



LA PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE DANS LA CONSTRUCTION

*JOURNÉES TECHNIQUES DE LA
RÉGLEMENTATION PARASISMIQUE,
LA ROCHELLE 16/11/2017*

BRGM NOUVELLE-AQUITAINE
SITE DE POITIERS

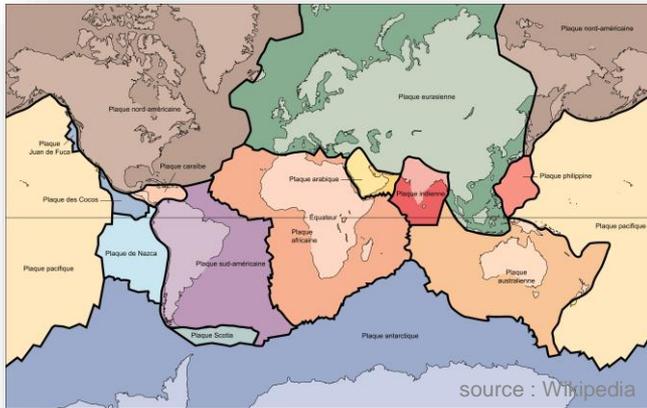
jc.audru@brgm.fr



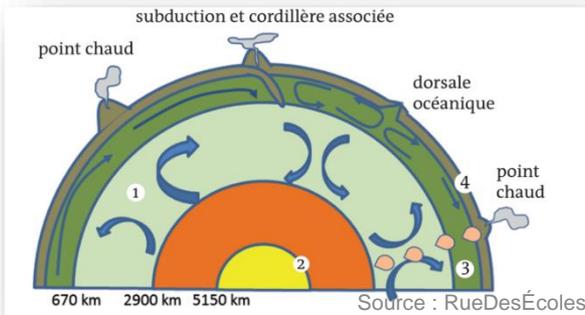
Géosciences pour une Terre durable

brgm

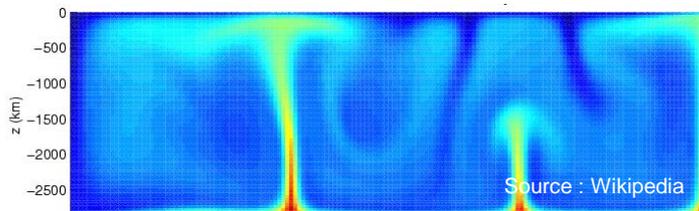
LE MOTEUR DES SÉISMES



Les plaques tectoniques

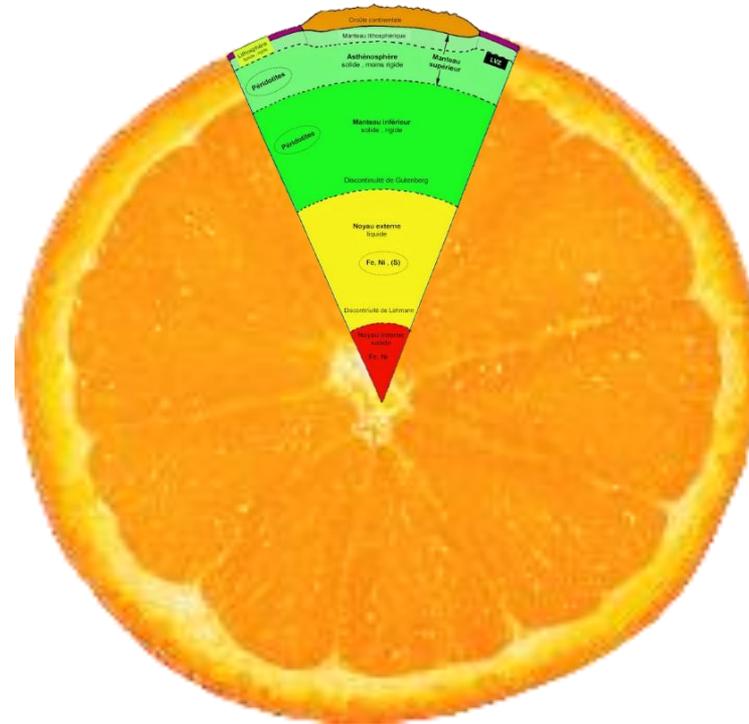


Les mouvements de convection



La chaleur interne du noyau

LA CHALEUR INTERNE



Les plaques tectoniques (~0,2 mm d'épaisseur à la surface d'une orange)

La chaleur interne provient :

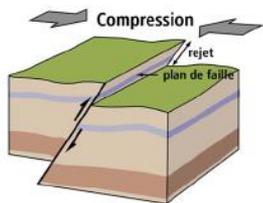
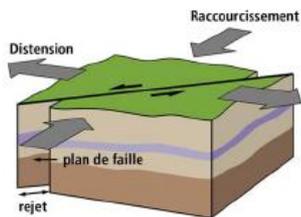
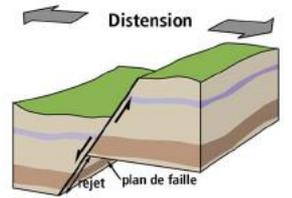
- De l'énergie cinétique issue de l'accrétion de la planète
- De la cristallisation du noyau externe (liquide) au profit de la graine (solide)
- De la désintégration d'éléments radioactifs à période longue U K Th

Cette chaleur est à l'origine de mouvements de convection comme dans « une soupe épaisse sur le feu ». Ces volutes animent le manteau, ce qui implique des déformations et des cassures de sa carapace rigide, la lithosphère.

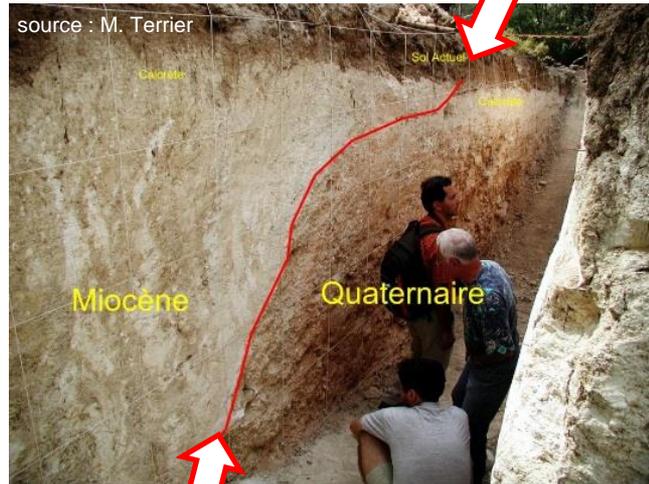
LE MOTEUR DES SÉISMES

LES FAILLES ACTIVES

Exemples de failles actives (France, Japon, Californie et Nouvelle-Zélande)



