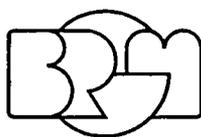


BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES
SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL

NATURE ET DEFINITION DE L'ALEA SISMIQUE

par

P. GODEFROY* et A. LEVRET**



DEPARTEMENT GENIE GEOLOGIQUE
ATELIER RISQUE ET GENIE SISMIQUES

* BRGM/SGN-GEG/ARGES

** CEA/IPSN/DAS/SAER BP 6 - 92260 FONTENAY-aux-Roses

Rapport du B.R.G.M.
83 SGN 925 GEG

Décembre 1983

NATURE ET DEFINITION DE L'ALEA SISMIQUE

par

Pierre GODEFROY* et Agnès LEVRET**

* BRGM/SGN-GEG/ARGES ** CEA/IPSN/DAS/SAER BP.6 92260 FONTENAY-
aux-Roses

83 SGN 925 GEG

Marseille, Décembre 1983

R E S U M E

La notion d'*aléa sismique* recouvre la possibilité pour un site ou une région d'être exposé à une secousse sismique de caractéristiques données. Ces caractéristiques traduisent les effets potentiels du tremblement de terre parmi lesquels on peut distinguer schématiquement, en fonction des principaux mécanismes définissant le phénomène sismique, *les déformations tectoniques* associées à l'apparition d'une rupture brutale au sein des roches de l'écorce terrestre et *l'ébranlement du sol* résultant de l'émission et de la propagation des ondes sismiques. Ces phénomènes principaux sont à l'origine de différents *effets primaires* (ou directs) sur l'environnement physique et les ouvrages qui y sont édifiés, eux-mêmes susceptibles d'engendrer toute une série d'*effets secondaires* (ou indirects), d'où l'immense diversité des conséquences possibles d'un tremblement de terre et corrélativement l'étendue de la notion d'aléa sismique.

C'est à partir de l'inventaire de l'ensemble des effets observés en un point qu'est estimée *l'intensité macrosismique*. Ce paramètre, dont l'usage est très répandu en génie parasismique, peut ainsi servir à quantifier la sévérité d'une secousse potentielle en un site. Cependant, par sa définition même, il ne représente aucune grandeur physique et ne peut donc être utilisé directement dans des calculs : d'où le recours aux *paramètres de mouvements du sol* (accélération, vitesse, déplacement). Dans la pratique, différents types de corrélations entre ces paramètres ont été établis, dont le domaine de validité doit être discuté.

Disposant de paramètres quantitatifs pour caractériser une secousse sismique en un point donné, il devient possible de préciser la notion d'aléa sismique qui représente alors la distribution de probabilités de dépassement au cours d'une période de référence, de différentes valeurs de ces paramètres. Elle se distingue bien ainsi de celle de *risque sismique* qui intègre les conséquences économiques de la secousse. Il est alors montré que, dans la pratique, l'évaluation de l'aléa sismique peut prendre différentes formes et que notamment, la tendance actuelle conduit à distinguer deux échelles : *l'échelle régionale* et *l'échelle locale* selon que sont prises en compte, ou non, les caractéristiques topographiques et géologiques propres des sites considérés.

ABSTRACT

The notion of *seismic hazard* signifies the possibility for a site or for a region to be subjected to an earthquake with given characteristics. These characteristics convey the potential effects of the earthquake, which may be broken down summarily, according to the main mechanisms by which the seismic phenomenon is defined, into *tectonic deformations*, associated with the appearance of a sudden rupture within the rocks composing the Earth's crust, and *ground vibrations*, resulting in the generation and propagation of seismic waves. These main phenomena are responsible for *primary*, or direct, *effects* upon the physical environment and upon the structures erected thereon, and these in turn are capable of giving rise to a whole series of *secondary*, or indirect, *effects*, whence the great diversity of possible consequences of an earthquake and, accordingly, the wide range covered by the notion of seismic hazard.

An exhaustive survey of all effects observed at a given location are required when estimating the *macroseismic intensity*. This parameter, very current in engineering seismology, can be called upon to quantify the severity of a potential event on a site. However, by its very definition, it is not representative of any precise physical entity and therefore cannot be used directly in calculations : recourse must consequently be had to the physical *parameters of ground motion* (acceleration, velocity, displacement). In practice, various types of collections between these parameters have been established, the range of validity of which should be discussed.

Once quantitative parameters have been made available to characterize a seismic event on a given spot, the notion of seismic hazard can be ascribed a precise meaning, thereby coming to represent the distribution, during a reference period, of the probabilities of different values of these parameters being exceeded. It is thus clearly distinct from the notion of *seismic risk*, which involves the economic consequences of the earthquake. It is then shown that, in practice, the assessment of seismic hazard may take on a variety of forms and that, in particular, the present tendency is to differentiate two types of scale : *regional scales* and *local scales*, according to whether, for each site considered, the individual topographical and geological characteristics are taken into account, or not.

SOMMAIRE

1	Introduction	page 1
2	Les différents types d'effets engendrés par les tremblements de terre :	1
	. Les déformations tectoniques	2
	. L'émission d'ondes élastiques	8
	. Combinaison des effets : séismes catastrophiques	12
3	Mesure des effets engendrés par les tremblements de terre :	12
	. Paramètres de mesure	12
	- Intensité macrosismique	12
	- Paramètres du mouvement du sol	15
	. Exploitation des données macrosismiques	17
	. Corrélations intensité-paramètres physiques.	22
4	Notion de risque sismique et d'aléa sismique	23
5	La notion d'aléa sismique aux différentes échelles	24
6	Conclusion	26

SUMMARY

1	Introduction	1
2	The various types of effects generated by earthquakes	1
	. Tectonic deformations	2
	. Emission of elastic waves	8
	. Combination of effects : catastrophic earthquakes	12
3	Measurement of effects generated by earthquakes	12
	. Measurement parameters	12
	- Macroseismic intensity	12
	- Parameters of ground motion	15
	. Processing macroseismic data	17
	. Intensity-physical parameter correlations	22
4	Notion of seismic risk and seismic hazard	24
5	Notion of seismic hazard at different scales	24
6	Conclusion	26

LÉGENDE DES TABLEAUX ET FIGURES

- TABLEAU 1 : Différents types d'effets engendrés par les tremblements de terre.
- TABLEAU 2 : Ordres de grandeur des déformations à la source en fonction de la magnitude et du moment sismique.
- TABLEAU 3 : Echelle d'intensité M.S.K. (1964)
- TABLEAU 4 : Equivalence entre degrés de l'échelle M.S.K. et paramètres de mouvement du sol, (d'après P.L. WILLMORE et al, 1971).
- TABLEAU 5 : Questionnaire utilisé pour les enquêtes macrosismiques effectuées en France.
- FIGURE 1a, b, c : Exemple de déformations tectoniques observées en surface du sol lors du séisme d'El Asnam (Algérie) du 10 octobre 1980 (magnitude 7.3).
- FIGURE 1d : Carte des déformations tectoniques observées en surface du sol et localisation des répliques. Séisme d'El Asnam (Algérie), 10 octobre 1980, (d'après D. HATFELD et H. PHILIP, 1981).
- FIGURE 2 : Carte des déformations tectoniques associées au tremblement de terre du 27 mars 1964, dans la région d'Anchorage (Alaska) : surrection et subsidence exprimées en mètres, (d'après G. PLAFKER, 1965).
- FIGURE 3 : Exemples de mouvements gravitaires associés au séisme du Monténégro (Yougoslavie) du 15 avril 1979 (magnitude : 7.1).
- FIGURE 4 : Exemples de phénomènes de liquéfaction observés lors du séisme du Monténégro (Yougoslavie) du 15 avril 1979 (magnitude : 7.1).
- FIGURE 5 : Exemple de chute de niveau de l'eau dans les piezomètres suite au séisme du 27.3.1964. Anchorage, Alaska, (d'après R.M. WALLER, 1966).
- FIGURE 6 : Comparaison de différentes échelles d'intensité, (d'après A. LEVRET, 1982).
- FIGURE 7 : Progression des dommages aux constructions dans l'échelle d'intensité M.S.K., (d'après A. LEVRET, 1982).

- FIGURE 8 : Valeurs réelles du pic d'accélération du sol en fonction de l'intensité pour trois périodes successives, (d'après N. N. AMBRASEYS, 1974).
- FIGURE 9 : Représentation schématique du phénomène sismique.
- FIGURE 10 : Comparaison des isoseistes de séismes de magnitude équivalente, (d'après B. MOHAMMADIOUN, 1982).
- FIGURE 11 : Détermination de la profondeur du foyer par ajustement à la loi de Sponheuer, (d'après X. GOULA, 1980).
- FIGURE 12 : Corrélations proposées par différents auteurs entre l'intensité macrosismique et le pic d'accélération horizontale du sol, (d'après J. R. MURPHY et L. J. O'BRIEN, 1977).
- FIGURE 13 : Aléa sismique régional et aléa sismique local.

FIGURE CAPTIONS

- TABLE 1 : Various types of effects generated by earthquakes.
- TABLE 2 : Approximate amount of deformation at the source as a function of magnitude and seismic moment.
- TABLE 3 : The M.S.K. intensity scale (1964).
- TABLE 4 : The equivalence between the degrees of the MSK scale and the parameters of ground motion (from P.L. WILLMORE and al, 1971).
- TABLE 5 : Questionnaire used in France for macroseismic surveys.
- FIGURE 1a, b, c : Examples of tectonic deformations observed at the ground surface following the El Asnam, Algeria, earthquake of October 10, 1980 (magnitude : 7.3).
- FIGURE 1d : Map of tectonic deformations observed at the ground surface and location of aftershocs - El Asnam earthquake, October 10, 1980 (from D. HATZFELD and H. PHILIP, 1981).
- FIGURE 2 : Map of tectonic deformations observed at the ground surface in connection with the March 27, 1964 earthquake that took place in the region of Anchorage, Alaska : uplift and subsidence expressed in meters, (from G. PLAFKER, 1965).
- FIGURE 3 : Examples of gravity-related, terrain movements connected with the Montenegro, Yugoslavia, earthquake of April 15, 1979 (magnitude : 7.1).
- FIGURE 4 : Examples of soil liquefaction phenomena observed during the Montenegro, Yugoslavia, earthquake of April 15, 1979 (magnitude : 7.1).
- FIGURE 5 : Example of the drop in water level in the piezometers following the March 27, 1964, earthquake near Anchorage, Alaska, (from R. M. WALLER, 1966).
- FIGURE 6 : Comparison of different intensity scales, (from A. LEVRET, 1982).
- FIGURE 7 : Progression in structural damage according to the M.S.K. intensity scale, (from A. LEVRET, 1982).
- FIGURE 8 : Actual peak ground acceleration values versus intensity at three successive stages, (from N. N. AMBRASEYS, 1974).
- FIGURE 9 : Diagram outlining the seismic phenomenon.
- FIGURE 10 : A comparison of isoseismals from two earthquakes of like magnitude, (from B. MOHAMMADIOUN, 1982).

- FIGURE 11 : Determination of focal depth through application of the Sponheue law, (from X. GOULA, 1980).
- FIGURE 12 : Correlations proposed by various authors between macroseismic intensity and peak horizontal ground acceleration, (from J. R. MURPHY and L. J. O'BRIEN, 1977).
- FIGURE 13 : Regional seismic hazard and local seismic hazard

INDEX GÉOGRAPHIQUE

Alaska
Algérie
Anchorage
Awashima
Californie
Dhamar
Europe
Etats Unis
France
Fukui
Japon
Lisbonne
Montenegro
Niigata
Portugal
Nord Yemen
Yougoslavie

MOTS CLÉS

absorption (coefficient d')
accélération (pic)
aléa sismique
atténuation (de l'intensité, de l'énergie)
corrélations statistiques
décrochement
déformations tectoniques
dommages
données macrosismiques
ébranlement
échelles d'intensité
échelle régionale, locale
effets primaires, secondaires
enregistrement de mouvements forts
épicentre
expansion géométrique
facteur de qualité
faille (normale, inverse)
formations superficielles
foyer
géodynamique
hydrogéologie
hypocentre
intensité macrosismique (M.S.K., M.M.)

intensité épacentrale
isoséistes
liquéfaction
magnitude
microzonage sismique
mécanisme à la source, au foyer

mouvements gravitaires, de terrain
mouvements verticaux
moment sismique
néotectonique
ouvrages souterrains

KEYWORDS

absorption (coefficient)
peak ground acceleration
seismic hazard
attenuation (intensity, energy)
statistical correlations
strike-slip
tectonic deformations
damage
macroseismic data
shaking
intensity scales
local, regional scale
primary, secondary effects
strong motion records
epicenter
geometric expansion
quality factor
fault (normal, thrust)
superficial layers
focus
geodynamics
hydrogeology
hypocenter
macroseismic intensity (M.S.K.,
M.M.).

epicentral intensity
isoseismals
liquefaction
magnitude
seismic microzonation
source-mechanism, fault-plane
solution
gravitational sliding, landslides
vertical movements
seismic moment
neotectonics
underground structures

paramètres de mouvements du sol	ground motion parameters
plaques tectoniques	tectonic plates
probabilités d'apparition, de dépassement	probabilities of occurrence, of exceeding
profondeur focale	focal depth
propagation	propagation
rayonnement de la source	source radiation
risque sismique	seismic risk
rupture (longueur de, traces de)	rupture (length, traces of)
sismicité (historique, instrumentale)	seismicity (historical, instru- mental)
sismogénèse	seismogenesis
sismotectonique	seismotectonics
sources sismiques	seismic sources
subsidence	subsidence
surrection	uplift
tsunamis	tsunamis
vulnérabilité	vulnerability

AVERTISSEMENT

Ce rapport constitue une des cinq contributions du B.R.G.M. sous forme d'article devant être publié dans un ouvrage de Génie Parasismique, préparé sous le patronage du Commissariat à l'Etude et la prévention des risques naturels majeurs (CEPRINA) et Le Ministère de l'urbanisme et du Logement.

Cet ouvrage, édité sous la direction de Monsieur Victor DAVIDOVICI, ingénieur principal à La SOCOTEC et conseiller auprès du CEPRINA, comprend 10 chapitres :

- * Préambule : le projet de construction parasismique,
- * Chapitre I : sismologie générale et sismogénèse,
- * Chapitre II : étude des mouvements forts,
- * Chapitre III : évaluation de l'aléa sismique,
- * Chapitre IV : prise en compte de l'action sismique sur les sols,
- * Chapitre V : méthodes de calcul dynamique,
- * Chapitre VI : interaction sol-structure,
- * Chapitre VII : prise en compte de l'action sismique sur les structures
- * Chapitre VIII : prise en compte de l'action sismique sur des ouvrages spécifiques,
- * Chapitre IX : prise en compte de l'action sismique sur les équipements industriels,
- * Chapitre X : prise en compte effective du risque sismique.

Il sera édité en français aux Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et comportera un résumé de chaque article en français et en anglais et un index général français/anglais. Les cinq contributions du B.R.G.M. se rapportent au chapitre III : Evaluation de l'aléa sismique

* *
*

La contribution du BRGM à ce travail a été effectuée sur fonds propres, département Génie géologique à l'Atelier Risque et Génie Sismiques à Marseille.

1. - INTRODUCTION

Les progrès récents acquis à travers le Monde dans la connaissance et l'évaluation des risques liés aux séismes ont souligné l'importance que revêt l'étude de *la sismogénèse*, c'est-à-dire celle des causes et de la nature physique des tremblements de terre et de leurs conséquences géologiques.

