





# Etablissement d'une base de données des intensités historiques extrapolées pour toutes les communes françaises (phase 2)

Rapport final

**BRGM/RP-64384-FR**

Décembre 2014

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2014 (Programme de travail 2014 DGPR – BRGM)

**J. Rey**

Avec la collaboration de  
**S. Auclair et D. Monfort Climent**

**Vérificateur :**

Nom : J. DOUGLAS

Date : 04/02/2015

Signature :

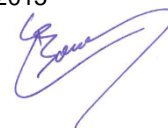


**Approbateur :**

Nom : O. BOUC

Date : 18/02/2015

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, Antilles françaises, Guyane, Mayotte, Réunion, Nouvelle-Calédonie

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

**Rey J.**, avec la collaboration de **S. Auclair et D. Monfort Climent** (2014) – Etablissement d'une base de données des intensités historiques extrapolées pour toutes les communes françaises (phase 2). Rapport final. BRGM/RP-64384-FR, 52 p., 11 fig., 4 tabl., 2 annexes.

© BRGM, 2014, 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](http://www.sisfrance.net), BRGM/IRSN/EDF), il est ainsi utile de mettre en place une base de données permettant de faire état de niveaux d'intensité présumés qui seraient occasionnés par des séismes historiques insuffisamment documentés. Chaque commune du territoire français serait ainsi mieux informée de son exposition à l'aléa sismique.

Le BRGM a mené en 2012-2013, avec le soutien de la DGPR (convention n°2200626840), une étude visant à établir dans un premier temps la faisabilité d'une telle base de données et à valider l'utilisation d'un code de calcul (Rey, 2013, rapport BRGM/RP-62941-FR). La présente étude, réalisée dans le cadre de l'action C.14 du programme de travail du BRGM, en appui à la DGPR, relatif à l'acquisition et à la diffusion de la connaissance sur les risques naturels pour l'année 2014, constitue la seconde phase de ce projet.

Des développements méthodologiques ont été apportés au code de calcul sélectionné et présenté dans la première phase de l'étude, qui réalise des interpolations des intensités observées à l'aide d'une technique de krigeage. En particulier la prise en compte des codes de fiabilités des observations et des grilles de calculs imbriquées ont été implémentées dans le code.

Des programmes informatiques ont également été créés afin d'automatiser la procédure de calcul : les intensités référencées dans la base de données SisFrance (Lambert, 2004) sont automatiquement rapatriées et converties dans un fichier d'entrée du programme. Un second programme crée ensuite des fichiers de sauvegarde de toutes les intensités observées pour un séisme donné. Le code de calcul en lui-même est ensuite utilisé pour interpoler les intensités selon la méthode de krigeage pour des grilles de calcul de tailles prédéfinies.

Cette procédure a été testée puis appliquée pour l'ensemble des séismes de la base de données SisFrance pour lesquels au moins trois points d'intensité macrosismique exploitables étaient disponibles. Pour cela la totalité de la base de données SisFrance a été utilisée, à savoir la base de données concernant la métropole mais également les bases de données satellites mises en place dans les DROM-COM (Antilles françaises, Guyane, Mayotte, Réunion et Nouvelle-Calédonie). Au final, 1891 séismes ont été considérés sur les 8498 séismes présents dans les bases de données SisFrance. Ceci

met en lumière le fait que, pour une grande proportion de séismes, un nombre restreint, voire nul, de points d'intensité quantifiée est disponible et ces événements ne sont donc pas exploitables dans le cadre de ce travail.

Ensuite, une procédure d'automatisation a été mise en place afin de générer une carte automatique des isoséistes pour un séisme donné à partir des fichiers de sortie du code de krigeage. Des cartes dites d'isoséistes sont automatiquement générées pour quelques événements sélectionnés et permettent de valider la procédure et les outils mis en place pour des événements situés en métropole et en outre-mer.

Les perspectives de poursuite de ce travail dans une troisième et dernière phase sont enfin évoquées. Il s'agit principalement de continuer à travailler sur les données d'entrée du calcul (intensités observées) et sur la mise à disposition des résultats obtenus. Selon le public visé (grand public, administration et collectivités, scientifiques) la mise à disposition des résultats devra être accompagnée d'une communication spécifique adaptée à ces publics différents.

Des perspectives d'évolutions sont ainsi proposées en ce sens et pourront faire l'objet de développements lors de la troisième et dernière phase de ce projet.

## Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Développement et automatisation de la méthode d'interpolation des intensités macrosismiques retenue pour établir les cartes d'isoséistes .....</b>	<b>11</b>
2.1. RAPPELS SUR LA METHODE D'INTERPOLATION RETENUE.....	11
2.1.1. Krigeage.....	11
2.1.2. Code de calcul .....	11
2.2. AMELIORATIONS APORTEES A LA SELECTION DES DONNEES D'ENTREE ET AU CODE DE CALCUL.....	12
2.2.1. Améliorations portant sur la définition des observations utilisables pour un séisme donné.....	12
2.2.2. Améliorations portant sur le code de calcul de krigeage.....	16
2.3. QUANTIFICATION DE L'INCERTITUDE SUR LES RESULTATS.....	20
2.3.1. Calcul d'incertitude automatique.....	20
2.3.2. Proposition d'indices automatiques de cohérence .....	21
2.4. AUTOMATISATION DES CALCULS .....	22
2.4.1. Automatisation de la sélection des points d'observation de la base de données SisFrance .....	22
2.4.2. Automatisation de la transformation de cette sélection en fichiers d'entrée pour le code de calcul .....	22
2.4.3. Automatisation du calcul de krigeage et de la sauvegarde des résultats pour tous les séismes de la base de données .....	22
2.5. AUTOMATISATION DE LA REPRESENTATION DES RESULTATS .....	23
2.5.1. Automatisation de la représentation des résultats sous forme cartographique .....	23
2.5.2. Modes alternatifs de représentation des résultats .....	25
<b>3. Génération automatique des cartes d'isoséistes.....</b>	<b>27</b>
3.1. CHOIX DES PARAMETRES DE CALCULS .....	27
3.2. TEST SUR UN SEISME AUX ANTILLES .....	27
3.3. GENERATION DES CARTES D'ISOSEISTES POUR L'ENSEMBLE DES SEISMES DE SISFRANCE .....	28
3.3.1. Caractéristiques des séismes traités .....	28
3.3.2. Traitement automatisé pour l'ensemble des séismes de SisFrance .....	30

<b>4. Résultats obtenus et perspectives</b> .....	<b>31</b>
4.1. RESULTATS OBTENUS .....	31
4.1.1.Exemples de séismes en métropole .....	31
4.1.2.Exemples de séismes aux Antilles.....	34
4.2. LIMITES OBSERVEES.....	38
4.3. BILAN SUR LA METHODE ET AMELIORATIONS POSSIBLES .....	39
4.3.1.Bilan sur l'utilisation des outils développés .....	39
4.3.2.Améliorations possibles et perspectives pour la dernière phase du projet	40
<b>5. Conclusions et perspectives</b> .....	<b>43</b>
<b>6. Bibliographie</b> .....	<b>45</b>
<b>Annexe 1 - Echelle d'intensité MSK</b> .....	<b>47</b>
<b>Annexe 2 - Exemples de cartes d'isoséistes</b> .....	<b>49</b>

## Liste des figures

Figure 1 - Test portant sur l'élimination des données nulles pour le séisme d'Arudy du 29 février 1980. A gauche, carte d'isoséistes de référence (1291 points d'observation), et à droite carte d'isoséistes en enlevant les données d'intensités nulles (1020 points d'observation). .....	13
Figure 2 - Test portant sur la transformation des données d'intensité nulle pour le séisme du Béarn (Nay-Bourdettes) du 13 décembre 1973. A gauche, carte d'isoséistes de référence avec intensités nulles, et à droite carte d'isoséistes en transformant ces intensités nulles en intensités de valeur II (attention le code couleur utilisé est différent sur les deux figures). .....	14
Figure 3 - Carte d'isoséistes de SisFrance pour le séisme du Béarn (Nay-Bourdettes) du 13 décembre 1973.....	15
Figure 4 - Test portant sur la prise en compte des indices de fiabilité pour le séisme de Remiremont du 12 mai 1682 avec introduction d'une donnée aberrante (48°N / 6°E). A gauche, carte d'isoséistes ne prenant pas en compte les indices de fiabilité, et à droite carte d'isoséistes prenant en compte ces indices. ....	17
Figure 5 - Test portant sur la prise en compte des indices de fiabilité en champ proche pour le séisme de du Béarn (Nay-Bourdettes) du 13 décembre 1973. A gauche, carte d'isoséistes ne prenant pas en compte les indices de fiabilité, et à droite carte d'isoséistes prenant en compte ces indices. ....	18
Figure 6 - Carte d'isoséistes réalisée automatiquement à partir des intensités interpolées pour le séisme du Bugey du 19 février 1822 (cercle rouge : rayon de 200 km autour de l'épicentre). .....	32



Figure 7 - Carte d'isoséistes réalisée automatiquement à partir des intensités interpolées pour le séisme du Noyonnais du 29 août 1873 (cercle rouge : rayon de 200 km autour de l'épicentre).....	33
Figure 8 - Carte d'isoséistes réalisée automatiquement à partir des intensités interpolées pour le séisme de Martinique du 11 janvier 1839 .....	35
Figure 9 - Carte d'isoséistes de référence réalisée manuellement (site <a href="http://www.SisFrance.net">www.SisFrance.net</a> ) pour le séisme de Martinique du 11 janvier 1839.....	36
Figure 10 - Carte d'isoséistes réalisée automatiquement à partir des intensités interpolées pour le séisme de Guadeloupe du 8 février 1843 .....	37
Figure 11 - Carte d'isoséistes de référence réalisée manuellement (site <a href="http://www.SisFrance.net">www.SisFrance.net</a> ) pour le séisme de Guadeloupe du 8 février 1843 .....	38

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Reclassification de l'intensité en valeur discrète .....	23
Tableau 2 - Reclassification de l'intensité en valeur discrète (par demi-niveau d'intensité).....	24
Tableau 3 - Nombre de séismes à traiter dans les différentes bases de données SisFrance .....	29
Tableau 4 - Nombre de séismes à traiter selon le nombre d'observations quantifiées disponibles (base de données SisFrance métropole : 5678 séismes au total) .....	30

## Liste des annexes

Annexe 1 - Echelle d'intensité MSK.....	47
Annexe 2 - Exemples de cartes d'isoséistes .....	49



# 1. Introduction

L'information des citoyens sur les risques majeurs est un droit inscrit dans le code de l'environnement (article L.125-2). 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](http://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, mais seulement celles où des effets ont été rapportés. 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 incomplètement documentés. Chaque commune du territoire français serait ainsi mieux informée sur son exposition au risque sismique.

Dans un premier temps une étude réalisée en 2012-2013, avec le soutien de la DGPR (convention n°2200626840), a fourni des éléments pour évaluer la faisabilité d'une telle base de données (Rey, 2013, rapport BRGM/RP-62941-FR). La seconde phase de l'étude, objet du présent rapport, s'inscrit dans le cadre de l'action C.14 du programme de travail du BRGM relatif à l'acquisition et à la diffusion de la connaissance sur les risques naturels pour l'année 2014 en appui à la DGPR. Elle consiste à développer et automatiser le code de calcul et la représentation des résultats sous forme de cartes d'isoséistes.

Dans le présent rapport les développements apportés au code de calcul ainsi que l'automatisation de la chaîne de calcul sont dans un premier temps décrits (chapitre 2). Ensuite la procédure visant à l'automatisation de la génération des cartes d'isoséistes est décrite (chapitre 3) et les résultats sont présentés (chapitre 4). Les améliorations possibles de cette méthode et les perspectives pour la réalisation de la suite de l'étude (phase 3) sont enfin listées (chapitre 4 et chapitre 5).



## **2. Développement et automatisation de la méthode d'interpolation des intensités macrosismiques retenue pour établir les cartes d'isoséistes**

### **2.1. RAPPELS SUR LA METHODE D'INTERPOLATION RETENUE**

#### **2.1.1. Krigeage**

Le code de calcul retenu effectue les interpolations selon une méthode de 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.

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. 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).

#### **2.1.2. Code de calcul**

Un code informatique adaptant cette méthode statistique a été développé par Ambraseys et Douglas en 2004. Ce code a été légèrement modifié et testé lors de la première phase de ce projet (Rey, 2013). 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 et IV).

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 épacentrale et un poids plus fort doit être attribué aux intensités les mieux contraintes. Pour cela, une fonction de corrélation spatiale est utilisée pour évaluer les intensités à chaque point de la grille de calcul. 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.

## **2.2. AMELIORATIONS APORTEES A LA SELECTION DES DONNEES D'ENTREE ET AU CODE DE CALCUL**

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

La phase 1 du projet avait permis de mettre en lumière que la sélection des données en amont du calcul en lui-même contribue de façon importante aux résultats obtenus (Rey, 2013). Ainsi plusieurs pistes avaient été identifiées pour améliorer la sélection de ces données d'entrée. Il avait été cependant noté que ce travail devait être validé par des experts de ce type de données afin de ne pas dénaturer les données. Ainsi ce travail doit être réalisé au cas par cas et il est délicat de proposer systématiquement des procédures automatiques permettant ce travail. Cependant certaines de ces pistes d'amélioration ont été étudiées et sont décrites ci-dessous.

#### ***Utilisation des données d'intensités nulles***

Des intensités nulles sont présentes dans les fichiers d'intensités observées. Ces observations indiquent que le séisme n'a pas été ressenti au point d'observation. Il s'agit d'une information intéressante mais qui est difficile à manipuler dans le cadre d'interpolations automatiques. En effet l'indication « non ressenti » peut vouloir indiquer que la plupart des personnes n'ont pas ressenti le séisme et qu'ainsi une intensité faible, sans doute inférieure à III mais pas forcément nulle, peut être estimée pour le lieu d'observation. Il est ainsi délicat de quantifier exactement l'intensité entre la valeur 0 et la valeur III, gamme d'intensités qui correspondrait en toute rigueur à ces observations indiquées comme « non ressenties ». Ceci peut avoir des conséquences importantes lors des interpolations des intensités faibles.

