

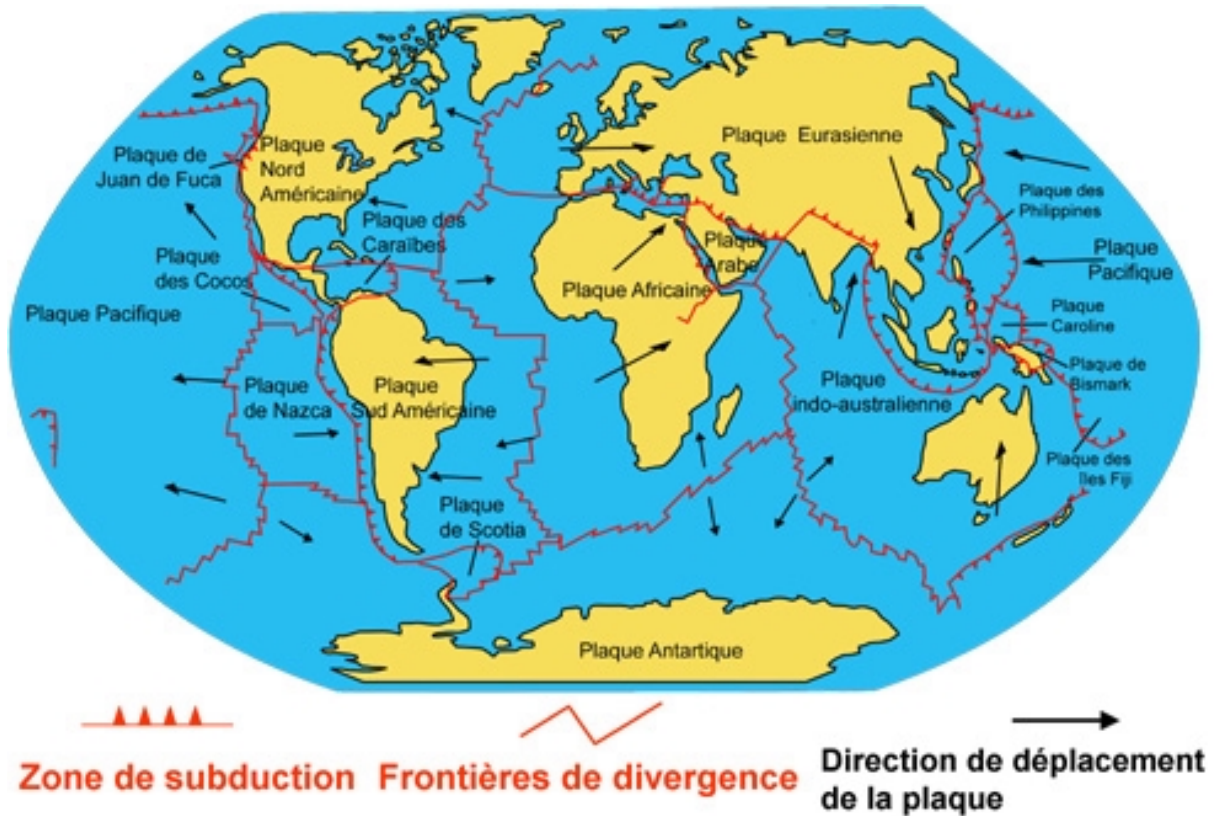
Formation CLIS

Sismologie

Michel Granet

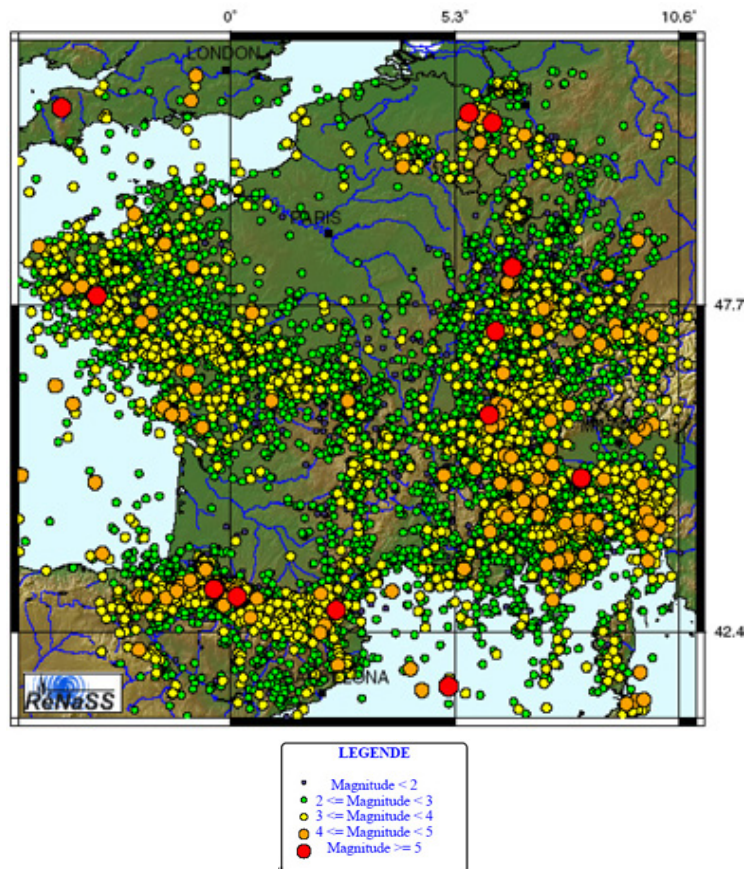
Directeur du Rénass
Strasbourg

La tectonique des plaques



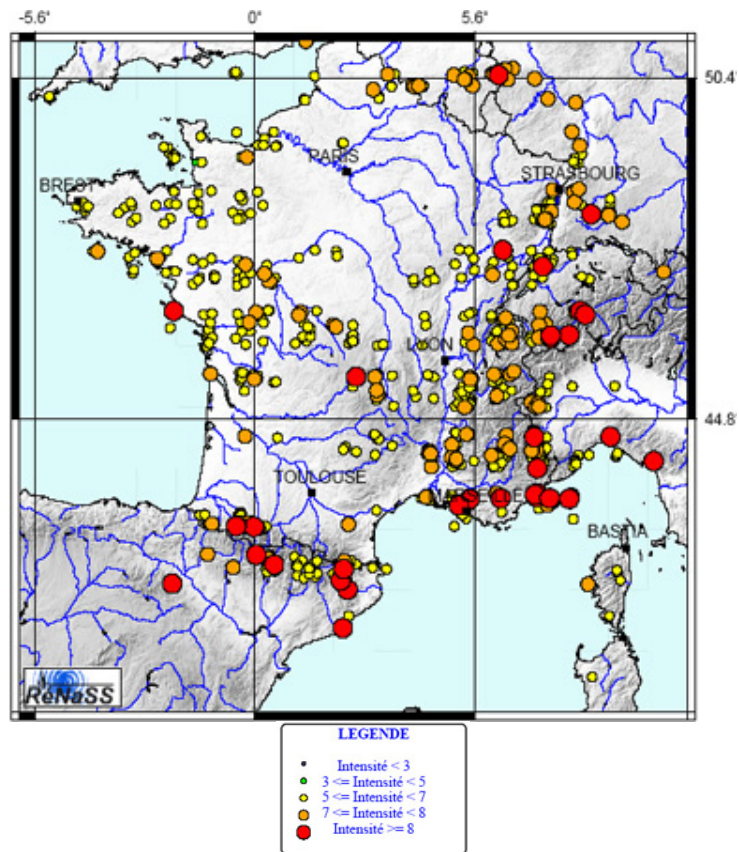
La lithosphère (enveloppe supérieure de la terre) est morcelée en différentes plaques. Ces morceaux ne sont pas immobiles et sont animés chacun d'un mouvement, d'une direction de déplacement. Ce sont ces déplacements provoquant des collisions entre plaques, qui sont responsables des séismes.

La sismicité récente de la France



Latitude : de 41.00 à 52.00
Longitude : -5.00 à 11.00
Période du 10 janvier 1980 au 30 avril 2004
Source RÉNaSS et LDG

La sismicité historique de la France



Latitude : de 40.00 à 51.00
Longitude : de -6.00 à 11.00
Période du 14 juin 590 au 14 décembre 1994
Source Base Siren

Définitions

LA MAGNITUDE

1. Introduite par Ch. Richter en 1935 pour les séismes locaux californiens afin d'estimer l'énergie libérée au foyer.

2. C'est une grandeur physique mesurée :

- soit à partir du logarithme de l'amplitude des ondes sismiques enregistrées par un sismomètre (M_L , M_S , m_B , M_W),
- soit à partir du logarithme de la durée du signal (M_D).