L'efficacité des mesures de protection contre les tremblements de terre est en effet liée au degré de fiabilité avec lequel le phénomène et ses conséquences peuvent être modélisés. Toutes les observations recueillies lors des derniers séismes destructeurs ont montré combien la spécificité des sources sismiques ou celles de certains sites pouvaient prendre en défaut des principes de protection non adaptés à ces spécificités. C'est pourquoi les progrès que l'on est en droit d'attendre en matière de génie sismique exigent que, parallèlement à la multiplication des observations faites sur le terrain lors des séismes destructeurs, l'étude fondamentale des sources sismiques et de leur "fonctionnement" soit encouragée.

Il y a cependant beaucoup à faire dans cette voie, et l'on est bien contraint, dans un souci pragmatique, de définir les bases d'une protection en fonction des connaissances du moment, aussi imparfaites soient-elles. L'important est alors de s'assurer que toute amélioration sensible des connaissances puisse s'intégrer aisément dans les règles que l'on s'est donné. L'application de ces règles suppose que soient définies et cartographiées les zones exposées aux effets des tremblements de terre, effets dont les caractéristiques probables doivent être estimées ; c'est ce que l'on désignera sous le terme général *d'évaluation de l'aléa sismique*.

C'est par un bref rappel de la nature du phénomène sismique et de ses diverses conséquences sur l'environnement physique que l'on tentera de cerner cette notion *d'aléa sismique*, tout en soulignant sa diversité selon l'échelle à laquelle elle est considérée : échelle globale, échelle régionale ou échelle locale.

2. - LES DIFFERENTS TYPES D'EFFETS ENGENDRES PAR LES TREMBLEMENTS DE TERRE

Un séisme se traduit essentiellement par l'apparition de 2 phénomènes qui sont chacun à l'origine de toute une série d'effets variés sur l'environnement physique et les ouvrages qui peuvent y être édifiés :

- l'apparition d'une *rupture brutale* au sein des roches de l'écorce terrestre, créant une fracture se développant dans le milieu, à des vitesses de l'ordre de quelques km/s, continûment ou par saccades, jusqu'à épuisement de l'énergie potentielle de déformation ;

- *L'émission d'ondes élastiques*, résultant de la propagation de la rupture qui vont elles-même rayonner à partir de la source jusqu'à épuisement de l'énergie (cinétique) dont elles sont porteuses.

Les différents effets engendrés par les tremblements de terre peuvent alors être classés de façon schématique, en fonction de ces deux phénomènes principaux *déformations tectoniques* associées à l'apparition de la rupture et *ébranlement du sol* résultant de la propagation des ondes sismiques (tableau 1).

PHENOMENE PRINCIPAL	FACTEURS	EFFETS "PRIMAIRES"	EFFETS "SECONDAIRES"
DEFORMATIONS TECTONIQUES	<ul style="list-style-type: none"> . caractéristiques géométriques de la source : profondeur, dimensions . type de mouvement à la source . propriété des matériaux 	<ul style="list-style-type: none"> . ruptures en surface . déplacement relatif de "blocs" : décrochement, surrection, subsidence 	<ul style="list-style-type: none"> . modification du réseau hydrographique . niveau des côtes . tsunamis
EMISSION D'ONDES ELASTIQUES (ébranlement du sol : amplitude, fréquence, durée)	<ul style="list-style-type: none"> . rayonnement de la source: caractéristiques géométriques et dynamiques . propagation des ondes : distance à la source et propriétés des matériaux traversés . caractéristiques du site: topographie, nature et géométrie des formations superficielles 	<ul style="list-style-type: none"> . effets sur les "sols": mouvements gravitaires, liquéfaction . effets sur les structures 	<ul style="list-style-type: none"> . modification hydrogéologique régionale . effets sur les structures . tsunamis et séismes . incendies, explosions

TABLEAU 1 - DIFFERENTS TYPES D'EFFETS ENGENDRES PAR LES TREMBLEMENTS DE TERRE

a) *Les déformations tectoniques* apparaissant au voisinage de la source dépendent essentiellement de trois types de facteurs :

- * *Les caractéristiques géométriques de la source* : profondeur, dimensions,
- * *Le type de mouvement à la source définissant le mécanisme au foyer du séisme* : mouvement essentiellement vertical (faille normale ou inverse), mouvement décrochant,
- * *Les propriétés (mécaniques) des matériaux* au voisinage de la source.

Les séismes de faible magnitude ($M < 5$), associés à des sources de petite taille, ne donnent généralement pas de déformations observables macroscopiquement. En s'inspirant des corrélations établies par exemple par CHINNERY (1969) ou KANAMORI (1978), il est possible de retenir pour les déformations à la source différents ordres de grandeur (tableau 2).

MAGNITUDE D'ONDES DE SURFACE	MOMENT SISMIQUE (dyne-cm)	LONGUEUR DE RUPTURE	DEPLACEMENT MOYEN SUR LA FAILLE
supérieure ou égale à 8	$\sim 10^{28}$	une à quelques centaines de kilomètres	quelques mètres à une dizaine de mètres
comprise entre 7 et 8	10^{26} à 10^{27}	une à quelques dizaines de kilomètres	un à quelques mètres
comprise entre 6 et 7	10^{25} à 10^{26}	quelques kilomètres	quelques dizaines de centimètres

TABLEAU 2 - ORDRES DE GRANDEUR DES DEFORMATIONS A LA SOURCE EN FONCTION DE LA MAGNITUDE ET DU MOMENT SISMIQUE

Pour des séismes plus faibles (magnitude 4 à 5), le déplacement moyen sur la faille est de l'ordre de quelques millimètres à quelques centimètres (PRATT et al, 1979).

Ces déformations tectoniques peuvent se traduire tout d'abord par *des traces de rupture en surface du sol* s'accompagnant éventuellement de rejets importants (jusqu'à quelques mètres) apparaissant ponctuellement sur la faille. Lors du séisme d'EL ASNAM (Algérie) du 10 Octobre 1980, des rejets verticaux atteignant 6 mètres ont pu être mesurés localement sur la faille principale (H. PHILIP, 1983), visible sur le terrain sur une quarantaine de km (fig - 1).

Ce n'est cependant pas toujours le cas, surtout lorsque la rupture prend naissance à grande profondeur, sa propagation pouvant alors s'arrêter avant d'atteindre la surface du sol. Par exemple, lors du séisme de Fukui (Japon) du 28 Juin 1948 (magnitude : 7.2), aucune trace de rupture n'est apparue en surface du sol alors qu'un mouvement vertical relatif a été mis en évidence de part et d'autre d'une ligne N-S traversant la plaine de FUKUI, avec surrection du compartiment est et affaissement du compartiment ouest (OKAMOTO, 1973).



a. Miroir de faille très net dans les marnes blanches du Messinien, dans la région de Sara bel Aggoun, à l'extrémité NE de la faille. Dans ce secteur, l'accident principal s'incurve pour prendre une direction $N70-N80^{\circ} E$ (photo H. PHILIP, U.S.T.L. Montpellier).



b. Détail du a montrant des stries verticales caractéristiques permettant de définir le mouvement sur la faille (photo H. PHILIP, U.S.T.L. Montpellier).

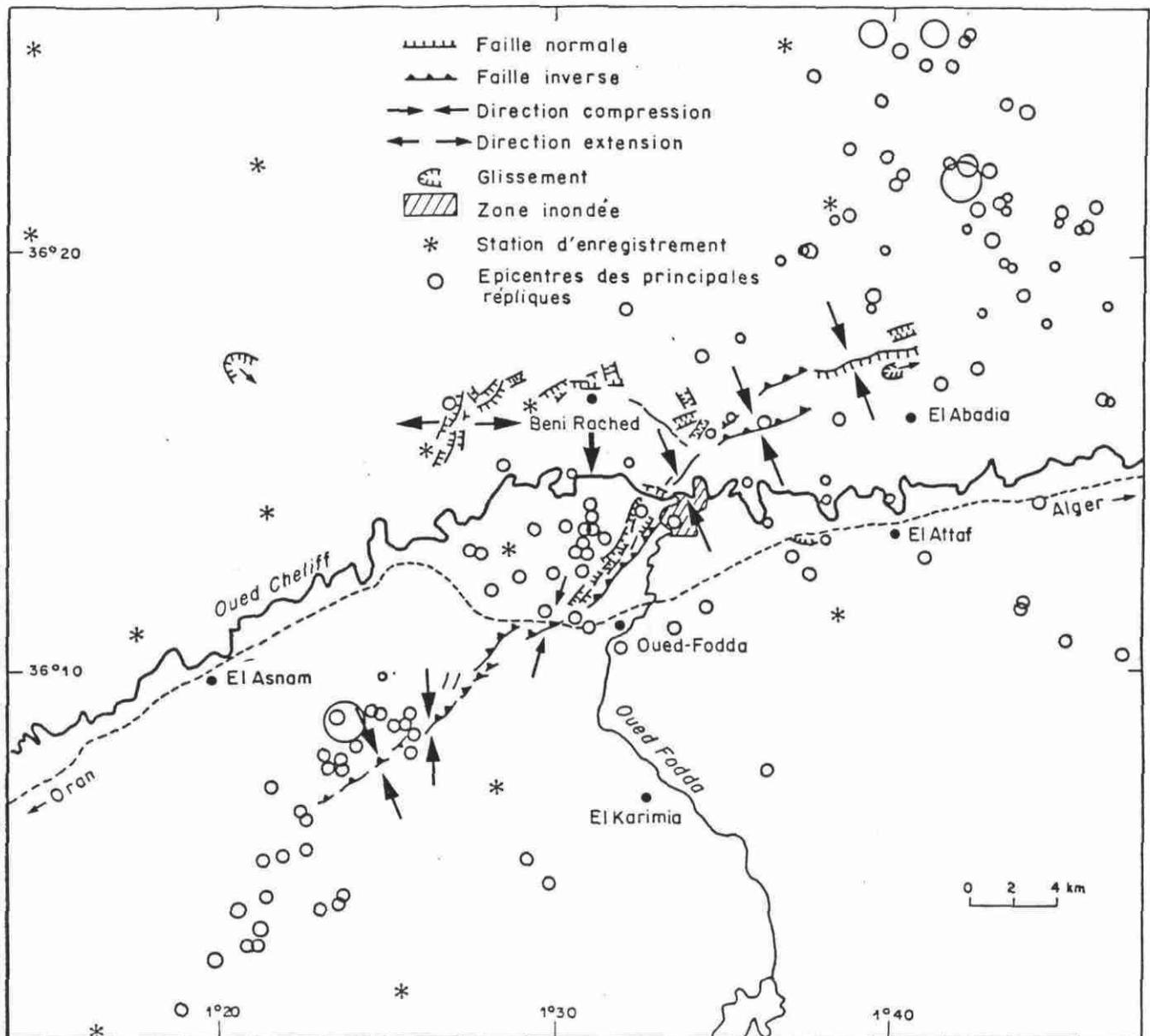


c. Trace de la rupture en surface du sol dans les conglomérats rougeâtres pliocènes, au Sud-Est d'El Asnam. La trace est plus sinueuse et les déformations prennent l'allure de bourrelets compressifs (photo J.P. MENEROUD, L.R.P.C. Nice).

L'analyse des déformations tectoniques observées en surface, à différentes échelles, permet de conclure que le mouvement, lors du séisme, correspond au jeu inverse d'une faille d'orientation moyenne $N50^{\circ}E$, avec une composante de décrochement sénestre bien visible localement, et conduisant au chevauchement du compartiment NW sur le compartiment SE (OUYED et al, 1981 ; PHILIP, 1983 ; RUEGG et al, 1982). De même ces déformations traduisent une direction de compression N-S à NNW-SSE, compatible avec la convergence des plaques africaine et européenne et avec la direction de raccourcissement déduites d'études néotectoniques (BOUSQUET et PHILIP, 1981).

Fig. 1a, b, c

EXEMPLE DE DEFORMATIONS TECTONIQUES OBSERVEES EN SURFACE DU SOL LORS DU SEISME D'EL ASNAM (ALGERIE) DU 10 OCTOBRE 1980 (magnitude : 7.3).



Les déformations observées en plusieurs points le long de la faille principale ne se limitent pas à son voisinage immédiat mais intéressent une zone parfois large de 800 mètres dans le compartiment chevauchant. Elles prennent une allure plus complexe : failles antithétiques inverses, failles normales, par exemple dans la partie nord de la faille (région d'El Abadia et de Beni-Rached). On suppose que la rupture, initialisée au Sud-Ouest, s'est propagée vers le Nord-Est puis, en abordant la région à fort relief et à terrains plus hétérogènes, s'est amortie en donnant naissance à de nombreuses ramifications (HATZFELD et PHILIP, 1981). Un modèle de dislocation a également été proposé par CISTERNAS et al (1982) pour rendre compte de la complexité de ces déformations.

Les résultats de l'analyse géologique des déformations en surface du sol sont en parfait accord avec les données sismologiques : mécanisme au foyer du choc principal, distribution spatiale des répliques (DESCHAMPS et al, 1982). Il semble cependant d'après ces dernières que la rupture soit plus étendue en profondeur que les traces relevées en surface.

Fig. 1d - CARTE DES DEFORMATIONS TECTONIQUES OBSERVEES EN SURFACE DU SOL ET LOCALISATION DES REPLIQUES (d'après HATZFELD et PHILIP, 1981). SEISME D'EL ASNAM (ALGERIE), 10 OCTOBRE 1980.

L'expression que peut prendre la fracture en surface varie considérablement en fonction des propriétés des terrains superficiels : le séisme d'El Asnam en fournit quelques exemples (fig. 1).

On observe souvent un réseau de fractures plus ou moins continu (les relais entre différents segments sont souvent marqués par des failles "en échelon"), pouvant s'accompagner de fissures sub-parallèles ou conjuguées. Ces fractures sont à distinguer de celles qui se forment du fait de mouvements de terrain purement gravitaire. Lors du séisme du Nord-Yemen (région de DHAMAR) du 13 Décembre 1982 (magnitude : 6.0), ce sont de simples fissures de quelques centimètres de largeur qui ont pu être observées par tronçons, en un réseau relativement continu sur une dizaine de kilomètres, de même orientation que les failles majeures connues dans la région. Bien visibles dans les sols meubles, ces fissures disparaissent dans les terrains rocheux volcaniques. Aucun indice de mouvement apparent n'a pu être relevé le long de ces fissures (LANDRY, 1983).

D'une façon générale, ces ruptures en surface du sol, surtout lorsqu'elles sont de grande ampleur, sont fatales aux ouvrages qu'elles atteignent.

Par ailleurs, le séisme peut s'accompagner du *déplacement relatif des blocs séparés par la fracture*, responsable par exemple, de la surrection ou de la subsidence de certaines zones. Ce fut le cas en Alaska, lors du tremblement de terre du 27.03.1964 (magnitude : 8.5), sur des aires d'une centaine de km de large et de plusieurs centaines de km de long (fig. 2), la superficie totale de l'aire déformée par mouvements verticaux dépassant 250 000 km². Il s'agit là d'un mouvement tectonique brusque à distinguer des *déformations progressives* du sol qui peuvent précéder l'occurrence de séismes majeurs. La surveillance de ces déformations sur plusieurs mois, voire quelques années, est d'ailleurs une des méthodes utilisées dans la prévision des tremblements de terre (SAVARENSKY et NERSEVOV, 1980).

Ces mouvements verticaux peuvent entraîner divers effets secondaires liés à la variation relative d'altitude des blocs affectés, par exemple sur le réseau hydrographique (déviations de cours d'eau, etc.) ou sur le niveau des côtes par rapport à la mer.