L'influence de ces intensités nulles a été étudiée de façon qualitative sur un exemple. Les cartes d'isoséistes automatiques ont ainsi été générées pour le séisme d'Arudy du 29 février 1980 en prenant en compte, ou non, ces intensités nulles. Les cartes automatiques générées sont présentées sur la Figure 1 ci-dessous. On note que plusieurs intensités sont indiquées comme nulles à des distances relativement faibles de l'épicentre (moins de 100 km). Afin de respecter ces intensités nulles l'algorithme utilisé introduit donc des circonvolutions complexes autour de ces points d'observations, présentant une carte d'isoséistes très découpée et peu lisible (voir figure de gauche). Quand on enlève les 271 intensités nulles du fichier d'entrée, le calcul d'interpolation automatique permet d'obtenir une nouvelle carte d'isoséistes (à droite) beaucoup plus lisible et surtout beaucoup plus proche de la carte établie à dire d'expert manuellement.

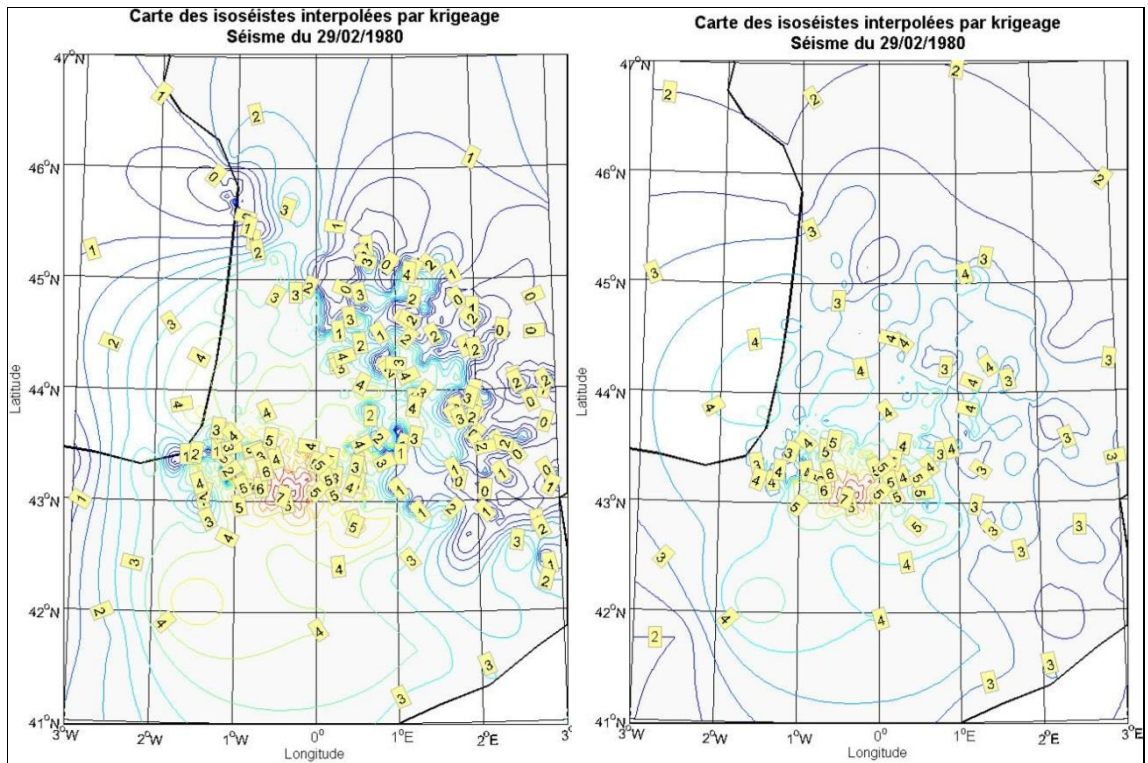


Figure 1 - Test portant sur l'élimination des données nulles pour le séisme d'Arudy du 29 février 1980. A gauche, carte d'isoséistes de référence (1291 points d'observation), et à droite carte d'isoséistes en enlevant les données d'intensités nulles (1020 points d'observation).

Une conséquence importante de ce type de manipulation est que les isoséistes sont moins bien définies à grandes distances. En effet les points d'intensités nulles à grande distance permettent de contraindre précisément les courbes d'isoséistes inférieures à III (respectivement II-III, II, I-II, I, 0-I, 0).

Une solution proposée pour remédier à cela est d'imposer qu'une intensité II soit affectée forfaitairement à ces intensités « non ressenties ». En effet les intensités les plus faibles indiquées dans SisFrance sont en général III (on note également quelques très rares intensités II-III). Ceci est logique : pour indiquer une intensité quantifiable il faut des indications telles que le séisme a été ressenti, même faiblement par une minorité d'observateurs. Ainsi toutes les intensités indiquées comme « non ressenties » sont par construction strictement inférieures à III. Cependant elles ne signifient pas non plus une intensité strictement nulle, car sinon elles ne seraient pas intégrées à SisFrance : si un inventaire des intensités nulles était systématiquement dressé, des intensités nulles seraient indiquées à Paris pour chaque séisme pyrénéen par exemple. Ces intensités « non ressenties » marquent plus vraisemblablement la limite géographique à laquelle le séisme n'a pas été ressenti, même par une minorité des habitants, et doivent en toute logique être plus faible que l'intensité III mais pas complètement nulles. Ainsi il est proposé pour le présent travail de remplacer ces intensités, qui sont quantitativement indiquées comme valant 0 dans le fichier d'entrée, par une valeur forfaitaire de II. Ceci permet de mieux caler les isoséistes à grandes

distances ainsi que de lisser les effets de ces observations à courte distance. En toute rigueur certaines de ces intensités peuvent être de I ou I-II, voire réellement 0, plutôt que II. Cependant comme les intensités inférieures à un seuil (intensité minimale à définir) ne seront sans doute pas prise en compte dans les cartes d'isoséistes produites au final, les intensités inférieures à II ne seront pas considérées et seules les formes des isoséistes sont importantes à ce stade. Ce compromis semble donc le plus acceptable pour conserver l'information apportée par ces données sans biaiser le calcul. On peut observer sur la Figure 2 ci-dessous l'effet de cette procédure pour le séisme du Béarn (Nay-Bourdettes) du 13 décembre 1973. On note qu'on ne perd pas d'information pour les zones d'intensités supérieures à III et que les isoséistes sont beaucoup plus lissées et lisibles pour les valeurs inférieures.

La carte d'isoséistes obtenue est plus proche de la carte d'isoséistes établie manuellement à dire d'expert disponible sur SisFrance (Figure 3).

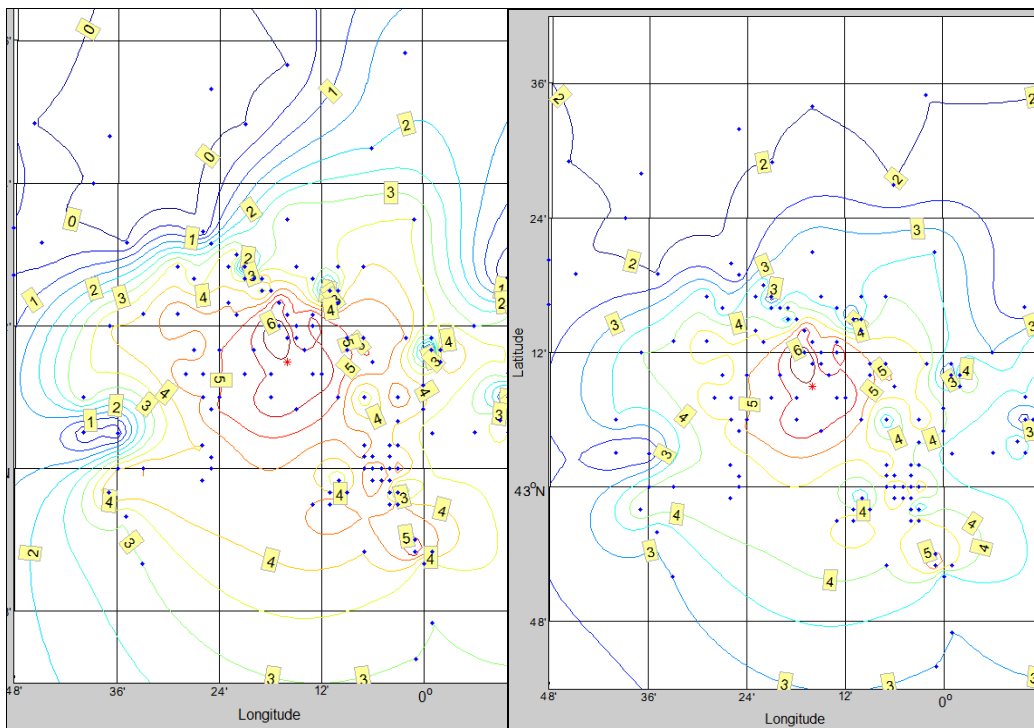


Figure 2 - Test portant sur la transformation des données d'intensité nulle pour le séisme du Béarn (Nay-Bourdettes) du 13 décembre 1973. A gauche, carte d'isoséistes de référence avec intensités nulles, et à droite carte d'isoséistes en transformant ces intensités nulles en intensités de valeur II (attention le code couleur utilisé est différent sur les deux figures).



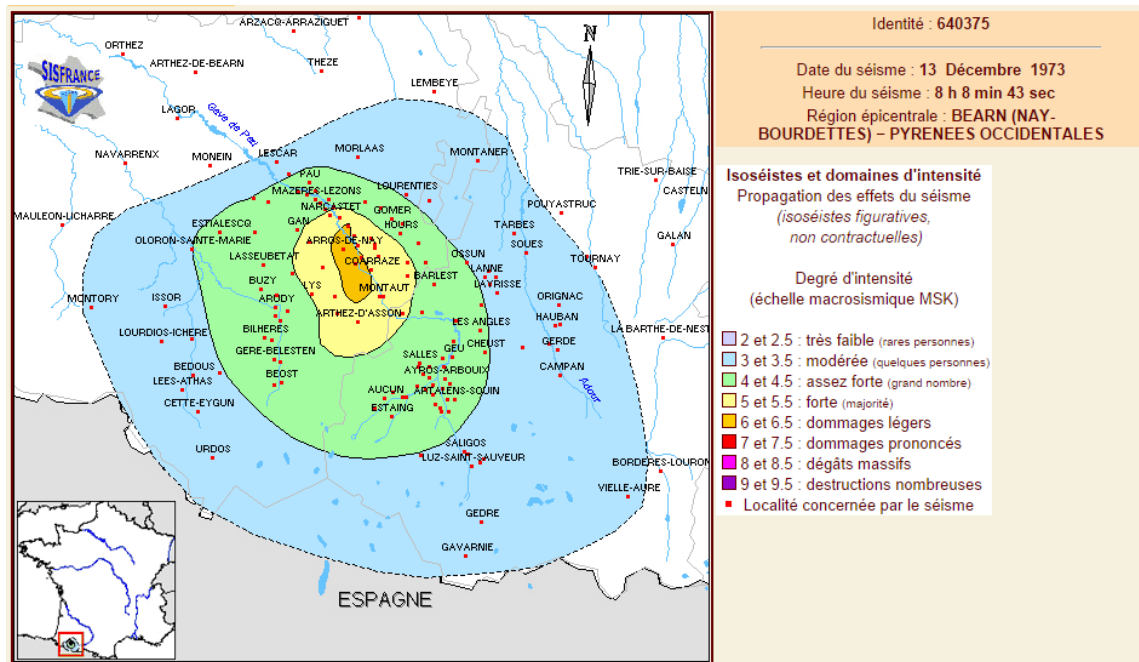


Figure 3 - Carte d'isoséistes de SisFrance pour le séisme du Béarn (Nay-Bourdettes) du 13 décembre 1973

### Quantification des intensités ressenties à grandes distances

Pour de nombreux séismes anciens des observations indiquant que le séisme a été ressenti à grandes distances sont présentes dans SisFrance. Cependant ces observations sont rarement quantifiées et sont ignorées dans le calcul d'interpolation automatique. Il est dommage de ne pas considérer ces observations qui apportent tout de même une information : s'il est indiqué dans SisFrance que le séisme a été ressenti en un lieu donné cela veut dire qu'une source le précise et donc que l'intensité doit être supérieure à III ou IV selon la période considérée. Ainsi il est envisageable d'essayer de quantifier des observations recensées comme « ressenti » en utilisant des critères de distance à l'épicentre et/ou de dates pour améliorer la précision des isoséistes en champ lointain.

Cependant ces critères doivent être établis « à dire d'expert » pour estimer à quelles distances et à quelles époques une intensité ressentie correspond plutôt à une intensité III, IV voire plus. **Ce travail n'a pas été effectué à ce stade.** En effet il conviendrait de faire plusieurs tests pour proposer une matrice de correspondance de ces intensités ressenties en fonction de la distance à l'épicentre et de la date du séisme. Une autre solution envisagée est d'estimer des intensités interpolées au lieu de ces observations pour tous les séismes de la base de données. Cela permettrait d'établir des tendances globales pouvant permettre de mieux contraindre ces paramètres. Ce travail n'a pas été effectué mais est proposé dans le cadre de la dernière phase de cette étude. En effet les intensités interpolées ont été systématiquement recensées au niveau des localités où des séismes sont indiqués

comme « ressentis » mais où l'intensité n'est pas quantifiée (voir §2.5.2). La prochaine étape consiste à traiter les informations recueillies relatives à ces intensités.

### ***Prise en compte de l'indice de fiabilité des données***

La prise en compte dans le calcul des indices de fiabilité des données pour accorder plus de poids aux données les plus fiables ou pour ne pas considérer les données les plus incertaines a été évaluée comme une piste d'amélioration possible des résultats obtenus. Cette procédure est détaillée dans le paragraphe 2.2.2 ci-dessous.

#### ***« Filtrage » automatique des données en amont***

Une dernière amélioration évoquée consistait en un « filtrage » des données pour les séismes récents et/ou avec beaucoup de données pour éliminer les données aberrantes en amont. **Aucun critère automatique n'a cependant été identifié pour réaliser cela.** En effet s'il est possible pour un expert d'identifier une donnée aberrante pour un point d'observation donné, il est impossible de proposer un critère automatique d'identification de telles données. Des effets de sites très locaux et très marqués peuvent parfois contribuer à évaluer des intensités d'un ou deux degrés plus ou moins élevées que les intensités observées aux alentours et il est impossible à ce stade d'éliminer ces données qui reposent sur un phénomène physique avéré. Un retraitement rigoureux de toutes les intensités observées, en comparant par exemple avec les résultats d'une carte d'isoséistes automatique, pourrait permettre d'identifier ces données aberrantes mais cela représenterait un travail conséquent pour l'expert impliqué.

### **2.2.2. Améliorations portant sur le code de calcul de krigeage**

Plusieurs améliorations ont été apportées au code de calcul en lui-même. Elles sont décrites ci-dessous.