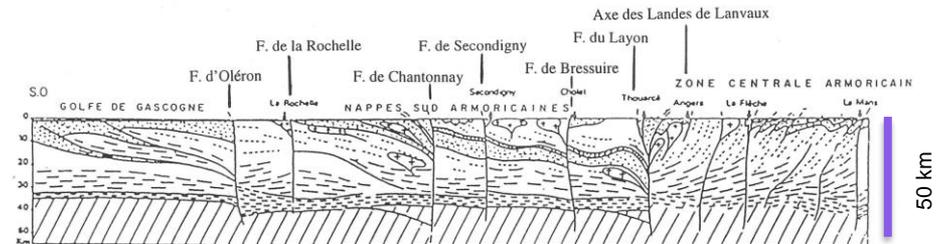
source : Wikipedia



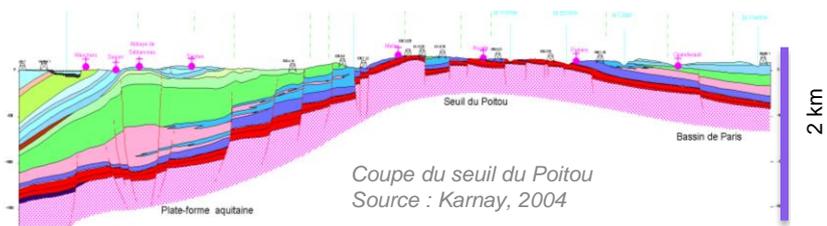
LES FAILLES en NOUVELLE-AQUITAINE

DES CASSURES DE 30 KM DE PROFONDEUR

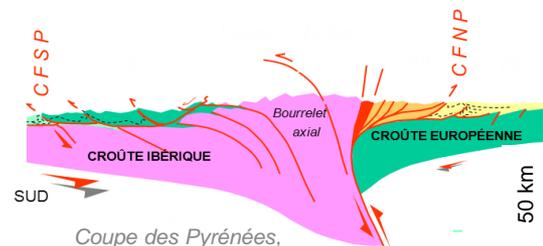
En Poitou-Charentes-Limousin, la faille la plus longue est la Faille de Bressuire à Oradour-sur-Glane (170 km)



Coupe du Massif armoricain, Source : Matte et Hirn, 1988



Coupe du seuil du Poitou
Source : Karny, 2004

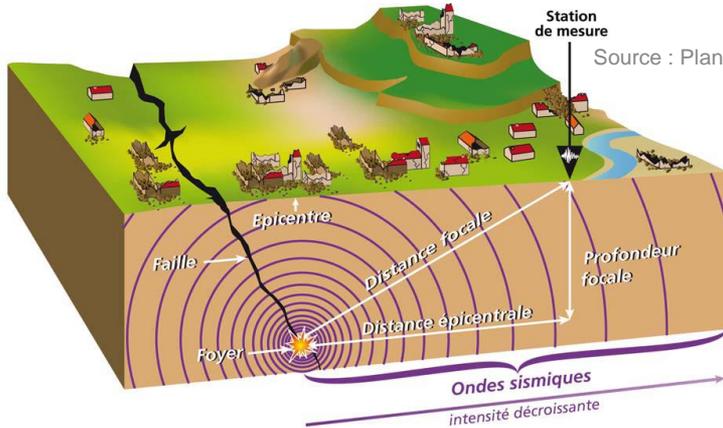


Coupe des Pyrénées,
Source : Canérot, 2008

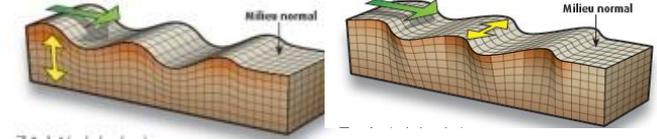
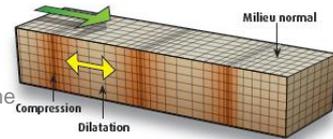


LES ONDES PRODUITES

LA DISPERSION D'UNE PARTIE DE L'ÉNERGIE



Source : Plan Séisme



Des ondes de volume (internes)
→ Compression
→ À l'origine des grondements
et bruits de camions

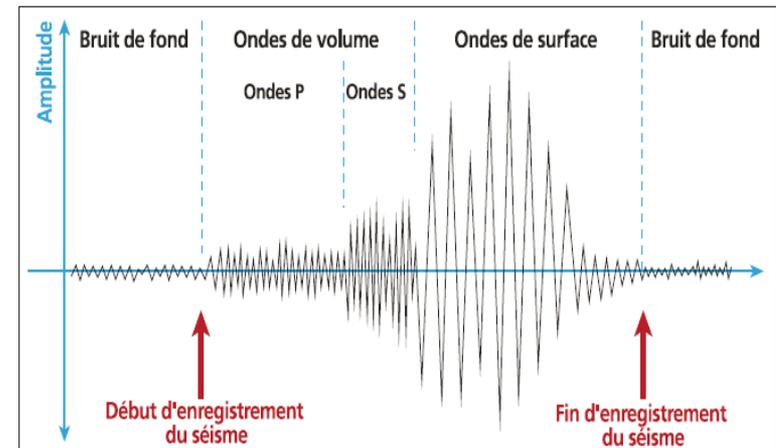
Des ondes de surface (interfaces)
→ cisaillement horizontal et vertical
→ vagues du sol très perceptibles

À une vitesse de 6 km /seconde, les ondes P d'un séisme aux Antilles parviennent à Paris en 22 minutes (les ondes S, 37 minutes)



← Sismomètre

Sismogramme →



MAGNITUDE & INTENSITÉ

La magnitude

- **Ne varie pas quand on s'éloigne de l'épicentre**
- Caractérise les dimensions de la faille
- Se calcule à partir du sismogramme
- « L'échelle de Richter/Kanamori » est en fait une fonction continue, sans limite (celle des roches)
- d'un degré à l'autre, l'énergie est multipliée par 30 et l'amplitude du mouvement par 10
- les séismes les plus puissants mesurés : Chili 1960 M9,5, Alaska 1964 et Sumatra 2004 M9,2 et Japon 2011 M9

Magnitude	Énergie libérée	Durée de la rupture	Valeur moyenne du rejet	Longueur moyenne du coulissage
9	$E \times 30^9$	250 s	8 m	800 km
8	$E \times 30^8$	85 s	5 m	250 km
7	$E \times 30^7$	15 s	1 m	50 km
6	$E \times 30^6$	3 s	20 cm	10 km
5	$E \times 30^5$	1 s	5 cm	3 km
4	E	0,3 s	2 cm	1 km
3	$E / 30$			
2	$E / 30^2$			
1	$E / 30^3$			
0				

Source : Plan Séisme

L'intensité

- **En principe, l'ampleur des dégâts diminue en s'éloignant de l'épicentre**
- s'évalue après séismes sur la base des témoignages www.franceseisme.fr
- Caractérise les effets ressentis ou observés en surface en un lieu donné sur les personnes et les biens
- Échelle de référence EMS98 (European Macroseismic Scale de 1998)