Ainsi lors du séisme d'Anchorage, la surrection des îles dans la baie du Prince Guillaume, mise en évidence par l'émergence de trottoirs d'algues, a été estimée à 2 mètres en moyenne, avec une valeur maximale de 13 mètres à l'île Montague et ce, jusqu'à plus de 150 km de l'épicentre (Committee on the Alaska Earthquake, 1973). De même, l'île Awashima, à proximité de l'épicentre du séisme de Niigata (Japon) du 16 Juin 1964 (magnitude : 7.5) a subi une surrection atteignant 1,5 mètres (OKAMOTO, 1973). Enfin, lors du séisme d'El Asnam en 1980, la

surrection du compartiment situé au Nord-Ouest de la faille a créé un barrage naturel temporaire au confluent des oueds Cheliff et Fodda, entraînant d'importantes inondations (fig. 3.1d).

Ce mouvement brusque peut enfin, lorsqu'il se produit au fond d'un océan, être à l'origine d'un *tsunami*, par réponse oscillatoire de la colonne d'eau soumise à la pesanteur et rayonnement d'ondes de longue période dans toutes les directions à partir de la source (SOLOVIEV, 1980). Ces tsunamis peuvent se propager jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres de leur source.

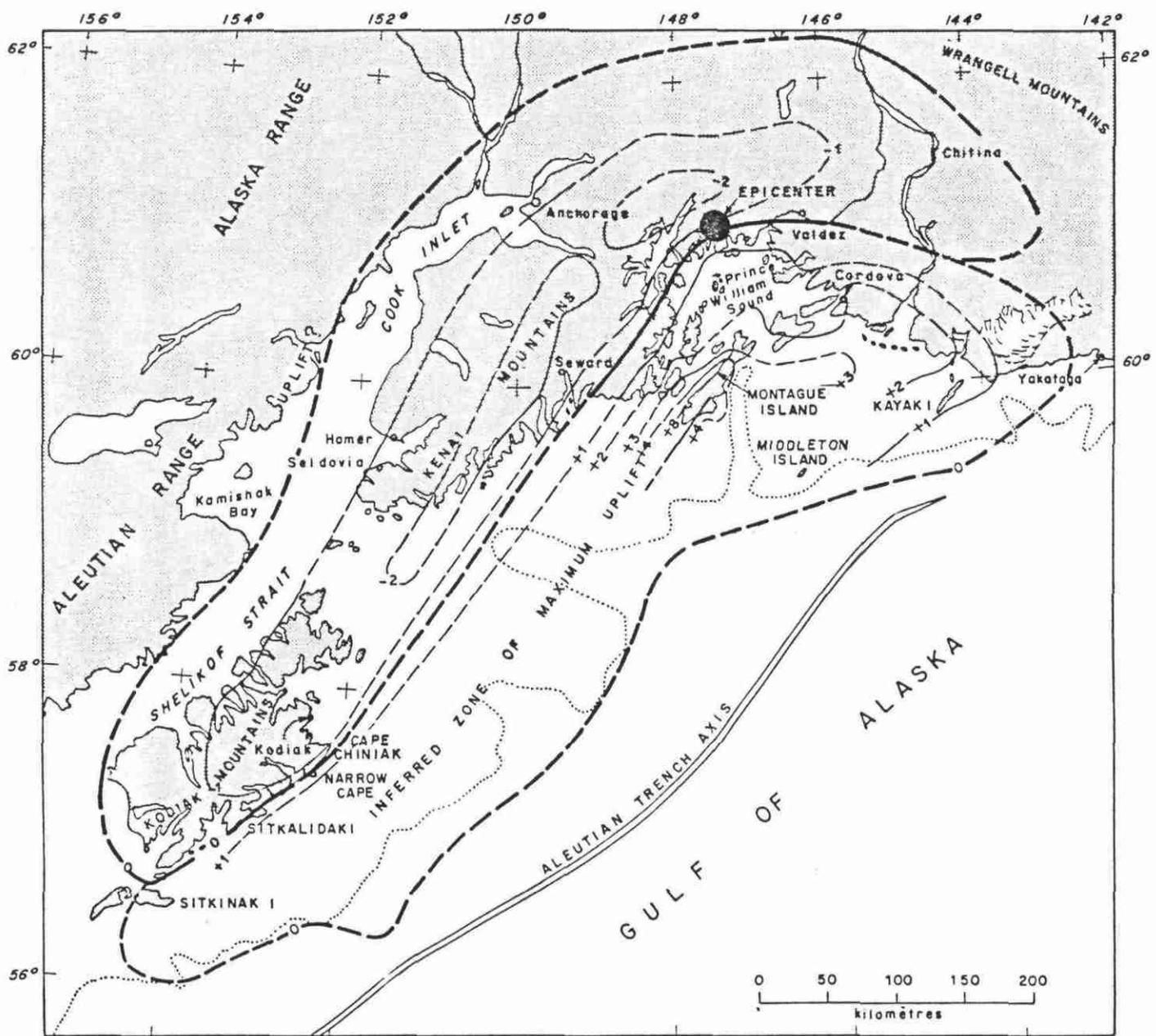


Fig. 2 - CARTE DES DEFORMATIONS TECTONIQUES ASSOCIEES AU TREMBLEMENT DE TERRE DU 27 MARS 1964, DANS LA REGION D'ANCHORAGE (ALASKA) : SURRECTION ET SUBSIDENCE EXPRIMEES EN METRES (d'après G. PLAFKER, 1965)

b) L'émission d'ondes élastiques provoque un ébranlement du sol sous forme d'un mouvement vibratoire tridirectionnel caractérisable par son amplitude, sa fréquence et sa durée et dépendant de trois facteurs principaux :

- * *Le rayonnement de la source* : faisant intervenir ses caractéristiques géométriques et dynamiques,
- * *La propagation des ondes* : fonction de la distance à la source et des propriétés des matériaux traversés,
- * *Les caractéristiques du site* : notamment l'épaisseur, la géométrie, les propriétés mécaniques et dynamiques des formations superficielles, et la topographie.

Cette sollicitation dynamique peut être responsable de *divers effets sur les "sols"* .

En premier lieu, le déclenchement ou l'accélération de *mouvements gravitaires* : chute de blocs, écroulements, glissements, etc. (fig. 3). Pour les chutes de blocs et les écroulements, le séisme joue le rôle d'une "purge" et somme toute, ne fait que précipiter l'occurrence de ces phénomènes. Le cas des glissements est différent : les sollicitations dynamiques peuvent jouer un rôle déterminant dans leur genèse.

D'autre part, certaines formations superficielles montrent un comportement défavorable sous sollicitation sismique : tel est le cas de la *liquéfaction* des sols lâches et saturés ou des tassements dynamiques (fig. 4). Leur apparition dépend de facteurs sismologiques (caractéristiques des sollicitations sismiques) et géotechniques (propriétés dynamiques des sols). Ces phénomènes peuvent causer l'affaissement de zones très étendues à distinguer des subsidences d'origine tectonique. Lors du séisme du Montenegro (Yougoslavie) du 15 Avril 1979, la côte, le long des bouches de KOTOR, a ainsi disparu sous la mer sur des kilomètres de longueur, entraînant routes et habitations.

De la même façon, la sollicitation sismique agit directement sur les structures avec divers effets dépendant bien sûr du type et de la qualité de celles-ci mais aussi de leur implantation, les caractéristiques du mouvement sismique en surface du sol pouvant varier de façon significative à quelque distance . A noter que les ouvrages souterrains (tunnels, puits, etc...) constituent une classe à part, l'expérience montrant qu'ils sont beaucoup moins endommagés que les ouvrages situés en surface du sol au même lieu (ROZEN, 1976 ; DOWDING, 1978 ; PRATT et al, 1979 ; GODEFROY, 1983) ; ce que confirment les enregistrements effectués sur une même verticale en surface du sol et à différentes profondeurs en mettant en évidence une forte atténuation du mouvement avec la profondeur (surtout en accélération et en vitesse), du moins dans une certaine gamme de fréquences (KANAI et al, 1950, 1953 ; OKAMOTO, 1973 ; IWASAKI et al, 1977).

Les dommages aux structures peuvent également apparaître en tant qu'effets secondaires liés à l'instabilité des terrains de fondation : glissement en masse par exemple. Ils peuvent alors se généraliser à tous les types de structures, y compris les bâtiments conçus et dimensionnés selon les règles de l'Art et causer ainsi des dégâts considérables (lors du tremblement de terre d'Anchorage du 27.03.1964, la plus grande partie du quartier résidentiel de "Turnagain Heights"



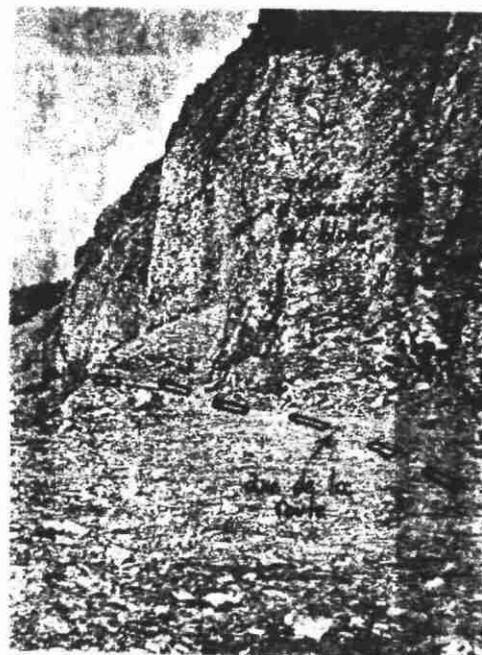
a. Chute de blocs de calcaires sur la route TITOGRAD-PETROVAC, à environ 30 km de l'épicentre (photo M.VELKOV, Inst.génie sism. Skopje).



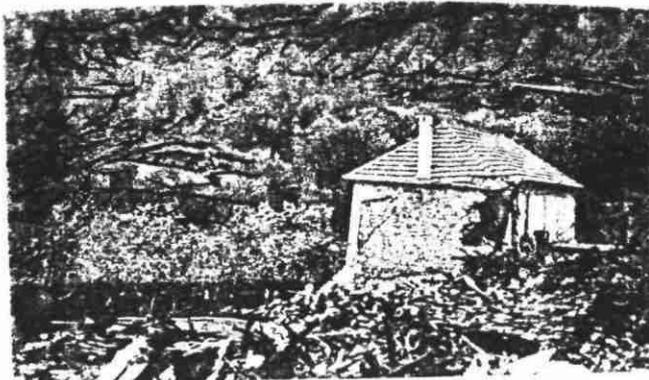
b. Eroulement de calcaires en plaques le long de la rade de JAZ, entre BUDVA et TIVAT sur la côte adriatique, à environ 40 km de l'épicentre. Le mouvement s'est fait à la faveur de glissements le long des plans de stratification (photo P. GODEFROY, B.R.G.M.)



d. Glissement dans les flyschs paléogènes de la région de KALIMAN, près de la frontière albanaise, à une vingtaine de km de l'épicentre. Ce glissement a affecté une zone d'environ 1 km de long et 300 mètres de large, sur une profondeur atteignant 20 mètres. Le volume concerné est de l'ordre de 6 millions de m^3 (photo G. WIECZOREK, U.S.G.S. Menlo Park)



c. Détail du b, montrant la route ensevelie sous les rochers, qui a été coupée sur plusieurs kilomètres (photo P. GODEFROY, B.R.G.M.)



e. Détail du même glissement atteignant des habitations (photo G. WIECZOREK, U.S.G.S. Menlo Park)

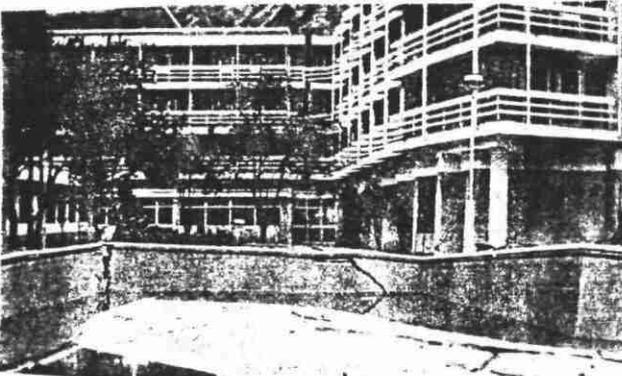
Fig. 3 - EXEMPLES DE MOUVEMENTS GRAVITAIRES ASSOCIES AU SEISME DU MONTENEGRO (YUGOSLAVIE) DU 15 AVRIL 1979 (magnitude : 7.1)



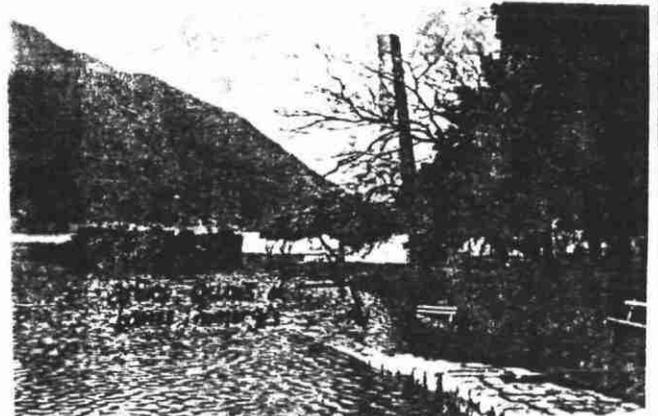
a. Fissures dans le sol et projections de sable dans la région de TIVAT, sur les bouches de KOTOR, à une cinquantaine de km de l'épicentre. La liquéfaction du sol a provoqué le basculement de la balise (photo G. WIECZOREK, U.S.G.S. Menlo Park).



b. Enfouissement d'une maison dans la région de BIJELA, consécutif à une liquéfaction de sables, en bordure de mer (photo G. WIECZOREK, U.S.G.S. Menlo Park)



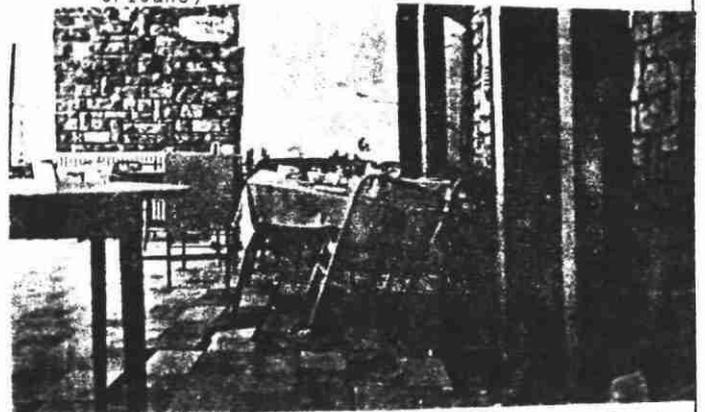
d. Sur la rive opposée de la SKURDA, l'hôtel Fjord et sa piscine ont été détruits suite à la liquéfaction des remblais et couches sous-jacentes (photo P. GODEFROY, B.R.G.M. Orléans)



c. Une partie du jardin public de KOTOR, situé à l'embouchure de la SKURDA, a disparu sous les eaux : arbres et quais sont immergés. En plusieurs endroits, apparaissent des crevasses profondes de plus d'1 mètre et larges de quelques dizaines de cm, bordées de projections de sable argileux (photo P. GODEFROY, B.R.G.M. Orléans)



e. Détail montrant l'enfoncement des fondations de l'hôtel (photo P. GODEFROY, B.R.G.M. Orléans)



f. La salle à manger de l'hôtel Fjord : suite à la liquéfaction des terrains de fondations, les piliers ont "crevé" le plancher (photo P. GODEFROY, B.R.G.M. Orléans)

Fig. 4 - EXEMPLES DE PHENOMENES DE LIQUEFACTION OBSERVES LORS DU SEISME DU MONTENEGRO (YUGOSLAVIE), DU 15 AVRIL 1979 (magnitude : 7.1)

c) Combinaison des effets : les séismes "catastrophiques"

La cause principale (en dehors des facteurs liés au potentiel et à l'organisation des secours) qui peut faire d'un séisme majeur une catastrophe humaine et économique est la combinaison d'effets en "cascade". Par exemple, lors du séisme d'Anchorage en 1964 : l'association de gigantesques mouvements de terrain, de phénomènes de liquéfaction et de subsidence sur des milliers de km², et d'un tsunami déclenchant lui-même la destruction puis l'incendie des installations du port pétrolier de Seward et propageant le feu à l'intérieur des terres. Ou encore : la destruction de la ville de Lisbonne (Portugal), lors du tremblement de terre de 1755, sous l'effet de l'ébranlement du sol, puis d'un incendie et d'un tsunami.

