

République Algérienne Démocratique et Populaire

34/91

MINISTÈRE DES UNIVERSITÉS

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL  
LABORATOIRE INTERACTION SOLS-STRUCTURES

## THESE DE MAGISTER

Présentée par : M<sup>ed</sup>. MERZOUAKI

Septembre 1991

# Evaluation du risque sismique aux sites de construction

Membres du Jury :

<b>A. BALI</b>	Professeur	Président
<b>M. BERRAH</b>	Maître de Conférence	Examineur
<b>S. BELKACEMI</b>	Maître de Conférence	Examineur
<b>M. DEMIDEM</b>	Chargé de Cours	Examineur
<b>B. TILIOUINE</b>	Professeur titulaire	Rapporteur

République Algérienne Démocratique et Populaire

MINISTÈRE DES UNIVERSITÉS

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL  
LABORATOIRE INTERACTION SOLS-STRUCTURES

## THESE DE MAGISTER

Présentée par : M<sup>ce</sup>. MERZOUAKI

Septembre 1991

# Evaluation du risque sismique aux sites de construction

Membres du Jury :

<b>A. BALI</b>	Professeur	Président
<b>M. BERRAH</b>	Maître de Conférence	Examineur
<b>S. BELKACEMI</b>	Maître de Conférence	Examineur
<b>M. DEMIDEM</b>	Chargé de Cours	Examineur
<b>B. TILIOUINE</b>	Professeur titulaire	Rapporteur

ملخص: إن حساب المنشآت المضادة للزلازل، وتحليل مدى ثباتها يتطلب تقييم مبدئي لخطر الزلازل على مواقع بنائها. لهذا الغرض، تم عرض قوانين مختلف نماذج منابع الزلازل، وذلك بناء على معرفة بنوية الأديم و تاريخ المنطقة الزلزالي. كما تم إنجاز برنامج آلي يضم كل النماذج المقترحة، وتطبيق الطريقة على سد جزائري مُرادٍ قصد إيجاد عناصر حمولة الزلازل على موقع السد، تماشي مع مدة الإستغلال الإقتصادية للمشروع، وكذلك من أجل توطيع الإمكانيات المختلفة للبرنامج الآلي المنجز.

Résumé : Le calcul dynamique d'un ouvrage donné et l'analyse de sa stabilité aux séismes, nécessitent l'évaluation du risque sismique a son site de construction. A cet effet, une formulation unifiée des différents modèles de sources sismiques est développée, en se basant sur le contexte tectonique et la sismicité historique de la région étudiée. Un programme de calcul intégrant l'ensemble de ces modèles est également élaboré. Aux fins d'illustrer la versatilité du programme de calcul et d'examiner l'applicabilité de la formulation développée, le risque sismique au site du barrage "Meurad" ( Nord Ouest Algerien ) est examiné et les paramètres de charge sismiques compatibles avec le site et la vie économique du projet sont évalués.

Summary : The aseismic design of a given facility and the analysis of its stability require prior assessment of the seismic risk at the site of construction. For this purpose, a unified formulation for various models of seismic risk and a computer program have been developed. To illustrate the versatility of the computer program and to examine the applicability of the methode, the seismic risk at the "Meurad" dam site (North Western Algeria) is investigated. The tectonic context and the historic seismicity of the surrounding region are taken into account, and seismic loading parameters consistent with the site conditions and the economic life of the project are evaluated.

## الإهداء

إلى والدي الكريمين

إلى أخي الطاهر

إلى الذين ألهمهم من وراء الحجب يحملون مشعل  
فجر المستقبل المنشود

إلى الذين يؤثرون الحق فيبتلون به إلى الحقيقة  
ويرغبون في العمل فيصلون به إلى تحقيق الأمل

إلى هؤلاء جميعاً أهدم هذا البسمة

## تقدير و تقدير

يسرني في بداية هذه الرسالة، أن أتقدم بشكري الجزيل الى  
الأستاذ تليوين بوعلام على عظيم ماقدمه لي رغم كثرة  
اشغاله، وتقديري للمجهود الذي بذله في توجيهي، وللمراجع  
التي جعلها تحت تصرفي، ولحسن استقباله وحفاوته لي، سواء  
في بيته أو في مكتبه، وللنصائح المثمرة، وللتشجيعات  
المنوية، وللثناء التي أثبتها طيلة البحث.  
كما أشكر لجنة القراءة، السيد منير براح أستاذ محاضر  
بالمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات، والسيد مصطفى دميدي،  
أستاذ مكلف بالدروس بنفس المدرسة، على تفضلهما بمناقشة  
رسالتي وعلى ملاحظاتهم القيمة وأراءهم السديدة.  
كما أتقدم بتشكراتي الحارة الى الأستاذ بالي الذي شرفني  
بقبوله رئاسة اللجنة، والسيد بلقاسمي أستاذ محاضر  
بالمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات، على تفضله بالمشاركة  
في لجنة المناقشة.  
كما أنه لا ينبغي أن أختم هذه الكلمة دون أن أتوه بالمجهود  
المشكور، والمعاونة الصادقة التي بذلها السيد الضول، مدير  
مكلف بخطر الزلازل بمركز الدراسات الزلزالية، والأخ جمال  
سايس طالب دراسات عليا بالمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات،  
في الأخير أشكر كل من ساهم سواء من قريب أو من بعيد في  
إعانتني على إنجاز هذا البحث.



# Remerciements



Il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma profonde gratitude au Professeur B. TILIOUINE, directeur de recherche, pour ses précieux conseils et ses encouragements permanents ainsi que le dévouement, le sérieux et la compétence dont il a fait preuve durant la réalisation de cette recherche.

Je tiens également à remercier très chaleureusement Messieurs BERRAH, Maître de conférence et DEMIDEM, chargé de cours, qui ont accepté d'être membres du comité de lecture et du jury. Leurs remarques et suggestions m'ont été très précieuses et ont contribué à un enrichissement certain de cette thèse.

Je suis heureux d'exprimer toute ma gratitude à Monsieur BALI, Professeur à l'E.N.P, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de thèse et à Monsieur BELKACEMI, Maître de conférence, pour avoir bien voulu faire partie de ce jury.

Je ne saurais conclure sans adresser également mes vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, et notamment à Monsieur EL FOUL, Directeur du département aléa sismique au C.G.S et à Monsieur SAIS, Post-graduant à l'E.N.P, pour leur aide précieuse à la mise au point finale de ce travail



# Table des matières



## CHAPITRE PREMIER : INTRODUCTION

I.1 - POSITION DU PROBLEME .....	01
I.2 - OBJECTIFS .....	06

## CHAPITRE DEUXIEME : METHODOLOGIE

II.1 - HYPOTHESES .....	09
II.2 - APPROCHES POSSIBLES .....	10
II.2.1 - Approche déterministe .....	10
II.2.2 - Approche probabiliste .....	11
II.3 - METHODOLOGIE ADOPTEE .....	12

## CHAPITRE TROISIEME : CARACTERISATION DES MOUVEMENTS SISMIQUES

III.1 - GRANDEUR D'UN SEISME .....	15
III.1.1 - Intensité Macrosismique .....	15
III.1.2 - Magnitude .....	16
III.2 - LOI D'ATTENUATION .....	17
III.3 - LOI DE RECURRENCE .....	19
III.4 - MODELE D'OCCURRENCE ADOPTE .....	20

V.7 - INFLUENCE DU COEFFICIENT DE MAGNITUDE " $b_2/\beta$ " .....	65
V.8 - INFLUENCE DU PARAMETRE " $b_3$ " .....	66

CHAPITRE SIXIEME : PRESENTATION DU PROGRAMME

VI.1 - INTRODUCTION .....	68
VI.2 - STRUCTURE DU PROGRAMME PRINCIPAL ET DESCRIPTION DES PRINCIPAUX MODULES .....	69

CHAPITRE SEPTIEME : ETUDE DE CAS :

ANALYSE DU RISQUE SISMIQUE DU BARRAGE "MEURAD"

VII.1 - INTRODUCTION .....	80
VII.2 - CONTEXTE TECTONIQUE DE LA REGION .....	81
VII.3 - HISTORIQUE SISMIQUE DE LA REGION .....	84
VII.3.1 - Séismicité historique de la région .....	85
VII.3.2 - Modélisation des sources sismiques actives .....	88
VII.3.3 - Relations de récurrence .....	89
VII.4 - LOIS d'ATTENUATION .....	90
VII.5 - EVALUATION DES CHARGES PROBABLES FUTURES .....	91

CHAPITRE HUITIEME : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

VIII.1 - PROBLEMATIQUE .....	94
VIII.2 - PRINCIPAUX RESULTATS .....	95
VIII.2.1 - Aspect analytique .....	95

VIII.2.2 - Etude de cas "barrage MEURAD" .....	97.
VIII.2.2.1 - Recommandations pour .....	
le séisme du projet .....	99
VIII.2.2.2 - Recommandations pour .....	
le Séisme maximum probable ..	101

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

#### ANNEXE



# Chapitre premier



## INTRODUCTION

### I.1: POSITION DU PROBLEME

Parmi les menaces qui pèsent le plus sur l'homme, celles relatives aux tremblements de terre sont les plus anciennes et les plus réparties sur la planète. Elles constituent l'une des plus grands dangers auxquels devra faire face l'humanité aux cours des siècles prochains.

Depuis 1960, le nombre de victimes des catastrophes majeures augmente de quelques 6 % par an en moyenne [1]. Environ 600 millions de personnes concernées ont été dénombrées pour la seule période 1980 - 1986.

En 1556, l'humanité a connu le choc le plus violent et le plus meurtrier. Il s'agit du séisme qui a pris place en Chine et qui a provoqué environ 830 000 morts.

En 1980, un violent séisme de magnitude 7.3 a eu lieu à Chlef (El Asnam), provoquant des pertes humaines et économiques considérables .

En 1985, la catastrophe de Mexico ville de 20 millions d'habitants a provoqué l'effondrement de 15.000 immeubles en l'espace d'une minute et demie , écrasant 30.000 personnes et laissant près de 500 000 personnes sans abris et causant près de 5 milliards de dollars de pertes économiques; de quoi augmenter brutalement la dette du pays de 15 % environ .

En 1988, un tremblement de terre superficiel de magnitude 7 sur l'échelle de Richter s'est produit en Arménie à proximité des zones fortement peuplées . Quelques 30.000 personnes ont trouvé la mort.

En 1990, le séisme de Ghilan et Zandjan (nord ouest de l'Iran) d'une magnitude de 7.3 sur l'échelle de Richter a été un véritable cauchemar pour la population . Fortement ressenti sur une superficie de 785.000 km<sup>2</sup>, ce tremblement de terre a causé 50.000 morts et plus de 20.000 blessés. 300 villages ont été portés disparus et 90 % des provinces de Ghilan et Zandjan ont été rasés. La mauvaise qualité des constructions et surtout leurs concentrations à proximité des failles actives sont les causes essentielles de ces massacres .

La liste des principales catastrophes sismiques survenues dans le monde, présentée ci-dessous [1] [2], donne un bref aperçu du nombre de victimes des séismes et de l'effort à entreprendre

en matière de la protection et de mitigation du risque sismique à l'échelle mondiale.

- 1268 : Turquie, 60.000 morts.
- 1290 : Chine, 100.000 morts.
- 1556 : Chine, 830.000 morts.
- 1667 : U.R.S.S, 80.000 morts .
- 1727 : Iran, la ville de Tabriz est détruite, 77.000 morts.
- 1730 : Pékin en Chine, le séisme fait 100.000 morts.
- 1737 : Inde, 300.000 individus périssent à Calcutta .
- 1755 : Portugal, à Lisbonne, 60.000 morts.
- 1783 : Italie, la ville de Calabre, 60.000 morts.
- 1908 : Italie, 82.000 morts à Messine et Rezia.
- 1920 : Chine, à Kansu et Shansi , 180.000 morts.
- 1923 : Japon, 143.000 morts sont dénombrés à Tokyo et Yokohama
- 1927 : Chine, à Tsiengha, 50.000 morts.
- 1937 : Pakistan, 30.000 morts à Quetta .
- 1939 : Chili, 30.000 morts .
- 1939 : Turquie, 27.500 morts à Erzincan.
- 1954 : Algérie, El-Asnam ravagée, 1.200 morts.
- 1960 : Agadir, 15.000 morts.
- 1962 : Iran, 10.000 morts .
- 1968 : Iran, 12.000 morts .
- 1970 : Péros, le long de la côte du pacifique, 66.000 morts.
- 1972 : Managua (Nicaragua), 12.000 morts et 20.000 disparus.

- 1974 : Violent tremblement de terre dans le sud-ouest de la Chine, 50.000 victimes dont 20.000 morts.
- 1974 : Pakistan, neuf villages sont ravagés au nord , 5.200 morts, 17.000 blessés.
- 1975 : Turquie, à Lice , 3.000 morts.
- 1976 : Un violent séisme se produit au Guatemala et détruit une partie du pays, 30.000 morts, 77.000 blessés, un million et demi d'habitants sans abris.
- 1976 : Dans la région d'Uldine dans le nord de l'Italie. Une secousse tellurique provoque la mort de 1.000 personnes, 1.800 blessés et 645.000 sans abris.
- 1976 : Séisme dans la région du sud-ouest en Nouvelle-Guinée indonésienne, plus de 6.000 morts.
- 1976 : Violent séisme dans le nord-est de la Chine, Tang-Shan, ville industrielle (1 million d'habitants), est entièrement rasée, 242.000 morts, 164.000 blessés graves.
- 1976 : Secousse tellurique dans l'île de Mindanao aux Philippines, 4.000 morts et 4.000 disparus.
- 1976 : Tremblement de terre dans la province de Van en Turquie, 4.000 morts et 5.000 blessés.
- 1977 : Séisme en Roumanie. Environ 1.600 morts.
- 1978 : dans l'est de l'Iran , la ville de Tabass est particulièrement éprouvée par une secousse tellurique .  
Bilan : 25.000 morts.

- 1979 : 200 morts dans le nord-est de l'Iran à la suite d'une secousse tellurique.
- 1980 : Algérie, El-Asnam ravagée, des milliers de morts.
- 1980 : Italie, 4.500 morts en Irpina.
- 1985 : Séisme de Mexico, 30.000 morts.
- 1988 : Un violent séisme se produit en Arménie, 30.000 morts.
- 1990 : Séisme de Ghilan et Zandjan (Nord-ouest de l'Iran), 50.000 morts et plus de 20.000 blessés.

- Comment reconstruire alors que la menace peut avoir lieu à n'importe quel moment ?
- Comment limiter ces pertes importantes en vies humaines et économiques ?
- Comment prédire les tremblements de terre ou les potentiels sismiques qui leur sont associés ?
- Comment améliorer les critères de conception et de réalisation des structures face au risque sismique ?

La réponse à ces questions et la protection face à ce risque naturel a contribué au développement rapide d'une science récente : le Génie Parasismique, englobant diverses disciplines telles que : la Dynamique des Structures, la Dynamique des sols, la Séismologie, le Risque Sismique, l'Instrumentation Sismique..., et permettant de limiter substantiellement les pertes en vies humaines et de maintenir les pertes économiques à un niveau acceptable par la communauté .

La conception des constructions importantes (centrales nucléaires, barrages, réservoirs de gaz naturel liquéfié ...etc) nécessite l'évaluation du risque sismique comme étape préalable au processus de calcul et de vérification aux séismes . Autrement dit, il s'agira d'abord de prédire l'ampleur des charges sismiques attendues au site durant une période de temps donnée.

La question se pose aussi bien pour ces ouvrages importants à précautions sismiques particularisées, que pour les réglementations applicables à des ensembles de constructions notamment les structures d'un usagé courant en pratique.

## 1.2 : OBJECTIFS

L'objectif cherché consistera à élaborer une relation entre la vie économique d'une structure donnée, le niveau de risque désiré et la période de retour du séisme attendu .

L'évaluation du risque sismique au site de construction sera basée sur une approche probabiliste devant permettre de déterminer les pointes d'accélération sismiques et la probabilité de dépassement d'un niveau donné d'accélération pour une période de temps fixée à priori.

Il conviendra d'élaborer entre autres, après une formulation adéquate du problème, un programme d'évaluation du risque sismique en un site donné intégrant l'ensemble des modèles des sources sismiques possibles .

Un volume de travail considérable a été accompli en matière :

- D'estimation probabiliste des paramètres de charge sismique du barrage " MEURAD " situé à 12 Km au nord de Boumedfâa et à 37 Km à l'ouest de Blida dans une zone de forte sismicité. Les résultats de l'étude pourront être exploités directement dans les analyses de stabilité et de dimensionnement des ouvrages parasismiques à ériger dans cette région.

- D'identification des facteurs susceptibles d'influencer de façon significative le degré de risque encouru au site en considérant successivement divers paramètres :

- . Profondeur focale
- . Longueur de faille
- . Paramètre d'atténuation ( $b_3$ ) et de magnitude ( $\beta$ )
- . Distribution des magnitudes ...etc

- D'élaboration d'un logiciel de calcul " RISK " permettant l'évaluation du risque sismique au niveau d'un site donné

prenant en charge divers modèles d'idéalisation des sources sismiques à savoir :

- . Modèle de source ponctuelle .
- . Modèle de source linéique .
- . Modèle de source surfacique .
- . Modèle de rupture de faille .



# Chapitre Deuxieme



## METHODOLOGIE

### II.1 - HYPOTHESES

La détermination probabiliste des niveaux de charges sismiques est basée essentiellement sur les hypothèses suivantes :

1 - Les sources sismiques ponctuelles, linéiques, ou surfaciques sont identifiées sur la base de considérations liées à la séismicité historique et instrumentale ainsi qu'à la tectonique de la région étudiée.

2 - Une relation de récurrence peut être établie pour chaque source sismique .

3 - Le nombre d'occurrences de séismes au cours d'une période donnée est une variable aléatoire distribuée suivant le processus de Poisson. Un tel processus suppose implicitement que :

- Les événements sismiques sont indépendants dans le temps et dans l'espace.

- la probabilité pour que deux événements sismiques se produisent au même endroit et en même temps est voisine de zéro.

## II.2 - APPROCHES POSSIBLES

Deux approches principales peuvent être utilisées pour l'évaluation du risque sismique; une approche déterministe basée sur un modèle géophysique de précision plutôt limitée ou une approche probabiliste fondée sur une estimation du potentiel sismique ou des paramètres de mouvement susceptibles de se produire au site avec une probabilité donnée [5],[6].

### II.2.1 - Approche déterministe

C'est une approche qui vise à définir le potentiel sismique d'une région en terme de valeur maximale d'un des paramètres caractéristiques du mouvement. L'évaluation de ces paramètres par l'intervention du mécanisme à la source ( énergie mécanique libérée, dimensions de la source, chute de contrainte ), la nature géologique des couches du sol traversées par les ondes sismiques est une approche analytique extrêmement complexe du fait que le nombre de paramètres à prendre en compte est élevé . Cette approche n'a été utilisée qu'en de très rares occasions en relations avec des projets réels [1].

Malgré la complexité de cette méthode et la méconnaissance des phénomènes physiques de rupture lors d'un séisme destructeur il y a beaucoup à faire dans cette voie et il est certain que

cette méthode soit appelée à connaître des développements importants .

Une deuxième méthode purement empirique repose sur l'hypothèse de l'existence d'une limite supérieure appelée Séisme Maximal Historiquement Vraisemblable ( S.M.H.V ) déterminée en examinant les séismes historiques survenus dans la région du site .

La magnitude et la profondeur du S.M.H.V sont fournies par les données instrumentales s'il s'agit de séismes récents, ou sont déduites des données macrosismiques à l'aide des lois d'atténuation et les paramètres du mouvement du sol :

- Accélération - vitesse - déplacement .

### II.2.2 - Approche probabiliste

C'est une approche qui évalue à partir des fréquences des séismes constatés, les probabilités futures des paramètres de charge en utilisant un modèle d'occurrence décrivant la succession des séismes importants dans le temps .

Le modèle stochastique le plus fréquemment utilisé pour la prévision sismique est celui de Poisson - Parzen (1962) [7], Cornell (1964) [3], Gardner et Knopoff (1975) [4], Schenk [11]-.

Ce modèle permet, entre autres, le calcul des périodes de retour, et du nombre de séismes annuels de magnitudes supérieures ou égales à un niveau donné. Cette approche constitue le fondement de l'analyse du risque sismique au niveau des sites de construction dont les étapes sont exposées dans le paragraphe suivant II.3.

### II.3 - METHODOLOGIE ADOPTÉE

L'analyse du risque sismique passe par la modélisation des diverses sources sismiques de la région ( sources ponctuelles, linéiques ou surfaciques ) et la définition d'un niveau d'activité moyen ( taux d'occurrence moyen ) pour chaque type de source [13], en se basant sur le contexte tectonique, la sismicité historique, ainsi que les données géophysiques et géologiques de la région.

L'intégration des influences de toutes les sources permet l'évaluation du risque sismique au site, ou plus spécifiquement la probabilité pour qu'un niveau d'accélération sismique donné soit dépassé au site pour une période de temps spécifiée à l'avance .

La méthodologie utilisée peut être résumée en cinq étapes consécutives.

1 - Compilation de toutes les données géologiques et sismologiques :

a - Inventaire aussi complet que possible des séismes historiques observés et leurs paramètres caractéristiques (magnitude, intensité, profondeur focale, latitude, longitude, hypocentre ).

b - Localisation des zones sismiques actives et leurs modélisations :

- Sources ponctuelles ( ex :volcan actif )
- Sources ponctuelles disposées linéairement (ex:faille)
- Sources surfaciques (des sources ponctuelles réparties sur une surface).

2 - Obtention séparément pour chaque source de la relation de récurrence permettant de donner entre autres le taux moyen d'apparition d'événements sismiques (N) pour un niveau donné de magnitude (m).

Le modèle de régression linéaire de Gutenberg - Richter [14] est généralement utilisé pour représenter analytiquement cette relation sous la forme :

$$\log(N) = a - b m \quad ( 1-1 )$$

où a et b sont des paramètres caractéristiques de la région



# Chapitre Troisième



## CARACTERISATION DES MOUVEMENTS SISMIOUES

### III.1 - GRANDEUR D'UN SEISME

Afin de quantifier et comparer éventuellement le degré de violence et les quantités d'énergies libérées des séismes, des paramètres instrumentaux ( magnitude , accélération, vitesse, déplacement ) et descriptifs ( intensité ) ont été définis par plusieurs chercheurs .

#### III.1.1 - Intensité Macrosismique

L'intensité macrosismique est généralement évaluée à partir des dégâts subits par les constructions et des effets ressentis par les personnes lors d'un séisme.

Les échelles d'intensité sont nombreuses ( il existe plus de 40 versions différentes à ce jour ). La première échelle reposant pour la première fois sur des critères précis a été établie par Rossi-Forel au siècle dernier.

Les échelles les plus utilisées sont :

- Echelle M.S.K ( Medvedev, Sponheuer et Karnik 1964 ) graduée en chiffre romain variant de I . à XII et utilisée surtout en Europe .

- Echelle Mercalli modifiée, recommandée par la Commission de Sismologie Européenne ( C.E.S ) et utilisée surtout en Amérique avec ces deux versions légèrement différentes :

- . Wood Neumann (1931).
- . Richter (1956)

### III.1.2 : Magnitude

Richter (1935) a introduit pour la première fois une mesure (magnitude dite de Richter, appelée aussi magnitude locale ) permettant de quantifier l'énergie libérée par un séisme en calculant le logarithme de l'amplitude des ondes sismiques, de fréquence donnée, enregistrées sur un sismographe corrigé de l'effet d'atténuation et de site.

La relation de Richter se présente sous la forme :

$$m = \log \frac{A}{T} + f( d , h ) + S \quad ( 3-1 )$$

avec A : Amplitude de l'onde enregistrée par un sismographe de type WOOD ANDERSON .

T : La période correspondante .

f : facteur de correction fonction de la distance épacentrale d et de la profondeur h .

S : facteur de site .

### III.1.3 -Grandeurs maximales

Ces grandeurs très utiles pour l'ingénieur , sont généralement déterminées directement à partir des diagrammes enregistrés lors d'un séisme. Par des techniques d'intégration d'un accélérogramme enregistré [1], il est possible d'obtenir les diagrammes de vitesse et de déplacement en fonction du temps. Les valeurs maximales des trois diagrammes représentent respectivement l'accélération maximale ( généralement exprimée en fraction de g ), la vitesse maximale ( cm/s ) et le déplacement maximum d ( cm ).

### III.2 - LOI D'ATTENUATION

La relation empirique permettant de déterminer un des paramètres maximaux caractéristiques du mouvement sismique (accélération, vitesse ou déplacement) en fonction des deux variables (magnitude et distance focale) ayant une incidence significative sur la nature du mouvement est appelée loi d'atténuation .

La forme générale la plus répandue, de cette loi se présente Comme suit :

$$Y = b_1 e^{b_2 m} ( R + b_4 )^{-b_3} \quad ( 3-2 )$$

où  $b_1, b_2, b_3$  et  $b_4$  sont des constantes déterminées à partir de l'analyse statistique des enregistrements de séisme dans la région. La distance focale  $r$  est liée à la distance épacentrale  $d$  et la profondeur focale  $h$  par la relation :

$$r = ( d^2 + h^2 )^{1/2} \quad ( 3-3 )$$

De nombreuses lois d'atténuation pour différentes régions du monde ont été établies, Idriss (1978) [15] en avait dénombré quelques 32 formules pour le paramètre accélération contre 15 et 10 pour les paramètres vitesse et déplacement respectivement.

La formule choisie pour l'équation implique que le paramètre  $Y$  augmente d'une façon exponentielle en fonction de la magnitude et varie de manière inversement proportionnelle avec la distance focale .

Il convient de remarquer aussi que les conditions locales du site (nature et caractéristiques du sol ) ne sont pas prises en compte dans l'évaluation de l'accélération maximale, à l'inverse de la vitesse maximale et le déplacement maximum. Cette observation est corroborée clairement par les travaux importants de Seed (1976), Trifunac et Brady (1975) ainsi que ceux de Joyner et Boore (1981) .

A titre purement indicatif les relations d'atténuation de Joyner et Boore (1981) applicables pour les séismes superficiels ( $5\text{km} \leq h \leq 10\text{km}$ ) sont présentées ci-après.

$$\begin{cases} \log(A) = -1.02 + 0.249m - \log(r) - 0.00255 r \\ r = (d^2 + 7.3^2)^{0.5} \end{cases} \quad (3-4)$$

$$\begin{cases} \log(V) = -0.67 + 0.489 m - \log(r) - 0.00256 r + 0.17 S \\ r = (d^2 + 4.0^2)^{0.5} \end{cases}$$

On voit clairement que la nature du site S n'est pas prise en considération pour les accélérations sismiques, ce n'est pas le cas pour les vitesses et déplacement de sol.

Nous examinerons plus loin (Chapitre VII) l'applicabilité de plusieurs lois d'atténuation à l'analyse du risque sismique au site d'un barrage algérien.

### III.3 - LOI DE RECURRENCE

Sur la base de la sismicité historique une relation de récurrence est déterminée séparément pour chaque source sismique. Une telle relation permet de déterminer le nombre moyen d'événements relatifs à une source donnée, de magnitudes supérieures ou égales à m.

Gutenberg et Richter (1958) [14] ont proposé la loi suivante :

$$\log (N) = a - b m \quad ( 3-5 )$$

où N désigne le nombre moyen d'événements de magnitude supérieure ou égale à m par unité de temps . Les constantes "a" et "b" représentent les paramètres dépendant du niveau de sismicité moyen de la région .Elles peuvent être déterminées par des modèles de régression linéaires des données recueillies à partir de la sismicité historique de la région étudiée.

#### III.4 - MODELE D'OCCURRENCE ADOPTE

La description des occurrences futures nécessite l'utilisation d'un modèle probabiliste de prévision sismique permettant de déterminer ce nombre d'événements sismiques susceptibles de se réaliser pendant une période de temps donnée.