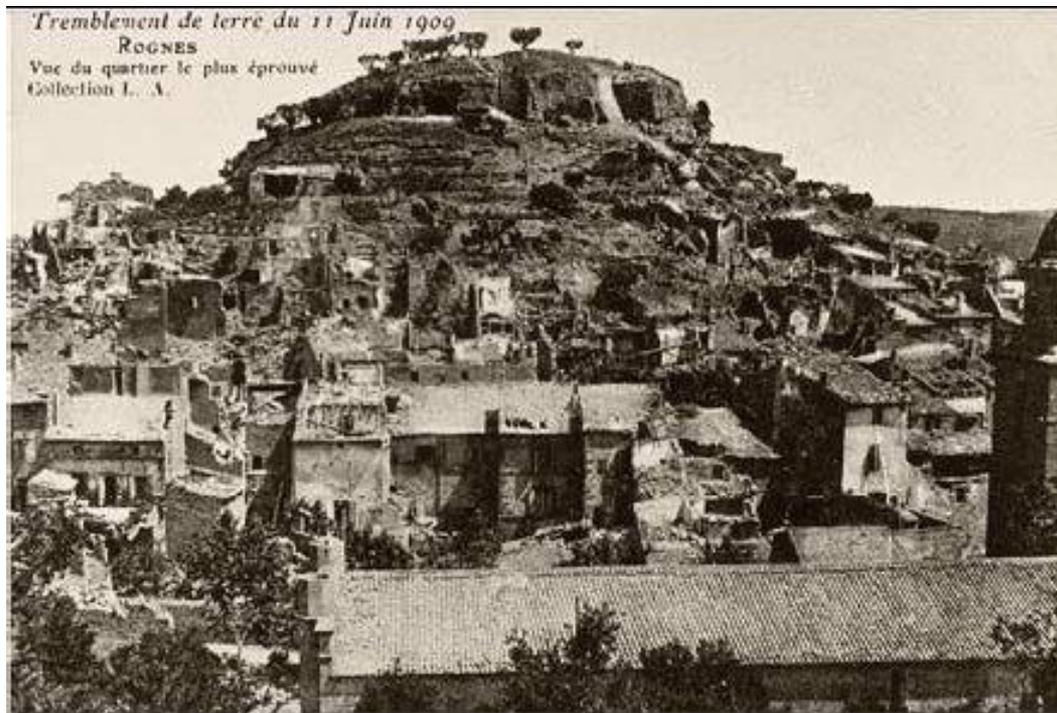
I	secousse non ressentie, mais enregistrée par les instruments
II	secousse partiellement ressentie, notamment par des personnes au repos et aux étages
III	secousse faiblement ressentie, balancement des objets suspendus
IV	secousse largement ressentie dans et hors les habitations, tremblement des objets
V	secousse forte, réveil des dormeurs, chute d'objets, parfois légères fissures dans les plâtres
VI	légers dommages, parfois fissures dans les murs, frayeur de nombreuses personnes
VII	dégâts, larges lézards dans les murs de nombreuses habitations, chutes de cheminées
VIII	dégâts massifs, les habitations les plus vulnérables sont détruites, pres que toutes subissent des dégâts importants
IX	destructions de nombreuses constructions, quelquefois de bonne qualité, chute de monuments et de colonnes
X	destruction générale des constructions, même les moins vulnérables (non parasismiques)
XI	catastrophe, toutes les constructions sont détruites (ponts, barrages, canalisations enterrées...)
XII	changement de paysage, énormes crevasses dans le sol, vallées barrées, rivières déplacées...

Source : IRSN.fr

Exemple d'effet topographique par piégeage des ondes sur la commune de Rognes (Bouches-du-Rhône) lors du séisme de Lambesc en 1909

Magnitude estimée 6.3, intensité IX : 46 morts, 250 blessés et 3 000 constructions endommagées

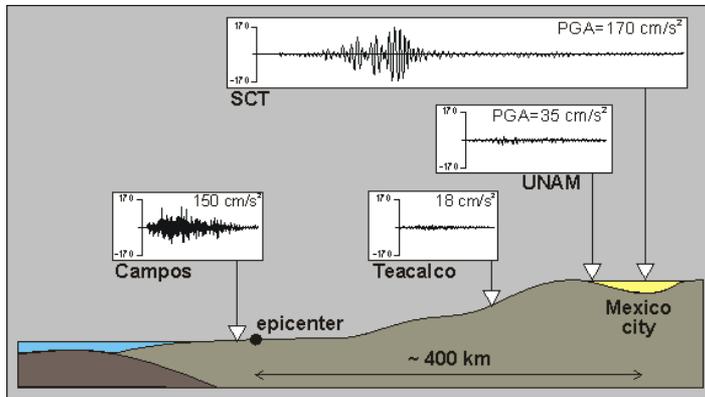
Rognes après le séisme, source APGH



Exemple d'effet lithologique lors du séisme de Martinique en 2007 (7.4) : amplification des mouvements au centre-ville de Fort-de-France

Exemple d'effet lithologique (roche) lors du séisme de Mexico en 1985 (8.1)

Atténuation des mouvements avec la distance, PUIS amplification sur la bordure et dans l'ancien lac remblayé du centre-ville



source : Singh et al., 1985



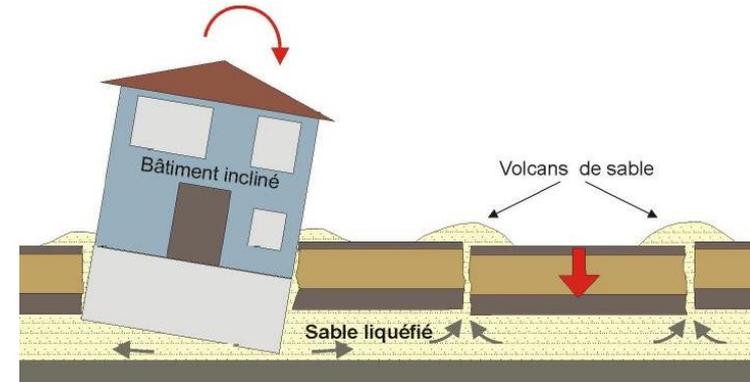
Source : JC Audru



LA LIQUÉFACTION

La liquéfaction est spectaculaire, le sol se comporte momentanément comme de l'eau

- Touche les sols granulaires de sables ou de limons gorgés d'eau
- La déconsolidation brutale du matériau se traduit par la destruction du sol.



Source : CDRNM06

Turquie, 1999



© Pierre Mouroux

Taiwan 2016



Nouvelle-Zélande, 2011

[LES EFFETS INDUITS]

[MOUVEMENTS DE TERRAIN & TSUNAMIS]

Salvador 2001



Nouvelle-Zélande, 2016



Japon 2011

LES DÉGÂTS AU BÂTI ET AUX INFRASTRUCTURES

Iran 2017



Éjection des façades, effet coup de fouet dans les étages supérieurs d'un bâtiment mis en résonance avec le sol.