De tels exemples suffisent, après ce bref aperçu des différents types d'effets potentiels consécutifs à un séisme, à illustrer combien vaste est la notion de "risques liés aux séismes" et il conviendra, en guise d'introduction aux différentes approches décrites dans ce chapitre, de définir les paramètres permettant la mesure de ces effets (3) et de préciser l'emploi de quelques termes, pris jusque là dans leur acception la plus large (4).

3. - MESURE DES EFFETS ENGENDRES PAR LES TREMBLEMENTS DE TERRE

a) Paramètres de mesure

■ Intensité macrosismique

C'est à partir de l'inventaire en un site donné, de l'ensemble des effets produits par une secousse sismique sur la population, les constructions et l'environnement physique, qu'est évaluée l'*intensité macrosismique* en ce site. Ce paramètre, dont l'usage est répandu en génie parasismique, permet de reconstituer l'histoire sismique d'une région à travers les témoignages consignés dans diverses sources (archives, chroniques, presse de l'époque, etc...). Cette démarche se heurte au délicat problème de la fiabilité des sources et nécessite une interprétation critique des textes tenant compte du contexte historique. Malgré son approche descriptive, elle reste le complément indispensable à la sismicité instrumentale dont le développement n'est apparu qu'au cours du XXe siècle, notamment dans les pays de sismicité modérée (comme l'Europe occidentale), où l'occurrence des séismes majeurs peut être séparée par des intervalles de l'ordre de quelques siècles.

La nécessité d'une quantification des effets engendrés par les tremblements de terre est apparue dès le milieu du XVIIIe siècle. Cependant, la première *échelle d'intensité macrosismique* reposant sur des critères précis n'a été établie par ROSSI-FOREL qu'au siècle dernier ; elle était limitée à 10 degrés. On doit la première échelle à 12 degrés aux sismologues italiens MERCALLI et CANCANI au début de ce siècle (ROTHE, 1924). Au fur et à mesure les échelles se sont diversifiées, notamment selon les spécificités nationales : niveau de sismicité, types d'habitation, etc... De plus, il est apparu nécessaire de détailler cette échelle de naturaliste de façon à quantifier plus rigoureusement les effets observés. D'où le développement

de plus de 40 versions différentes, responsable actuellement d'une grande hétérogénéité dans l'estimation des intensités.

En 1964, MEDVEDEV, SPONHEJER et KARNIK proposent, en Europe, une échelle dite "échelle MSK" du nom de ses auteurs (tableau 3), pour tenter d'uniformiser les données (MEDVEDEV et al, 1963). Son utilisation a été recommandée par la Commission Sismologique Européenne. Aux Etats Unis et dans de nombreux pays du monde, l'échelle la plus communément utilisée est l'échelle MERCALLI MODIFIEE suivant deux versions : soit celle de WOOD-NEUMANN en 1931 (WOOD et al, 1931), soit celle de RICHTER en 1956 (WILLMORE et al, 1971). Ces deux versions diffèrent légèrement, ce qui prête à confusion car la version utilisée est rarement précisée.

La comparaison de douze échelles courantes (fig. 6), sur la base des critères de définition de chacune d'elle traduits dans l'échelle MSK, montre que l'absence de référence à l'échelle d'intensité employée peut entraîner une erreur pouvant dépasser le degré pour celles qui en comportent douze.

ROSSI-FOREL 1873	MERCALLI 1902	MERCALLI CANCANI SIEBERG 1917	MERCALLI MODIFIEE (WOOD-NEUMANN) 1931	OBS. CENTRAL JAPON 1932 (ISHIMOTO)	MERCALLI CANCANI SIEBERG (MODIFIEE ROTHE) 1942	OBS. CENTRAL JAPON 1951 (MODIFIEE KAWASUMI)	GEOFAN URSS 1953 (MEDVEDEV)	MERCALLI MODIFIEE (RICHTER) 1956	MERCALLI MODIFIEE NEW ZEALAND 1965 (EIBY)	E.M.I. (Echelle macro-sismique internationale)	M.S.K. 1964 (MEDVEDEV SPONHEJER KARNIK)
I	I	I	I	0	I	0	I	I	I	I	I
II	II	II	II	I	II	I	II	II	II	II	II
III	III	III	III	II	III	II	III	III	III	III	III
IV	IV	IV	IV	III	IV	III	IV	IV	IV	IV	IV
V	V	V	V	IV	V	IV	V	V	V	V	V
VI	VI	VI	VI	V	VI	V	VI	VI	VI	VI	VI
VII	VII	VII	VII		VII	VI	VII	VII	VII	VII	VII
VIII	VIII	VIII	VIII	VI	VIII	VII	VIII	VIII	VIII	VIII	VIII
IX	IX	IX	IX	VII	IX	VIII	IX	IX	IX	IX	IX
X	X	X	X	VIII	X	IX	X	X	X	X	X
		XI	XI	IX	XI	X	XI	XI	XI	XI	XI
		XII	XII	X	XII	XI	XII	XII	XII	XII	XII

Fig. 6 - COMPARAISON DE DIFFERENTES ECHELLES D'INTENSITE (d'après A. LEVRET, 1982).

L'échelle d'intensité macrosismique MSK utilisée en France et dans la plupart des pays européens est une échelle discrète à 12 degrés, exprimés en chiffres romains. En pratique, l'usage des demi-degrés d'intensité est courant. Elle s'appuie pour les degrés inférieurs à V, essentiellement sur la description de la sensibilité de l'homme aux effets de la secousse puis, au-delà, sur une progression de trois critères d'évaluation des dommages aux structures : type de construction, sévérité des dommages, quantité des dommages (fig. 7). Or il apparaît à la lecture de l'échelle, une lacune dans cette progression entre les degrés VI et VII que devrait combler un niveau intermédiaire, d'autant plus utile qu'il correspond à des effets très fréquents dans une région de sismicité modérée comme la France.

Echelle d'intensité MSK (1964). La description de l'échelle comprend, d'une part, la définition des termes utilisés et, d'autre part, la définition des degrés de l'échelle.

TYPES DE CONSTRUCTIONS

- Type A. Constructions en pierre tout venant, constructions rurales; maisons en pisé, argile, briques crues.
 B. Constructions en brique ordinaire ou en blocs de béton; constructions mixtes maçonnerie et bois; constructions en pierre taillée.
 C. Constructions armées, constructions de qualité en bois.

Définition des quantités

Une ou quelques	5% environ
Nombreuses	50% environ
La plupart	75% environ

Classification des dommages aux constructions

- 1er Degré: Dommages légers. Légères fissures dans les pilières; chute de petits débris de plâtre.
 2e Degré: Dommages modérés. Petites fissures dans les murs; chute d'assez gros débris de plâtre; chute de tuiles; fissuration de cheminées ou chute de parties de cheminées.
 3e Degré: Sévères dommages. Lésions larges et profondes dans les murs; chute de cheminées.
 4e Degré: Destruction. Breches dans les murs; des parties de constructions peuvent s'effondrer; destruction de la cohésion entre différentes parties d'une construction; effondrement de cloisons intérieures ou de remplissages de murs.
 5e Degré: Dommage total. Effondrement total des constructions.

Effets caractéristiques dans l'échelle. Dans tous les paragraphes, les lettres d'introduction sont utilisées comme suit:

- a Effets sur les personnes et leur environnement;
 b Effets sur les ouvrages de toute nature,
 c Effets sur les sites naturels

INTENSITE

I Secousse non perceptible

- a L'intensité de la vibration se situe au-dessous du seuil de perception humaine; la secousse est seulement détectée et enregistrée par les sismographes

II Secousse à peine perceptible

- a La vibration est seulement ressentie par quelques personnes au repos à l'intérieur des maisons, plus particulièrement aux étages supérieurs des immeubles

III Secousse faible ressentie de façon partielle

- a Le séisme est ressenti par quelques personnes à l'intérieur des constructions et n'est ressenti à l'extérieur qu'en cas de circonstances favorables. La vibration ressemble à celle que cause le passage d'un camion léger. Des observateurs attentifs notent un léger balancement des objets suspendus, balancement un peu plus accentué aux étages supérieurs.

IV Secousse légèrement ressentie

- a Le séisme est ressenti par de nombreuses personnes à l'intérieur des constructions et par quelques personnes à l'extérieur. Quelques dormeurs s'éveillent mais personne n'est effrayé. La vibration est comparable à celle qui est due au passage d'un camion lourdement chargé. Les fenêtres, les portes et les assiettes tremblent. Les planchers et les murs font entendre des craquements. Le mobilier commence à être secoué. Les objets suspendus oscillent légèrement. Les liquides contenus dans des récipients ouverts s'agitent légèrement. La secousse est ressentie dans des voitures à l'arrêt.

V Risés des dormeurs

- a Le séisme est ressenti par tout le monde à l'intérieur des constructions et par de nombreuses personnes à l'extérieur. De nombreux dormeurs s'éveillent, quelques-uns sortent en courant. Les animaux deviennent inquiets. Les constructions sont prises d'un tremblement général. Les objets suspendus oscillent largement. Les tableaux craquent contre les murs ou sont déplacés. Il arrive que des horloges à balancier s'arrêtent. Quelques objets en équilibre instable peuvent être renversés ou déplacés. Les portes et les fenêtres mal fermées s'ouvrent brusquement et se referment en claquant. Les liquides contenus dans des récipients ouverts et bien remplis se répandent en petite quantité. La vibration est ressentie comme celle que causerait un objet lourd tombant à l'intérieur du bâtiment.

- b De légers dommages du 1er degré sont possibles dans des constructions du type A.
 c Quelques, modification du débit des sources

VI Frayeur

- a Le séisme est ressenti par la plupart des personnes, à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments. De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Quelques personnes perdent l'équilibre. Les animaux domestiques s'échappent de leur stable. Dans quelques cas, des assiettes et de la verrerie peuvent se briser, des livres tomber. Certains meubles lourds peuvent se déplacer et, dans les clochers, les petites cloches peuvent sonner.
 b Dommages du 1er degré dans quelques constructions du type B et dans de nombreuses constructions du type A. Dommages du 2e degré dans quelques bâtiments de type B.
 c Dans quelques cas, on peut observer dans le sol mouille des crevasses d'une largeur atteignant 1 cm. Parfois, des glissements de terrain en montagne. On observe des changements dans le débit des sources et dans le niveau des puits.

VII Dommages aux constructions

- a La plupart des personnes sont effrayées et se précipitent au dehors. Beaucoup ont de la difficulté à rester debout. La vibration est observée par les personnes conduisant des voitures automobiles. De grosses cloches se mettent à sonner.
 b Dans de nombreux bâtiments du type C, dommages du 1er degré, dans de nombreux bâtiments du type B, dommages du 2e degré. De nombreux bâtiments du type A sont endommagés au 3e degré et quelques-uns au 4e degré. Dans quelques cas, affaissement des routes sur des pentes abruptes; fissures dans les routes; joints de canalisations endommagés, fissures dans les murs de pierre.
 c Des vagues se forment sur l'eau et celle-ci est troublée par la boue mise en mouvement. Le niveau de l'eau dans les puits et le débit des sources changent. Dans quelques cas, des sources tarées se remettent à couler et des sources existantes se tarissent. Dans des cas isolés, des talus de sable ou de gravier s'éboulent partiellement.

VIII Destruction de bâtiments

- a Frayeur et panique; les personnes conduisant des voitures automobiles sont, elles aussi, effrayées. Ça et là, des branches d'arbres cassent. Le mobilier, même lourd, se déplace et une partie se renverse. Les lampes suspendues sont en partie endommagées.
 b De nombreuses constructions du type C subissent des dommages du 2e degré et quelques-unes, du 3e degré. De nombreux bâtiments du type B subissent des dommages du 3e degré et beaucoup de bâtiments du type A sont endommagés au 4e degré. Rupture occasionnelle de joints de canalisations. Des monuments et des statues se déplacent ou tournent sur eux-mêmes. Des stèles funéraires se renversent. Des murs de pierre s'effondrent.
 c Petits glissements de terrain dans les ravins et sur les routes en talus, sur de fortes pentes; les crevasses dans le sol atteignent plusieurs centimètres de largeur. L'eau des lacs devient trouble. De nouvelles retenues d'eau se créent dans les vallées. Des puits asséchés se remplissent et des puits existants se tarissent. Dans de nombreux cas, changement dans le débit et le niveau de l'eau.

IX Dommages généralisés aux constructions

- a Panique générale; dégâts considérables au mobilier. Les animaux affolés courent dans toutes les directions et poussent des cris.
 b De nombreuses constructions du type C subissent des dommages du 3e degré, quelques-uns du 4e degré. De nombreux bâtiments du type B subissent des dommages du 4e degré, quelques-uns du 5e degré. De nombreux bâtiments du type A sont endommagés au 5e degré. Les monuments et les colonnes tombent. Dommages considérables aux réservoirs; ruptures partielles des canalisations souterraines. Dans quelques cas, des rails de chemins de fer sont courbés, et des routes endommagées.
 c Des débordements d'eau, de sable et de boue sont souvent observés en terrain plat. Les crevasses dans le sol atteignent 10 cm; elles dépassent 10 cm sur les pentes et les berges des rivières; en outre, un grand nombre de petites crevasses s'observent dans le sol; chutes de rochers, nombreux glissements de terrain et éboulements, grandes vagues sur l'eau. Des puits asséchés se remplissent et des puits existants s'assèchent.

X Destruction générale des constructions

- b De nombreuses constructions du type C subissent des dommages du 4e degré et quelques-uns du 5e degré. De nombreux bâtiments du type B subissent des dommages du 5e degré; la plupart des bâtiments du type A sont détruits (catégorie 5), dommages dangereux aux barrages et aux digues; graves dégâts aux ponts. Les rails de chemins de fer sont légèrement tordus. Les canalisations souterraines sont rompues ou tordues. Le pavage et l'asphalte des routes présentent des ondulations.
 c La largeur des crevasses du sol peut atteindre plusieurs décimètres, parfois jusqu'à 1 mètre. Il se produit de larges crevasses parallèlement aux cours d'eau. Les terres meubles s'éboulent le long des pentes raides. De grands glissements de terrain peuvent se produire dans les berges des rivières et le long des rivages escarpés. Dans les zones littorales, déplacement de sable et de boue, changement du niveau de l'eau dans les puits, l'eau des canaux, des lacs, des rivières, etc., est projetée sur la terre. De nouveaux lacs se créent.