#### ***Prise en compte de l'indice de fiabilité des données***

Comme indiqué dans la partie précédente, l'indice de fiabilité indiqué dans SisFrance est respectivement associé à chacune des intensités observées. Lors de la lecture des paramètres d'entrée ces indices de fiabilité sont ensuite convertis en valeurs numériques (1 pour l'indice de fiabilité 'A', 2 pour l'indice de fiabilité 'B' et 3 pour l'indice de fiabilité 'C'). Enfin lors du calcul de krigeage, le facteur 'a' qui mesure le rayon d'influence du calcul (voir Rey, 2013) est alors imposé de façon variable en fonction de l'indice de fiabilité : pour les observations fiables (indice de fiabilité 'A' dans SisFrance), le rayon d'influence est fixé à une valeur maximale. Pour une observation peu fiable (indice de fiabilité 'C' dans SisFrance), le rayon d'influence est fixé à une valeur minimale. Enfin pour une observation moyennement fiable (indice de fiabilité 'B' dans SisFrance), le rayon d'influence est fixé à une valeur intermédiaire.

Ainsi l'influence d'une donnée dans le calcul est directement liée à sa fiabilité. Ceci permet de limiter les artefacts liés à des données aberrantes indiquées comme peu fiables. Un test a été réalisé pour illustrer ceci et est présenté sur la Figure 4 ci-dessous. Un point aberrant d'intensité nulle a été introduit de façon arbitraire proche de la zone épiscopale, avec un code de fiabilité médiocre (indice de fiabilité 'C'). Ce point de coordonnées 48°N et 6°E est très apparent sur la figure de gauche (isoséistes réalisées sans prise en compte des indices de fiabilité) mais n'apparaît presque plus sur la figure de droite (isoséistes réalisées avec prise en compte des indices de fiabilité).

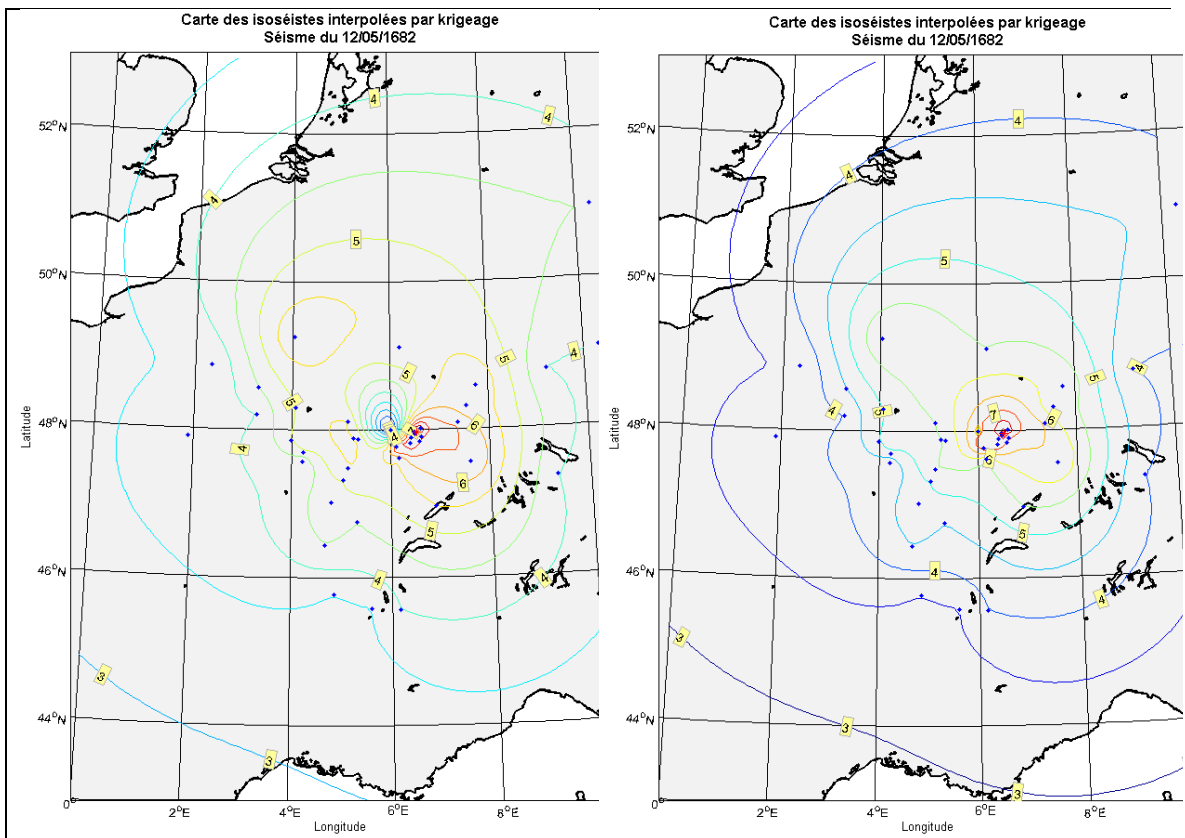


Figure 4 - Test portant sur la prise en compte des indices de fiabilité pour le séisme de Remiremont du 12 mai 1682 avec introduction d'une donnée aberrante (48°N / 6°E). A gauche, carte d'isoséistes ne prenant pas en compte les indices de fiabilité, et à droite carte d'isoséistes prenant en compte ces indices.

Cependant un artefact important est apparu lors des tests effectués : dans le cas d'un séisme pour lequel les intensités utilisées en champ proche ont un indice de fiabilité médiocre, l'interpolation automatique attribue alors dans la zone épiscopale des intensités plus fortes que les intensités les plus importantes relevées dans cette zone, et même que l'intensité épiscopale. Ceci ne semble pas être physiquement possible car même si ponctuellement une intensité plus importante que l'intensité épiscopale peut parfois être relevée (effet de site localisé en champ très proche par exemple), il serait étonnant que toute la zone épiscopale puisse subir des intensités parfois

significativement plus importantes que l'intensité épacentrale sans que cela soit noté dans les observations de SisFrance. Cette situation a été observée en champ proche pour le cas exemple du séisme de Remiremont de 1682 : en champ proche les intensités simulées (VIII-IX) peuvent être supérieures à l'intensité épacentrale (intensité VIII). On observe également ce phénomène sur la Figure 5 présentant l'exemple du séisme du Béarn (Nay-Bourdettes) du 13 décembre 1973 : en champ proche les intensités maximales simulées en cas de prise en compte des indices de fiabilité (intensités de l'ordre de VII-VIII) sont supérieures à l'intensité épacentrale et aux intensités maximales observées (intensités VI-VII). Les intensités pour la même zone en cas de non prise en compte des indices de fiabilité sont de l'ordre de VI-VII, comme l'intensité épacentrale.

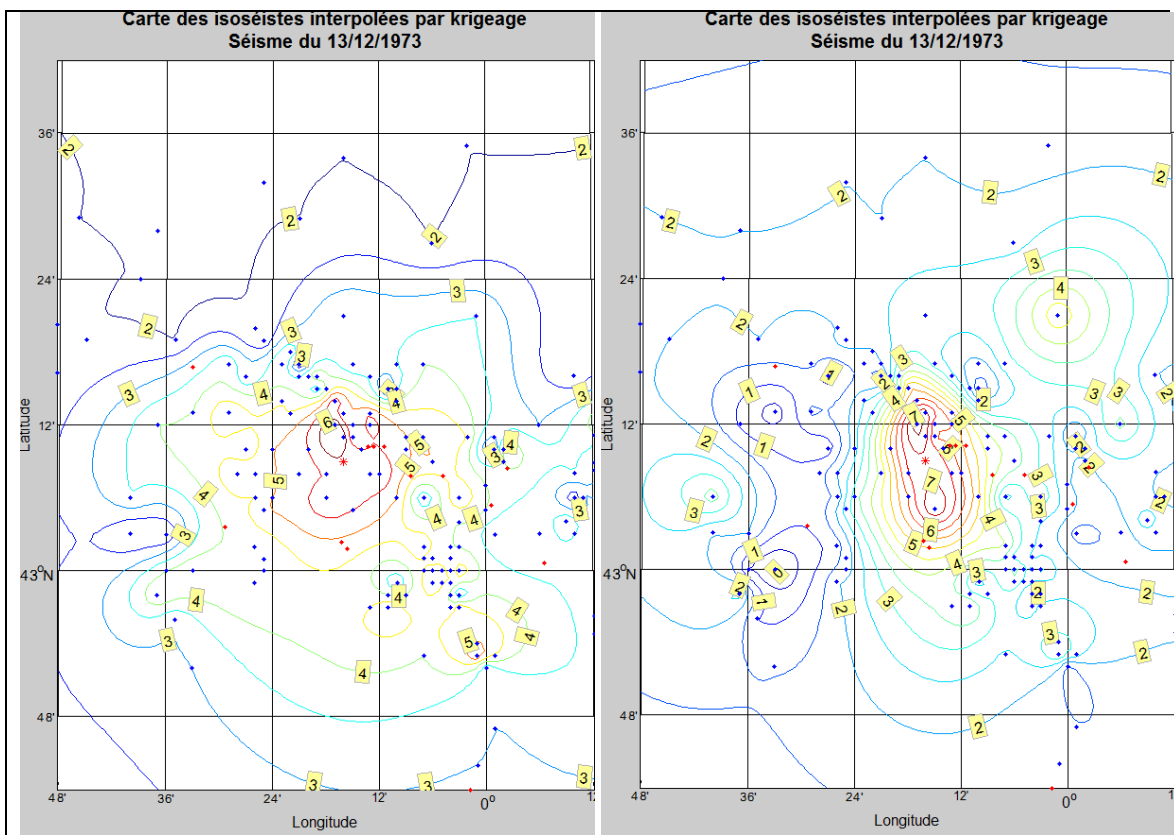


Figure 5 - Test portant sur la prise en compte des indices de fiabilité en champ proche pour le séisme de du Béarn (Nay-Bourdettes) du 13 décembre 1973. A gauche, carte d'isoséistes ne prenant pas en compte les indices de fiabilité, et à droite carte d'isoséistes prenant en compte ces indices.

Au final étant donné que les artefacts observés étaient très importants en zone épacentrale, que la raison de ces artefacts n'a pas été trouvée et qu'ils étaient potentiellement pénalisants, il a été décidé **de ne pas considérer** dans la suite de l'étude **les indices de fiabilité de façon automatique**. Une réflexion devra être menée pour évaluer comment le travail réalisé sur ce sujet pourrait être valorisé.

### ***Calcul pour des grilles de calculs imbriquées***

Il avait été noté lors de la première phase de l'étude que les temps de calcul étaient directement liés à la taille de la grille de calcul : plus la cellule de la grille est fine, plus le nombre de points de calcul est important et plus le temps de calcul également. Afin d'optimiser ce temps de calcul il a été proposé de travailler avec des grilles de calcul imbriquées. Ainsi des calculs portant sur une grille avec une imbrication de cellules de tailles différentes selon la distance à l'épicentre donnent des résultats plus précis et consomment moins de puissance de calcul.

Il a été proposé de créer une grille de calcul avec un pas très fin ( $0.01^\circ$ ) en zone épiscopale puis un pas plus large ( $0.05^\circ$ ) à l'échelle régionale et enfin un pas important ( $0.2^\circ$ ) pour le reste du territoire métropolitain. Le calcul est réalisé trois fois pour chacune de ces 3 grilles de calcul et les résultats sont stockés dans 3 fichiers distincts. Un fichier de résultats unique permet de synthétiser ces données et de réaliser ensuite la représentation graphique des cartes d'isoscistes.

Toutes les données sont prises en compte, quelle que soit la grille de restitution du calcul considérée. Ainsi les points situés hors de la grille de restitution sont également utilisés pour le calcul. Les résultats obtenus sont ainsi strictement identiques pour les points communs aux différentes grilles de calcul considérées. La seule différence concerne la densité des points de calcul qui varie selon la grille considérée.

L'emprise globale des grilles de calculs est variable selon la grille considérée. Pour la zone épiscopale l'emprise est de  $1^\circ$  en longitude et également  $1^\circ$  en latitude, centrée sur la localisation de l'épicentre, telle que fournie par SisFrance. Pour la zone régionale, l'emprise est de  $4^\circ$  en longitude et  $4^\circ$  également en latitude, centrée sur la localisation de l'épicentre. Pour la zone nationale l'emprise est fixée pour tous les calculs et couvre toute la zone d'étude (soit par exemple pour la métropole : de  $41^\circ$  à  $52^\circ$  en latitude et de  $-5^\circ$  à  $10^\circ$  en longitude).

### ***Prise en compte automatique de la profondeur du foyer***

Il avait été noté dans la phase 1 de l'étude que la profondeur indiquée pour le foyer pouvait avoir une influence sur les isoscistes simulées. Il a ainsi été envisagé de contraindre la profondeur du foyer pour chaque séisme étudié à l'aide de données disponibles ou à défaut de formules spécifiques, afin de mieux représenter l'écartement des isoscistes observé empiriquement. Cependant après consultation des données disponibles il s'avère que la profondeur du foyer est estimée pour un nombre très faible de séismes, principalement des séismes récents ayant été l'objet de campagne de mesures sur le terrain. De plus si la profondeur des séismes est liée au contexte sismotectonique elle est très variable autour d'une valeur moyenne. Pour la métropole il a ainsi été décidé d'imposer une profondeur moyenne de 7 km pour l'ensemble des séismes étudiés.

Pour les Antilles l'estimation de la profondeur est plus importante car selon le contexte (séisme crustal ou de subduction) les profondeurs des séismes considérés peuvent être très différentes. Une possibilité est d'attribuer forfaitairement une profondeur

moyenne de quelques kilomètres pour les séismes crustaux et de quelques dizaines de kilomètres de profondeur pour les séismes de subduction (interplaque ou interface).

**Ce point n'a pas été pris en compte à ce stade et devra être évalué dans la dernière phase de l'étude.**

### ***Calcul pour des points spécifiques***

Pour constituer une base de données communale dans la dernière phase de l'étude l'estimation de l'intensité interpolée devra être réalisée au préalable pour chaque commune du territoire. Une solution consiste à utiliser les grilles de calcul imbriquées produites pour les cartes d'isoséistes (voir ci-dessus). Une autre solution consiste à évaluer directement en un point donné (par exemple le centre-ville de la commune représentée par l'église ou la mairie) l'intensité extrapolée. Pour cela il faut fournir au code de calcul un fichier des points au droit desquels l'intensité doit être extrapolée. Ceci a été implémenté dans la chaîne de calcul et deux tests ont été réalisés :

- Pour chaque séisme les intensités ont été extrapolées en un lieu donné de chaque commune française (coordonnées fournies par l'IGN) ;
- Pour chaque séisme les intensités ont été extrapolées dans tous les lieux où il était indiqué dans SisFrance que le séisme avait été ressenti mais où l'intensité n'avait pas été quantifiée. Cela pourrait permettre de réaliser par la suite des statistiques au sujet de ces intensités ressenties mais non quantifiées.