Effondrement en « mille-feuilles » des planchers dû à l'absence de contreventement.



Japon 1995



Japon 2011



Dégâts aux infrastructures de transport

Sources : Tasnim/Reuters, Shwan Mohammed/AFP, P. Balandier, EERI, EQIIS, tdwordl.com, fotolia



La Rochelle 2016...



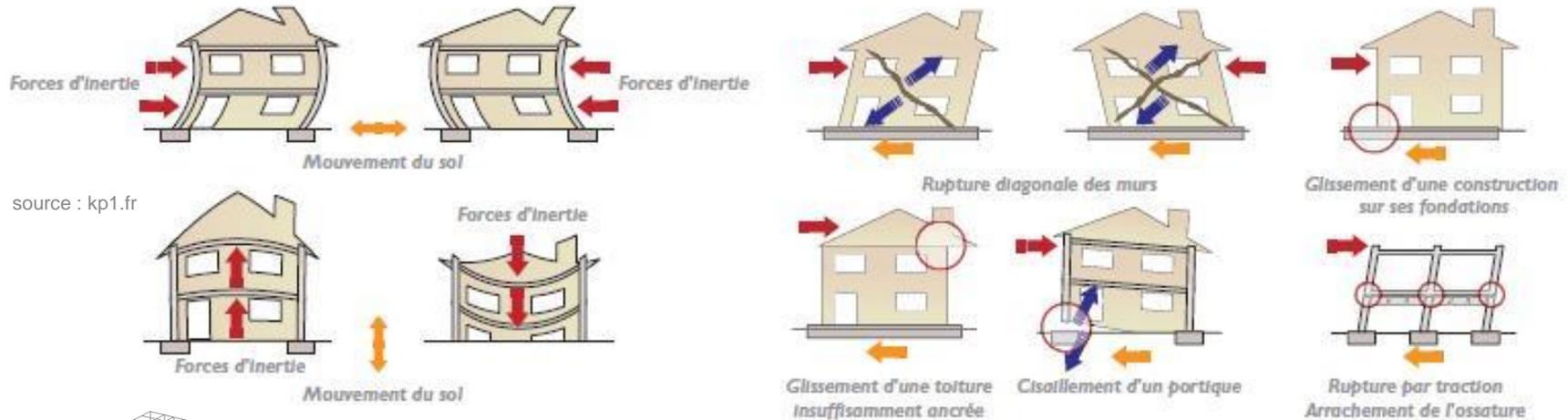
Nouvelle-Zélande 2016



LES DÉGÂTS AU BÂTI ET AUX INFRASTRUCTURES

DES EFFETS PRÉVISIBLES

Un bâtiment courant peut être assimilée à un oscillateur (masse + ressort)



source : kp1.fr

source : necs.fr



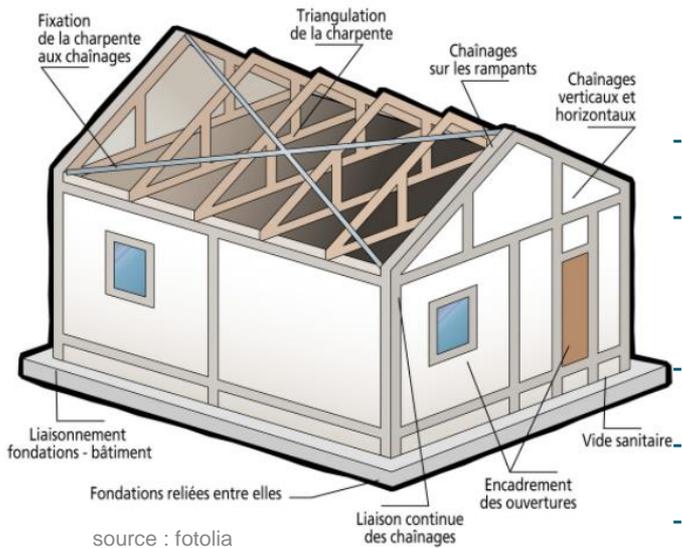
Il a une **période propre** d'oscillation (période à laquelle le bâtiment oscille librement suite à un déplacement)

Il faut éviter que la période propre d'oscillation du bâtiment corresponde à celle du sol, sinon il y a mise en résonance. C'est un facteur de **ruine**

La période propre d'un bâtiment courant $\approx 1/10^{\text{e}}$ du nombre de niveaux. Un bâtiment de 4 étages sur rez-de-chaussée aura une période propre proche de 0,5 s.

LA CONSTRUCTION PARASISMIQUE

DES DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES ÉPROUVÉES



- Situation du projet
- Catégorie d'importance des bâtiments (→ règles de construction applicables)
- Conception
- Réalisation contrôlée
- Conformité des matériaux



source : P. Balardier

Contreventement par ossature acier lors du chantier du palais de justice de Grenoble ;



Clinique (Martinique) sur isolateurs en élastomère fretté + amortisseurs à fluide visqueux



source : JC Audru



Pont parasismique (Martinique) avec joints et amortisseurs joignant les culées au tablier

LE CONFORTEMENT PARASISMIQUE

DES SOLUTIONS VARIÉES



Contreforts béton et contreventements acier sur immeubles, Martinique, source : Replik972.fr



