Evaluation de l'aléa sismique

De la sismicité historique à la sismicité instrumentale

Journées thématiques: Risque Sismique

Europôle de l'Arbois

Aix en Provence

10/10/2014

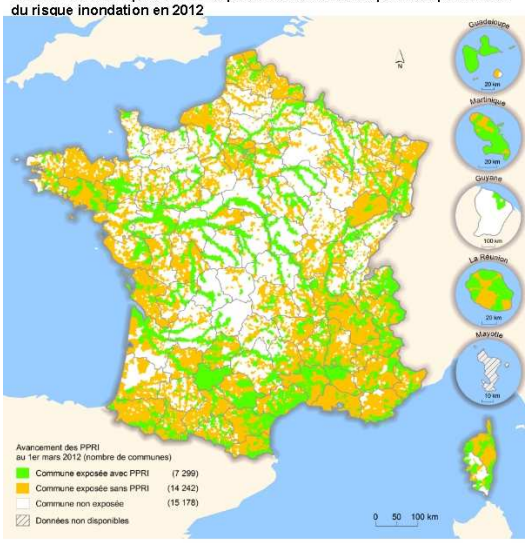
Présenté par O. Scotti

Préparé en collaboration avec le PRP-DGE/SCAN - BERRSIN

Système de management de la qualité IRSN certifié

L'inondation - le risque majeur en France

Les communes exposées au risque d'inondation et les plans de prévention du risque inondation en 2012



Source : MEEDDM, Gaspar, mars 2012 - © IGN, BD Carto® limites communales, 2006

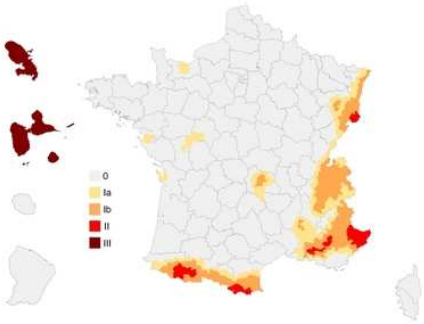
Inondations - Plus de la moitié du coût des sinistres sur les 20 dernières années :

Coûts estimés de quelques crues historiques en France

- 6 milliards d'euros : la crue de la Loire en 1856 (300 000 personnes concernées)
- 1,4 milliards d'euros : la crue de la Seine en 1910 (200 mm de précipitations pendant 3 jours pour des débits de la Seine de 2400 m3/s)
- 1,2 milliard d'euros : la crue du Gard en septembre 2002
- 1,5 milliard d'euros : le débordement de nombreux cours d'eau (dont le Rhône, la Loire, le Tarn, le Lot, l'Aveyron...) en décembre 2003

Le séisme – un risque qui n'a pas beaucoup marqué les mémoires..

Zonage sismique en vigueur de 1991 à 2011



- Le dernier séisme meurtrier, d'une magnitude supérieure à 5, s'est produit à Arette (Pyrénées-Atlantiques) le 13 août 1967, faisant un mort et plusieurs blessés et détruisant 340 maisons.
- Il y a près d'un siècle, en juin 1909, un tremblement de terre avait causé la mort de 50 personnes dans la région de Salon-de-Provence (Bouches-du-Rhône).

..et perçu comme tellement faible en France métropolitaine…

Les normes sismiques là où la Terre n'a jamais tremblé.

Par application du décret du 22 octobre 2010, depuis le 1er mai 2011, une nouvelle réglementation antisismique est applicable aux nouvelles constructions dans des zones qui n'ont jamais connu de secousses sismiques.

Une ville comme Le Mans, dont l'histoire sismique reste dans toutes les mémoires., se voit imposer des normes constructives plus draconiennes (chaînages et ferraillages plus importants, sections des structures potentiellement plus grandes…). Le surcoût estimé est de l'ordre de 1 à 5 % suivant le type d'édifice (source : Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie).

Pour un collège en construction sur la Ville du Mans, le redimensionnement des fondations représente un surcoût de 100 000 € pour les classes et de 60 000 € pour le restaurant (art R.431-16-9 du Code de l'Urbanisme).

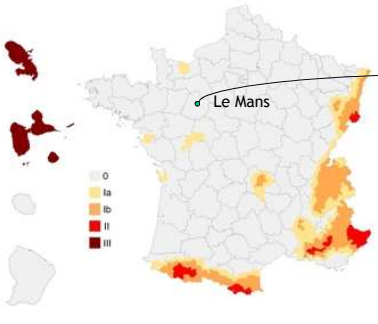
Il est proposé d'abroger les contraintes antisismiques là où la terre n'a jamais tremblé.

Alain Lambert,
Ancien Ministre
Président du Conseil Général de l'Orne
Président de la Commision Consultative d'Évaluation des Normes

Jean-Claude Boulard,
Maire du Mans
Président de Le Mans Métropole
Président de la Commission des Finances de l'AMGVF
Conseiller d'État Honoraire

Evolution du zonage sismique français

Zonage sismique en vigueur de 1991 à 2011



Zonage sismique en vigueur depuis le 1er mai 2011

20 années sont passées!!

Objectif de la présentation

1. Introduction

2. Que savons-nous sur les séismes ressentis par le passé en métropole?

   - Séismes historiques
   - Séismes instrumentaux
   - Catalogue de sismicité homogène en magnitude + incertitude

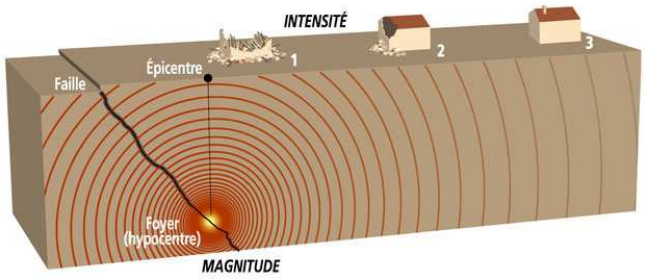
3. Quelles approches pour estimer les mouvements sismiques futurs?

   - Approche déterministe + incertitude
   - Approche probabiliste + incertitude

4. Complémentarité des approches

5. Perspectives

Quelques définitions - séisme



- Un séisme est le déplacement brutal de blocs de part et d'autre d'une faille suite à l'accumulation au fil du temps de forces autour de la faille.
- Après la secousse principale, il y a des répliques, parfois meurtrières, qui correspondent à des réajustements des blocs au voisinage de la faille.
- L'importance d'un séisme se caractérise par deux paramètres : sa magnitude et son intensité.
- Ne pas confondre magnitude (énergie du séisme) et intensité qui dépend de la position des observateurs.

http://www.risquesmajeurs.fr/le-risque-sismique

Quelques définitions - intensité

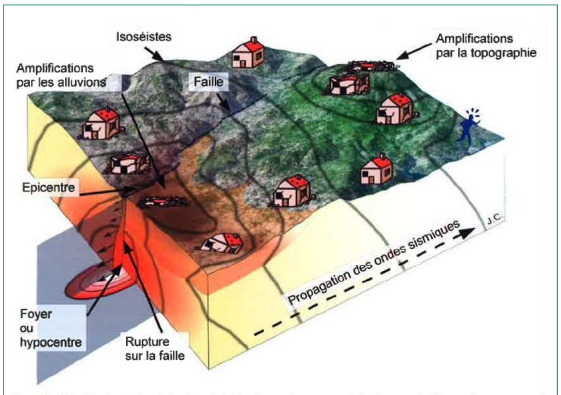
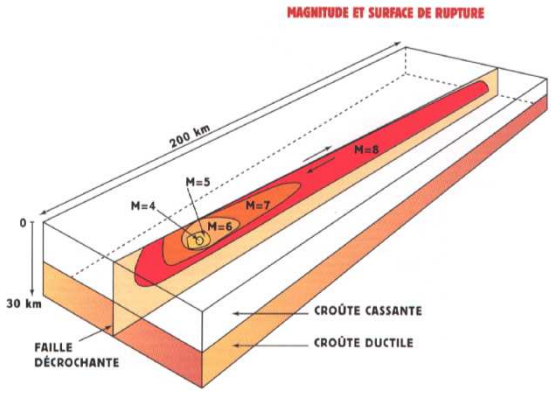


Figure 01-001 - Représentation schématique de la décroissance du mouvement sismique avec la distance. En se propageant vers la surface, les ondes sismiques s'atténuent par effet géométrique et par amortissement dans les roches. Elles portent la marque de la complexité de la rupture et du milieu géologique traversé. En surface, les zones d'accumulation sédimentaires (alluvions par exemple) dont les caractéristiques géotechniques sont faibles (sédiments mous, saturés en eaux) piègent les ondes sismiques qui y «résonnent» amplifiant de ce fait le mouvement en surface. Ce phénomène est appelé effet de site. Il existe aussi un effet de site lié au piégeage des ondes sismiques dans une topographie marquée. Les dégâts ou la perception des effets sont d'autant plus marqués que la distance au foyer est faible.