C'est une **fonction continue** qui peut être négative (fonction de la sensibilité du capteur) : et atteindre des valeurs de -2, voire -3.

Sa valeur maximale est fonction de la longueur maximum de la faille susceptible de se fracturer en une seule fois.

3. **Magnitude de Richter** : $M_L = \log A(\Delta) - \log A_0(\Delta)$

A est l'amplitude maximale en mm sur l'enregistrement obtenu par un sismographe du type Wood Anderson situé à une distance Δ

$M_L=0$: correspond à la mesure d'une amplification de 1 micromètre, sur un sismomètre W-A, à 100 km de distance.

S'applique " bien " aux séismes locaux.

4. **Magnitude de surface** : $M_S = \log A(\Delta) - \log A_0(\Delta)$ (Gutenberg & Richter)

$M_S = \log (A/T) + 1,66 \log (\Delta) + 3,3$ (formule dite de " Prague ")

A = amplitude maximale du mouvement du sol en micromètres observée sur une onde de Rayleigh dont la période T est voisine de 20s. Δ est la distance épacentrale en degrés.

S'applique " bien " aux télé-séismes superficiels ($h < 80$ km, $90^\circ > \Delta > 25^\circ$).

5. **Magnitude de volume** : $m_B = \log (A/T) + Q (\Delta, h)$ (Gutenberg)

A = amplitude du mouvement du sol en microns observée sur la composante verticale de l'onde P (T = 1s). T est la période de l'onde dont on mesure l'amplitude

Q est une fonction de calibration fonction de h (profondeur) et Δ (distance).

S'applique à tous les séismes.

6. **Magnitude de durée** : $M_D = a + b \times \log (t) + c \times \log (t^2) + d\Delta$

(formules de Bisztricsany (1958) et Real & Teng (1973))

C'est une échelle locale qui s'applique aux petits séismes ($M < 4,5$ et $\Delta < 200$ km).

Problème : les trois échelles M_L , m_B et M_S " saturent " (on ne peut pas dépasser une certaine valeur) car elles ne sont pas représentatives de l'ensemble du spectre sismique.

7. Magnitude d'énergie : M_W (ou magnitude de Kanamori, 1977).

Kanamori utilise le moment sismique ($M_0 = m \cdot S \cdot \Delta u$), qui s'obtient à partir du niveau plat du spectre.

$$M_W = 2/3 \log (M_0) - 6,0$$

Exemple : séisme du Chili du 22/05/1960: $M_S = 7$, $M_W = 9,5$.

8. Magnitude de manteau : M_m (Okal & Talandier, 1989).

C'est une magnitude où la période de calcul n'est pas toujours la même.

$$M_m = \log X(w) + C_{\text{Distance}} + C_{\text{Source}} + C_{\text{calibration}}$$

$X(w)$ est l'amplitude spectrale de l'onde de Rayleigh à la période w (et à une distance Δ)

$C_{\text{calibration}}$ est une constante choisie de façon à ce que $M_m = M_W$ pour $M_W = 8$.

Pour se fixer les idées :

$M = 6$	$L = 10 \text{ km}$	$\Delta u = 20 \text{ cm}$	$t = 3 \text{ s}$
$M = 7$	$L = 50 \text{ km}$	$\Delta u = 100 \text{ cm}$	$t = 15 \text{ s}$
$M = 8$	$L = 200 \text{ km}$	$\Delta u = 500 \text{ cm}$,	$t = 60 \text{ s}$
$M = 9$	$L = 800 \text{ km}$	$\Delta u = 1500 \text{ cm}$	$t = 250 \text{ s}$

L : longueur de la faille, Δu : coulissage moyen et t : durée de la rupture.

9. Energie: $\log E = 1,5 M_W + 4,8$ (E en joules)

Un séisme de magnitude 8 produit une énergie de $6,3 \cdot 10^{16}$ Joules à comparer à la consommation énergétique annuelle de l'Alsace : $5 \cdot 10^{16}$ Joules.