Contreforts liaisonnés à la structure, Sophia Antipolis ; source: freyssinet.com



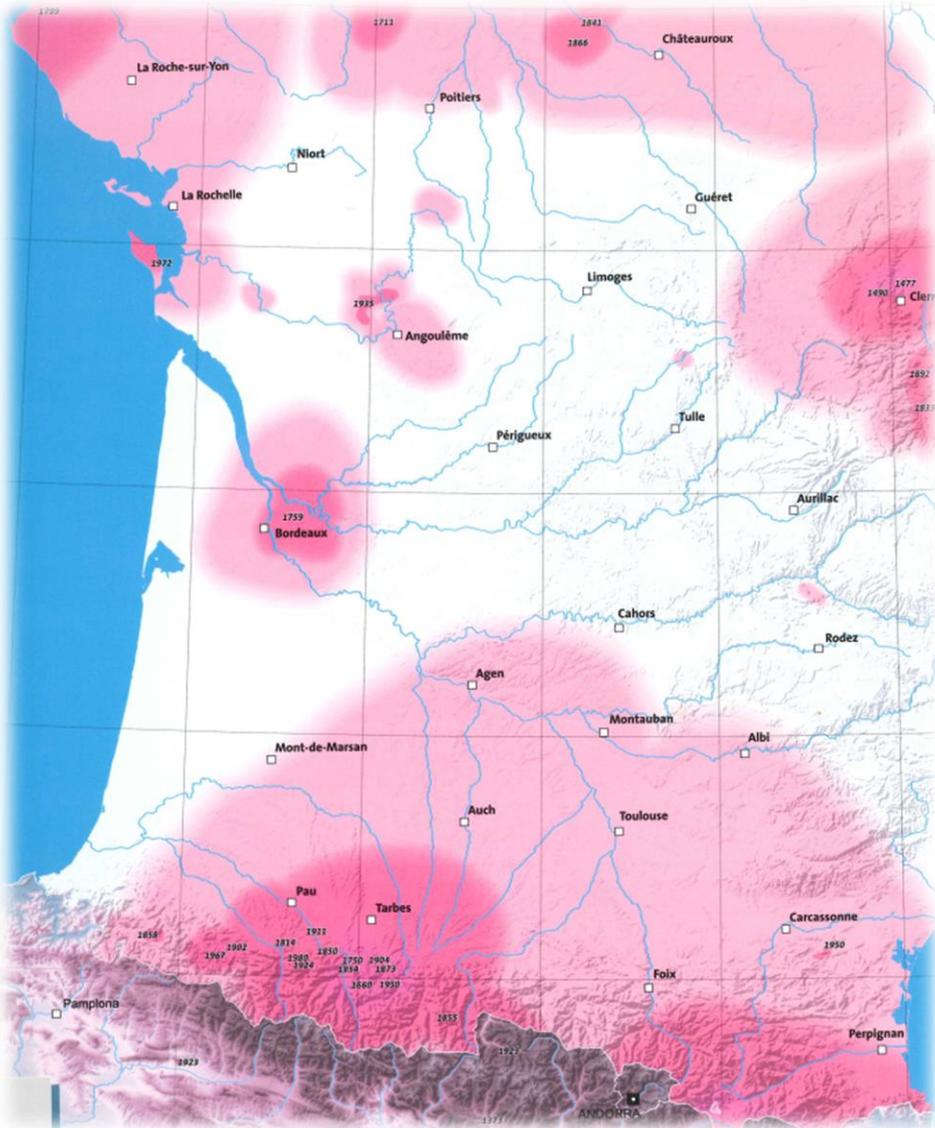
Renforcement de nœuds poteau-poutre par des renforts composites ; source: freyssinet.com



Renforcement d'un collège en Suisse, source : Kcing.ch

LA SISMICITÉ HISTORIQUE

CONNUE GRÂCE AUX ÉCRITS ANCIENS



ÉCHELLE D'INTENSITÉ

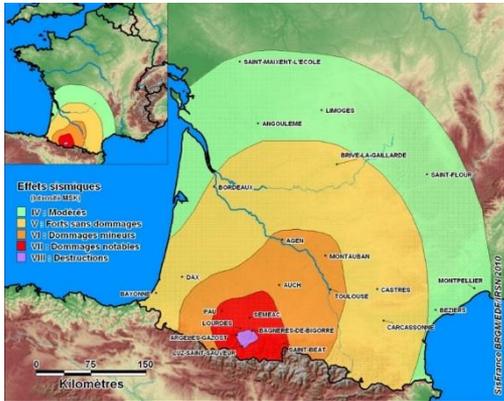
- IV et IV-V - Secousse modérée
- V et V-VI - Secousse forte
- VI et VI-VII - Légers dommages
- VII et VII-VIII - Dommages modérés
- VIII et VIII-IX - Dommages importants
- IX et IX-X - Dommages sévères

1682 Année identifiant un séisme et son épicentre ayant atteint ou dépassé le degré VII de l'échelle d'intensité.

Source : BRGM

LA SISMICITÉ HISTORIQUE

Séisme de Bigorre 1660

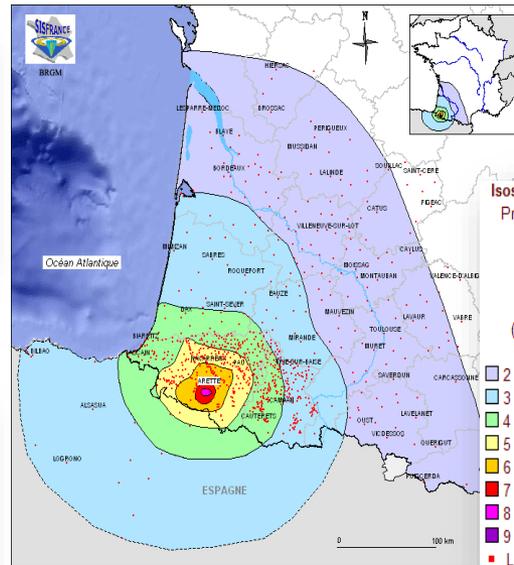
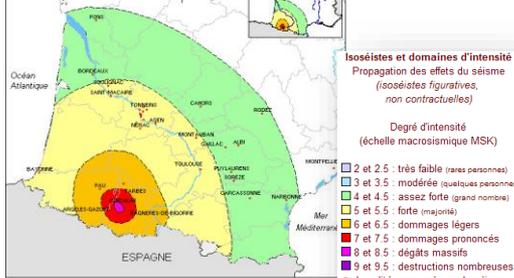


SÉISMES RÉGIONAUX D'INTENSITÉ > VIII

Séisme d'Arrette du 13 août 1967 ; M~5,3 ; 1 mort, 800 sinistrés /1200 hb, bâti détruit à 80%