Parzen (1962) [7], Cornell (1964) [3], Gardner et Knopoff (1975) [4] ont montré que la distribution des événements sismiques dans le temps (répliques exclues) suit un processus de Poisson de sorte que l'on peut écrire :

$$P_t(n) = \frac{\text{Exp}(-vt) \cdot (vt)^n}{n!} \quad ( 3-6 )$$

où  $\nu$  désigne le Taux moyen d'apparition d'événements significatifs (excédant un niveau minimal de magnitude) par unité de temps.  $F_t(n)$  représente la probabilité pour que  $n$  événements futurs se produisent pendant une période de temps donnée  $t$ .



# Chapitre Quatrième



## ANALYSE DU RISQUE SISMIQUE

### IV.1 -INTRODUCTION

L'analyse du risque sismique est une étape déterminante dans le processus de calcul des ouvrages d'intérêt stratégiques . Elle permet entre autres , de déterminer les paramètres de charge probables en vue du calcul et de la vérification des projets industriels implantés en zone sismiquement active, compatibles avec la vie économique de ces projets.

L'analyse du risque sismique permet d'intégrer de façon "élégante" les aspects géophysiques et sismologiques en prenant en considération l'effet des sources actives grâce aux données de la sismicité historique et de la tectonique de la région étudiée .

Quatre modèles d'idéalisation des sources sismiques sont utilisés dans le but de modéliser l'effet du risque sismique quelque soit la nature des sources sismiques envisagées . Le risque sismique au site sera déterminé par l'intégration des effets séparés de l'ensemble des sources sismiques actives.

## IV.2 -MODELE DE SOURCES PONCTUELLES

Le modèle est fondée sur l'hypothèse selon laquelle l'énergie libérée lors d'un séisme est émise à partir d'une source ponctuelle.

### IV.2.1 -Source ponctuelle

Ce modèle est utilisé dans le cas où la position exacte des épicentres des séismes peut être assimilée à un point distant de  $r$  à partir du foyer sismique ( Fig.1 ).

Les événements sismiques sont distribués selon la loi de Poisson, avec un taux d'occurrence moyen  $\nu$ . La magnitude  $m$  du séisme est une variable aléatoire distribuée suivant une loi exponentielle.

Soit : .  $m_0$  la magnitude limite inférieure .

.  $m_u$  la magnitude limite supérieure .

D'après l'équation (3-6) :

$$\log N = a - b m \quad \text{d'où} \quad N = \text{Exp}( \alpha - \beta m )$$

$$\text{avec:} \quad \begin{cases} \alpha = a \ln(10) \\ \beta = b \ln(10) \end{cases}$$

$$F_M(m) = P[ M < m / m_0 \leq m \leq m_u ] \quad ( 4-1 )$$

$$= \frac{N(m_0) - N(m)}{N(m_0) - N(m_u)} = \frac{1 - \text{Exp}[ - \beta ( m - m_0 ) ]}{1 - \text{Exp}[ - \beta ( m_u - m_0 ) ]}$$

avec :  $m_0 \leq m \leq m_u$

Posons :

$$K_m = \left[ 1 - \text{Exp}[ - \beta ( m_u - m_0 ) ] \right]^{-1} \quad ( 4-2 )$$

Il en résulte :

$$F_M(m) = K_m \left[ 1 - \text{Exp}[ - \beta ( m - m_0 ) ] \right] \quad ( 4-3 )$$

avec :  $m_0 \leq m \leq m_u$

La stabilité du paramètre  $\beta$ , d'une région à une autre, a été examinée par Isacks et Oliver (1964) [17] qui ont montré que les valeurs possibles de  $\beta$  varient généralement entre 1.5 et 2.3 .

On remarque également que si la distribution des magnitudes est illimitée, alors  $K_m = 1$  et l'on peut écrire :

$$F_M(m) = \left[ 1 - \text{Exp}[ - \beta ( m - m_0 ) ] \right] \quad ( 4-4 )$$

Soit  $P_1$  la probabilité d'un événement futur de magnitude dépassant  $m$ .

$$P_1 = K_m \left[ \text{Exp} [-\beta(m - m_0)] - \text{Exp} [-\beta(m_u - m_0)] \right] \quad (4-5)$$

Par conséquent la combinaison de (3-6) et (4-5) fournit la probabilité pour qu'il y aurait  $n$  événements de magnitude supérieure à  $m$  dans un intervalle de temps  $t$  :

$$P(n) = \frac{\text{Exp}(-\nu P_1 t) \cdot (P_1 \nu t)^n}{n!} \quad (4-6)$$

On en déduit aisément que la probabilité d'avoir au moins un événement sismique de magnitude  $M$  supérieure à  $m$  pendant une période de temps  $t$  :

$$\begin{aligned} P(M \geq m, t) &= 1 - \text{Exp}(-\nu P_1 t) \\ &= 1 - \text{Exp} \left[ -\nu t K_m \left[ \text{Exp} [-\beta(m - m_0)] - \text{Exp} [-\beta(m_u - m_0)] \right] \right] \end{aligned}$$

Par ailleurs, la probabilité  $P_y$  pour qu'un niveau d'accélération sismique  $y$  soit dépassé pendant une période de temps  $t$ , s'écrit :

$$\begin{aligned} P_y &= P(Y \geq y, t) = P \left( b_1 e^{b_2 M} (r + b_4)^{-b_3} \geq y \right) \\ &= P \left( M \geq \frac{1}{b_2} \ln \left[ \frac{(r + b_4)^{b_3}}{b_1} y \right], t \right) \end{aligned}$$

$$= 1 - \text{Exp} \left\{ -K_m \nu t \left[ \text{Exp} \left[ -\beta \left[ \frac{1}{b_2} \ln \left[ \frac{(r + b_4)^{b_3}}{b_1} Y \right] - m_0 \right] \right] - \text{Exp} \left[ -\beta (m_u - m_0) \right] \right] \right\}$$

Après introduction des grandeurs, cette équation peut être simplifiée comme suit :

$$P_y = 1 - \text{Exp} \left[ -K_m \nu t \left[ (r + b_4)^{-\gamma} C Y^{-\frac{\beta}{b_2}} - \text{Exp} \left[ -\beta (m_u - m_0) \right] \right] \right]$$

Avec :

$$C = b_1^{\beta/b_2} \text{Exp}(\beta m_0) \quad \text{et} \quad \gamma = \beta \frac{b_3}{b_2}$$

D'où finalement :

$$P_y = 1 - \text{Exp} \left( -K_m \nu t G_p C Y^{-\beta/b_2} \right) \text{Exp} \left( K_m \nu t e^{-\beta (m_u - m_0)} \right) \quad \text{Si } Y \geq Y_0$$

( 4-7 )

Avec :

$$\begin{cases} G_p = (r + b_4)^{-\gamma} \\ Y_0 = b_1 (r + b_4)^{-b_3} \text{Exp}(b_2 m_0) \end{cases}$$

Il importe de signaler que l'équation (4-7) est valable uniquement si l'hypocentre sismique est situé dans la zone d'influence (chapitre V) telle que la distance focale  $r$  soit

inférieure ou égale à la valeur  $r_y$  correspondante à la valeur limite supérieure de magnitude  $m_u$ , et au dessus de laquelle il devient pratiquement impossible pour un séisme de générer des mouvements de sol d'intensité excédant le niveau d'accélération sismique .

Cette valeur de la distance focale peut être obtenue à partir de la relation :

$$r_y = \left( \frac{Y}{b_1} \right)^{-\frac{1}{b_3}} \text{Exp} \left( \frac{b_2}{b_1} m_u \right) - b_4$$

Pour résumer, on pourra donc écrire :

Si  $Y \geq Y_0$  :

$$P_y = \begin{cases} 1 - \text{Exp} \left( -K_m v t G_p C \bar{Y}^{-\beta/b_2} \right) \text{Exp} \left( K_m v t e^{-\beta(m_u - m_0)} \right) & \text{pour } r \leq r_y \\ 0 & \text{pour } r > r_y \end{cases}$$

Si  $Y < Y_0$  :  $P_y = 1$  ( 4-8 )

avec

$$C = b_1^{\beta/b_2} \text{Exp}(\beta m_0) ; G_p = (r + b_4)^{-\gamma} ; \gamma = \beta \frac{b_3}{b_2}$$

$$r_y = \left( \frac{Y}{b_1} \right)^{-\frac{1}{b_3}} \text{Exp} \left( \frac{b_2}{b_1} m_u \right) - b_4 ; Y_0 = b_1 (r + b_4)^{-b_3} \text{Exp}(b_2 m_0)$$

Dans le cas où la distribution des magnitudes est illimitée, la probabilité annuelle correspondante est :

$$\begin{aligned}
 P_y &= 1 - \text{Exp} \left( - v G_p C Y^{-\beta/b_2} \right) & \text{Si } Y \geq Y_0 \\
 P_y &= 1 & \text{Si } Y < Y_0
 \end{aligned}
 \quad (4-10)$$

La période de retour correspondante  $T_y$ , exprimée en années, pour les deux cas de distribution pourra être obtenue par la relation suivante :

$$T_y = \frac{1}{P_y(t = 1 \text{ an})} \quad (4-11)$$

#### IV.2.2 - Source linéaire

Lorsque les épicentres sismiques sont localisés suivant une faille linéaire, on admet généralement que les sources ponctuelles sont distribuées le long de la faille de façon uniforme et équiprobable. La sommation des effets de l'ensemble de ces sources permettra l'évaluation du risque associé au site de construction ( Fig.2a et Fig.2b )

En se basant sur l'hypothèse de l'indépendance des événements sismiques, la probabilité de non-dépassement d'un niveau d'accélération associé à une source linéaire dans un intervalle de temps  $t$ , peut être obtenu par le produit des probabilités de  $k$  sources ponctuelles composant cette source.

Il vient donc :

$$P(Y < y, t) = \prod_{j=1}^{j=k} P_j(Y < y, t) \quad (4-12)$$

avec  $P_j$  désignant la probabilité de non-dépassement de  $y$  associée à la source ponctuelle  $j$ .

$$P_j = 1 - P_y = \text{Exp} \left( -K_m \nu_j t G_{p_j} C y^{-\beta/b_2} \right) \text{Exp} \left( K_m \nu_j t e^{-\beta(m_u - m_0)} \right)$$

où  $\nu_j$  représente le taux moyen d'apparition par unité de temps de séismes correspondant à la source  $j$  et  $G_{p_j} = (r_j + b_4)^{-\gamma}$  avec  $r_j$  distance focale, associée à la source ponctuelle  $j$ .

On aura donc :

$$P(Y < y, t) = \prod_{j=1}^{j=k} \text{Exp} \left( -K_m \nu_j t G_{p_j} C y^{-\beta/b_2} \right) \text{Exp} \left( K_m \nu_j t e^{-\beta(m_u - m_0)} \right)$$

Soit:

$\nu_j = \nu_0 \Delta x_j$  où  $\nu_0$  désigne le taux d'occurrence moyen par unité de longueur de la faille, et par unité de temps.

Alors:

$$P(Y < y) = \text{Exp} \left( -K_m \nu_0 t C y^{-\beta/b_2} \sum_{j=1}^{j=k} (r_j + b_4)^{-\gamma} \Delta x_j \right) \cdot \text{Exp} \left( K_m \nu_0 t e^{-\beta(m_u - m_0)} \sum_{j=1}^{j=k} \Delta x_j \right)$$

D'où par intégration des effets des différents segments linéaires de la faille :

$$\left\{ \begin{array}{l} P(Y < y) = \text{Exp} \left( -K_m v_0 t C y^{-\beta/b_2} \int_0^l (r + b_4)^{-\gamma} dx \right) \\ \cdot \text{Exp} \left( K_m v_0 t e^{-\beta(m_u - m_0)} \int_0^l dx \right) \end{array} \right. \quad (4-13)$$

Comme  $x$  dépend du rayon focal ; on obtient en considérant les notations de la figure 2a :

$$P(Y < y) = \text{Exp} \left( -K_m v_0 t C y^{-\beta/b_2} \int_{r_0}^{r_1} \frac{r (r + b_4)^{-\gamma}}{(r^2 - r_0^2)^{0.5}} dr \right) \cdot \text{Exp} \left( K_m v_0 t e^{-\beta(m_u - m_0)} l \right)$$

Il importe d'observer que l'équation (4-13) n'est valable que si la faille entière est incluse dans la zone d'influence telle que le rayon focal  $r_y$  associé à la magnitude limite  $m_u$  dépasse les deux extrémités de la faille ( $r_0 < r_1 \leq r_y$ ).

En conclusion, la probabilité pour qu'au moins un événement sismique relatif à une source linéaire (de séismicité moyenne  $v_0$  par unité de longueur et de temps) et associé à un niveau d'accélération  $y$  soit dépassé en un site donné pendant une période de temps  $t$  s'écrira :

Si  $Y \geq Y_0$

$$P_y = \begin{cases} 0 & \text{Pour } r_y \leq r_0 \\ 1 - \text{Exp} \left( - K_0 v_0 t C Y^{-\beta/b_2} G_1 \right) \text{Exp} \left( K_m v_0 t e^{-\beta(m_u - m_0)} L \right) & \text{Pour } r_y > r_0 \end{cases} \quad (4-14)$$

Si  $Y < Y_0$   $P_y = 1$  (4-15)

Dans l'équation (4-14), les grandeurs L et  $G_1$  (appelé facteur géométrique) sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} L = \left[ \left[ \text{Min}(r_y, r_1) \right]^2 - r_0^2 \right]^{0.5} \\ G_1 = \int_{r_0}^{\text{Min}(r_1, r_y)} \frac{r (r+b_4)^{-\gamma}}{(r^2 - r_0^2)^{0.5}} dr \end{cases} \quad (4-16)$$

On rappelle pour toutes fins jugées utiles que les expressions de C,  $\gamma$ ,  $Y_0$  et  $r_y$  sont données par les relations (4-9).

Dans le cas où la distribution des magnitudes est illimitée, la probabilité annuelle de dépassement s'écrit :

$$P_y = \begin{cases} 1 & \text{Si } Y < Y_0 \\ 1 - \text{Exp} \left( - v_0 C Y^{-\beta/b_2} G_1 \right) & \text{Si } Y \geq Y_0 \end{cases} \quad (4-17)$$

IV.2.2.1 -Evaluation du facteur géométrique

L'évaluation des probabilités de dépassement ( équations 4-14 et 4-17 ) nécessite la détermination préalable du facteur géométrique  $G_1$ . Cette opération est réalisée par intégration numérique dont les calculs peuvent être grandement facilités sur la base des développements analytiques suivants:

Soit :  $r_m = \text{Min} (r_x, r_y)$

Alors :

$$G_1 = \int_{r_0}^{r_m} \frac{r (r+b_4)^{-\gamma}}{(r^2 - r_0^2)^{0.5}} dr = \int_{r_0}^{r_m} \frac{(r+b_4)^{-\gamma}}{[1 - (r_0/r)^2]^{0.5}} dr$$

Posons  $u = 1 - (r_0/r)^2$  et  $u_0 = 1 - (r_0/r_m)^2$

Après développement :

$$G_1 = \frac{1}{2} r_0^{1-\gamma} \int_{u_0}^1 \left[ (1-u)^{-0.5} + \frac{b_4}{r_0} \right]^{-\gamma} \cdot (1-u)^{1.5} \cdot u^{-0.5} \cdot du$$

( 4-18 )

■ Dans le cas où le coefficient d'atténuation  $b_4$  est nul  $G_1$  peut être exprimé en termes de fonction Eulerienne Incomplète  $\beta_u (p, q)$ .

$$\beta_u ( p, q ) = \int_0^u (1 - u)^{q-1} u^{p-1} du \quad , p > 0 , q > 0$$

De sorte que :

$$G_1 = \frac{1}{2} r_0^{1-\gamma} \int_0^u (1 - u)^{(3-\gamma)/2} u^{-0.5} du \quad ( 4-19 )$$

où encore :

$$G_1 = \frac{1}{2} r_0^{1-\gamma} \beta_u \left( \frac{1}{2}, \frac{\gamma-1}{2} \right) \quad ( 4-20 )$$

Nous proposons dans la figure 4 des abaques permettant l'évaluation directe de la fonction  $\beta_u \left( \frac{1}{2}, \frac{\gamma-1}{2} \right)$  et par suite du facteur géométrique  $G_1$ .

■ Pour les valeurs non nulles du coefficient d'atténuation "b<sub>s</sub>" le programme " RISK " présente un sous-programme permettant l'évaluation de  $G_1$  dans le cas général .Il est intéressant de faire remarquer que pour les sites localisés autrement par rapport à la faille linéaire, seul le facteur géométrique  $G_1$  et la longueur  $l$  seront modifiés dans les équations précédentes. Ainsi en considérant les deux autres cas possibles représentés sur les figures 7a et 7b , on aura :

$$\begin{cases} G_1 = G_{11} + G_{12} & ; l = l_1 + l_2 & \text{pour la Fig.7a} \\ G_1 = G_{11+12} - G_{11} & ; l = l_2 & \text{pour la Fig.7b} \end{cases} \quad ( 4-21 )$$

où  $G_{l_1+l_2}$  désigne le facteur géométrique associé à la faille linéaire de longueur  $l=l_1+l_2$ .

#### IV.2.3 -Source surfacique

Pour certains cas d'études d'engineering, notamment les analyses d'implantation de site il est nécessaire de considérer que les séismes peuvent avoir lieu à n'importe quel endroit aux alentours du site de construction. Ceci peut s'expliquer par l'existence de nombreuses failles s'entrecroisant dans la région ou bien par l'erreur possible d'estimation des emplacements des épïcêtres puisque ces derniers sont généralement déterminés avec une précision à quelques kilomètres près.

En ce lieu on considère la région comme un anneau ( Fig.3a et 3b ) de rayon épïcétral interne  $x_0$  et externe  $x_1$  avec une séismicité moyenne  $\bar{v}$  par unité de surface et de temps. L'anneau peut être subdivisé en plusieurs arcs d'épaisseur  $dx$  de sorte que la probabilité associée à la surface élémentaire  $dA = x d\theta dx$  peut être obtenue en utilisant l'équation ( 4-7 ) :

$$P_j(Y < y) = \text{Exp} \left[ -K_m v_j t G_j C y^{-\beta/b_2} \right] \text{Exp} \left[ K_m v_j t e^{-\beta(m_u - m_0)} \right]$$

avec :  $v_j = \bar{v} x_j \Delta x_j \Delta \theta_j$  ;  $G_j = (r_j + b_4)^{-\gamma}$

La probabilité de non-dépassement d'un niveau d'accélération  $y$  associé à la source surfacique dans un intervalle de temps  $t$  est obtenue par sommation des effets des  $k$  surfaces élémentaires. Il en découle que pour une source surfacique :

$$\begin{aligned}
 P(Y < y, t) &= \prod_{j=1}^{j=k} P_j(Y < y, t) \\
 &= \prod_{j=1}^{j=k} \text{Exp} \left[ -K_m v_j t G_j C y^{-\beta/b_2} \right] \text{Exp} \left[ K_m v_j t e^{-\beta(m_u - m_0)} \right] \\
 &= \prod_{j=1}^{j=k} \left\{ \text{Exp} \left[ -K_m \bar{v} t C y^{-\beta/b_2} (r_j + b_4)^{-\gamma} x_j \Delta x_j \Delta \vartheta_j \right] \right. \\
 &\quad \left. \text{Exp} \left[ K_m \bar{v} t e^{-\beta(m_u - m_0)} x_j \Delta x_j \Delta \vartheta_j \right] \right\}
 \end{aligned}$$

Lorsque le nombre de sources élémentaires croît indéfiniment, nous obtenons à la limite ( en utilisant les notations des figures 3a et 3b )

$$\begin{aligned}
 P(Y < y, t) &= \left\{ \text{Exp} \left[ -K_m \bar{v} t C y^{-\beta/b_2} \int_0^{\vartheta} \int_{r_0}^{r_1} (r + b_4)^{-\gamma} r \, dr \, d\vartheta \right] \right. \\
 &\quad \left. \text{Exp} \left[ K_m \bar{v} t e^{-\beta(m_u - m_0)} \int_0^{\vartheta} \int_{r_0}^{r_1} r \, dr \, d\vartheta \right] \right\}
 \end{aligned}$$

ou encore :

$$P(Y < y, t) = \left\{ \text{Exp} \left( -K_m \bar{v} t C y^{-\beta/b_2} \int_{r_0}^{r_1} r (r + b_0)^{-\beta} dr \right) \right. \\ \left. \text{Exp} \left( K_m \bar{v} t e^{-\beta (m_u - m_0)} \left[ \frac{r_1^2 - r_0^2}{2} \right] \right) \right\}$$

Il est à noter que cette dernière expression n'est valable que si toute la source surfacique est incluse dans la zone d'influence telle que le rayon focal externe  $r_1$  est inférieur ou égal au rayon limite  $r_y$ , correspondant à la magnitude limite supérieure  $m_u$ .

En résumé, on peut écrire que pour une source surfacique de sismicité moyenne  $\bar{v}$  par unités de surface et de temps, la probabilité pour qu'un niveau d'accélération sismique  $y$  soit dépassé pendant une période de temps  $t$  au site de construction sera donnée par les équations suivantes :

Si  $y \geq y_0$

$$P(Y \geq y, t) = \begin{cases} 1 - \text{Exp} \left( -K_m \bar{v} t C y^{-\beta/b_2} G_s \right) \text{Exp} \left( K_m \bar{v} t e^{-\beta (m_u - m_0)} S \right) & \text{pour } r_y > r_0 \\ 0 & \text{pour } r_y \leq r_0 \end{cases} \quad (4-22)$$

Si  $y < y_0$

$$P(Y \geq y, t) = 1$$

Dans l'équation (4-22), les paramètres  $S$ ,  $G_s$ ,  $C$ ,  $r_y$ ,  $K_m$  et  $y_0$  sont donnés par les relations suivantes:

$$G_s = \vartheta \int_{r_0}^{\text{Min}(r_y, r_1)} \frac{r}{r + b_4}^{-\gamma} dr \quad ; \quad S = \vartheta \frac{[\text{Min}(r_y, r_1)]^2 - r_0^2}{2}$$

$$C = b_1^{\beta/b_2} \text{Exp}(\beta m_0) \quad ; \quad K_m = \left[ 1 - \text{Exp}[-\beta(m_u - m_0)] \right]^{-1}$$

$$r_y = \left( \frac{y}{b_1} \right)^{-\frac{1}{b_3}} \text{Exp}\left( \frac{b_2}{b_1} m_u \right) - b_4 \quad ; \quad y_0 = b_1 (r + b_4)^{-b_3} \text{Exp}(b_2 m_0)$$

Dans le cas où la distribution des magnitudes est illimitée l'équation (4-22) devient :

$$P(Y \geq y, t) = \begin{cases} 1 - \text{Exp}\left[-\bar{v} t C y^{-\beta/b_2} G_s\right] & \text{Si } y \geq y_0 \\ 1 & \text{Si } y < y_0 \end{cases} \quad (4-23)$$

On en déduit la probabilité annuelle de dépassement :

$$P(Y \geq y) = \begin{cases} 1 - \text{Exp}\left[-\bar{v} C y^{-\beta/b_2} G_s\right] & \text{Si } y \geq y_0 \\ 1 & \text{Si } y < y_0 \end{cases} \quad (4-24)$$

#### IV.2.3.1 - Evaluation du facteur géométrique

L'évaluation des probabilités de dépassement (Equations 4-22, 4-23 et 4-24) nécessite la détermination préalable du

facteur géométrique  $G_s$  donné par la relation suivante :

$$G_s = \vartheta \int_{r_0}^{r_m = \text{Min}(r_y, r_1)} r(r + b_4)^{-\gamma} dr$$

On peut démontrer aisément et après intégration par partie que le facteur géométrique  $G_s$  s'écrit comme suit :

$$G_s = \vartheta \frac{(r_0 + b_4)^{1-\gamma} [(1-\gamma)r_m - b_4]}{(1-\gamma)(2-\gamma)} \left[ \left( \frac{r_m + b_4}{r_0 + b_4} \right)^{1-\gamma} - \frac{(1-\gamma)r_0 - b_4}{(1-\gamma)r_m - b_4} \right]$$

( 4-25 )

Dans le cas où le coefficient d'atténuation  $b_4$  est nul , la relation précédente se réduit à :

$$G_s = \frac{\vartheta}{(\gamma-2)r_0^{\gamma-2}} \left[ 1 - \left( \frac{r_0}{r_m} \right)^{\gamma-2} \right] \quad ( 4-26 )$$

L'équation ( 4-22 ) peut être utilisée pour évaluer le potentiel de risque sismique associé à des sources distribuées dans une région aux contours présentant une forme quelconque. A cette effet, il est souvent plus commode de déterminer la région par un ou plusieurs secteurs d'anneaux .

En effet, la fonction de distribution de la variable aléatoire "y" pour toute la région peut être déterminée par

combinaison des résultats obtenus de chacune des "n" sources supposées indépendantes .Il s'ensuit que:

$$F_Y (Y) = \prod_{j=1}^{j=n} F_{j, Y} (Y)$$

avec  $F_j$  désignant la probabilité de non dépassement de  $y$  associée à la source surfacique  $j$ .

$$F_Y (Y) = \prod_{j=1}^{j=n} \left\{ \text{Exp} \left( K_m t c y^{-\beta/b^2} G_{s_j} \bar{v}_j \right) \cdot \text{Exp} \left( K_m t e^{-\beta(m_u - m_0)} \bar{v}_j \varphi_j \frac{[\text{Min} (r_y, r_{1j})]^2 - r_{0j}^2}{2} \right) \right\}$$

Soit encore :

$$F_Y (Y) = \text{Exp} \left( K_m t c y^{-\beta/b^2} \sum_{j=1}^{j=n} G_{s_j} \bar{v}_j \right) \text{Exp} \left( K_m t e^{-\beta(m_u - m_0)} \sum_{j=1}^{j=n} \bar{v}_j S_j \right)$$

( 4-27 )

Avec :

$$G_{s_j} = \varphi_j \int_{r_{0j}}^{\text{Min} (r_y, r_{1j})} r (r + b^2)^{-\gamma} dr \quad ; \quad S_j = \varphi_j \frac{[\text{Min} (r_y, r_{1j})]^2 - r_{0j}^2}{2}$$

où  $\bar{v}_j$  représente le taux moyen d'apparition par unités de temps et de surface, de séismes correspondant à la source surfacique  $j$  de caractéristiques géométriques,  $\varphi_j$ ,  $S_j$  et  $G_{s_j}$ .