Définitions

L'INTENSITE

Elle ne se calcule pas ! Elle est **estimée** à partir des effets produits (observés et/ou ressentis) par le séisme.

L'échelle d'intensité comporte douze degrés :

I :	Secousse non perceptible
II :	Secousse à peine perceptible
III :	Secousse faible ressentie seulement de façon partielle
IV :	Secousse largement ressentie
V :	Réveil des dormeurs
VI :	Frayeur
VII :	Dommages aux constructions
VIII :	Destruction de bâtiments
IX :	Dommages généralisées aux constructions
X :	Destruction générale des bâtiments
XI :	Catastrophe
XII :	Changement de paysage

On appelle **isoséistes** les courbes d'égale intensité. Le centre de la courbe de plus forte intensité (I_0) est l'**épicerentre macrosismique**.

Relation intensité-magnitude : empirique, nécessairement empirique !

$M=0,5 I_0 + 0,35 + \log (h)$ (Karnik) (si $h=10$ et $I_0=VIII$ alors $M=5,35$)

- Séisme dit de " Peille " du 19/12/2000 : $ML=3,4 / I_0=V$
- Séisme dit " d'Annecy " du 15/07/1996 : $ML=5,2 / I_0=VII/VIII$

Cette relation est dépendante des caractéristiques du séisme, du site et du contexte sismotectonique donc peu fiable !

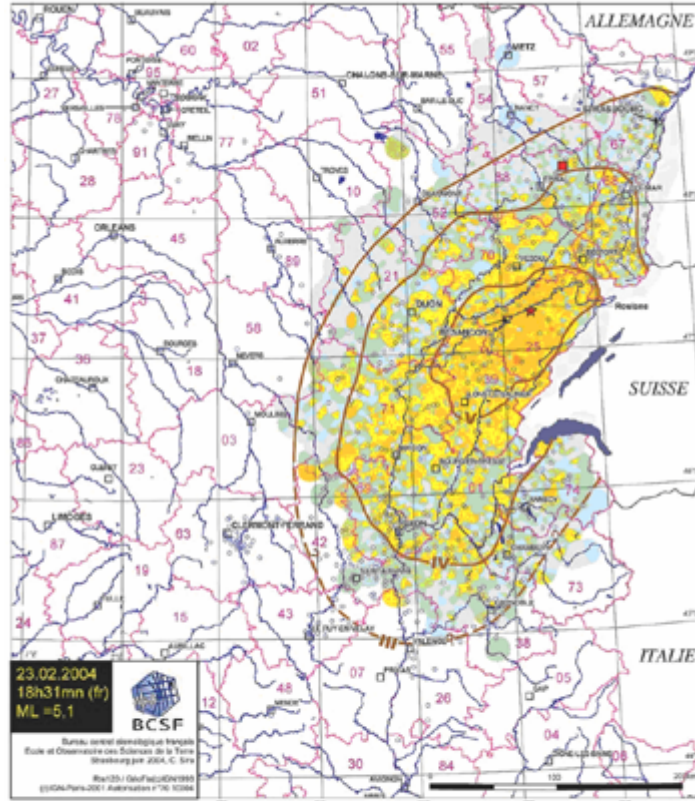
Relation intensité-accélération du sol

A terme, les échelles d'intensité devraient être remplacées par les échelles d'accélération du sol (voir effets de site) au fur et à mesure du déploiement de stations accélérométriques et de la connaissance des lois d'atténuation.

Lois empiriques (eg. Murphy et O'Brien) :

- $\log (A_h) = 0,25 I + 0,25$ ($I = VIII \implies A_h = 177 \text{ cm/s}^2 = 0,18 \text{ g}$)
- $\log (A_v) = 0,30 I - 0,54$

**Séisme du 23 février 2004 de Roulans (dép.25)
Carte macrosismique (EMS98)**



Intensités macrosismiques communales (EMS98)

- VI - dégâts légers
- V - fortement ressenti (seuil de dégâts)
- IV - largement ressenti
- III - faiblement ressenti
- II - rarement ressenti
- I - non ressenti
- commune ayant ressenti la secousse (sans estimation d'intensité)

- isoséiste
- ★ épicentre du séisme de Roulans (localisation Réness)
- épicentre du séisme de Rambervillers fév.2003 (localisation réseau local)
- limite départementale et n° du département hydrographie

Accélération du sol

Il y a diminution de l'énergie sismique en fonction de la distance à la source.