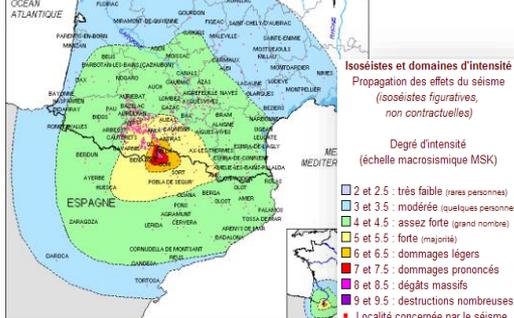
Séisme de Juncalas 1750



Sources : SudOuest, BCSF, BRGM

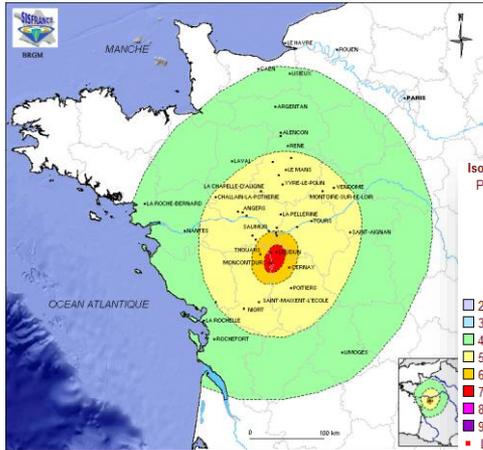


Séisme de Viella 1923



LA SISMICITÉ HISTORIQUE

SÉISMES RÉGIONAUX D'INTENSITÉ VI à VII-VIII



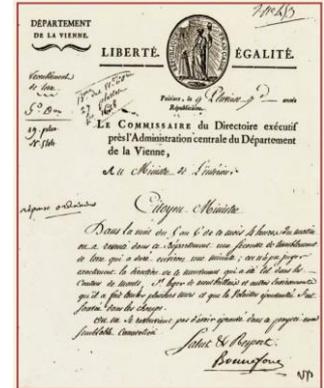
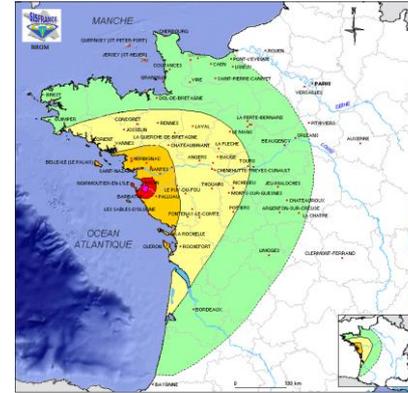
**Loudun
1711**

Isoséistes et domaines d'intensité
Propagation des effets du séisme
(isoséistes figuratives,
non contractuelles)

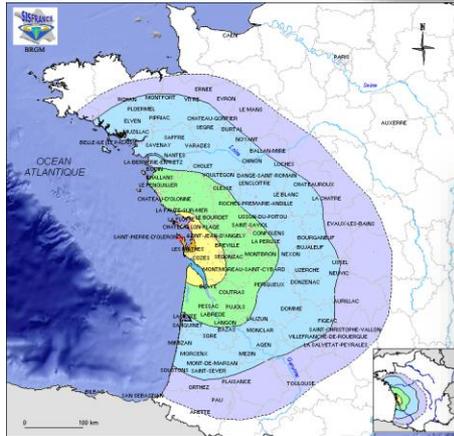
Degré d'intensité
(échelle macrosismique MSK)

- 2 et 2.5 : très faible (rares personnes)
- 3 et 3.5 : modérée (quelques personnes)
- 4 et 4.5 : assez forte (grand nombre)
- 5 et 5.5 : forte (majorité)
- 6 et 6.5 : dommages légers
- 7 et 7.5 : dommages prononcés
- 8 et 8.5 : dégâts massifs
- 9 et 9.5 : destructions nombreuses
- Localité concernée par le séisme

**Bouin 1799
« rejoué »
en 2016**



Sources : SudOuest,
BCSF, BRGM

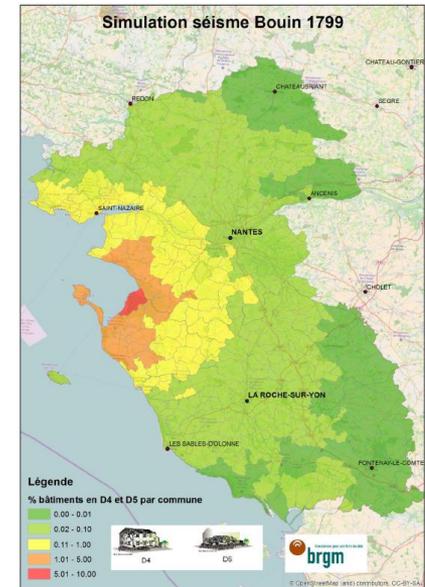
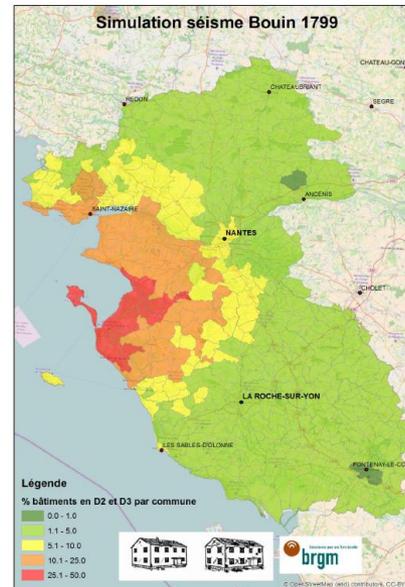


**Oléron
1972**

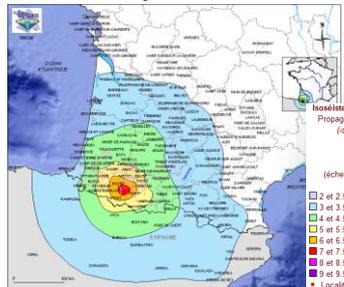
Isoséistes et domaines d'intensité
Propagation des effets du séisme
(isoséistes figuratives,
non contractuelles)

Degré d'intensité
(échelle macrosismique MSK)

- 2 et 2.5 : très faible (rares personnes)
- 3 et 3.5 : modérée (quelques personnes)
- 4 et 4.5 : assez forte (grand nombre)
- 5 et 5.5 : forte (majorité)
- 6 et 6.5 : dommages légers
- 7 et 7.5 : dommages prononcés
- 8 et 8.5 : dégâts massifs
- 9 et 9.5 : destructions nombreuses
- Localité concernée par le séisme



Arudy 1980



La terre a tremblé dans le Sud-Ouest La secousse ressentie jusqu'à Bordeaux

Isoséistes et domaines
Propagation des effets
(isoséistes figu
non contract)