### ***Quantification de l'incertitude sur les résultats***

Le calcul d'une intensité interpolée donne une information importante, cependant en un point donné l'incertitude associée à ce calcul peut être très variable selon qu'on se situe à proximité immédiate de points d'observation ou non. Un calcul automatique des incertitudes a ainsi été intégré à la chaîne de calcul. Les développements apportés en ce sens sont précisés dans le paragraphe dédié ci-dessous.

## **2.3. QUANTIFICATION DE L'INCERTITUDE SUR LES RESULTATS**

### **2.3.1. Calcul d'incertitude automatique**

L'estimation automatique d'intensités interpolées est importante mais l'incertitude associée à ce calcul est tout aussi importante. Lors de l'analyse des résultats de la première phase de cette étude est apparu le besoin de quantifier les incertitudes associées aux calculs.

Ainsi une procédure de calcul d'incertitude automatique est proposée et a été implémentée dans le code de calcul. Pour chaque point de la grille de calcul, l'algorithme délivre une valeur d'intensité estimée mais peut également fournir l'écart-type associé à ce calcul. Ainsi si le point considéré est un lieu d'observation d'une

intensité quantifiée le calcul retourne comme intensité interpolée la valeur observée et l'écart-type est nul car il n'y a pas de distribution des résultats obtenus. De même plus le point considéré est proche de valeurs imposées et moins l'incertitude est importante et plus l'écart-type est proche d'une valeur nulle. En revanche plus le point de calcul est éloigné de points d'observations, plus il est difficile de contraindre le calcul de l'intensité résultante et plus l'écart-type associé au calcul est important.

Ainsi le calcul automatique de l'écart-type associé à l'estimation de chaque intensité interpolée a été ajouté aux résultats fournis par la chaîne de calcul. Ce calcul ne prend pas en compte d'autres paramètres tels les indices de fiabilité sur les intensités observées.

### **2.3.2. Proposition d'indices automatiques de cohérence**

Des indices automatiques de cohérence des résultats pourraient être proposés. Ces indices pourraient prendre en compte l'écart-type brut calculé ainsi que la fiabilité des intensités utilisées pour le calcul.

Au vu des résultats obtenus pour quelques séismes-exemples, il ressort que les catégories suivantes pourraient par exemple être proposées concernant le calcul en lui-même :

- Ecart-type inférieur à 0,05 : interpolation très fiable ;
- Ecart-type compris entre 0,05 et 0,5 : interpolation assez fiable ;
- Ecart-type supérieur à 0,5 : interpolation moyennement à peu fiable.

En effet on estime généralement qu'une estimation d'intensité doit être réalisée pour des degrés entiers de l'échelle de mesure utilisée. Parfois des demi-degrés sont indiqués mais il s'agit alors du niveau de précision le plus fin envisageable étant donné le caractère empirique de ce type d'estimation. Ainsi il apparaît légitime de considérer qu'une estimation établie avec un écart-type inférieur à 0,5 signifie que l'incertitude maximale sur cette estimation (plus ou moins un écart-type, soit pour 84% de la distribution) est de l'ordre au global de  $0,5+0,5=1$  degré, et que la majorité de la distribution des estimations est comprise dans le même degré d'intensité, ce qui reste acceptable. C'est la raison pour laquelle pour un écart-type supérieur à 0,5 on considère que l'interpolation est moyennement à peu fiable.

Les indices de fiabilité des intensités utilisées pour le calcul et précisés dans SisFrance peuvent être pris en compte. Pour cela plusieurs possibilités peuvent être envisagées. Etant donné que pour un calcul tous les points sont utilisés, quelle que soit leur distance au point de calcul, on peut imaginer :

- La prise en compte d'un indice de fiabilité « moyen » pour chaque séisme : par exemple moyenne de tous les indices de fiabilité précisés dans SisFrance pour chaque observation ;
- La prise en compte d'un indice de fiabilité « local » pour chaque point de calcul : une moyenne des indices de tous les points situés dans un périmètre de 10, 50 ou 100 km pourrait être effectué ;

- La prise en compte d'un indice de fiabilité « local » et corrélé à la distance : une moyenne pondérée pourrait être réalisée en fonction des indices de fiabilité ainsi que de la distance des points d'observation au point de calcul.

Ensuite un indice global pourrait être proposé sur la base des deux indicateurs fournis : qualité globale du calcul d'une part et qualité des points d'observation utilisés d'autre part. Comme il sera plus aisé d'utiliser un indicateur unique l'importance relative de ces deux critères devra être mesurée afin de fournir un mode de calcul pour l'indicateur unique et global. Dans tous les cas il conviendra de fixer l'indicateur retenu dans la dernière phase de l'étude.

## **2.4. AUTOMATISATION DES CALCULS**

### **2.4.1. Automatisation de la sélection des points d'observation de la base de données SisFrance**

La base de données SisFrance est sauvegardée sous forme de bases de données Oracle sur lesquelles il est possible de faire des requêtes automatiques. Des requêtes spécifiques ont été écrites afin de générer automatiquement des fichiers d'entrée pour la chaîne de calcul. Dans ces fichiers d'entrée toutes les informations nécessaires au calcul pour l'ensemble des séismes sont extraites automatiquement de la base de données SisFrance. Ainsi pour chaque séisme sont recensées les intensités observées avec en particulier les informations suivantes : nom du lieu d'observation, coordonnées géographiques, indice de fiabilité de l'observation et valeur de l'intensité.

### **2.4.2. Automatisation de la transformation de cette sélection en fichiers d'entrée pour le code de calcul**

Le fichier des données issu de requêtes sur la base de données SisFrance est ensuite converti en fichiers individualisés pour chaque séisme à traiter. Pour chaque séisme identifié par sa clé unique (NUMEVT) les observations associées sont rassemblées dans un fichier spécifique pour ce séisme. L'ensemble des fichiers relatifs aux séismes de la base de données sont ensuite sauvegardés dans des répertoires dédiés selon leur localisation (métropole, Caraïbes, Océan Indien, Océan Pacifique). Une liste des fichiers disponibles est ensuite générée automatiquement.

Un code informatique programmé en langage Matlab<sup>®</sup> effectue automatiquement ces opérations.

### **2.4.3. Automatisation du calcul de krigeage et de la sauvegarde des résultats pour tous les séismes de la base de données**

Le code de calcul en lui-même a été complété afin d'effectuer les calculs en série sur l'ensemble des données disponibles. De même, la sauvegarde des résultats a été automatisée et est effectuée de façon automatique pour l'ensemble des séismes considérés, dans des répertoires dédiés.



Les résultats se présentent sous la forme de fichiers en format texte avec les coordonnées de la grille ou de la liste de points utilisées et les intensités interpolées correspondantes avec les incertitudes associées. Les cartes d'isoséistes peuvent être générées automatiquement à partir de ces fichiers (voir §2.5.1 ci-dessous).

## 2.5. AUTOMATISATION DE LA REPRESENTATION DES RESULTATS

### 2.5.1. Automatisation de la représentation des résultats sous forme cartographique

Le présent projet a abouti au calcul des intensités interpolées pour un nombre conséquent des séismes en Métropole et outre-mer. L'objectif n'était pas de produire un volumineux atlas cartographique avec tous les séismes traités, mais de pouvoir générer d'une manière rapide une représentation cartographique du résultat pour un séisme donné.

Un outil a été développé avec le logiciel de Système d'Information Géographique (SIG) ArcMap v10. Cet outil permet de produire une carte d'isoséistes pour n'importe quel séisme pour lequel le calcul d'interpolation d'intensités a été réalisé.

Pour représenter de façon cartographique l'intensité en dégradé couleurs on commence par convertir les fichiers en sortie de l'interpolation mathématique (grille de calcul de Matlab) en fichiers SIG vecteur (format shp).

Les résultats de l'interpolation « bruts » donnent des chiffres réels. Or l'intensité macrosismique s'exprime et se représente par des valeurs discrètes, en chiffres romains en général, et de plus on considère souvent également les demi-niveaux (VI-VII par exemple, voir Rey, 2013).

Les valeurs d'intensité obtenues sur l'ensemble du territoire sont donc reclassées en valeurs d'intensité discrètes selon l'échelle MSK (voir Annexe 1). Le Tableau 1 (par niveau d'intensité) et le Tableau 2 (par demi-niveau) montrent ci-dessous les valeurs seuils qui ont été utilisés pour faire cette reclassification.

Borne min de l'intensité calculée	Borne max de l'intensité calculée	Valeur intensité finale MSK
1,5009	2,5000	2 - II
2,5009	3,5000	3 - III
3,5009	4,5000	4 - IV
4,5009	5,5000	5 - V
5,5009	6,5000	6 - VI
6,5009	7,5000	7 - VII
7,5009	8,5000	8 - VIII
8,5009	9,5000	9 - IX
9,5009	10,5000	10 - X

Tableau 1 - Reclassification de l'intensité en valeur discrète

Valeur min	Valeur max	Valeur intensité finale MSK
1.75	2.249999	2,0 - II
2.25	2.749999	2,5 - II-III
2.75	3.249999	3,0 - III
3.25	3.749999	3,5 - III-IV
3.75	4.249999	4,0 - IV
4.25	4.749999	4,5 - IV-V
4.75	5.249999	5,0 - V
5.25	5.749999	5,5 - V-VI
5.75	6.249999	6,0 - VI
6.25	6.749999	6,5 - VI-VII
6.75	7.249999	7,0 - VII
7.25	7.749999	7,5 - VII-VIII
7.75	8.249999	8,0 - VIII
8.25	8.749999	8,5 - VIII-IX
8.75	9.249999	9,0 - IX
9.25	9.749999	9,5 - IX-X
9.75	10.249999	10,0 - X

Tableau 2 - Reclassification de l'intensité en valeur discrète (par demi-niveau d'intensité).

Si une intensité est évaluée à 5,142 en un point donné, l'intensité attribuée est V et si elle est évaluée 6,628 en un autre point, l'intensité attribuée est ainsi VI-VII.

Au final les intensités ont été reclassées dans la suite de l'étude en valeurs discrètes par demi-niveau d'intensité (Tableau 2).

Deux mises en page automatisées ont été élaborées : la première spécifiquement adaptée au contexte de la Métropole et la seconde adaptée pour les séismes outre-mer (Antilles, océans Indien et Pacifique).

- Pour les séismes de la Métropole

La fenêtre principale de la carte représente un zoom dans un rayon de 200 km autour de l'épicentre. Cette fenêtre montre la localisation de l'épicentre, les zones d'intensités (en échelle MSK) et les préfectures comme points de repère.

Une petite fenêtre est par ailleurs fixée avec le contour de la France métropolitaine. Elle localise l'épicentre et l'emprise du rayon de 200 km autour de l'épicentre.

- Pour les séismes aux Antilles, dans l'océan Indien ou le Pacifique

La fenêtre principale de la carte représente un zoom dans un rayon de 300 km autour de l'épicentre. Etant donné que les séismes antillais ont en général un rayon d'influence plus large il a été décidé d'élargir ce rayon pour la construction des cartes. Cette fenêtre montre la localisation de l'épicentre, les zones d'intensités (en échelle

MSK) et les principales villes comme points de repère. Ces villes repères sont des villes situées en territoire français mais également dans des pays voisins (c'est le cas par exemple de la Dominique et Montserrat).

Une petite fenêtre est par ailleurs fixée et montre une carte régionale avec quelques villes repères. Elle localise l'épicentre et l'emprise du rayon de 300 km autour de l'épicentre.

Cette procédure entièrement automatisée indique également en titre de la figure le nom du séisme et la région affectée selon les deux champs dédiés dans la base de données SisFrance. Pour cela le code événement de SisFrance (NUM EVT) est utilisé comme clé unique de référencement des événements. Etant donné que les résultats du calcul d'interpolation sont archivés dans des fichiers avec cette même référence dans le nom des fichiers (voir §2.4.3), un lien est automatiquement établi avec les fichiers résultats et il est possible de générer une carte d'isoséistes pour un séisme donné sans aucune intervention, directement à partir des fichiers de sorties du code de calcul.

Cette procédure n'a pas été appliquée aux 1 891 séismes traités mais uniquement testée sur plusieurs séismes représentatifs situés en Métropole (voir §4.1.1 et Annexe 2) ou aux Antilles (voir §4.1.2). Cependant il est possible de générer selon les besoins à partir de ces développements et de façon entièrement automatique une carte d'isoséistes pour un séisme donné.

### **2.5.2. Modes alternatifs de représentation des résultats**

Une cartographie sous forme d'isoséistes est, comme on a pu le constater dans ce rapport, très utile pour contrôler la pertinence des résultats obtenus, mais ce n'est pas le mode de représentation des résultats le plus simple à fournir, en particulier au grand public qui sera plus intéressé par les intensités observées et interpolées en un lieu donné (comme par exemple son lieu de résidence ou de vacances). De plus étant donné la quantité d'informations disponibles une consolidation des résultats est souhaitable pour restituer les résultats obtenus. Ainsi il est proposé de calculer pour toutes les communes françaises des intensités interpolées pour chacun des séismes de la base de données SisFrance. Les données pourront ensuite être rassemblées afin de fournir uniquement les intensités observées/interpolées pour chaque commune française.

Ainsi une proposition alternative du calcul consiste en un calcul non pas en tous points d'une grille de calcul mais au droit de chacune des communes françaises. Ce mode de représentation des résultats devra être discuté pour finaliser le mode de restitution dans la dernière phase du projet. La restitution des résultats pour toutes les communes françaises a été implémentée dans le code de calcul en ce sens.

De même, comme évoqué au §2.2.1, il peut être intéressant d'évaluer les intensités interpolées en d'autres points, tels les lieux où des observations de séismes « ressentis » sont notées mais non quantifiées. La restitution des résultats du calcul en ces points a également été implémentée dans le code de calcul en ce sens.