- L'intensité mesure les effets et dommages du séisme en un lieu donné. Ce n'est pas une mesure par des instruments, mais une observation de la manière dont le séisme se traduit en surface et dont il est perçu.
- On utilise habituellement les échelles EMS 98 ou MSK, qui comportent douze degrés (I à XII).
- le début de dégâts notables correspond à l'intensité VI

Monographie Manosque, 2014

Quelques définitions - magnitude



- La notion de magnitude a été introduite par Richter en 1935. La magnitude n'est pas une échelle mais une fonction continue qui peut être négative et qui en principe n'a pas de limites.
- En réalité, sa valeur minimale est limitée par la sensibilité des sismographes, tandis que sa valeur maximale dépend de la longueur de la faille susceptible de se fracturer d'un seul coup.

Un séisme de magnitude 5 libère 32 fois plus d'énergie qu'une magnitude 4

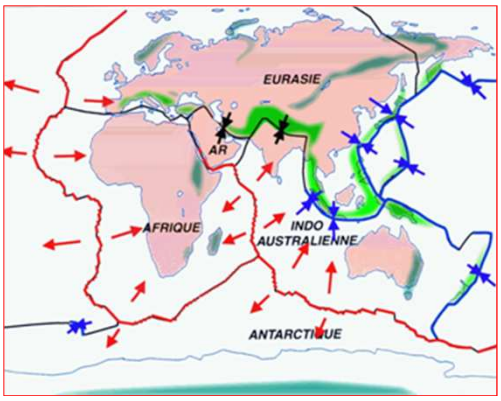
Monographie Manosque, 2014

Paradigme actuel

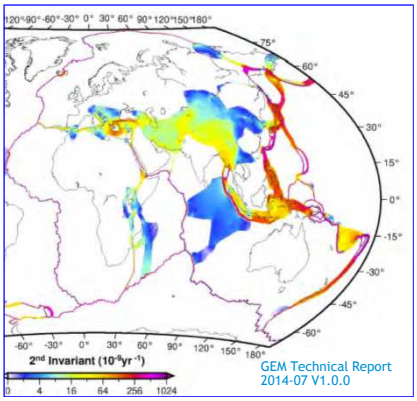
La tectonique de plaque - principal moteurs de la déformation de la croûte terrestre

Cependant, de la déformation est aussi observée loin des limites de plaques

Carte des frontières des plaques tectoniques



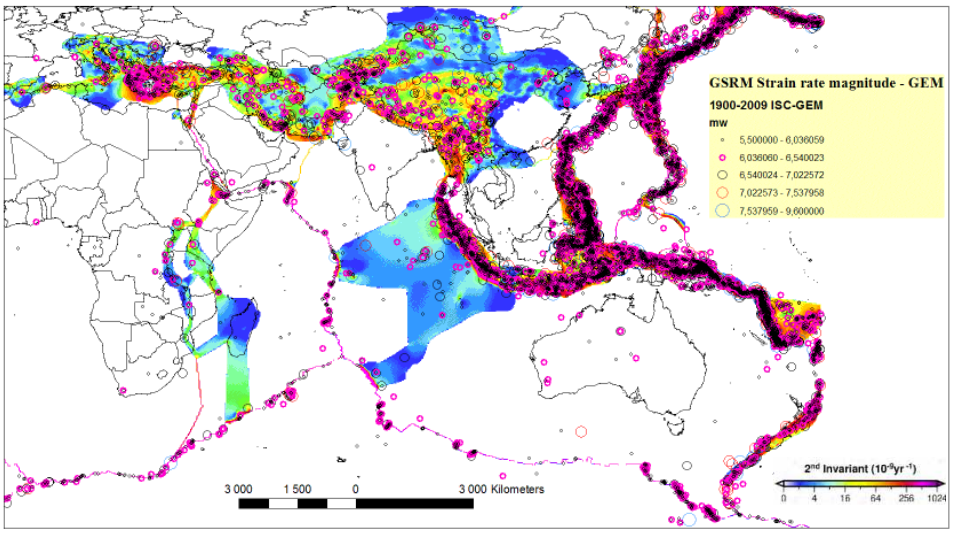
Carte des taux de déformation (données GPS)



GEM Technical Report 2014-07 V1.0.0

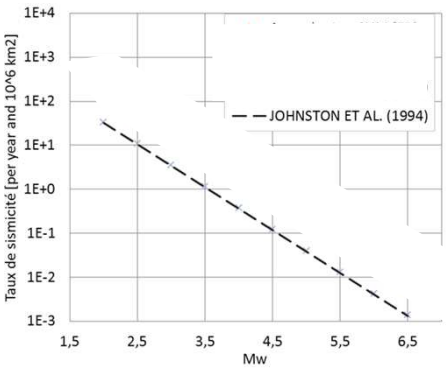
L'activité sismique peut avoir lieu aussi loin des frontières de plaques

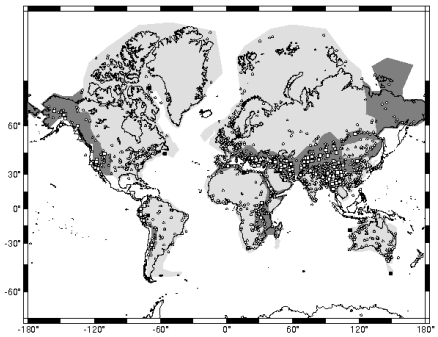
… des séismes de magnitude importante ont eu lieu dans des zones à très faible déformation (zones blanches et bleues)



Taux de sismicité dans les zones à faible sismicité (zones grisées)

Régions en grisées = zones « stables »





Une séisme de M>=6.5 a eu lieu dans des zones à très faible déformation environ tous le 1000 ans par million de km^2

La sismicité en France métropolitaine est considérée faible à modérée

➔La période de retour des événements sismiques majeurs est bien **supérieure** à la période d'observation

➔L'estimation de leur taille maximale possible et de leur localisation future demeure très incertaine

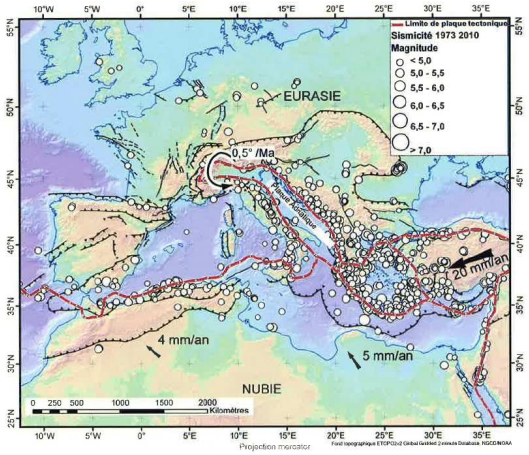
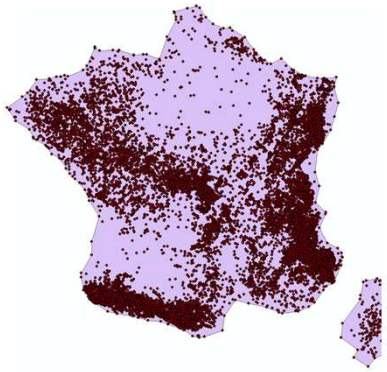


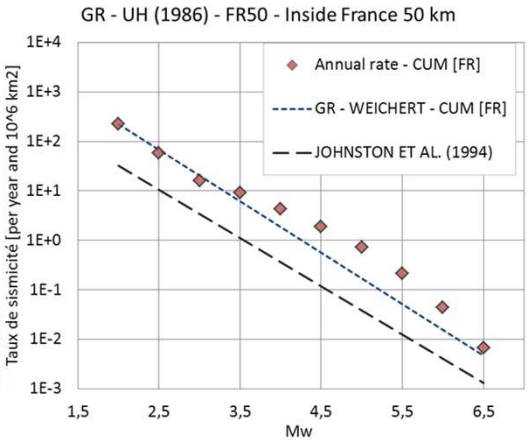
Figure 01-002 - Géodynamique du bassin méditerranéen. Les vitesses relatives des plaques Nubie (africaine) et anatolienne par rapport à la plaque Eurasie supposée fixe sont représentées par des flèches. La microplaque Adriatique subit une rotation anti-horaire qui provoque la déformation en coulissage dextre dans l'arc alpin franco-italien et localement dans les zones externes des chevauchements sur l'avant pays.