En conclusion, la probabilité pour qu'au moins un événement sismique appartenant à un ensemble de sources surfaciques associée à un niveau d'accélération  $y$  (en un site donné, pendant une période de temps  $t$ ), soit dépassé sera donné par :

$$F_y ( y , t ) = 1 - F_y ( y , t ) \quad ( 4-23 )$$

IV.2.4 - Intégration des effets des différents types de sources sismiques :

En général, la charge probabiliste associée à un niveau de probabilité donné au site de construction, sous l'effet de l'ensemble des trois types étudiés de sources sismiques peut être déterminée à partir de l'équation suivante :

$$P(Y > y, t) = 1 - \left\{ \begin{aligned} & \text{Exp} \left( -K_m t c y^{-\beta/b_2} \sum_{i=1}^{N_p} v_i G_{p_i} \right) \text{Exp} \left( K_m t e^{-\beta(m_u - m_0)} \sum_{i=1}^{N_p} v_i \right) \\ & \text{Exp} \left( K_m t e^{-\beta(m_u - m_0)} \sum_{i=1}^{N_1} v_{.i} L_i \right) \text{Exp} \left( -K_m t c y^{-\beta/b_2} \sum_{i=1}^{N_1} v_{.i} G_{l_i} \right) \\ & \text{Exp} \left( K_m t c y^{-\beta/b_2} \sum_{i=1}^{N_s} G_{s_i} \bar{v}_i \right) \text{Exp} \left( K_m t e^{-\beta(m_u - m_0)} \sum_{i=1}^{N_s} \bar{v}_i K_i \right) \end{aligned} \right\}$$

Soit finalement pour  $y > y_0$  :

$$P(Y > y, t) = 1 - \left\{ \text{Exp} \left[ -K_m t c y^{-\beta/b_2} \left[ \sum_{i=1}^{N_p} v_i G_{p_i} + \sum_{i=1}^{N_l} v_{.i} G_{l_i} + \sum_{i=1}^{N_s} G_{s_i} \bar{v}_i \right] \right] \right. \\ \left. \text{Exp} \left[ K_m t e^{-\beta(m_u - m_0)} \left[ \sum_{i=1}^{N_p} v_i + \sum_{i=1}^{N_l} v_{.i} L_i + \sum_{i=1}^{N_s} \bar{v}_i S_i \right] \right] \right\}$$

( 4-29 )

Avec :

$$c = b_1^{\beta/b_2} \text{Exp}(\beta m_0) \quad ; \quad K_m = \left[ 1 - \text{Exp}[-\beta(m_u - m_0)] \right]^{-1}$$

$$G_{p_i} = \begin{cases} 0 & \text{Si } r_i > r_y \\ (r_i + b_4)^{-\gamma} & \text{Si } r_i \leq r_y \end{cases}$$

$$G_{s_i} = \begin{cases} \varphi_i \int_{r_{0i}}^{\text{Min}(r_y, r_{1i})} r(r + b_4)^{-\gamma} dr & \text{Si } r_y \geq r_{0i} \\ 0 & \text{Si } r_y < r_{0i} \end{cases}$$

$$S_i = \begin{cases} \varphi_i \frac{[\text{Min}(r_y, r_{1i})]^2 - r_{0i}^2}{2} & \text{Si } r_y \geq r_{0i} \\ 0 & \text{Si } r_y < r_{0i} \end{cases}$$

$$G_{11} = \begin{cases} \int_{r_{.1}}^{\text{Min}(r_{11}, r_y)} \frac{r (r+b_4)^{-\gamma}}{(r^2 - r_{.1}^2)^{0.5}} dr & \text{Si } r_y \geq r_{.1} \\ 0 & \text{Si } r_y < r_{.1} \end{cases}$$

$$L_1 = \begin{cases} \left[ [\text{Min}(r_y, r_{11})]^2 - r_{.1}^2 \right]^{0.5} & \text{Si } r_y \geq r_{.1} \\ 0 & \text{Si } r_y < r_{.1} \end{cases}$$

$$r_y = \left( \frac{y}{b_1} \right)^{\frac{1}{b_3}} \text{Exp} \left( \frac{b_2}{b_1} m_u \right) - b_4 ; \quad y_0 = b_1 (r + b_4)^{-b_3} \text{Exp}(b_2 m_0)$$

Dans le cas où le coefficient d'atténuation  $b_4 = 0$  :

$$G_{p_1} = \begin{cases} 0 & \text{Si } r_1 > r_y \\ r_1^{-\gamma} & \text{Si } r_1 \leq r_y \end{cases}$$

$$G_{11} = \frac{1}{2} r_{.1}^{1-\gamma} \beta_u \left( \frac{1}{2}, \frac{\gamma-1}{2} \right)$$

avec  $\beta_u(p, q)$  : Fonction Eulerienne incomplète.

$$G_{s_1} = \begin{cases} \beta_1 \int_{r_{01}}^{\text{Min}(r_y, r_{11})} r^{-\gamma+1} dr & \text{Si } r_y \geq r_{01} \\ 0 & \text{Si } r_y < r_{01} \end{cases}$$

#### IV.2.5 - Exemple illustratif

Afin d'illustrer l'application des développements analytiques obtenus dans les paragraphes précédents, considérons le site indiqué sur la figure 5a, dont les sources sismiques sont modélisées sur une carte de la région en se basant sur les données de la sismicité de la région notamment les épicentres enregistrés.

Trois groupes de sources sont identifiées :

- Cinq sources surfaciques caractérisées par un taux d'occurrence moyen par unités de surface et de temps  $\bar{\nu} = 10^{-6}/\text{Km}^2/\text{an}$  .

- Une source ponctuelle ( $30 \times 30 \text{ Km}^2$ ) située à 200 Kms du sud-est du site caractérisée par un taux d'occurrence moyen  $\nu = 10^{-4} \times 30^2 = 0.09/\text{an}$ .

- Deux failles actives localisées au nord-ouest du site ont été identifiées . L'examen de leurs activités sismiques suggère un taux d'occurrence moyen unique  $\nu = 10^{-4}/\text{Km}/\text{an}$  .

Les paramètres sismiques pour les différentes sources sont les suivants :

$$\beta = 1.6 ; m_0 = 4 ; h = 28.3 \text{ Km}$$

$$b_1 = 2000 ; b_2 = 0.8 ; b_3 = 2 ; b_4 = 0 ; C = 2.4 \cdot 10^9$$

Les résultats de l'analyse numérique des différentes sources obtenus après application du programme développé "RISK" dans le cadre de ce travail sont reportés directement sur la figure 5b.

Nous observons que pour les niveaux faibles d'accéléérations sismiques les sources surfaciques  $S_1$  et  $S_2$  contribuent substantiellement à la valeur du risque sismique total au site de construction. Il est bon de rappeler que cette conclusion est difficilement observable sur la figure 5b en raison de la contraction induite par l'effet d'échelle logarithmique.

Pour des niveaux d'intensités supérieurs à 0.45g, il est remarquable que le risque sismique total est en fait pratiquement induit par la source surfacique  $S_1$ . Ainsi, la probabilité annuelle associée à la source  $S_1$  correspondante à une pointe d'accélération sismique de 0.5g est égale à  $2.10^{-5}$ . Cette valeur est exactement égale ( $2.10^{-5}$ ) au risque total associé au même niveau d'accélération (0.5g).

Ceci signifie, entre autres que les deux failles linéaires et la source ponctuelle ont un effet négligeable sur l'évaluation du risque sismique total pour des niveaux d'intensités sismiques élevés.

Pour des niveaux moyens d'accéléérations sismiques de l'ordre de 0.22g on constate que la probabilité annuelle totale est

égale à  $2.10^{-6}$ . Soit approximativement le double du risque sismique induit par la source  $S_1$  ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ).

#### IV.3 -MODELE DE RUPTURE DE FAILLE

Le modèle de rupture de faille est fondé sur l'hypothèse selon laquelle l'énergie est libérée le long d'une zone de rupture de faille dans l'écorce terrestre et que l'intensité du mouvement de site est principalement influencée par la longueur de glissement de la faille ( Fig.6 ).

Le modèle de rupture de faille a été introduit pour la première fois par Ang (1974) [21], et a fait l'objet de développements ultérieurs successifs par Der Kiureghian et Ang (1975) [22], et Douglas et Ryall (1977) [23]. Dans ces travaux, l'intensité au site est fonction de la magnitude et la plus courte distance au glissement.

Krinitzsky (1974) et Housner ont proposé une relation permettant d'évaluer la longueur de la zone de rupture  $S$  en fonction de la magnitude  $m$  :

$$S = \text{Exp}( a m - b ) \quad ( 4-30 )$$

Il est à noter que pour des séismes importants, la longueur de glissement est généralement de l'ordre de plusieurs kilomètres

ce qui indique clairement l'importance et la nécessité de sa prise en considération dans l'évaluation ou l'analyse du risque sismique .

Les résultats obtenus à l'aide des modèles décrits précédemment sont critiquement examinés. En particulier, on indique que le modèle de sources ponctuelles peut sous estimer de façon significative le risque sismique réel dans une région donnée, notamment lors de mouvements de fortes intensités. Par ailleurs, il est possible de montrer aisément que les iso-accélérations développées par ce modèle ne sont pas circulaires . Cette conclusion peut être corroborée par les isosismiques ordinairement développés lors de l'analyse de la sismicité historique [22].

#### IV.3.1 - Formulation du modèle

On rappelle que la fonction de distribution de probabilité des magnitudes  $F_M(m)$ , s'écrit :

$$F_M(m) = K_m \left[ 1 - \text{Exp} \left[ - \beta ( m - m_0 ) \right] \right] \quad \text{Si } m_0 \leq m \leq m_u$$

La densité de probabilité,  $f_M(m)$  correspondante sera donc :

$$f_M(m) = \begin{cases} K_m \beta \text{Exp} \left[ - \beta ( m - m_0 ) \right] & \text{Si } m_0 \leq m \leq m_u \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad ( 4-31 )$$

Supposons par ailleurs qu'il y ait "n" sources sismique dans la région du site et soit  $\nu_i$  le taux d'occurrence moyen des séismes ( de magnitude  $m$  supérieure ou égale à  $m_0$ ) associé à la source  $i$ . Le taux moyen  $\nu$  de réalisation des événements sismiques susceptibles de se produire pour toute la région sera donc :

$$\nu = \sum_{i=1}^{i=n} \nu_i \quad ( 4-32 )$$

Si un séisme de magnitude  $m \geq m_0$  avait lieu dans la région , la probabilité pour que l'intensité  $Y$  en un site donné excède la valeur  $y$ , serait donnée par la relation :

$$P( Y > y ) = \sum_{i=1}^{i=n} P( Y > y / E_i ) \cdot P( E_i )$$

où  $P(E_i)$  désigne la probabilité d'un événement sismique  $E_i$  se produisant au niveau de la source  $i$  .

mais :

$$P( E_i ) = \frac{\nu_i}{\nu}$$

Ce qui permet d'écrire :

$$P( Y > y ) = \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^{i=n} P( Y > y / E_i ) \nu_i$$

En admettant que l'occurrence future des séismes suit le processus de Poisson avec un taux d'occurrence moyen  $\nu$ , alors la

probabilité d'avoir au temps  $t$ , au moins une fois une intensité au site  $Y$  dépassant  $y$ , sera :

$$P( Y > y , t ) = 1 - \text{Exp} \left( - \sum_{i=1}^{i=n} P( Y > y / E_i ) \nu_i t \right) \quad ( 4-33 )$$

La période de retour correspondante  $T_y$  en années est :

$$T_y = \frac{1}{1 - \text{Exp} \left( - \sum_{i=1}^{i=n} P( Y > y / E_i ) \nu_i \right)} \quad ( 4-34 )$$

La détermination de la probabilité conditionnelle  $P(Y > y / E_i)$  constitue une tâche essentielle dans l'évaluation des expressions données par les équations (4-33) et (4-34).

Par ailleurs, d'après le théorème de probabilité totale, on peut écrire :

$$P( Y > y / E_i ) = \int_{m_0}^{m_u} P( Y > y / E_{i,m} ) f_y(m) dm \quad ( 4-35 )$$

Dans cette relation,  $E_{i,m}$  représente l'occurrence d'un séisme de magnitude  $m$  associé à la source  $i$ .

Considérons maintenant une faille de longueur  $l$  et de profondeur  $h$ , localisée entièrement d'un seul coté du site, par exemple telle qu'indiquée par la figure 6.

Soient :

$r_0$  : la plus proche distance du site à la faille .

$r$  : la plus courte distance du site au glissement .

$S$  : la longueur de rupture de faille.

La localisation du foyer est aléatoire et est définie par sa distance  $x$ , le long de la faille . Pour une magnitude  $m$  , on admettra que la rupture se propagera d'une distance égale à la moitié de  $S$  de chaque côté du foyer .

D'après l'équation d'atténuation , on peut écrire :

$$r = \left( \frac{Y}{b_1} \right)^{\frac{1}{b_3}} \text{Exp} \left( \frac{b_2}{b_3} m \right) - b_4 \quad ( 4-36 )$$

Il importe de noter que cette équation implique entre autres, qu'un site situé à une distance inférieure à  $r$  , aura une intensité supérieure ou égale à  $y$  ( pour une magnitude sismique donnée  $m$  ).

En utilisant l'équation (4-30) et (4-36), La valeur de  $x$  est:

$$x = \left[ \left( \left[ \frac{Y}{b_1} \right]^{\frac{1}{b_3}} \text{Exp} \left[ \frac{b_2}{b_3} m \right] - b_4 \right)^2 - r_0^2 \right]^{0.5} + \frac{1}{2} \text{Exp}(a m - b)$$

( 4-37 )

La probabilité conditionnelle intervenant dans l'équation (4-35), peut être obtenue comme suit :

$$P( Y > y / E_{1,m} ) = \begin{cases} 0 & \text{Si } r < r_0 \\ \frac{x}{I} & \text{Si } x < 1 \\ 1 & \text{Si } x \geq 1 \end{cases}$$

L'équation (4-35) devient alors :

$$\begin{aligned} P( Y > y / E_1 ) &= \int_{m_1}^{m_2} \frac{x}{I} f_M(m) dm + \int_{m_2}^{m_0} f_M(m) dm \\ &= \int_{m_1}^{m_2} \frac{x}{I} f_M(m) dm + 1 - F_M(m_2) \end{aligned}$$

Soit finalement :

$$P(Y > y / E_1) = \int_{m_1}^{m_2} \frac{x}{I} f_M(m) dm + 1 - K_n \left[ 1 - \text{Exp} \left[ -\beta (m_2 - m_0) \right] \right] \quad (4-38)$$

La magnitude  $m_1$ , dans cette équation doit satisfaire la relation suivante :

$$m_1 = \text{Max} \left\{ m_0, \frac{1}{b_2} \text{Ln} \left[ \frac{Y}{b_1} (r_0 + b_4)^{b_3} \right] \right\} \quad (4-39)$$

La magnitude  $m_2$  correspond à la condition extrême pour laquelle  $x=1$  et peut être obtenue à partir de l'équation non linéaire suivante :

$$\left\{ \left( \left[ \frac{Y}{b_1} \right]^{-\frac{1}{b_3}} \text{Exp} \left[ \frac{b_2}{b_1} m_2 \right] - b_4 \right)^2 - r_0^2 \right\}^{0.5} + \frac{1}{2} \text{Exp}(a m_2 - b) = 1 \quad (4-40)$$

Dans le cas où  $m_2 > m_u$ , l'équation (4-38) devient :

$$P(Y > y / E_1) = \int_{m_1}^{m_u} \frac{x}{l} f_X(m) dm$$

Pour des niveaux d'intensité très élevés, le séisme correspondant peut causer la rupture totale de la faille.

L'équation (4-38) devient donc :

$$P(Y > y / E_1) = \begin{cases} 1 - F_Y(m_1) & \text{Si } m_1 < m_u \\ 0 & \text{Si } m_1 \geq m_u \end{cases}$$

Il convient de remarquer que le développement analytique précédent correspond au cas d'une faille située entièrement d'un côté du site. Dans le cas échéant, la solution décrite plus haut peut être appliquée également (moyennant quelques modifications) pour des sites localisés différemment en utilisant les notations des figures 7a et 7b.

$$\begin{cases} P(Y > y / E_{AC}) = \frac{l_1}{l} P(Y > y / E_{AB}) + \frac{l_2}{l} P(Y > y / E_{BC}) \\ P(Y > y / E_{DE}) = \frac{l_1}{l} P(Y > y / E_{EF}) - \frac{l_2}{l} P(Y > y / E_{DF}) \end{cases} \quad (4-41)$$

où  $E_{AC}, E_{AB}, E_{BC}, E_{DE}, E_{EF}, E_{DF}$  représentent les événements sismiques se produisant respectivement au niveau des sources AC, AB, BC, DE, EF et DF.

De façon générale les résultats de l'évaluation du risque sismique pour une période de temps  $t$ , obtenus par le modèle de

rupture de faille peuvent être résumés comme suit :

$$P(Y > y, t) = 1 - \text{Exp} \left[ - \sum_{i=1}^{i=n} P(Y > y / E_i) v_i t \right] \quad (4-42)$$

où

$$P(Y > y / E_i) = \begin{cases} \int_{m_1}^{m_2} \frac{x}{I} f_K(m) dm + 1 - K_m \left[ 1 - \text{Exp}[-\beta(m_2 - m_0)] \right] & (1) \\ \int_{m_1}^{m_u} \frac{x}{I} f_K(m) dm & (2) \\ 1 - F_K(m_1) = 1 - K_m \left[ 1 - \text{Exp}[-\beta(m_1 - m_0)] \right] & (3) \\ 0 & (4) \end{cases} \quad (4-43)$$

Les relations (1), (2), (3) et (4) de l'équation (4-43) étant applicables respectivement sous les conditions suivantes:

Relation (1) : Si  $m_1 < m_2 < m_u$  et  $m_1 < [\ln(2I) + b]/a$

Relation (2) : Si  $m_2 > m_u$

Relation (3) : Si  $m_1 < m_u$  et  $m_1 \geq [\ln(2I) + b]/a$

Relation (4) : Si  $m_1 > m_u$

Pour la détermination des magnitudes  $m_1$  et  $m_2$  ainsi qu'à la distance  $x$ , on pourra se référer aux équations (4-39), (4-40) et (4-37) respectivement.

IV.3.2 - Illustration numérique

Afin d'illustrer l'application numérique du modèle proposé, nous considérons l'étude de cas de la faille San Andreas située dans la cote ouest des Etats Unis.

La longueur de rupture de la faille pour un séisme de magnitude  $m$  est donnée par la relation :

$$S = \text{Exp}( 0.84 m - 1.08 )$$

Cette relation a été obtenue par régression linéaire de l'ensemble des données relatives à la faille de San Andreas ( Krinitzsky 1974 ). L'équation d'atténuation utilisée est celle obtenue par Donovan (1973) [24]:

$$y = 1350 ( r+25 )^{-1.52} \text{Exp}( 0.58 m )$$

Les paramètres de position du site par rapport à la faille considérée sont indiqués sur la figure 8. Les différents paramètres statistiques sont présentés dans le tableau ci-dessous (et rappelés pour des raisons de clarté dans la figure 9 ).

Courbe	$\beta$	$m_0$	$\nu$
1	1.22	4.0	1.57
2	1.22	4.5	0.88
3	1.30	4.0	1.57
4	1.39	4.0	2.35

Les résultats de l'analyse du risque sismique sont présentés sous forme de probabilité annuelle de dépassement d'accélération du sol ( courbes 1 à 4 en trait continu de la figur 9 )

On peut observer que pour le site considéré, les résultats obtenus à partir des différentes valeurs des paramètres statistiques sont raisonnablement serrés indiquant que le risque estimé par le modèle de rupture de faille n'est pas très sensible aux incertitudes fondamentales relatives aux courbes de récurrences sismiques .

La courbe 5 ( en trait pointillé ) reproduit pour toutes fins jugées utiles les résultats d'analyse du risque sismique au site considéré en utilisant le modèle de sources ponctuelles réparties sur une faille linéaire .On peut clairement observer que ce modèle sous-estime considérablement le risque sismique notamment pour les niveaux d'intensités sismiques élevés . Cette observation est également confortée par les résultats obtenus en termes de périodes de retour. Ainsi à titre indicatif, pour un niveau d'accélération sismique de  $0.4g$ , le modèle de sources ponctuelles prédit une période de retour de 590 ans , tandis que le modèle de rupture de faille permet de prédire une période de retour de 140 ans seulement ( Soit une période de retour pratiquement inférieure au quart de celle déduite du modèle de source ponctuelle ).

## IV.4 - COMPARAISON DES MODELES DE FAILLES LINEAIRES

Le modèle de source ponctuelle , décrit dans ce chapitre néglige la possibilité que durant un séisme majeur, la zone de rupture puisse se propager jusqu'à des distances très proches du site et suppose que l'énergie totale libérée lors d'un séisme est émise à partir d'un point. Le modèle de rupture de faille développé dans ce chapitre permet de mieux appréhender ces hypothèses.

Aux fins de visualiser l'incidence des effets induits par ces hypothèses et d'illustrer l'applicabilité des deux modèles du risque sismiques , considérons deux sites - site (a) et site (b) - situés à des distances différentes d'une faille linéaire donnée . Les paramètres de position de ces deux sites sont indiqués sur les figures 10a et 10b respectivement .

Le risque sismique associé à chaque site est évalué en employant successivement le modèle de sources ponctuelles et le modèle de rupture de faille . Les paramètres sismiques suivants sont retenus :

$$\beta = 2.0 ; \nu = 1 \text{ séisme par an} ; m_0 = 4$$

$$b_1 = 2000 ; b_2 = 0.8 ; b_3 = 1.75$$

Les résultats de l'analyse sont reportés graphiquement sur les figures 10a et 10b .On observe clairement que les probabilités de dépassement des niveaux d'accélération sismiques au site, calculées en utilisant le modèle de sources ponctuelles sont constamment inférieures à celles déterminées en employant le modèle de rupture de faille, notamment pour les séismes caractérisés par des magnitudes élevées .Une conséquence immédiate de cette conclusion est que les périodes de retour correspondantes, évaluées à partir du modèle de sources ponctuelles seront plus grandes que celles déduites via le modèle de rupture de faille.

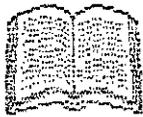
A titre d'exemple , nous observons que pour le site (a) ( Fig.10a ) le modèle de sources ponctuelles prédit une période de retour de 3700 ans pour un niveau d'accélération sismiques égal à  $300 \text{ cm/s}^2$ , alors que le modèle de rupture de faille prévoit pour le même niveau d'accélération une période de retour égale à 1000 ans.

Pour le site (b), l'analyse des résultats obtenus montre que les périodes de retour correspondantes sont respectivement égales à 290 et 120 ans.

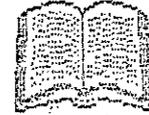
Il convient de noter également que l'écart entre les résultats est très appréciable pour les accélérations de fortes intensités. Tel n'est pas le cas pour les faibles niveaux d'accélération, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que

les mouvements sismiques générés au site doivent être dus soit à des séismes de faible intensité et par suite de faible longueur de glissement, soit à des séismes de magnitude élevée dont les foyers se situeraient à des distances éloignées du site de construction.

Dans les deux cas , l'effet de la longueur de glissement n'est pas significatif et tout se passe comme si l'énergie sismique était libérée à partir d'une source ponctuelle.



# Chapitre Cinquieme



## INFLUENCE DES PARAMETRES SIGNIFICATIFS SUR LE RISQUE SISMIQUE

### V.1 - INTRODUCTION

L'évaluation du risque sismique nécessite une évaluation d'un certain nombre de paramètres physiques ( tels que la relation intensité- distance ) et de paramètres statistiques ( tels que le taux d'occurrence moyen des événements sismiques aux alentours du site ) fondée sur la synthèse de l'ensemble des informations séismo-historiques relatifs à la région considérée.

L'incidence de ces facteurs physiques et séismo-statistiques sur l'évaluation du risque sismique constitue le but essentiel de ce chapitre. Une étude paramétrique est effectuée systématiquement pour chaque facteur et les résultats finaux sont présentés sous forme graphique en vue d'une appréciation globale des effets des paramètres les plus significatifs .

Les figures 11 à 16 relatives aux divers modèles du risque sismiques étudiés sont établies sur la base des valeurs présentés dans le tableau ci-dessous. Evidemment, seul le paramètre d'influence étudié variera en fonction du cas considéré.

CHAPITRE 5 : INFLUENCE DES PARAMETRES SIGNIFICATIFS SUR LE RISQUE

Paramètre	S.P	S.S	S.L (M.S.P)	S.L (M.R.F)
$\nu$ (/année)	1	1	1	1
$\beta$	2.0	2.0	2.0	2.0
$b_1$	2000	2000	2000	2000
$b_2$	0.8	0.8	0.8	0.8
$b_3$	2	2	2	2
$b_4$	0	0	0	0
$m_o$	4	4	4	4
$m_u$	9	9	9	9
$h$ (Km)	10	10	10	10
$l$ (Km)	-	-	100	100
$d$ (Km)	50	-	30	30
$x_o$ (Km)	-	0	-	-
$x_1$ (Km)	-	300	-	-
$\theta$ (rad)	-	4.5	-	-
$a$	-	-	-	1.15
$b$	-	-	-	3.35

Dans ce tableau, S.P, S.S, S.L, M.S.P et M.R.F représentent respectivement les abréviations source ponctuelle, source surfacique, source linéaire, modèle de sources ponctuelles et modèle de rupture de faille.

Il est important de noter que les valeurs numériques citées dans les paragraphes suivants correspondent au modèle de rupture de faille . Des conclusions similaires peuvent être formulées pour les modèles de sources ponctuelles, dont les résultats sont reportés sur les figures correspondantes à chaque paramètre d'influence considéré.

## V.2 - INFLUENCE DE LA DISTRIBUTION TRONQUEE DES MAGNITUDES

Bien que la magnitude du plus fort séisme capable de se produire dans une région donnée demeure une inconnue du problème, il y a des raisons séismo-historiques permettant de conclure que les magnitudes des séismes susceptibles de se produire dans la région admettent une borne supérieure  $m_u$ .

Cette supposition implique que cette limite définit une distance focale  $r_y$  au-delà de laquelle il devient pratiquement impossible pour un séisme de causer des mouvements de sol excédant le niveau d'intensité  $y$ . Cette constatation nous amène à éliminer de l'analyse, les sources ou portions de sources situées à l'extérieur de la zone d'influence délimitée par le rayon :

$$r_y = \left( \frac{y}{b_1} \right)^{-1/b_3} \text{Exp} \left( \frac{b_2 m_u}{b_3} \right) - b_4$$

de sorte que seules les portions de sources suffisamment proches du site contribuent effectivement à l'évaluation du risque sismique au site de construction. Ceci étant, il est non moins important de comprendre comment cette limite peut influencer sur l'estimation du risque sismique final.

Les figures 11a, 11b, 11c et 11d indiquent que cette influence est particulièrement significative pour les mouvements de tremblement de terre de magnitudes élevées ( et par suite de fortes intensités en général ). On peut clairement constater sur les figures que les résultats d'estimation du risque sismique ne varient pratiquement plus pour les séismes de magnitude maximale  $m_u$  supérieure ou égale à 9 . Pour les séismes de faibles magnitudes, on observe un résultat attendu ; à savoir que toutes les courbes se rapprochent les unes des autres.

### V.3 - INFLUENCE DE LA LONGUEUR DE FAILLE

La répartition des épicentres sismiques dans le monde montre qu'ils sont généralement localisés autour des systèmes de failles assez souvent bien identifiés notamment pour les régions de forte sismicité .

Il convient néanmoins de faire remarquer que si l'estimation de l'activité totale  $v$  ne pose généralement pas de problème majeur

la question la plus critique est incontestablement l'estimation des longueurs de failles relatives aux régions sismiques dans lesquelles les failles actives sont difficilement identifiables. C'est pourquoi, il est très utile de procéder à une étude paramétrique de l'effet de la longueur de faille, toute chose égale par ailleurs, sur l'estimation du risque sismique au site. Les figures 12a et 12b permettent une visualisation directe de cet effet. A titre indicatif, on peut observer que pour un niveau d'accélération sismique de l'ordre de  $200 \text{ cm/s}^2$ , une surestimation éventuelle de 250 % de la longueur de faille conduit à une variation de l'ordre de 70 % de la probabilité annuelle de dépassement du niveau d'accélération sismique choisi. Une surestimation de 130 % de la longueur de faille pour une augmentation du niveau des accélérations sismiques à  $800 \text{ cm/s}^2$ , conduirait à une sous-estimation du risque sismique de l'ordre de 35 %.

Ces résultats indiquent que les incertitudes dans l'estimation de la longueur de faille semblent présenter un effet peu prépondérant sur l'évaluation du risque sismique au site de construction.

#### V.4 - INFLUENCE DE LA PROFONDEUR FOCALE

L'analyse numérique du risque sismique par les modèles de sources ponctuelles et le modèle de rupture de faille, pour

différentes valeurs de la profondeur focale "h" ( Figs.13a, 13b, 13c. et 13d ) reflète l'effet significatif de cette grandeur sur le risque calculé, notamment pour les mouvements de fortes intensités .

Les résultats de risque obtenus pour les diverses valeurs du paramètre "h" sont substantiellement différents, indiquant que le risque estimé est sensible aux incertitudes fondamentales de la profondeur focale. A titre indicatif, pour une accélération de 0.8g, une surestimation éventuelle de 60 % de la profondeur focale, entraîne une sous-estimation de la probabilité annuelle de dépassement de 80 % .

