. C'est une limite importante des méthodes automatiques d'interpolation qu'il faut garder en mémoire.

2.4.2. Interpolations classiques

Les méthodes classiques d'interpolation consistent d'une façon générale à estimer une fonction simple de type linéaire, cubique, polynomiale pour modéliser la variation de la quantité étudiée entre deux valeurs observées. Les valeurs des points « intermédiaires » entre les deux valeurs observées sont ensuite directement déduites de cette fonction dont les paramètres sont estimés de façon à ce que les valeurs calculées au niveau des points d'observation donnent exactement les valeurs observées en ces points.

Ces méthodes sont adaptées quand on raisonne sur des problèmes simples pouvant être modélisés en une dimension : régression linéaire ou polynomiale de points de valeurs Y situés sur un axe X. Mais les méthodes ne sont pas utilisables dès qu'on considère une interpolation selon deux dimensions. Dans le cas présent la méthode d'interpolation doit tenir compte de tous les points et les variations doivent être considérées selon toutes les directions, entre chaque couple de points. Pour cela il convient d'utiliser des méthodes d'interpolations plus élaborées.

2.4.3. Interpolations élaborées

Dans le cas de données à interpoler selon deux dimensions on parle d'interpolation spatiale. Plusieurs méthodes ont été élaborées pour réaliser ce type d'interpolation. Pour les calculs d'isoséistes, les méthodes basées sur la triangulation de Delaunay sont très adaptées. Des cartes d'isoséistes automatiques avaient ainsi été réalisées en 2008 dans le cadre d'une étude du BRGM pour la DGPR intitulée « Carte de l'aléa sismique par l'approche statistico-historique » (Rey et Dewez, 2008).

Dans cette étude de 2008 un programme Matlab[®] avait été élaboré afin d'interpoler au mieux les intensités ressenties. Quatre méthodes d'interpolation proposées par le logiciel Matlab[®] avaient été testées. Parmi celles-ci, trois méthodes utilisent une méthodologie selon des triangles de Delaunay. L'interpolation est ainsi effectuée par triangulation selon une interpolation linéaire ('linear'), géométrique ('cubic') ou encore plus simplement selon la valeur la plus proche du point considéré ('nearest'). Ces méthodes sont classiquement utilisées pour des travaux d'interpolation de données parcellaires dans des domaines scientifiques aussi variés que la géodésie ou la recherche médicale. La dernière méthode, référencée 'v4', est spécifique à Matlab[®] et a été développée lors de travaux sur des données radar en 1987.

Les tests de sensibilité avaient montré que les techniques d'interpolation linéaire et cubique donnent les résultats les plus stables (Rey et Dewez, 2008). Dans cette étude, les résultats obtenus étaient assez proches selon les méthodes d'interpolation utilisées, avec peut-être un léger étalement des valeurs les plus fortes plus marqué en 'cubic' qu'en 'linear'. Les zones pour lesquelles aucune valeur n'est obtenue différaient peu selon la méthodologie et aucune des méthodes ne permettait en particulier de réduire ces zones.

Un exemple d'interpolation des intensités recensées dans SisFrance pour créer une carte d'isoséistes était donné dans cette étude de 2008. Dans cet exemple, qui concerne le séisme de Waldkirch (Forêt Noire) du 5 décembre 2004 pour lequel 801 observations sont disponibles, les valeurs des intensités répertoriées dans SisFrance et l'interpolation de ces intensités (triangulation de Delaunay avec interpolation linéaire) sont respectivement représentées sur la Figure 2 et la Figure 3 ci-dessous.

Remarque : on note qu'aucun point d'observation n'est disponible en Allemagne (Figure 2) mais l'intensité épiscopale a tout de même été utilisée comme point de référence pour réaliser l'interpolation sur le territoire allemand (Figure 3).

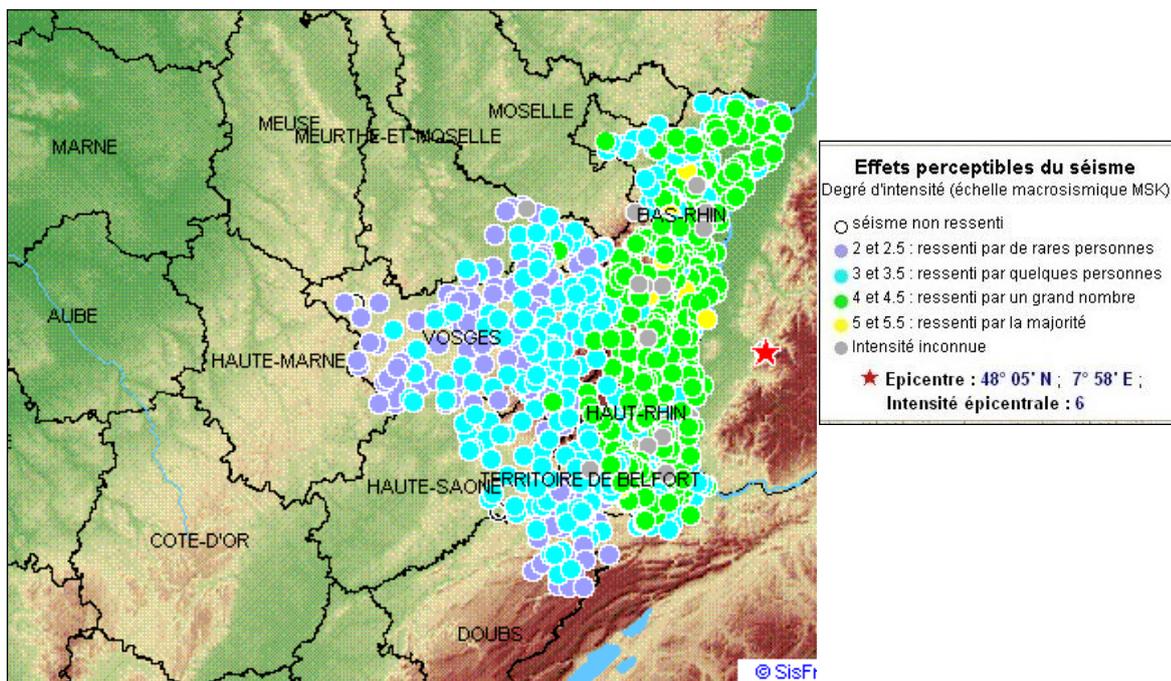


Figure 2 - Intensités ressenties lors du séisme du 5 décembre 2004 recensées dans la base de données SisFrance (Rey et Dewez, 2008)

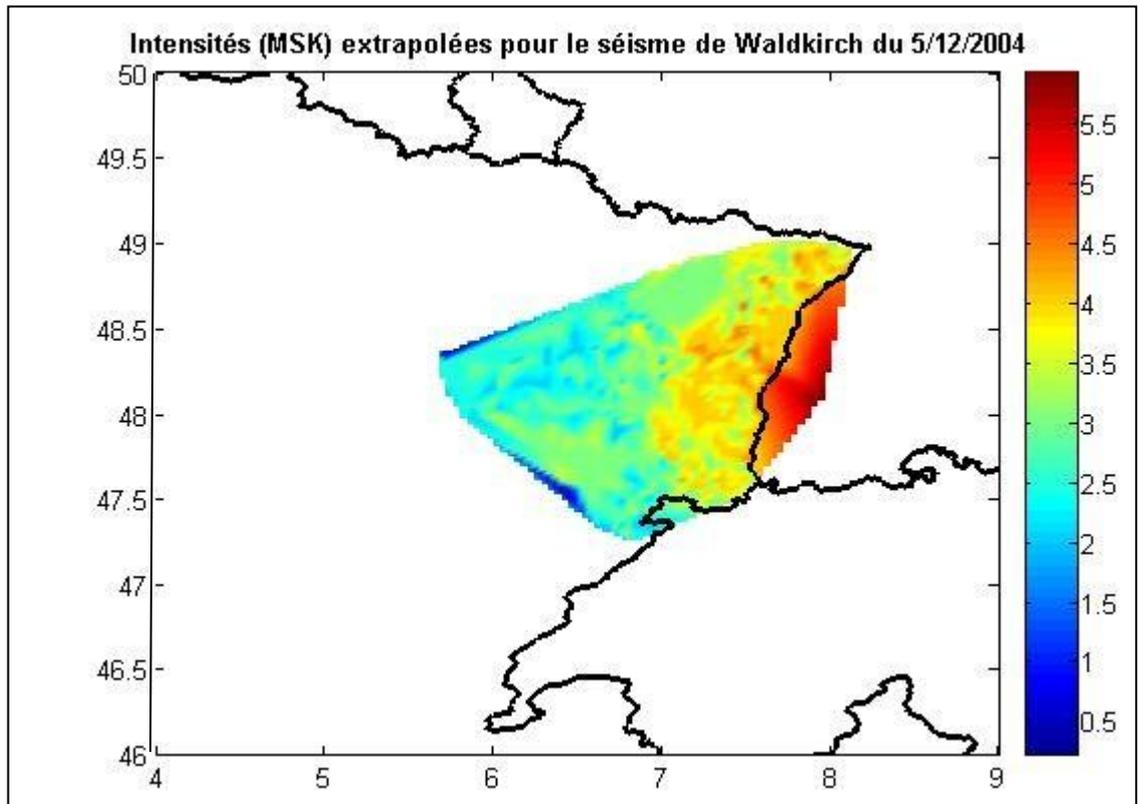


Figure 3 - Interpolation des intensités du séisme du 5 décembre 2004 à partir des intensités ressenties (Rey et Dewez, 2008)

Cette méthode permet une bonne prise en compte des modifications locales du mouvement sismique (effets de site, directivité, ...) et donc des intensités observées. En effet, l'échelle de travail est fonction de la distance entre les points d'observation et est en général plus fine et donc plus proche de la réalité que les courbes dessinées manuellement, en particulier en champ proche (zone épiscopale), où un grand nombre de données d'intensités observées fiables sont disponibles.

À la lecture de l'exemple ci-dessus on visualise cependant la principale limite de cette méthode qui est adaptée quand il y a beaucoup de points mais qui semble difficilement utilisable quand on dispose de peu de données. Ainsi cette méthode d'interpolation fournit des valeurs d'intensité théoriques uniquement pour les zones situées à l'intérieur d'un triangle formé par 3 points d'observation. Il reste de nombreuses « zones blanches » non couvertes où des intensités notables sont pourtant attendues (intensités III à IV en Lorraine ou en Allemagne dans cet exemple). En ce sens elle est complémentaire d'une estimation manuelle des courbes d'isoséistes.

2.4.4. Shakemaps de séismes historiques

Même si ce n'est pas sa fonction première il est parfaitement possible avec l'outil Shakemap présenté dans le paragraphe 2.3.2 de générer des cartes d'intensités relatives à des séismes historiques. Pour cela une localisation et une magnitude sont indiquées en entrée de l'outil, sur la base par exemple de catalogues de sismicité historique, ainsi que des intensités relevées en différentes localités. Le logiciel calcule ensuite les mouvements sismiques correspondants selon la procédure développée au paragraphe 2.3.2 et une carte d'intensités estimées est produite. On peut voir par exemple ci-dessous (Figure 4) la carte produite par cet outil ShakeMap pour le séisme du 2 février 1428 en Catalogne. Il s'agit d'un des séismes les plus importants relevés sur le territoire ou proches de la métropole depuis 1000 ans.

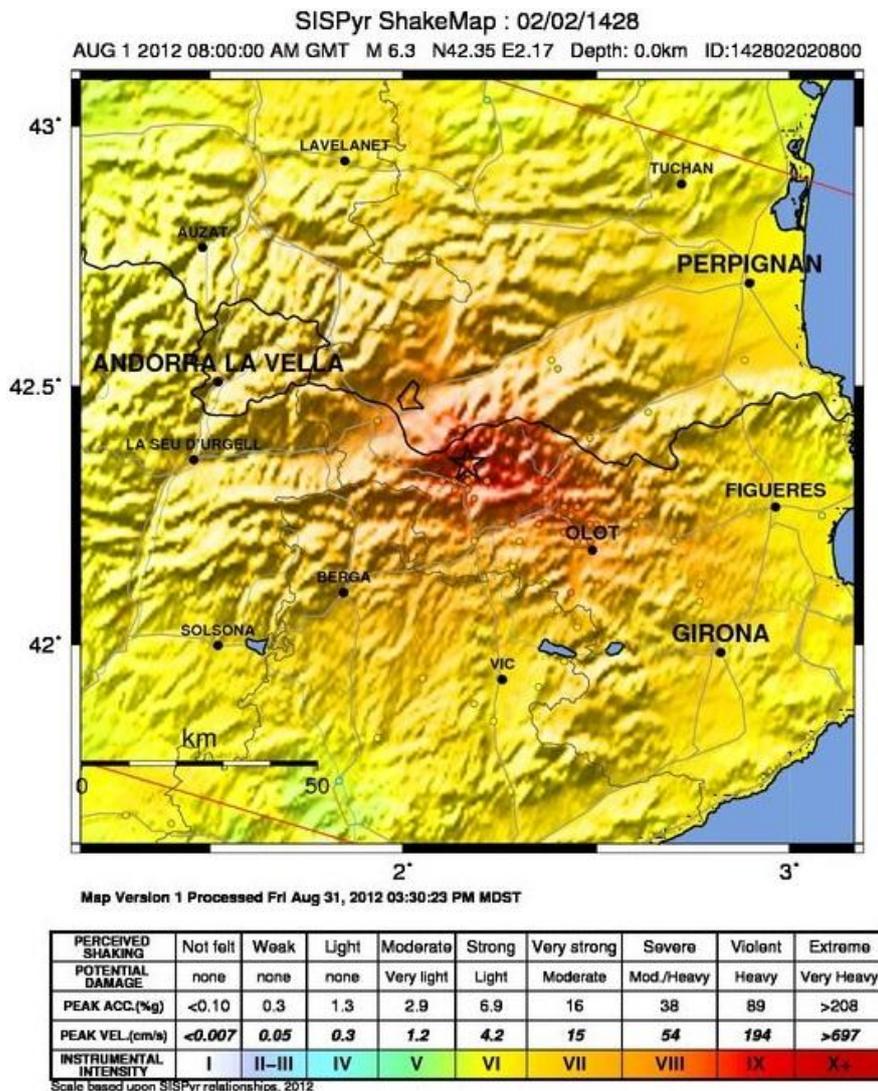


Figure 4 - Carte d'intensités produite pour le séisme du 2 février 1428 (Bertil et al., 2013).

Cette carte peut être comparée à une carte manuelle d'isoséistes produite dans la littérature pour ce même séisme, sur la Figure 5 ci-dessous :

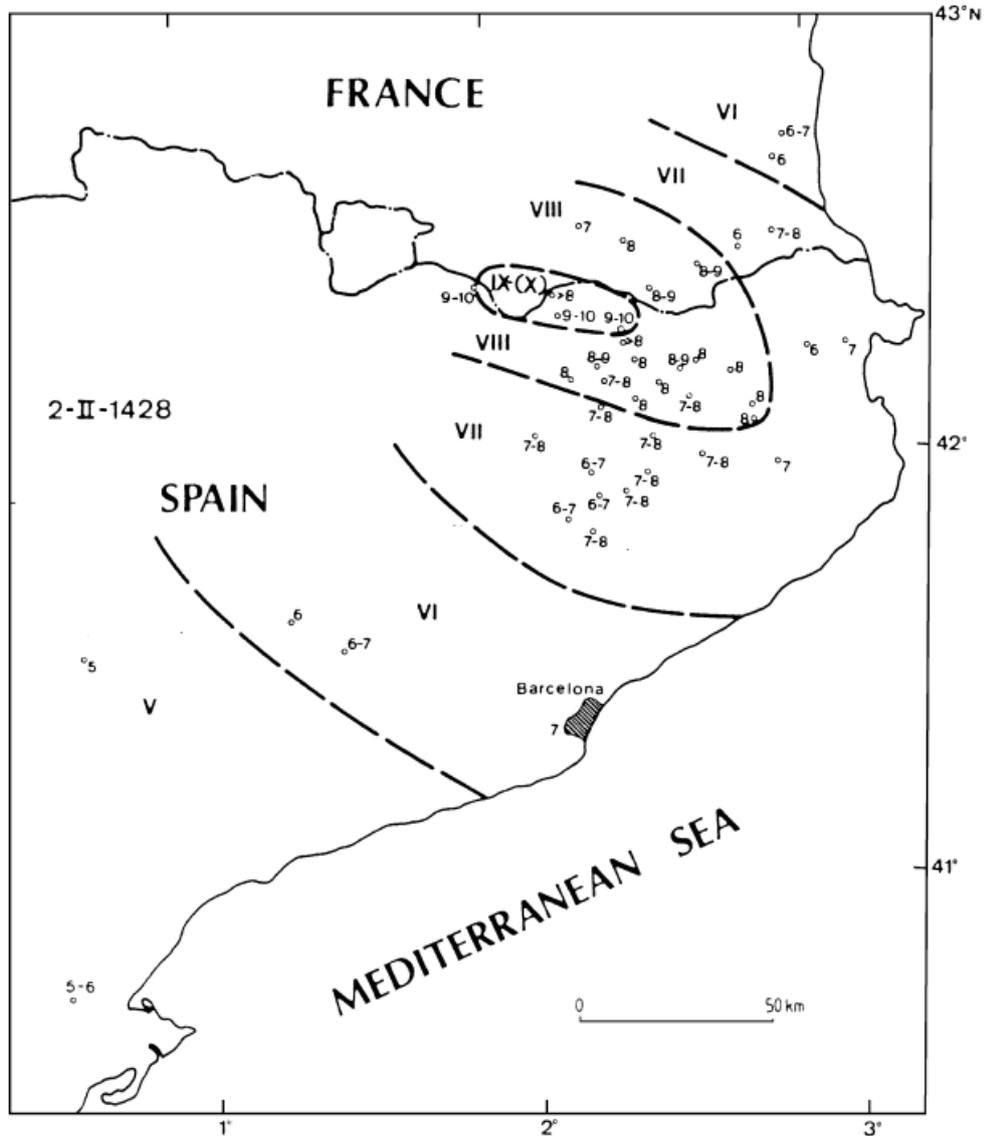


Figure 5 - Carte des isoséistes pour le séisme du 2 février 1428 (Banda et Correig, 1984).

On note que la Shakemap donne globalement les mêmes niveaux d'intensités que la carte d'isoséistes publiée. Cependant cette carte Shakemap est beaucoup plus précise car elle tient compte des effets de site locaux. On voit ainsi nettement que les intensités sont plus importantes dans les vallées encaissées où des effets de site sont probables.

Ainsi cet outil présente de nombreux avantages : il fournit des résultats précis, sans doute plus proches de la réalité qu'une carte d'isoséistes établie manuellement. L'outil est également adaptable et modulable car il s'agit d'un outil libre de droits. Enfin il

permet l'utilisation de données complémentaires aux estimations classiques des intensités comme des données issues de réseaux de surveillance locaux. Enfin cet outil est utilisable pour obtenir des cartes en temps réel, ce qui peut être utile pour des utilisations en matière de Protection Civile par exemple.

Les inconvénients de l'outil sont principalement qu'il nécessite un travail important de préparation. En effet des informations précises telle la carte des effets de site ou les relations d'atténuation locales sont nécessaires pour que l'outil fonctionne de façon optimale. De plus, il s'agit d'un code difficile à prendre en main. Il est par exemple difficile de modifier les relations d'atténuation qui sont codées en « dur » dans le programme.

En conclusion cet outil constitue une solution très performante pour estimer des cartes d'isoséistes dans une zone bien étudiée. Il est cependant difficilement utilisable dans d'autres régions, sauf si des simplifications/approximations sont faites. Par exemple l'outil Shakemaps en ligne sur le site de l'USGS utilise des relations empiriques génériques et fournit ainsi des résultats dégradés. Il n'est ainsi pas envisageable d'utiliser cet outil pour traiter des centaines d'isoséistes de différentes régions françaises mais cette solution ne doit pas être écartée pour générer des cartes d'isoséistes dans des régions dans lesquelles il a été adapté (par exemple les Pyrénées dans le cadre de SisPyr, ou d'autres régions, dont les Alpes, dans le cadre d'autres projets européens).

2.4.5. Krigeage

Le krigeage est, en géostatistique, la méthode d'estimation linéaire garantissant le minimum de variance. Le krigeage réalise l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, utilisant l'interprétation et la modélisation du variogramme expérimental. C'est le meilleur estimateur linéaire non-biaisé; il se fonde sur une méthode objective. Il tient compte non seulement de la distance entre les données et le point d'estimation, mais également des distances entre les données deux-à-deux. Le terme krigeage provient du nom de l'ingénieur minier sud-africain D. G. Krige. Il a ensuite été formalisé pour la prospection minière puis le domaine de ses applications a largement été étendu (météorologie, sciences de l'environnement, l'électromagnétisme ...) (source : Wikipédia).

Cette méthode est ainsi particulièrement adaptée pour les interpolations de paramètres dont la valeur dépend directement de la distance entre les points. C'est le cas pour les courbes d'isoséistes : les valeurs des intensités décroissent en général linéairement avec le logarithme de la distance (voir paragraphe 2.3.1). Ceci est dû au mode de propagation des ondes sismiques dont l'amplitude est modélisée généralement comme étant linéairement décroissante selon le logarithme de la distance (atténuation constante).

Un code informatique adaptant cette méthode statistique a été développé par Ambraseys et Douglas en 2004 pour estimer des courbes d'isoséistes de séismes historiques en Inde du Nord. Ce code a été légèrement modifié et testé sur un séisme

historique français, le séisme d'Arudy du 29/02/1980 (voir Figure 24). Quand des données sont disponibles le code estime en chaque point les intensités permettant de respecter exactement ces observations. Quand peu de données sont disponibles, le code simule des courbes d'isoséistes sous forme de cercles concentriques en estimant leurs diamètres à partir d'au moins une donnée observée, respectivement pour chaque classe d'intensités (par exemple II, II-III, III, III-IV, IV, ..).

Cette méthode a été retenue *a priori* car elle permettait de répondre aux principaux inconvénients des méthodes précédentes. En particulier, elle permet ainsi en théorie de traiter un grand nombre d'événements et ne nécessite pas d'adaptations lourdes.

Ainsi, cette méthode a été plus particulièrement étudiée dans le cadre de la présente étude. Des tests de sensibilité ont été réalisés et la méthode a été appliquée pour des événements historiques. Les résultats obtenus pour huit séismes représentatifs sont ainsi reproduits dans la partie 4.3 du présent rapport.

3. Sélection de séismes historiques représentatifs

3.1. CRITÈRES DE SÉLECTION DES SÉISMES

Afin de tester la méthodologie retenue, plusieurs séismes représentatifs ont été sélectionnés. Ces séismes serviront de référence pour cette phase de tests avant de décliner les résultats obtenus pour les autres séismes de la base de données SisFrance dans les futures phases de l'étude.

Pour cela plusieurs zones géographiques, de sismicité variable, ont été identifiées : une zone « Pyrénées » estimée représentative de la sismicité du massif pyrénéen, une zone « Alsace-Vosges » estimée représentative de la sismicité de l'Est de la France (Alsace, Vosges, Jura, Ardennes, ...), une zone « Alpes » estimée représentative de la sismicité du massif alpin et enfin une zone « Grand Ouest » estimée représentative de la sismicité de l'Ouest et du Nord de la France (massif Armoricain, Poitou, Massif Central, Nord, Normandie, ...). Ainsi les principales zones de sismicité du territoire métropolitain sont couvertes par cette sélection.

Pour chacune de ces quatre zones, deux séismes ont ensuite été sélectionnés en collaboration avec Jérôme Lambert (BRGM) qui gère la base de données SisFrance. Il a été décidé de sélectionner un séisme destructeur dont l'épicentre est situé dans la zone considérée, même si un nombre limité d'intensités est recensé. Cependant, les séismes très mal connus, dont moins de dix observations sont recensées dans SisFrance, ont été écartés à ce stade. Un second séisme moins violent mais récent a également été sélectionné pour chacune des zones. Les intensités maximales de ce second type de séismes sont moins importantes mais les observations sont beaucoup plus nombreuses pour ces séismes récents relativement bien connus.