## **3. Génération automatique des cartes d'isoséistes**

### **3.1. CHOIX DES PARAMETRES DE CALCULS**

Les paramètres de calcul ont été définis de façon homogène pour l'ensemble des séismes traités. Pour rappel, ces paramètres sont les suivants :

- Profondeur des sources : une profondeur moyenne de 7 km a été choisie (en métropole mais également pour les autres régions) ;
- Intensités « ressenties » ignorées : toutes les observations qui indiquent qu'un séisme a été ressenti mais sans intensité quantifiée ont été ignorées (voir 2.2.1) ;
- Intensités nulles : toutes les intensités nulles ont été remplacées par une intensité II (voir 2.2.1) ;
- Pas de la grille de calcul : trois grilles imbriquées avec respectivement un pas de 0.01° en zone épiscopale puis un pas plus large de 0.05° à l'échelle régionale et enfin un pas important de 0.2° à l'échelle nationale ;
- Emprise des résultats : elle dépend de la grille de calcul. Pour la zone épiscopale l'emprise est de 1° en longitude et en latitude, centrée sur la localisation de l'épicentre. Pour la zone régionale, l'emprise est de 4° en longitude et en latitude, centrée sur la localisation de l'épicentre. Pour la zone nationale l'emprise est fixée (métropole : 41° à 52° en latitude et -5° à 10° en longitude) ;
- Intensité minimale des données : toutes les intensités ont été considérées dans le calcul d'interpolation ;
- Intensité minimale des résultats : aucun seuil d'intensité minimale n'a été appliqué à ce stade ;
- Pas de prise en compte des indices de fiabilité : en raison des artefacts observés en zone épiscopale, les indices de fiabilité des observations n'ont pas été pris en compte à ce stade (voir 2.3.2).

### **3.2. TEST SUR UN SEISME AUX ANTILLES**

La méthodologie développée a été en premier lieu testée sur des séismes ayant affecté la métropole. Cependant la base de données SisFrance comporte également de nombreuses observations dans d'autres zones géographiques du territoire français, par exemple aux Antilles.

Un test a ainsi été effectué afin de vérifier que la procédure d'automatisation mise en place était bien adaptée au contexte spécifique de l'outre-mer. En particulier les codes ont été adaptés pour prendre en compte une emprise géographique différente, des formats parfois différents dans les fichiers d'entrée (code INSEE des communes par exemple).

Les deux séismes les plus importants de la base de données ont été sélectionnés pour réaliser ce test. En effet le séisme du 11 janvier 1839 qui a touché la Martinique et le séisme du 8 février 1843 survenu proche de l'archipel guadeloupéen ont impacté l'ensemble de l'archipel antillais et même la zone Caraïbes.

Les paramètres utilisés pour le calcul de ces séismes spécifiques sont les mêmes que ceux utilisés pour les séismes métropolitains. La seule différence concerne la profondeur du foyer. Pour ces séismes de subduction une profondeur importante de 40 km a été utilisée. Cependant l'influence de ce paramètre sur les résultats est marginale car cela ne modifie que les isoséistes en champ proche qui sont situés en mer. La forme des isoséistes couvrant les zones émergées est en effet presque totalement contrôlée par les observations relevées dans l'archipel.

Les résultats obtenus sur ces deux séismes, présentés au paragraphe 4.1.2, ont permis de valider la méthodologie pour les régions outre-mer.

### **3.3. GENERATION DES CARTES D'ISOSEISTES POUR L'ENSEMBLE DES SEISMES DE SISFRANCE**

#### **3.3.1. Caractéristiques des séismes traités**

Pour effectuer des calculs, l'algorithme utilisé nécessite au moins deux données en entrée (voir Rey, 2013). De plus ces observations doivent être des intensités quantifiées pour que le calcul puisse être mené. Dans le cadre de la présente étude il a été décidé de ne traiter que les séismes pour lesquels au moins **trois intensités quantifiées** étaient disponibles. En effet il nous a semblé qu'une interpolation reposant sur deux points d'observations était soumise à des incertitudes trop importantes pour être présentée. Pour la plupart des séismes sélectionnés une intensité épiscopentrale est en outre évaluée. Cependant pour certains séismes sélectionnés (donc ayant été observés en au moins trois lieux distincts) l'intensité épiscopentrale n'est pas toujours disponible. Cela ne pose pas de problème pour le calcul en lui-même car l'intensité épiscopentrale n'est pas utilisée comme une observation. Cependant cela peut rendre difficile l'évaluation des résultats et dénote une médiocre connaissance de l'événement considéré.

Une analyse a ainsi été menée afin d'évaluer le nombre de séismes de la base de données qui pourraient potentiellement être traités. Selon les zones géographiques les résultats sont présentés sur Tableau 3 ci-dessous :

	Nombre total de séismes	Nombre de séismes avec une intensité épicentrale	Nombre de séismes ayant au moins trois observations quantifiées	Nombre de séismes ayant au moins trois observations quantifiées ET une intensité épicentrale
Métropole	5739	3114	1648	1623
Antilles + Guyane	2722	1914	210	193
Océan Indien	61	51	22	22
Océan Pacifique	92	59	11	10

*Tableau 3 - Nombre de séismes à traiter dans les différentes bases de données SisFrance*

On remarque dans ce tableau que pour une grande partie des séismes des bases de données aucune intensité épicentrale n'est disponible et/ou moins de trois observations quantifiées sont disponibles. La plupart de ces séismes sont en fait des précurseurs ou des répliques de séismes plus importants qui seront traités par ailleurs. Cependant il est également possible que certains séismes importants ne soient pas traités du fait du manque de données quantifiées pouvant les caractériser. C'est une limite importante de l'étude qu'il convient de garder en mémoire.

En particulier on remarque qu'aux Antilles, pour une très grande majorité des séismes de la base de données, peu d'intensités observées quantifiées sont disponibles. Alors que le taux est d'un séisme pouvant être traité sur trois en métropole, ce taux chute à un sur dix environ aux Antilles. Ceci reflète la connaissance très partielle de la sismicité historique dans cette partie du territoire national. Par ailleurs les séismes étant globalement de magnitudes plus importantes dans cette partie du globe qu'en métropole, il est normal qu'un plus grand nombre de répliques soient référencées après un séisme majeur. Ces répliques sont cependant en général mal identifiées en termes de sismicité historique.

Dans le Tableau 4 ci-dessous le nombre de séismes à traiter selon certains seuils en termes de nombre de données disponibles sont indiqués.

On note que seulement quelques séismes (environ 2% de l'ensemble des séismes de la base de données ayant au moins une observation quantifiée, soit à peine plus de 1% du nombre de séismes total de la base) sont très bien documentés, et comportent plus de 200 observations quantifiées. Pour la plupart des séismes traités un nombre faible voire très faible de données sont disponibles. Cette observation renforce l'utilité de générer des isoséistes automatiques pour ces séismes mal documentés car il s'agit d'un travail impossible à réaliser à dire d'expert du fait du nombre important de séismes considérés et du nombre limité de données disponibles pour chacun d'entre eux.

Nombre de séismes ayant ...	... au moins 1 observation quantifiée	... au moins 3 observations quantifiées	... au moins 7 observations quantifiées	... au moins 20 observations quantifiées	... au moins 50 observations quantifiées	... au moins 200 observations quantifiées
Métropole	3227	1626	1073	651	325	73
En % nb séismes avec au moins une observation	100%	50%	33%	20%	10%	2.3%
En % du nb total de séismes	56%	28%	19%	11%	6%	1.3%

Tableau 4 - Nombre de séismes à traiter selon le nombre d'observations quantifiées disponibles (base de données SisFrance métropole : 5678 séismes au total)

### 3.3.2. Traitement automatisé pour l'ensemble des séismes de SisFrance

La chaîne de traitement décrite dans le paragraphe 2.4 a été appliquée pour l'ensemble des séismes sélectionnés, soit pour 1 891 évènements au total (1 648 en métropole, 210 aux Antilles, 22 dans l'océan Indien et 11 dans le Pacifique).

Les intensités interpolées pour les grilles de calculs imbriquées ont été archivées ainsi que les intensités interpolées pour chaque commune du territoire national et pour tous les points où la valeur de l'intensité était inconnue (« séisme ressenti » mais intensité non quantifiée). De plus les incertitudes associées à ces résultats (écart-type sur le calcul de krigeage) ont également été précisées dans les fichiers de résultats.

A ce stade toutes les intensités ont été considérées et aucun seuil d'intensité minimale n'a été appliqué pour la restitution des résultats.

Il est ensuite possible de générer automatiquement des cartes d'isoséistes à partir de ces résultats, comme décrit dans la procédure automatique développée dans le paragraphe 2.5.1. Ce travail n'a pas été réalisé pour l'ensemble des séismes traités mais seulement pour quelques-uns d'entre eux, afin de vérifier la pertinence des résultats obtenus.

Les résultats de ces traitements automatisés sont présentés sous forme cartographique dans la partie 4 suivante ainsi qu'en Annexe 2.



## 4. Résultats obtenus et perspectives

### 4.1. RESULTATS OBTENUS

#### 4.1.1. Exemples de séismes en métropole

Les résultats obtenus pour deux séismes survenus en métropole sont présentés ci-dessous. Sur la Figure 6, la carte des isoséistes réalisée automatiquement pour un premier événement, le séisme du Bugey du 19 février 1822, est présentée. La petite fenêtre en bas à droite permet de figurer globalement les isoséistes interpolées à l'échelle de la métropole. Le cercle rouge sert de repère et indique un rayon de 200 kilomètres autour de l'épicentre.

Un travail de comparaison qualitatif et quantitatif entre les cartes d'isoséistes automatiques et les cartes établies manuellement a été réalisé pour huit séismes tests lors de la première phase de l'étude (Rey, 2013). Ainsi, l'objet de cette partie n'est pas de vérifier la pertinence de l'interpolation effectuée mais de s'assurer que toute la chaîne de calcul et de traitement entièrement automatisée est opérationnelle pour ce séisme choisi au hasard parmi les centaines d'événements survenus sur le territoire métropolitain. On note sur la Figure 6 que la carte obtenue ne semble pas présenter de points aberrants et on vérifie de même que le calque du logiciel de SIG défini pour réaliser ces cartes automatiques est pertinent.

Comme le séisme testé est un événement relativement bien connu (129 observations dont 60 intensités quantifiées), un second séisme test est choisi parmi les événements présentant peu de données quantifiées disponibles. Sur la Figure 7, la carte des isoséistes réalisée automatiquement pour le séisme du Noyonnais du 29 août 1873 est ainsi présentée. Pour ce second séisme seulement 15 observations sont disponibles dont 10 intensités quantifiées. On note parmi ces observations que neuf d'entre elles font référence à une intensité IV et une donnée à une intensité III-IV. Le traitement automatique et la représentation cartographique fonctionnent également pour ce second exemple. On note cependant que les intensités interpolées sont toutes proches de la valeur IV, quelle que soit la distance à l'épicentre. Ceci est dû au fait que le programme n'arrive pas à estimer une relation de décroissance des intensités à partir des observations, ce qui est logique étant donné que la quasi-totalité des données sont identiques (valeur IV, quelle que soit la distance à l'épicentre). L'interpolation en elle-même est donc bien cohérente et retourne une valeur constante de IV pour toute la zone. Cependant on sait que les intensités doivent normalement décroître à plus grande distance, ce qui n'est pas observé dans ce cas. Il s'agit ici d'un artefact important de la méthode utilisée. Pour corriger cela il faudrait introduire quelques intensités très faibles (I ou II) à grandes distances de l'épicentre pour « forcer » une relation de décroissance des intensités avec la distance. Des tests ont été réalisés et quatre observations supplémentaires situées de façon arbitraire aux quatre points cardinaux sont suffisantes pour cela (parfois deux ou trois points peuvent suffire). Même s'il est probable que de telles observations auraient été faites dans ce cas réel, introduire de telles données implique de modifier la composition originale de la base de

données SisFrance, ce qui n'est pas l'objet de la présente étude. Ainsi cette modification n'est pas présentée ici mais pourrait faire l'objet d'un développement futur. Une relation de décroissance forfaitaire, comme par exemple la relation de Levret (1994), pourrait également être introduite dans le calcul pour parer à ces données lacunaires. De plus un seuil d'intensité minimale (III ou IV) pourrait être proposé afin d'enlever les intensités faibles pour lesquelles des erreurs d'interpolation sont plus fréquentes que pour les intensités fortes qui sont en général mieux contraintes.