#### V.5 - INFLUENCE DU COEFFICIENT DE MAGNITUDE " $\beta$ " :

La stabilité du paramètre  $\beta$  d'une région à une autre a fait l'objet d'une étude approfondie afin de mieux cerner son domaine de variation . Les effets de ce paramètre sur les courbes de récurrence de la loi de Gutenberg-Richter ont été étudiés par Isaks et Oliver [17] .

Différentes courbes sont tracées sur les figures 14a, 14b, 14c et 14d permettant d'apprécier directement la sensibilité du risque sismique aux variations du coefficient de magnitude  $\beta$ . Les résultats obtenus montrent que les valeurs du risque sismique sont inversement proportionnelles à celles de  $\beta$ . Ainsi

une augmentation du facteur  $\beta$  de 1.5 à 1.7 ( Soit 13% ) entraîne une diminution des probabilités annuelles correspondantes de 0.25 % à 0.11 % ( Soit une baisse de 60 % du risque ).

Ces résultats indiquent clairement que le paramètre  $\beta$  a un effet significatif sur l'estimation du risque au site notamment pour les niveaux d'accéléérations sismiques élevés .

#### V.6 - INFLUENCE DU PARAMETRE "b<sub>2</sub>"

La sensibilité du risque sismique au paramètre  $b_2$  est reportée graphiquement sur les figures 16b, 16a, 16c et 16d, en utilisant successivement le modèle de rupture de faille et les modèles de sources ponctuelles .

Les résultats indiquent que les incertitudes dans l'estimation du paramètre  $b_2$  semblent présenter un effet très significatif sur l'évaluation du risque sismique aux sites de construction. Il convient de noter également que l'écart entre les résultats est très appréciable pour les accélérations de fortes intensités.

A titre indicatif, nous observons ( Fig.16b ) que pour un niveau d'accélération de  $800 \text{ cm/s}^2$ , une surestimation de 20 % du paramètre  $b_2$  induira une erreur de 400 % ! sur la valeur du risque sismique calculé .

Enfin, il est à noter que le coefficient d'atténuation  $b_2$ , lié à la magnitude  $m$ , se présente dans la formulation du risque sismique sous forme d'un rapport  $b_2/\beta$  dont l'influence est présentée au paragraphe suivant.

#### V.7 - INFLUENCE DU COEFFICIENT DE MAGNITUDE " $b_2/\beta$ "

La présence exponentielle du rapport " $b_2/\beta$ " dans la formulation du risque, rend la probabilité annuelle de dépassement très sensible à la variation de ce paramètre. Les deux paramètres ont fait l'objet d'une étude approfondie, afin d'apprécier leurs variations d'une région à une autre [3]. Les résultats obtenus montrent que le rapport est compris entre les valeurs  $1/3$  et  $1/2$ .

Les figures 17a, 17b, 17c et 17d indiquent que :

- Le risque sismique évalué est proportionnel au rapport  $b_2/\beta$ .
- La sensibilité du risque est d'autant plus importante que les niveaux d'accélération sismiques sont plus élevés.

A titre indicatif, pour un niveau d'accélération de  $800 \text{ cm/s}^2$ , une surestimation éventuelle de 25% ( $1/2.5$  à  $1/2$ ) du rapport  $b_2/\beta$ , conduit à une surestimation de l'ordre de 950 % (!) ( $0.093\%$  à  $0.98\%$ ) de la probabilité annuelle de dépassement.

Ces résultats indiquent clairement que l'estimation correcte de ce rapport revêt une importance capitale pour l'évaluation du risque sismique aux sites de construction.

## V.2 - INFLUENCE DU PARAMETRE "b<sub>3</sub>"

Les incertitudes dans les valeurs des paramètres de la loi d'atténuation pour une région donnée induisent des effets prépondérants sur l'évaluation du risque sismique au site de construction .

Le paramètre "b<sub>3</sub>" en particulier est difficile à évaluer avec une grande précision en raison notamment de sa dépendance régionale . Les données instrumentales disponibles pour la région considérée et des estimations des distances focales . Le risque sismique en un site donné est évalué en utilisant successivement le modèle de rupture de faille et les modèles de sources ponctuelles pour différentes valeurs du paramètre d'atténuation "b<sub>3</sub>" ( Figs.15a, 15b, 15c et 15d ).

On peut observer que pour l'ensemble des cas considérés et modèles étudiés le risque sismique varie inversement par rapport au paramètre d'atténuation b<sub>3</sub>. Par ailleurs, il convient de noter également que la sensibilité du risque au paramètre "b<sub>3</sub>" est d'autant plus importante que les niveaux d'accéléérations sismiques sont plus élevés .

A titre indicatif les résultats montrent qu'une erreur de 20 % sur le paramètre d'atténuation "b<sub>3</sub>" induira une erreur de 90 % ( Soit près d'un ordre de grandeur ) sur la valeur du risque sismique calculé pour un niveau d'accélération sismique de l'ordre de 1.2g.



# Chapitre Sixieme



## PRESENTATION DU PROGRAMME :

### VI.1 - INTRODUCTION

Le problème général de l'analyse du risque sismique au niveau d'un site de construction donné constitue une tâche numérique relativement lourde, notamment si la configuration des sources sismiques localisées dans la région étudiée, est complexe .

L'analyse dynamique des structures d'intérêt stratégique, érigées en zones sismiques (ou en zones exposées à de fortes perturbations éoliennes) nécessite la définition des niveaux d'intensité au site de construction compatibles avec la durée de vie économique des aménagements considérés.

"RISK" est un programme en Fortran 77 développé sur micro OLIVETTI M290, d'utilisation souple, d'architecture relativement simple aux extensions possibles permettant d'accomplir précisément cet objectif. Plus spécifiquement le programme permet la détermination des pointes d'accélération susceptibles d'être générées au site de construction par suite des secousses sismiques et les probabilités de dépassements correspondantes pour une fenêtre de temps et un aménagement

donné. Différents modèles physiques et des configurations géométriques variables de sources sismiques dans la région étudiée sont pris en considération dans l'élaboration du programme .L'utilisation du programme est facilitée par un système d'entrée des données très souple. L'exploitation des résultats de sortie est aussi facilitée via création de fichiers directement utilisables par les logiciels graphiques.

La structure générale du programme principal et des sous-programmes correspondants est exposée avec suffisamment de détails dans le paragraphe suivant.

## VI.2 - STRUCTURE DU PROGRAMME PRINCIPAL ET DESCRIPTION DES PRINCIPAUX MODULES

L'architecture du programme " RISK " est organisée en 8 modules distincts :

Le programme principal " RISK " et 7 sous-programmes "RISK1", "RISK2", "RISK3", "RISK4", "REGRESS", "INTEG" et "RESOL".

### Programme principal " RISK "

Les étapes principales de ce programme peuvent être résumées comme suit :

## 1 - Menu principal et lecture des paramètres

- Lecture des paramètres sismiques communs aux divers modèles de sources sismiques :

- . les constantes d'atténuation .
- . la période de temps .

- Lecture des informations régionales :

- .  $N_p$  : nombre de sources ponctuelles .
- .  $N_l$  : nombre de sources linéaires .
- .  $N_s$  : nombre de sources surfaciques .
- .  $Probm$  : type du modèle utilisé pour les failles linéaire :

$Probm = 0$  : modèle de sources ponctuelles

$Probm = 1$  : modèle de rupture de faille

## 2 - Incrémentation des sources ponctuelles

. Pour chaque source ponctuelle procéder à :

2.1 - Appel du module RISK1 : Ce module permet l'évaluation du risque sismique associé aux sources ponctuelles . Le déroulement des principales séquences s'opère de la façon suivante :

2.1.1 - Lecture des paramètres sismiques et informations régionales.

- . Taux d'occurrence moyen des séismes .
- . Paramètre  $\beta$ .
- . Magnitudes extrémales .
- . Distances épacentrales.
- . Profondeurs focales.

2.1.2 - Appel du sous-programme SELECT aux fins de valider, corriger ou annuler les données d'entrée.

2.1.3 - Appel du sous-programme REGRESS afin de développer les lois de récurrences par ajustement des données sismiques à des modèles de régression linéaires :

- . Lecture des séismes historiques observés au niveau de la source  $i$ , et des magnitudes correspondantes
- . Développement des lois de récurrence par modèles de régression linéaire des données sismiques.
- . Evaluation pour chaque source des paramètres  $\nu$  et  $\beta$ .

2.1.4 - Incrémentation des accélérations sismiques

- . Pour chaque incrément d'accélération, évaluer :

2.14.1 - La zone d'influence correspondante.

2.14.2 - La probabilité annuelle de dépassement associée à la source ponctuelle  $i$ .

2.14.3 - La période de retour associée.

2.14.4 - Retour à 2.14 jusqu'à couverture complète de la plage des niveaux d'accélération considérés.

2.2 - Retour à 2.1 et Evaluation des probabilités de dépassement par intégration des effets de l'ensemble des  $N_p$  sources ponctuelles .

2.3 - Impression des résultats des effets cumulés de toutes les sources ponctuelles sur le fichier RISK1.DAT.

2.4 - Retour au programme principal pour contrôle sur le type de modèle physique utilisé pour l'évaluation du risque sismique associé aux sources linéaires .

3 - Si  $Prob_m = 0$  : Incrémentation des  $N_l$  sources linéaires .

. Pour chaque source linéaire, procéder à :

3.1 - Appel du module RISK2 :Ce module permet l'évaluation du risque sismique associé aux sources linéaires via modèle de sources ponctuelles.

3.1.1 - Lecture des paramètres sismiques et informations régionales.

- . Taux d'occurrence moyen des séismes
- . Paramètre  $\beta$
- . Magnitudes extrémales
- . Longueur de faille
- . Distances épacentrales
- . Profondeurs focales

Les opérations séquentielles relatives aux étapes 3.1.2 , 3.1.3, 3.1.4, 3.14.1, sont respectivement similaires à celles des étapes 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4 et 2.14.1.

. Pour chaque incrément d'accélération; procéder également à :

3.14.2 - Appel du sous-programme INTEG pour évaluer le facteur géométrique  $G_1$  . Dans le cas où  $b_1 = 0$ , déterminer la fonction Eulerienne  $\beta_u$

3.14.3 - Evaluation de la probabilité annuelle de dépassement associée à la source linéaire :

3.14.4 - Evaluation de la période de retour associée .

3.14.5 - Retour à 3.14 jusqu'à couverture complète de la plage des niveaux d'accéléérations considérés .

3.2 - Retour à 3.1 jusqu'à évaluation des probabilités de dépassement par intégration des effets de l'ensemble des  $N_1$  sources linéaires.

3.3 - Impression des résultats des effets cumulés de toutes les sources linéaires sur le fichier RISK2.DAT.

3.4 - Retour au programme principal pour incrémentation des sources surfaciques .

4 - Si  $Prob_m = 1$  : Incrémentation des  $N_1$  sources linéaires .

. Pour chaque source linéaire, procéder à :

4.1 - Appel du module RISK4 : Ce module permet l'évaluation du risque sismique associé aux sources linéaires via modèle de rupture de faille .

4.1.1 - Lecture des paramètres sismiques, des informations régionales et de la longueur de glissement .

Les opérations séquentielles relatives aux étapes 4.1.2 , 4.1.3, 4.1.4, 4.14.1, sont respectivement similaires à celles des étapes 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4 et 2.14.1.

. Pour chaque incrément d'accélération ; procéder également à :

4.14.2 - Appel du sous-programme RESOL pour évaluer  $m_2$  par résolution d'équation non linéaire.

4.14.3 - Appel du sous-programme INTEG pour le calcul des intégrales nécessaires au calcul de risque .

4.14.4 - Evaluation de la probabilité annuelle de dépassement associée à la source linéaire :

4.14.5 - Evaluation de la période de retour associée.

4.2 - Retour à 4.1 jusqu'à évaluation des probabilités de dépassement par intégration des effets de l'ensemble des  $N_1$  sources linéaires.

4.3 - Impression des résultats des effets cumulés de toutes les sources linéaires sur le fichier RISK4.DAT.

5 - Incrémentation des  $N_s$  sources surfaciques.

. Pour chaque source surfacique, procéder à :

5.1 - Appel du module RISK3 : Ce module permet l'évaluation du risque sismique associé aux sources surfaciques .

5.1.1 - Lecture des paramètres sismiques et informations régionales :

- . Paramètres  $\nu, \beta, m_0$  et  $m_u$
- . Profondeurs focales
- . Rayons épicaux internes
- . Rayons épicaux externes
- . Angles internes des secteurs

Les opérations séquentielles relatives aux étapes 5.1.2 , 5.1.3, 5.1.4, 5.14.1, sont respectivement similaires à celles des étapes 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4 et 2.14.1.

. Pour chaque incrément d'accélération ; procéder également à :

5.14.2 - Evaluation du facteur géométrique  $G_s$

5.14.3 - Evaluation de la probabilité annuelle de dépassement associée à la source surfacique  $s$ .

5.14.4 - Evaluation de la période de retour associée.

5.14.5 - Retour à 5.1.4 jusqu'à couverture complète de la plage des niveaux d'accélération considérés.

5.2 - Retour à 5.1 jusqu'à évaluation des probabilités de dépassement par intégration des effets de l'ensemble des  $N_s$  sources surfaciques.

5.3 - Impression des résultats des effets cumulés de toutes les sources surfaciques sur le fichier RISK3.DAT.

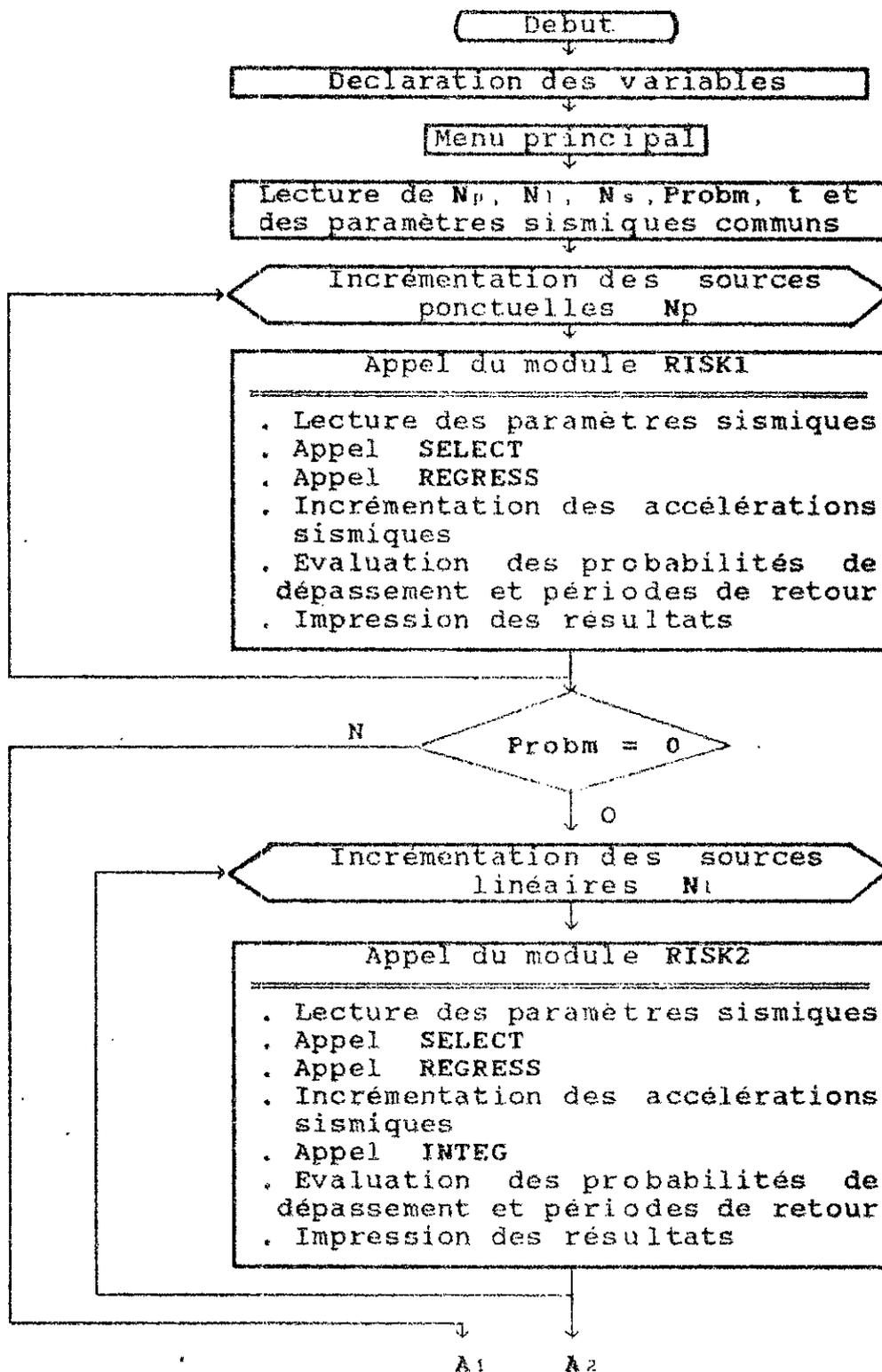
6 - Evaluation des périodes de retour et charges probabilistes maximales susceptibles d'être générées au site de construction au temps  $t$  sous les effets cumulés de l'ensemble des sources de la région, toutes natures physiques confondues.

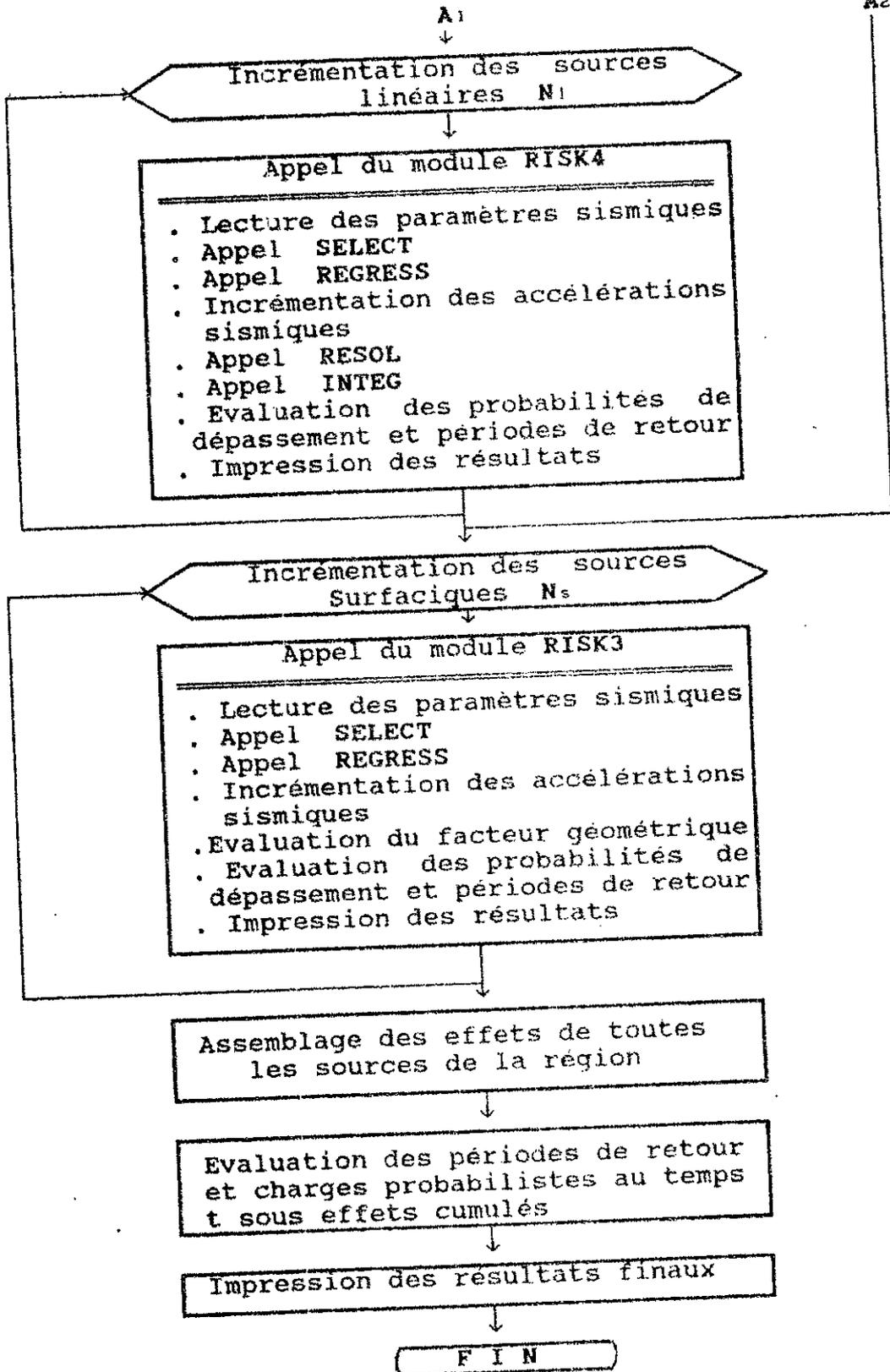
7 - Impression des résultats finaux sur le fichier principal de sortie RISK.DAT .

Les fichiers résultats ( RISK.DAT, RISK1.DAT, RISK2.DAT, RISK3.DAT, RISK4.DAT ) sont définis de telle façon qu'on puisse les exploiter directement par les logiciels graphiques (GRAPHER et ALGRAPH, notamment ) en vue de la présentation des courbes de risque.

Pour des raisons de clarté et afin d'illustrer les interactions et articulations des différents blocs fonctionnels, la figure suivante présente l'organigramme général .

( STRUCTURE DU PROGRAMME PRINCIPAL )  
( RISK )







# Chapitre Septieme



## ANALYSE DU RISQUE SISMIQUE DU BARRAGE "MEURAD"

### VII.1 - INTRODUCTION

En nous basant sur les données de la sismicité historique et l'étude du contexte tectonique de la région de Ain-Defla ( [8], [9], [10], [18] ) , nous présentons dans ce chapitre une étude de cas dont la méthodologie mise en oeuvre pourrait s'avérer d'une grande utilité pour les études futures de risque sismique aux sites de construction d'ouvrages d'importance stratégique. Dans ce cadre nous présentons l'analyse du risque sismique au site du barrage " MEURAD " situé dans la région de Ain-Defla, zone de forte sismicité .

Afin de définir les zones sismiques actives, et les relations de récurrence, un inventaire aussi complet des séismes observés dans un rayon d'environ 250 Km autour du site est effectué. Un travail considérable a été développé en matière d'estimation probabiliste des paramètres de charge sismique en prenant en considération tous les séismes observés autour du site pour la période 1900 à 1990.

La sensibilité du risque sismique a été étudiée en employant différentes lois d'atténuation permettant ainsi d'estimer sa zone de variation . L'analyse permet d'incorporer aussi bien les distributions illimitée que limitée des magnitudes.

Dans le cas où une distribution limitée des magnitudes est considérée, seuls les zones sismiques appartenant à la région d'influence doivent être utilisées pour l'évaluation du risque qu'un certain niveau d'accélération soit dépassé au site pour une période de temps donnée .

Les résultats de l'étude ( séisme de projet et séisme maximum probable notamment ) seront pris en considération dans l'analyse de stabilité du barrage et le dimensionnement des ouvrages annexes .

## VII.2 - CONTEXTE TECTONIQUE DE LA REGION

Le contexte tectonique de la région considérée a fait l'objet d'une étude approfondie dans le cadre de la microzonation sismique de la région du Chlef [10] et de la réalisation de projets importants initiés par le ministère de l'Hydraulique [18].

Selon les modèles géotectoniques modernes, le continent africain est en collision avec la plaque eurasienne le long d'une ligne qui s'étend de Gibraltar vers l'ouest, à travers le

nord de l'Algérie, la Sicile, la Grèce et le nord de la Turquie ( Fig.18 ). Le long du contact, la plaque eurasiennne est en train d'être charriée au-dessus de la plaque africaine. En Algérie la conséquence de ces mouvements est la formation des chaînes de l'Atlas, un complexe de structures en direction sud-ouest et nord-est, limitée au sud par la faille sud de l'Atlas. Immédiatement au nord de cette faille se trouve l'Atlas saharien qui est modérément plissé et faillé, suivi par les Hauts Plateaux. La structure de l'Atlas Tellien est par contre dominée par des plissements, des failles et des nappes complexes avec chevauchement vers le sud.

Selon Ritsema (1969) [25] les contraintes tectoniques dans le bassin occidental du méditerranéen sont à l'origine des mouvements en direction ouest-est dans l'Atlas septentrionale, en parallèle avec les structures tectoniques.

De l'autre côté, Mortgat et Shah (1978) [26] affirment que les mouvements le long des failles de l'Atlas sont surtout verticaux et que les foyers sismiques sont en général à une profondeur de moins de 70 Km.

L'Algérie est divisée géologiquement en six grandes zones tectoniques :

1 - Les massifs paléozoïques :

Formés de terrains métamorphiques, plissés pendant les orogénies calédoniennes et hercyniennes ( Sahel d'Alger, Grande Kabylie, massif d'Edough ...etc ) .Leur relief topographique a été rajeuni par les poussées tertiaires et quaternaires.

2 - Les chaînes littorales:

Le complexe orogénique des chaînes littorales est composé d'un nombre de faisceaux, constituant de vastes "anticlinoriums" : la chaîne Numidique, les Babors, les monts de Djurdjura, l'Atlas Mitidjien, le massif de Miliana, le Dahra, le Sahel d'Oran. Formé principalement pendant les orogénies pyrénéennes et alpines, cette zone se caractérise par des plis orientés est-ouest .

3 - Les montagnes du Tell intérieur

Cette zone comprend le Tell constantinois, les Bibans, le Titteri, l'Ouarsenis et les plis qui forment les monts du Hodna. Formés par les mouvements pyrénéens , les accidents orogéniques y sont de plus faibles amplitude que dans la chaîne littorale .

4 - Les Hauts Plateaux :

Les roches de base de cette suite de hautes plaines sont très anciennement plissées mais le Jurassique et le Crétacé ne sont guère affectés par des mouvements orogéniques. Cette zone présente une architecture tabulaire.

5 - L'Atlas saharien :

Une série de plis d'âge pyrénéen ( Monts de Nemamcha, Aurès, Monts d'Ouled-Nal, Djebel-Amour, Monts des Ksours ) a conservé les formes structurales primitives depuis l'oligocène. Des plissements datant de la phase alpine ont donné naissance aux dislocations de l'Aurès )

6 - Sahara :

Les plateaux et les basses plaines constituent la partie la plus importante du Sahara .Le centre du Sahara est caractérisé par des hautes montagnes formées de roches ignées " El Hoggar " entourées par des roches phanérozoïques..

VII.3 - HISTORIQUE SISMIQUE DE LA REGION

Bien que l'étude des séismes en Algérie ait débuté depuis plus d'un siècle ( Rothé.1950 ) [12], et qu'elle ait été intensivement stimulée ( [10], [19], [20] ) par le séisme du 10 Octobre 1980, beaucoup de points demeurent encore obscurs dont notamment la microzonation sismique de la capitale, l'identification des sources actives ainsi que les équations d'atténuation du nord de l'Algérie.

Des investigations futures et des interprétations photogéologiques demeurent nécessaires en vue d'une étude approfondie de l'environnement sismique de l'Algérie du Nord.

Le site du barrage " MEURAD " se trouve à 37 Km à l'Ouest de Blida et à 60 Km au Sud-ouest d'Alger, donc à la bordure sud de l'Atlas Mitidjien dans une zone de forte sismicité.

.Le séisme du 7 novembre 1959 a été ressenti à Boumedfâa ( 12 Km au sud du barrage )avec une intensité de VIII.

.Le séisme du 31 Octobre 1988 ressenti aussi à Boumedfâa a endommagé plusieurs habitations,des Ecoles , Centre de santé , plus de 500 familles sans abris et 3 blessés [2].