Les principales causes sont :

- atténuation géométrique
- anélasticité et fissuration des milieux traversés
- effets de site (caractéristiques géomécaniques et géométriques)

Lois d'atténuation empiriques : $A = C (1/r) \times \exp(aM) \times \exp(-br) \times f(S)$

Avec A = amplitude du pic d'accélération, r distance à la zone de rupture, $f(S)$ fonction de site, C , a et b constantes.

Effets de site : ce sont les effets d'amplification dus aux caractéristiques géomécaniques ou géométriques du sol. Ils sont observés depuis longtemps (par exemple Mexico, 1985).

Caractéristiques géomécaniques :

→ Les dommages sont systématiquement plus importants sur les zones à sol meuble que sur les affleurements rocheux (x 10) en raison de l'effet de résonance. Ceci est dû au piégeage des ondes sismiques dans les couches peu rigides (alluvions, sédiments récents, remblais, sol meubles, etc.)

Cas simple 1D : soit une onde transversale verticale traversant un milieu (vitesse de l'onde : V_2 , densité du milieu : r_2) surmonté d'une couche (V_1 , r_1) d'épaisseur h :

Fréquences de résonance : $f_n = (2n + 1) \times V_1 / 4 h$ (fondamentale $n = 0$)

Amplification : $A = r_2 V_2 / r_1 V_1$

Exemple : $h = 80$ m, $V_1 = 500$ m/s, $r_1 = 1,5$ g/cm³ (alluvions)

$V_2 = 2000$ m/s, $r_2 = 2,3$ g/cm³

→ $A=6,1$ et $f_n = 1,6; 4,7; 7,8; 10,9$ Hz, etc.

Mais en général les structures sont 2D → création et propagation d'ondes de surface ; selon le rapport $h/0,5 L$ (largeur), les valeurs 1D peuvent être multipliées par 4.

Caractéristiques géométriques :

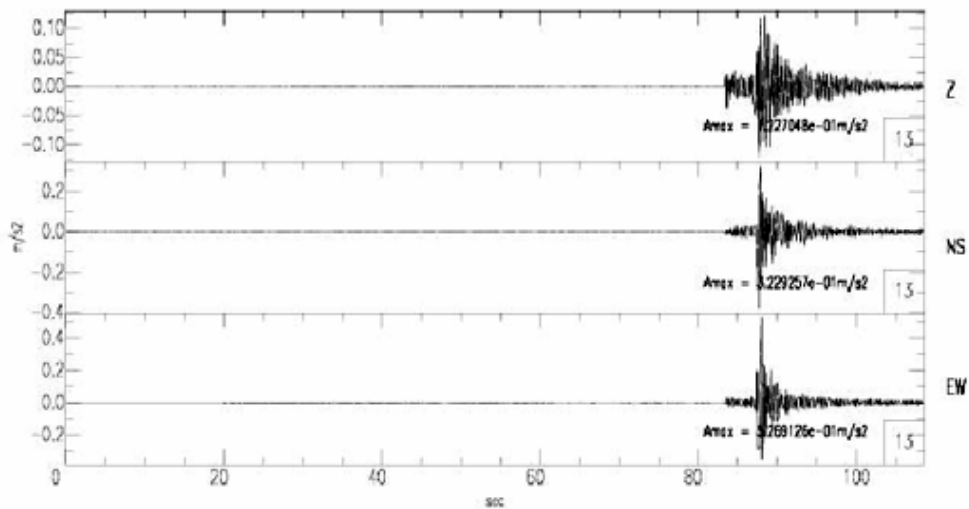
→ Les mouvements enregistrés au sommet des reliefs sont systématiquement plus importants que ceux enregistrés au pied des reliefs (x 20).