## INTENSITE\_SEISME\_10007

BUGEY (BELLEY) 19-2-1822

Carte des isoséistes estimées par interpolation selon une méthode de krigeage

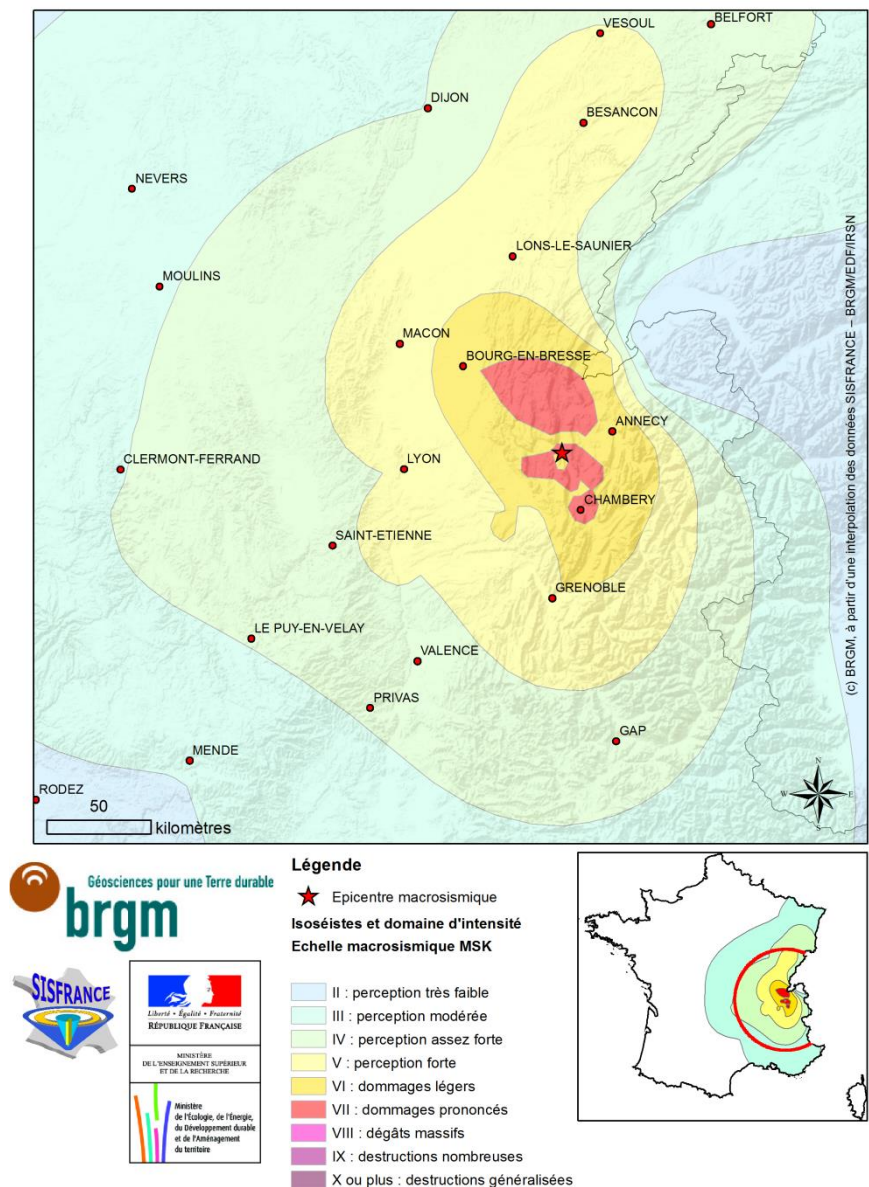
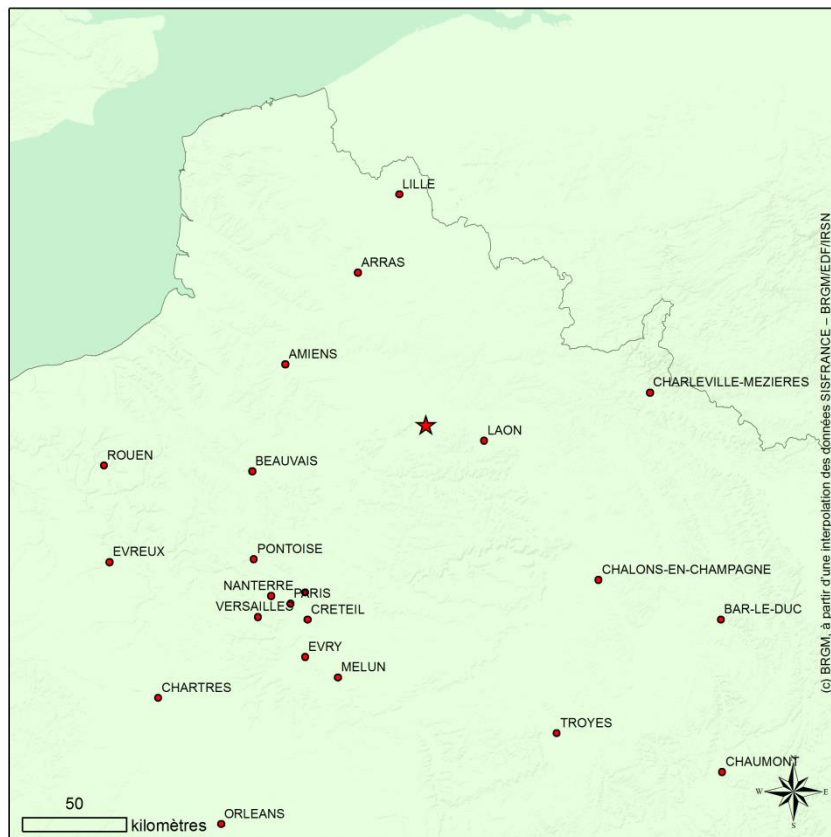


Figure 6 - Carte d'isoséistes réalisée automatiquement à partir des intensités interpolées pour le séisme du Bugey du 19 février 1822 (cercle rouge : rayon de 200 km autour de l'épicentre).

## INTENSITE\_SEISME\_20006

NOYONNAIS (CHAUNY) 29-8-1873

Carte des isoséistes estimées par interpolation selon une méthode de krigeage



### Légende

- ★ Epicentre macrosismique
- Isoséistes et domaine d'intensité**
- Echelle macrosismique MSK**
- II : perception très faible
- III : perception modérée
- IV : perception assez forte
- V : perception forte
- VI : dommages légers
- VII : dommages prononcés
- VIII : dégâts massifs
- IX : destructions nombreuses
- X ou plus : destructions généralisées

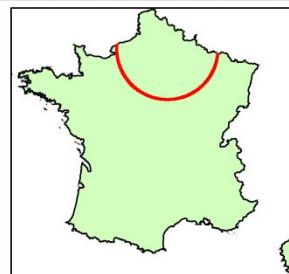


Figure 7 - Carte d'isoséistes réalisée automatiquement à partir des intensités interpolées pour le séisme du Noyonnais du 29 août 1873 (cercle rouge : rayon de 200 km autour de l'épicentre).

Dans le cadre d'un autre projet interne mené au BRGM sur la thématique de la gestion opérationnelle de crise sismique, des cartes d'isoséistes automatiques ont été réalisées pour une quinzaine de séismes du XX<sup>ème</sup> siècle à partir des résultats bruts obtenus dans le cadre de la présente étude. Les résultats ne sont pas interprétés ici. En effet cet échantillon n'est pas représentatif car il s'agit de séismes récents et relativement bien documentés. Cependant on peut noter que les résultats obtenus sont

très convaincants pour les séismes traités. Ils sont présentés à titre indicatif en Annexe 2.

#### **4.1.2. Exemples de séismes aux Antilles**

Comme indiqué au paragraphe 3.2 deux séismes ont été testés comme exemples aux Antilles. Les cartes d'isoséistes automatiques sont présentées sur la Figure 8 et la Figure 10 ci-dessous respectivement pour le séisme martiniquais du 11 janvier 1839 puis pour le séisme guadeloupéen du 8 février 1843. Des cartes d'isoséistes de référence établies manuellement et présentes dans le site internet de SisFrance sont également respectivement présentées pour comparaison sur la Figure 9 et la Figure 11.

On note une correspondance quasi-parfaite entre les cartes établies manuellement et les cartes automatiques. Les données étant assez nombreuses pour ces séismes majeurs et ne concernant qu'une petite partie de la zone d'étude (les terres émergées) ceci n'est pas très surprenant. Ce test permet cependant de valider la méthodologie pour les zones hors métropole qui n'avaient pas été testées lors de la première phase de l'étude (Rey, 2013).

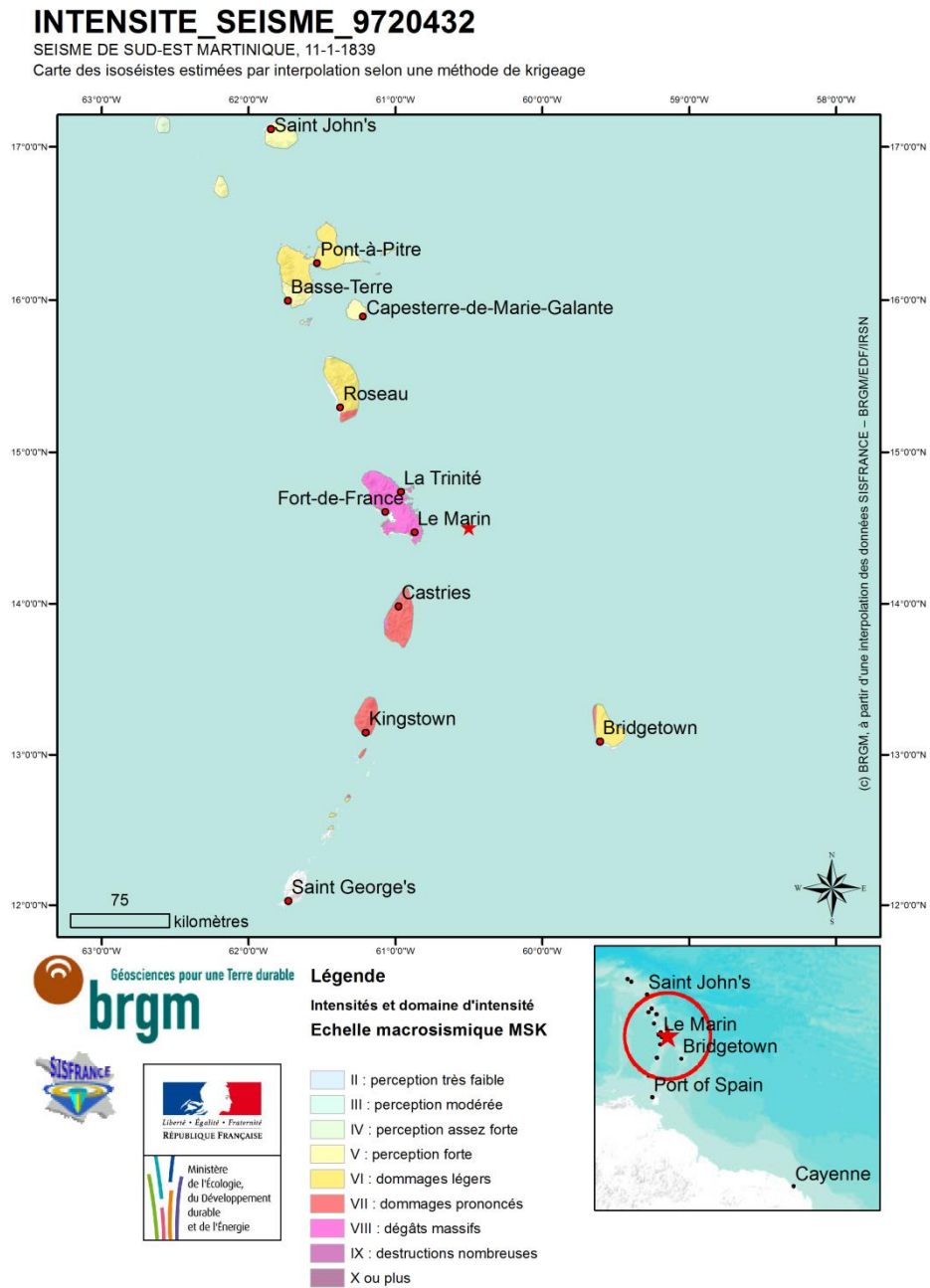


Figure 8 - Carte d'isoséistes réalisée automatiquement à partir des intensités interpolées pour le séisme de Martinique du 11 janvier 1839

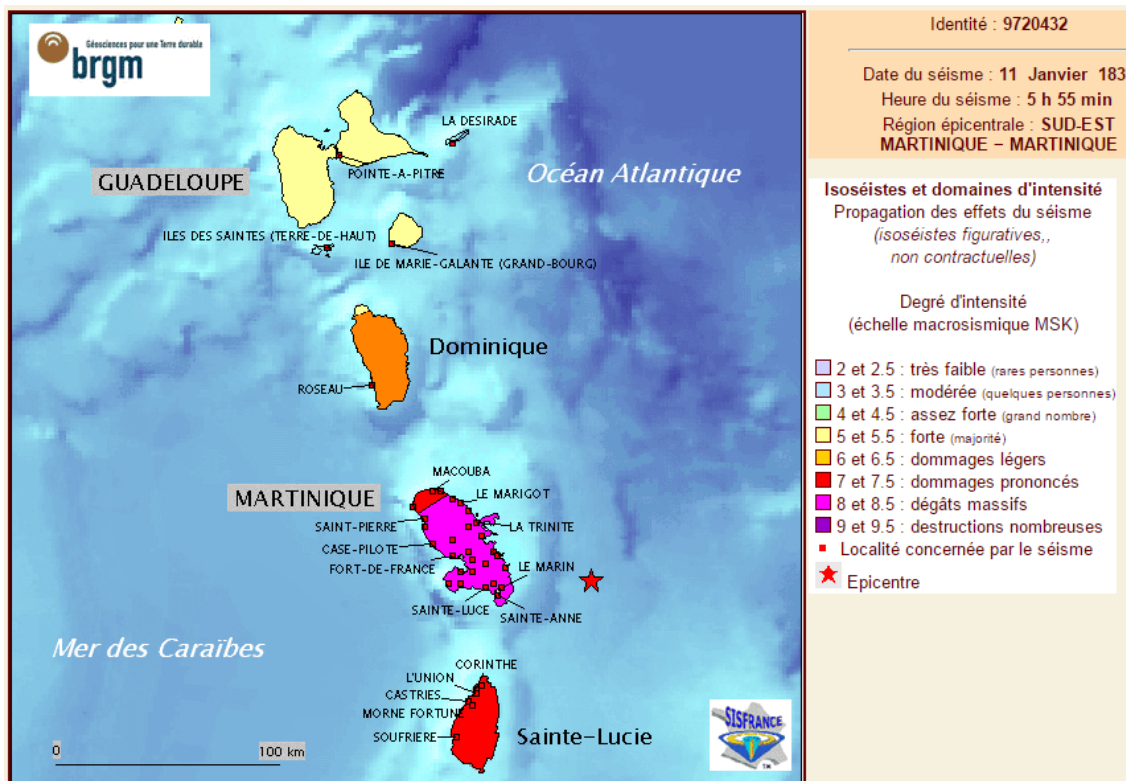


Figure 9 - Carte d'isoséistes de référence réalisée manuellement (site [www.SisFrance.net](http://www.SisFrance.net)) pour le séisme de Martinique du 11 janvier 1839