XI Catastrophe

- b Dommages sévères même aux bâtiments bien construits, aux ponts, aux barrages et aux lignes de chemins de fer, les grandes routes deviennent inutilisables, les canalisations souterraines sont détruites.
 c Le terrain est considérablement déformé par de larges crevasses aussi bien que par des mouvements dans les directions horizontale et verticale; nombreux glissements de terrain et éboulements de rochers. La détermination de l'intensité du tremblement de terre nécessite une recherche spéciale.

XII Changement du paysage

- b Pratiquement tous les ouvrages au-dessus et au-dessous du sol sont gravement endommagés ou détruits.
 c La topographie est bouleversée. D'énormes crevasses accompagnées d'importants déplacements verticaux et horizontaux sont observées. Des chutes de rochers et des affaissements de berges de rivières s'observent sur de vastes étendues. Des vallées sont barrées et transformées en lacs; des cascades apparaissent et des rivières sont déviées. L'intensité du séisme doit faire l'objet d'une recherche spéciale.

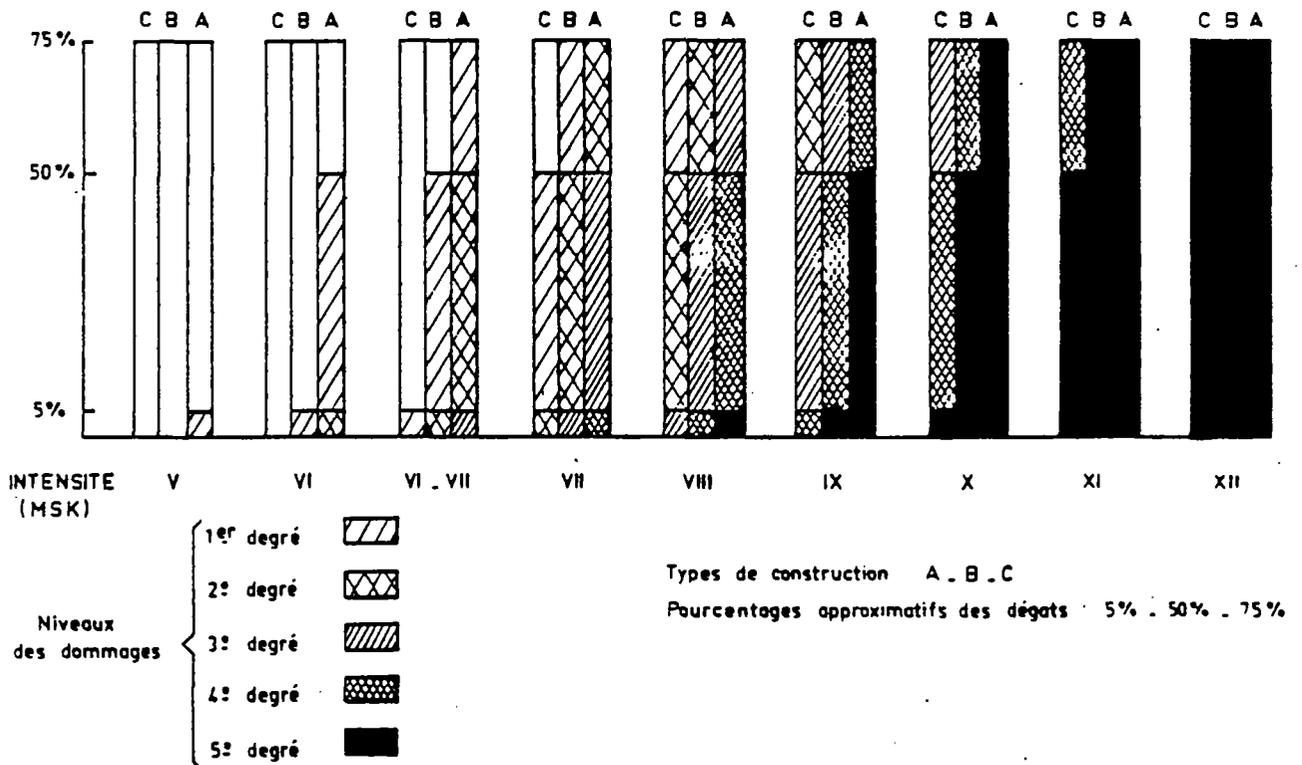


Fig. 7 - PROGRESSION DES DOMMAGES AUX CONSTRUCTIONS DANS L'ECHELLE D'INTENSITE M.S.K. (d'après A. LEVRET, 1982).

Après de nombreuses années de pratique, l'échelle MSK paraît être un outil assez bien adapté à la prise en compte des effets des séismes actuels dans des pays de construction de type européen. Cependant, outre l'irrégularité signalée précédemment, des perfectionnements sont encore souhaitables. Par exemple, la prise en compte de certains types de structures : ouvrages antisismiques avec un indice précisant le niveau de dimensionnement, barrages, centrales nucléaires, tours, etc... ; celle de la taille des bâtiments ou mieux de leur fréquence propre de vibration ; ou encore l'introduction d'un cas supplémentaire dans la classification des dommages aux constructions : degré zéro, soit pas de dégâts. Ces améliorations pourraient porter également sur l'estimation des pourcentages de dommages à l'échelle d'un site ou sur le mode de prise en compte des effets du séisme sur l'environnement naturel (effets sur les sols, l'hydrogéologie) et sur certaines structures enterrées (canalisations, pipe-lines). Une mise à jour de l'échelle prenant en compte ces remarques est actuellement en discussion dans le cadre de la Commission Sismologique Européenne (ANGHEL et al, 1981).

■ Paramètres du mouvement du sol

La prise en compte des effets observés en terme d'intensité macrosismique est insuffisante pour les besoins du génie parasismique. Il est essentiel de rattacher cette donnée descriptive à un paramètre physique. Grâce aux enregistrements effectués en des points d'observation, il est possible de relier l'intensité macrosismique évaluée en ces points à un paramètre de mouvement du sol : accélération, vitesse, déplacement (AMBRASEYS, 1974) ou au spectre de réponse du

signal temporel obtenu en ce lieu (DEVILLERS et al, 1981 ; LEVRET et al., 1984).

C'est donc en se fondant sur des données expérimentales et sur le choix d'une progression simple des paramètres de mouvement du sol (multiplication par deux du paramètre lorsque l'intensité est incrémentée d'une unité) qu'une correspondance a été proposée avec l'échelle MSK en 1964 (WILLMORE et al, 1971) entre les degrés de l'échelle et les pics de mouvement du sol (Tableau 4).

INTENSITE	$\gamma \text{ cm.s}^{-2}$	$V \text{ cm.s}^{-1}$	$X_0 \text{ cm}$
V	12 - 25	1 - 2	0,05 - 0,1
VI	25 - 50	2,1 - 4	0,11 - 0,2
VII	50 - 100	4,1 - 8	0,21 - 0,4
VIII	100 - 200	8,1 - 16	0,41 - 0,8
IX	200 - 400	16,1 - 32	0,81 - 1,6
X	400 - 800	32,1 - 64	1,61 - 3,2

γ = pic d'accélération du sol pour des périodes comprises entre 0,1 et 0,5 s

V = pic de vitesse du sol pour des périodes comprises entre 0,5 s et 2,0 s

X_0 = amplitude du mouvement en cm du centre de gravité de la masse d'un pendule

de période propre 0,5 s et de décrement logarithmique 0,5 (8% de l'amortissement critique)

TABEAU 4 - EQUIVALENCE ENTRE DEGRES DE L'ECHELLE MSK ET PARAMETRES DE MOUVEMENT DU SOL,
(d'après P.L. WILLMORE et al., 1971).

Ce double aspect, très contraignant, sur lequel s'appuie l'échelle d'intensité macrosismique MSK : d'une part progression logique dans la description des effets, en particulier des dommages, d'autre part choix d'un principe simple de corrélation à un paramètre physique peut expliquer l'incohérence rencontrée dans la progression des dommages entre les degrés VI et VII de l'échelle.

Par ailleurs, au fur et à mesure que le nombre des enregistrements de mouvements forts augmente, de nombreuses autres correspondances sont proposées. La dispersion devient telle (fig. 8) qu'une corrélation paraît de plus en plus difficile entre *l'intensité et le pic d'accélération du sol* (AMBRASEYS, 1973).

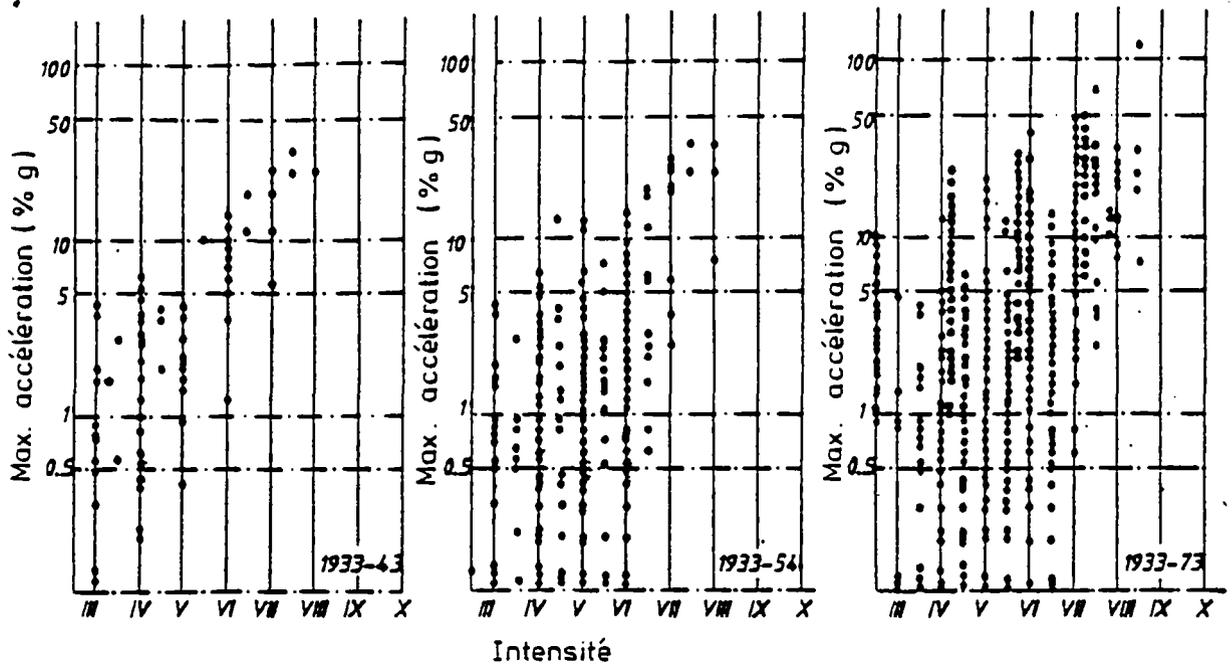


Fig. 8 - VALEURS REELLES DU PIC D'ACCELERATION DU SOL EN FONCTION DE L'INTENSITE POUR TROIS PERIODES SUCCESSIVES, (d'après N.N. AMBRASEYS, 1974).

Il ne faut pas perdre de vue que l'intensité reste un paramètre essentiellement descriptif qui est une fonction complexe d'un ensemble de phénomènes physiques : effets directs des ondes élastiques ou bien effets indirects tels éboulements, liquéfactions, tsunamis, etc... pouvant entraîner sur les populations, les constructions ou l'environnement des dommages importants. La correspondance entre intensité et paramètre de mouvements du sol restera, de ce fait, toujours entachée d'une grande incertitude.

b) Exploitation des données macrosismiques

L'ensemble des estimations ponctuelles d'intensité constitue la base de données macrosismiques. Celles-ci peuvent être issues du dépouillement des documents historiques pour les séismes anciens, ou des questionnaires des enquêtes macrosismiques pour les séismes récents (Tableau 5). En théorie, l'intensité décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'épicentre, point à la normale du foyer ou hypocentre du séisme (fig. 9).

I = Intensité, effets en surface (M.S.K)

I_0 = Intensité épicentrale

I_1, I_2, I_3 = Isoséistes

r_1, r_2, r_3 = Distances épicentrales

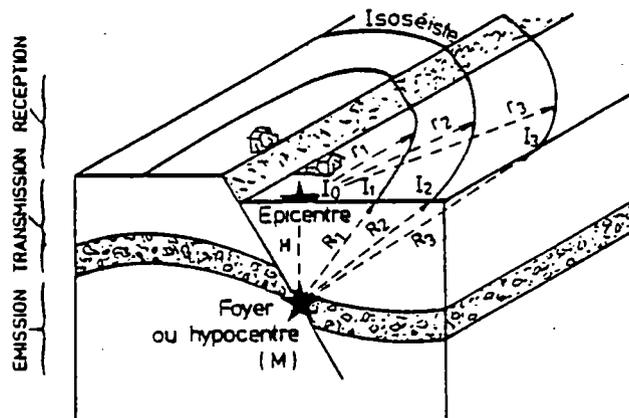


Fig. 9 - REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PHENOMENE SISMIQUE

H = Profondeur

R_1, R_2, R_3 = Distances focales ou hypocentrales

M = Magnitude, énergie au foyer (RICHTER)

MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR
Direction de la Sécurité civile

BUREAU DE RECHERCHES
GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
Service géologique national

INSTITUT NATIONAL
D'ASTRONOMIE ET DE GÉOPHYSIQUE
Bureau central sismologique français

Annexer les enquêtes relatives aux effets des séismes ressentis en France (enquêtes macrosismiques) émanant originaires par le Bureau central sismologique français (Institut de physique du globe de Strasbourg). Une convention passée entre l'Institut national d'astronomie et de géophysique et le Bureau de recherches géologiques et minières (Service géologique national) conduit à ce dernier la collecte et l'enregistrement des renseignements et l'élaboration relative à ces tremblements de terre. En accord avec Monsieur le Directeur de la Sécurité civile, je demande aux destinataires de ce questionnaire d'appuyer leur contribution à ces enquêtes dans le meilleur intérêt.

LE PREFET

Nous vous serions reconnaissants de remplir ce questionnaire, même partiellement. En outre, la dernière page, blanche, vous permet de préciser l'un ou l'autre point.

Veuillez renvoyer ce questionnaire à Monsieur le Préfet, Direction départementale de la Protection civile pour regroupement et transmission au B. R. G. M., Division Risques naturels, B.P. 6008, 45018 ORLÈANS Cédex - Tél. (38) 63 80 01

1 - DÉPARTEMENT []

COMMUNE []

CODE POSTAL [] CODE INSEE []

Lieu dit []

LE TREMBLEMENT DE TERRE A T-IL ÉTÉ RESENTI DANS VOTRE COMMUNE ?

OUI NON Si non, indiquez les communes voisines qui l'ont ressenti.

2 - DATE [] HEURE DE LA SECousse PRINCIPALE []

AUTRES SECoussES OUI NON NOMBRE []

3 - LE TREMBLEMENT DE TERRE A T-IL ÉTÉ RESENTI DANS LA COMMUNE PAR

- QUELQUES PERSONNES (de l'ordre de 5 %)
- DE NOMBREUSES PERSONNES (de l'ordre de 50 %)
- L'ENSEMBLE DE LA POPULATION (75 % et plus)

4 - OÙ SE TROUVAIENT EN GÉNÉRAL LES PERSONNES QUI ONT RESENTI LE TREMBLEMENT DE TERRE ?

- DANS LES MAISONS INDIVIDUELLES
- DANS LES IMMEUBLES
- EN PLEIN AIR

5 - QUELS ONT ÉTÉ SES EFFETS SUR LES PERSONNES ?