- Fonction du rapport L (largeur relief) / l : maximal pour $0,33 < r < 3$
- Indépendant de M
- $A_{\text{Horizontal}} > A_{\text{Vertical}}$

RESEAU ACCELEROMETRIQUE PERMANENT

SITE CENTRAL

STATION :	ENREGISTREMENT :	EVENEMENT : 040223 173120
nom : STFL	date : FEB 23 (054), 2004	latitude : 4.729000e+01
latitude : 4.708000e+01	heure : 17:30:03.467 UTC	longitude : 6.270000e+00
longitude : 6.320000e+00		profondeur : 1.000000e+01
elevation : 9.100000e+02		region : ENE BESANCON(25)
profondeur : 0.000000e+00		magnitude : 5.100000e+00
Reseau : RAP-EGST		source : renaissance



Accélérations du sol en m/s² enregistrées par les stations du RAP

Stations	Distance épicentrale (km)	ZZ m/s²	NS m/s²	EW m/s²
STFL	24	0.123	0.381	0.327
STBU	79	0.117	0.175	0.150
STDN	84	0.058	0.086	0.097
STBR	93	0.046	0.175	0.176
STUF	97	0.113	0.139	0.218
STBO	98	0.020	0.030	0.054
STHE	101	0.046	0.048	0.049
STSM	123	0.031	0.029	0.039
STMU	182	0.087	0.099	0.047
OGTB	111	0.017	0.020	0.037
OGSI	142	0.009	0.011	0.013
OGEP	152	0.038	0.067	0.066
OGPO	153	0.022	0.049	0.043
OGAN	155	0.016	0.024	0.023

OGAP	155	0.093	0.231	0.263
OGMA	179	0.079	0.152	0.163
OGBL	188	0.052	0.091	0.058
OGLE	197	0.010	0.012	0.019
OGCH	203	0.027	0.035	0.037
OGTI	207	0.004	0.003	0.004
OGFB	236	0.007	0.007	0.008
OGFH	236	0.025	0.037	0.029
OGMO	235	0.008	0.007	0.005
OGCU	236	0.024	0.039	0.033
OGMU	237	0.018	0.023	0.029
OGSR	239	0.025	0.025	0.043
OGDH	240	0.044	0.063	0.063
OGPC	244	0.009	0.018	0.016
OGMB	258	0.003	0.007	0.007
OGAG	280	0.003	0.004	0.004
OGDI	356	0.002	0.003	0.003

La prévision sismique

Prévoir les tremblements de terre : localisation (site), date, magnitude !

Géophysique (sismologie) = **Géologie** (science naturelle) + **Physique** (science exacte)

- Observation des phénomènes, enregistrement de l'activité sismique, cartographie des failles
- Etude expérimentale du comportement des roches, construction de modèles

Approche empirique : prévoir directement à partir d'observations.

Interprétation directe des observations sans connaissance des processus mécaniques précédant le tremblement de terre :

- Variation du potentiel électrique
- Variation de la vitesse de propagation des ondes sismiques
- Variation du niveau de l'eau dans les puits
- Emanation de gaz rares
- Déformation géodésique (augmente ou décroît)
- Comportement anormal des animaux
- Composition chimique des eaux minérales

Il existe des précurseurs hydrologiques, géochimiques, électriques, magnétiques, sismologiques, etc.

On observe ces phénomènes précurseurs, MAIS :

- Non reproductibles d'un site à l'autre (en fonction du contexte sismotectonique),
- Difficulté d'établir un lien entre l'observation et le " possible " futur séisme,
- Pollution des signaux précurseurs par des bruits anthropiques ou naturels.

Nous n'avons pas de théorie expliquant l'ensemble des phénomènes observés ...

Approche mécanique : construire un modèle physique qui débouchera sur une méthode de prévision.

Quel est l'ensemble des paramètres physiques et chimiques susceptibles d'être affectés par l'initiation de la rupture ?

Où est localisée la zone de nucléation du séisme ? Quelle est la durée de cette phase de nucléation ?

Prévision à long terme : de plusieurs années à plusieurs décennies.

- Tectonique des plaques : taux de convergence, taux de récurrence
- Sismotectonique, Sismicité historique, Sismicité instrumentale

Problème : validité des concepts de séisme caractéristique, de période de retour ?

Prévision à moyen terme : de plusieurs semaines à quelques années.

C'est la probabilité qu'un événement de magnitude prévue se produise dans une période de temps précisée.