## INTENSITE\_SEISME\_97110338

SEISME DE NORD-EST GUADELOUPE, 8-2-1843

Carte des isoséistes estimées par interpolation selon une méthode de krigeage

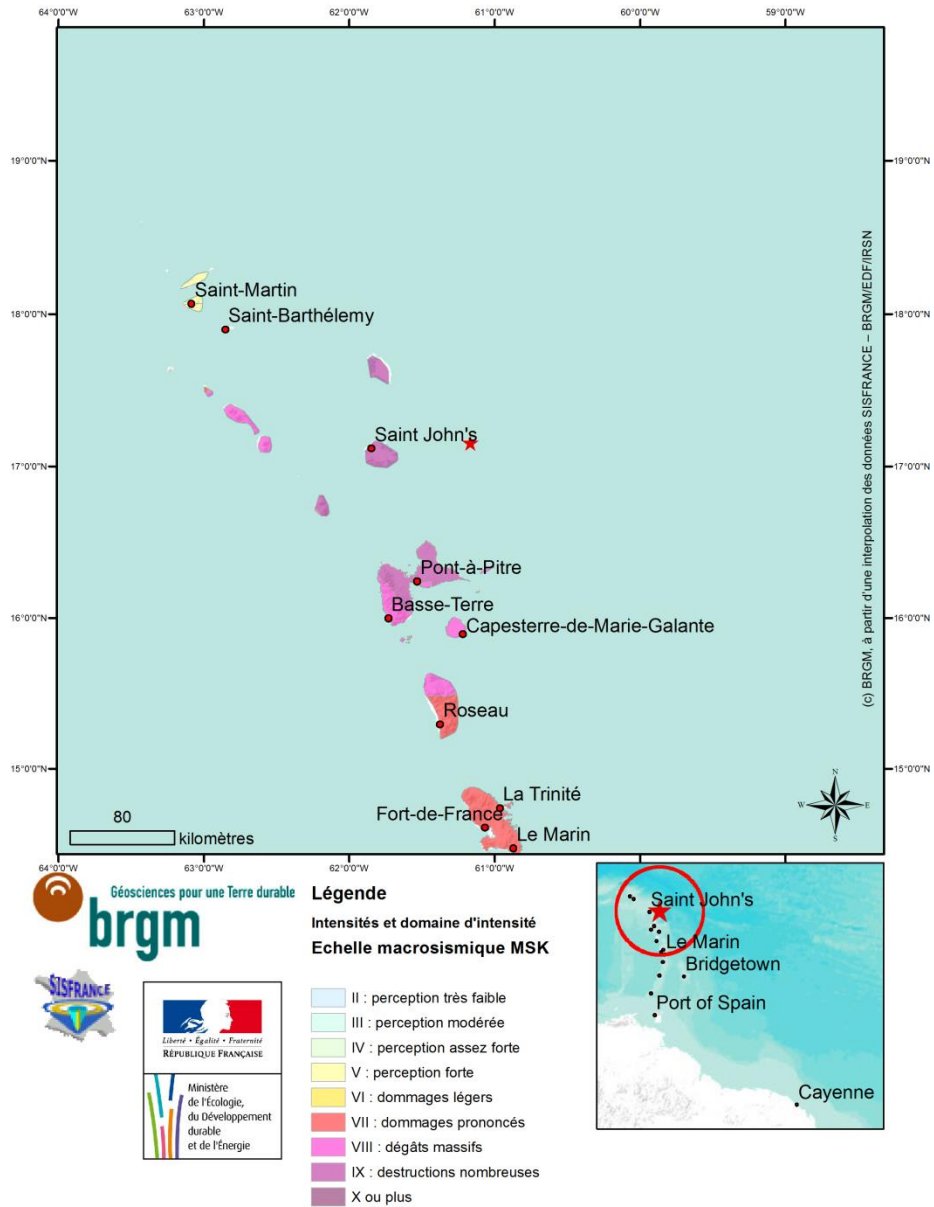
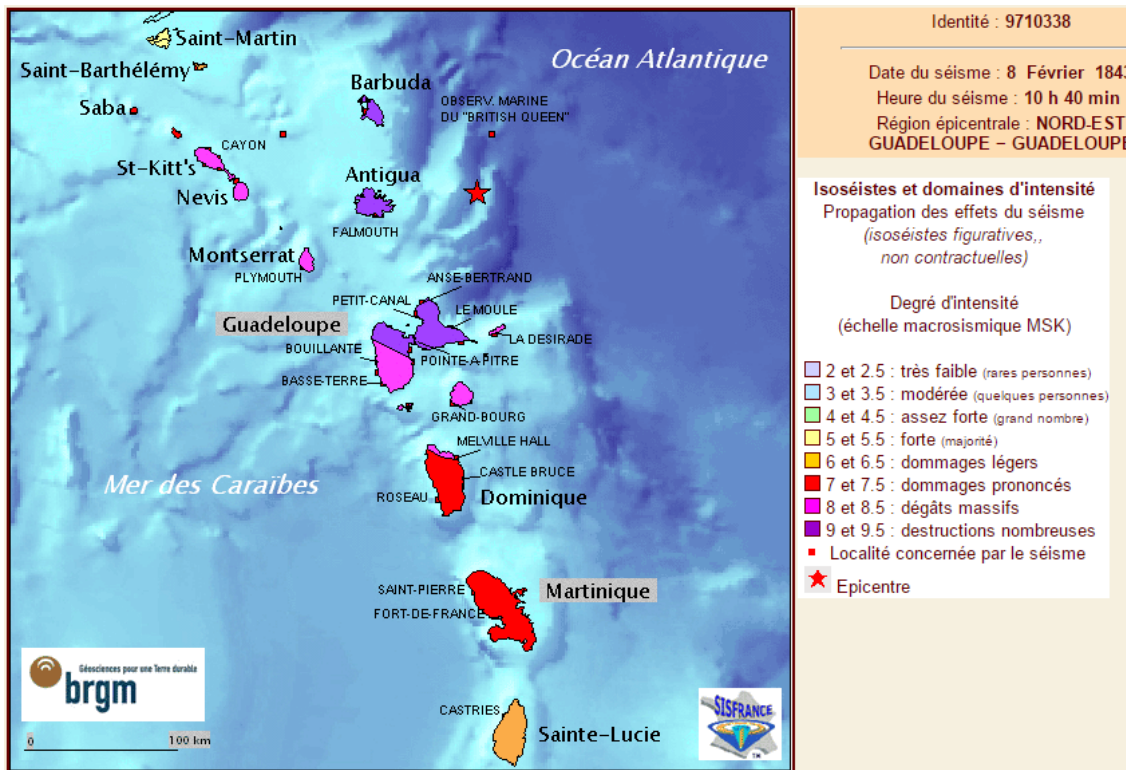


Figure 10 - Carte d'isoséistes réalisée automatiquement à partir des intensités interpolées pour le séisme de Guadeloupe du 8 février 1843



#### 4.2. LIMITES OBSERVEES

La procédure d'interpolation automatique a été appliquée à l'ensemble des séismes de la base de données disposant de plus de trois observations quantifiées. Les cartes d'isoséistes ont été représentées automatiquement pour certains d'entre eux. L'ensemble des résultats obtenus n'a pas été étudié et en particulier les cartes d'isoséistes n'ont pas été générées pour la grande majorité des séismes traités. Il est ainsi délicat d'établir un bilan exhaustif des erreurs et approximations qui auraient pu affecter tel ou tel événement. Cependant une étude attentive des résultats obtenus pour certains séismes représentatifs (métropole/Antilles, anciens/récents, peu de données/beaucoup de données, ...) permet d'établir une liste des principales limites de la méthodologie utilisée qui sont listées ci-dessous :

- Les interpolations sont très délicates voire impossibles à réaliser si moins de trois données quantifiées sont disponibles. Il s'agit de la limite la plus contraignante de l'exercice car un grand nombre de séismes de la base de données sont peu ou mal renseignés ;
- L'interpolation retourne parfois une valeur unique pour toute la zone épiscopentrale si des valeurs d'intensité différentes ne sont pas disponibles dans les données d'entrée pour contraindre la régression. Cette difficulté pour simuler la



décroissance des intensités avec la distance peut être pénalisante pour certains séismes peu importants et anciens. En effet dans le cas de séismes majeurs et/ou récents, on dispose en général de plusieurs intensités différenciées situées à des distances variables de l'épicentre ;

- De nombreuses intensités sont indiquées comme « ressenti » mais ne sont pas quantifiées, limitant ainsi le calcul automatique de l'interpolation. Cela représente même parfois la majorité des données dans des cas spécifiques (séismes frontaliers par exemple) ;
- L'utilisation des indices de fiabilité indiqués dans SisFrance peut donner des résultats aberrants en champ proche, les intensités interpolées étant parfois largement supérieures à l'intensité épiscopentrale estimée.
- Les interpolations sont globalement moins fiables à grandes distances car les données sont alors moins denses et moins fiables puisque les intensités observées sont alors plus faibles.

### **4.3. BILAN SUR LA METHODE ET AMELIORATIONS POSSIBLES**

#### **4.3.1. Bilan sur l'utilisation des outils développés**

Au vu des exemples présentés ci-dessus, ainsi que d'autres exemples qui ne sont pas présentés, un bilan peut être tiré concernant d'une part le code de calcul en lui-même et d'autre part la représentation des données.

Concernant le code de calcul les résultats obtenus correspondent à ce qui était attendu d'un tel code. L'interpolation s'effectue correctement quand les données sont fiables et assez nombreuses. Certains paramètres peuvent être affinés (telle la profondeur des séismes par exemple) pour améliorer encore l'interpolation effectuée. Cependant le code en lui-même ne semble pas présenter d'artefacts particuliers.

Concernant la méthodologie de représentation des données elle est parfaitement adaptée. Elle permet en effet de représenter automatiquement les cartes des isoséistes sur la base des résultats bruts obtenus. Par ailleurs d'autres modes de représentations des résultats sont possibles et l'exploitation des résultats ne se résume pas à ces cartes automatiques.

Les principales améliorations possibles dans les résultats obtenus portent, comme cela avait déjà été noté en conclusion de la première phase de l'étude, sur la sélection et l'enrichissement des données d'entrée. Ainsi les développements présentés au paragraphe 2.2.1 pourraient être menés pour compléter les données quantifiées disponibles qui peuvent être parfois peu nombreuses pour des séismes peu documentés, qui sont en général des séismes anciens. Ces améliorations sont listées et développées ci-dessous.

#### **4.3.2. Améliorations possibles et perspectives pour la dernière phase du projet**

Plusieurs améliorations sont possibles concernant en amont du calcul la sélection des données. Ces améliorations étant indépendantes de la chaîne de calcul en elle-même elles pourront être réalisées après la fin de ce projet. Il suffira ensuite de refaire des interpolations avec le code de calcul sur les séismes dont les données auront été enrichies. La plupart de ces améliorations ont été identifiées dans le paragraphe 2.2.1. On peut citer l'utilisation des intensités épicentrales, l'utilisation des données ressenties mais non quantifiées, l'introduction artificielle de données de faibles valeurs d'intensité à grande distance ou la simulation d'une décroissance moyenne, qui rendrait un calcul possible avec une seule donnée (intensité épicentrale ou une observation).

Les principales améliorations possibles portent sur le mode de mise à disposition des résultats obtenus. Une réflexion doit être menée pour cela en préalable à la réalisation de la dernière phase du projet, prévue pour l'année 2015. Les résultats peuvent en effet être présentés sous forme de cartes d'isoséistes mais également sous la forme de catalogue des intensités potentiellement ressenties en un lieu donné. Une base de données des intensités à destination des scientifiques est envisageable mais pour le grand public une restitution sous forme d'un outil en ligne sur un site internet semble plus pertinente. Cela permettrait sans doute une meilleure appréhension du risque sismique localement.

Ainsi un travail important à mener dans la dernière phase du projet portera sur la communication auprès des différents publics concernés (grand public, administration et collectivités, scientifiques), sur la mise en ligne d'un outil en ligne ainsi que sur le travail scientifique ayant mené à cette réalisation.

En conclusion, les principales tâches proposées pour la dernière phase de l'étude sont les suivantes :

- Ajustement des paramètres de calcul sur les séismes exploités ;
- Réflexion sur la valorisation des données concernant les séismes non exploités ;
- Calcul d'un indice de fiabilité associé à chaque intensité communale extrapolée ;
- Constitution de la base de données communale des intensités extrapolées et des indices de fiabilité associés pour les communes métropolitaines et dans les DROM et collectivités concernées (Martinique, Guadeloupe, Guyane, Réunion, Mayotte, Nouvelle-Calédonie) ;
- Définition du format informatique compatible avec l'outil utilisé pour la mise à disposition des données en ligne (standard WMS, Web Map Service de l'OGC, Open Geospatial Consortium) et mise en forme de la base de données dans ce format ;
- Réalisation de l'interface graphique et de l'outil d'interrogation en ligne ;

- Tests sur le site de recette, rédaction des textes explicatifs (mode d'emploi, méthode d'élaboration de la base de données, limitations d'usage, ...) et mise en production de l'outil ;
- Actions de valorisation des résultats de l'ensemble des trois phases du projet différenciées selon le public visé.



## 5. Conclusions et perspectives

La DGPR et le BRGM ont envisagé la constitution d'une base de données des intensités macrosismiques potentiellement ressenties en France, en extrapolant les données archivées dans la base de données SisFrance (BRGM/IRSN/EDF). La présente étude, réalisée dans le cadre de l'action C.14 du programme de travail du BRGM, en appui à la DGPR, relatif à l'acquisition et à la diffusion de la connaissance sur les risques naturels pour l'année 2014, constitue la seconde phase de ce projet global initié en 2012.

Au cours de cette seconde phase du projet, une procédure a été testée. Elle consiste à générer automatiquement des fichiers d'entrée des intensités observées puis de faire un calcul d'interpolation selon une méthode de krigeage et enfin de représenter automatiquement les résultats obtenus sous forme de cartes d'isoséistes. Cette chaîne de traitement a ensuite été appliquée pour l'ensemble des séismes de la base de données SisFrance pour lesquels au moins trois points d'intensité macrosismique exploitables étaient disponibles (en métropole et outre-mer), soit au final 1 891 séismes sur les 8 498 séismes présents dans les bases de données SisFrance. Ceci met en lumière le fait que pour une grande proportion de séismes pas ou peu de points d'intensité quantifiée sont disponibles et ces événements ne sont donc pas exploitables dans le cadre de ce travail.

Des cartes dites d'isoséistes sont automatiquement générées pour quelques événements sélectionnés et permettent de valider la procédure et les outils mis en place pour des événements situés en métropole mais également en outre-mer.

Les perspectives de poursuite de ce travail dans une troisième et dernière phase sont de continuer à travailler sur les données d'entrée du calcul (intensités observées) et sur la mise à disposition des résultats obtenus. Selon le public visé (grand public, administration et collectivités, scientifiques) la mise à disposition des résultats devra être accompagnée d'une communication spécifique adaptée à ces publics différents.

Des perspectives d'évolutions sont ainsi proposées en ce sens et pourront faire l'objet de développements lors de la troisième et dernière phase de ce projet.



## 6. Bibliographie

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

**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.

**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, 75 p., 40 fig., 2 tabl., 1 annexe.





## Annexe 1 - Echelle 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 MSK<sup>1</sup>.

### Echelle 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** : Destructures 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.