Une compilation de tous les événements sismiques historiques ( [8],[9],[10],[18] ) de magnitude dépassant 4.5 dans un rayon de 250 Km autour du site a été répertoriée pour la période 1900 - 1990 afin de préparer le catalogue de la sismicité historique de la région étudiée et par suite de procéder à la modélisation des sources sismiques actives .

Pour chaque événement les données du catalogue comprennent :

- Le temps : la date et l'heure à laquelle l'événement fut ressenti.
- La localisation : Latitude et Longitude .
- La Dimension : Magnitude ou intensité macrosismique .
- La Profondeur focale h .

Dans certains cas d'événements, en raison de l'absence de données instrumentales, seules l'intensité macrosismique , la profondeur où la magnitude sont connues. La détermination des magnitudes se fait alors, selon les méthodes suivantes ( V.KARNIK 1971 ) :

- 1 - Si l'intensité I n'est pas connue, la magnitude M est estimé par un nombre aléatoire dans l'intervalle 4 et 5.2.
- 2 - Si uniquement l'intensité I est connue .

$$M = 0.32 I + 2.45 \quad ( 7-1 )$$

- 3 - Si l'intensité I et la profondeur focale h sont connues :

$$M = 0.5 I + \log h + 0.35 \quad ( 7-2 )$$

Les magnitudes données dans le catalogue des séismes correspondent à celles des "ondes de surface". Le calcul de la magnitude des "ondes de corps"  $M_b$  se fera selon la relation suivante de Kondorskaya :

$$M_s = 2.119 M_b - 5.826 \quad ( 7-3 )$$

La figure 19 donne une récapitulation des séismes observés de 1900 à 1990 pour les zones sismiques , lesquelles sont décrites dans le paragraphe suivant .

VII.3.2 - Modélisation des sources sismiques actives :

L'évaluation de la probabilité des différents niveaux d'intensité des mouvements de sol au site, au cours d'un intervalle de temps nécessite une connaissance préalable de l'emplacement et de la géométrie des sources sismiques actives . La localisation des épicentres observés aux voisinage du site (  $r = 250 \text{ Km}$  ) indique un mode de répartition de sources de type surfaciques distribuées selon 3 zones ( Fig.19 ) :

ZONE 1 : Elle présente une activité sismique d'intensité moyenne ( à l'exception du séisme d'El Abadia de 1934 "M = 5.6" et celui de Boumedfâa de 1959 "M = 5.6" ) et comprend la région voisine du site dans un rayon de 80 Km autour du barrage .

ZONE 2 : C'est une zone d'activité sismique importante caractérisée par des séismes de forte intensité :

( 9 Sep 1954 Magnitude 6.8 , 1243 victimes ).

(10 Oct 1980 Magnitude 7.3 , 3500 victimes ).

Le rayon épical est compris entre 80 Km et 135 Km .

ZONE 3 : Cette zone présente une activité sismique moyenne à l'exception de l'événement sismique du ( 24 Juin 1910 ) de magnitude 6.4 et comprend la région située à l'est du site entre 80 Km et 220 Km .

Aucune zone linéaire n'a pu être définie, alors que les investigations géologiques effectuées en 1984 [10] dans la région du chlef (Zone 2 décrite ci-après) indiquent l'existence de plusieurs failles actives ( faille de Oued Fodda ), non actives et probablement actives ( failles d'Ouled Fares, Bled Bahri, Medjadja, Oued Ras, Montagnes rouges, Oued Allalah, Lakhdar et la zone faillée de mer ) (Fig.20). Ces considérations nous amènent à considérer la zone 2 comme étant une source surfacique formée par un groupe de failles s'entrecroisant dont la majorité est probablement active .

VII.3.3 - Relations de récurrence :

Les relations de récurrence ont été établies séparément pour chaque zone sismique par ajustement des données sismiques à des modèles de régression linéaire ( Fig.21,22 et 23 ). Seuls les événements significatifs de magnitude supérieure ou égale à 4.5 couvrant la période 1900 - 1990 ont été considérés . Les valeurs des paramètres  $a, b, \beta$  et  $\nu$  des 3 zones sismiques ainsi que les magnitudes limites  $m_0$  et  $m_u$  associées à chacune de ces 3 zones sont résumés dans le tableau suivant :

	a	b	$\beta$	$m_0$	$m_u$	$\nu$
Zone 1	6.635	1.158	2.667	4.5	7.0	0.27
Zone 2	4.106	0.588	1.354	4.5	7.5	0.30
Zone 3	4.407	0.700	1.612	4.5	7.0	0.19

VII.4 - LOIS D'ATTENUATION

Le choix de la loi d'atténuation la plus appropriée nécessite une connaissance des paramètres sismiques des mouvements violents de la région . Du fait de l'insuffisance de telles données , il nous manque par là un critère important pour le choix de la loi d'atténuation la plus appropriée .

Sept lois d'atténuation ont été employée en vue d'apprécier la sensibilité du risque vis à vis de ces lois .Elles sont exprimées sous les formes suivantes :

$$1 . y = 2.88 r^{-1.10} \text{ Exp}( 1.45 m ) \quad ( \text{ Ambrasseys 1978 } )$$

$$2 . y = 2000 r^{-2} \text{ Exp}( 0.8 m ) \quad ( \text{ Esteva et Rosenblueth 1964 } )$$

$$3 . y = 5600 ( r + 40 )^{-2} \text{ Exp}( 0.8 m ) \quad ( \text{ Esteva et Villaverde 1973 } )$$

$$4 . y = 1230 ( r + 25 )^{-2} \text{ Exp}( 0.8 m ) \quad ( \text{ Esteva 1969 } )$$

$$5 . y = 0.685 ( r + 25 )^{-0.228} \text{ Exp}( 1.03 m ) \quad ( \text{ Blume 1977 } )$$

$$6 . \log ( y ) = -1.02 + 0.249 m - \log r - 0.00255 r \quad ( \text{ Joyner et Boore 1981 } )$$

$$7 . y = 1350 ( r + 25 )^{-1.52} \text{ Exp}( 0.58 m ) \quad ( \text{ Donovan 1973 } )$$

Les figures 24 et 25 expriment la variation à la surface du sol de l'accélération maximale avec la distance focale pour des séismes de magnitudes respectivement égales à 5 et 7 sur l'échelle de Richter .

On observe clairement une dispersion importante de ces lois d'atténuation d'où la difficulté de choisir parmi ces lois la mieux adaptée pour la région considérée dans cette étude .

Les lois d'atténuation retenues ainsi que la définition des niveaux de chargement sismiques recommandés pour le séisme de projet et le séisme maximum probable seront examinés dans le chapitre suivant.

#### VII.5 - EVALUATION DES CHARGES PROBABLES FUTURES

L'analyse du risque sismique associé au site du barrage MEURAD repose sur l'application du modèle de source surfacique développé au paragraphe 2.3 du chapitre IV.

Le calcul de risque a été réalisé en utilisant les différentes lois d'atténuation ( proposées au paragraphe VII.4) pour les deux cas de distribution limitée et illimitée des magnitudes. ( Fig.26a et 26b )

Selon le catalogue de la sismicité historique il apparaît que la plupart des séismes observés aux alentours du site

étudié , se situent à une profondeur focale comprise entre 5 Km et 15 Km . Ainsi a-t-il admis pour le calcul, une profondeur moyenne unique  $h = 10$  Km.

Le tableau du paragraphe VII.3.3. présente les valeurs des paramètres employés pour le calcul de risque sismique .

Les figures 26a et 26b montrent clairement que les lois d'atténuation (1) et (2) conduisent à des résultats exagérés ( pointes d'accélération très élevées). Ces figures indiquent également l'influence importante de la magnitude limite  $m_u$  sur l'évaluation du risque sismique.

Il est intéressant de remarquer que la Zone sismique (2) ( malgré son importante activité ) et la zone (3) ne présentent pas d'effet significatif sur le risque sismique total au site de projet . Cette observation peut être expliquée par le fait que seules les zones situées à une distance suffisamment proche du site contribuent de façon décisive au calcul de risque .

Les figures 27a , 27b et 27c montrent que pour certaines lois d'atténuation (1), (4) et (7) la zone (1) contribue de manière déterminante ( par rapport aux zones 2 et 3 ) dans l'estimation des niveaux probables de risque au site . Pour une période de retour de 1000 ans, les valeurs des pointes d'accélération correspondantes aux sept lois d'atténuation utilisées sont résumées ci-dessous.

A titre indicatif, seule les résultats relatifs à une distribution limitée des magnitudes sont présentés.

Lois d'atténuation	N.1	N.2	N.3	N.4	N.5	N.6
Accélération max ( % g)	86	88	30	12	51	20

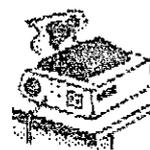
Les niveaux d'accélération relatives aux cas de lois d'atténuation (5) et (3) correspondent approximativement au domaine de variation moyenne des accélérations sismiques , tandis que les niveaux d'accélération relatives aux cas des lois d'atténuations (4) et (7) devront être considérées comme relativement faibles .

Les figures 28 et 29 représentent les probabilités de niveaux d'accélération susceptibles d'être dépassés au site du barrage MEURAD pour des durées de vie économique égales à 50 ans et 100 ans respectivement.

La détermination des séismes du projet (D.E) et le séisme maximum probable (M.C.E) sur la base des graphiques du risque développés , ainsi que le choix des lois d'atténuation les plus appropriées à notre cas d'étude seront examinées au chapitre suivant.



# Chapitre Huitieme



## CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

### VIII.1 - PROBLEMATIQUE

Le calcul para-sismique d'un ouvrage et l'analyse de sa stabilité nécessitent l'évaluation d'une relation entre sa vie économique, le risque désiré et la période de retour , autrement dit la détermination des pointes d'accélération dont le site de l'ouvrage serait le siège et les probabilités correspondantes pour une période de temps donnée.

En évaluant ces relations, certains paramètres statistiques permettant de déterminer la distribution des probabilités tels que le taux d'occurrence moyen des séismes  $\nu$ , paramètre de Richter  $\beta$ , les magnitudes extrémales  $m_0$  et  $m_u$ , et certaines relations physiques telles que la loi d'atténuation , la relation de récurrence et la relation longueur de glissement - magnitude doivent être soigneusement spécifiés .En outre, Une connaissance assez profonde de la sismicité historique et des caractéristiques locales sont nécessaires aux fins de modéliser de façon adéquate les diverses sources de la région environnante du site de construction .

La synthèse de toutes les informations régionales et historiques aux alentours du site en vue de l'obtention des paramètres et relations physiques sus-cités (et par suite des probabilités d'apparition des événements sismiques significatifs) constitue le fondement même du développement des modèles de risque .

## VIII.2 - PRINCIPAUX RESULTATS

L'étude analytique et les diverses illustrations numériques notamment l'étude de cas du barrage MEURAD ont permis de formuler les principales conclusions et importants résultats suivants :

### VIII.2.1 - Aspect analytique

1 - La comparaison des résultats obtenus à partir du modèle de sources ponctuelles et du modèle de rupture de faille montre que dans ce cas de sources linéaires, le modèle de sources ponctuelles peut sous-estimer sérieusement le risque réel au site notamment pour les mouvements de fortes intensités. Il en découle entre autres, que les périodes de retour seront plus courtes si le modèle de rupture de faille est employé.

2 - La majeure contribution au risque provient des sources sismiques les plus proches du site de construction. Cette observation est corroborée par l'analyse du risque sismique total au site du barrage MEURAD, dont la valeur correspond essentiellement à celle du risque sismique déterminé à partir de la zone (1) seulement .

3 - Chacune des diverses sources appartenant à la zone d'influence contribue d'une façon approximativement additive au risque via son activité sismique  $\nu$  et son facteur géométrique G.

4 - Les valeurs de magnitude minimale  $m_0$  comprise dans l'intervalle  $3.5 \leq m_0 \leq 4.5$  n'influent pas de manière significative sur le risque sismique calculé.

5 - Les paramètres  $\nu$  et  $\beta$  peuvent être estimés à partir de la courbe de récurrence. Leurs influences sur le risque sont significativement importantes notamment pour les séismes de fortes intensités. Cette conclusion souligne la nécessité de choisir soigneusement et convenablement les courbes de récurrence sismique .

6 - L'utilisation d'une distribution illimitée des magnitudes peut conduire à une surestimation du risque. Le degré de surestimation peut être particulièrement important pour

les mouvements forts de sol. La limite supérieure de magnitude  $m_u$  définie à partir de considérations basées sur l'analyse de la sismicité historique peut avoir une incidence significative sur le degré de risque encouru au site. Néanmoins, les résultats obtenus montrent qu'un phénomène de saturation de risque s'établit pour les valeurs de magnitudes limites supérieures à 9 degrés sur l'échelle de Richter.

7 - Une surestimation de la longueur de faille sous-estime le risque d'une façon mineure .Il en résulte que les incertitudes commises sur l'estimation de la longueur de faille présentent un effet plutôt négligeable sur le risque sismique.

8 - Le risque sismique est sensible aussi à la profondeur focale  $h$  ,la distance épacentrale  $d$ , les coefficient d'atténuation  $b_1$  et  $b_2$ , le coefficient de magnitude  $\beta/b_2$  ,mais il est rarement sensible à la longueur de faille.

#### VIII.2.2 - Etude de cas " Barrage MEURAD "

Une difficulté relativement importante ( à résoudre impérativement dans toute évaluation du risque sismique au site de construction ) réside dans le développement d'une loi d'atténuation susceptible de simuler de façon adéquate les

caractéristiques d'atténuation des accélérations au niveau de la région étudiée. Pour l'étude de cas du barrage MEURAD, nous avons utilisé les lois développées pour la zone ouest des Etats- Unis. Ce choix peut être justifié par de nombreuses considérations toutes semblant indiquer que les caractéristiques d'atténuation du nord de l'Algérie seraient semblables à celles de la côte Ouest des Etats-Unis. [10]

Parmi ces considérations, il convient de noter :

- 1 - Le type de déformation le long de la côte d'Afrique du nord est celui d'une compression (plissement et chevauchement) similaire aux "Transverse Ranges" de Californie .
- 2 - Les vitesses dans la croûte terrestre de l'Algérie du Nord sont comparables à celles de la Californie (de l'ordre de 5.55 km / sec ) . ( Bockel, 1972 )
- 3 - L'épaisseur de la croûte de l'Algérie du nord est de 30 - 35 Km ( Cara et Hatzfeld, 1977 ) , valeur proche de celle de la région du Nevada et de la Californie.
- 4 - Les profondeurs focales des deux régions sont comprises entre 5 et 15 Km.

5 - Une bonne concordance entre les données sismiques de l'Algérie du Nord et celles déduites de la loi d'atténuation développée pour les séismes superficiels par Joyner et Boore [10] [16] ( Eq.6 , Fig.25 ) . Dans ce cadre, il convient également de souligner que Donovan a développé une loi d'atténuation applicable à la région du Californie ( Eq.7 , Fig.25 ) avec des taux d'atténuation légèrement plus faibles que ceux employés par Joyner et Boore .

Néanmoins il convient de noter aussi que la loi de Joyner et Boore présentant de part sa forme mathématique des complexités supplémentaires en vue d'une formulation analytique du risque, ne sera pas retenue pour l'évaluation des charges probabilistes. Seuls les lois d'atténuation d'Esteva et Villaverde ( Eq.3 , Fig.25 ) et Donovan ( Eq.7 , Fig.25 ) semblent appropriées pour l'estimation du risque sismique au site du barrage MEURAD.

Il en découle que le séisme du projet " D.E " et le séisme maximum probable "M.C.E" seront définis en utilisant ces dernières lois.

#### VIII.2.2.1 - Recommandations pour le séisme du projet

Le séisme du projet est défini comme étant le séisme pouvant raisonnablement se produire durant la vie économique de l'aménagement considéré.

Par définition, aucun dommage important n'est toléré lors du séisme du projet .

Si nous admettons que le séisme du projet correspond à une vie économique d'aménagement considéré de 100 ans et une probabilité d'apparition acceptable de 30 % , ( ce qui impliquerait une période de retour de 280 ans ) les pointes d'accélération maximales au site du barrage serait les suivantes :

Lois d'atténuation	N. 3	N. 7
Accélérations max- ( % g)	13	10

Compte tenu de ces résultats une accélération de 15 % g peut être adopté pour le séisme du projet .

A titre comparatif, Mortgat et Shah dans leur étude " Seismic Hazard Analysis of Algeria " [26] ont proposé pour la région du barrage une accélération de 20 % g pour une période de retour de 200 ans.

VIII.2.2.2 - Recommandations pour le séisme maximum probable

Le séisme maximum probable est définie comme le plus sévère séisme possible au site. Par définition les dommages considérables sans pour autant remettre en cause la sécurité de l'aménagement peuvent être tolérés . Les calculs de risque montrent que les accélérations maximales correspondant à des périodes de retour de 5.000 ans et 10.000 ans (associées à des probabilités d'apparition de 2 % et 1 % respectivement et une vie économique de 100 ans ) sont les suivantes :

Lois d'atténuation	N. 3	N. 7
T = 5.000 ans	26 % g	18 % g
T =10.000 ans	31 % g	20 % g

Compte tenu de ces résultats, nous recommandons un séisme maximum probable de 30 % g au site du barrage considéré .

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. PECKER, "Dynamique des sols", Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 1984.
- [2] Journal "El-MOUDJAHID", "Principaux séismes survenus dans le monde", Presses d'El-Moujahid, Alger, 13 Nov.1980.
- [3] C.A. CORNELL, "Stochastic process models in structural engineering", Tech. Report #34, Stanford university, C.E. Dept. California, 1964.
- [3] C.A. CORNELL, "Engineering seismic risk analysis", Bull. Seis. Soc. Amer., Vol.58, N.5, Oct 1968.
- [4] J.K. GARDNER and L. KNOPOFF, "Is the sequence of earthquakes in southern california, with aftershocks removed, poissonian ?", Bull. Seis. Soc. Amer., Vol.64, 1974.
- [5] V. DAVIDOVICI, "Génie parasismique", Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 1985.
- [6] A.C. CORNELL and H.A. MERZ, "Seismic risk analysis of Boston", J. Struct. Div., ASCE, Vol.101, ST 10, 1975.

[7] E. PARZEN, "Stochastic process", Holden-Day, San Francisco, 1962.

[8] H. BENHALLOU et J. ROUSSEL, "Sur les séismes et la séismicité de l'Algérie de 1951 à 1970", Institut de météorologie et de physique du globe de l'Algérie, Note I.M.P.G.A N.4, Alger, 1971.

[9] H. BENHALLOU , A. FERRER et J. ROUSSEL, "Catalogue des séismes algériens de 1951 à 1970", Institut de météorologie et de physique du globe de l'Algérie, Publication N.3, Alger, 1971.

[10] WOODWARD-CLYDE CONSULTANTS, "Microzonation sismique de la région d'Ech-Chélif", Algérie, Volume 1, Etude d'Aléa Sismique, 1984.

[11] V. SHENK, " Achievements and probable trends in seismic hazard assessment", Tectonophysics 167, 1989.

[12] J.P. ROTHE, "Les séismes de Kerrata et la séismicité de l'Algérie", Bulletin du service de la carte géologique de l'Algérie, 1950.

[13] H.C. SHAH, "Génie sismique", Série de conférences, Ecole nationale des travaux publics, Alger, 1979.

[20] M. MEGHRAOUI, H. PHILIP and A. CISTERNAS, "Seismotectonics of the lower Cheliff bassin : structural background of El-Asnam (Algeria) earthquake", Tectonics 5, 1986.

[21] A.H.S. ANG, "Probability concepts in earthquake engineering, in app. mech. and earth. eng.", W.D. Iwan Editor, ASME, AMD 8, 1974.

[22] A. DER KIUREGHIAN and A.H.S. ANG , "A Line-source model for seismic risk analysis", University of Illinois at Urbana-Champaign, Civil Eng. series, SRS N.419, 1975.

[23] B.M. DOUGLAS and A. RYALL , "Seismic risk in linear source regions, with application to the San Andrias fault", Bull. Seis. Soc. Amer., Vol.67, 1977.

[24] N.C. DONOVAN, "Earthquake hazards for building", R. Wright, S. Kramer, C. Culver Editors, Building science series 46, U.S dept. of commerce, National bureau of standards, 1973.

[25] A.R. RITSEMA, "Seismic data of the west mediterranean and the problem of oceanization", Verhandelingen Kon. Ned. Geol. Mijnbouw. Gen., Volume XXVI, 1969.

[26] C.P. MORTGAT et H.C. SHAH, "Seismic hazard analysis of Algeria", The John A.Blume Earthquake, Eng. center, Dep. of civil eng., Stanford University, 1978.

République Algérienne Démocratique et Populaire

MINISTRE DES UNIVERSITES

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL  
LABORATOIRE INTERACTION SOLS-STRUCTURES

## THESE DE MAGISTER

Présentée par : M<sup>o</sup>. MERZOUAKI

Septembre 1991

### Evaluation du risque sismique aux sites de construction

Membres du Jury :

A. BALI	Professeur	Président
M. BERRAH	Maître de Conférence	Examineur
S. BELKACEMI	Maître de Conférence	Examineur
M. DEMIDEM	Chargé de Cours	Examineur
B. TILIOUINE	Professeur titulaire	Rapporteur