Monographie Manosque, 2014

IRSN

Taux de sismicité en France + 50 km autour

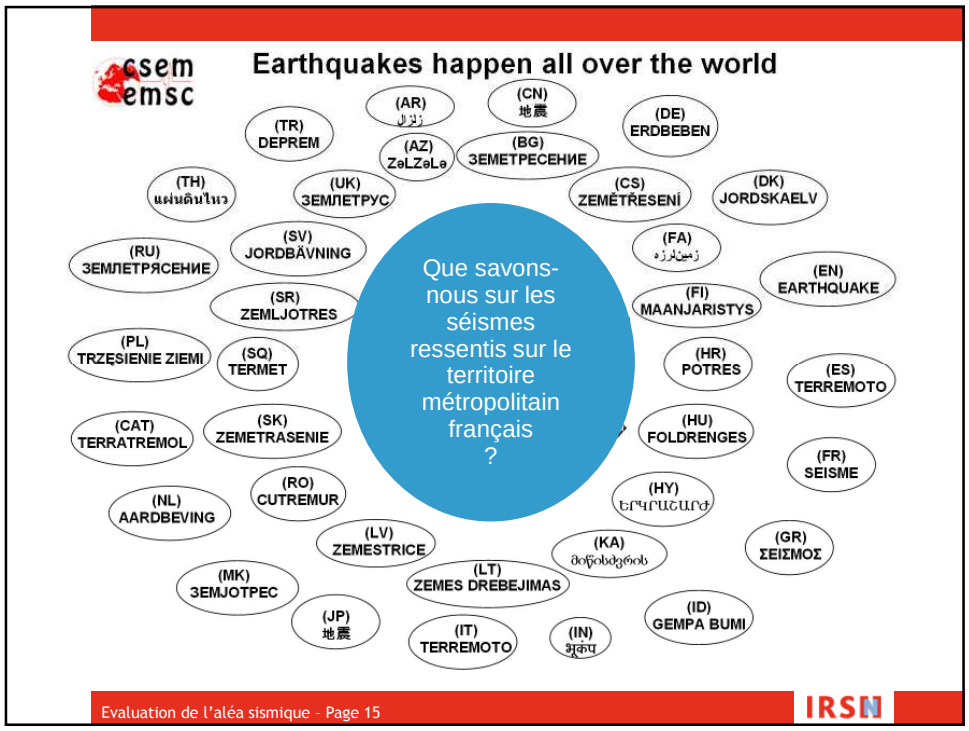




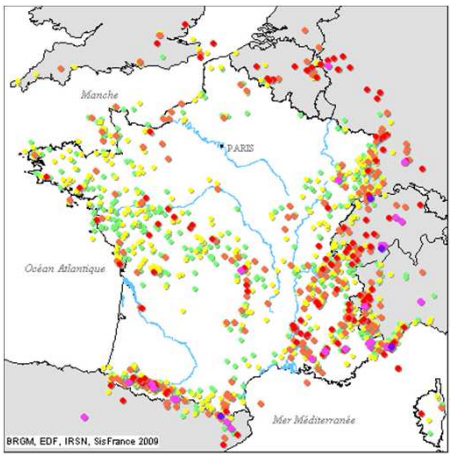
Une séisme de M>=6.5 a eu lieu dans des zones à très faible déformation environ tous le ~300 ans par million de km^2

Baumont et Clement, 2014

IRSN



SISFRANCE – Base de données de la sismicité historique

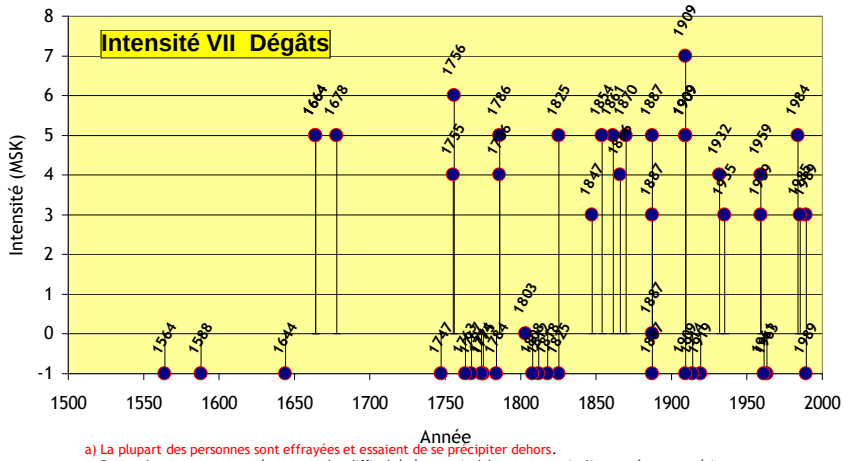


Epicentres de séismes et intensités épicentrales (1300-2007)
- Degré 4 à 4.5 (secousse modérée)
- Degré 5 à 5.5 (secousse forte)
- Degré 6 à 6.5 (dommages légers)
- Degré 7 à 7.5 (dommages prononcés)
- Degré 8 à 8.5 (destructions importantes)
- Degré 9 à 9.5 (destructions massives)

- Recherche et analyse des témoignages sur les tremblements de terre, conservés dans les archives. Ces témoignages constituent la base de la macrosismicité, c'est-à-dire la sismicité dont les effets peuvent être décrits
- un séisme fortement destructeur et quatre séismes responsables de dommages sévères en moyenne par siècle, sur mille ans d'histoire.
- Sous l'impulsion du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, SisFrance est accessible sur Internet depuis 2002 (www.sisfrance.net).

Développé par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Electricité de France (EDF) et l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) (à l'époque Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN)) depuis 1975 avec le lancement du programme électronucléaire français.

Histoire sismique – Aix en Provence



a) La plupart des personnes sont effrayées et essaient de se précipiter dehors.
De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à se tenir debout, en particulier aux étages supérieurs.
b) Les meubles sont déplacés et les meubles dont le centre de gravité est élevé peuvent se retourner.
Les objets tombent des étagères en grand nombre. Les récipients, les réservoirs et les piscines débordent.
c) De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 3* quelques uns de degré 4.
d) De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3.
e) Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2.
f) Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 1

*Degré 3: Dégâts sensibles à importants (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants)

Histoire sismique – Le Mans

Présentation
Définitions
Contexte
Catalogue des séismes
→ Séismes régionaux
Epicentres régionaux
Cartes d'épicentres
Zone d'épicentres
Faux séismes

Droits d'usage
Accueil
Liens
Aide
Contact / FAQ

Documents

Votre sélection : commune LE MANS (72181)
séismes ressentis

Cliquez dans la colonne localisation épicentrale pour connaître les caractéristiques du séisme

1

Date	Heure	Choc	Localisation épicentrale	Région ou pays de l'épicentre	Intensité épicentrale	Intensité dans la commune
7 Septembre 1972	22 h 26 min 54 sec		ILE D'OLERON	CHARENTES	7	
4 Mars 1965	0 h 47 min 13 sec		CRAONNAIS ET SEGREEN (LE LION-D'ANGERS)	ANJOU	5,5	3
2 Janvier 1959	6 h 20 min 50 sec		CORNOUAILLE (MELOVEN)	BRETAGNE	7	4
7 Juin 1931	0 h 25 min 1 sec		MER DU NORD (DOGGER BANK)	GRANDE-BRETAGNE	7	2
19 Novembre 1927	23 h 3 min 23 sec		BOCAGE NORMAND (FLERS)	NORMANDIE	6	4
30 Juillet 1926	13 h 19 min 52 sec		JERSEY	ILES ANGLO-NORMANDES	6,5	3
26 Septembre 1925	5 h 5 min	Z	MARCHE-BOISCHAUT (CHATEAUMEILLANT-LA CHATRE)	BERRY	6,5	2
10 Janvier 1921	0 h 20 min		BASSIN DE LAVAL (ST-JEAN-SUR-MAYENNE)	MAINE	5	0
23 Janvier 1892	3 h		VALLEE DU LOIR (SARCE-CHATEAU-DU-LOIR)	MAINE	4,5	2
14 Septembre 1866	5 h 10 min		BRENNE (AZAY-LE-FERRON)	BERRY	7	
21 Janvier 1814	7 h 15 min		VALLEE DE LA SARTHE (STE-JAMME ?)	MAINE	5	5
25 Janvier 1799	3 h 45 min	Z	MARAIS BRETON (BOUIN)	PAYS NANTAIS ET VENDEEN	7,5	5
30 Décembre 1775	10 h 34 min	Z	PLAINE DE CAEN (CAEN)	NORMANDIE	7	3,5
6 Octobre 1711	19 h		LOUDUNOIS (LOUDUN)	POITOU	7,5	5

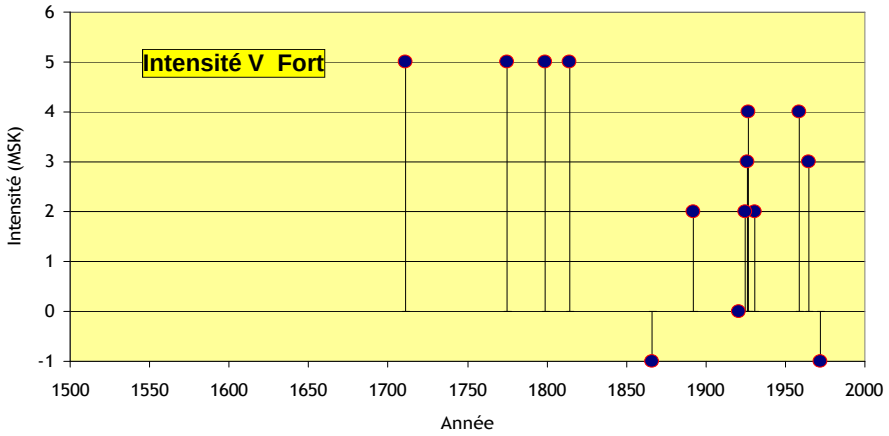
1

http://www.sisfrance.net/

Source : BRGM, EDF, IRSN / sisfrance

Date de dernière mise à jour : 01/01/2014

Histoire sismique – Le Mans



a) La secousse est ressentie à l'intérieur des habitations par la plupart des personnes et à l'extérieur par quelques personnes. Quelques personnes effrayées se précipitent dehors. Réveil de la plupart des dormeurs. Les observateurs ressentent une forte secousse ou une forte oscillation de l'ensemble du bâtiment de la pièce ou du mobilier.

b) Balancement important des objets suspendus. La porcelaine et les verres s'entrechoquent. De petits objets, des objets dont le centre de gravité est élevé et/ou qui sont mal posés peuvent se déplacer ou tomber. Des portes ou des fenêtres s'ouvrent ou se ferment. Dans quelques cas, des vitres se brisent. Les liquides oscillent et peuvent être projetés hors des récipients pleins. Les animaux deviennent nerveux à l'intérieur.