Préciser par la lettre correspondante si ces effets sont rares (R) de l'ordre de 5 %, nombreux (N) de l'ordre de 50 %, généralisés (G) de l'ordre de 75 %.

- RÉVEILS FRAVEUR
- PERTES D'ÉQUILIBRE PANIQUE

6 - Y A T-IL EU DES EFFETS SUR LES ANIMAUX ? OUI NON

Enquêtes ?

7 - QUELS ONT ÉTÉ SES EFFETS SUR LES OBJETS ?

Préciser par la lettre correspondante si ces effets sont rares (R) de l'ordre de 5 %, nombreux (N) de l'ordre de 50 %, généralisés (G) de l'ordre de 75 %.

- VIBRATIONS DE VAISSELLE ET DE VITRES
- TINTEMENTS DE SONNETTES
- ARRÊTS DE PENDULES
- CRAQUEMENTS DE MEUBLES, PLANCHERS ET PLAFONDS
- DÉPLACEMENTS D'OBJETS SUSPENDUS (TABLEAUX, ETC.)
- DÉPLACEMENTS DE MEUBLES LÉGERS
- DÉPLACEMENTS DE MEUBLES LOURDS
- CHUTES D'OBJETS

8 - QUELS DÉGÂTS IMMOBILIERS ONT ÉTÉ PROVOQUÉS PAR LE SÉISMÉ ?

Les constructions sont classées en trois types.

La colonne A correspond aux maisons en

: ARGILE, PISE, BRIQUES CRUES, PIERRE TOUT VENANT

La colonne B correspond aux maisons en

: BRIQUES TOUT VENANT, MAÇONNERIE ET BOIS (MIXTE), PIERRES TAILLÉES

La colonne C correspond aux maisons en

: CONSTRUCTION EN BÉTON ARMÉ, CONSTRUCTION EN BOIS

Indiquer dans la case correspondante l'importance des dégâts, rares (R) de l'ordre de 5 %, nombreux (N) de l'ordre de 50 %, généralisés (G) de l'ordre de 75 %.

TYPE

A B C

- FISSURATION DES PLÂTRES
- CHUTES DE DÉBRIS DE PLÂTRES
- FISSURATIONS DES MURS
- (1) FISSURATIONS DES CHEMINÉES
- CHUTES DE TUILES
- LÉZARDES LARGES DANS LES MURS
- CHUTES DE CHEMINÉES
- BRÈCHES DANS LES MURS
- RUPTURES DE SOLIDARITÉ ENTRE LES PARTIES D'UNE CONSTRUCTION
- (1) EFFONDEMENTS

9 - QUELLE EST LA NATURE DU TERRAIN AUX ENDOITS OÙ CES DÉGÂTS SE SONT PRODUITS ?

MEUBLE ROCHEUX

10 - SOURCES ET PUIES ONT-ILS ÉTÉ AFFECTÉS ?

- CHANGEMENT DU NIVEAU DE L'EAU
- MODIFICATION DU DÉBIT
- TROUBLE DE L'EAU

11 - A T-ON OBSERVÉ DES EFFETS SUR LE TERRAIN ?

- CRÉVASSES AFFECTANT DES REMLAIS
- CRÉVASSES AFFECTANT LE SOL NATUREL
- GLISSEMENTS
- ÉBOULEMENTS
- DÉFORMATION DES ROUTES

12 - AVEZ-VOUS PERSONNELLEMENT RESENTI LE TREMBLEMENT DE TERRE ?

OUI NON

Si oui, étiez-vous dans votre MAISON A QUEL ÉTAGE

EN PLEIN AIR

QUELLE ÉTAIT VOTRE OCCUPATION :

NOM : _____

PRÉNOM : _____

PROFESSION : _____

ADRESSE : _____

DATE : .../.../...

Veuillez noter au verso d'éventuelles précisions et tous renseignements au sujet de phénomènes que ce questionnaire n'embrasse pas ou n'aborde que partiellement et qui vous paraissent présenter de l'intérêt (nombre, durée, heure approximative, direction apparente des secousses, bruit, etc.).

Joindre si possible croquis et photos.

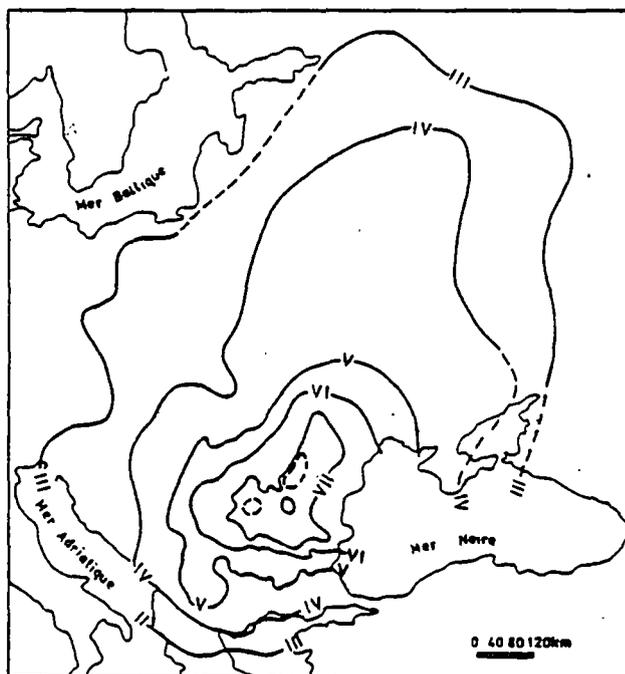
Merci de votre collaboration

TABLEAU 5 - QUESTIONNAIRE UTILISÉ POUR LES ENQUÊTES MACROSISMQUES EFFECTUÉES EN FRANCE

Dans la pratique, il est possible de délimiter des aires d'égale intensité par des *courbes isoséistes*, enveloppes des données ponctuelles de même degré. On observe souvent de petits îlots d'effets différents à l'intérieur d'une plage d'intensité homogène traduisant la réponse spécifique du sol en fonction de conditions topographiques et géologiques locales. La limite de perception du phénomène située entre les degrés II et III de l'échelle d'intensité définit *l'aire macrosismique* ou *aire de perception* du tremblement de terre. L'aire de plus forte intensité est *l'aire pléistoséiste* au sein de laquelle est défini *l'épicentre macrosismique*, approximativement le barycentre des intensités maximales ; contrairement à une idée répandue, cette détermination peut être assez précise dans les cas favorables (incertitude inférieure à 5 km) ; elle pose cependant un problème évident pour les sources sismiques situées en mer (LEVRET, 1982).

L'intensité *épicentrale* I_0 , peut alors être estimée ; elle n'est pas obligatoirement égale à l'intensité maximale observée mais dépend de la distribution des intensités ponctuelles dans l'aire pléistoséiste et de l'extension de celle-ci. Elle est parfois utilisée pour caractériser la "force" du séisme (séismes historiques notamment). Elle ne donne cependant qu'une idée très imparfaite de l'énergie rayonnée par la source puisque c'est une mesure en surface du sol. Pour une même énergie à la source, l'intensité épicentrale et l'extension des zones d'effets peuvent être très différents (fig. 10), ce qui met en évidence l'influence de la *profondeur focale* et de *l'absorption spécifique* du milieu traversé.

Vrancea (Roumanie) $M = 7,2$ $h = 100$ km



El Asnam (Algérie) $M = 7,3$ $h < 20$ km

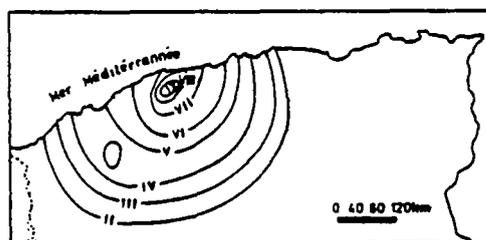


Fig. 10 - COMPARAISON DES ISOSEISTES DE SEISMES DE MAGNITUDE EQUIVALENTE (d'après B. MOHAMMADIOUN, 1982).

L'atténuation de l'intensité avec la distance au foyer peut s'écrire sous la forme générale suivante (KARNIK, 1969) :

$$I = Cte - a \log_{10} R - bR \quad \text{avec } R = (h^2 + r^2)^{1/2} \quad (1)$$

où R = distance focale, r = distance épacentrale, h = profondeur focale

Cette relation s'appuie :

- sur l'hypothèse d'une source ponctuelle à l'intérieur d'un milieu homogène et isotrope,
- sur le fondement de l'échelle d'intensité qui relie les degrés macrosismiques à une amplitude du mouvement du sol :

$$I = p \log_{10} A + q \quad (2)$$

- sur la théorie de la propagation des ondes d'où il ressort que l'énergie en un point est proportionnelle au carré de l'amplitude du mouvement du sol

$$W = cA^2 \quad (3)$$

Cette amplitude décroît elle-même avec la distance :

$$A = CR^m \exp[-\alpha R] \quad (4)$$

où : R^m représente l'expansion géométrique des ondes, avec $m = 1$ pour les ondes de volume
 $m = 1/2$ pour les ondes de surface.

$\exp[-\alpha R]$ représente l'atténuation anélastique, due à l'absorption des matériaux, fonction de la fréquence f des ondes et du milieu traversé :

$$\alpha = \pi f/QV \quad \text{avec } Q = \text{facteur de qualité du milieu traversé et} \\ V = \text{vitesse de propagation des ondes.}$$

Entre l'épicentre d'intensité I_0 et un point d'intensité I_n à la distance R_n du foyer, les relations (2) et (4) deviennent :

$$\Delta I = I_0 - I_n = P \log_{10} (A_0/A_n) \quad (5)$$

$$\text{et } (A_0/A_n) = (R_n/h)^m \exp[\alpha (R_n - h)] \quad (6)$$

$$\text{soit } \Delta I = P \log_{10} (R_n/h)^m + P\alpha (\log_{10} e) (R_n - h) \quad (7)$$

La variable P , obtenue empiriquement, représente le facteur de correspondance entre degrés de l'échelle d'intensité et paramètres de mouvement du sol (en général les pics d'accélération du sol). KOVESLIGETHY puis SPONHEUER proposent la valeur $P = 3$.

La relation (7) devient dans le cas des ondes de volume ($m = 1$), (SPONHEUER, 1960) :

$$\Delta I = 3 \log_{10} [h^{-1} (r_n^2 + h^2)^{1/2}] + 1,3 \alpha [(r_n^2 + h^2)^{1/2} - h] \quad (8)$$

Une relation simplifiée ne tenant compte que de l'expansion géométrique est souvent utilisée :

$$\Delta I = P \log_{10} [h^{-1} (r_n^2 + h^2)^{1/2}] \quad (9)$$

De nombreuses valeurs de P sont proposées suivant les auteurs (KARNIK, 1969), en relation avec la profondeur des foyers et les régions étudiées. KARNIK pour l'ensemble des séismes européens retient la valeur $P = 4,5$. Un nombre suffisant de données (plusieurs couples de valeurs I_0 et r_0 , particulièrement pour le modèle de Sponheuer) est nécessaire pour obtenir un ajustement significatif à ces lois de décroissance. D'autant plus qu'il faut parfois affiner le modèle pour tenir compte :

- . de variations azimutales de la décroissance correspondant à un rayonnement ou une propagation non isotrope.
- . d'une source sismique non ponctuelle, se traduisant par une aire épiscopentrale étendue, à l'intérieur de laquelle l'intensité ne décroît pas.
- . d'un coefficient d'atténuation anélastique variable avec la distance (fig. 11).

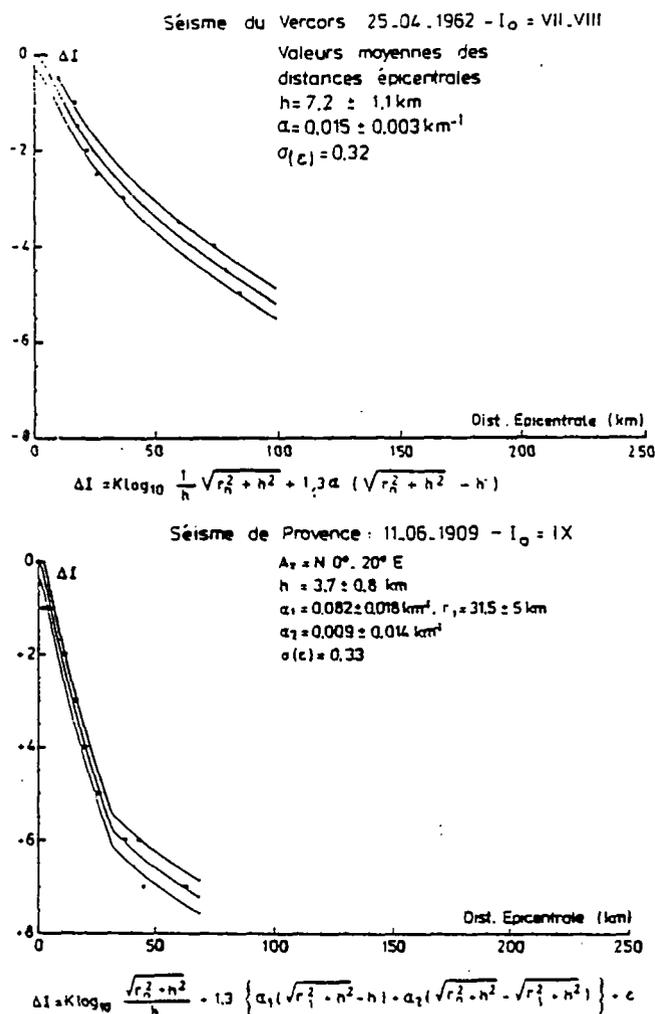


Fig. 11 - Détermination de la profondeur du foyer par ajustement à la loi de SPONHEUER (les précisions indiquées représentent les écarts types des paramètres ajustés avec la loi de décroissance, mais ne tiennent pas compte de l'imprécision liée au modèle choisi) ; d'après X. GOULA, 1980.

La comparaison des profondeurs focales de séismes récents, obtenue respectivement par application de cette méthode aux données macrosismiques et par exploitation des données instrumentales, est très satisfaisante (A. LEVRET, 1982). Cette concordance a pu être vérifiée pour différentes classes de profondeur de foyers sismiques (C. DADOU, 1981). Elle permet ainsi d'envisager le calcul de la profondeur focale de séismes historiques ou survenant dans des régions dénuées de réseau d'enregistrement, dès lors que les données macrosismiques sont assez nombreuses.

Enfin, l'exploitation de l'ensemble des données macrosismiques dans une même région, peut mettre en évidence l'existence de plusieurs lois d'atténuation dépendant du coefficient d'absorption locale et de la profondeur des foyers.

c) Corrélations intensité - Paramètres physiques

Malgré la difficulté de relier un paramètre essentiellement descriptif comme l'intensité à un paramètre physique représentatif de l'énergie émise ou transmise par le tremblement de terre (magnitude, amplitude du mouvement du sol), de nombreuses tentatives ont été entreprises en différentes régions du globe. Celles-ci s'appuient sur une quantité toujours plus grande d'enregistrements de mouvements forts, ce qui permet une meilleure analyse statistique.

Les corrélations d'usage courant en génie parasismique sont celles qui relient l'intensité en un point à un paramètre du mouvement du sol enregistré au même point (en général, amplitude du pic d'accélération). La dispersion des données est très grande et les corrélations variables suivant les auteurs et les caractéristiques des observations : nombre de séismes et situation géographique, quantité des enregistrements, domaine des intensités et des accélérations (fig. 12).