# ANNEXE



ANNEXE



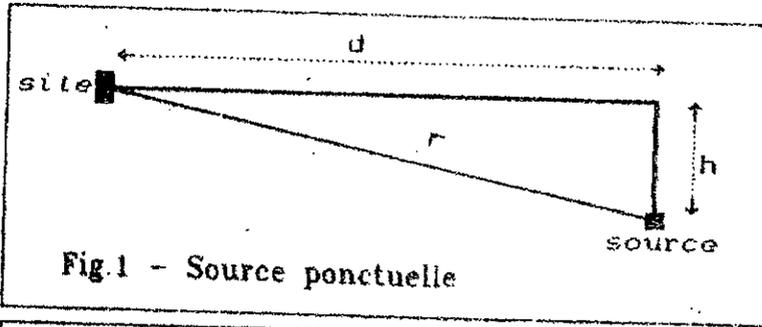


Fig.1 - Source ponctuelle

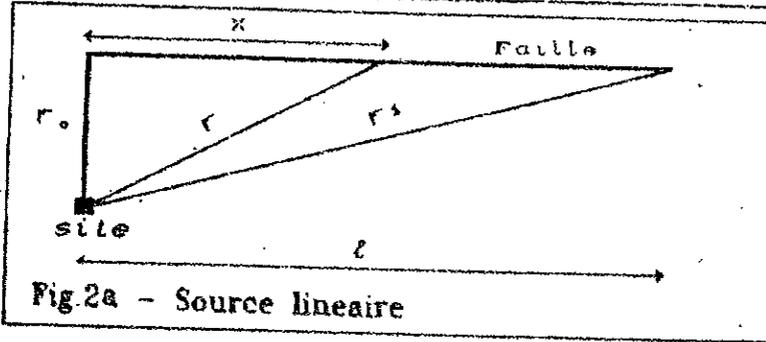


Fig.2a - Source lineaire

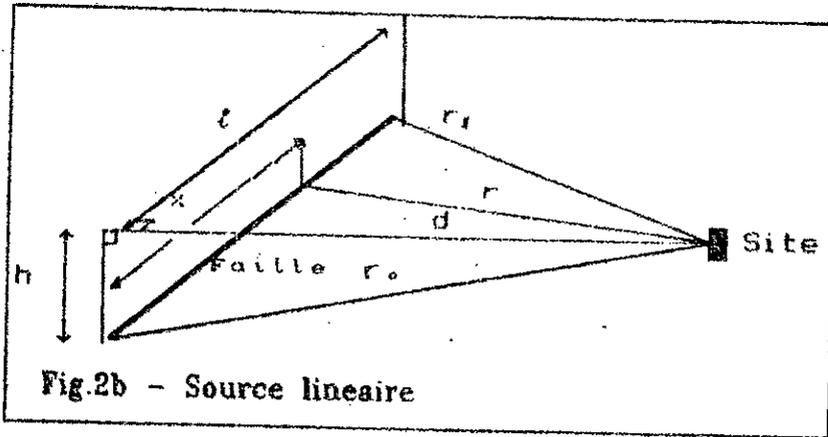


Fig.2b - Source lineaire

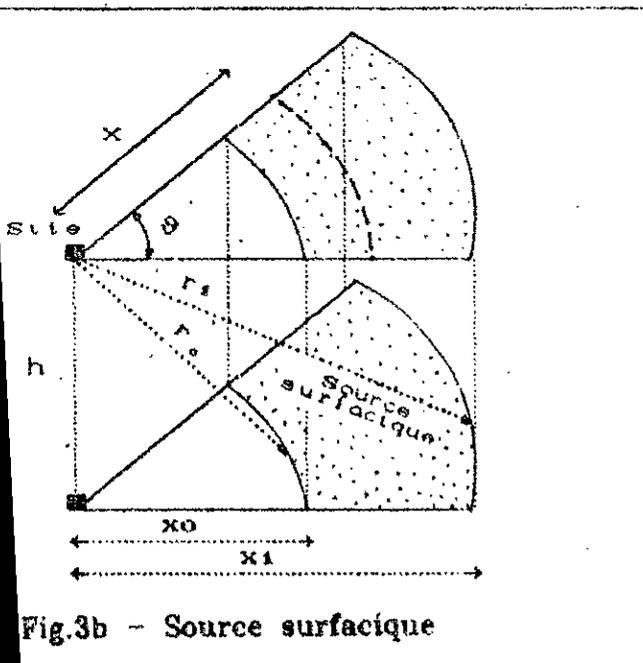


Fig.3b - Source surfacique

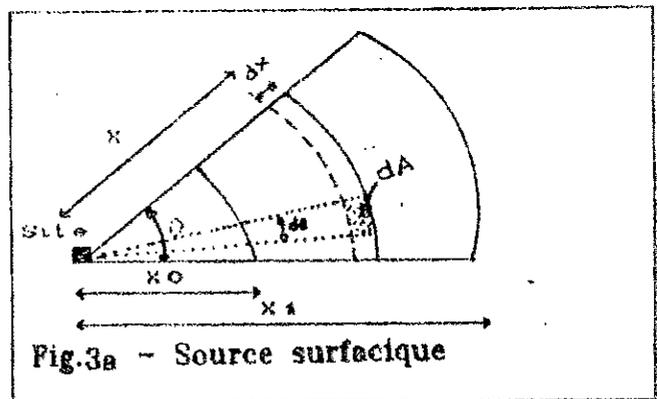


Fig.3a - Source surfacique

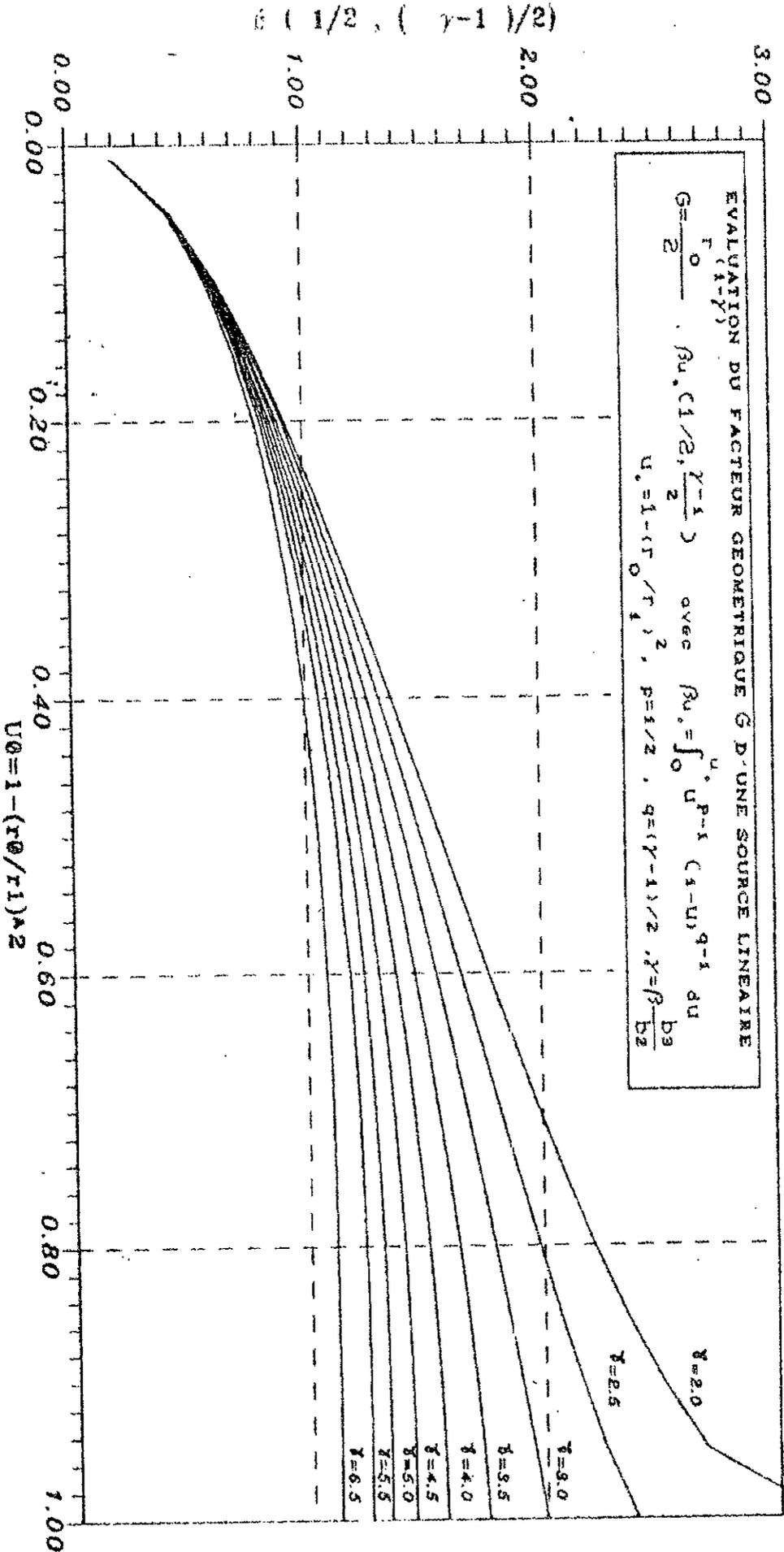


Fig. 4

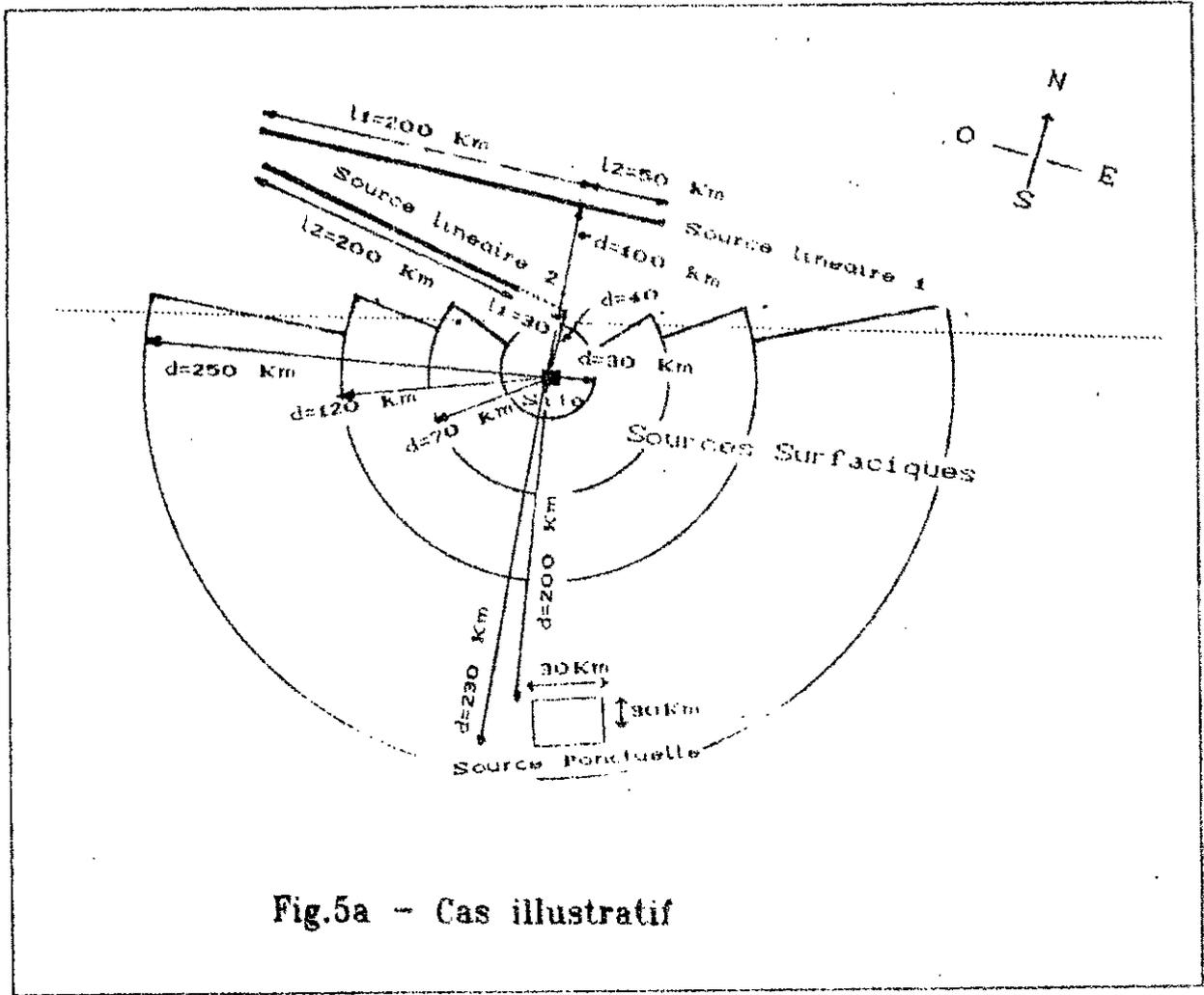


Fig.5a - Cas illustratif

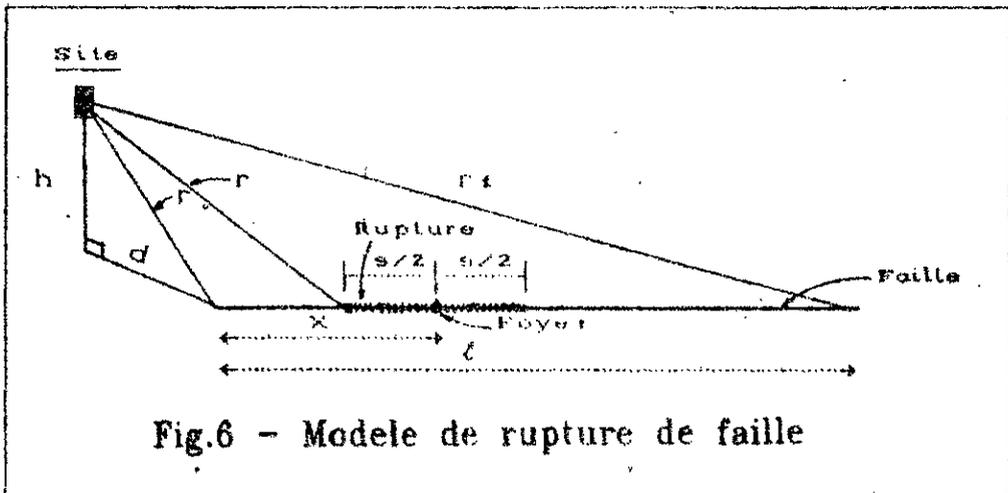
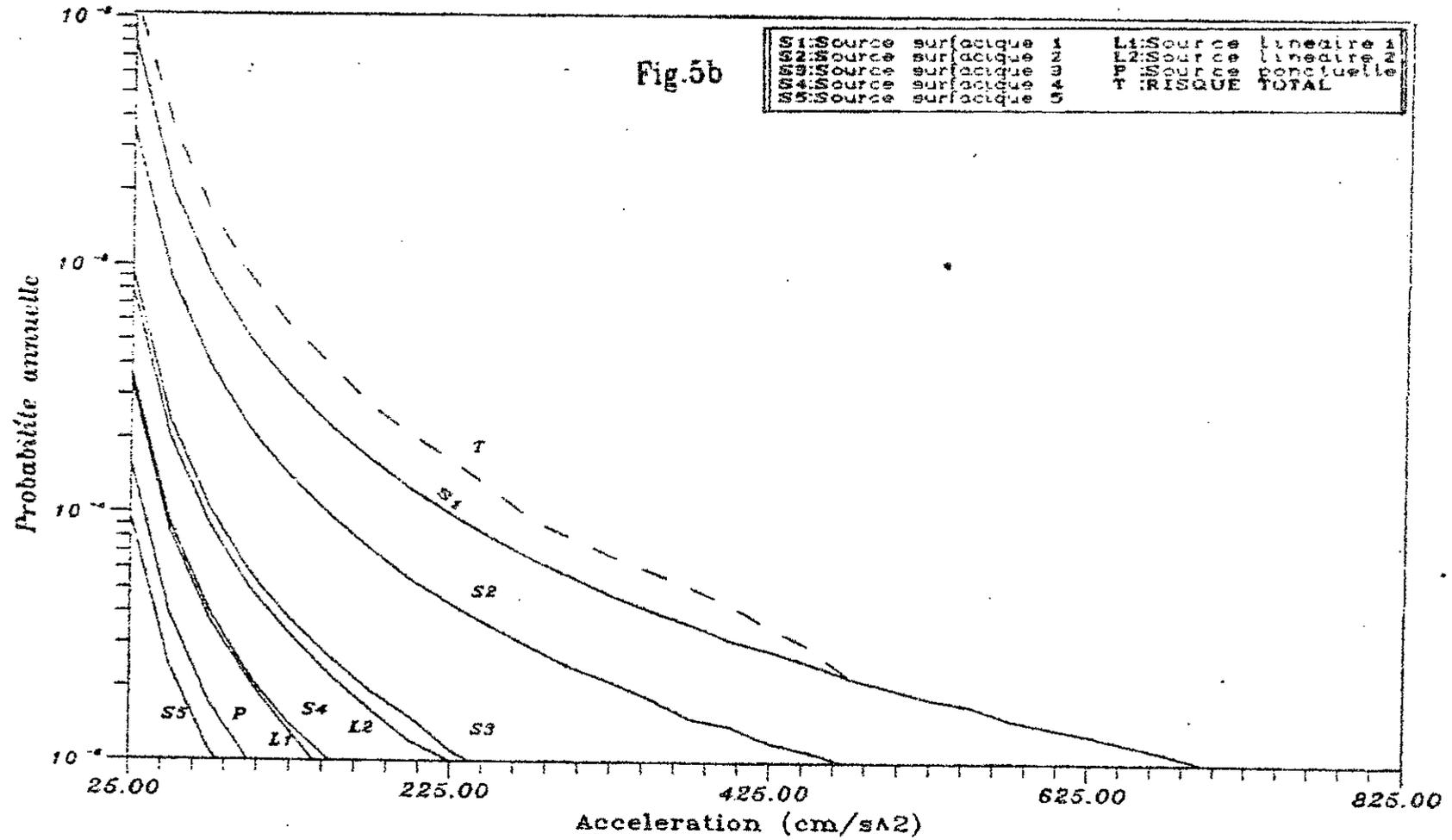


Fig.6 - Modele de rupture de faille

Fig.5b



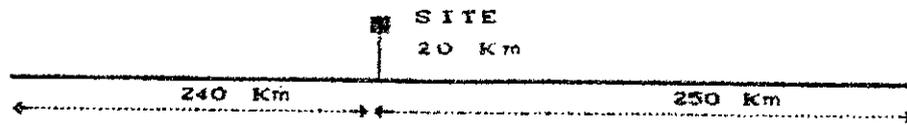


Fig.8 - Faille de San Andreas

KRINITZSKY 1974 :  $S = \text{Exp}(0.84 m - 1.08)$   
 DONOVAN 1973 :  $Y = 1350(r+25)^{-1.52} \text{Exp}(.58 m)$

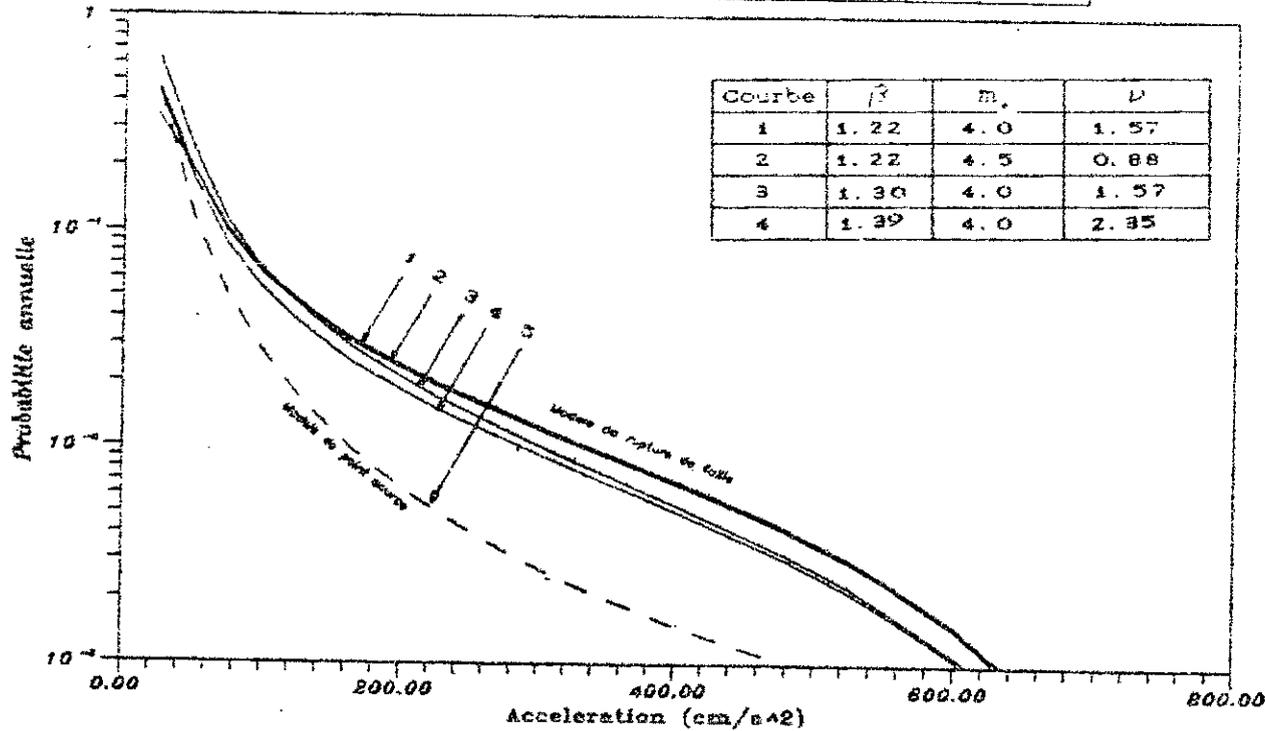


Fig.9 - Risque sismique associe a la faille de San Andreas

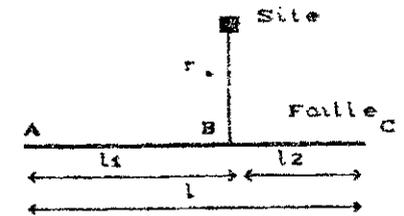


Fig.7a

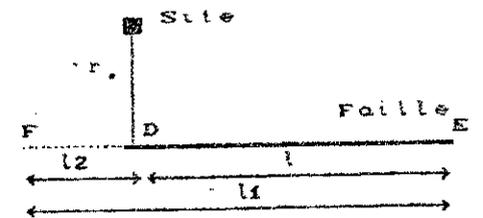


Fig.7b

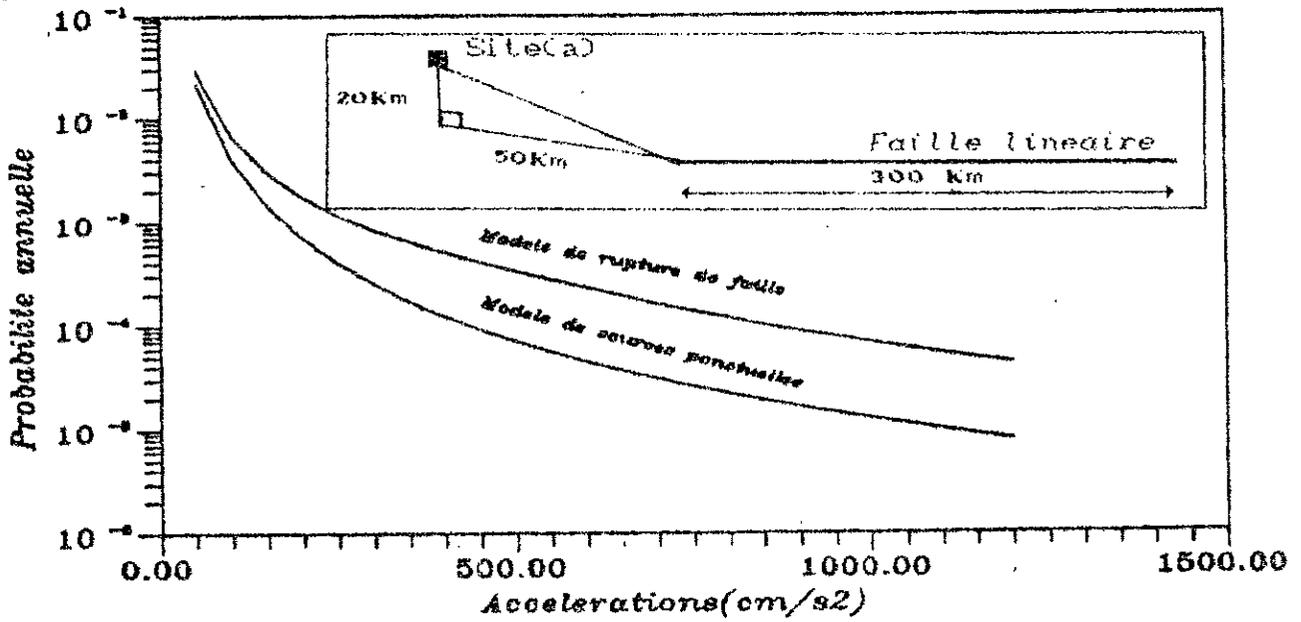


Fig.10a - Comparaison des modeles de sources lineaires  
- Cas(a) -

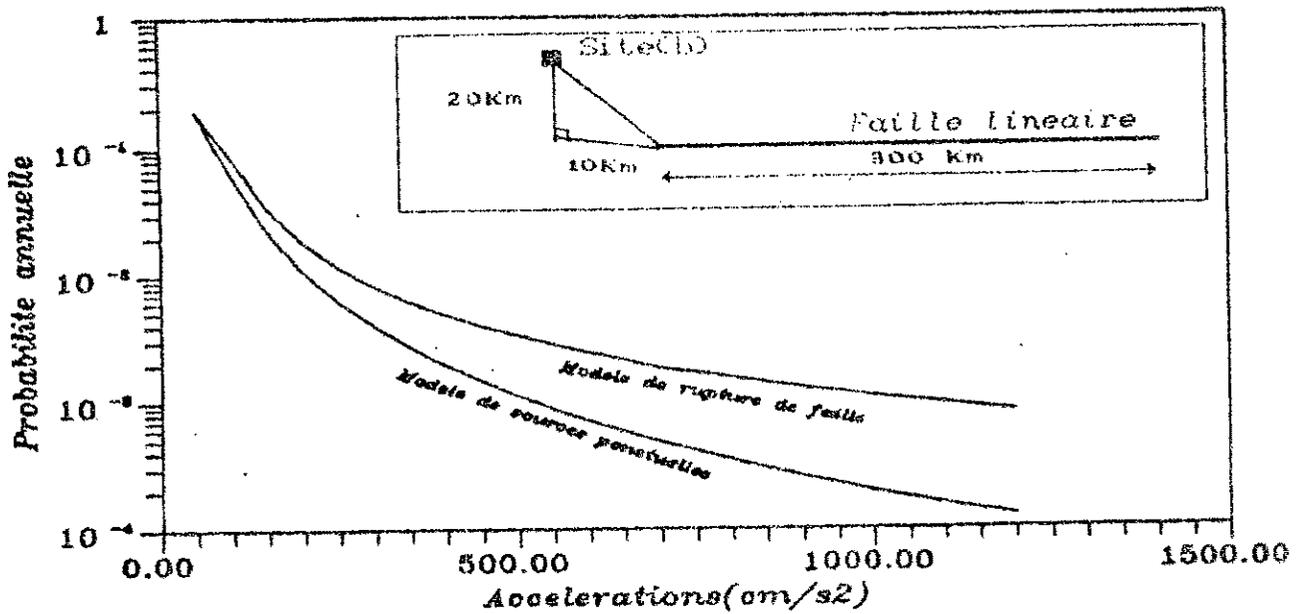


Fig.10b - Comparaison des modeles de sources lineaires  
- Cas(b) -

Fig.11 - Influence de la distribution tronquee des magnitudes sur le risque sismique sur le risque sismique

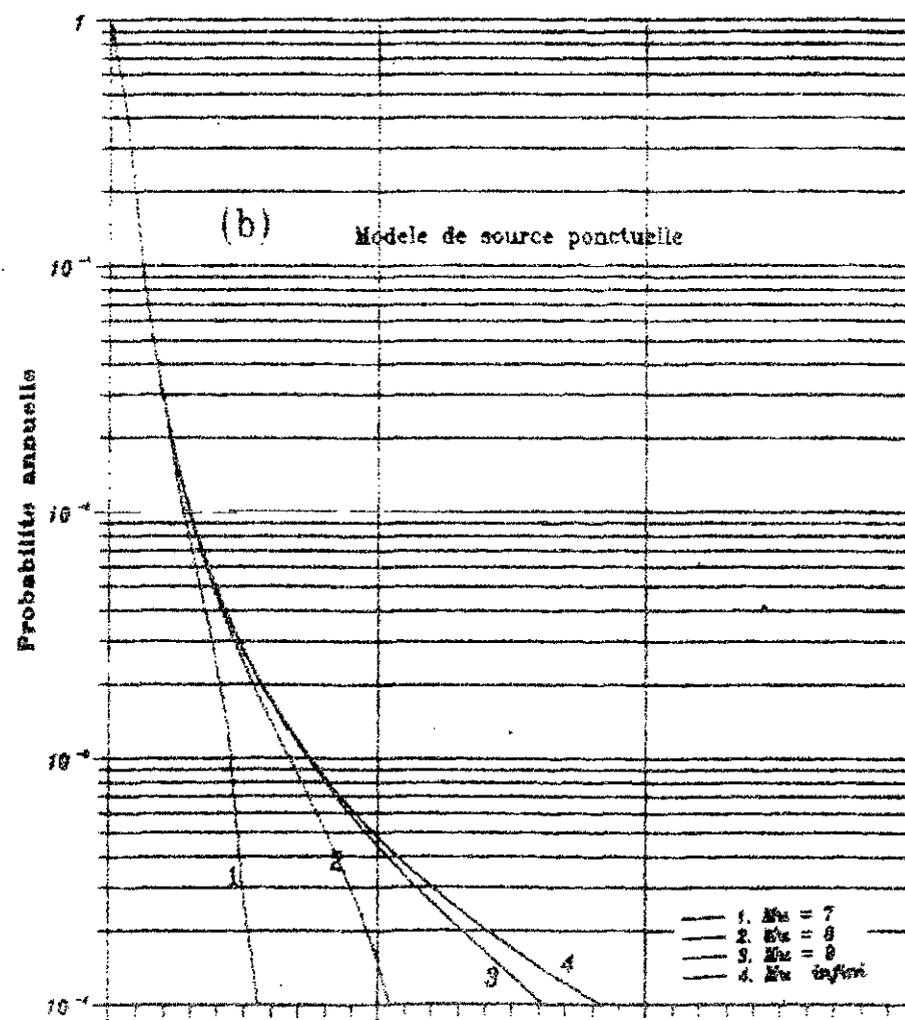
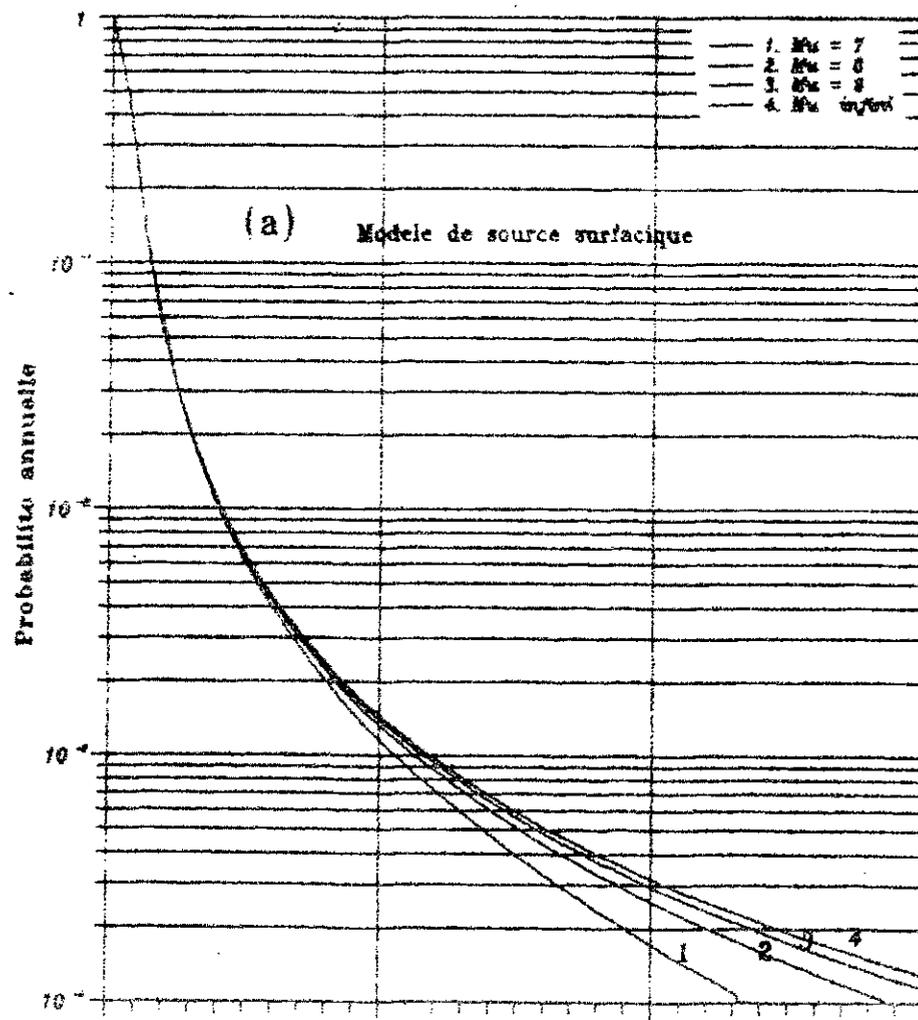


Fig.11 - Influence de la distribution tronquee des magnitudes sur le risque sismique sur le risque sismique