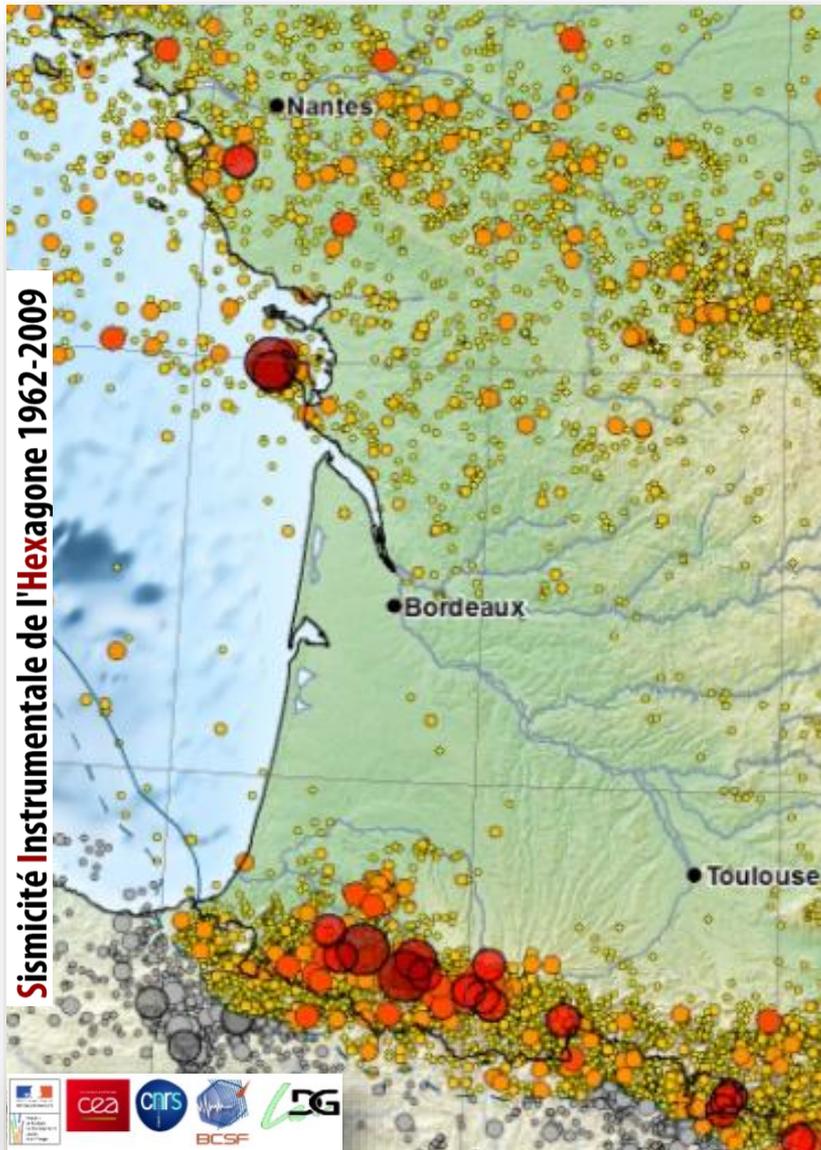
Degré d'intensité
(échelle macrosismique MSK)

- 2 et 2.5 : très faible (rares personnes)
- 3 et 3.5 : modérée (quelques personnes)
- 4 et 4.5 : assez forte (grand nombre)
- 5 et 5.5 : forte (majorité)
- 6 et 6.5 : dommages légers
- 7 et 7.5 : dommages prononcés
- 8 et 8.5 : dégâts massifs
- 9 et 9.5 : destructions nombreuses
- Localité concernée par le séisme



LA SISMICITÉ INSTRUMENTALE

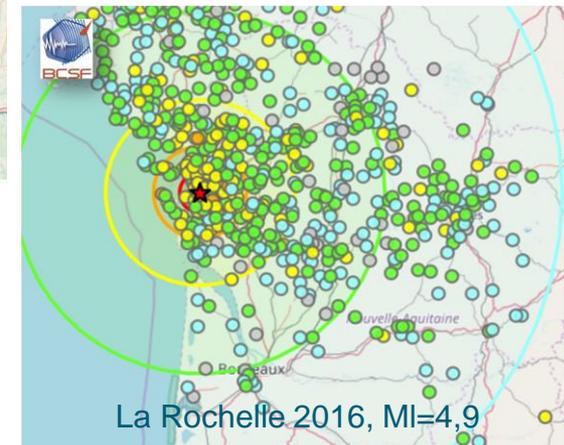
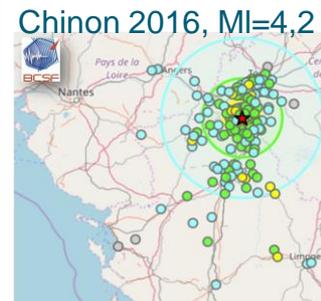
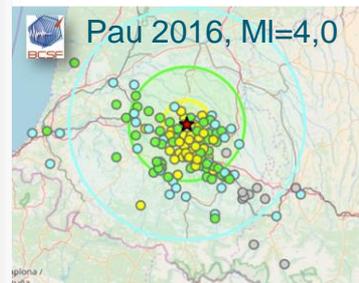
MESURÉE DEPUIS 1962



Le catalogue SIHex (1962-2009)

- Les nombreux séismes enregistrés depuis les années 60' s'organisent de la même façon que les séismes historiques

Quelques séismes régionaux récents (séquence de 2016)

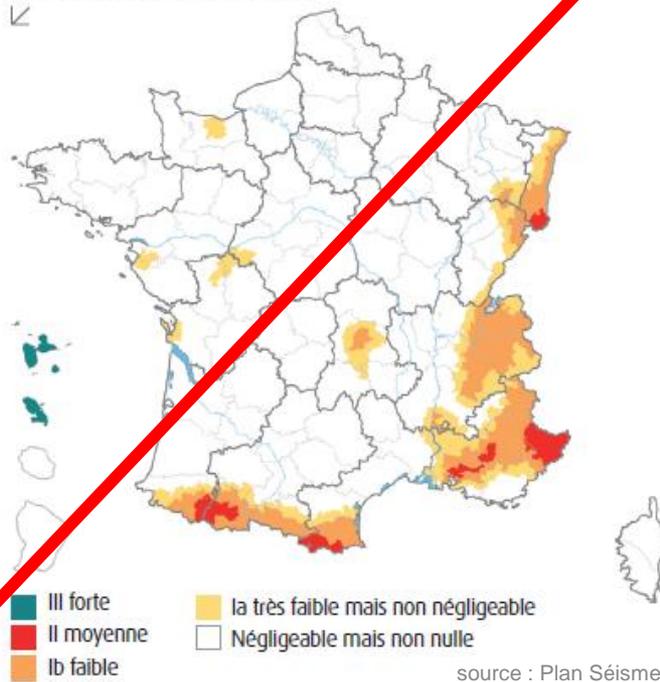


LE ZONAGE RÉGLEMENTAIRE

TOUJOURS EN ÉVOLUTION

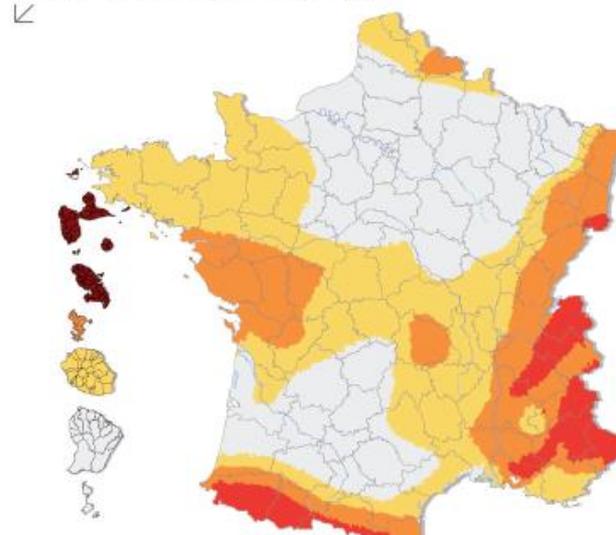
Une actualisation du zonage sismique réglementaire français en 2010 (puis 2015) rendue nécessaire par l'évolution des connaissances scientifiques et la mise en place du code européen de construction parasismique Eurocode 8