Les séismes sélectionnés font partie du sous-ensemble de séismes d'intensité épacentrale supérieure à VI pour lesquels des cartes d'isoséistes ont été établies manuellement et représentées sur le SIG MAPINFO® (Lambert, 2004).

Les huit séismes sélectionnés pour cette phase de tests sont successivement présentés dans le paragraphe 3.2.

3.2. SÉISMES SÉLECTIONNÉS

3.2.1. Zone Pyrénées

- Séisme du 21 juin 1660 (85 observations dans la base de données SisFrance dont 59 intensités quantifiées).

Ce séisme appelé « séisme de Bigorre » a eu lieu proche de la commune de Bagnères-de-Bigorre (Hautes-Pyrénées). L'intensité épacentrale est estimée à VIII-IX, ce qui en fait le séisme le plus violent survenu sur le territoire métropolitain dans la base de données SisFrance. Sa magnitude locale était sans doute supérieure à $M_l=6.0$ et sa profondeur est estimée à 13 km (Martin *et al.*, 2002).

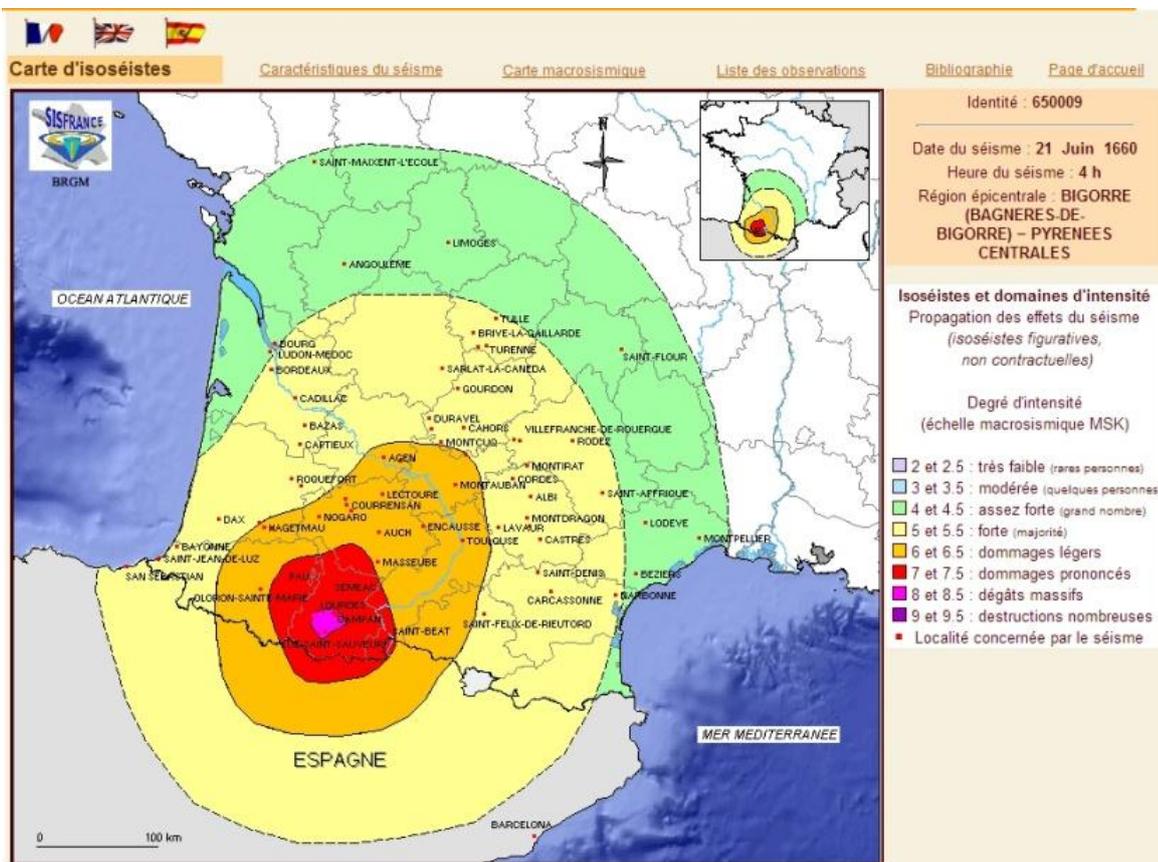


Figure 6 - Carte manuelle des isoséistes du séisme du 21 juin 1660 (www.sisfrance.net).

- Séisme du 29 février 1980 (1 323 observations dans la base de données SisFrance dont 1 291 intensités quantifiées).

Ce séisme dit « séisme d'Arudy » est le séisme ayant généré les dommages les plus importants depuis 40 ans en métropole. Sa magnitude locale est évaluée à $M_L=5.1$ et sa profondeur 5 km (Martin *et al.*, 2002). L'intensité épiscopentrale est estimée à VII-VIII (MSK).

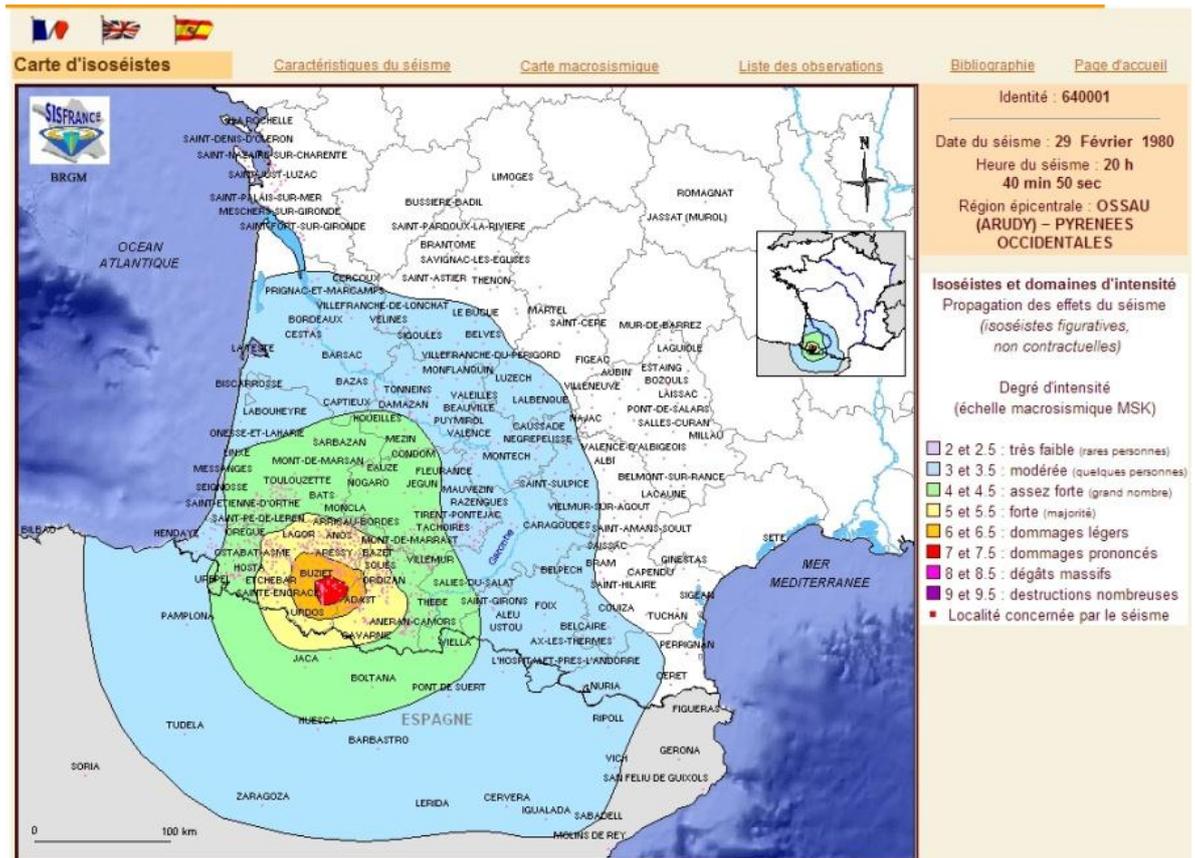


Figure 7 - Carte manuelle des isoseistes du séisme du 29 février 1980 (www.sisfrance.net).

3.2.2. Zone Alsace-Vosges

- Séisme du 12 mai 1682 (103 observations dans la base de données SisFrance dont 41 intensités quantifiées).

Ce séisme dit « séisme de Remiremont » a eu lieu dans les Hautes-Vosges et est un des plus importants survenus au cours des 1000 dernières années en métropole. Sa magnitude est estimée à $M_I=6.0$ à l'aide des intensités macrosismiques et sa profondeur à 20 km (Martin *et al.*, 2002). L'intensité épiscopale atteint la valeur de VIII. Du fait de sa magnitude et de sa profondeur importantes, ce séisme a été fortement ressenti dans une zone très étendue, de Paris à l'ouest jusqu'en Autriche à l'est.

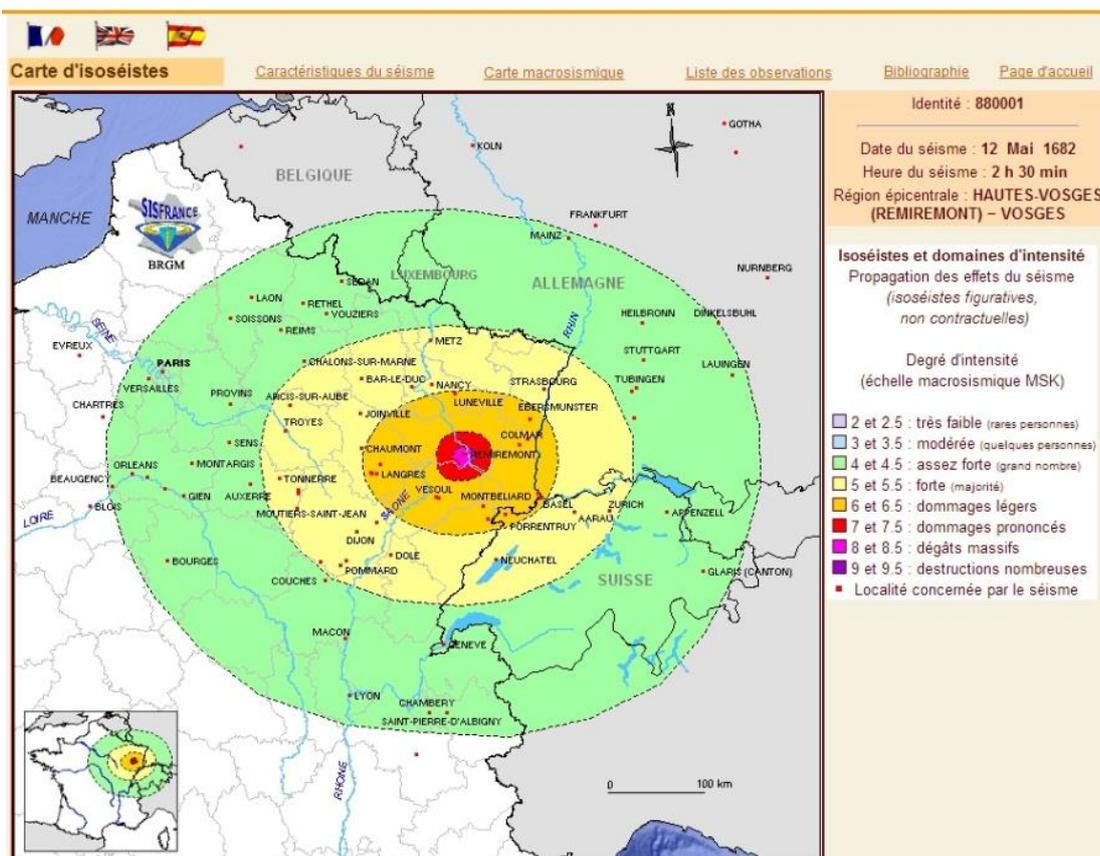


Figure 8 - Carte manuelle des isoséistes du séisme du 12 mai 1682 (www.sisfrance.net).

- Séisme du 22 février 2003 (3 959 observations dans la base de données SisFrance dont 3 853 intensités quantifiées).

Ce séisme dit « séisme de Rambervillers » a eu lieu proche de cette ville des Vosges et a été largement ressenti dans tout le quart nord-est de la France. Sa magnitude, évaluée à $M_l=5.4$ par le Réseau National de Surveillance Sismique (RéNaSS) est la plus importante enregistrée en métropole depuis plus de 50 ans. Sa profondeur est estimée entre 10 kilomètres (RéNaSS) et 12 kilomètres (Laboratoire de Détection Géophysique du CEA). L'intensité épiscopale est évaluée à VI-VII. Il s'agit du séisme pour lequel les observations disponibles sont les plus nombreuses dans SisFrance.

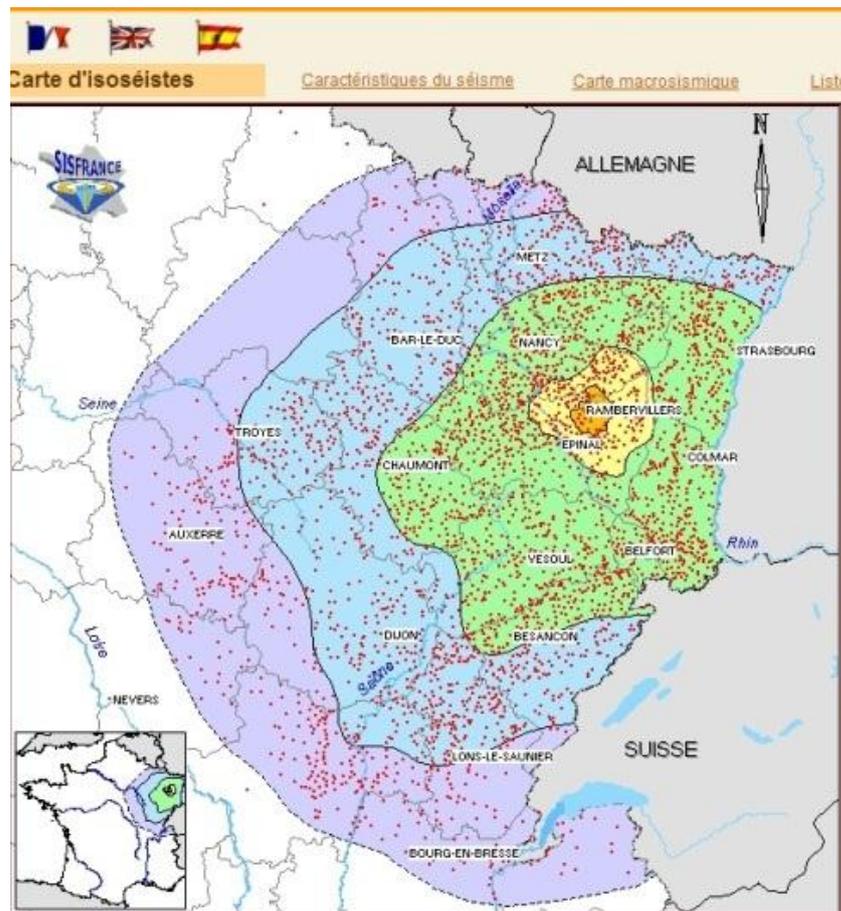


Figure 9 - Carte manuelle des isoséistes du séisme du 22 février 2003 (www.sisfrance.net).

3.2.3. Zone Alpes

- Séisme du 19 février 1822 (129 observations dans la base de données SisFrance dont 60 intensités quantifiées).

Ce séisme est le plus important d'une crise sismique en essaim qui s'est produite aux alentours de Belley, dans le Bugey (Ain). L'intensité maximale de ce choc principal est évaluée à VII-VIII. Au total, plus d'une quinzaine d'événements sont recensés entre le 18 février et le 29 mai 1822. La magnitude du choc principal est évaluée à partir des intensités macrosismiques à $M_I=5.6$ et la profondeur 15 km (Martin *et al.*, 2002). L'intensité épiscopentrale de l'événement du 19 février est estimée à VII-VIII.

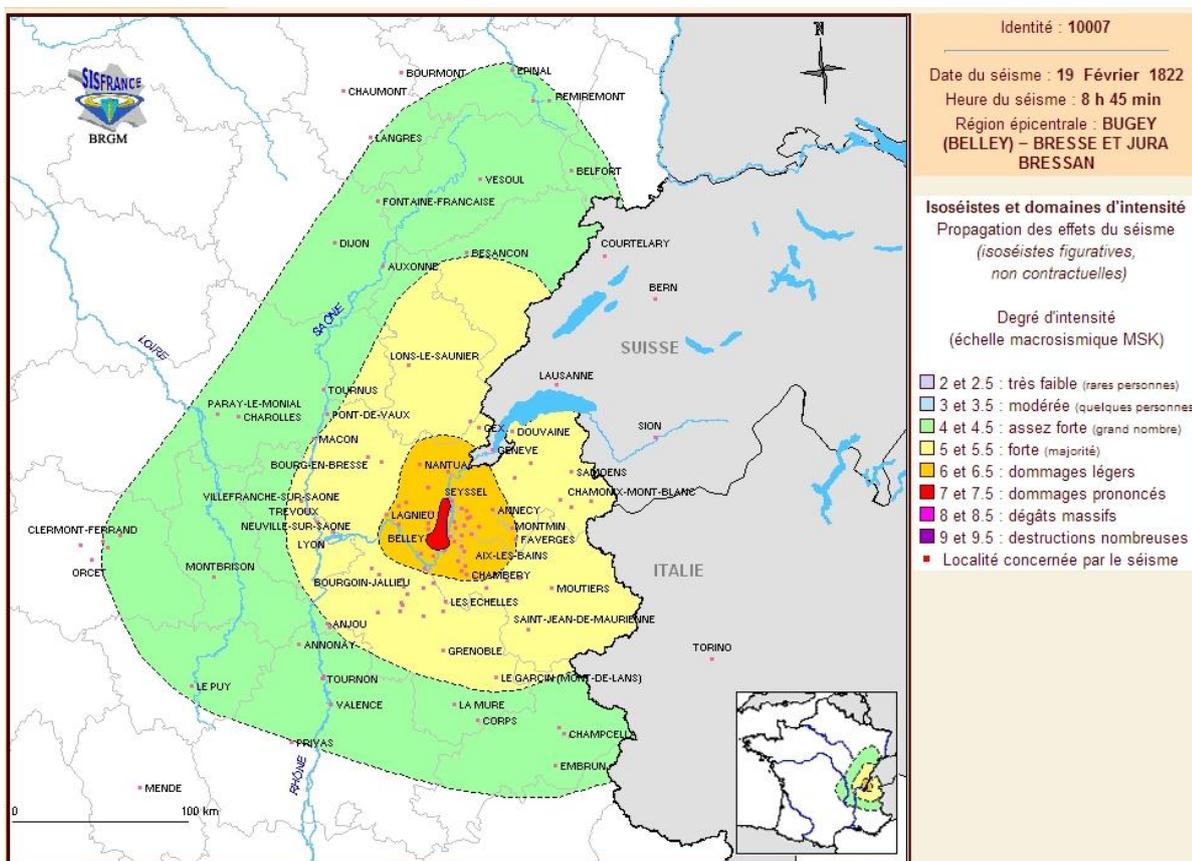


Figure 10 - Carte manuelle des isoséistes du séisme du 19 février 1822 (www.sisfrance.net).

- Séisme du 15 juillet 1996 (782 observations dans la base de données SisFrance dont 648 intensités quantifiées).

Ce séisme dit « séisme d'Epagny (ou d'Anney) » est le dernier événement récent ayant engendré des dommages importants en métropole. Il est survenu dans la nuit du 14 au 15 juillet 1996, dans l'agglomération d'Anney (Haute-Savoie). Sa magnitude locale est évaluée par le RéNaSS à $M_l=5.2$ et sa profondeur à 5 km. L'intensité épicentrale est de VII (MSK).

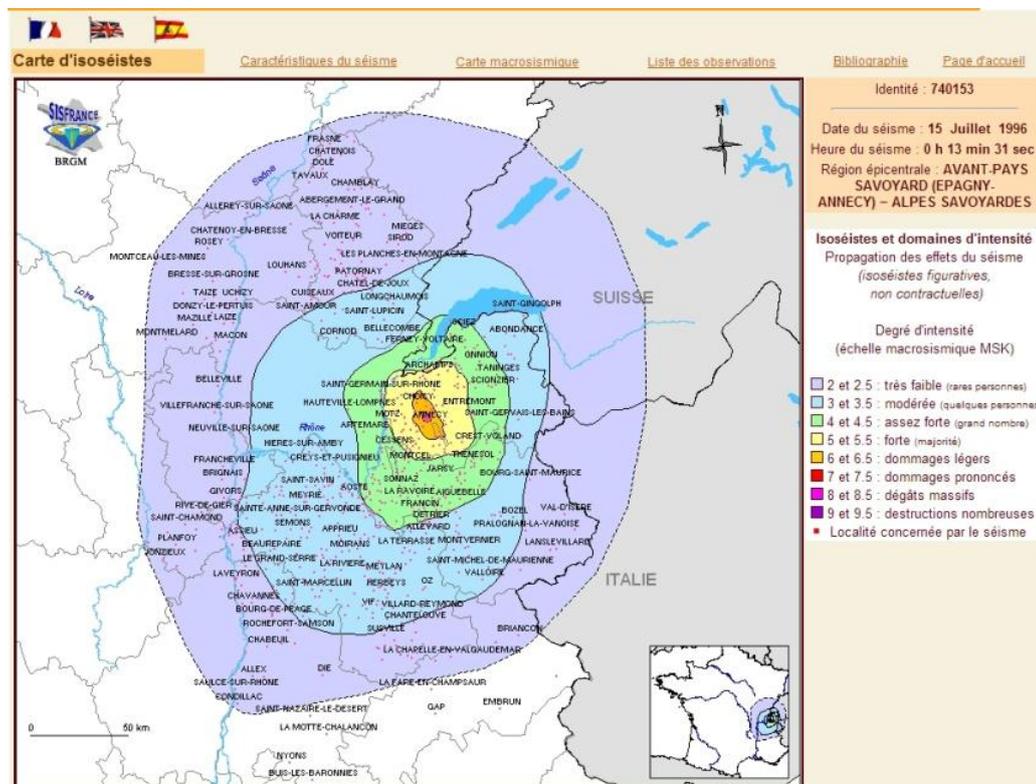


Figure 11 - Carte manuelle des isoséistes du séisme du 15 juillet 1996 (www.sisfrance.net).

3.2.4. Zone Grand-Ouest

- Séisme du 6 octobre 1711 (62 observations dans la base de données SisFrance dont 44 intensités quantifiées)

Ce séisme est survenu proche de Loudun, dans le Poitou. Sa magnitude locale est estimée à partir des intensités macrosismiques à $M_l=5.4$ et sa profondeur est évaluée à 15 km (Martin *et al.*, 2002). L'intensité épiscopale est VII-VIII.