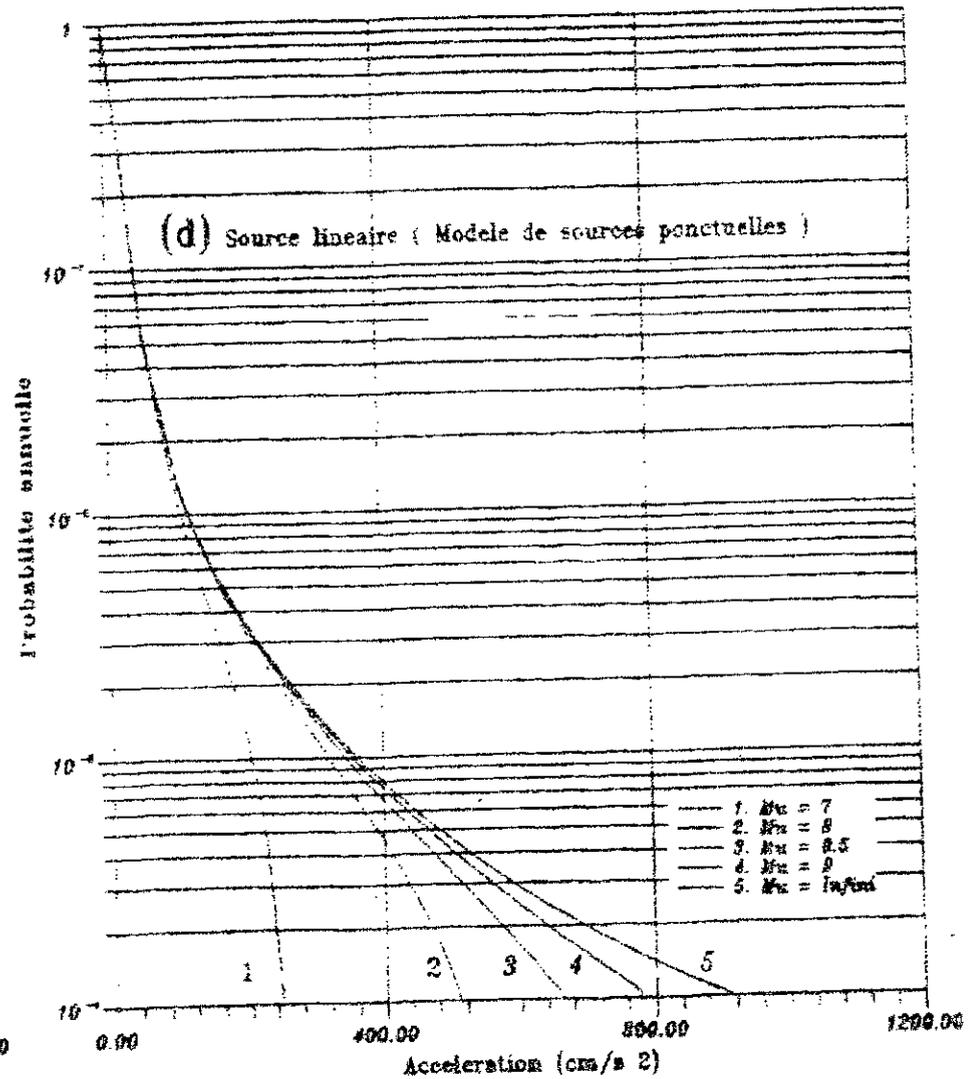
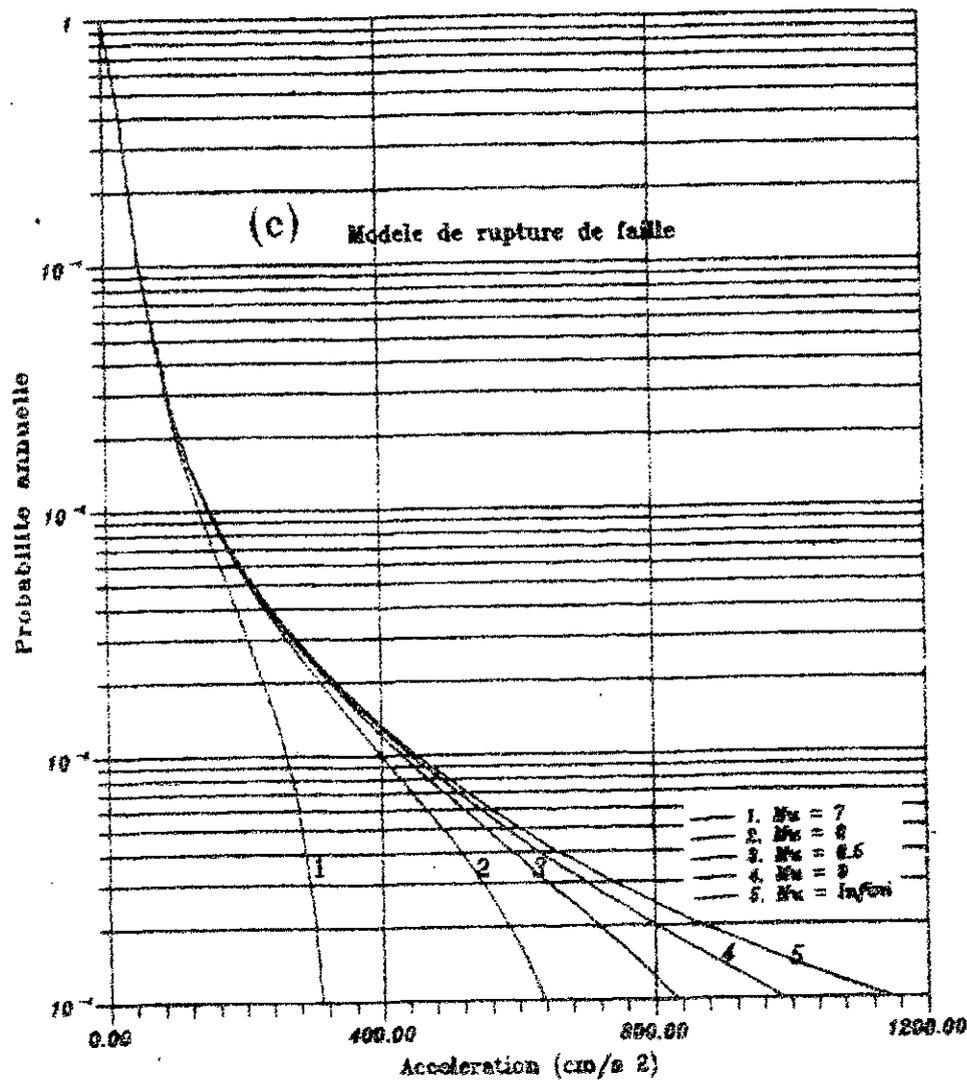


Fig.12 - Influence de la longueur de faille sur le risque sismique

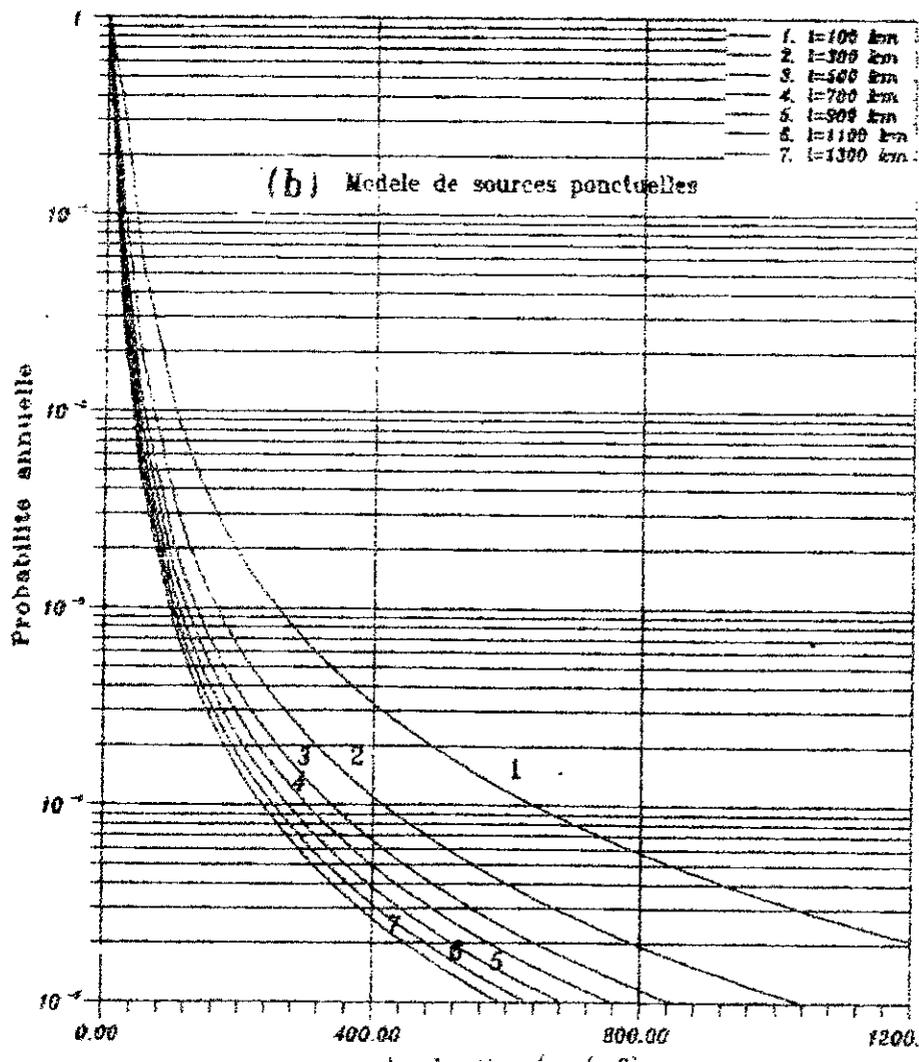
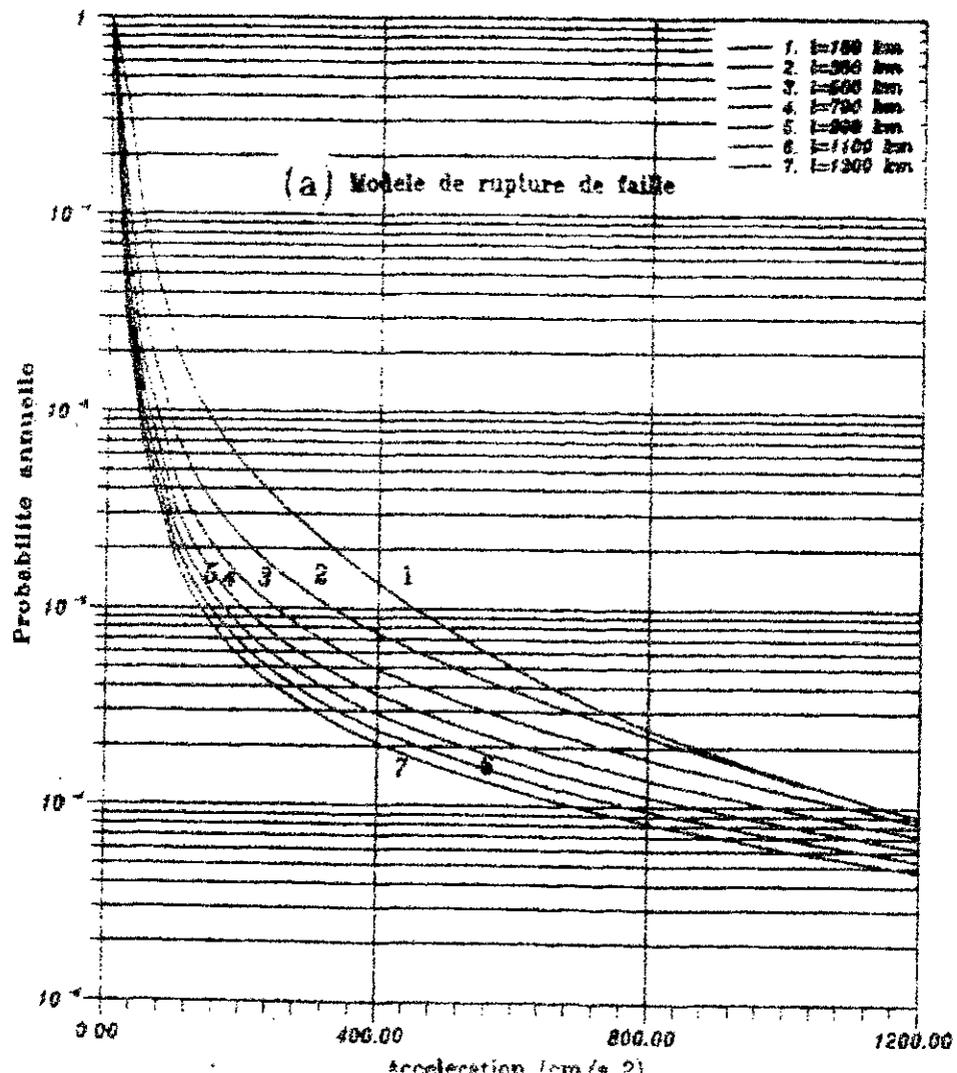


Fig.13 - Influence de la profondeur focale sur le risque sismique

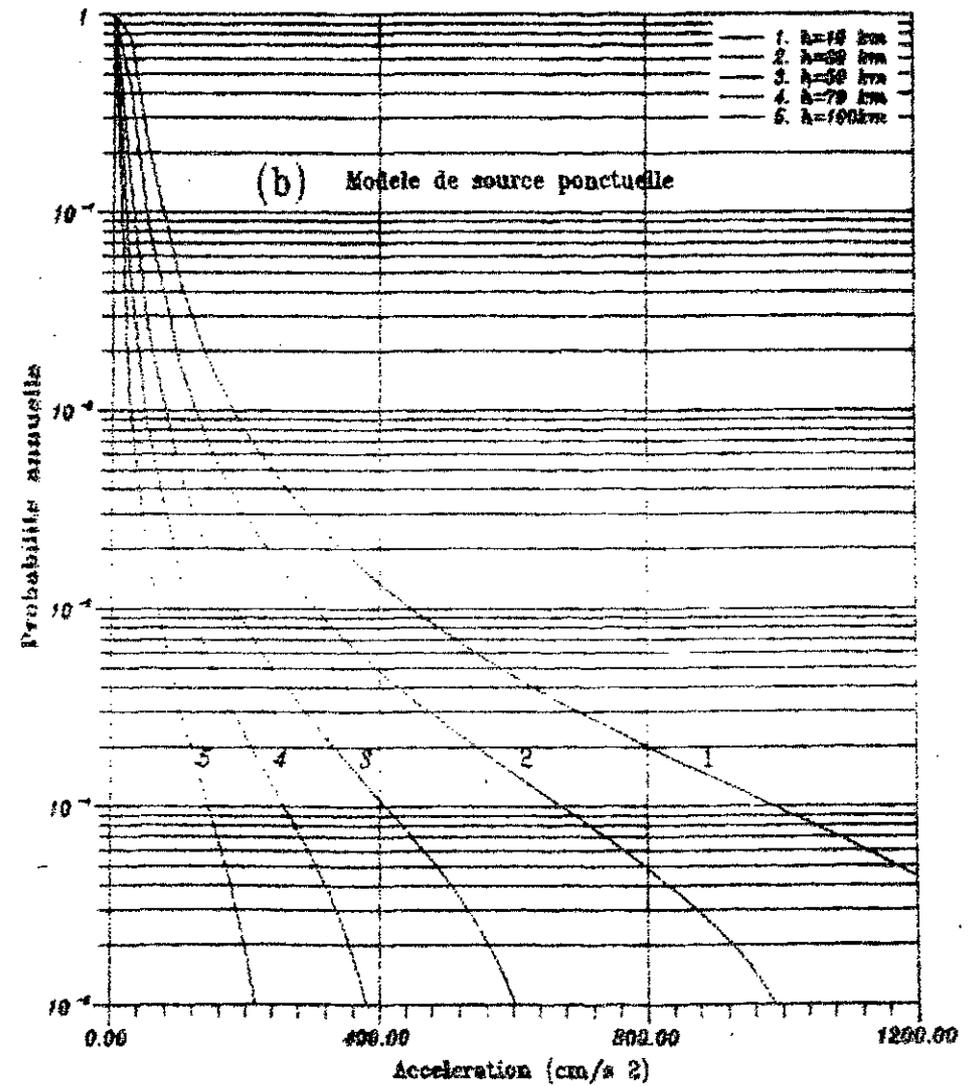
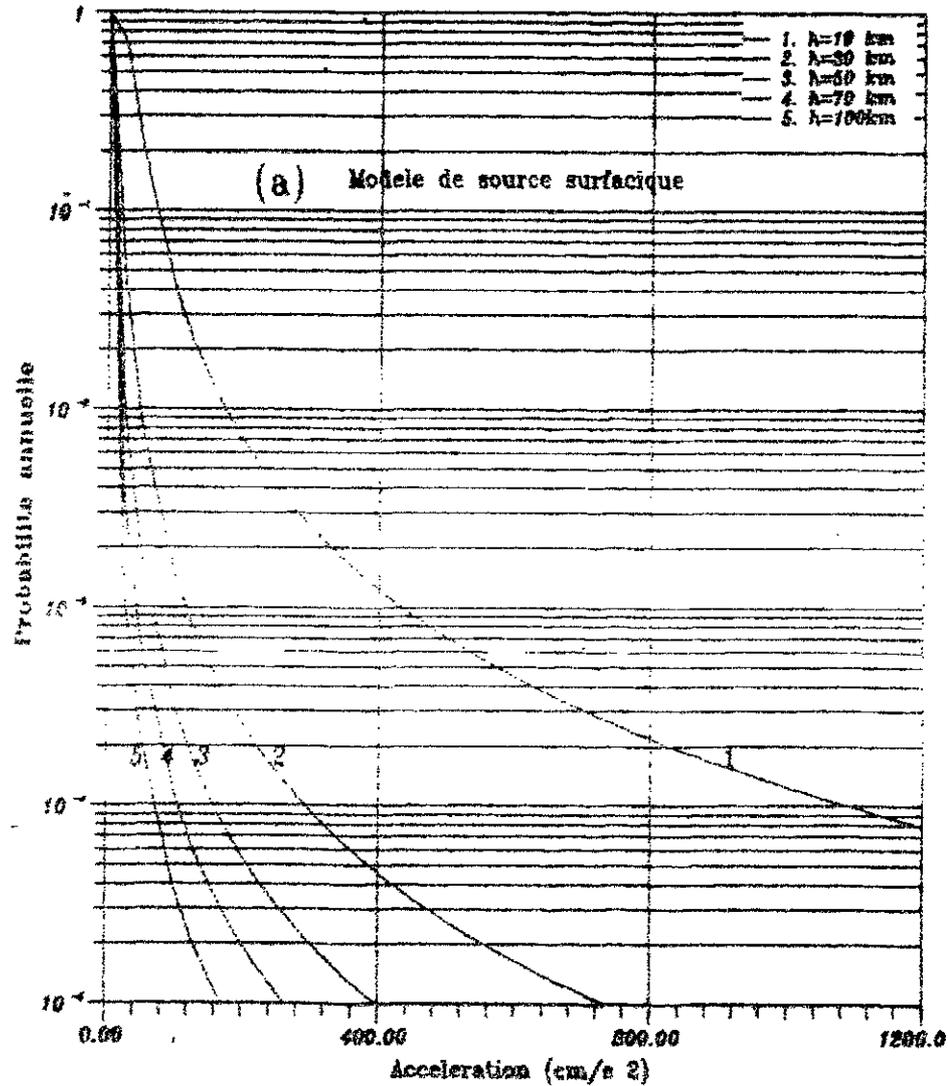


Fig.13 - Influence de la profondeur focale sur le risque sismique

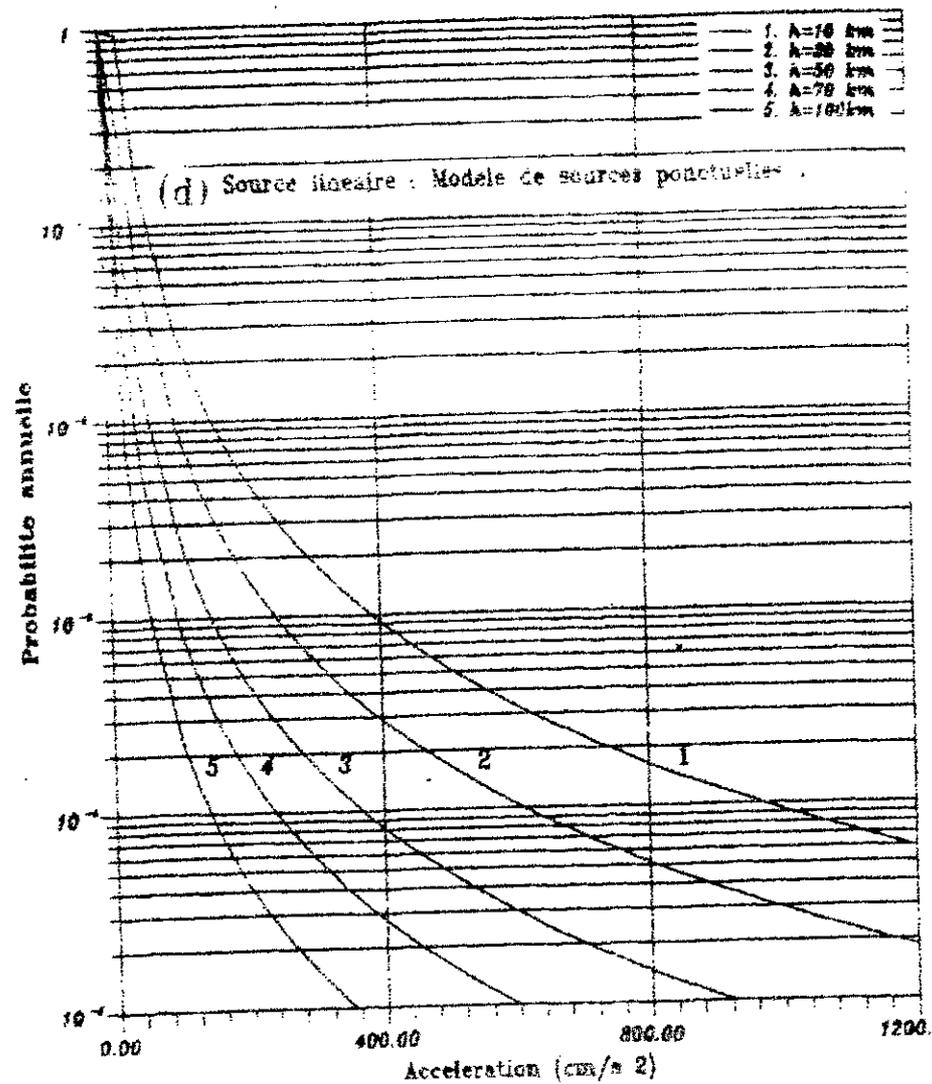
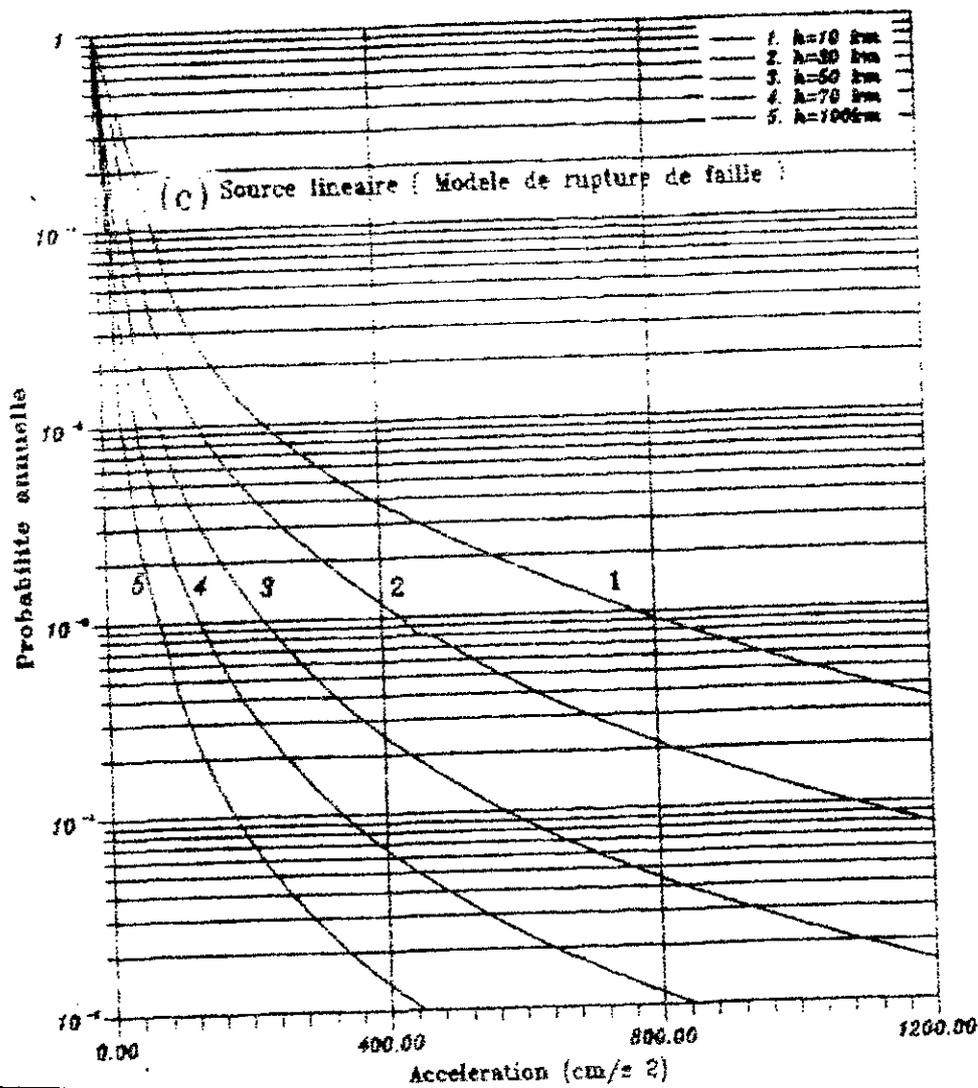