Ancien zonage sismique (jusqu'au 30/04/2011)
Décret n° 91-461 du 11 mai 1991



Découpage cantonal et déterministe de l'aléa basé sur les données sismologiques antérieures à 1984, ~ 5000 communes concernées

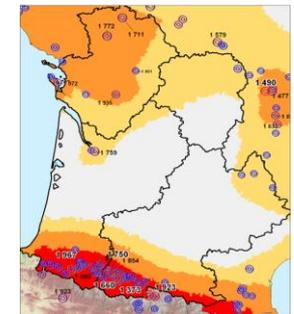
Nouveau zonage sismique (depuis le 01/05/2011)
Décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010



Découpage communal et probabiliste de l'aléa basé sur :

- La sismicité historique révisée puis instrumentale depuis 1984 pour des magnitudes $\geq 3,5-4$
- La période de retour de la sismicité (nombre de séismes /an)
- Le zonage de zones de sismicité homogène
- ~21000 communes

	Accélération	Zone de sismicité	Remarque
	$< 0,7 \text{ m/s}^2$	très faible	
	$0,7 \text{ m/s}^2 \leq a < 1,1 \text{ m/s}^2$	faible	englobe tous les séismes historiques d'intensité ressentie supérieure ou égale à VII
	$1,1 \text{ m/s}^2 \leq a < 1,6 \text{ m/s}^2$	modérée	englobe tous les séismes historiques d'intensité ressentie supérieure ou égale à VIII
	$1,6 \text{ m/s}^2 \leq a < 3,0 \text{ m/s}^2$	moyenne	en cohérence avec les zonages des pays limitrophes
	$> 3,07 \text{ m/s}^2$	forte	Outre-mer





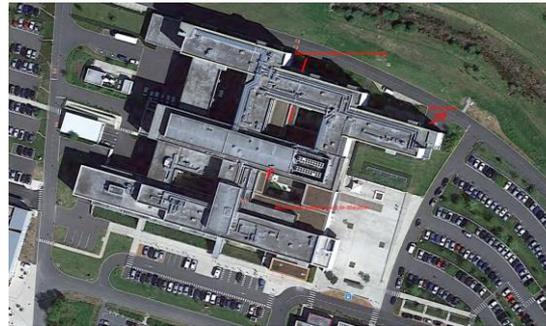
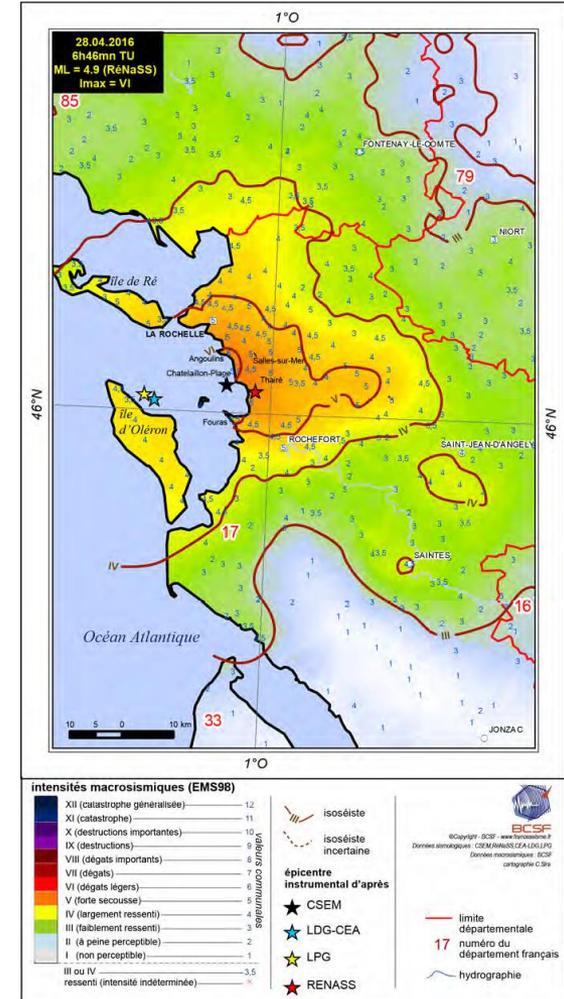
LE SÉISME « DE LA ROCHELLE, 2016 »

28 avril 2016, M ~ 4.9



Localisations d'après	Latitude (WGS84)	Longitude (WGS84)	Prof. (km)	Magnitude (M _L)	Magnitude (M _w)
LDG (CEA)	46,02	-1,29	7 (imposée) 10.3 (pP et sP)	5,1	
RéNaSS (EOST)	46,04	-1,04	15	4,9	-
LPG (Nantes)	46,028	-1,315	3 à 10	-	-
CSEM-EMSC	46,05	-1,12	5	4,6	-
USGS	46,069	-1,168	10		3,9
INGV	46,12	-1,20	16 (imposée)		4,15
GFZ	46,07	-1,16	5 à 10		3,9
Geoazur	-	-	8 (4 à 18)	-	3,8
BCSF (valeurs préférentielles)	46,05	-1,12	10.3 (pP et sP)	5±0,1 (4,9 à 5,1)	3,8 à 3,9

Source : BCSF



- **Chatellaillon** : cheminées endommagées, pierres de façade descellées au Casino
- **Angoulins, Salles-sur-Mer, Thaire d'Aunis, Yves** : fissures en façades et murs, cheminées endommagées
- **Fouras** : chute de cumulus, déplacement de faîtage
- **La Rochelle** : chute de pierres du sommet de la Tour de la Lanterne, ...

Quelques sites (sismicité historique et instrumentale)

Les séismes historiques en France
<http://www.sisfrance.net>

Le Commissariat à l'Énergie Atomique
<http://www-dase.cea.fr/>

Le Bureau Central Sismologique Français
<http://www.franceseisme.fr>

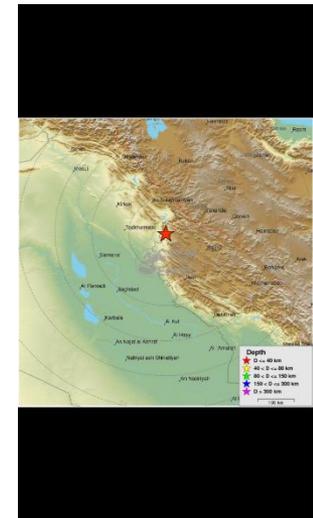
Le Réseau National de Surveillance Sismique
<http://renass.unistra.fr>

Le Centre sismologique euro-méditerranéen
<http://www.emsc-csem.org/>

L'institut géologique américain USGS
<https://earthquake.usgs.gov>



Alerte en temps réel (mais un peu après Facebook...) :
L'appli LastQuake du CSEM et de la Fondation
MAIF/Thalès



EN CONCLUSION, CONSTRUISEZ SIMPLE ET SOBRE...



Source : JC Audru