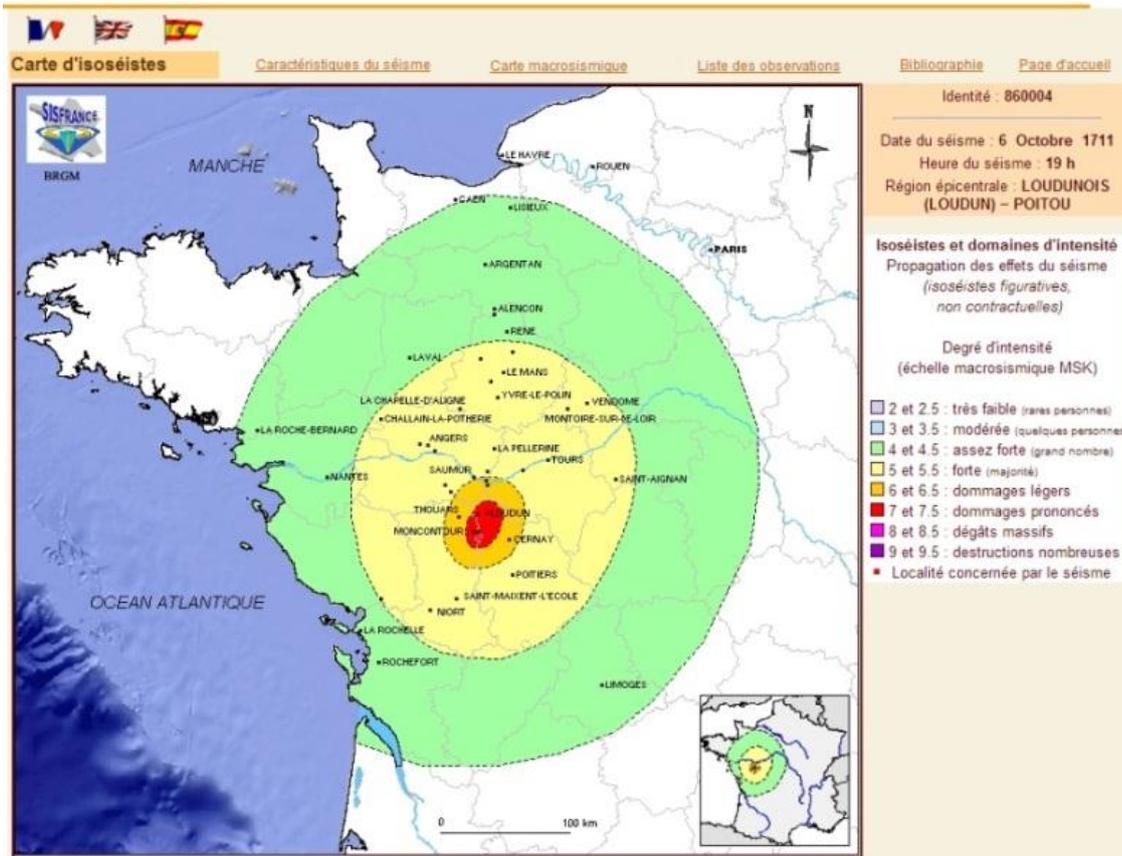


Figure 12 - Carte manuelle des isoséistes du séisme du 6 octobre 1711 (www.sisfrance.net).

- Séisme du 28 septembre 1935 (647 observations dans la base de données SisFrance dont 616 intensités quantifiées).

L'épicentre de ce séisme est localisé près de Rouillac, dans les Charentes, à une vingtaine de kilomètre au nord-ouest d'Angoulême. Sa magnitude est évaluée de $M_l=4.9$ (estimation à partir des intensités) à $M_l=5.1$ (estimation instrumentale) et sa profondeur à 5 km (Martin *et al.*, 2002). L'intensité épicentrale relevée dans SisFrance est VII.

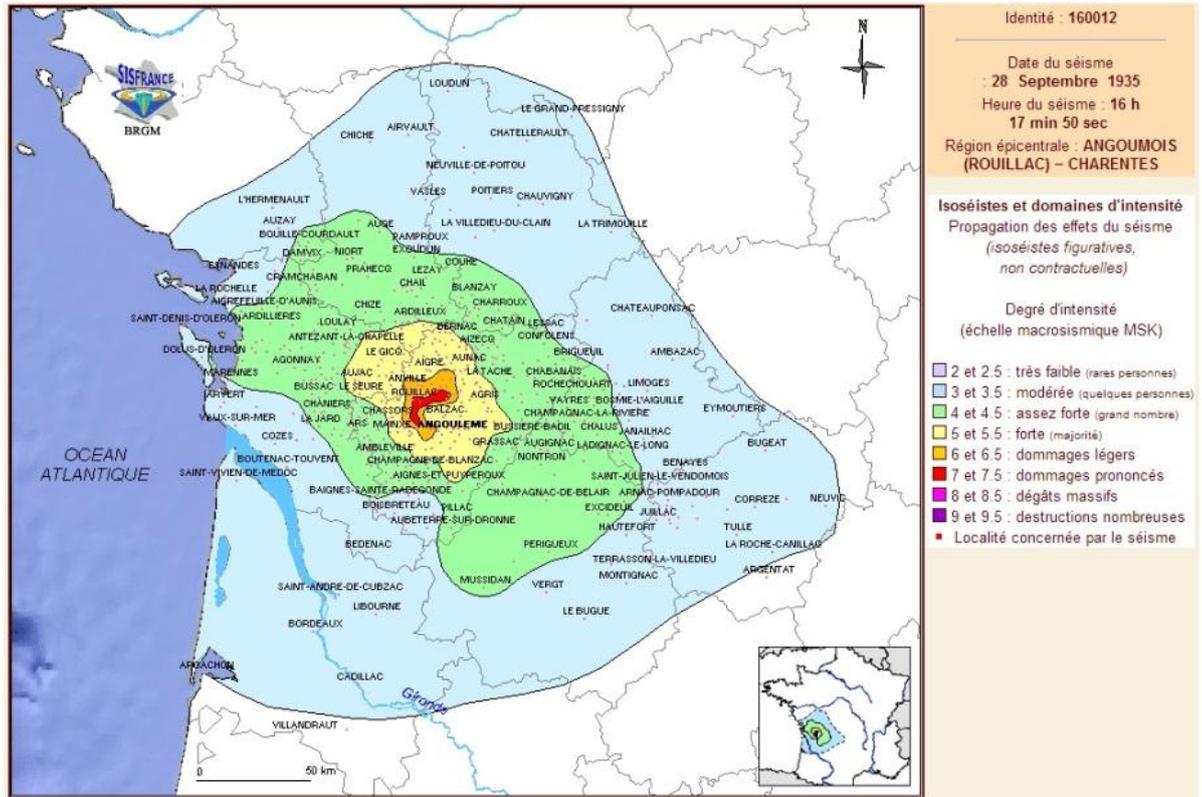


Figure 13 - Carte manuelle des isoséistes du séisme du 28 septembre 1935 (www.sisfrance.net).

3.3. INTENSITÉS UTILISÉES

Indices de fiabilité

Pour chacun des huit séismes sélectionnés la base de données SisFrance (base de développement) sous format ORACLE a été interrogée et les observations correspondantes ont été téléchargées. Parmi ces observations, la majorité des intensités sont quantifiées depuis l'intensité nulle (séisme non ressenti) à l'intensité IX (destructions nombreuses). Les autres observations correspondent à des intensités non définies. Par ailleurs un indice de fiabilité est associé à chacune de ces observations. Cet indice de fiabilité (A = très sûr, B = assez sûr, C = incertain) permet de traduire le niveau d'incertitude de l'évaluation de l'intensité.

Lorsque, par manque de détails des effets de la secousse en une localité, l'estimation du niveau de l'intensité (degré) ne peut être précisée, l'indice de fiabilité seul (A, B ou C) est indiqué et marque ainsi le fait que le séisme a été « ressenti » dans cette localité avec une certitude plus ou moins grande.

L'intensité macrosismique est évaluée à partir de l'échelle d'intensité MSK 1964 (voir Annexe 1).

Dans cette première phase de l'étude, l'ensemble des intensités définies ont été utilisées, quel que soit leur indice de fiabilité.

Utilisation des observations avec intensité indéterminées

Dans la base de données SisFrance, de nombreuses observations sont indiquées sans valeur d'intensité associée ou avec la valeur 0. Ces informations sont également importantes à prendre en compte :

- une intensité 0 indique que le séisme n'a pas été ressenti dans la localité considérée,
- une intensité non renseignée indique que le séisme a été ressenti mais que les informations disponibles ne sont pas assez nombreuses ou précises pour déterminer une valeur d'intensité.

Les valeurs d'intensité 0 ont ainsi été intégrées dans un premier temps à la base de données des observations. Ces intensités sont essentielles car situées en général loin de l'épicentre, elles permettent ainsi d'élargir la zone couverte par les isoséistes extrapolées.

Les valeurs d'intensité non renseignées peuvent correspondre à deux cas de figure :

- dans la zone proche de l'épicentre, elles indiquent que le séisme a été fortement ressenti mais que les effets observés ne sont pas quantifiables sous forme d'intensité. Ces observations ne sont ainsi pas exploitables ;
- en champ lointain, une observation dont l'intensité est non renseignée apporte une information à considérer. Le séisme a bel et bien été ressenti dans la localité considérée, même si l'intensité ressentie n'est pas quantifiable. Si on étudie l'échelle d'intensité MSK (Annexe 1), le degré III correspond à une secousse faible, ressentie de façon partielle et le degré IV à une secousse largement ressentie dans et hors des habitations. Pour des séismes anciens pour lesquels peu de données sont disponibles, si une observation est notée pour un séisme, cela signifie que la secousse a été assez largement ressentie pour le séisme considéré. Ainsi on peut supposer qu'une intensité IV au moins est probable. Pour les séismes plus récents, les sources d'informations sont plus nombreuses et même en cas de secousse faible (intensité III ou inférieure), une observation a pu être établie et recensée dans SisFrance.

Dans le rapport déjà cité « Carte de l'aléa sismique par l'approche statistico-historique » (Rey et Dewez, 2008) il avait été proposé, en accord avec le gestionnaire de la base de données SisFrance, de tenir compte de ces intensités non renseignées en utilisant les critères suivants :

- pour les séismes **avant 1800**, les intensités recensées dans SisFrance mais dont la valeur est non renseignée, sont remplacées **par des intensités IV** pour des observations situées à plus de 300 km de l'épicentre pour un séisme d'intensité épiscopale VIII (ou supérieur), 250 km si le séisme est d'intensité épiscopale VII, 200 km pour une intensité épiscopale VI, 150 km pour une intensité épiscopale V, 100 km pour une intensité épiscopale IV ou inférieure ;
- pour les séismes **après 1800**, les intensités recensées dans SisFrance, mais dont la valeur est non renseignée, sont remplacées **par des intensités III** pour des observations situées à plus de 300 km de l'épicentre pour un séisme d'intensité épiscopale VIII (ou supérieur), 250 km si le séisme est d'intensité épiscopale VII, 200 km pour une intensité épiscopale VI, 150 km pour une intensité épiscopale V, 100 km pour une intensité épiscopale IV ou inférieure ;
- pour les distances inférieures aux seuils proposés, les observations sont négligées (zones proches de l'épicentre).

Une telle procédure n'est pas appliquée à ce stade de la présente étude, car elle doit être maîtrisée pour ne pas être source d'incertitudes et d'imprécisions (voir paragraphe 4.2.3), mais pourrait être envisagée pour un prochain développement de la méthodologie (voir paragraphe 4.5.2).

4. Test du code de krigeage

4.1. PRÉSENTATION DU CODE TESTÉ

Dans un article de 2004, Ambraseys et Douglas ont généré des cartes d'isoséistes pour un certain nombre de séismes dans le nord de l'Inde. Pour établir ces cartes, ils ont développé un code de calcul automatique utilisant une technique d'interpolation par krigeage. La méthode utilisée est basée sur les principes du krigeage décrits par Olea (1999).

Dans cette méthode de krigeage, les distances à chaque point d'intensité sont systématiquement calculées et des poids relatifs à ces distances sont calculés. En effet, l'intensité décroît en fonction de la distance et un poids plus fort doit être attribué aux intensités les mieux contraintes, qui sont les plus fortes. Pour cela, une fonction de corrélation spatiale est utilisée pour évaluer les intensités à chaque point de la grille de calcul (voir paragraphe 2.4.5). Ainsi, pour chaque point de la grille de calcul proche d'un lieu où une intensité est connue la valeur d'intensité estimée par le code est conforme à cette intensité observée. En revanche, pour les points de la grille éloignés de lieux d'intensités observées l'intensité estimée est évaluée selon une moyenne pondérée des intensités observées, en fonction des distances respectives à chacune d'entre elles.

Pour une description complète de la méthode, on se reportera à l'Annexe A de l'article d'Ambraseys et Douglas (2004).

Le code de calcul développé par Ambraseys et Douglas en FORTRAN puis traduit en langage MATLAB[®] a été directement utilisé dans la présente étude. Dans un premier temps, seules des modifications à la marge (représentation des résultats) ont été apportées à ce code.

4.2. AMÉLIORATIONS ET TESTS DE SENSIBILITÉ

4.2.1. Correction des bugs

Le code a tout d'abord été testé sur un séisme particulier (le séisme d'Arudy du 29/02/1980). Les fichiers d'entrée ont été préparés. Le principal fichier d'entrée est composé d'une liste des localisations des intensités observées, avec les champs : 'Nom de la localité', 'longitude', 'latitude', 'intensité observée'. Une extraction de la base de données ORACLE SisFrance a été réalisée par l'intermédiaire d'une routine en langage SQL puis transformée dans le format du fichier d'entrée (longueur des champs, élimination des espaces dans les noms des lieux, ...).

Les résultats étant incohérents, un bug a été détecté et corrigé : quand deux localités proches avaient la même localisation mais des intensités observées différentes le code ne savait pas gérer cette situation et la solution trouvée divergeait d'une solution réelle.

Ce cas est rare mais possible : les coordonnées des localités étant indiquées dans SisFrance avec deux décimales, la précision est de l'ordre de 0.01° soit environ 1 km. Quand deux localités sont très proches elles peuvent donc être référencées avec exactement les mêmes coordonnées et le code calcule une distance nulle entre elles. Souvent dans ce cas les intensités observées sont équivalentes mais ce n'est pas toujours le cas (effets de site très localisés par exemple). Dans ce cas d'une distance nulle et de deux intensités différentes le code diverge car il se trouve face à une incohérence : deux intensités différentes doivent être respectées pour le même point. Ce bug a ainsi été corrigé, en indiquant que si la distance calculée entre deux localités était nulle, une distance de 500 mètres était indiquée par défaut, et ainsi deux intensités différentes sont proches mais pas exactement au même endroit, ce qui permet d'éviter les divergences du programme.

4.2.2. Mode de représentation des résultats

Les résultats sont présentés grâce à des routines Matlab[®] permettant de générer des cartes dans un système de projection pré-déterminé. Cependant ces présentations sont parfois peu satisfaisantes quand les isoséistes sont resserrées en zone épacentrale. De plus, il est difficile de comparer les résultats avec les isoséistes manuelles qui sont représentées dans un système d'information géographique (SIG).

Ainsi une amélioration du mode de représentation des résultats a été réalisée. Cela consiste à récupérer en sortie du code un fichier texte avec une grille de points sur la zone d'emprise (longitude, latitude, intensité interpolée). Cette grille est ensuite transformée en carte (raster) dans un SIG (MAPINFO[®]). Une analyse thématique est réalisée de façon à représenter les résultats selon un code couleur, de façon continue. Un exemple de carte générée par le code et traitée est présenté sur la Figure 22.

Il est ensuite possible de superposer directement les isoséistes manuelles, qui sont également représentées avec le même SIG (voir paragraphe 2.2).

Comme ce traitement manuel est fastidieux, il n'a été réalisé que pour les cartes définitives. Les résultats obtenus lors des tests de sensibilité réalisés (voir paragraphe 4.2.3) ont été représentés directement à partir des cartes générées par le code MATLAB[®].

4.2.3. Tests de sensibilité

Tests sur le pas d'interpolation

Le principal test de sensibilité a porté sur le pas d'interpolation. En effet, en entrée du programme, l'utilisateur précise l'emprise du calcul de l'interpolation (longitudes et latitudes minimales et maximales) ainsi que la taille de la cellule de la grille générée. Ce pas est indiqué sous forme de degrés.

Plus le pas est petit et plus les résultats sont précis car la grille est alors représentée par un grand nombre de points (petites cellules). Cependant, dans ce cas, les temps

de calcul et les volumes de données générés sont également très importants. Plusieurs essais ont été réalisés afin d'estimer le meilleur compromis entre une bonne précision des résultats et des temps de calcul/volumes de données acceptables.

Deux tests ont été réalisés, portant sur un séisme ancien avec peu de données (le séisme de Bigorre du 21/06/1660, 59 intensités observées) et un séisme récent avec un nombre important de données (séisme d'Epagny-Annecy du 15/07/1996, 648 intensités observées). Les résultats sont respectivement présentés sur la Figure 14 et la Figure 15 pour les pas d'interpolation suivants : 0.5°, 0.2°, 0.1°, 0.05°, 0.02° et 0.01°.

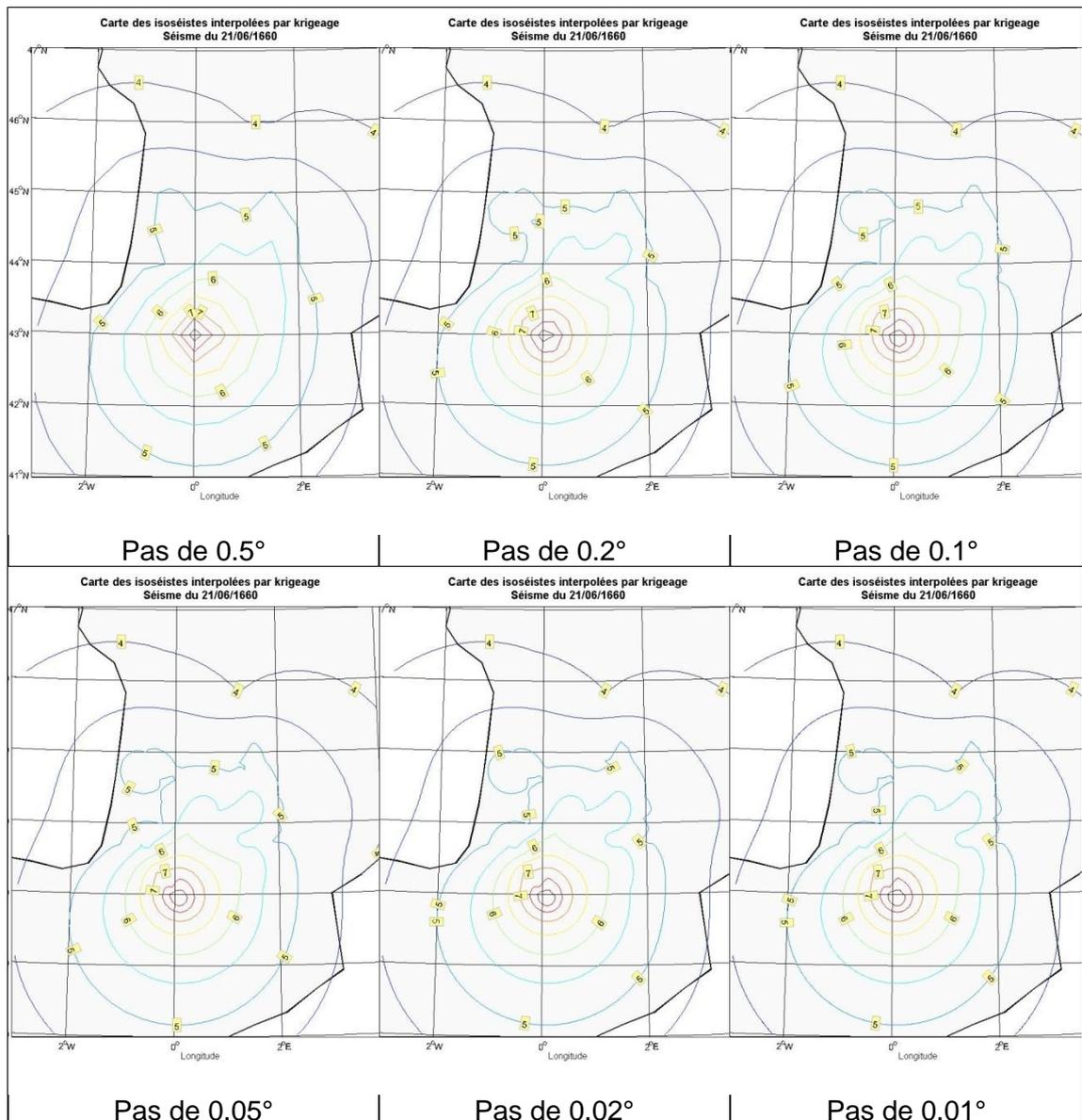


Figure 14 - Test de sensibilité portant sur le choix du pas d'échantillonnage (taille des cellules de la grille de restitution des résultats). Exemples de cartes générées avec six pas variant de 0.01° à 0.5° pour le séisme du 21/06/1660.

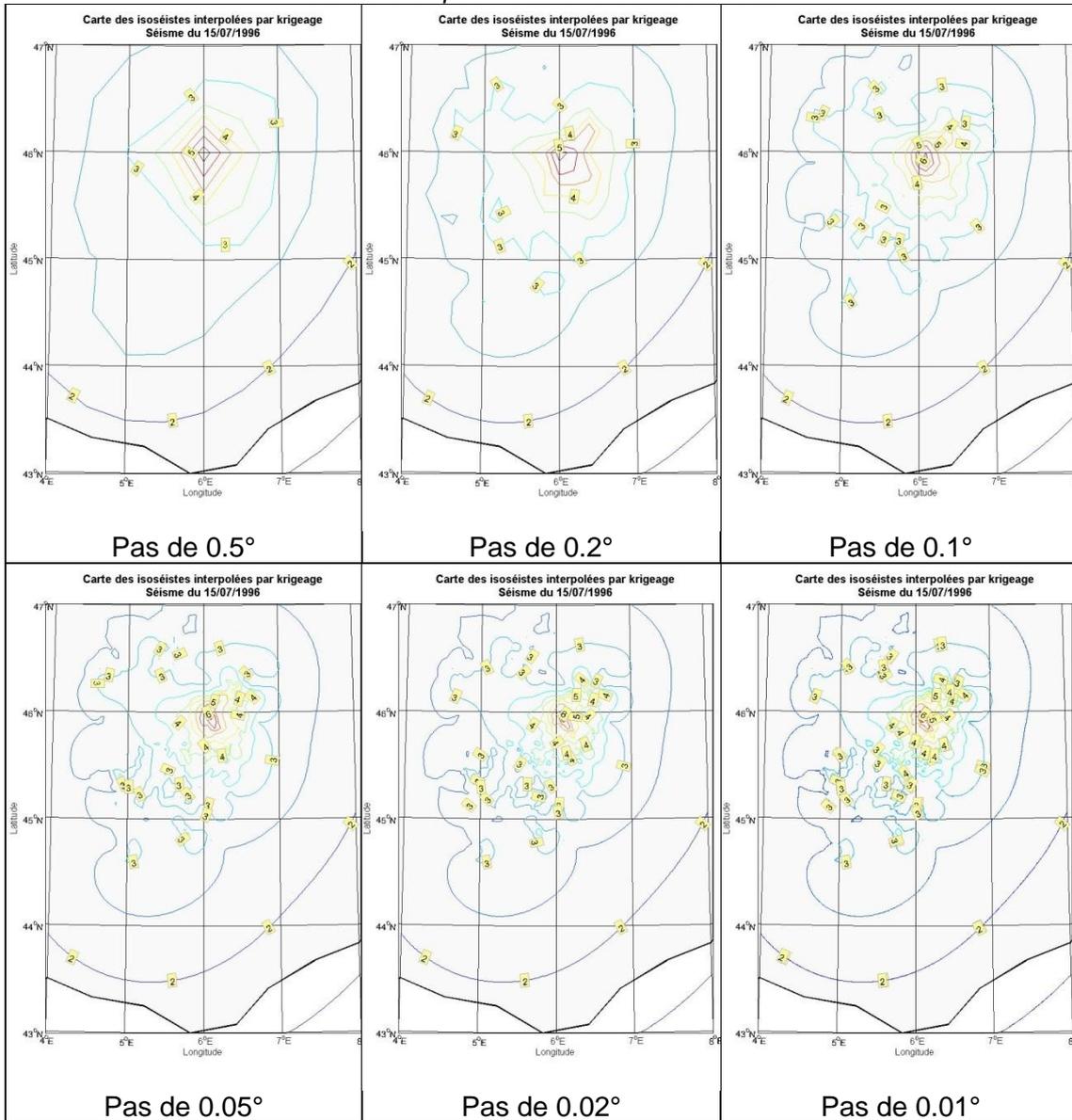


Figure 15 - Test de sensibilité portant sur le choix du pas d'échantillonnage (taille des cellules de la grille de restitution des résultats). Exemples de cartes générées avec six pas variant de 0.01° à 0.5° pour le séisme du 15/07/1996.