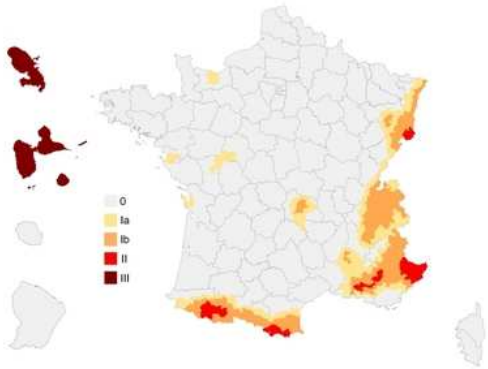
c) Dégâts de degré 1* de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité A et B. Fissures fines dans le plâtre sur les parties de l'ossature ou sur les murs à la base. Fissures fines dans les cloisons et les remplissages.

*Degré 1: Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structural, légers dégâts non structurels)

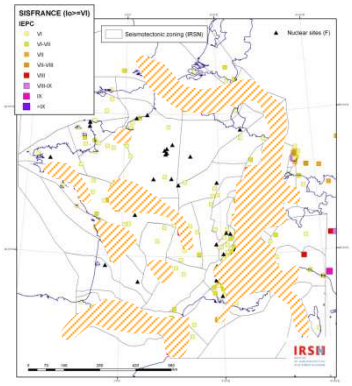
Le zonage sismique 1991 repose essentiellement sur les intensités VII+

Critère : Intensité >= VII

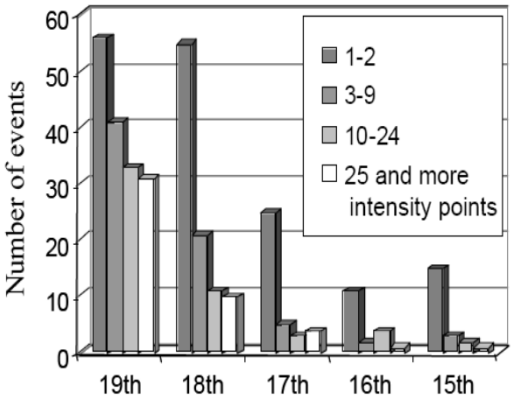
Sisfrance dans les années '80



...et 30 ans plus tard



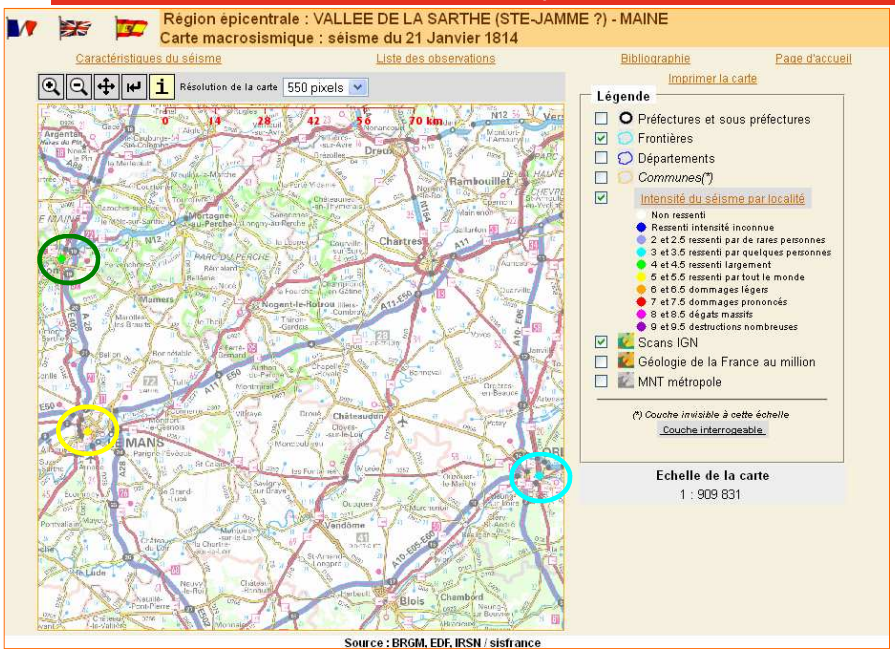
SISFRANCE – la recherche dans les archives continue……



Scotti et al. (2004)

- Plus de la moitié des séismes répertoriés dans SISFRANCE sont connus par un ou deux points d'observations macrosismiques
- Pour tous ces événements les localisation, magnitude et profondeur sont très incertaines
- La recherche approfondie pour améliorer la connaissance de ces séismes constitue un défi de taille!

Séisme du 21/01/1814: trois localités répertoriées dans SISFRANCE



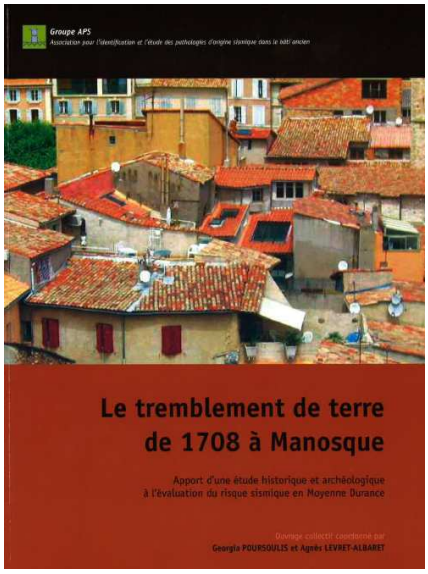
Un succès récent: le séisme de 1708 à Manosque

- Des recherches approfondies dans les archives locales

➔ mis en évidence l'existence de deux secousses majeures: 21 mars a Forcalquier et Oraison et, la plus importante d'intensité VIII MSK le 14 août, affectant considérablement la région de Manosque et Pierrevert.

➔ découverte exceptionnelle (Quenet, 2002, 2005) d'un rapport de visite de la ville de Manosque commandité par les autorités consulaires de la ville pour faire valoir leur droit auprès du Roi suite aux dommages engendrés par le tremblement de terr

➔ des précisions sur les dégâts subis par 740 bâtiments tant à l'intérieur des remparts que dans la campagne - ce qui a relancé l'étude des conséquences de ce séisme, notamment sur l'habitat privé.



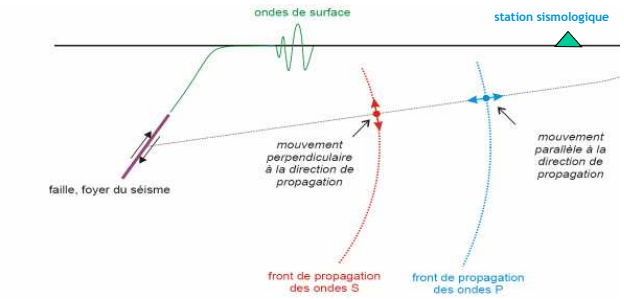
Aujourd'hui les données, les méthodes et les critères ont évolué

- Les ingénieurs demandent des estimations de l'aléa sismique pour des indicateurs du mouvement sismique déduits des accélérogrammes (par exemple le PGA)
- Les méthodes internationales ont évoluées vers des méthodes probabilistes (utilisée aux USA depuis les années '70-'80)

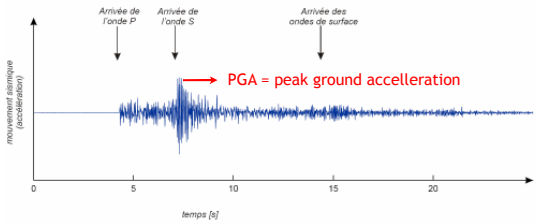
Pour évaluer l'aléa sismique probabiliste il faut:

1. développer des réseaux sismologiques les plus denses possibles
2. constituer des catalogues de sismicité les plus homogènes possibles
3. développer des équations prédictives du mouvement sismique les plus appropriées au territoire métropolitain