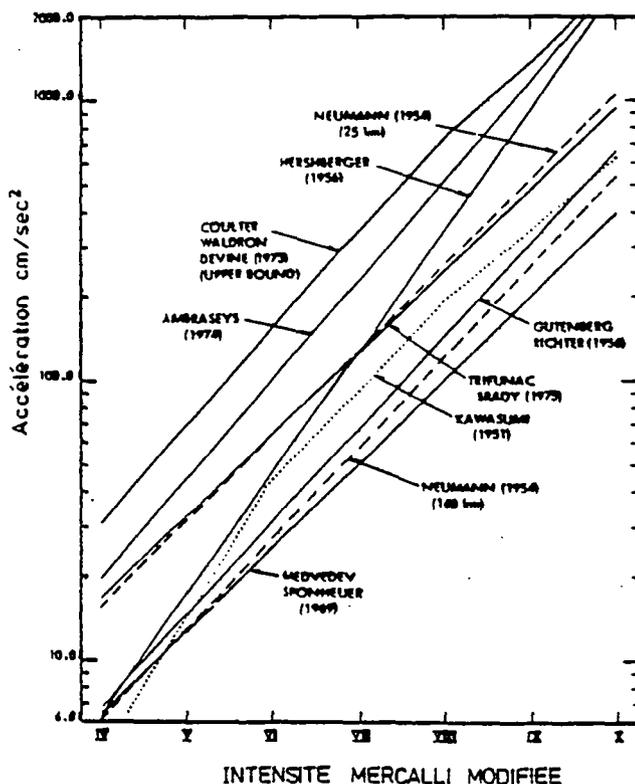


Fig. 12 - CORRELATIONS ENTRE L'INTENSITE MACRO-SISMIQUE ET LE PIC D'ACCELERATION HORIZONTALE DU SOL (d'après MURPHY et O'BRIEN, 1977).

Une analyse statistique de près d'un millier d'observations du monde entier (MURPHY et al., 1977) a conduit à la relation suivante entre l'amplitude du pic d'accélération (γ en cm.s^{-2}) et l'intensité (I en Mercalli Modifiée) observée au lieu d'enregistrement :

$$\begin{aligned} \log \gamma_H &= 0,25 I + 0,25 & \gamma_H &= \text{composante horizontale} \\ \log \gamma_V &= 0,30 I - 0,54 & \gamma_V &= \text{composante verticale} \end{aligned}$$

Ces auteurs ont, également, analysé l'influence de variables telles la magnitude locale (M), la distance épacentrale (R en km) et la région d'origine du séisme (β_k). Ils ont obtenu, alors, la loi suivante :

$$\log \gamma_H = 0,14 I + 0,24 M - 0,68 \log R + \beta_k$$

Les valeurs de β_k obtenues dans le Sud de l'Europe (0,88) et à l'Ouest des Etats Unis (0,60) peuvent conduire, pour une même intensité, à un écart dans un facteur deux sur les valeurs du pic d'accélération. Cela peut être dû en partie à des divergences d'estimation des intensités, mais aussi à un contexte sismotectonique différent dans ces deux types de régions. Les quelques enregistrements de séismes péri-méditerranéens récents montrent effectivement des caractéristiques différentes des séismes californiens : pic d'accélération maximale atteint très rapidement, durée du mouvement fort plus court, rapport des composantes horizontale et verticale modifié.

De nombreuses autres corrélations existent entre l'intensité épacentrale (I_0), la magnitude (M) et parfois la profondeur (h en km) lorsque celle-ci est connue ; par exemple, pour les séismes européens (KARNIK, 1969) :

$$M = 0,55 I_0 + \log h + 0,35$$

ou encore entre l'intensité en un lieu donné (I), la magnitude (M) et la distance focale (R en km) : par exemple, celle établie sur plusieurs centaines d'observations de mouvements forts, principalement californiennes (DEVILLERS et al., 1981 ; MOHAMMADIOUN, 1982) :

$$M = 0,55 I + 2,2 \log R - 1,14$$

Toutes ces corrélations sont très dépendantes des données sur lesquelles elles s'appuient : échelles d'intensité et types de magnitude utilisés, distance à la faille ou à l'hypocentre, contexte sismotectonique, caractéristiques géologiques de la station d'enregistrement, etc... Leur validité dépend statistiquement du nombre et de l'homogénéité des données. Elles doivent être utilisées avec une grande prudence en dehors de leur domaine de définition.

4. NOTION DE RISQUE SISMIQUE ET D'ALEA SISMIQUE

En s'inspirant de la terminologie préconisée par l'UNDRO et l'UNESCO (1980), les définitions suivantes, dont l'usage tend à se généraliser, seront retenues.

Le risque sismique R ("seismic risk" des anglo-saxons) est l'espérance mathématique de pertes au cours d'une période de référence et dans la région considérée. Il est proportionnel au nombre de vies humaines et à la valeur des biens exposés et dépend donc de l'extension de cette

région. Dans un désert parfait il serait nul quelle que soit la sismicité du désert.

En un site particulier, *le risque sismique spécifique ou unitaire* R_i ("specific risk") définit l'espérance mathématique de pertes au cours d'une période de référence et rapportée à une construction (ou un ensemble de constructions de valeur unité). Il peut se décomposer en 2 fonctions (dont il représente la convolution), *l'aléa sismique et la vulnérabilité* :

$$R_i = A_i \times V$$

Le risque sismique propre à une région se déduit des risques unitaires pour les divers sites appartenant à cette région, par multiplication par la valeur des constructions présentes (ou projetées) sur chaque site C_i et sommation pour tous les sites :

$$R = \sum_i (R_i \times C_i)$$

L'aléa sismique ("seismic hazard") est défini en un site donné, par la probabilité qu'au cours d'une période de référence (par exemple probabilité annuelle), une secousse sismique atteigne ou dépasse en ce site une certaine intensité (qu'il s'agisse d'intensité macrosismique ou de paramètres du mouvement du sol : accélération maximale, vitesse, etc...). Evaluer l'aléa sismique en un site donné revient donc à calculer la fonction de répartition de ces paramètres en ce site.

La vulnérabilité ("vulnerability") d'une construction (ou d'une classe de constructions ou d'une population de constructions) représente le rapport du coût des dommages au coût de la construction. Elle s'exprime par un pourcentage et c'est encore une fonction puisqu'elle dépend de l'intensité de la secousse subie. Elle est pratiquement nulle pour une intensité macrosismique inférieure à VI et en général égale à 100% pour une intensité macrosismique égale à XI ou XII. Elle dépend des propriétés des constructions considérées et peut être réduite par l'application de règles de construction parasismique.

Les éléments d'intérêt pour le décideur sont :

- la valeur du risque dans la région considérée,
- la réduction qu'on peut en attendre en agissant de façon appropriée sur la vulnérabilité des constructions,
- le coût des mesures propres à réduire la vulnérabilité.

L'évaluation de l'aléa sismique est donc une étape indispensable dans tout processus de décision relevant du génie parasismique. Les différents paragraphes de ce chapitre 3 illustrent précisément divers aspects liés aux démarches pouvant être mises en oeuvre et aux problèmes méthodologiques posés pour atteindre un tel objectif.

5. LA NOTION D'ALEA SISMIQUE AUX DIFFERENTES ECHELLES

Pour précise qu'elle soit, la définition de l'aléa sismique donnée plus haut présente l'inconvénient de masquer certaines difficultés survenant lors de son application pratique.

Tout d'abord, la référence à l'intensité des secousses renvoie, selon les cas, aux problèmes propres à l'utilisation de l'intensité macrosismique (3) et en particulier à celui de l'amalgame des phénomènes physiques recouverts par cette notion, ou bien aux difficultés rencontrées dans la définition du mouvement sismique en surface du sol. D'autre part, sous cette formulation, la définition de l'aléa sismique peut paraître incomplète ; en effet, elle ne fait pas intervenir, de façon explicite, les effets éventuellement engendrés par la sollicitation sismique sur les formations superficielles, dont on a souligné pourtant la part importante qu'ils pouvaient représenter dans la valeur du risque sismique (2). Il apparaît donc nécessaire de recourir dans la pratique à une définition plus souple qui, par commodité, est adaptée à l'échelle d'étude considérée : échelle régionale à laquelle le milieu est supposé "géologiquement homogène", échelle locale à laquelle sont prises en compte les caractéristiques géologiques et topographiques propres des sites concernés (3.7, fig. 3.13).

A l'échelle régionale, l'aléa sismique représente alors la possibilité pour cette région, d'être soumise à une secousse sismique de caractéristiques données. La définition de l'aléa sismique impose donc de résoudre les trois problèmes suivants :

- la définition des lieux d'occurrence possible de futurs séismes, soit *l'identification des sources sismiques* locales et plus lointaines,
- *la caractérisation de l'activité de ces sources*, en particulier la loi de distribution des événements dans le temps et la loi de distribution des magnitudes (faisant éventuellement intervenir la notion de séisme maximum possible par source ou zone sismique),
- l'estimation des effets susceptibles d'être engendrés, passant par la *modélisation de l'atténuation de l'énergie rayonnée* depuis les sources locales et environnantes.

A cette échelle, les méthodes probabilistes d'évaluation de l'aléa sismique permettent d'établir des cartes où apparaissent les courbes d'isovaleurs des paramètres suivants :

- probabilité annuelle de ressentir en un site une secousse d'intensité supérieure ou égale à une valeur donnée (intensité macrosismique, accélération maximale, vitesse maximale, etc...), généralement exprimée par son inverse, soit la période de retour de l'événement considéré,
- intensité de la secousse pouvant être atteinte ou dépassée sur le site pour une période de temps donnée ou une probabilité fixée par avance.

A l'échelle locale - c'est-à-dire à une échelle significative par rapport à l'emprise du bâti - l'aléa sismique traduit les effets prévisibles de cette secousse sismique en un site particulier, en fonction de ses caractéristiques topographiques et géologiques propres. Les méthodes probabilistes évoquées ci-dessus sont alors insuffisantes car elles reposent sur des modèles qui négligent deux aspects fondamentaux :

- les effets d'amplification dynamique et de modification du contenu fréquentiel du mouvement sismique que peuvent induire en un site donné, des facteurs locaux comme la topographie, la lithologie ou la géométrie des terrains superficiels.

EVALUATION DE L'ALEA SISMIQUE

ALEA SISMIQUE REGIONAL

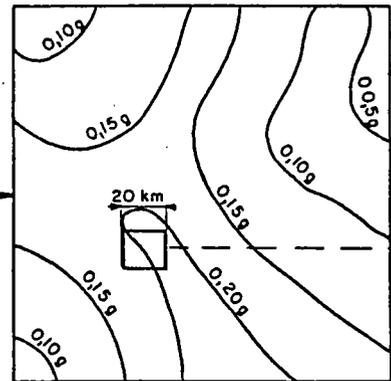
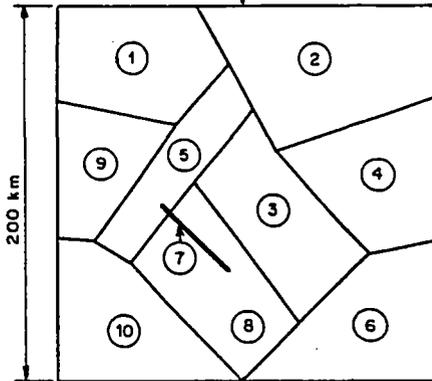
① SISMICITE : BILAN REGIONAL
- HISTORIQUE
- INSTRUMENTAL

② CONTEXTE. STRUCTURAL

④ DETERMINATION DE L'ALEA SISMIQUE REGIONAL
- DETERMINISTE
- PROBABILISTE

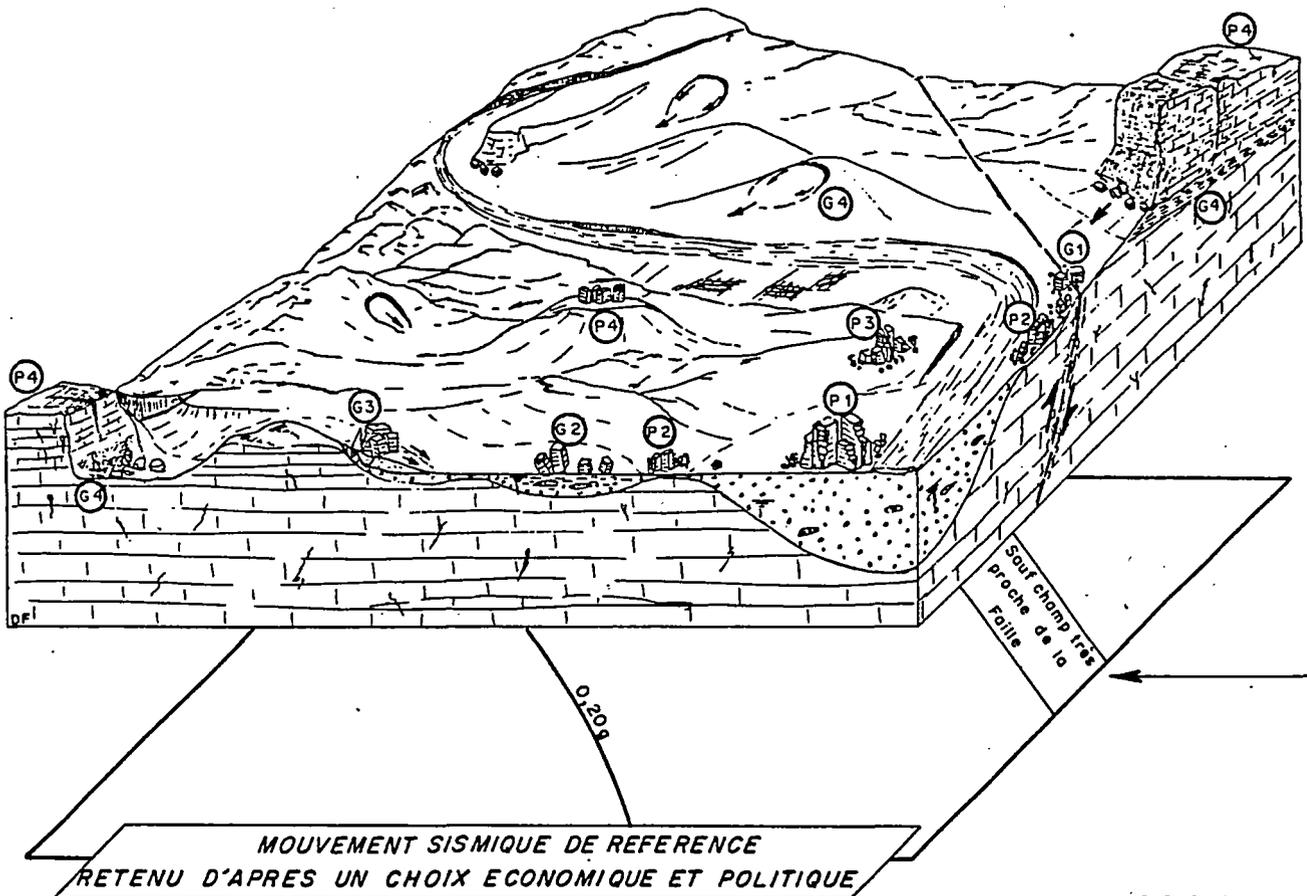
③ ANALYSE SISMOTECTONIQUE
- FAILLES ACTIVES } ZONES SOURCES
- PROVINCES SISMOTECTONIQUES } ou
ZONES SISMOGENES

EXEMPLE : VALEUR BICENTENNALE DE L'ACCELERATION MAXIMUM



ALEA SISMIQUE LOCAL - MICROZONAGE

- | | |
|----------------------------|---|
| GRANDS DEPLACEMENTS DU SOL | G1 : Rupture se propageant jusqu'en surface - Déformations tectoniques en surface du sol |
| | G2 : Liquéfaction en zone alluviale saturée subhorizontale entraînant un affaissement |
| | G3 : Liquéfaction de fines couches de sable saturé entraînant un glissement |
| | G4 : Glissements et Eboulements sans liquéfaction |
| PETITS DEPLACEMENTS DU SOL | P1 : Alluvions épaisses : Amplification faible mais réponse importante des constructions à période propre élevée (Exemple : Bâtiment 10 à 15 niveaux) |
| | P2 : Alluvions peu épaisses : Amplification plus forte et réponse importante des constructions à période propre faible (Exemple : Bâtiment 1 à 5 niveaux) |
| | P3 : Rocher subhorizontal : Pas d'amplification, et même réponse des constructions qu'en P2 |
| | P4 : Crêtes et talus : Amplification importante |



- Les effets induits par les vibrations sismiques sur des formations superficielles à propriétés spécifiques, tels tassements, liquéfaction, glissements en masse, éboulements rocheux, etc...