On note que les isoséistes sont très mal définies pour des pas trop larges (0.5°). Pour les pas très fins (0.01°, 0.02°) les cartes obtenues présentent des différences infimes avec les cartes réalisées avec des pas plus importants. On converge ainsi vers une solution stable à partir des pas 0.1° ou 0.05°. Ainsi pour le séisme de 1660, le meilleur compromis semble être pour un pas compris entre 0.1 et 0.05° alors que pour le

séisme de 1996, avec plus de points d'observation et un besoin de finesse plus important, le meilleur compris est clairement le pas 0.05°. Ainsi le critère de sélection du pas d'interpolation semble être fonction du nombre de points d'observation traités. Une étude plus fine serait nécessaire pour préciser ceci et pour la suite de l'étude un pas de référence de 0.1° ou 0.05° a été utilisé.

Une limite importante a cependant été identifiée lors de ces tests : lorsque la zone épacentrale d'intensité la plus forte est peu étendue elle peut ne pas être « vue » par le programme si le pas d'échantillonnage est plus grand que la zone en question. Par exemple dans le cas du séisme d'Annecy de 1996, trois observations sont notées pour une intensité VII. Les trois communes sont situées à moins de 5 km l'une de l'autre. Ainsi lorsqu'un pas de 0.05° est utilisé la taille de la cellule d'échantillonnage est justement de l'ordre de 5 km. Selon le positionnement de la grille, si un nœud se situe dans cette zone de forte intensité, l'intensité interpolée est du même ordre de grandeur (ici VII). Dans le cas contraire, si aucun nœud n'est situé dans cette zone, l'intensité interpolée attribuée à cette cellule est « diluée » à cause des intensités plus faibles alentour. Dans ce cas une intensité maximale plus faible (ici VI-VII) est estimée par le programme. Quand on recense les intensités par communes cela s'avère être une limite importante car de fortes intensités peuvent être sous-estimées du fait de cet artefact. Ceci devra donc être pris en compte dans les améliorations du programme (voir paragraphe 4.5.2).

Des tests concernant les temps de calcul en fonction de la taille de la fenêtre de représentation ont également été réalisés. Les temps de calcul varient énormément (moins d'une seconde à quelques heures) ainsi que les tailles des fichiers générés (de quelques Ko à plusieurs Mo) selon le pas d'interpolation et le nombre d'observations traitées. Ceci est logique étant donné que les distances entre chaque point d'observation et chaque point de la grille de calcul sont systématiquement calculés par le code. Ainsi les résultats indicatifs pour les deux séismes étudiés montrent que les temps de calcul et les tailles des fichiers sont fonction du pas d'interpolation au carré : quand on diminue le pas d'un facteur deux (en longitude et en latitude), la taille de la grille est alors multipliée par quatre, ainsi que le temps de calcul et la taille des fichiers générés.

Par exemple pour le séisme du 21/06/1660 (59 points), les temps de calcul estimés sont présentés dans le Tableau 1.

Pour le séisme du 15/07/1996 (648 points) le temps de calcul est ainsi de 180 secondes (pas de 0.05°) au lieu de 15 secondes pour le séisme du 21/06/1660 (59 points, soit 10 fois moins que le séisme du 15/07/1996).

Les tailles des fichiers augmentent également de façon similaire selon le pas d'interpolation. Un exemple est donné dans le Tableau 1 ci-dessous pour le séisme du 15/07/1996.

Pas d'interpolation	0,01°	0,02°	0,05°	0,1°	0,2°	0,5°
Séisme du 15/07/1996 (648 points)	5 340 Ko 3 420 s	1 342 Ko 857 s	218 Ko 180 s	56 Ko 40 s	15 Ko 16 s	3 Ko 7 s
Séisme du 21/06/1660 (59 points)	13 989 Ko 630 s	3 508 Ko 105 s	567 Ko 15 s	144 Ko 5 s	38 Ko 1 s	7 Ko <1 s

Tableau 1 - Temps de calcul (en secondes) et volume des fichiers générés (en Ko) pour deux séismes et pour six pas d'interpolation croissants.

Si l'ensemble des séismes de la base de données SISFRANCE sont traités ces aspects devront être pris en compte pour trouver le meilleur compromis entre précision des résultats et temps/volume de calcul. Une solution alternative consiste à définir une grille de calcul avec un pas variable selon que l'on se situe proche ou loin de l'épicentre. Ainsi il est envisageable de créer une grille de calcul avec un pas très fin en zone épacentrale et un peu moins important à grandes distances. Ceci permettrait de concilier les besoins de précision dans les zones où il y a beaucoup de données (zone épacentrale) avec des temps de calcul acceptables. Une amélioration du code de calcul est proposée en ce sens en fin de rapport (paragraphe 4.5.2).

Tests sur la profondeur du foyer

Dans le fichier d'entrée du code de calcul la profondeur du foyer doit être indiquée. Ceci permet au code de calculer les distances au foyer (distances focales). En théorie l'atténuation de l'intensité est en effet liée à l'atténuation du mouvement sismique (accélération, vitesse, déplacement) qui est lui-même fonction de la distance à la zone de rupture, donc pour des séismes modérés à la distance focale.

Un test de l'influence de ce paramètre a été effectué sur le séisme d'Annecy/Epagny du 15/07/1996. Trois calculs ont été réalisés avec le même fichier d'entrée mais avec une profondeur respectivement de 1 km, de 7 km puis de 25 km.

Les résultats sont présentés sur la Figure 16 ci-dessous. On ne note aucune différence en zone épacentrale. En effet dans cette zone où il y a des données disponibles le code respecte les observations et calcule directement les intensités en calculant les distances entre les points d'observation et la distance à l'épicentre ou au foyer a peu d'influence.

En champ lointain, en revanche, peu de données sont disponibles. Dans cet exemple, aucune intensité inférieure à II-III n'est ainsi disponible. Le code fait alors des hypothèses sur l'atténuation des mouvements sismiques et ainsi les isoséistes I, I-II et II sont estimées de façon purement forfaitaire. Pour cela, le code calcule la distance

focale et estime en conséquence la décroissance des intensités attendue. On remarque ainsi que les courbes d'isoséistes sont d'autant plus resserrées lorsque la profondeur est importante. Cependant, empiriquement le phénomène contraire est en général relevé : lorsque le foyer est profond les isoséistes observées sont en général plus écartées que lorsque le foyer est superficiel. Ceci permet d'ailleurs d'estimer la profondeur des séismes historiques en mesurant l'écartement relatif des isoséistes. La relation de Sponheuer (1960) a ainsi été généralement utilisée pour estimer les profondeurs des foyers des principaux séismes historiques recensés dans SisFrance.

Pour la suite de l'étude, une estimation plus réaliste de la distance focale devra être envisagée, en introduisant par exemple un calcul selon la relation de Sponheuer (1960). Cependant il faut garder en mémoire que ceci n'affecte que les zones à grandes distances pour lesquelles pas ou peu de données sont disponibles. En général les intensités associées sont faibles (inférieures à III-IV) et l'influence en termes d'interprétation des résultats obtenus est donc marginale. De plus les profondeurs des foyers de la quasi-totalité des séismes de la base de données SisFrance sont inconnues et lors du traitement éventuel de ces séismes des profondeurs forfaitaires (typiquement 7 ou 10 km par exemple pour la métropole) devront être indiquées, faute de données disponibles.

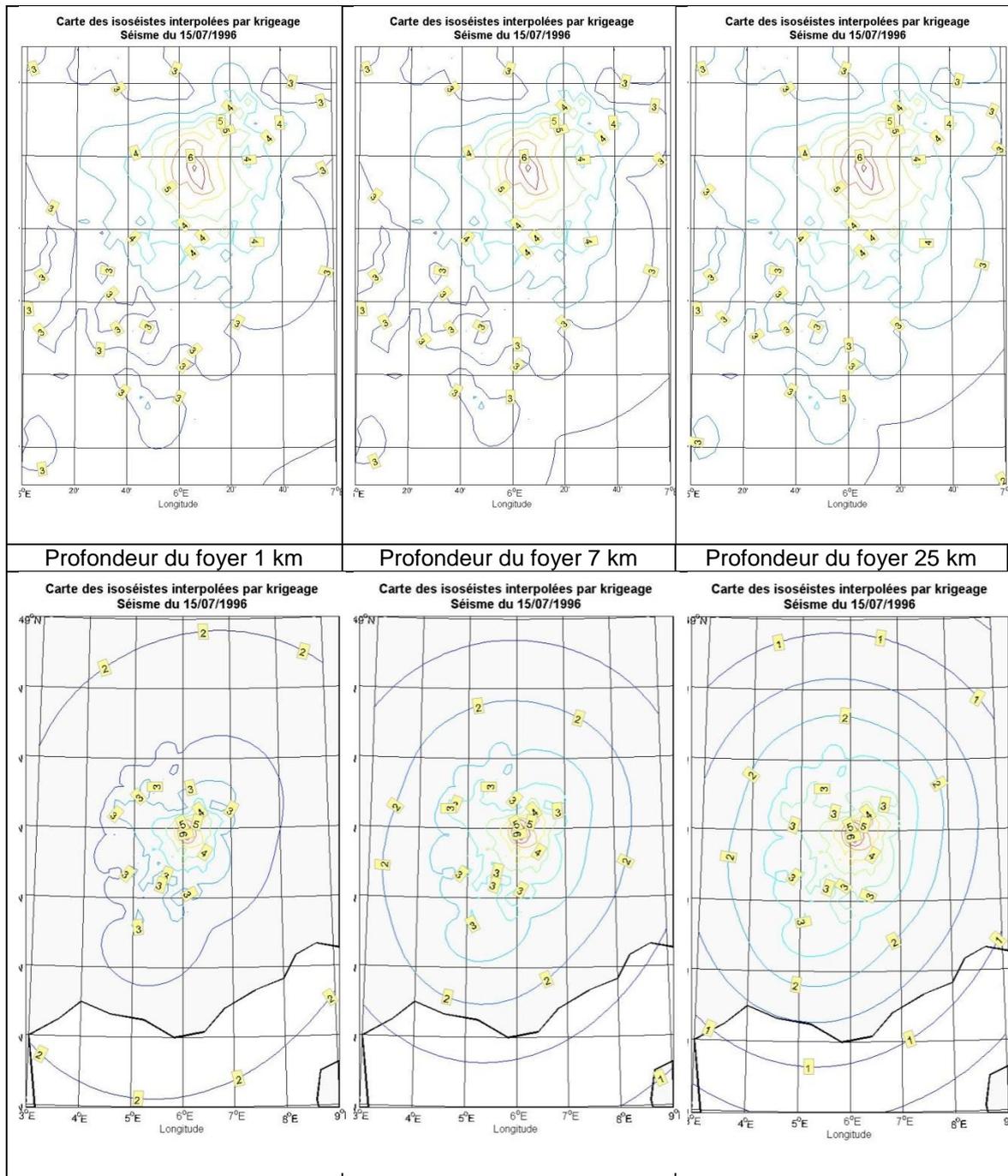


Figure 16 - Tests de sensibilité du paramètre « profondeur » pour le séisme d'Epagny du 15/07/1996. Les isoséistes obtenues pour des profondeurs de 1 km, 7 km et 25 km sont présentées en zone épiscopentrale (en haut) et à grandes distances (en bas).

Test sur le paramètre 'a' du code

Un paramètre du code de calcul, représenté par une variable 'a', contrôle directement l'influence respective des points d'observation. En effet dans le code de calcul un coefficient 'c' est calculé tel que :

$c(i,j)=c_0+c_1*\exp(-3*h/a)$ avec $c_0=c_1=1$, h :distance entre les points i et j et 'a' est un paramètre à préciser dont la valeur par défaut est prise telle que $a=1000$.

Ainsi, plus le coefficient 'a' est important et plus le coefficient 'c' est proche de la valeur maximale de 2. Plus le coefficient 'a' est faible et plus le coefficient 'c' est proche de la valeur minimale de 1. De même, plus la distance est importante et plus le coefficient 'c' est proche de la valeur minimale de 1 et plus la distance est faible plus le coefficient 'c' est proche de la valeur maximale de 2. Ainsi le coefficient 'a' représente en quelque sorte un coefficient de normalisation de la distance par rapport à une distance de référence. L'intensité interpolée étant directement fonction de la distance entre les points, via l'utilisation de ce coefficient 'c', elle est ainsi directement influencée par la définition de ce paramètre 'a'.

Un test a été réalisé sur le séisme d'Epagny du 15/07/1996 afin d'évaluer l'influence de ce paramètre 'a'. Les résultats pour 4 valeurs de 'a' sont présentés sur la Figure 17 ci-dessous. On note que plus le paramètre 'a' est faible et plus les isoséistes semblent « lissées ». Dans ce cas les rayons d'influence des différents points d'observation sont peu importants et l'estimation des isoséistes est proche de ce qui serait obtenu en l'absence de données. En revanche quand le paramètre 'a' est important toutes les observations sont respectées. A partir d'une certaine valeur de 'a' les résultats sont inchangés. Dans ce cas les mêmes résultats sont obtenus avec la valeur de 'a' par défaut ($a=1000$) que pour des valeurs de 'a' très importantes ($a=100\ 000$). Quand on teste des valeurs de 'a' croissantes, les isoséistes se rapprochent de plus en plus des isoséistes de référence. Les résultats se stabilisent pour des valeurs de 'a' comprises entre 100 et 1000, soit la distance moyenne entre deux points de la grille prise au hasard.

Dans la méthodologie déclinée dans la présente étude le lissage éventuel des courbes d'isoséiste peut être réalisé après le calcul en lui-même (voir paragraphe 4.2.2). Ainsi il ne semble pas utile de lisser les résultats lors de cette étape et d'utiliser des valeurs de 'a' inférieures à 1000. Ainsi cette valeur par défaut peut être conservée pour la suite de l'étude. En revanche ce paramètre 'a' pourrait être utile pour définir l'importance relative des observations. Dans une évolution du code de calcul, on peut envisager de considérer un paramètre 'a' qui dépendrait de la qualité de l'observation considérée : si la qualité est mauvaise le rayon d'influence serait réduit et l'influence de l'observation sera donc amoindrie, et si la qualité est bonne le rayon d'influence serait porté au maximum, afin de maximiser son influence relative sur le résultat final. Ceci devra faire l'objet d'une attention particulière dans le cadre de la seconde phase de la présente étude.

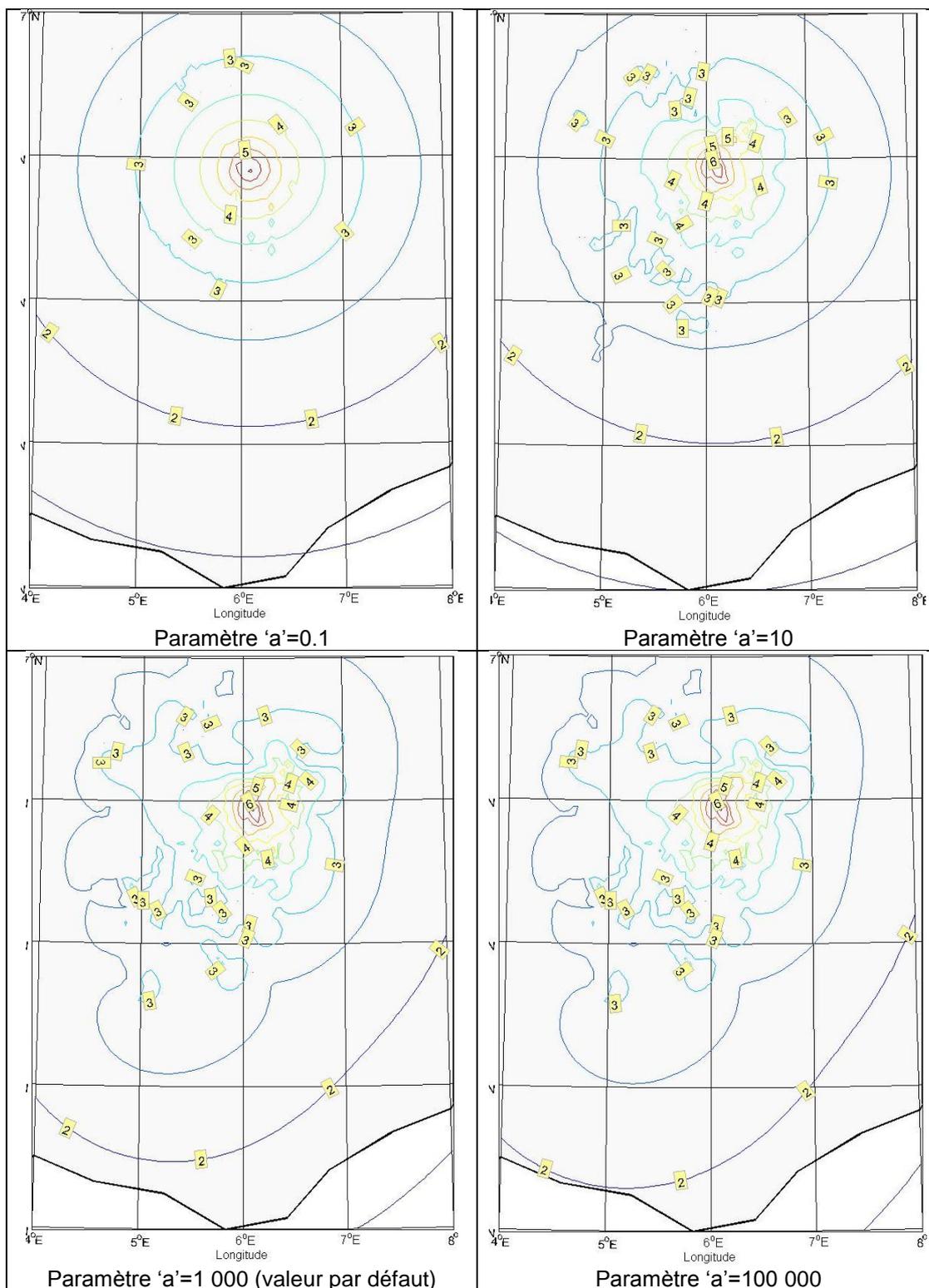


Figure 17 - Tests de sensibilité du paramètre 'a' pour le séisme d'Epagny du 15/07/1996. Les isoséistes obtenues pour des valeurs de 'a' de 0.1 ; 10 ; 1 000 et 100 000 sont présentées.

Influence des valeurs d'intensités intégrées dans le calcul

Les cartes d'intensités réalisées par le code dépendent fortement des observations d'intensités indiquées en entrée. En effet, comme les observations sont strictement respectées chaque intensité observée peut amener à déformer localement la courbe des isoséistes.

Un test a ainsi été réalisé pour illustrer cette sensibilité en champ proche. Dans le fichier des intensités observées pour le séisme de Bigorre du 21/06/1660, pour deux localités une intensité indéterminée est renseignée dans la base de données SisFrance. Si on indique une valeur aberrante pour ces deux localités, par exemple une intensité IV pour ces deux points situés en champ proche où des intensités de l'ordre de VI ou VII sont attendues, on obtient les modifications présentées sur la Figure 18 ci-dessous (pas de 0.1°) :

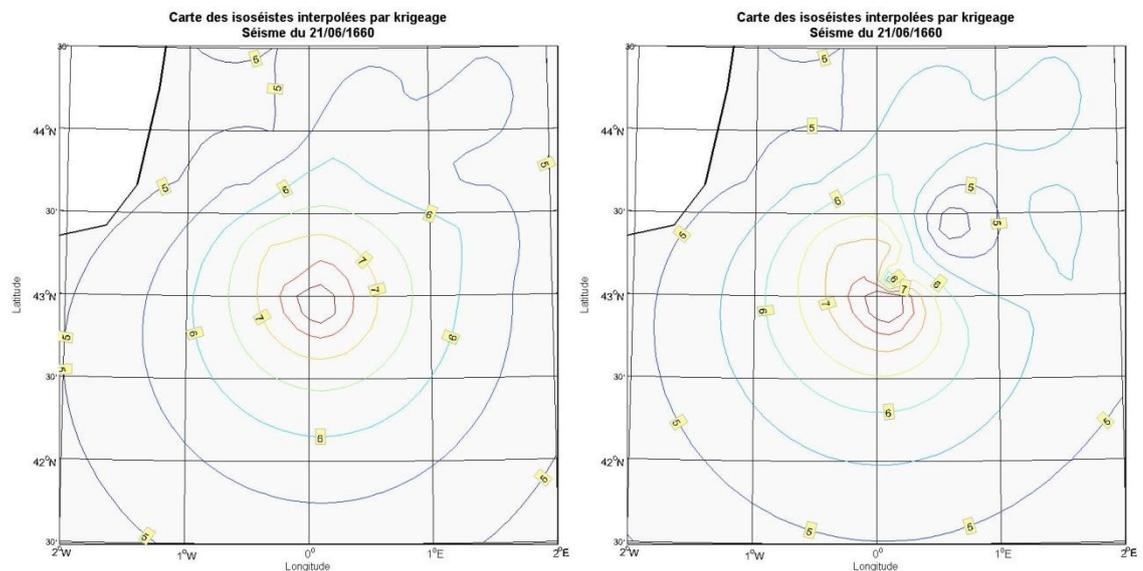


Figure 18 - Test de sensibilité : ajout de deux intensités IV pour des localités avec intensités non renseignées dans SisFrance pour le séisme du 21/06/1660, avec un pas de calcul de 0.01°. A gauche la carte des isoséistes de référence (59 points) et à droite la carte modifiée (61 points).

On observe clairement sur la Figure 18 que l'ajout de ces seuls deux points (pour 59 points initialement) modifie de façon notable les courbes d'isoséistes en champ proche. Les deux intensités étant respectées les courbes sont déformées en ce sens et des zones d'intensités IV à VI sont créées au milieu de zones d'intensités VI ou VII.

Ainsi le calcul des courbes d'isoséistes est très sensible à ces intensités aberrantes. Il convient donc d'être très prudent si on veut renseigner ces intensités ou prendre en compte des intensités avec des indices de fiabilité faibles. Cet exemple montre qu'il vaut mieux ignorer complètement une intensité avec un indice de fiabilité mauvais plutôt que de la prendre en considération car le risque que cette observation modifie de

façon notable les résultats est important, alors même qu'il est à ce stade impossible de prendre en compte l'incertitude associée à l'estimation de cette intensité.

Un second test a été réalisé pour le séisme du 29/02/1980 dans la même zone. Les intensités nulles (séisme non ressenti), qui ne sont pas considérées dans le cas de référence, ont ensuite été ajoutées. Dans ce cas 271 intensités nulles sont ajoutées aux 1020 points d'observation utilisés pour le calcul de référence. Les deux cartes sont comparées sur la Figure 19 ci-dessous. La carte de droite obtenue est beaucoup moins lisible que la carte de référence de gauche : le code respecte toutes les intensités nulles et s'oblige alors à faire des circonvolutions dans les zones où une intensité de l'ordre de III ou IV est attendue.

On peut ainsi considérer que ces observations présentes dans SisFrance apportent une information importante principalement à grandes distances, pour estimer l'aire globale de ressenti de l'événement et ainsi caler les isoséistes faibles (I et II). En champ proche elles sont sujettes à caution (ce n'est pas parce que le séisme n'a pas été ressenti par les observateurs locaux qu'il faut automatiquement en déduire qu'une intensité faible ne peut pas être envisagée, sans compter les observations potentiellement non relevées dans ces lieux). Une réflexion devra ainsi être menée concernant l'utilisation de ces données.