Quelques définitions - sismogramme

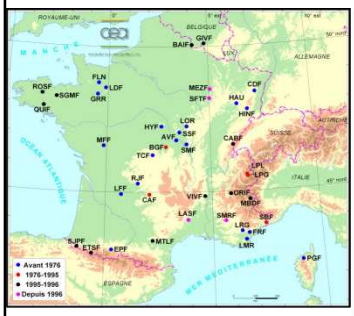


Exemple de sismogramme

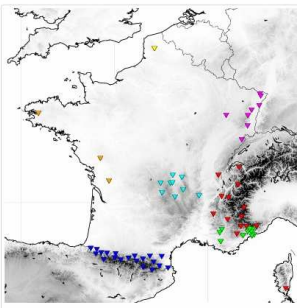


1. Développement des réseaux sismologiques en métropole

Depuis ~1960



Depuis ~1980



Futur

Large bande
Accéléromètre

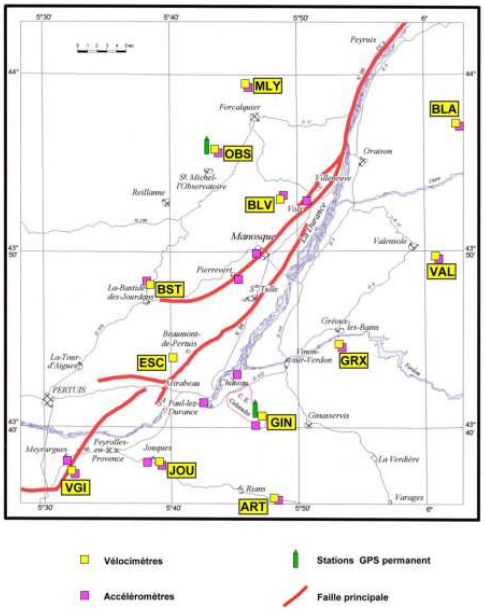
Stations courte période du RéNaSS

Observatoire
Observatoire Midi-Pyrénées (OMP)
Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble (OSUG)
Observatoire de la Côte d'Azur (OCA)
Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (OPGC)
École et Observatoire des Sciences de la Terre
Observatoire des Sciences de l'Univers Nantes Atlantique (OSUNA)

Exemple - le réseau sismique de l'IRSN

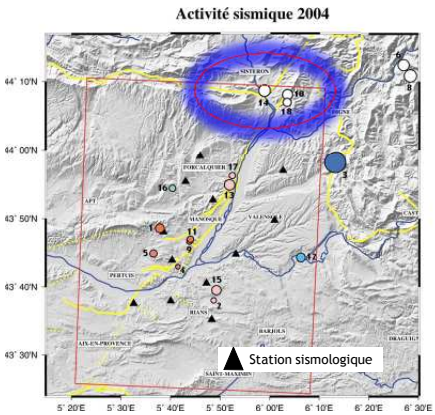
12 vélocimètres /18 accéléromètres

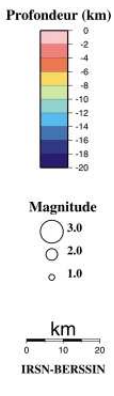
Le réseau sismique permet d'étudier la sismicité le long de la faille de la Durance depuis 1992

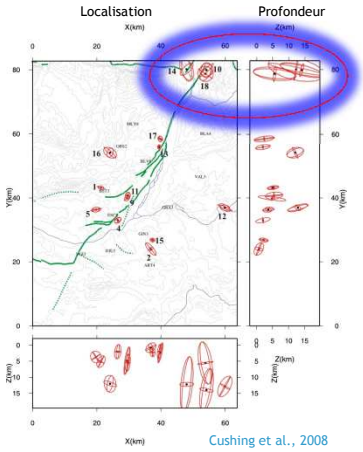


Nechtschein et al., 2006

Une estimation précise de la localisation et de la profondeur des séismes







Cushing et al., 2008

Carte et coupes NS et EO des séismes localisés avec le modèle de vitesse 3D (rectangle rouge). Les ellipses représentent les incertitudes sur les localisations.

Incertitude sur la profondeur ➔ incertitude sur le potentiel sismogénique de la faille

2. Constituer des catalogues de sismicité homogène en Mw (instrumentale)

Plusieurs types de capteurs, plusieurs ondes sismiques

➔ Plusieurs définitions de magnitude

1. Ml (magnitude locale) : définie pour des séismes locaux (courte distance)

2. Ms (magnitude des ondes de surface) : calculée à partir des ondes de surface de Rayleigh (séismes importants à faible profondeur)

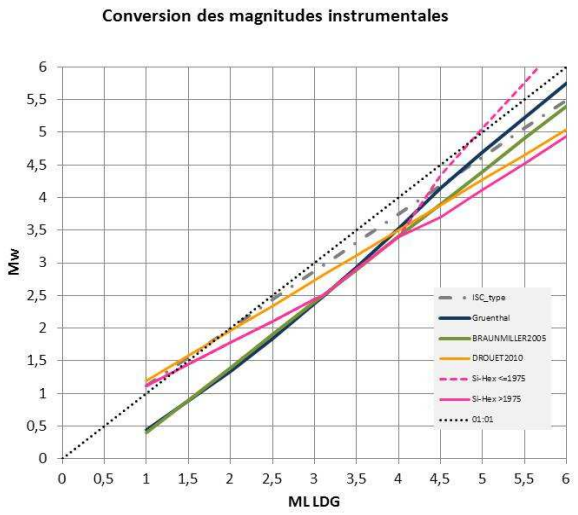
3. mB (magnitude des ondes de volume) : elle est calculée à partir des ondes de compression P (séismes profonds)

4. MD (magnitude de durée): calculée pour des petits séismes

5. Mw (magnitude de moment) : directement reliée au moment sismique du séisme (énergie libérée lors de la rupture). L'intérêt du calcul de cette magnitude est qu'elle ne sature pas et peut être calculée à la fois pour de forts événements et pour de petits événements

2. Constituer des catalogues de sismicité instrumentale homogènes en Mw

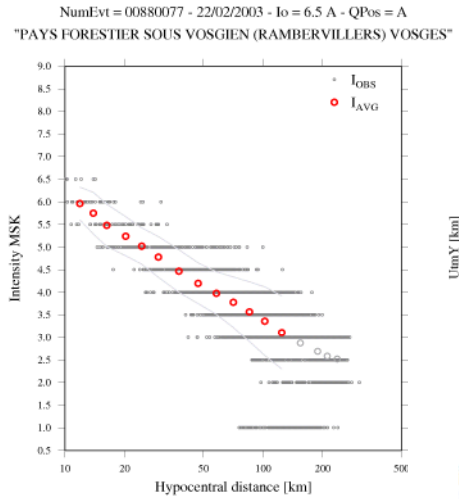
- Le choix de la magnitude doit être cohérent avec les équations prédictives du mouvement sismique
- Aujourd'hui la magnitude de référence est la Mw



Clement, 2014

2. Constituer des catalogues de sismicité historiques homogènes en Mw (historique)

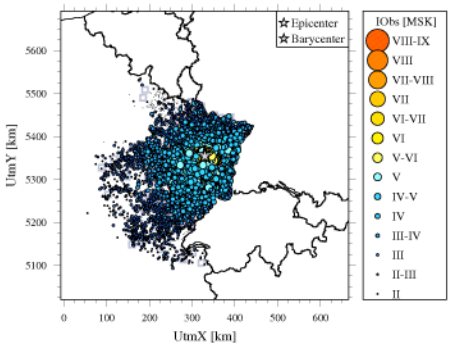
2.1 Modélisation de la décroissance de l'intensité – paramètre distance + profondeur



Baumont et Scotti, 2006

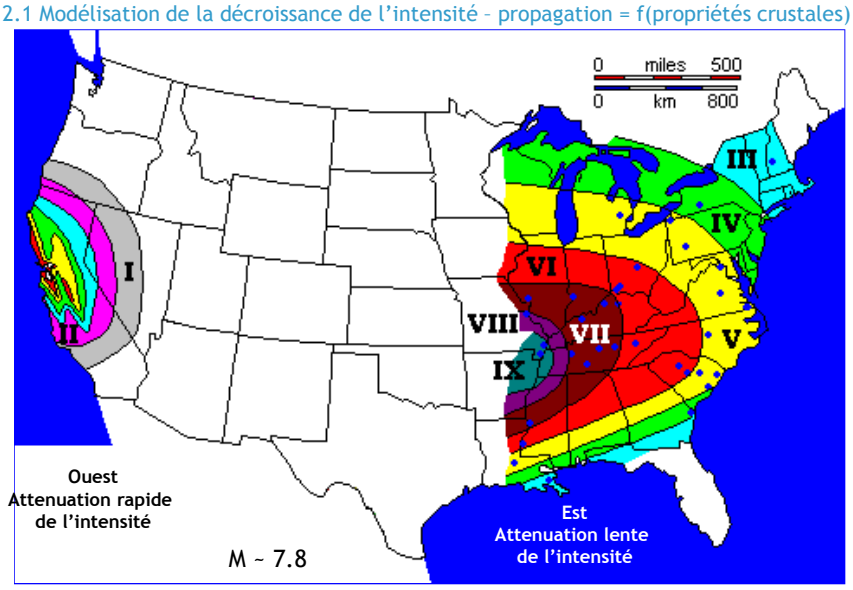
$I = I_0 + b.Log_{10}(R/h) + g.(R-h)$

Kövesligethy, 1907; Sponheuer, 1960)



2. Constituer des catalogues de sismicité homogène en Mw (historique)

2.1 Modélisation de la décroissance de l'intensité – propagation = f(propriétés crustales)



2. Constituer des catalogues de sismicité homogène en Mw (historique)

2.1 Modélisation de la décroissance de l'intensité - propagation = f(propriétés crustales)

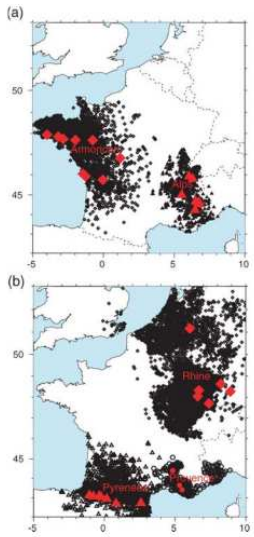


Figure 2. Calibration events (red symbols) and intensity sites (black symbols) used to develop attenuation models for (a) the French Alps (triangles) and Armorican (diamonds) regions and (b) the Pyrenees (triangles), Provence (circles) and Rhine (diamonds) regions.