- Analyse des catalogues de sismicité
- Déformations (GPS)

Prévision à court terme : de quelques heures à quelques jours.

- Anomalies simultanées sur différents paramètres physiques,
- Vp/Vs, niveau d'eau dans les puits,
- Radon, etc.

La prévision ne peut être validée que sur site pilote avec groupe d'experts constitué.

Quelques méthodes : lacune sismique, VAN (1981) : variation de l'intensité du courant électrique dans le sol, VP/VS, radon, activité sismique (variation du taux des petites secousses), etc.

Approche systématique de la prévision et des phénomènes précurseurs (sites pilotes avec stratégie d'observation) :

- Parkfield (USA) : 90% de chances pour un M=6 après 1993 !
- Faille Nord-Anatolienne
- Japon
- Corinthe

Succès :

- **Chine** (approche empirique, " Haicheng " 5/02/75, M=7,5, " Song Pan ", 1976),
- **USA** (approche empirique, " Blue Mountains ", VP/VS, 27/07/73, M=2,3, théorie de la dilatance)

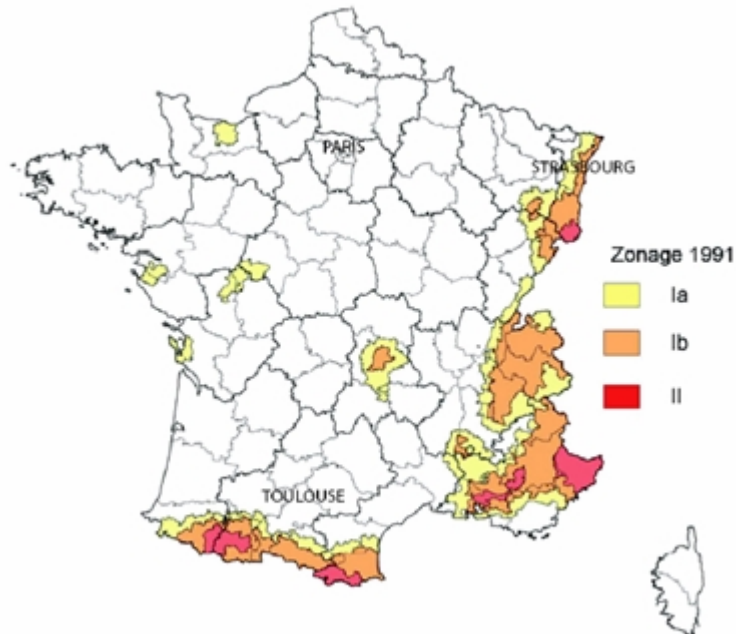
Echecs : **Chine** (approche empirique, Tangshan, 28/07/76, M=7,9)

LA PROTECTION DES PERSONNES ET DES BIENS DOIT ETRE D'ABORD BASEE SUR LA PREVENTION

TABLE DE RECURRENCE DES SEISMES DEPUIS 1900

Classification	Magnitude	Moyenne annuelle
Grand	8 et plus	1
Majeur	7 à 7,9	18
Fort	6 à 6,9	120
Modéré	5 à 5,9	800
Faible	4 à 4,9	6200 estimés
Mineur	3 à 3,9	49000 estimés
Très mineur	en dessous de 3	de 2 à 3/1000 /jour de 1 à 2/8000 /jour

ZONE DE SISMICITÉ EN FRANCE MÉTROPOLITAINE



- zone I : "sismicité faible"

- aucune secousse d'intensité supérieure ou égale à IX n'a été observée historiquement,
- la période de retour d'une secousse d'intensité supérieure à VIII dépasse 250 ans,
- la période de retour d'une secousse d'intensité supérieure à VII dépasse 75 ans.
- **zone Ia** : "sismicité très faible mais non négligeable" : aucune secousse d'intensité supérieure à VIII n'a été observée historiquement, les déformations tectoniques récentes sont de faible ampleur.
- **zone Ib** : "sismicité faible" qui reprend le reste de la zone I

- zone II : "sismicité moyenne"

- soit une secousse d'intensité supérieure à IX a été observée historiquement.
- soit les périodes de retour d'une secousse d'intensité supérieure ou égale à VIII et d'une secousse d'intensité supérieure ou égale à VII sont respectivement inférieures à 250 et 75 ans.