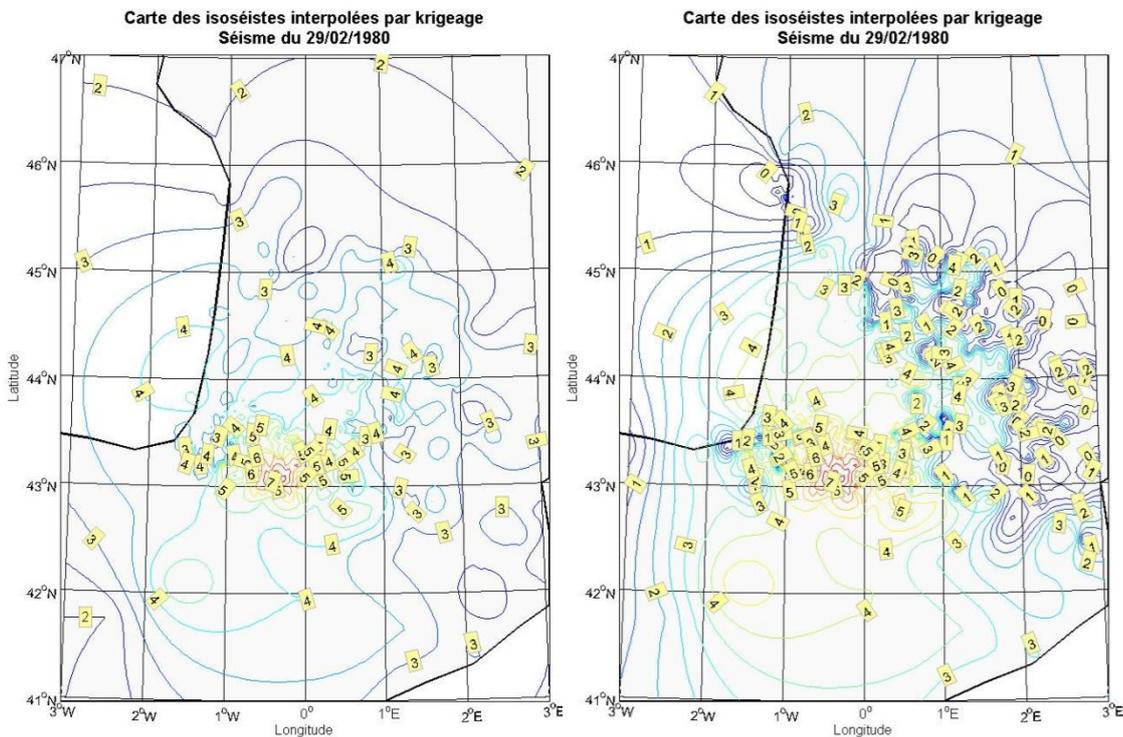


Figure 19 - Test de sensibilité : ajout des points d'intensité nulle (séisme non ressenti) pour le séisme du 29/02/1980, avec un pas de 0.05°.

Un dernier test a enfin été réalisé afin d'évaluer la plus-value que pourrait apporter la quantification d'intensités indéterminées en champ lointain. Pour de nombreux séismes anciens il est en effet indiqué dans SisFrance que l'événement a été ressenti à grande distance de l'épicentre sans plus de précision. Cependant ce type d'information à grande distance, même en nombre restreint, peut apporter une information capitale pour l'estimation des isoséistes à grandes distances. Pour cela il convient tout d'abord de vérifier que les observations en question aient un indice de fiabilité élevé. Il est ensuite possible, même s'il s'agit d'un exercice difficile, d'essayer de quantifier ces observations selon la distance à la source et la date du séisme comme cela est rappelé au paragraphe 3.3.

Un test a été réalisé sur le séisme de Bigorre du 21/06/1660. Dans SisFrance, il est indiqué que ce séisme a été ressenti à Poitiers et à Barcelone, sans précision sur l'intensité. Etant donné la distance de ces villes à l'épicentre et la date ancienne du séisme il est possible de supposer que le séisme a dû être ressenti par une majorité de personnes pour que cela soit mentionné dans les sources locales. On peut donc faire l'hypothèse d'une intensité de l'ordre de III à IV pour ces deux villes. Une intensité III-IV a été proposée afin de vérifier l'influence de cette hypothèse sur les résultats. Les résultats sont présentés sur la Figure 20 ci-dessous.

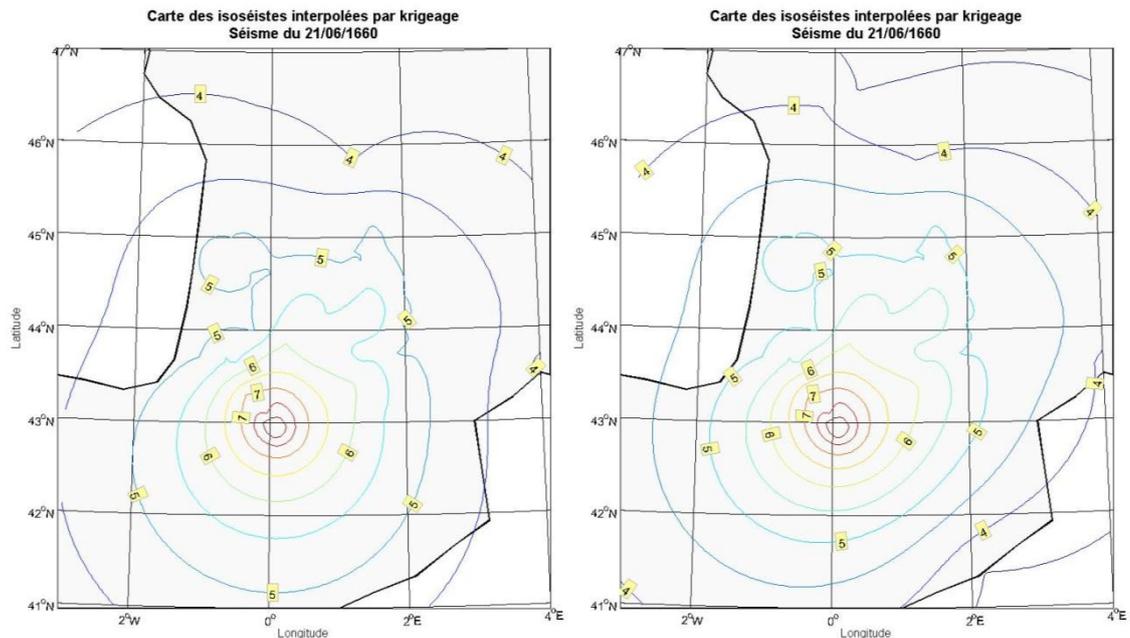


Figure 20 - Test de sensibilité portant sur la quantification de deux intensités à grande distance (Poitiers et Barcelone) pour le séisme de Bigorre du 21/06/1660. A gauche, carte des isoséistes de référence (intensité indéterminée et donc non utilisée pour ces deux villes) et à droite, carte des isoséistes en considérant une intensité de III-IV pour ces deux lieux (pas 0.01°).

On observe alors un léger recentrage des intensités IV et IV-V vers l'épicentre, ce qui est plus conforme aux isoséistes estimées manuellement (voir Figure 6). Ainsi cette information apporte un meilleur calage des isoséistes pour des intensités modérées (II

à V) à grandes distances de l'épicentre. Cependant, comme il a déjà été évoqué, une mauvaise estimation des intensités, même pour un nombre très réduit de points, peut induire des modifications notables dans le tracé des isoséistes. Ainsi même s'il convient d'être très prudent concernant l'ajout d'intensités, l'estimation des intensités pour quelques points d'observation très fiables à grandes distances pourrait permettre d'améliorer la pertinence des cartes produites.

Influence de la perte d'information avec le temps

Un test a également été réalisé pour évaluer l'influence du retrait de points d'observation. Cette opération permet de comparer les cartes d'isoséistes obtenues pour des séismes récents, pour lesquels de nombreuses observations sont disponibles, avec des cartes qui seraient obtenues s'il s'agissait de séismes historiques mal connus. Elle vise ainsi, en retour, à évaluer la robustesse pour des séismes anciens peu documentés de la démarche adoptée. Un exemple est présenté pour le séisme d'Annecy/Epagny du 15/07/1996. À l'origine 648 points d'observation sont disponibles et une carte de référence est produite.

De nombreuses observations de faibles intensités sont ensuite enlevées de façon aléatoire. Les observations en champ très proche sont intégralement conservées car dans le cas des séismes historiques on possède souvent des informations relativement détaillées pour les fortes intensités (bien que provenant en général de sources en nombre limité) correspondant à des dégâts visibles et quantifiables. Des observations dans la zone intermédiaire sont également supprimées afin d'y conserver les observations correspondant aux villes principales, où l'on peut supposer qu'il est plus facile d'obtenir des informations plusieurs siècles après l'événement. Ainsi un premier test avec un nombre restreint de 124 points est réalisé. Cette situation correspond à des séismes partiellement connus du milieu ou de la fin du XIX^{ème} siècle par exemple.

Dans un second temps, toutes les intensités inférieures à IV, dont on peut supposer qu'on ne conserverait pas de trace (ou alors sous forme d'intensités ressenties non quantifiables), sont supprimées. De même, d'autres intensités sont supprimées selon la procédure décrite ci-dessus. Un second test est réalisé avec 54 points. Ceci correspondant classiquement aux observations relatives à un séisme du XVII^{ème} ou XVIII^{ème} siècle (par exemple séismes de 1660 ou 1682 dans la présente étude).

On observe sur la Figure 21 ci-dessous que les isoséistes en zone épacentrale sont peu modifiées. En revanche à moyenne et grande distance le tracé se rapproche d'isoséistes elliptiques générées de façon forfaitaire par le code de calcul. La carte calculée avec le nombre minimal de points est très similaire à une carte d'isoséistes générée automatiquement ou manuellement pour un séisme ancien. On note que les isoséistes sont très différentes de la version de référence. Ceci amène à considérer avec prudence les tracés des isoséistes pour les séismes anciens, puisque ce test révèle des incertitudes significatives pour des séismes anciens mal renseignés.

Ce test a été poussé au maximum en diminuant progressivement le nombre d'observations fournies en entrée. Les résultats de ce test ont montré que le programme génère des isoséistes réalistes pourvu qu'au moins deux observations

soient disponibles et que ces observations soient d'intensités différentes. De plus les résultats sont meilleurs si les deux observations sont éloignées l'une de l'autre. Si une seule observation est disponible le calcul n'est pas réalisé. Si deux observations sont disponibles et qu'elles font référence à la même intensité, les calculs divergent et le programme présente des résultats aberrants. Ce résultat est important car pour de nombreux séismes très mal renseignés seulement quelques observations sont disponibles. Ce test montre que si au moins deux observations d'intensités différentes sont connues, un calcul automatique des isoséistes est envisageable. La fiabilité des résultats reste cependant dépendante du nombre de points considérés. Ceci devra être pris en compte lors de la diffusion de l'information au public, en proposant par exemple un code de fiabilité selon le nombre de points utilisés ou un message d'avertissement quant à la fiabilité des résultats présentés.

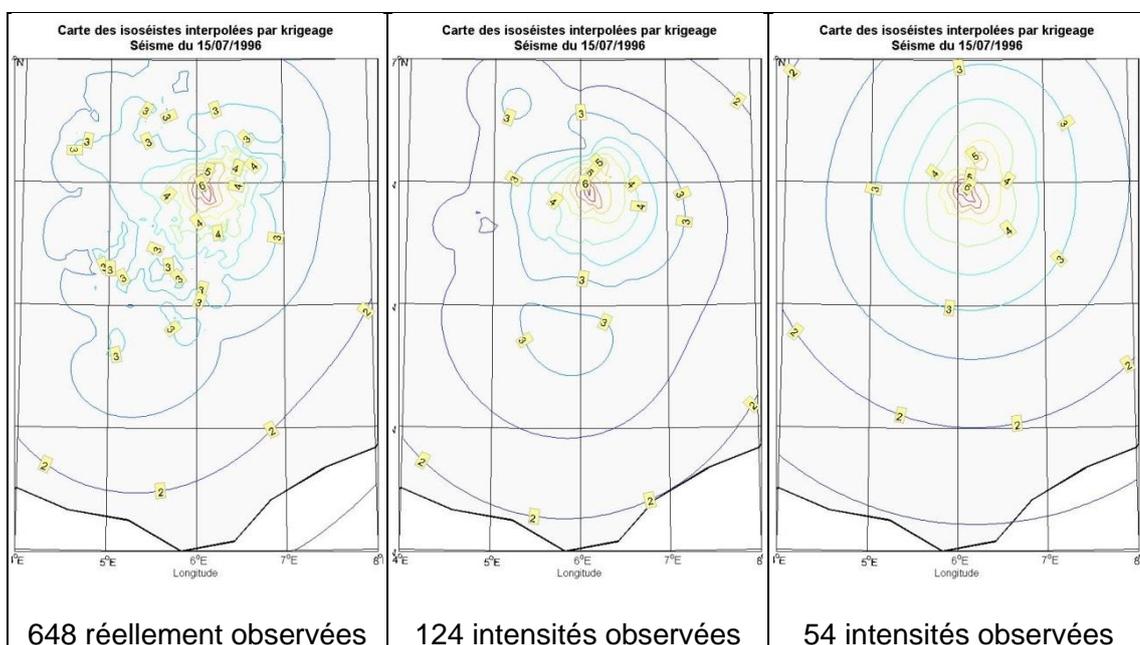


Figure 21 - Test portant sur le retrait de points d'intensités pour le séisme d'Epagny du 15/07/1996. A gauche, carte d'isoséistes de référence (648 points d'observation), au centre carte d'isoséistes pour un cas simulé avec 124 points d'observation et à droite carte d'isoséistes pour un autre cas simulé avec 54 points d'observation.

4.3. RÉSULTATS OBTENUS

Le code présenté ci-dessus a été utilisé afin de générer de façon automatique des isoséistes pour les huit séismes tests retenus et décrits dans le paragraphe 3.2. Dans un premier temps, les intensités sont calculées sur une échelle continue de valeurs pour l'ensemble de la grille de calcul ; à ce stade des courbes d'isolignes (courbes reliant des intensités constantes) sont générées. Dans un deuxième temps, des isoséistes de classes d'intensité entières (par exemple intensité III ou intensité VI) sont produites. Pour cela les cartes d'intensités interpolées générées de façon automatique ont été retraitées afin de représenter des isoséistes complètes, comparables à celles

représentées dans SisFrance. Des zones d'intensités homogènes ont été définies telle que l'intensité interpolée par le programme de krigeage soit située entre $I-0.25$ et $I+0.75$. Ainsi dans l'isoséiste IV sont comprises toutes les intensités interpolées entre les valeurs 3,75 et 4,75 ($[3,75-4,25[\Rightarrow$ intensité IV et $[4,25-4,75[\Rightarrow$ intensité IV-V). Les intensités IV et IV-V sont ainsi représentées de façon analogue aux représentations manuelles de SisFrance. La Figure 22 ci-dessous présente un exemple de ce traitement pour le séisme du 21/06/1660.

Les cartes des isoséistes finalement obtenues sont présentées sur les Figure 24 à Figure 29 dans les pages suivantes.

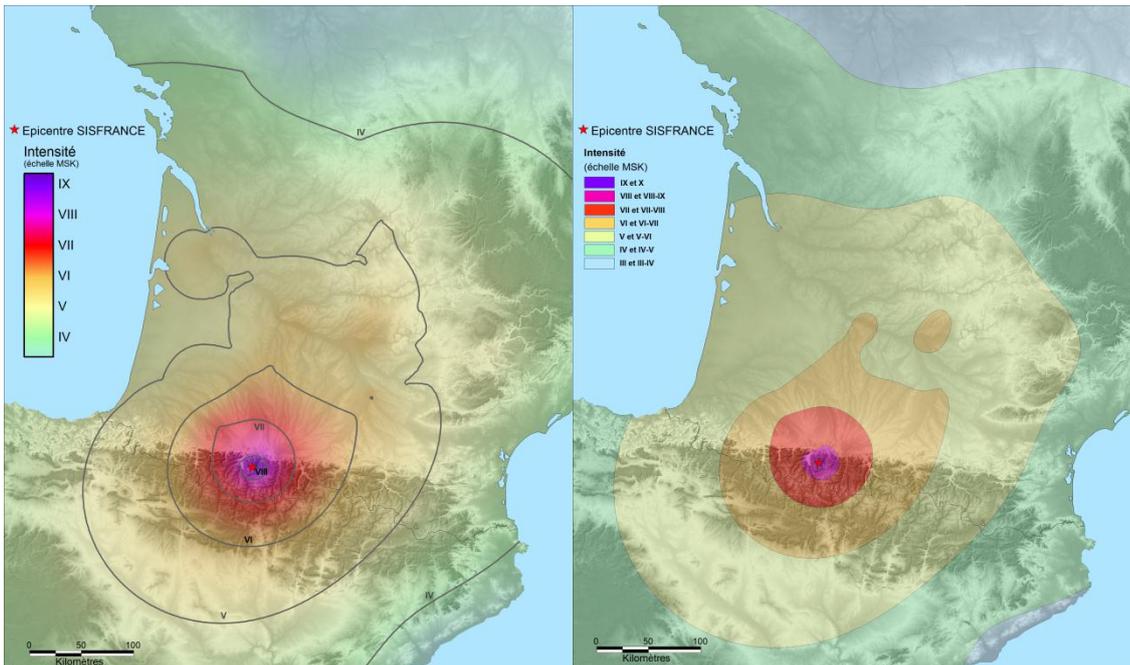


Figure 22 - Exemple de résultats obtenus pour le séisme du 21/06/1660 (pas de 0.05°) : à gauche la carte des intensités interpolées de façon continue et les isolignes correspondantes, à droite une carte d'isoséistes représentées par des intensités entières.

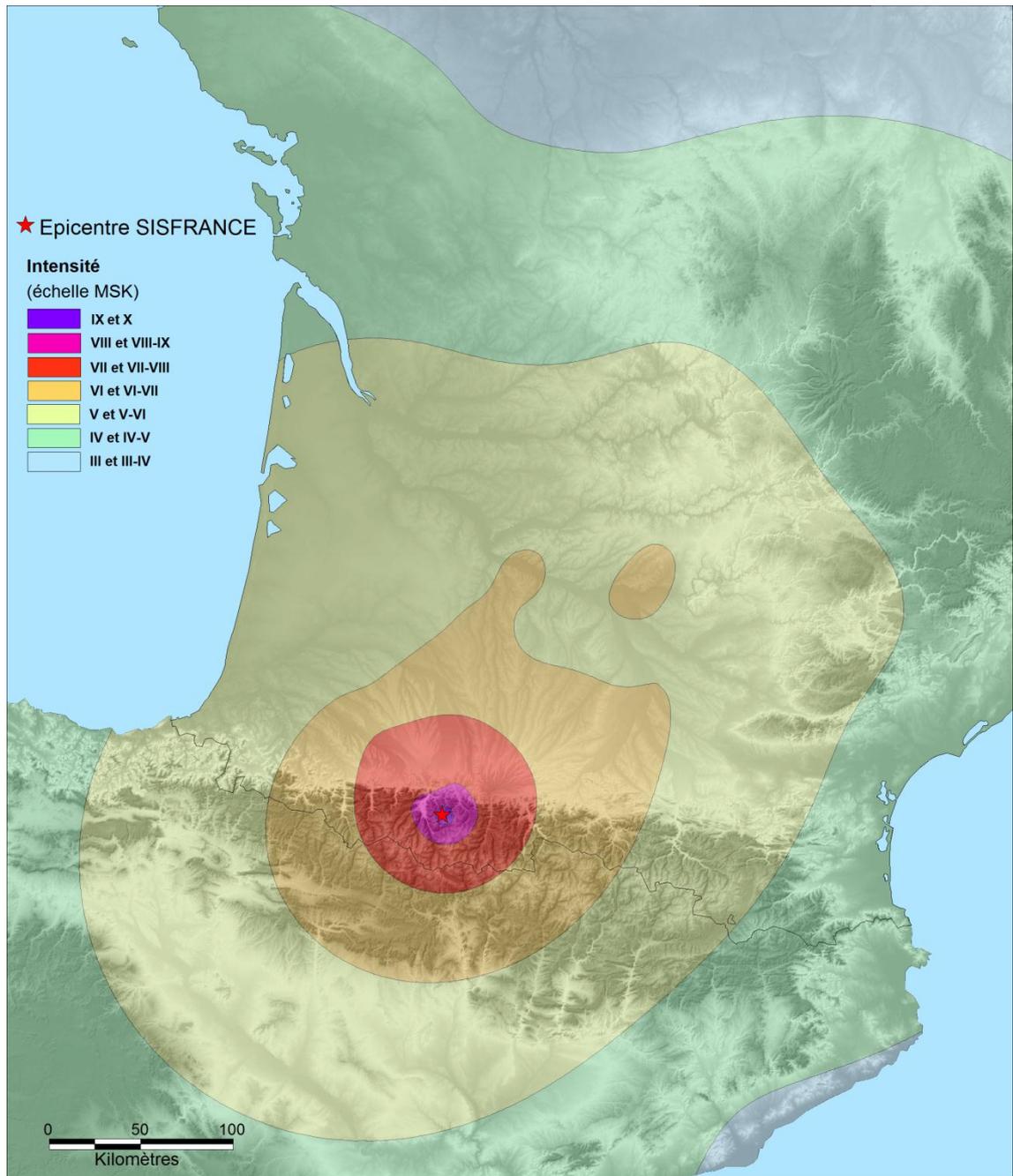


Figure 23 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 21/06/1660 (Pyrénées).

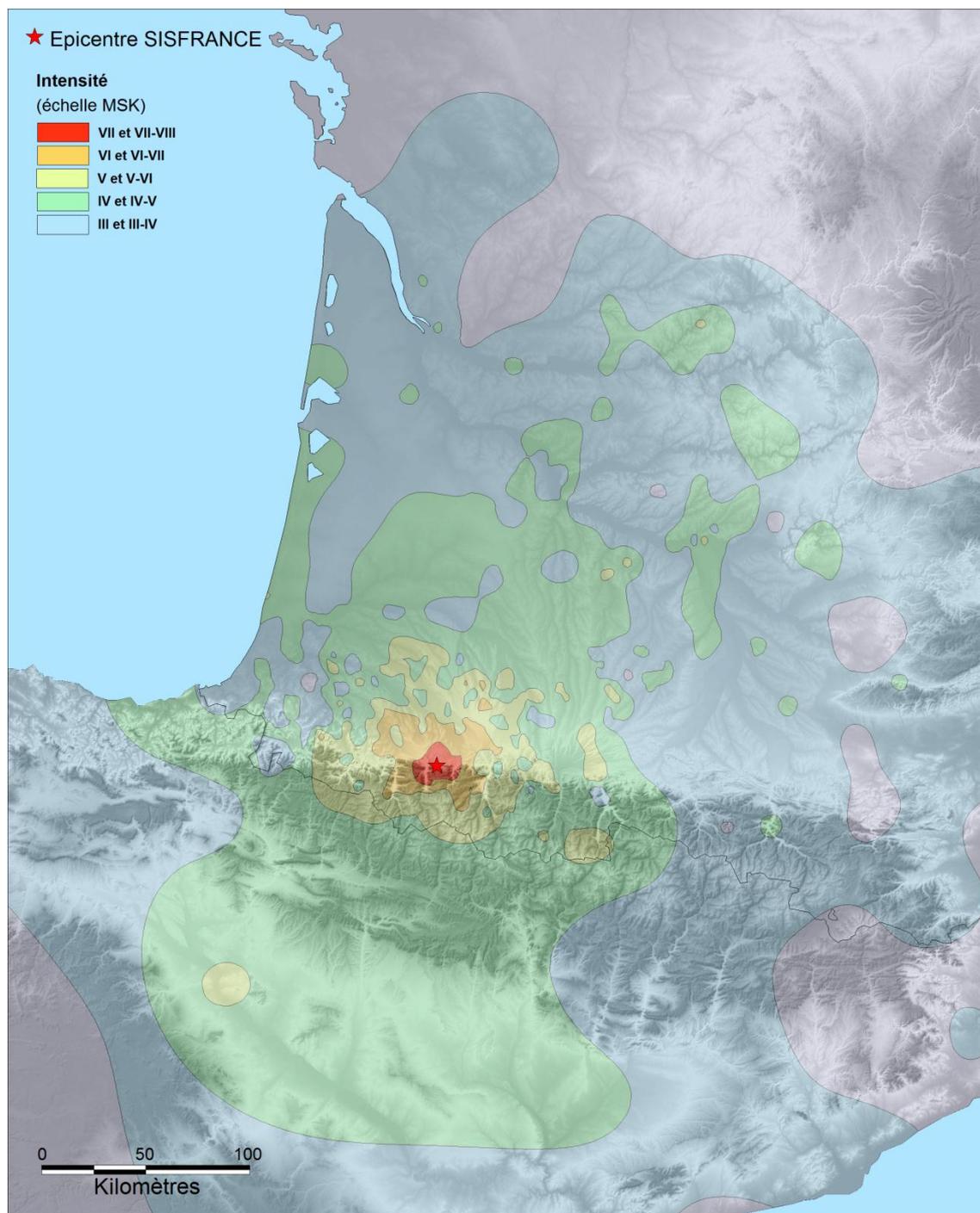


Figure 24 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 29/02/1980 (Pyrénées).