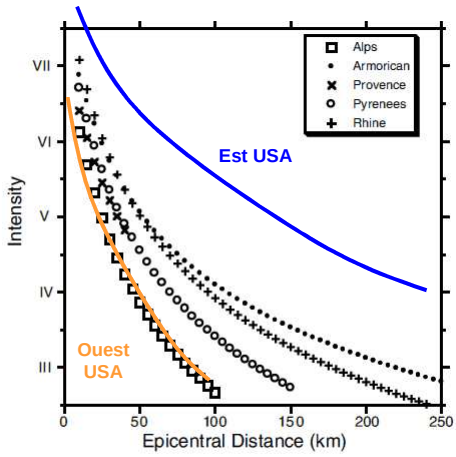


Figure 3. Intensity attenuation models for an M5.0 source at 10 km depth in the French Alps, Armorican, Provence, Pyrenees and Rhine regions.

$$\text{MSK Intensity} = \alpha + \beta \mathbf{M} + C_2 \log \Delta_h .$$

Bakun et Scotti, 2006

2. Constituer des catalogues de sismicité homogène (historique)

2.1 Modélisation de la décroissance de l'intensité - paramètre profondeur

M~7.2

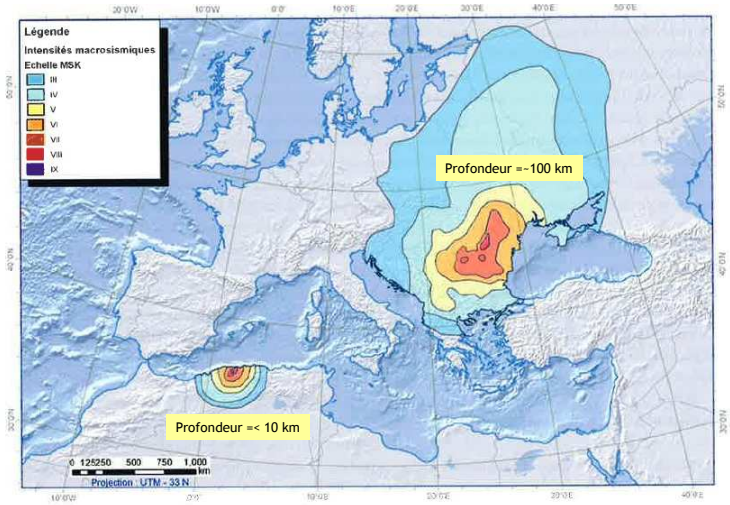


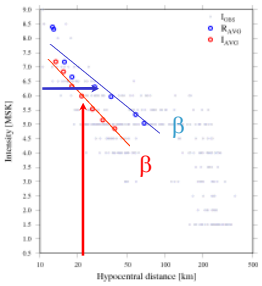
Figure 01-006 - Effets comparés géographiquement pour des séismes de magnitude équivalente (M ~7,2) à El Asnam en Algérie (10 octobre 1980) et Vrancea en Roumanie (4 mars 1977). Le premier est superficiel (< 10 km) alors que le second est profond (~100 km). Plus le foyer est profond, plus l'extension géographique des effets est grande (à magnitude équivalente) (d'après A. Levret in : Lambert *et al.*, 1997).

Monographie Manosque, 2014

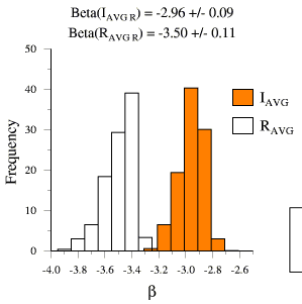
2. Constituer des catalogues de sismicité homogène en Mw (historique)

2.2 Calage des équations prédictives à l'aide de séismes instrumentaux

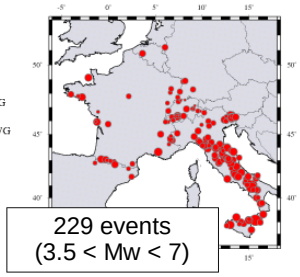
…la métrique utilisée



Plusieurs équations I=f(M)



…la sélection de données



$$\text{Intensity} = C_1 + C_2\, M_W + \beta\, \text{Log}_{10}(R)$$

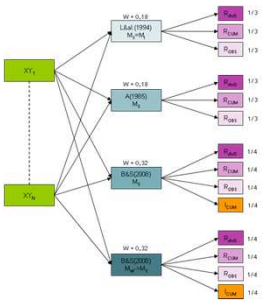
Baumont et Scotti, 2006

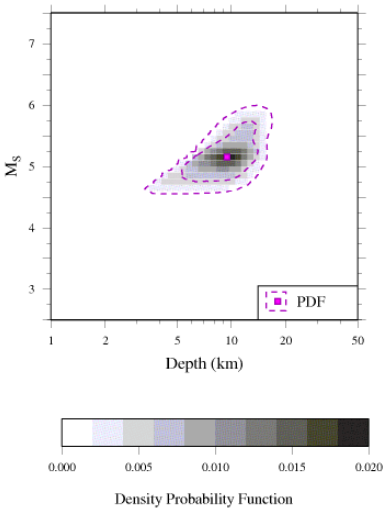
IRSN

2. Constituer des catalogues de sismicité homogène (historique)

2.3 Propagation de l'incertitude

Epicentre Equation I=f(M) Métrique





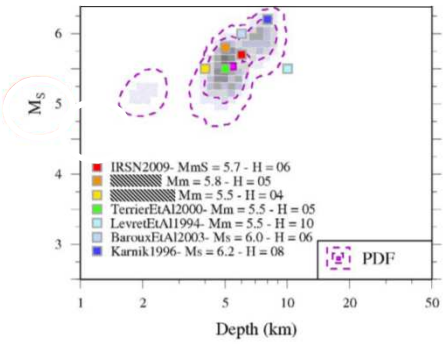
Approche utilisée à l'IRSN pour charactériser la magnitude et la profondeur des séismes historiques

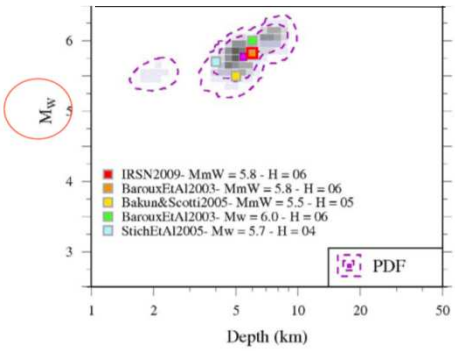
IRSN

Example: Magnitude-Profondeur pour le séisme de 1909 Lambesc

Plusieurs équations prédictives intensité-magnitude pour quantifier l'incertitude

dans l'estimation de la magnitude et de la profondeur des séismes historiques





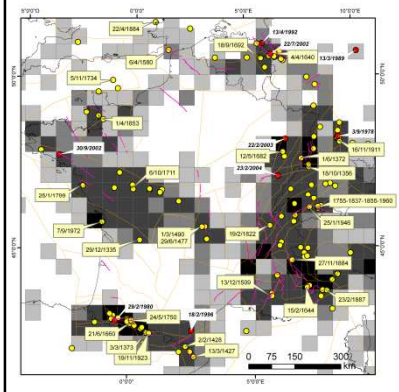
la fonction de densité de probabilité recouvre les différentes solutions

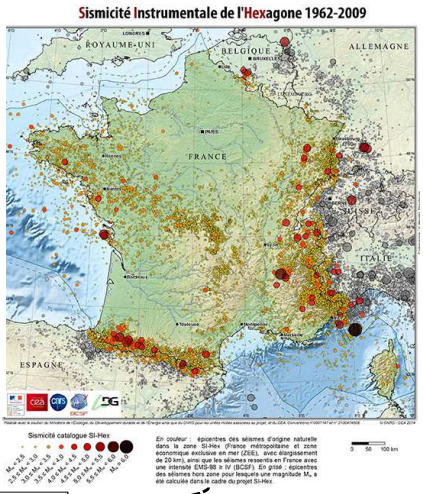
proposées par différents experts

2. Exemples de catalogues de sismicité homogène en Magnitude

Une mise à jour permanente !!

Sismicité historiques et instrumentale (1300-2010)





Baize et al., 2013

Mis à jour des relations intensité-magnitudes ??