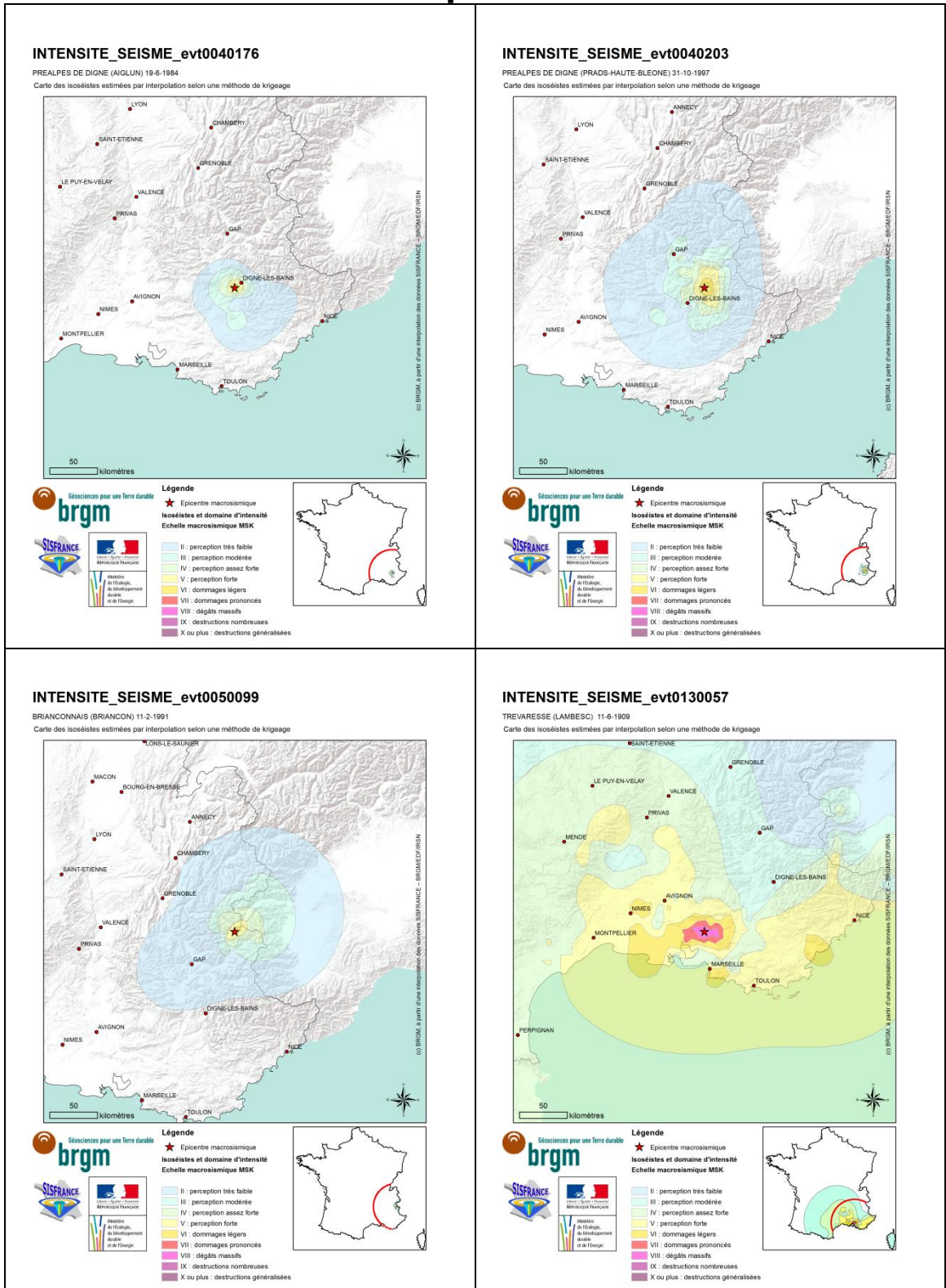
**Degré XII** : Changement de paysage, vallées barrées, lits de rivières déplacés.

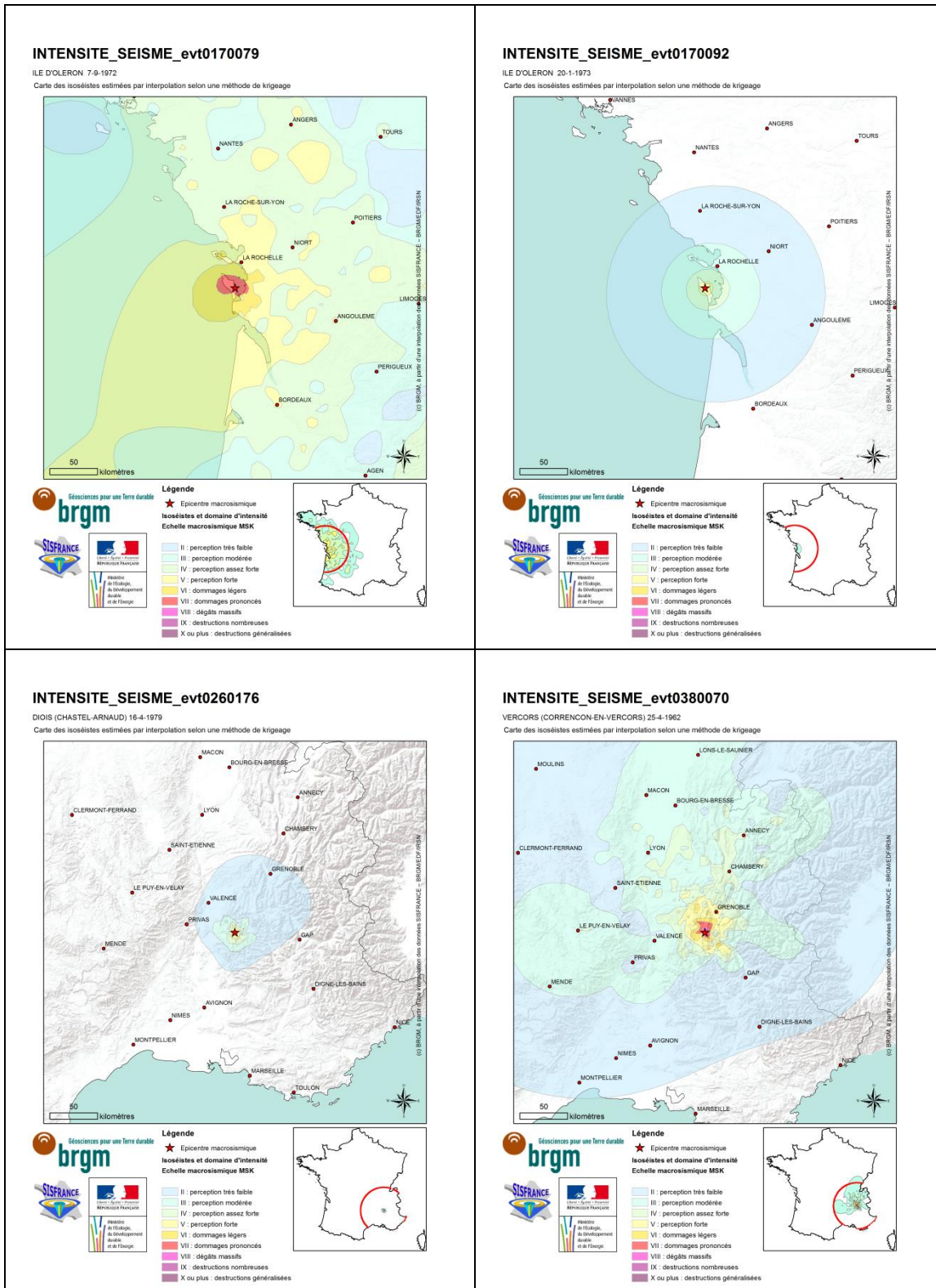
---

<sup>1</sup> Depuis 1998, une nouvelle échelle « l'Echelle 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.

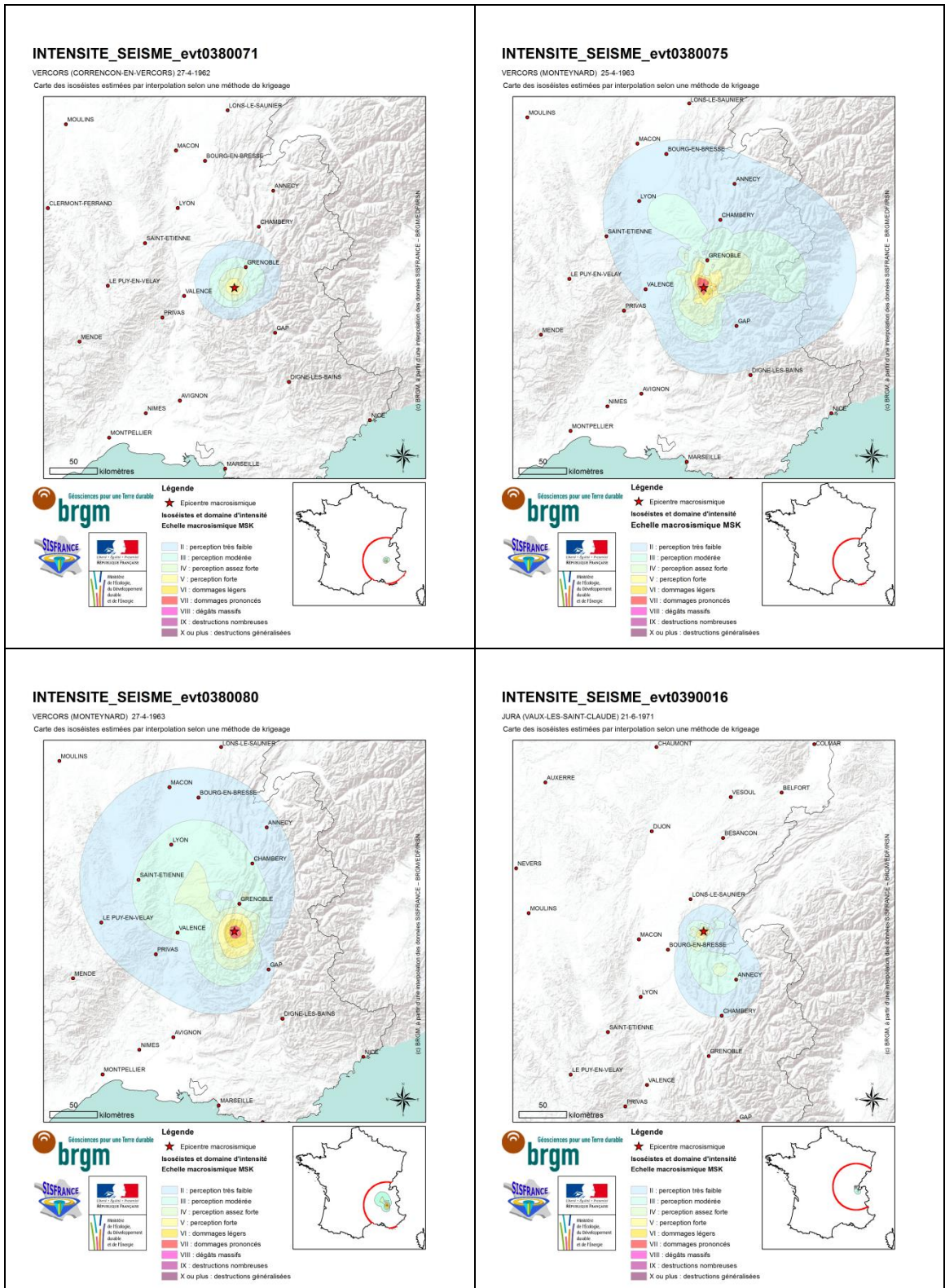


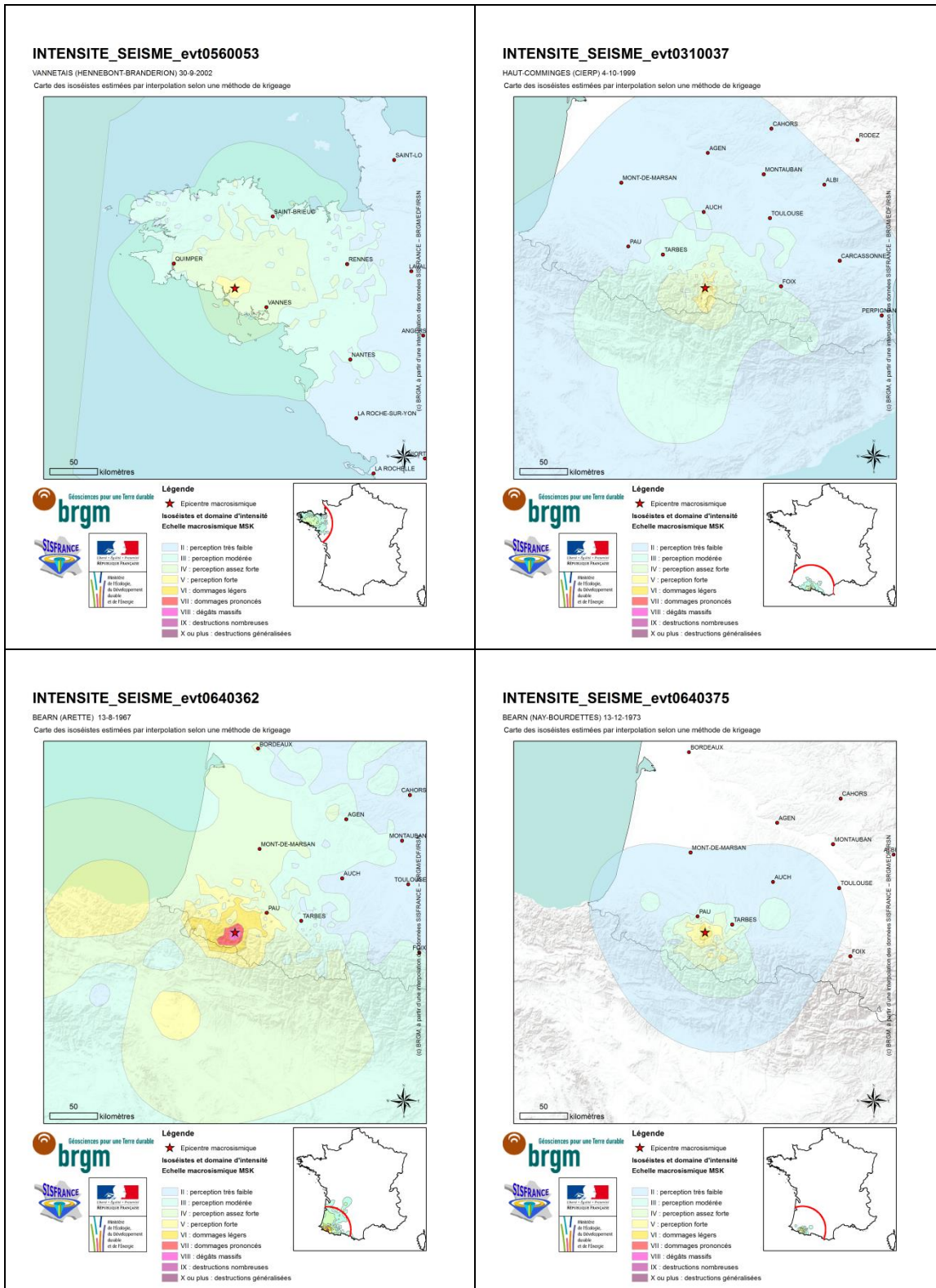
## Annexe 2 - Exemples de cartes d'isoséistes













**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