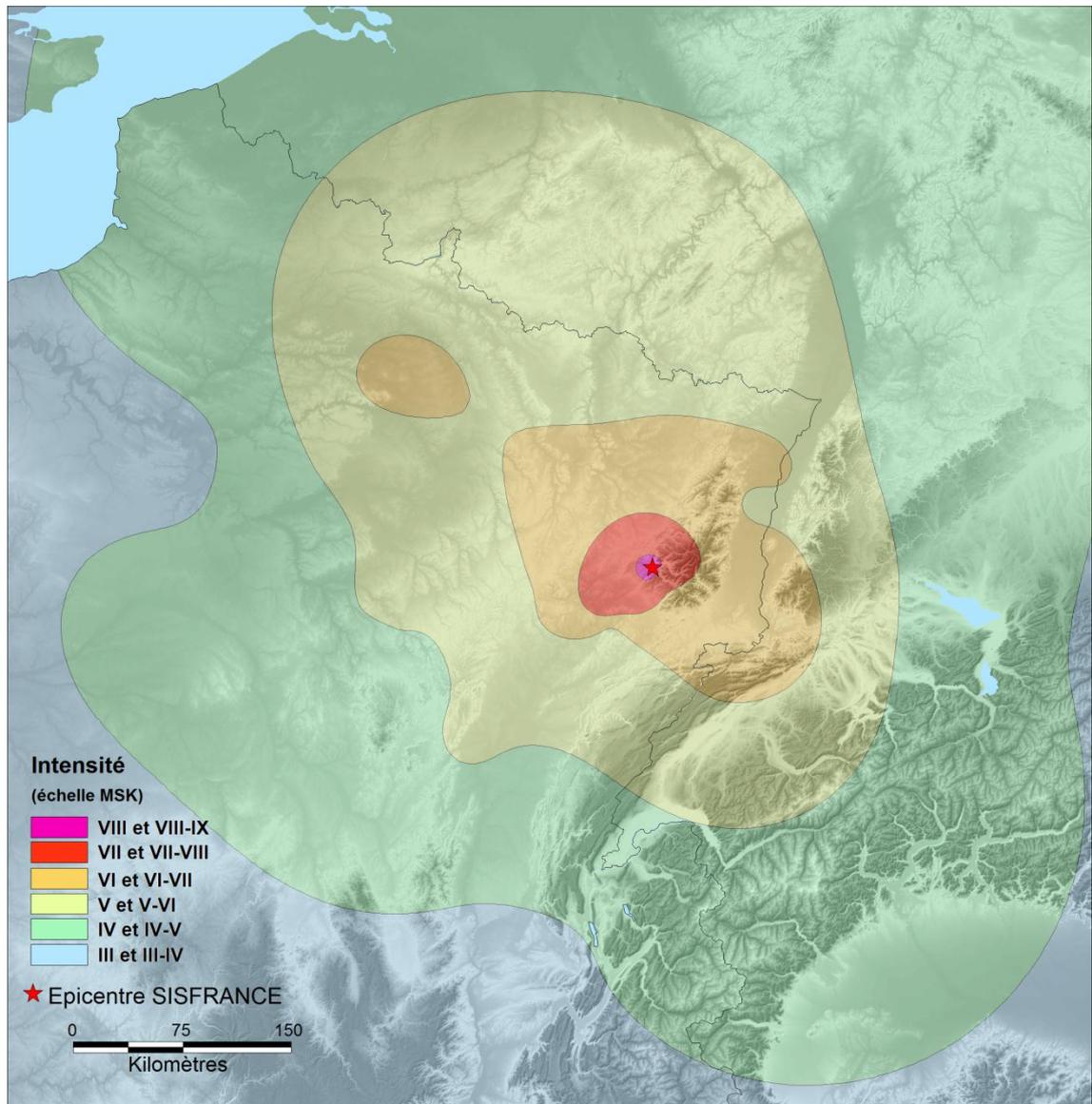


Figure 25 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 12/05/1682 (Vosges).

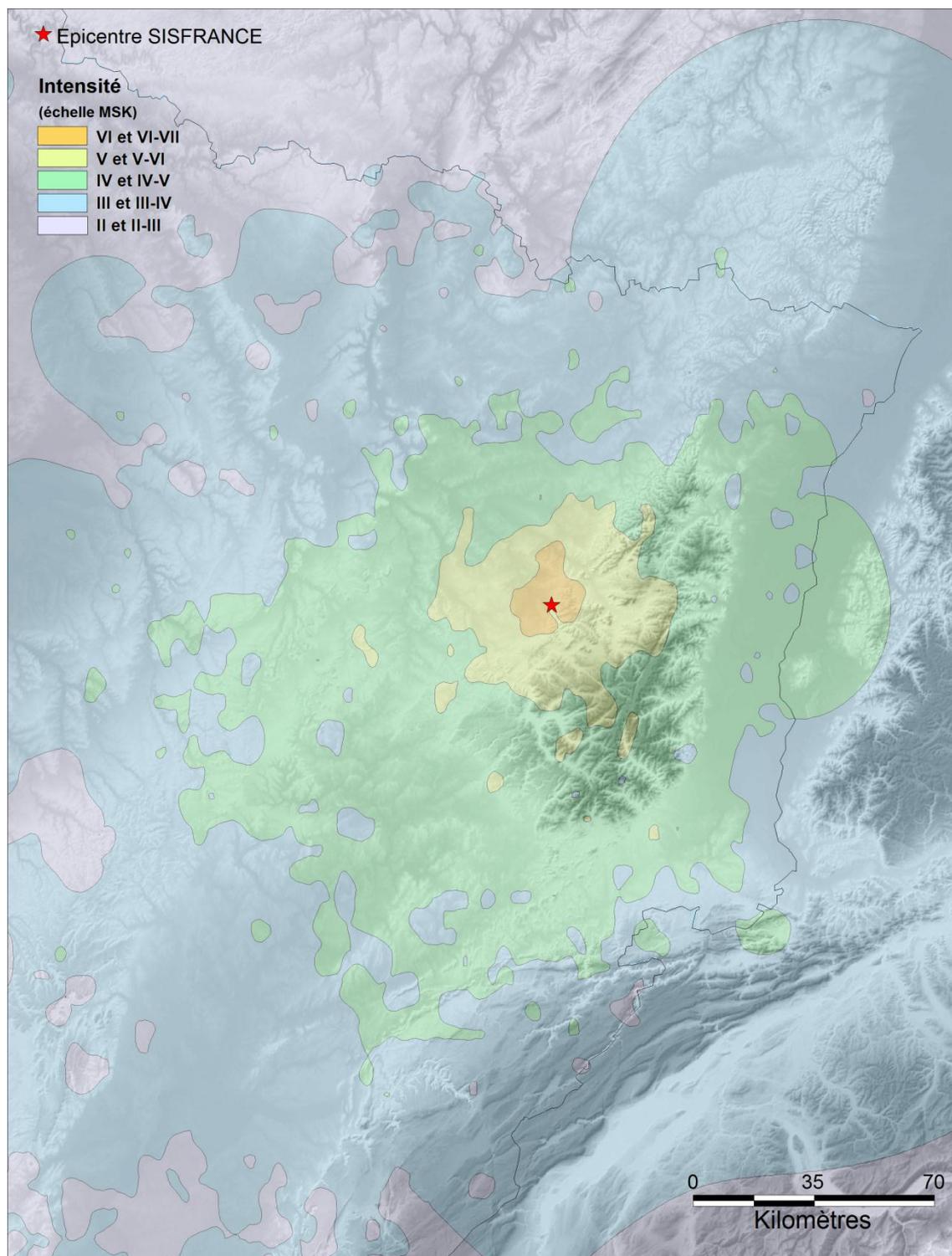


Figure 26 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 22/02/2003 (Vosges).

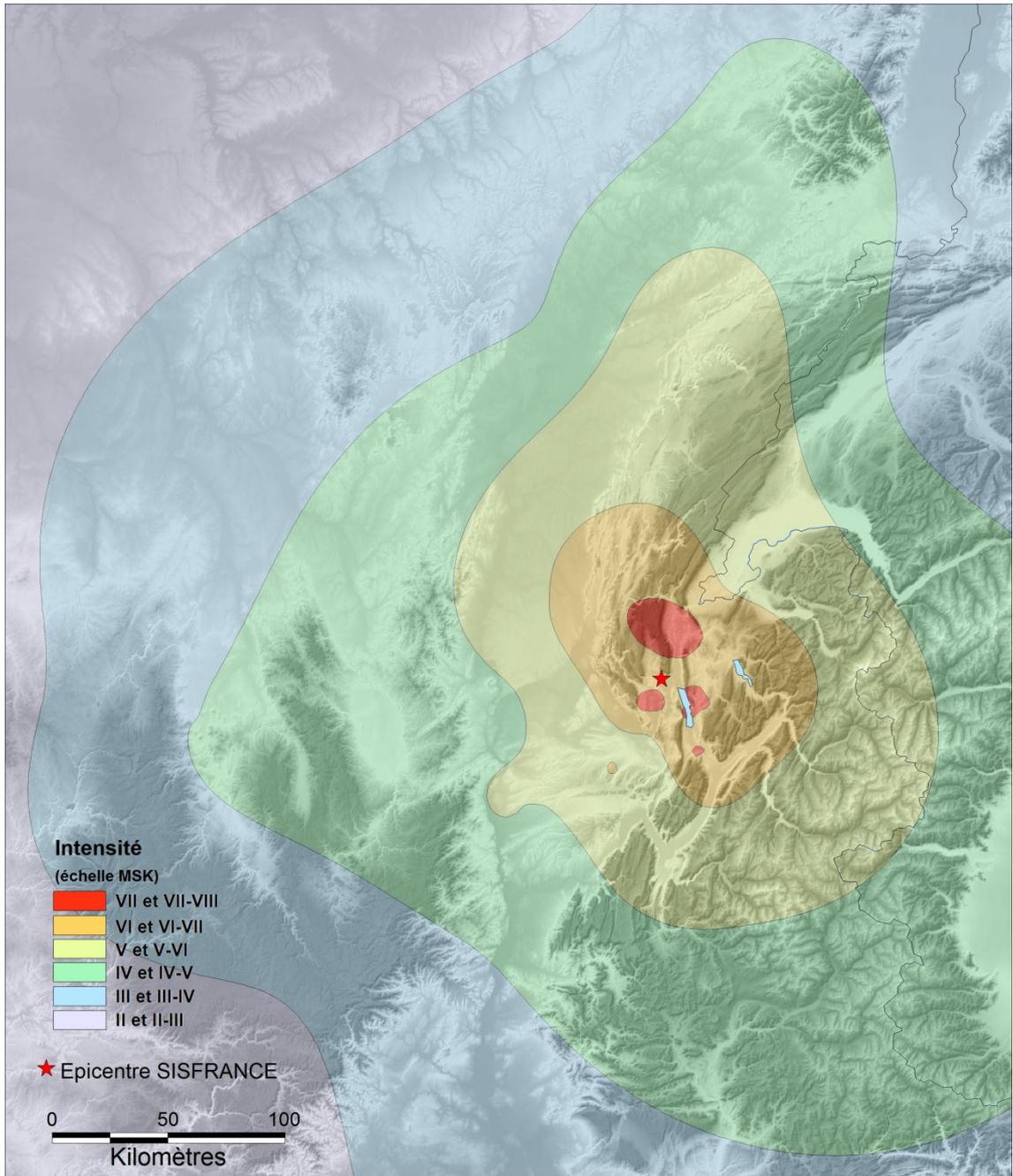


Figure 27 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 19/02/1822 (Alpes).

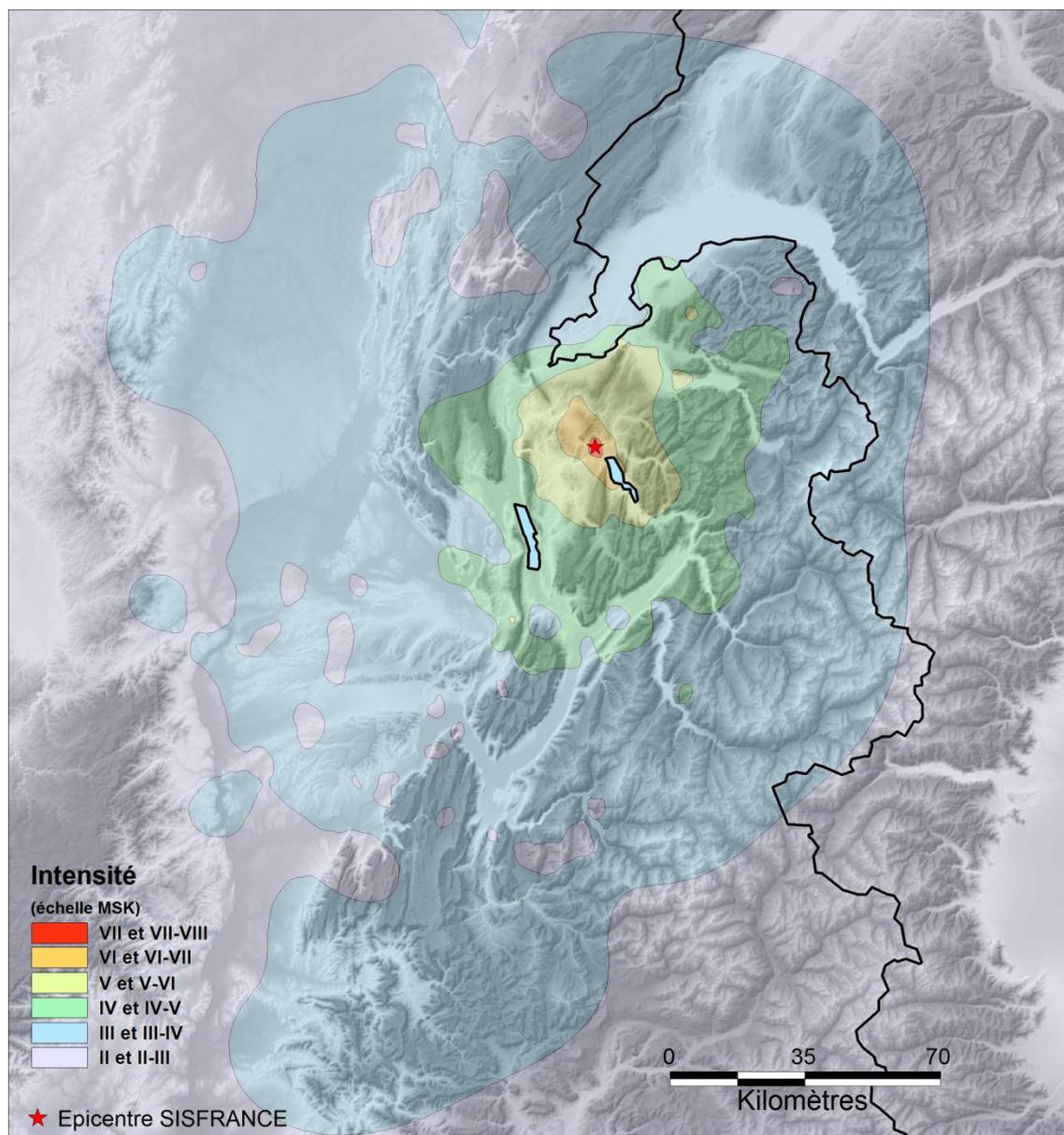


Figure 28 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 15/07/1996 (Alpes).

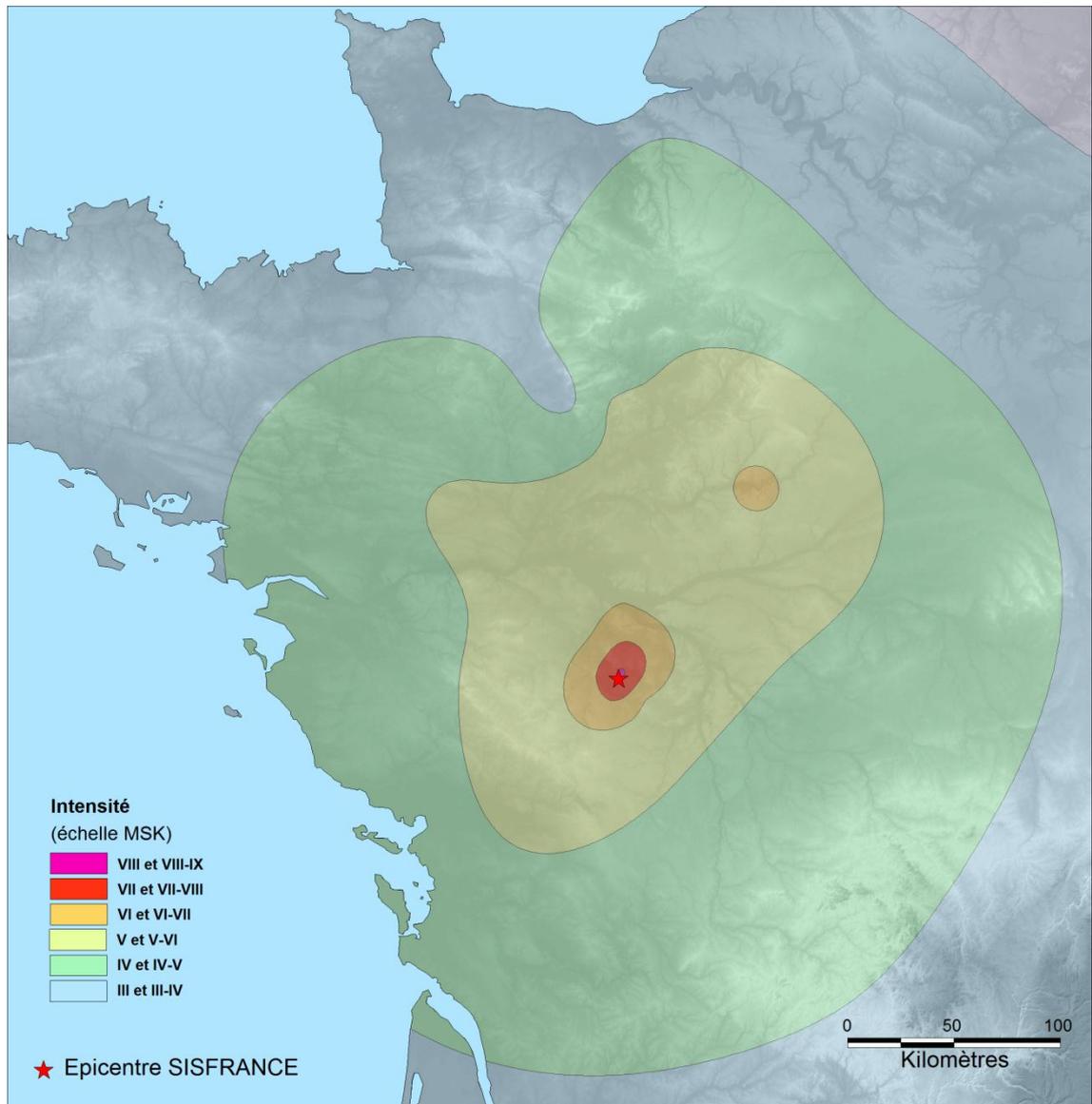


Figure 29 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 06/10/1711 (Grand-Ouest).

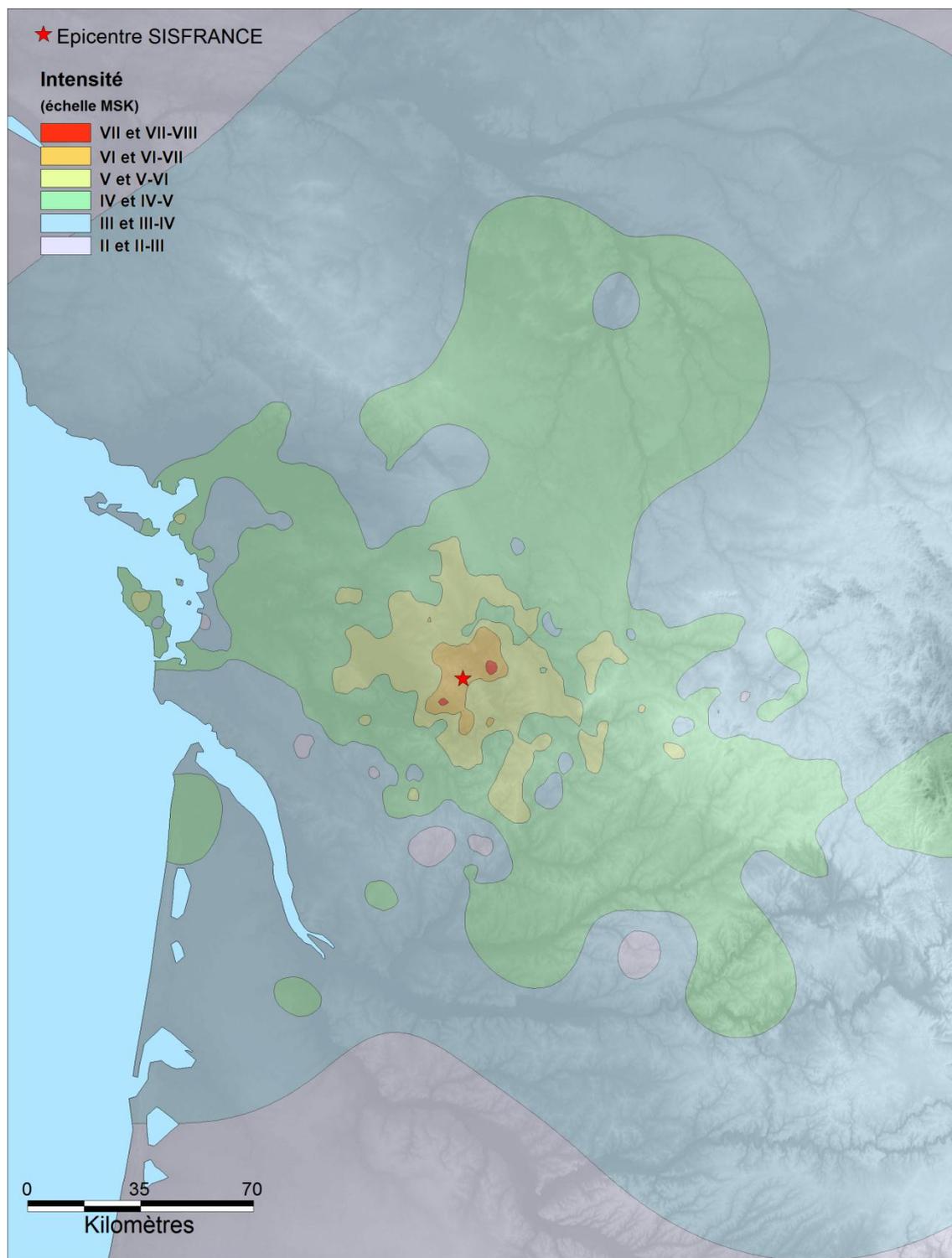


Figure 30 - Carte des isoséistes automatiques générées pour le séisme du 28/09/1935 (Grand-Ouest).