2014

Objectif de la présentation

3. Quelles approches pour estimer les mouvements sismiques futurs?

- L'approche déterministe
- L'approche probabiliste

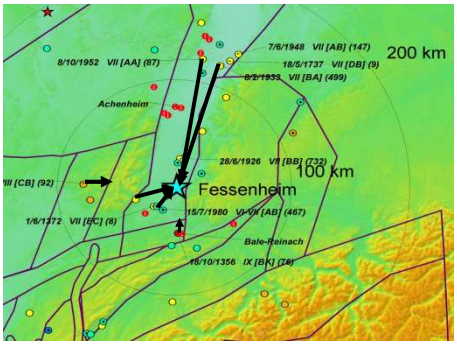
  - + incertitude

IRSN

Evaluation de l'aléa sismique

1. Déterministe

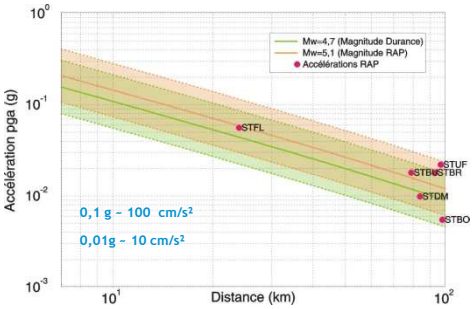
Choix de 1 ou 2 scénarii inspirés des séismes historiques les plus forts



Equation prédictive du mouvement sismique

valeur médiane

M ~5 à 10 km de distance hypocentrale ~ 0,1 g



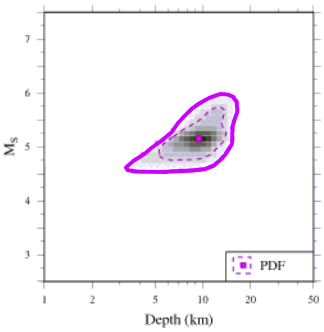
Zone - entité géologique dont on estime que le potentiel sismique est le même

IRSN

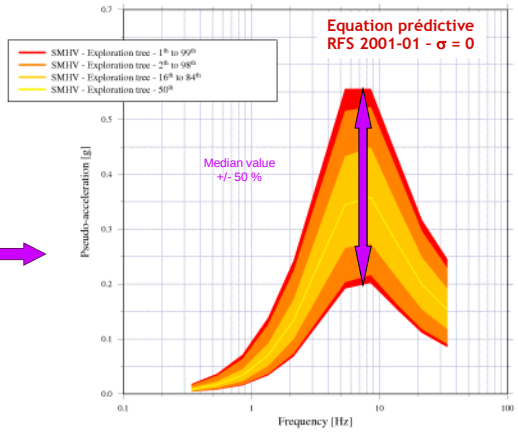
Evaluation de l'aléa sismique et quantification de l'incertitude

Approche déterministe

(M-h) et incertitude associée



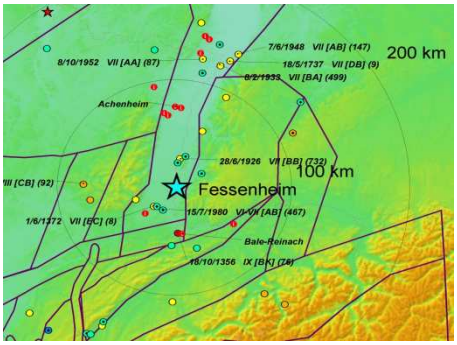
Aléa sismique et incertitude associée



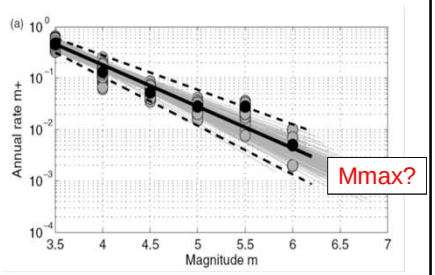
Dans ce cas l'incertitude dans les caractéristiques M-h du séisme de référence a un fort impact sur l'incertitude du niveau sismique

Evaluation de l'aléa sismique

2. Probabiliste



Tous les scénarii pour chaque zone - y compris des séismes de magnitude plus fortes que ceux enregistrés dans les catalogues de sismicité



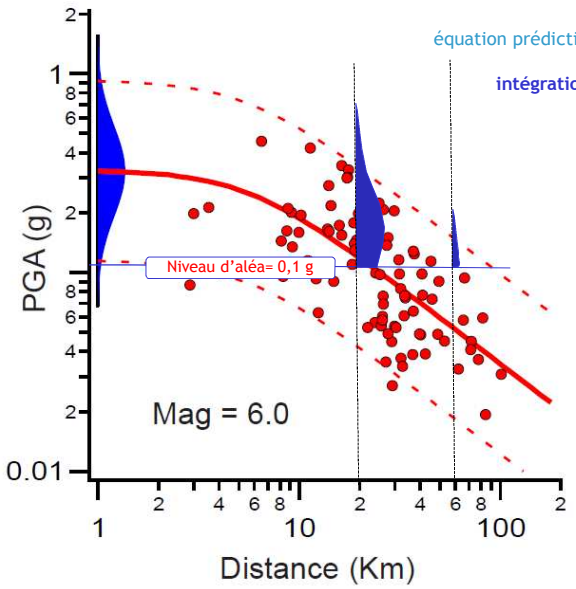
Zone - entité géologique dont on estime que le potentiel sismique est le même

3. Intégration de l'écart-type des équations prédictives du mvt sismique

2. probabiliste

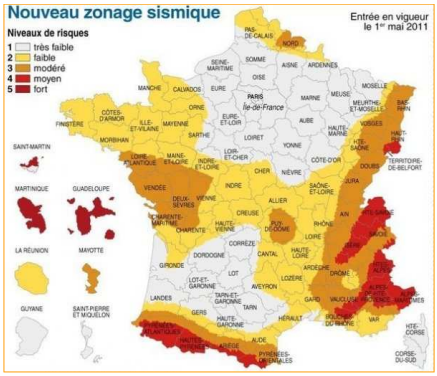
équation prédictive du mouvement sismique

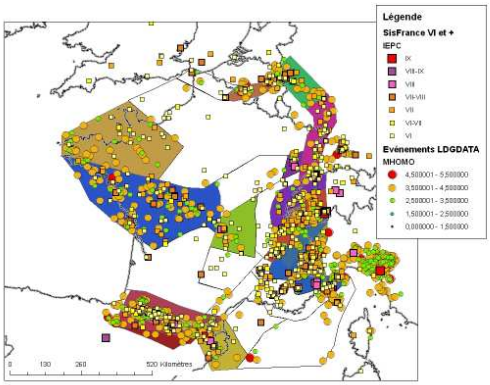
intégration de l'écart-type….



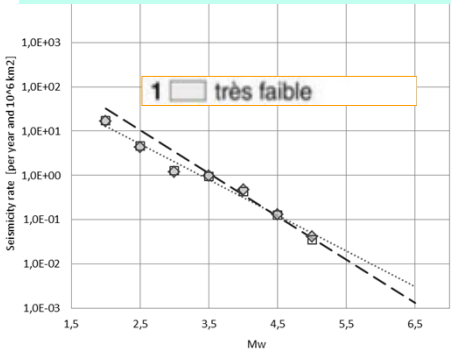
3. Confrontation de méthodes

Le nouveau zonage sismique repose essentiellement sur la méthode probabiliste
Critère: tous les séismes de M>=4.0



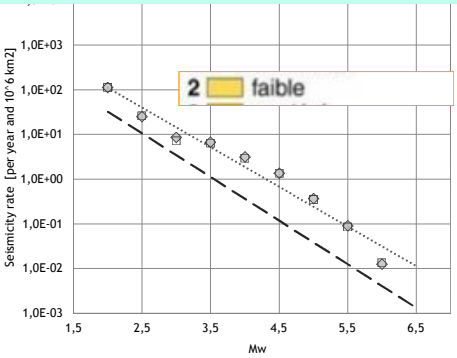


Taux de sismicité dans les régions de très faible sismicité
=
Taux de sismicité des zones « stables »



Annual rate - CUM [FR] | Annual rate - CUM [Zone] | GR - LS - CUM [FR] | JOHNSTON ET AL. (1994)

Taux de sismicité dans les régions de faible sismicité
=
10 fois les taux de sismicité des zones « stables »

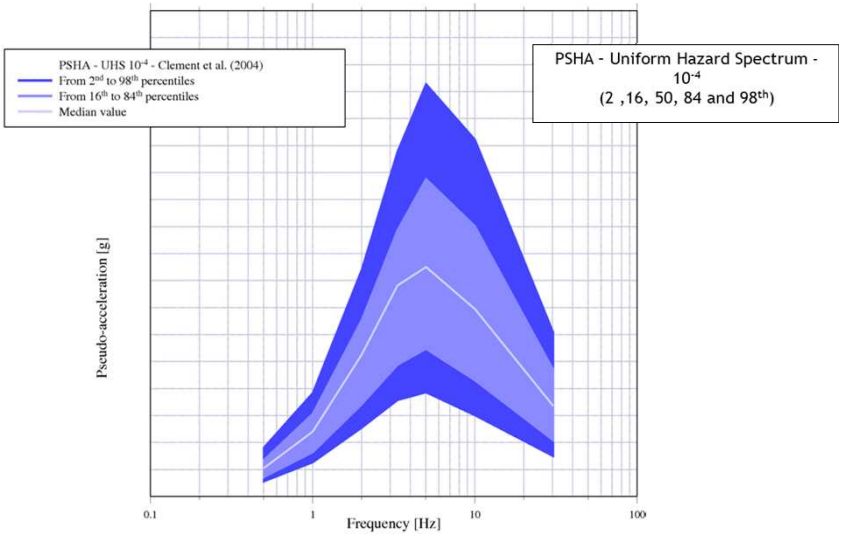


Annual rate - CUM [FR] | Annual rate - CUM [Zone] | GR - LS - CUM [FR] | JOHNSTON ET AL. (1994)