A cette échelle, la définition "complète" de l'aléa sismique nécessite :

- La modélisation de la réponse dynamique prévisible des terrains à des secousses sismiques dont les caractéristiques (origine, "intensité", durée, mécanisme à la source, etc...) sont fixées en fonction du contexte régional défini précédemment.
- L'identification précise des éventuelles failles actives affectant le site et l'évaluation des déformations tectoniques en surface pouvant leur être associées.

Les études entreprises pour atteindre ces objectifs sont souvent qualifiées de *microzonage sismique*.

Enfin, rappelons pour mémoire, qu'à l'échelle globale la définition de l'aléa sismique repose essentiellement sur les *données géodynamiques*. Les sources sismiques sont représentées schématiquement par les zones de contact entre plaques et c'est à partir de modèles cinématiques que certaines contraintes peuvent être définies pour les lois de distribution, par exemple, par les valeurs maximales possibles de la magnitude ou du moment sismique en fonction des dimensions des zones sismiques et du taux de déplacement moyen des plaques (ANDERSON, 1979 ; MOLNAR, 1979). C'est également à cette échelle qu'a été introduite la notion de "gap" sismique (ou lacune de sismicité) : certaines portions de zones sismiques majeures présentant une interruption de leur activité sur une période significative, sont interprétées comme le lieu privilégié pour l'occurrence de forts séismes dans un futur proche (SYKES, 1971). Tel est le cas actuellement d'une zone située à l'Est de la Guadeloupe au sein de l'arc des petites Antilles (DOREL, 1981). Il faut souligner cependant que des problèmes ardues peuvent survenir lorsque l'on quitte l'échelle du globe pour s'intéresser à une région particulière : par exemple le bassin méditerranéen. Les modèles cinématiques y sont souvent complexes et fort controversés.

En tout état de cause, cette échelle n'est généralement pas adaptée au traitement de problèmes de génie parasismique. Elle fournit un cadre général pour des études à une échelle plus fine.

6. CONCLUSION

La diversité des conséquences possibles d'un tremblement de terre sur l'environnement physique fait de l'évaluation de l'aléa sismique une étape particulièrement délicate. Les difficultés sont accrues par la complexité des phénomènes à considérer depuis l'identification et la "modélisation" des sources sismiques jusqu'à la simulation de la réponse des sols aux sollicitations sismiques, en passant par l'étude de la propagation des ondes en milieu fortement hétérogène, autant de domaines ("terme source", "propagation", "dynamique des sols") constituant des axes de recherches en plein essor.

Au stade actuel, les connaissances sont encore bien insuffisantes sur de nombreux points et il est indispensable de souligner les incertitudes importantes qui subsistent dans l'application des méthodes utilisées. C'est également une des raisons justifiant la variété des approches développées. Les paragraphes qui suivent permettront d'illustrer sur des exemples concrets ces différents points.

REFERENCES

- AMBROSEYS N.N. (1973) - "Dynamics and response of foundation materials in epicentral regions of strong earthquakes", June 1973, - Proceedings of the 5th World Conference on Earthquakes Engineering - Rome.
- AMBROSEYS N.N. (1974) - "The correlation of intensity with ground motion", September 1974, 14th General Assembly of the European Seismological Commission - Trieste.
- ANDERSON J.G. (1979) - "Estimating the seismicity from geological structure for seismic risk studies", Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 69, n°1, February 1979, p. 135-158.
- ANGHEL W. et al. (1981) - Report on the Ad-hoc Panel Meeting of Experts on Up-dating of the MSK 64 Seismic Intensity Scale, Jena 10-14 March 1980, Gerlands Beitr, Geophysik, Leipzig 90-3.
- BOUSQUET J.C. et PHILIP H. (1981) - "Les caractéristiques de la néotectonique en Méditerranée occidentale", *Sedimentary basins of Mediterranean margins*, F.C. WEZEL (editor), C.N.R. Italian project of oceanography, Tecnoprint, Bologna, Italie, p. 389-405.
- CHINNERY M.A. (1969) - "Earthquake magnitude and source parameters", Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 59, n°5, October 1969, p. 1969-1982.
- CISTERNAS A., DOREL J. and GAULON R. (1982) - "Models of the complex source of the El Asnam earthquake", Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 72, n°6, December 1982.
- COMMITTEE ON THE ALASKA EARTHQUAKE (1973) - "The Great Alaska earthquake of 1964" - Special report of the Division of Earth Sciences, National Research Council, U.S. National Academy of Sciences, 1973.
- DADOU C. (1981) - "Valorisation des données de sismicité historique et contemporaine, et application au calcul du risque sismique dans les Alpes Maritimes", Thèse soutenue le 23 Mars 1981 à l'Université Paris VII, pour l'obtention du grade de docteur-ingénieur.
- DESCHAMPS A., GAUDEMER Y. and CISTERNAS A. (1982) - "The El Asnam, Algeria, earthquake of 10 Octobre 1980 ; multiple-source mechanism determined from long-period records", Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 72, n°4, August 1982, p. 1111-1128.
- DEVILLERS C. and MOHAMMADIOUN B. (1981) - "French methodology for determining site adapted SMS (Seisme Majoré de Sécurité) Spectra", August 1981, Proceedings of the 6th International Conference on structural Mechanics in Reactor Technology - Paris.
- DOREL J. (1981) - "Seismicity and seismic gap in the Lesser Antilles arc and earthquake hazard in Guadeloupe", Geophysical Journal of the Royal astronomical Society, n°67, p. 679-695.

- DOWDING C.H. (1978) - "Seismic stability of underground openings", Proceedings of the 1st international symposium on Storage in excavated rock caverns, Rockstore 77, Stockholm, Suède - Pergamon Press, vol. 2, p. 231-238.
- GOULA X. (1980) - "Etude de faisabilité d'une approche probabiliste de l'évaluation du risque sismique. Application au Sud-Est de la France", octobre 1980, OECD - CSNI specialist meeting on probabilist methods in seismic risk assessment for nuclear power plants - Lisbonne.
- GODEFROY P. (1983) - "Effets des séismes sur les installations souterraines", Rapport du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, n° 83 SGN 169 GEG, B.R.G.M., Orléans, France, mars 1983.
- HATZFELD D. et PHILIP H. (1981) - "Il y a un an, El Asnam", La Recherche, vol. 12, n°127, Novembre 1981, p. 1284-1287.
- IWASAKI T., WAKABAYASHI S. and TATSUOKA F. (1977) - "Characteristics of underground seismic motions at four sites around Tokyo Bay", mai 1977, Proceedings of the 8th joint panel conference of the U.S. Japan cooperative program in natural resources on wind and seismic effects, Gaithersburg, Maryland, U.S.A., mai 1976 - National Bureau of Standards Special Bulletin n°477, U.S. department of Commerce, Washington, D.C., U.S.A., vol.III, p. 41-56.
- KANAI K. and TANAKA T. (1950) - "Observations of earthquake motion at the different depths of the earth", Bulletin of Earthquake Research Institute, vol. 29, Tokyo University, Japan, p. 107-113.
- KANAI K., OSADA K. and YOSHISAWA S. (1953) - "Observationnal study of earthquake motion in the depth of the ground", Bulletin of Earthquake Research Institute, vol. 31, Tokyo University, Japan, p. 227-234.
- LANDRY J. (1983) - "Le séisme de Dhamar (république arabe du Yémen) : rapport préliminaire de mission", Rapport du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, n° 83 SGN 001 AGE, BRGM Orléans, France, Janvier 1983.
- KANAMORI H. (1978) - "Use of seismic radiation to infer source parameters", Proceedings of the 3RD Conference on Fault mechanics and its relation to earthquake prediction, United States Geological Survey open file report n° 78-380, United States Government printing office, Washington, D.C., U.S.A., p. 283-318.
- KARNIK V. (1969) - "Seismicity of the European Area", R. Reidel Publishing Company Dordrecht, Holland, Part 1 (1969) - Part 2 (1971).
- LEVRET A. (1982) - "Les caractéristiques des séismes pour le choix des sites des centrales nucléaires", septembre 1982. Cours de l'AIEA, Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires - Saclay.

- LEVRET A. and MOHAMMADIOUN B. (1984) - "Determination of seismic motion for nuclear sites in France", Proceedings of the 18th General Assembly of the European Seismological Commission, Engineering Geology, vol, 20, Amsterdam, Netherlands
- MEDVEDEV S., SPONHEUER E. and KARNIK V. (1963) - "Intensity scale of earthquake", août 1963, Union Géodésique et Géophysique Internationale, 13^e Conférence-Berkeley.
- MOHAMMADIOUN B. (1982) - "Analyse du risque sismique pour les sites des centrales nucléaires", septembre 1982. Cours de l'AIEA. Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires - Saclay.
- MOLNAR P. (1979) - "Earthquake recurrence intervals and plate tectonics", Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 69, n°1, February 1979, p. 115-133.
- MURPHY J.R. and O'BRIEN L.J. (1977) - "The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters", Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 67, n°3.
- OKAMOTO S. (1973) - *Introduction to earthquake engineering*, University of Tokyo Press, Japan.
- OUYED M., MEGHRAOUI M., CISTERNAS A., DESCHAMPS A., DOREL J., FRECHET J., GAULON R., HATZFELD D. and PHILIP H. (1981) - "The EL Asnam earthquake of October 10, 1980 : seismotectonics", Nature n° 292, p. 26-31.
- PHILIP H. (1983) - "La tectonique actuelle et récente dans le domaine méditerranéen et ses bordures ses relations avec la sismicité"-Thèse soutenue le 15 Décembre 1983 à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, pour l'obtention du grade de docteur es Sciences.
- PLAFKER G. (1965) - "Tectonic deformation associated with the 1964 Alaska Earthquake", Science, vol. 148, n° 3678, June 1965, p. 1675-1687.
- PRATT H.R., ZANDT G. and BOUCHON M. (1979) - "Earthquake related displacement fields near underground facilities", Report of Savannah River Laboratory, n° DP 1533, Aiken (SC), U.S.A., Avril 1979, 70 p.
- ROTHER E. (1924) - "Les échelles employées en séismologie", 1924, Association Française pour l'Avancement des Sciences, 48^{ème} session - Liège.
- ROZEN A. (1976) - "Response of rock tunnels in earthquake shaking", Master of Sciences thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, U.S.A.
- RUEGG J.C., KASSER M., TARANTOLA A., LEPINE J.C. and CHOUIKRAT B. (1982) - "Deformations associated with the EL Asnam earthquake of 10 October 1980 : geodetic determinations of vertical and horizontal movements", Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 72, n°6, December 1982, p. 2227-2244.

- MOLNAR P. (1979) - "Earthquake recurrence intervals and plate tectonics", Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 69, n°1, February 1979, p. 115-133.
- MURPHY J.R. and O'BRIEN L.J. (1977) - "The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters", Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 67, n°3.
- OKAMOTO S. (1973) - *Introduction to earthquake engineering*, University of Tokyo Press, Japan.
- OUYED M., MEGHRAOUI M., CISTERNAS A., DESCHAMPS A., DOREL J., FRECHET J., GAULON R., HATZFELD D. and PHILIP H. (1981) - "The El Asnam earthquake of October 10, 1980 : seismotectonics", Nature n° 292, p. 26-31.
- PHILIP H. (1983) - "La tectonique actuelle et récente dans le domaine méditerranéen et ses bordures ses relations avec la sismicité"-Thèse soutenue le 15 Décembre 1983 à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, pour l'obtention du grade de docteur es Sciences.
- PLAFKER G. (1965) - "Tectonic deformation associated with the 1964 Alaska Earthquake", Science, vol. 148, n° 3678, June 1965, p. 1675-1687.
- PRATT H.R., ZANDT G. and BOUCHON M. (1979) - "Earthquake related displacement fields near underground facilities", Report of Savannah River Laboratory, n° DP 1533, Aiken (SC), U.S.A., Avril 1979, 70 p.
- ROTHER E. (1924) - "Les échelles employées en séismologie", Association Française pour l'Avancement des Sciences, 48ème session, Liège.
- ROZEN A. (1976) - "Response of rock tunnels in earthquake shaking", Master of Sciences thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, U.S.A.
- RUEGG J.C., KASSER M., TARANTOLA A., LEPINE J.C. and CHOUIKRAT B. (1982) - "Deformations associated with the El Asnam earthquake of 10 October 1980 : geodetic determinations of vertical and horizontal movements", Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 72, n°6, Décembre 1982, p. 2227-2244.
- SAVARENSKY E.F. et NERSESOV I.L. (1980) - "Prévision des séismes" - *La protection contre le risque sismique* - UNESCO, Paris, 1980, p. 70-95.
- SOLOVIEV S.L. (1980) - "Tsunamis" - *La protection contre le risque sismique* - UNESCO, Paris, 1980, p. 127-149.
- SYKES L.R. (1971) - "Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps and earthquake prediction for Alaska and the Aleutians", Journal of Geophysical Research, vol. 76, n°32, p. 8021-8041.

.../...

- SAVARENSKY E.F. et NERSESOV I.L. (1980) - "Prévision des séismes" - *La protection contre le risque sismique* - UNESCO, Paris, 1980, p. 70-95.
- SOLOVIEV S.L. (1980) - "Tsunamis" - *La protection contre le risque sismique* - UNESCO, Paris, 1980, p. 127-149.
- SYKES L.R. (1971) - "Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps and earthquake prediction for Alaska and the Aleutians", *Journal of Geophysical Research*, vol. 76, n°32, p. 8021-8041.
- U.N.D.R.O. (1980) - "Natural disasters and vulnerability analysis", july 1979, Report of expert group meeting, Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator, Genève, Août 1980.
- WALLER R.M. (1966) - "Effects of the March 1964 Alaska earthquake on the hydrology of South-Central Alaska" and Anchorage area", United States Geological Survey professional paper n°544A and n°544B, United States government printing office, Washington, D.C., U.S.A.
- WIEGEL R.L. (1976) - "Chapitre 7 : Tsunamis" - *Seismic risk and engineering decisions*, LOMNITZ C. and ROSENBLUETH E. (ed), Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Pays Bas, p. 225-287.
- WILLMORE P.L. et KARNIK V. (1971) - "Manuel Pratique des Observatoires Séismologiques", Centre Séismologique International, Edimbourg.
- WOOD H.O. and NEUMANN F. (1931) - "Modified Mercally Intensity Scale of 1931", *Bulletin of Seismological Society of America*, n° 21, p. 277-283.