4.4. COMPARAISON AVEC LES ISOSÉISTES ÉTABLIES MANUELLEMENT

4.4.1. Comparaisons qualitatives

Les cartes d'isoséistes générées automatiquement (Figure 24 à Figure 29) peuvent être respectivement comparées aux cartes réalisées manuellement (Figure 7 à Figure 12).

D'une façon générale, on note que les cartes réalisées de façon automatique sont très cohérentes avec les cartes manuelles. Les rayons moyens des différentes isoséistes sont par exemple comparables. Dans les cartes manuelles, les isoséistes des faibles intensités (II à IV) sont en général plus étendues et représentées sous formes de cercles ou d'ellipses alors que les cartes automatiques, qui tiennent compte de toutes les données, sont de formes moins homogènes.

On peut distinguer globalement deux cas de figures dans ces comparaisons :

- pour les séismes mal renseignés (en général les séismes anciens), avec 50 à 150 observations, les cartes d'isoséistes sont très comparables et se présentent sous forme de cercles ou d'ellipses plus ou moins concentriques. Ceci s'explique par le fait qu'au vu du nombre de données, il y a peu de valeurs d'intensités aberrantes et que ces données ont sans doute été « filtrées » lors du travail minutieux de recensement des sources historiques au cours duquel chaque intensité est évaluée individuellement. De plus, la complexité du phénomène est moins bien représentée avec peu de données, les effets de site dans une vallée ne sont par exemple pas identifiés s'il n'y a aucune observation dans cette structure ;
- pour les séismes mieux renseignés (séismes les plus récents), avec plusieurs centaines à plusieurs milliers d'intensités observées, les cartes sont moins facilement comparables : les cartes automatiques tenant compte de l'ensemble des données, la forme des isoséistes est plus complexe et découpée que dans les cartes manuelles dans lesquelles nombre de données sont ignorées. Ceci reflète mieux la complexité naturelle des variations du mouvement sismique (effets de site, effets de directivité, ...) mais est également dû au fait qu'il y a dans ces cas de nombreuses données erronées, imprécises ou aberrantes. En effet, étant donné le nombre de données considérées, ces dernières n'ont pas été vérifiées individuellement et reposent principalement sur les déclarations de témoins en ligne, qui sont parfois sujettes à caution.

Cette comparaison qualitative peut être visualisée pour les huit séismes sur la Figure 31 à la Figure 38 ci-dessous.

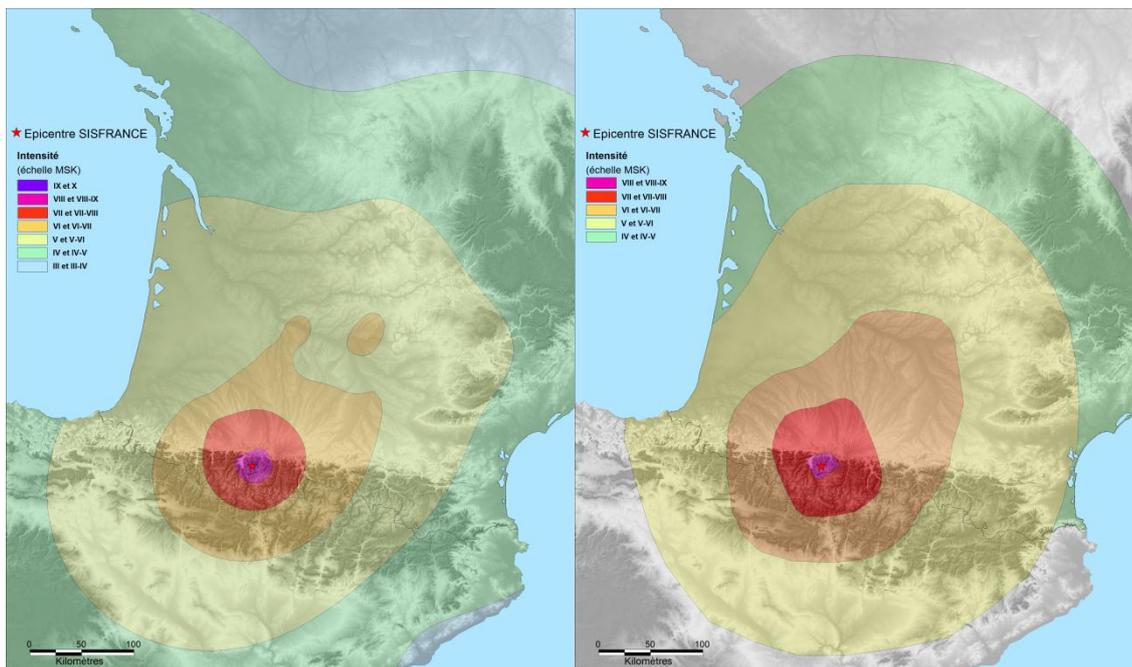


Figure 31 - Comparaison des cartes d'isocéistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isocéistes établies manuellement dans SisFrance (à droite) pour le séisme de Bigorre du 21/06/1660.

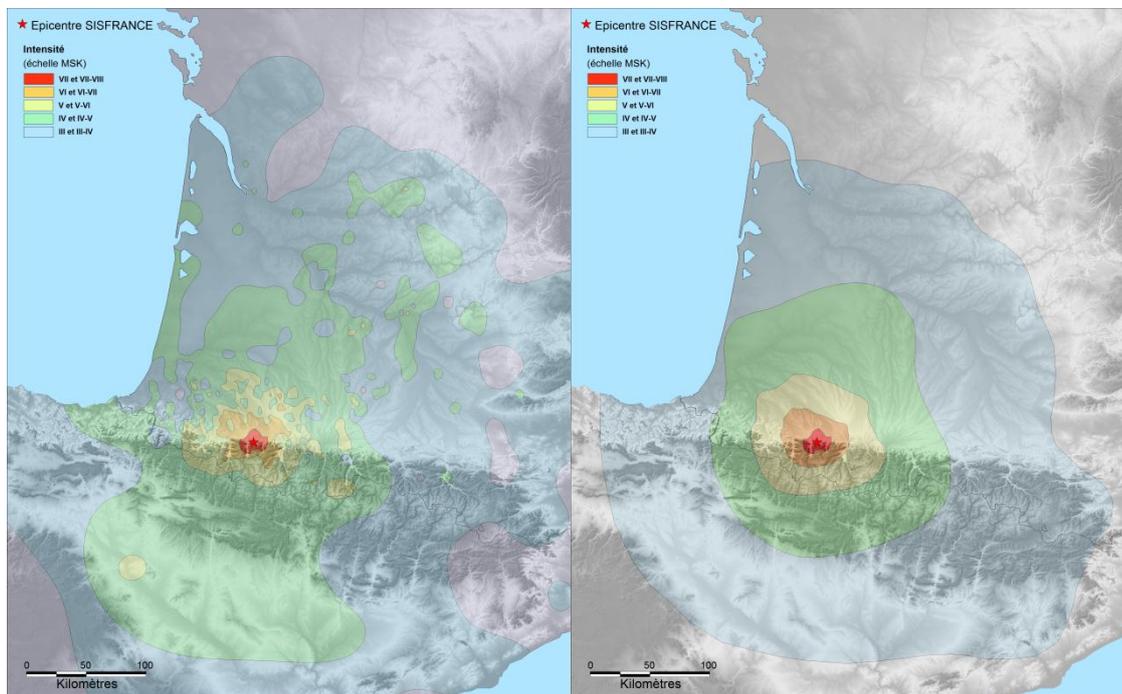


Figure 32 - Comparaison des cartes d'isocéistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isocéistes établies manuellement dans SisFrance (à droite) pour le séisme du 29/02/1980.

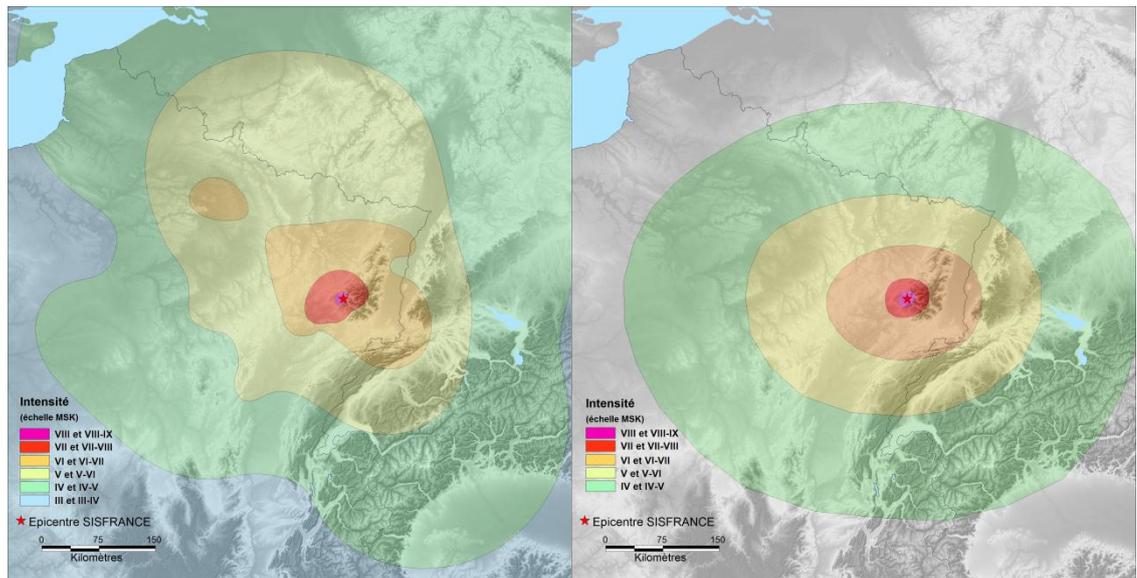


Figure 33 - Comparaison des cartes d'isoséistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isoséistes établies manuellement dans SisFrance (à droite) pour le séisme du 12/05/1682.

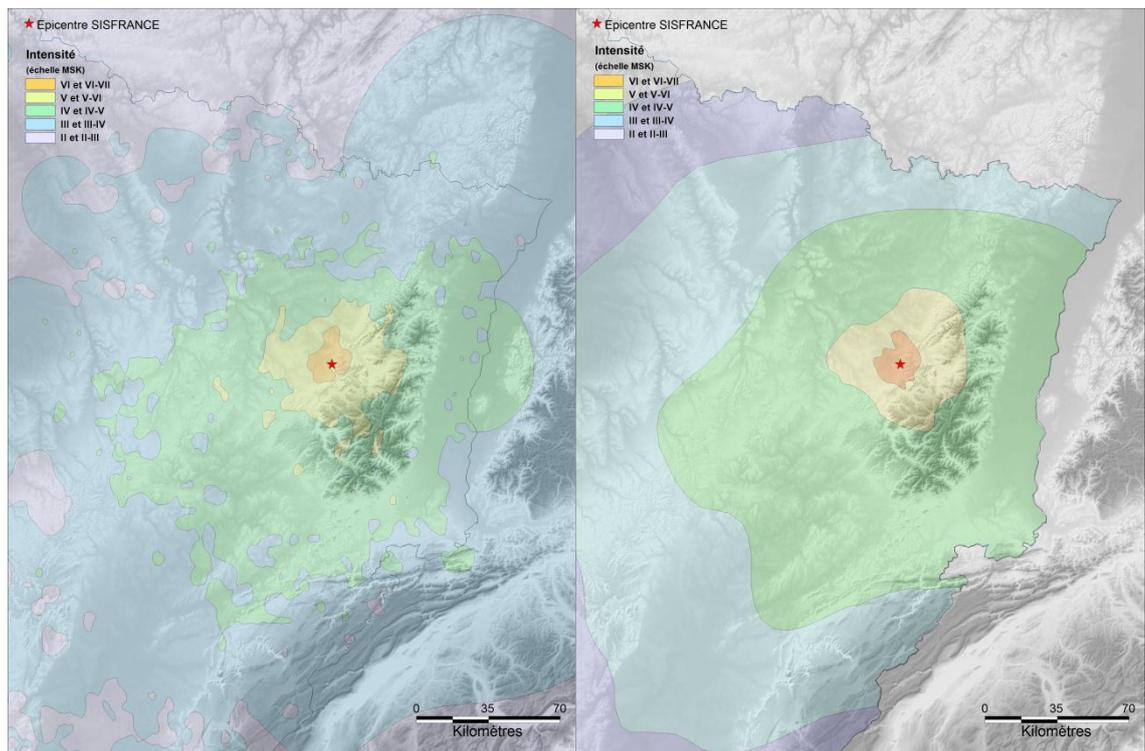


Figure 34 - Comparaison des cartes d'isoséistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isoséistes établies manuellement dans SisFrance (à droite) pour le séisme du 22/02/2003.

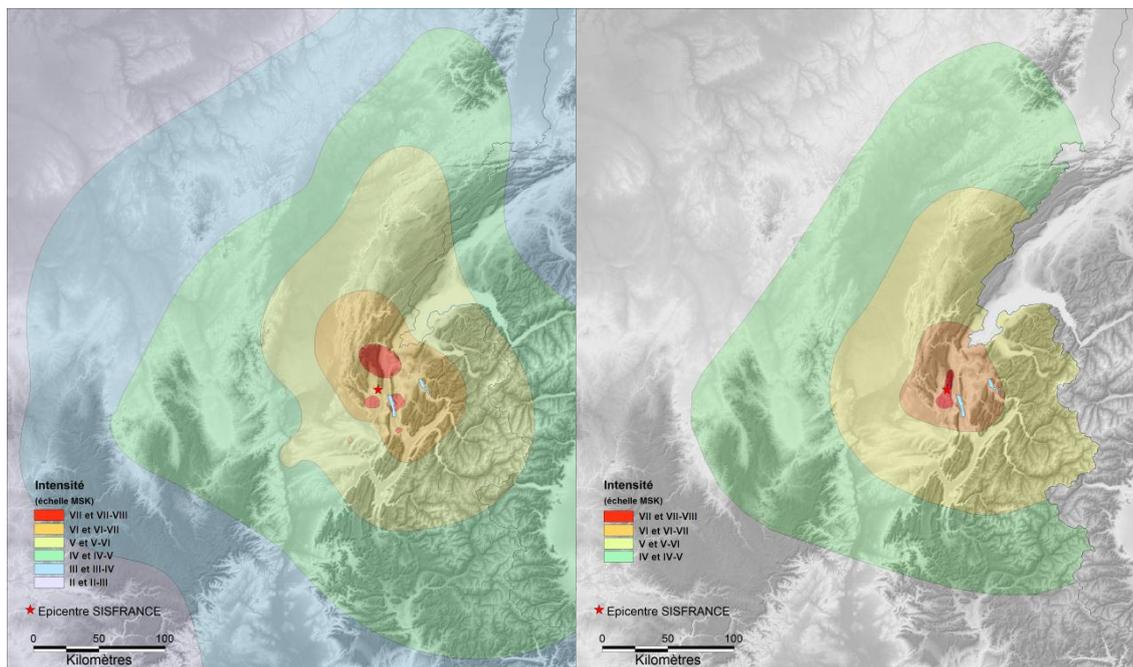


Figure 35 - Comparaison des cartes d'isoseistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isoseistes établies manuellement dans SisFrance (à droite) pour le séisme du 19/02/1822.

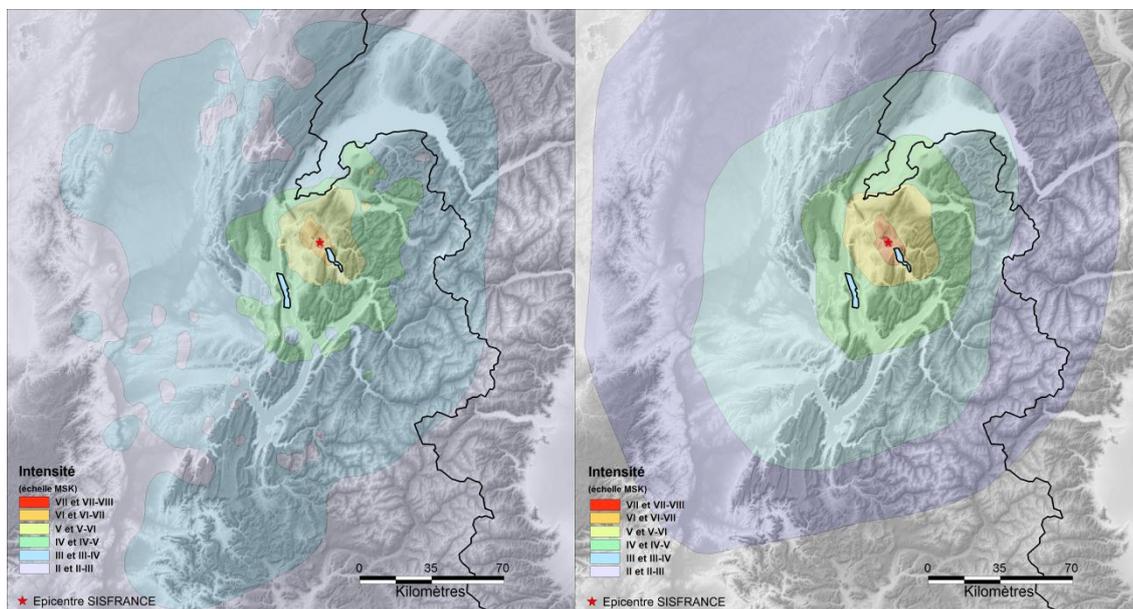


Figure 36 - Comparaison des cartes d'isoseistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isoseistes établies manuellement dans SisFrance (à gauche) pour le séisme d'Epagny du 15/07/1996.

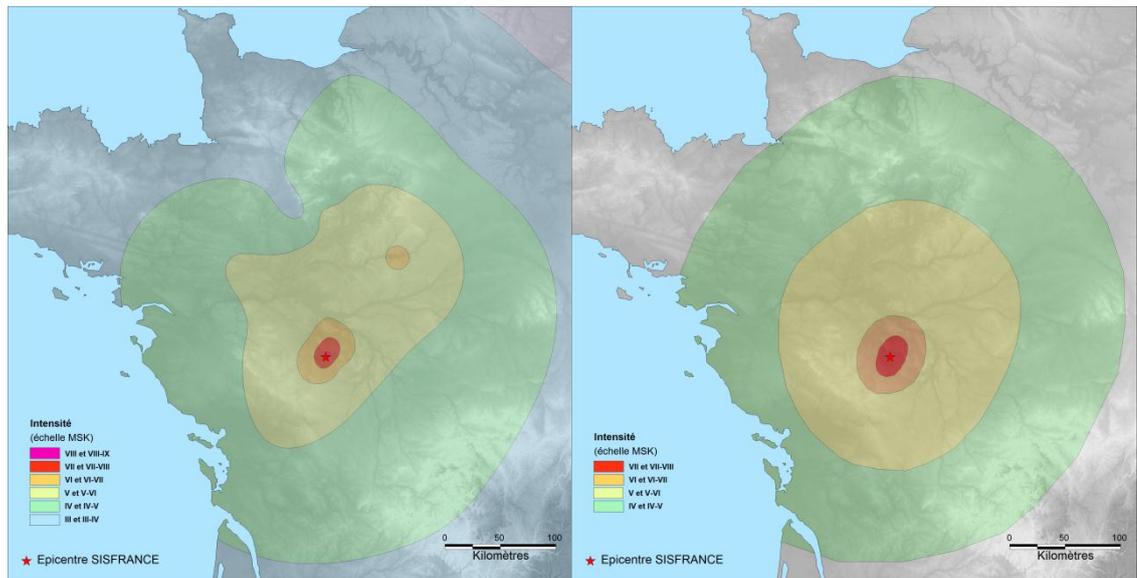


Figure 37 - Comparaison des cartes d'isoséistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isoséistes établies manuellement dans SisFrance (à droite) pour le séisme du 06/10/1711.

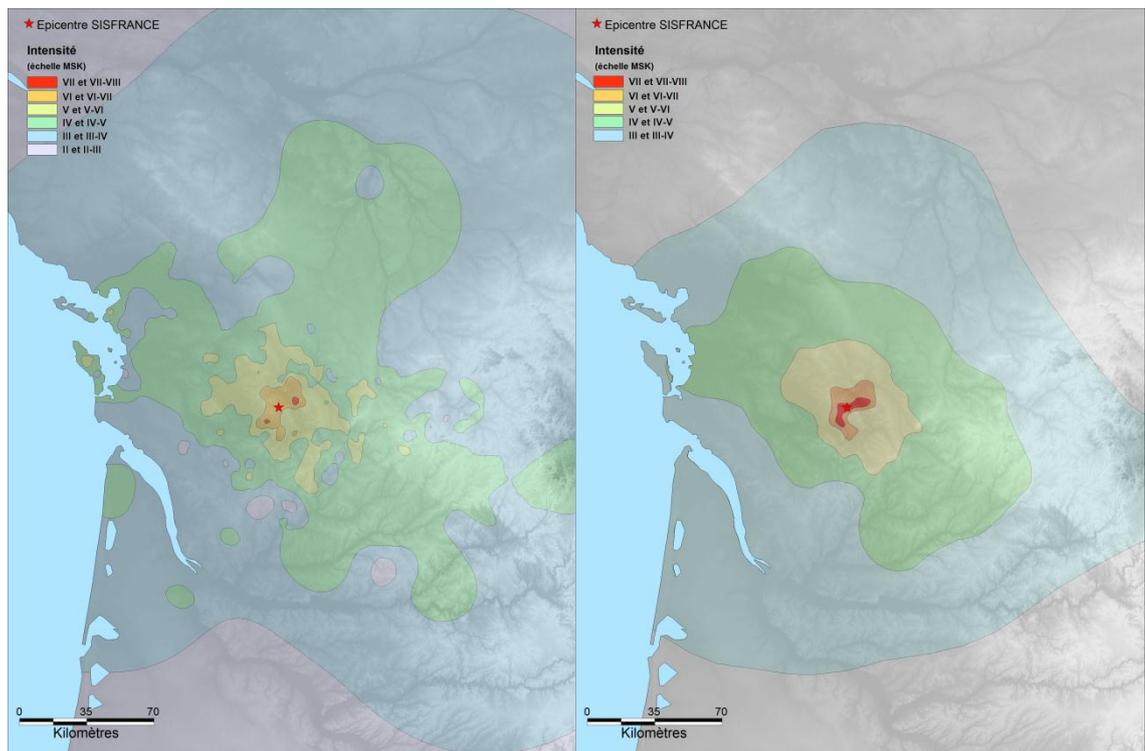


Figure 38 - Comparaison des cartes d'isoséistes générées de façon automatique (à gauche) avec les isoséistes établies manuellement dans SisFrance (à droite) pour le séisme du 28/09/1935.

4.4.2. Comparaisons quantitatives

Avec le logiciel MAPINFO® il est possible de calculer sur l'ensemble de la grille de calcul la différence entre les intensités estimées de façon manuelle et automatique. Pour cela, les cartes d'intensités interpolées de façon automatique ont été retraitées, comme indiqué dans le paragraphe 4.3, afin de représenter des isoséistes complètes comparables à celles établies manuellement et représentées dans SisFrance.