Evaluation de l'aléa sismique et quantification de l'incertitude

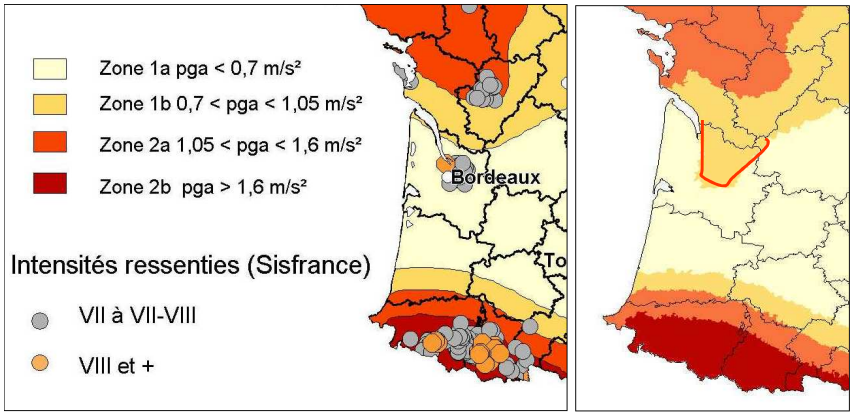
Approche Probabiliste

Tous les scénarii au pro rata de leur taux d'occurrence



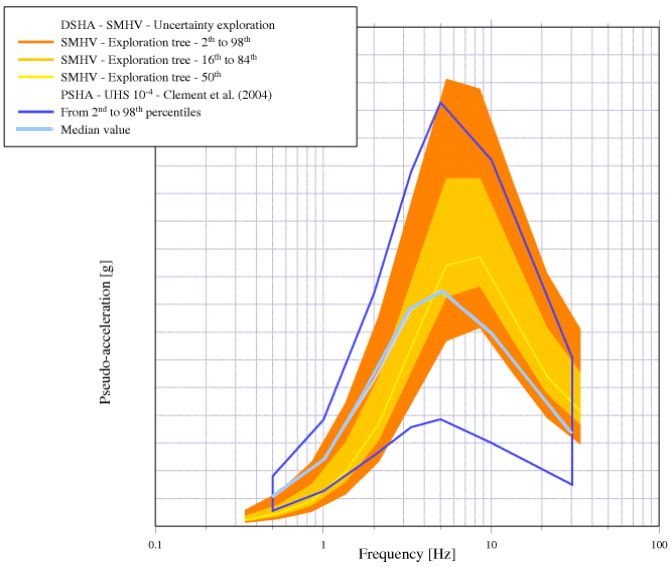
Conclusion : complémentarité des approches probabiliste et déterministe

Localement la carte du nouveau zonage sismique a été modifiée pour tenir compte de l'occurrence de séismes historiques de forte intensité qui ont eu lieu dans les zones à faible sismicité instrumentale



Conclusion : la quantification de l'incertitude est fondamentale

Complémentarité des évaluations d'aléa déterministe et probabiliste



48

Perspectives: **Mise à jour** plus régulière des cartes d'aléa sismique en France

- tous les 3 ans aux USA
- après chaque séisme meurtrier en Italie
- Tous les 10 pour les Installations Nucléaire de Base en France,
- Canada:

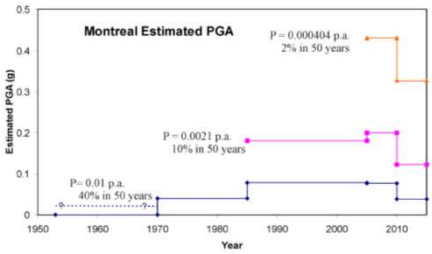


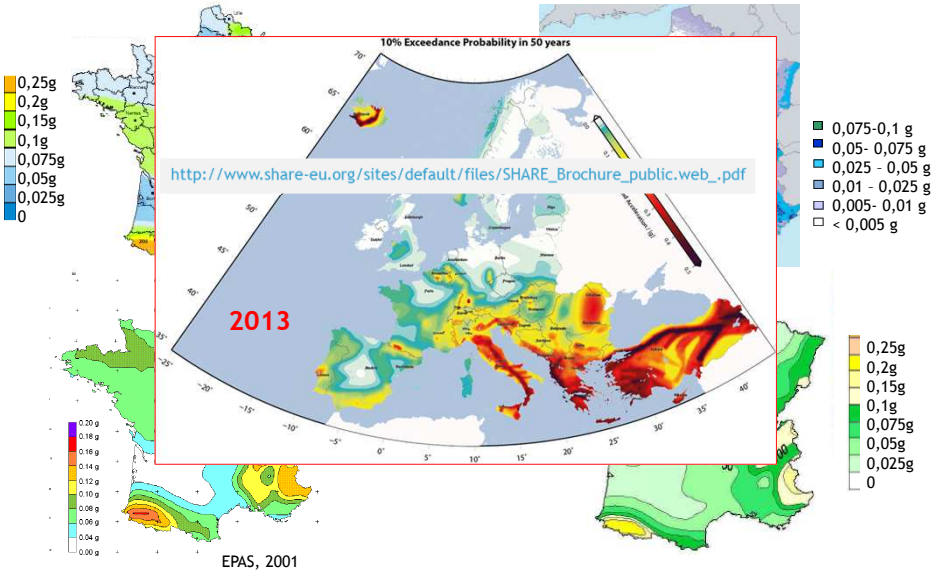
Figure 6. Evolution of estimates of Peak Ground Acceleration for Montreal, at various probability levels.

It is argued that an iterative process of continual code improvement occurring within an ongoing (permanent) national code committee is very important to the improvement of the earthquake provisions. While increases in code requirements may be resisted, these may be required to attain the expected performance (life-safety) or may be justified on economic grounds (present cost versus future loss). Adams, 2009

IRSN

Perspectives: formaliser l'élicitation d'experts dans les calculs de l'aléa sismique

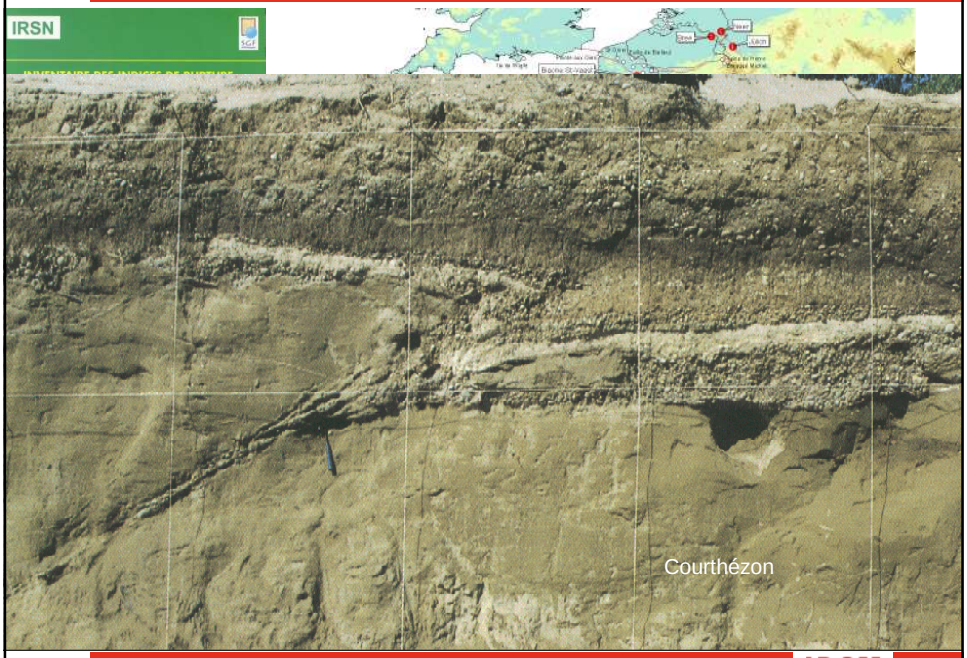
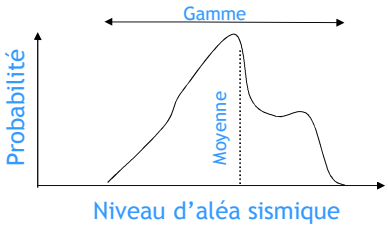
Pour rendre compte de la variété d'interprétations possibles!!!!!!!!!!!!!



EPAS, 2001

IRSN

Perspectives: inclure les failles potentiellement actives dans les calculs d'aléa sismique



Merci de votre attention