Pour chaque point de la grille de calcul, la différence entre les classes d'intensités manuelle et automatique est ensuite évaluée. On obtient ainsi pour un point donné une différence nulle si la classe établie de façon automatique est la même que la classe manuelle. Une différence de +1 est indiquée si l'intensité établie de façon automatique présente un degré de plus que l'intensité manuelle et réciproquement une différence de -1 est indiquée si c'est l'intensité manuelle qui présente un degré de plus que l'intensité automatique.

Ces cartes de différences ont été systématiquement établies pour les huit séismes testés dans la présente étude. Les cartes obtenues sont présentées à titre indicatif pour deux d'entre eux, un séisme ancien et un séisme récent : le séisme de Bigorre du 21/06/1660 (Figure 39) et le séisme d'Epagny du 15/07/1996 (Figure 40). Des calculs statistiques ont été par ailleurs réalisés afin d'établir les proportions respectives (en termes de nombre de points de la grille) des différences obtenues. Les résultats de ces comparaisons sont présentés dans le Tableau 2 pour les huit séismes traités.

Séisme	ΔI (%)				
	-2	-1	0	+1	+2
21/06/1660	-	9,6	87,7	2,7	-
12/05/1682	-	8,0	68,4	22,5	1,1
06/10/1711	-	19,8	77,6	2,6	-
19/02/1822	-	8,1	78,9	13	-
28/09/1935	-	9,2	71,4	23,9	-
29/02/1980	0,1	10,6	64,7	24,3	0,3
15/07/1996	-	4,7	69,4	25,9	-
22/02/2003	-	17,1	75,8	7,1	-

Tableau 2 - Différences de classes d'intensités établies de façon automatique et manuelle pour les 8 séismes traités (pourcentage en fonction du nombre de points total de la grille).

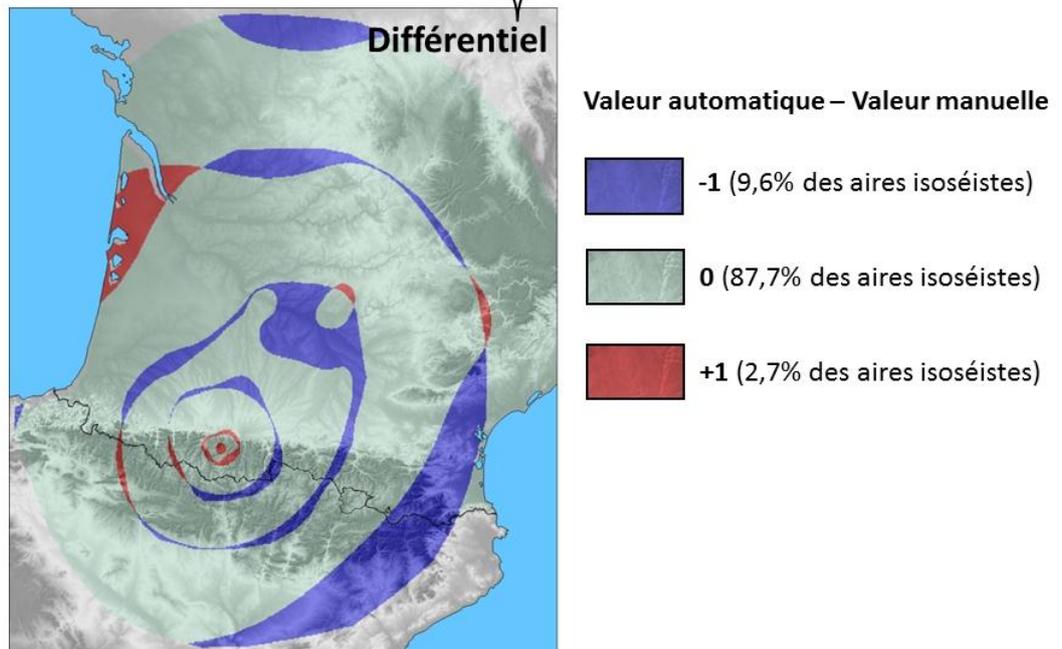
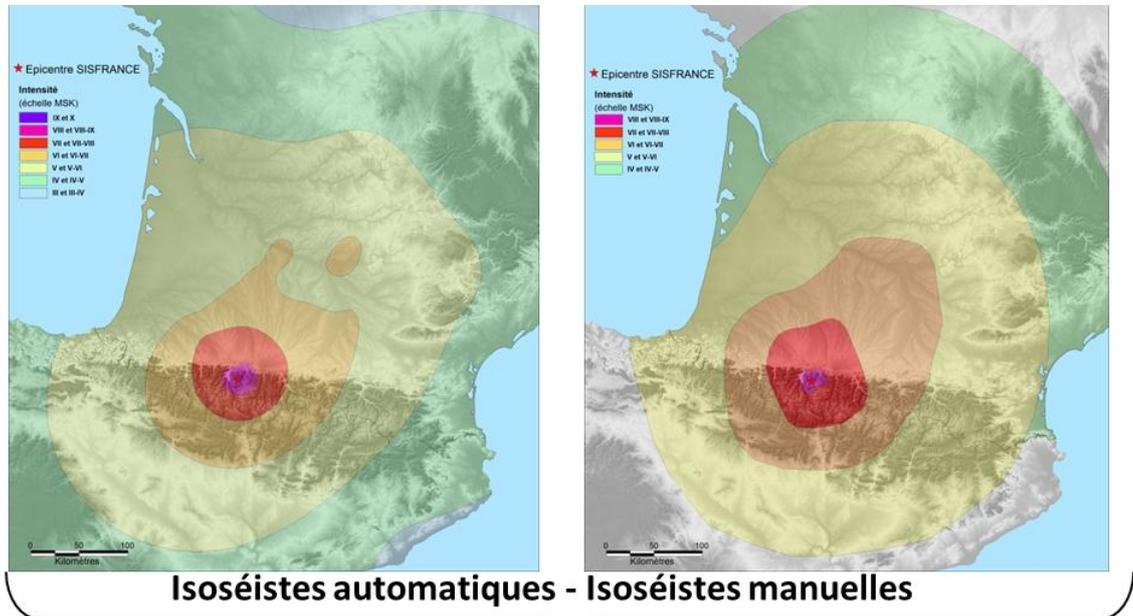


Figure 39 - Carte des différences entre les classes d'intensité établies de façon automatique et manuelle pour le séisme de Bigorre du 21/06/1660.

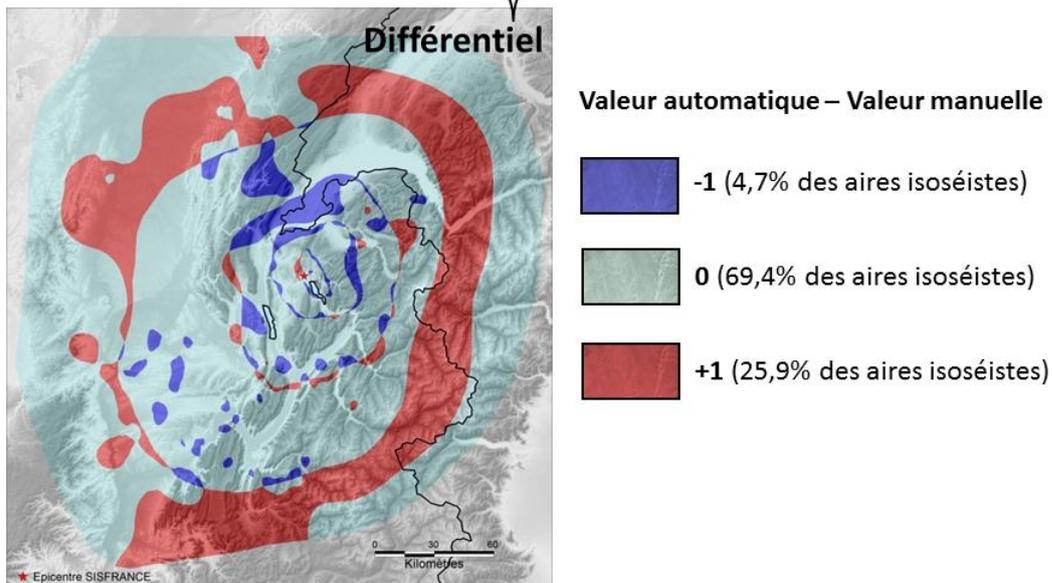
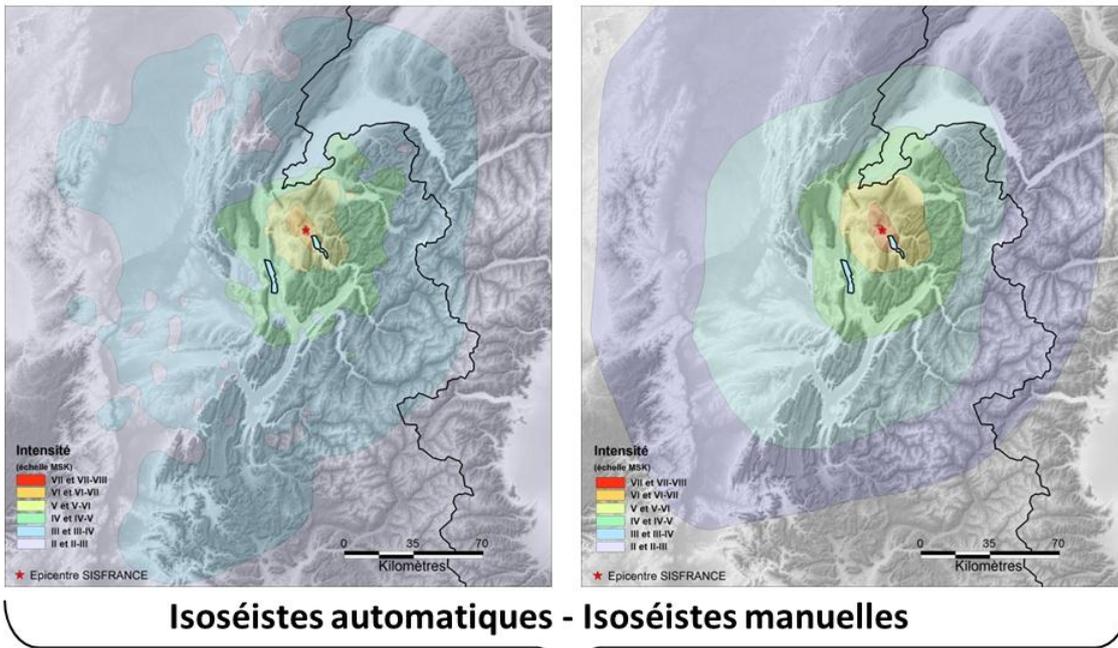


Figure 40 - Carte des différences entre les classes d'intensité établies de façon automatique et manuelle pour le séisme d'Epagny du 15/07/1996.

On observe que pour une grande majorité des points des zones d'étude (entre 65 % et 90 %) la classe d'intensité estimée de façon automatique est la même que celle estimée de façon manuelle. Les différences de deux classes sont ultra-minoritaires et concernent des zones très restreintes. On ne note par ailleurs pour l'ensemble des huit séismes traités aucune différence supérieure ou inférieure à deux niveaux d'intensité. Pour une minorité des points (entre 10 et 35 %) une différence d'une classe est identifiée : par exemple une intensité estimée à V en automatique au lieu de IV pour

une estimation manuelle (ou le contraire). Ces résultats montrent de façon quantitative que les résultats sont remarquablement similaires avec les deux méthodes. De plus il convient de noter que les isoséistes manuelles sont elles-mêmes une interprétation des observations ; elles ne peuvent constituer une référence absolue. Ainsi la pertinence des cartes établies de façon automatique semble grande et une majorité des intensités estimées doivent être identiques ou proches de celles qui seraient déterminées si des observations réelles étaient disponibles en tous points pour les séismes étudiés.

Ces résultats montrent par ailleurs qu'il n'existe pas de sur-estimation ou au contraire de sous-estimation systématique des intensités entre les résultats obtenus automatiquement et manuellement. Ainsi pour cinq séismes les différences positives sont majoritaires (séismes de 1682, 1822, 1935, 1980, 1996), ce qui signifie que les cartes automatiques sont globalement plus « pénalisantes » que les cartes manuelles, alors que pour les 3 autres (1660, 1711, 2003) les différences négatives sont majoritaires et dans ce cas les cartes automatiques sont moins « pénalisantes » que les cartes manuelles. Ces différences ne semblent par ailleurs pas clairement corrélées à l'ancienneté du séisme, les résultats sur les quelques séismes considérés étant cependant légèrement meilleurs pour les séismes anciens (en moyenne 78 % de points avec une différence nulle) que pour les séismes récents (en moyenne 70 % de points avec une différence nulle). Ceci rejoint le constat établi lors des comparaisons qualitatives (paragraphe 4.4.1). On n'observe pas non plus de décalage systématique, les huit comparaisons étant clairement centrées sur la valeur nulle. Ces observations tendent à montrer qu'il n'existe pas de biais systématique dans la méthodologie testée, en tous cas pour ces huit séismes représentatifs.

Enfin il convient de noter qu'une erreur d'un degré d'intensité est regrettable, mais pas rédhibitoire pour établir une base de données des intensités potentiellement ressenties dans un but pédagogique de communication. Rappelons que la précision d'une valeur d'intensité n'est pas plus fine qu'un demi-degré : deux analystes peuvent communément varier d'un demi-degré dans leur interprétation d'une même observation.

4.5. BILAN SUR LA MÉTHODE ET AMÉLIORATIONS POSSIBLES

4.5.1. Bilan sur l'utilisation du code

Les résultats obtenus avec ce code de calcul sont globalement proches des courbes établies manuellement à grande distance, pour des intensités modérées (de l'ordre de II à IV-V). Dans la zone épiscopale chaque donnée est respectée, même si l'intensité diffère localement de la tendance générale, et ainsi la forme des isoséistes automatiques est plus complexe que celle des isoséistes manuelles (voir Figure 31 ou Figure 36), en particulier pour les séismes comportant de nombreuses données.

Cette méthode permet ainsi d'obtenir des courbes relativement fiables et constitue un compromis acceptable pour obtenir automatiquement, et ainsi rapidement, des courbes d'isoséistes homogènes pour le territoire métropolitain.

Au final, au vu de ces premiers résultats, cette méthode a été retenue pour être testée sur un nombre plus important de séismes dans la suite de l'étude.

4.5.2. Améliorations possibles du code de calcul

Les tests réalisés ont montré qu'il était possible d'envisager plusieurs améliorations au code de calcul et plus généralement à l'ensemble de la méthodologie mise en place pour calculer des cartes d'isoséistes de façon automatique.

Améliorations portant sur la définition des observations utilisables pour un séisme donné.

Il conviendrait en premier lieu de prendre en compte dans le calcul l'indice de fiabilité des données pour accorder plus de poids aux données les plus fiables ou ne pas considérer les données les plus incertaines. A ce stade toutes les observations sont considérées de la même manière par le code de calcul. Il conviendrait de tester une évolution possible du code qui permettrait d'attribuer un poids relatif qui serait directement fonction de la fiabilité de l'observation.

De même un « filtrage » des données pour les séismes récents et/ou avec beaucoup de données pour éliminer les données aberrantes en amont améliorerait grandement la qualité des cartes obtenues. En effet des données aberrantes, même en nombre limité, peuvent modifier de façon substantielle la carte des isoséistes automatiques.

Pour améliorer la précision des isoséistes en champ lointain, les observations recensées comme « ressenti » pourraient être quantifiées en utilisant des critères de distance à l'épicentre et/ou de dates. De même, certaines intensités nulles (« non ressenti ») pourraient être conservées pour mieux caler les isoséistes à grandes distances.

Ce travail doit être réalisé en amont de l'utilisation du code de calcul et doit être validé par des experts de ce type de données afin de ne pas dénaturer les données.

Améliorations portant sur le code de calcul

Des calculs portant sur une grille avec une imbrication de cellules de tailles différentes selon la distance à l'épicentre pourraient donner des résultats plus précis et consommer moins de puissance de calcul. Il peut par exemple être envisagé de créer une grille de calcul avec un pas très fin (0.01°) en zone épiscopale puis un pas plus large (0.05°) à l'échelle régionale et enfin un pas important (0.2°) pour le reste du territoire métropolitain.

La profondeur du foyer pourrait être par ailleurs mieux prise en compte à l'aide de formules spécifiques, afin de mieux représenter l'écartement des isoséistes observé empiriquement.

5. Conclusion et perspectives

La DGPR et le BRGM ont envisagé la constitution d'une base de données plus exhaustive des intensités macrosismiques potentiellement ressenties en France, en extrapolant les données archivées dans la base de données SisFrance (BRGM/IRSN/EDF). Le BRGM, dans le cadre de l'action C.9 de la Convention DGPR – BRGM n° 2200626840, a mené une étude visant à établir dans un premier temps la faisabilité d'une telle base de données, constituant la première phase de ce projet global.

Au cours de cette première phase, plusieurs méthodologies d'interpolation des intensités macrosismiques ont été identifiées. Les avantages et inconvénients de chacune d'entre elles ont été listés. Au final, la méthode de calcul automatique des cartes d'isoséistes selon une méthodologie de type krigeage est retenue à l'issue d'une phase de tests de sensibilité. Le code de calcul utilisé permet ainsi de générer des cartes d'isoséistes de façon automatique et ces cartes sont assez comparables avec les cartes établies manuellement. Ceci a été vérifié de façon qualitative puis quantitative pour 8 séismes représentatifs du territoire métropolitain, anciens ou récents.

L'enjeu pour la suite de l'étude est de réaliser une base de données sur l'ensemble du territoire national. Une extraction des données de la base de données SisFrance indique que 6 326 événements sont recensés dans la base de données « métropole » dont 5 664 « vrais séismes », 2 905 événements sont recensés dans la base de données « Antilles », dont 2 722 vrais séismes, 153 événements dont 62 « vrais séismes » dans la base de données « océan Indien » (Mayotte et Réunion) et enfin 97 événements dont 92 « vrais séismes » dans la base de données « Nouvelle-Calédonie ».

Des tests devront être réalisés afin de vérifier si la méthodologie décrite dans le présent rapport pour des séismes en métropole peut être extrapolée pour des événements dans les DROM. Si c'est le cas, la méthodologie pourra ensuite être déclinée pour l'ensemble des événements de la base de données SisFrance.

Au final cela représenterait un total de 8 540 séismes à considérer dans le cadre de la phase 2 de l'étude. Pour autant, la quantité et la qualité des informations sont très variables selon les séismes, de sorte que tous ne seront sans doute pas exploitables. Les critères de prise en compte des séismes (nombre d'observations, indices de qualité, intensités épicentrales, intensités minimales recensées, ...) devront être définis avec la DGPR.

Dans l'objectif d'une base de données nationale des intensités relatives à tous les séismes ayant potentiellement affecté un territoire communal, les travaux ultérieurs devront porter successivement sur :

- l'amélioration du code/chaîne de calcul, selon les propositions contenues au paragraphe 4.5.2 ;
- l'automatisation de la chaîne de calcul et la représentation des résultats : le code de calcul a été créé et testé dans l'optique de traiter un nombre limité d'événements et ainsi étant donné le nombre très important d'événements à considérer une automatisation de l'ensemble du processus devra être réalisée. Ainsi l'extraction des données de la base de données SisFrance, leur traitement éventuel (ajout/retrait de points d'observation), la préparation des fichiers d'entrée, le calcul d'interpolation en lui-même (traitement de tous les séismes « à la chaîne ») et enfin la représentation des résultats à l'aide d'un logiciel de SIG devront être automatisés. Pour cela des codes/macros spécifiques devront être développés. Cette automatisation permettra en outre de générer facilement de nouvelles cartes si le code était amené à être de nouveau amélioré par la suite ;
- la synthèse des données par commune : une dernière étape dans le projet consistera à développer un outil pour faire une synthèse, sans doute directement dans le SIG utilisé, de toutes les intensités potentiellement ressenties dans chacune des communes françaises. Ceci pourra être réalisé en superposant toutes les cartes d'isoséistes obtenues pour l'ensemble des séismes traités. Une base de données des intensités potentiellement ressenties dans la commune pourra alors être constituée et mise à disposition des utilisateurs par l'intermédiaire d'un outil qu'il reste à concevoir.

6. Bibliographie

Ambraseys N. N. et Douglas J. (2004) - Magnitude calibration of north Indian earthquakes. *Geophysical Journal International*, 159, 165–206.

Banda E. et Correig A.M. (1984) - The Catalan Earthquake of February 2, 1428. *Engineering Geology*, 20, 89-97.

Bertil, D., Roviró J., Jara J.A., Susagna T., Nus E., Goula X., Colas B., Dumont G., Cabañas L., Antón R. et Calvet M. (2013) - Cartes de mouvement du sol ShakeMaps-Synthèse des procédures de régionalisation et de réponse rapide. SISPyR project report. European program POCTEFA (Programme Opérationnel de Coopération Transfrontalière Espagne France Andorre): FEDER Convention n°. : EFA73/08. 47p

Bossu R., Scotti O., Cotton F., Cushing M., et Levret A. (2000) - Determination of geomechanical site effects in France from macroseismic intensities and reliability of macroseismic magnitude of historical events. *Tectonophysics* 324, 81–110.

Lambert J. (2004) – Base de données SisFrance et SisFrance-Antilles, Sites internet, année 2004. Rapport final. Rapport BRGM/RP-53333-FR, 33 p.

Levret A., Backe J.C. et Cushing M. (1994) - Atlas of macroseismic maps for French earthquakes with their principal characteristics. *Natural Hazards*, 10, p. 19-46.

Martin C., Combes Ph., Secanell R., Lignon G., Carbon, D., Fioravanti A, Grellet B. (2002) - Révision du zonage sismique de la France, Approche probabiliste, Rapport GEOTER n°GTR/MATE/07/01-150.

Olea, R.A. (1999) - Geostatistics for engineers and earth scientists, *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht.

Rey J. et Dewez T. (2008) avec la collaboration de M. Imbault et J. Lambert – Carte de l'aléa sismique par l'approche statistico-historique. Rapport BRGM/RP-54983-FR, 100 pp., 44 fig., 4 tabl.

Sponheuer W. (1960) - Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik. *Freiberger Forschunghefte*, C88, 177 p.

Annexe 1 - Échelle d'intensité MSK

Historiquement, en France, l'échelle la plus communément utilisée est l'échelle MSK. C'est la première échelle à prendre en compte la diversité des types d'ouvrages. La base de données de sismicité historique SisFrance est toujours en échelle MSK¹.

Échelle d'intensité MSK (Medvedev, Sponheuer, Karnik, 1964)

Degré I : secousse non perceptible mais ressentie par les instruments

Degré II : secousse à peine perceptible, ressentie par des personnes au repos et aux étages élevés de bâtiments.

Degré III : secousse faible, ressentie de façon partielle ; balancement des objets suspendus

Degré IV : secousse largement ressentie dans et hors les habitations, tremblement des objets

Degré V : secousse forte, réveil des dormeurs, chutes d'objets, parfois de légères fissures dans les plâtres.

Degré VI : frayeur de nombreuses personnes, légers dommages, parfois fissures dans les murs.

Degré VII : dommages aux constructions, chutes de cheminées, larges lézardes dans les murs de nombreuses habitations.

Degré VIII : destructions des bâtiments, dégâts massifs de tous les types de constructions.

Degré IX : dommages généralisés aux constructions, même de bonne qualité, chutes de monuments et de colonnes.

Degré X : destruction générale des bâtiments

Degré XI : catastrophe, toutes les constructions sont détruites.

Degré XII : changement de paysage, vallées barrées, lits de rivières déplacés.

¹ Depuis 1998, une nouvelle échelle « l'Échelle Macrosismique Européenne » EMS (Grünthal, 2001) prend en compte l'évolution récente des techniques de construction. Ainsi, depuis début 2000, les enquêtes macrosismiques du BCSF sont en échelle d'intensité EMS.



Centre scientifique et technique
Direction Risques et Prévention
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34