Fig.14 - Influence du parametre  $\beta$  sur le risque sismique

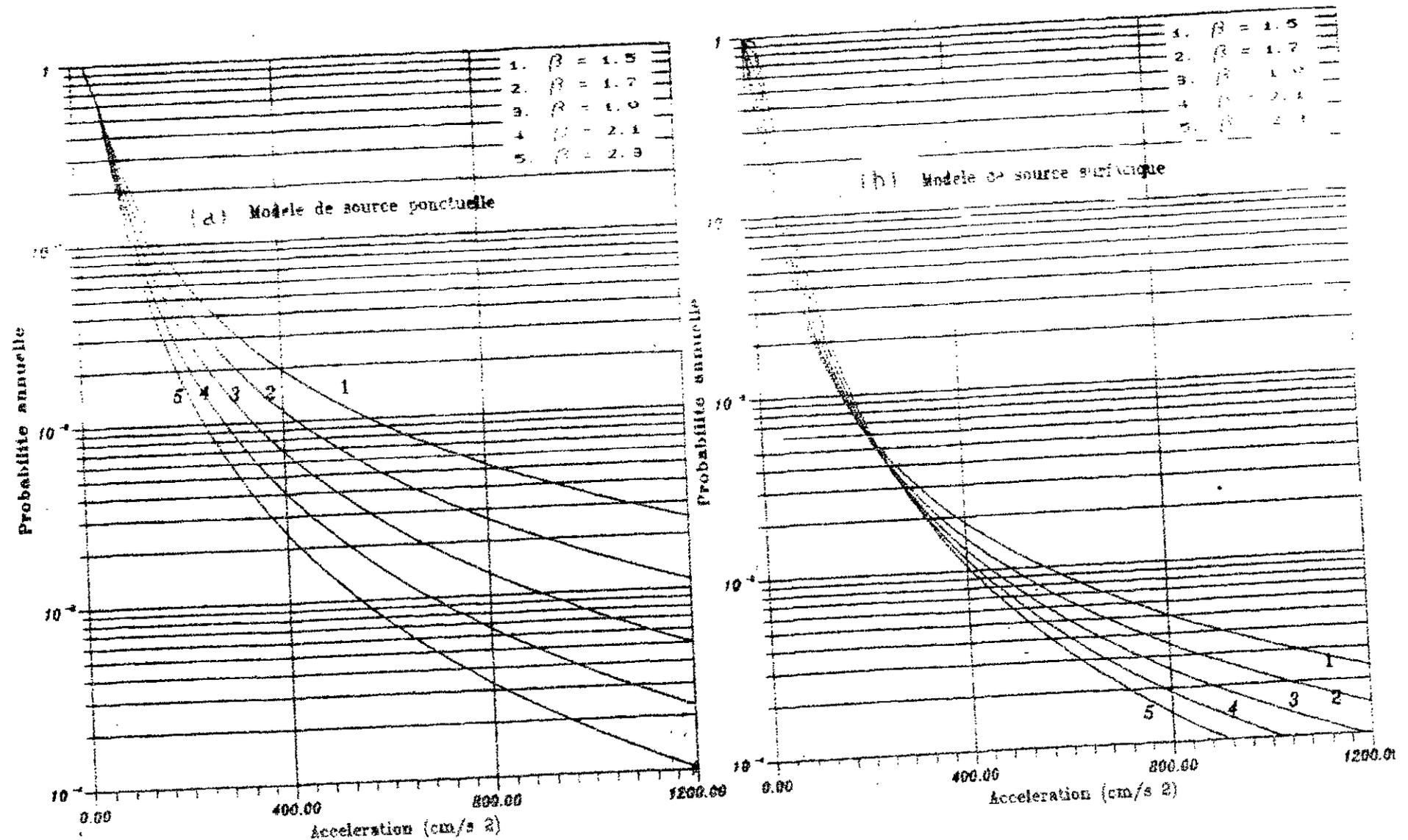


Fig.14 - Influence du parametre  $\beta$  sur le risque sismique

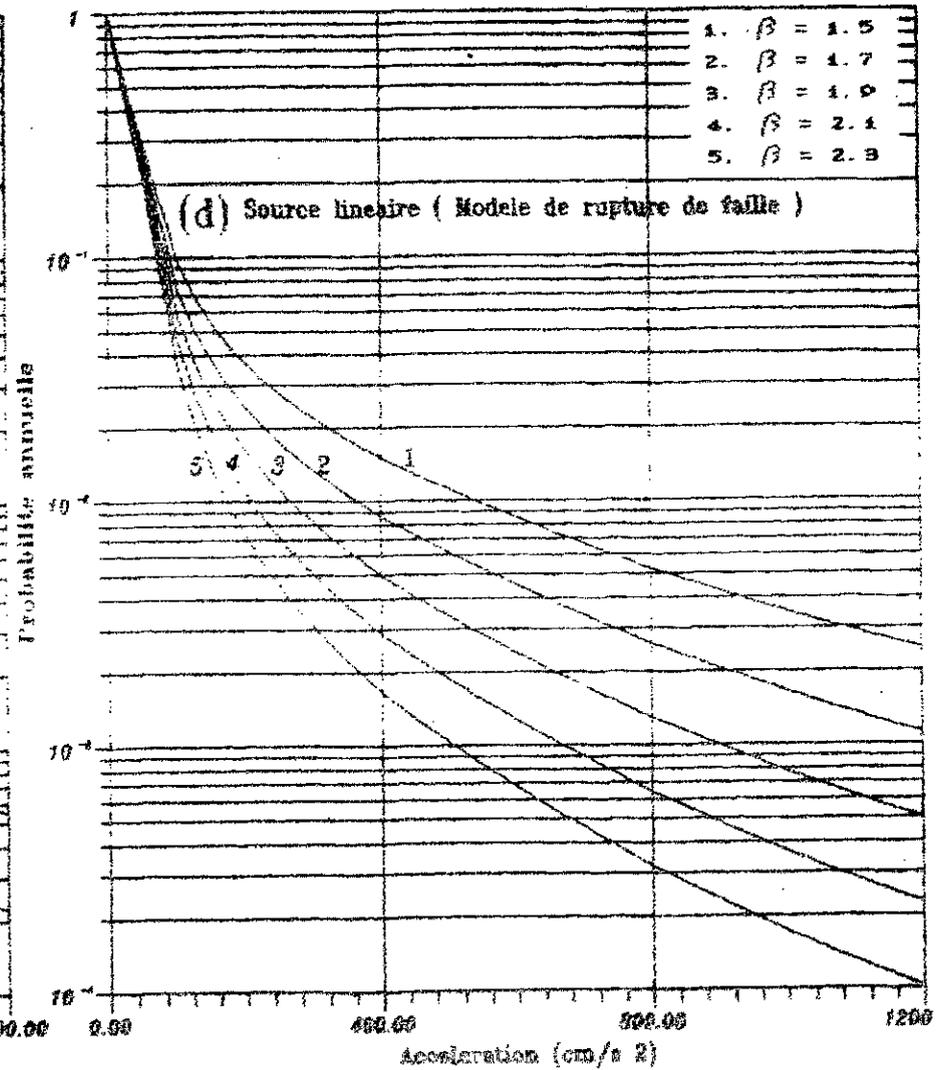
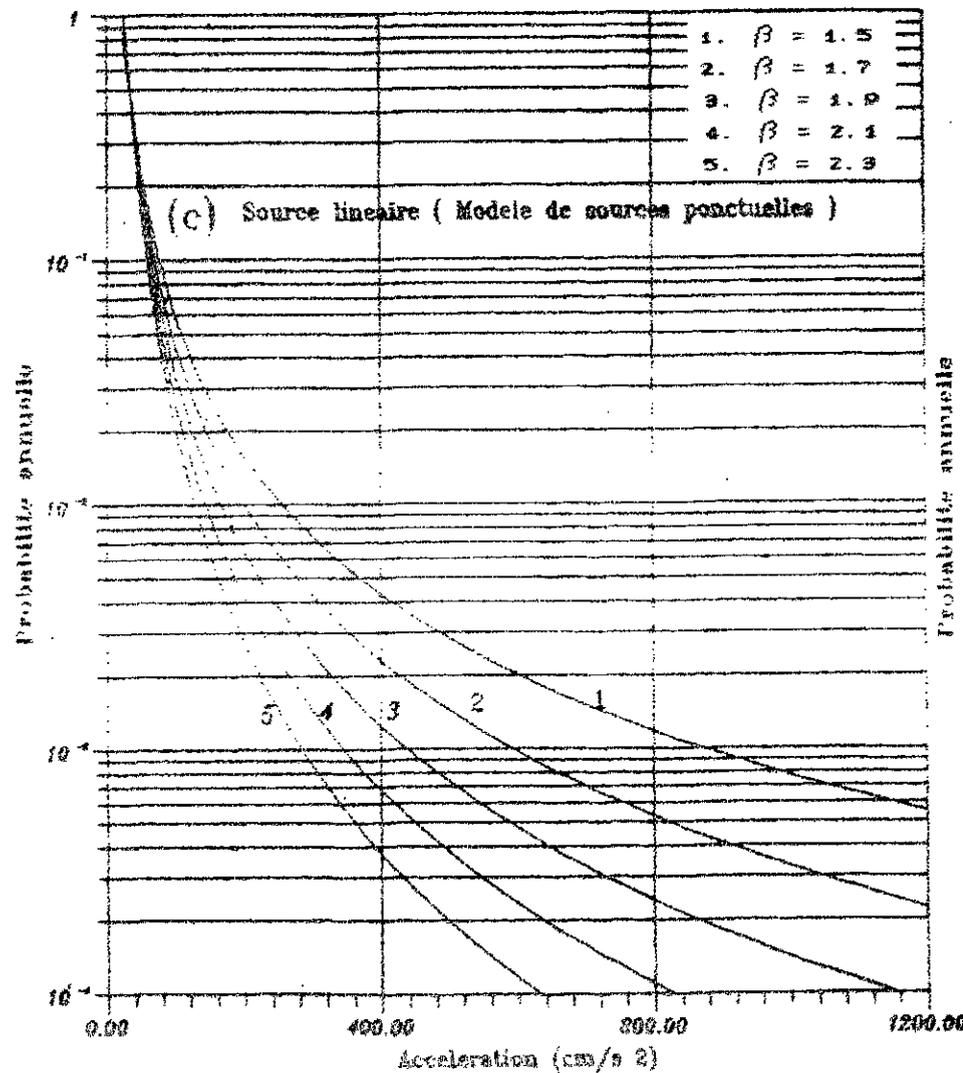


Fig.15 - Influence du parametre d'attenuation b3 sur le risque sismique

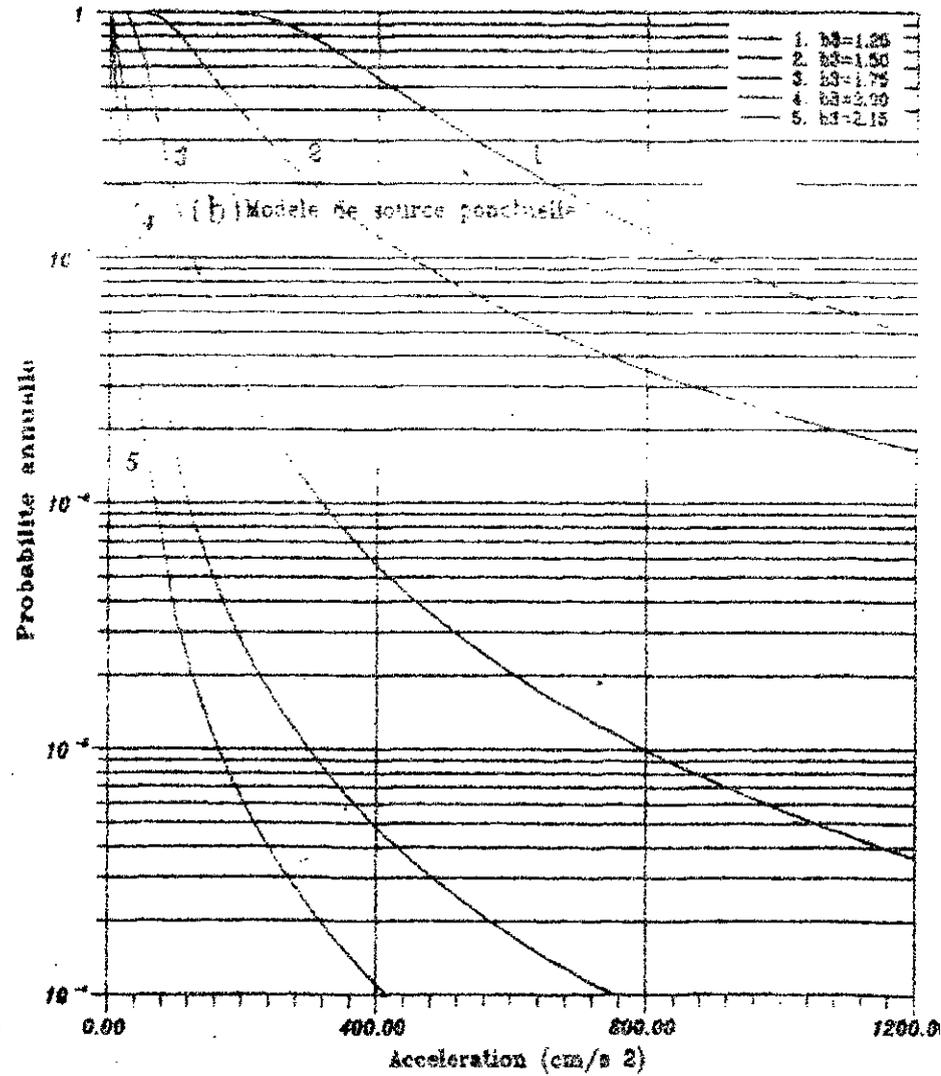
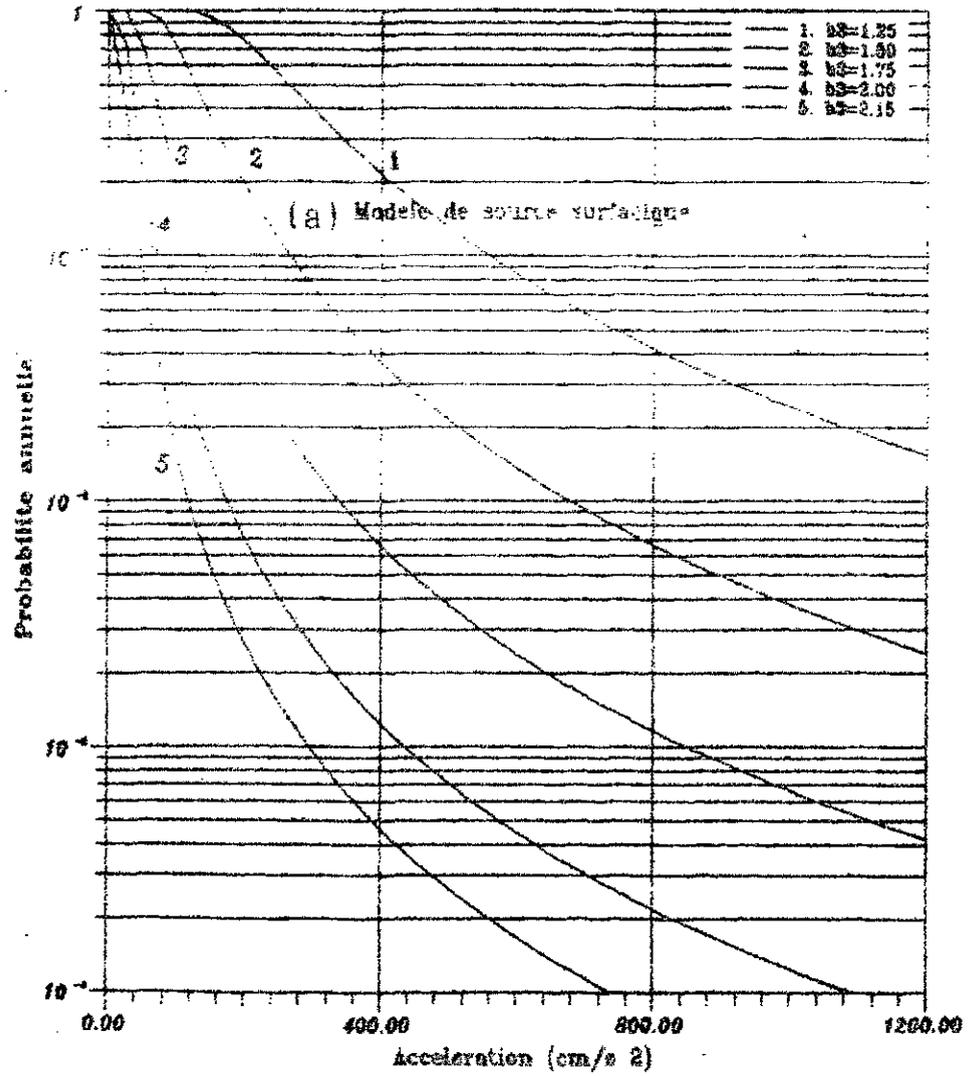


Fig.15 - Influence du parametre d'attenuation b3 sur le risque sismique

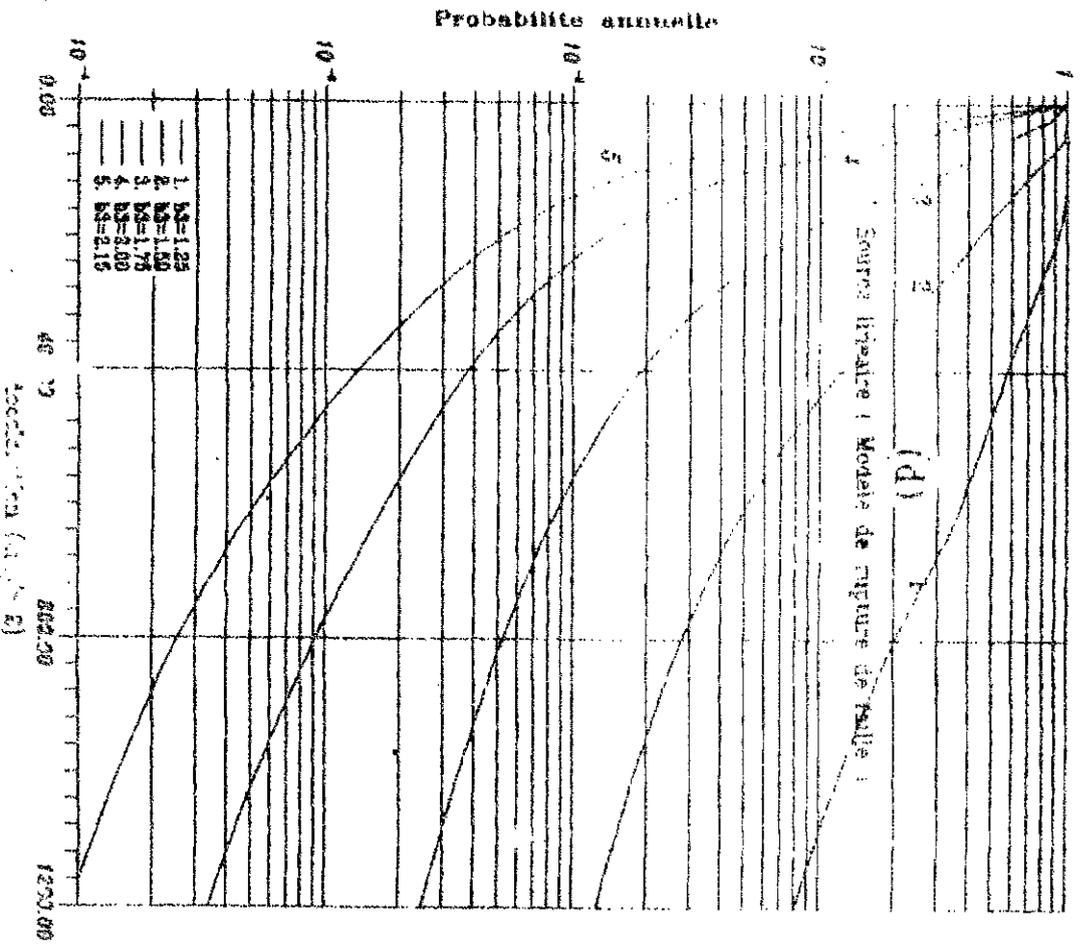
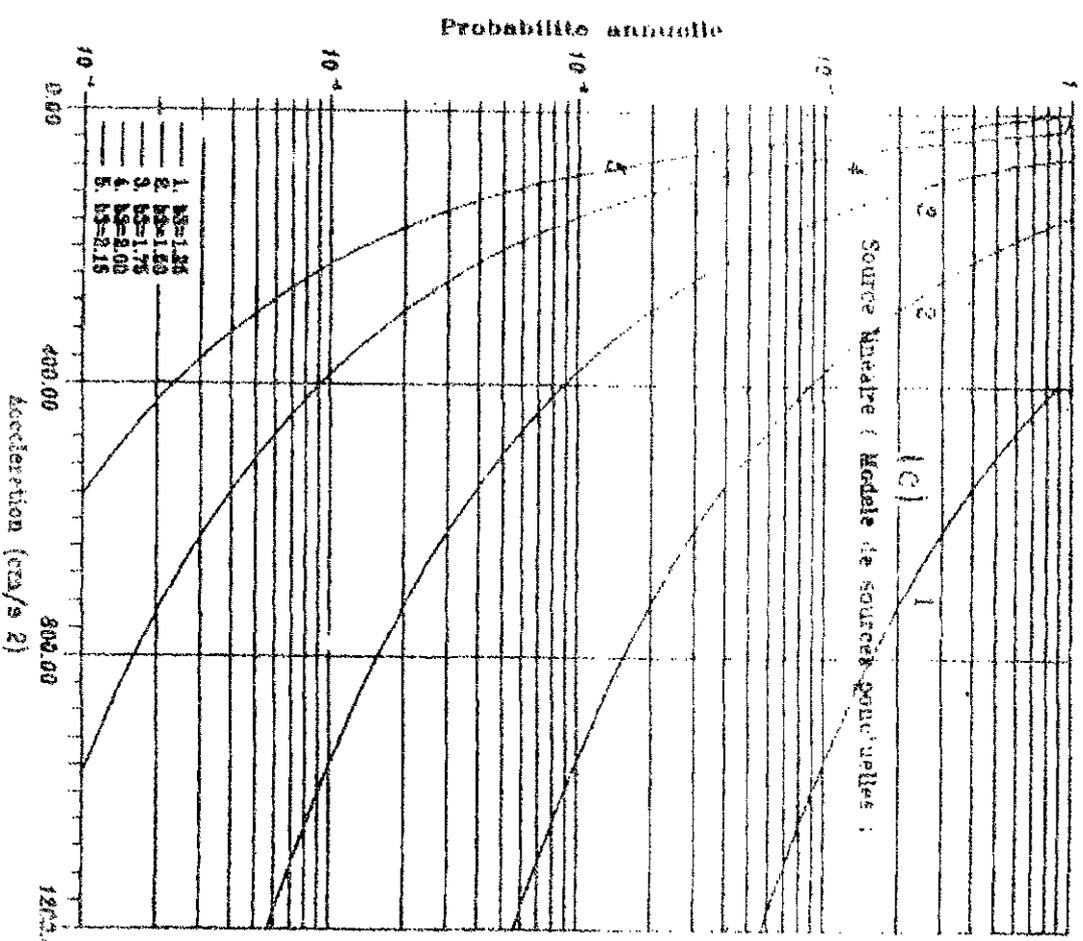


Fig.16 - Influence du parametre d'attenuation b2 sur le risque sismique

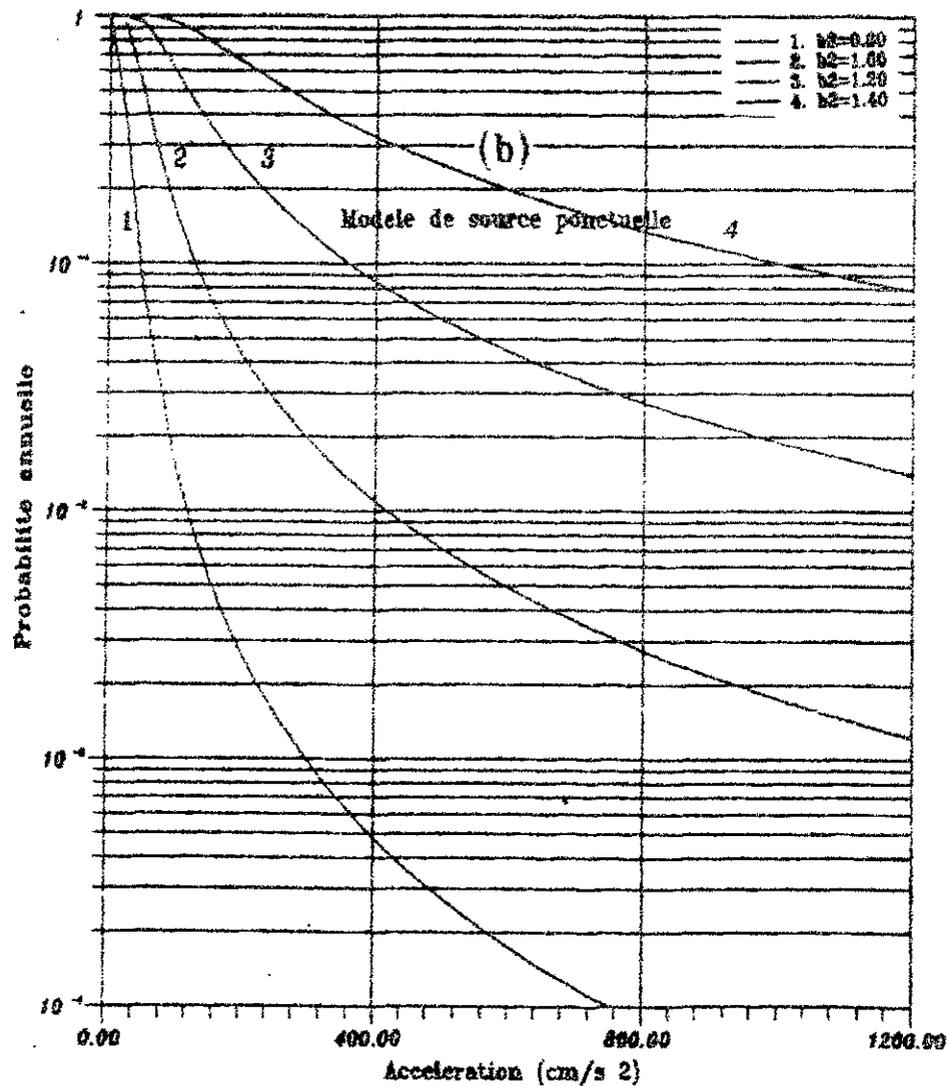
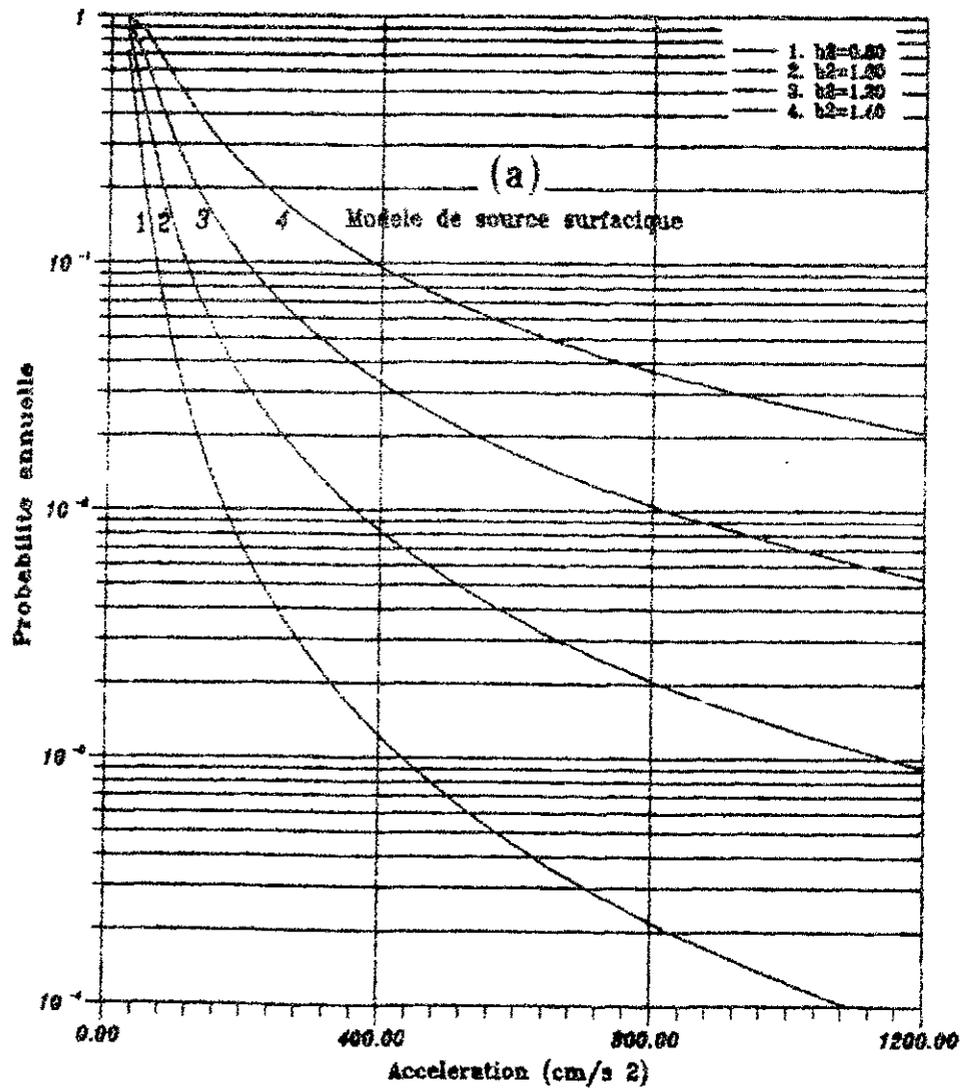


Fig.16 - Influence du parametre d'attenuation b2 sur le risque sismique

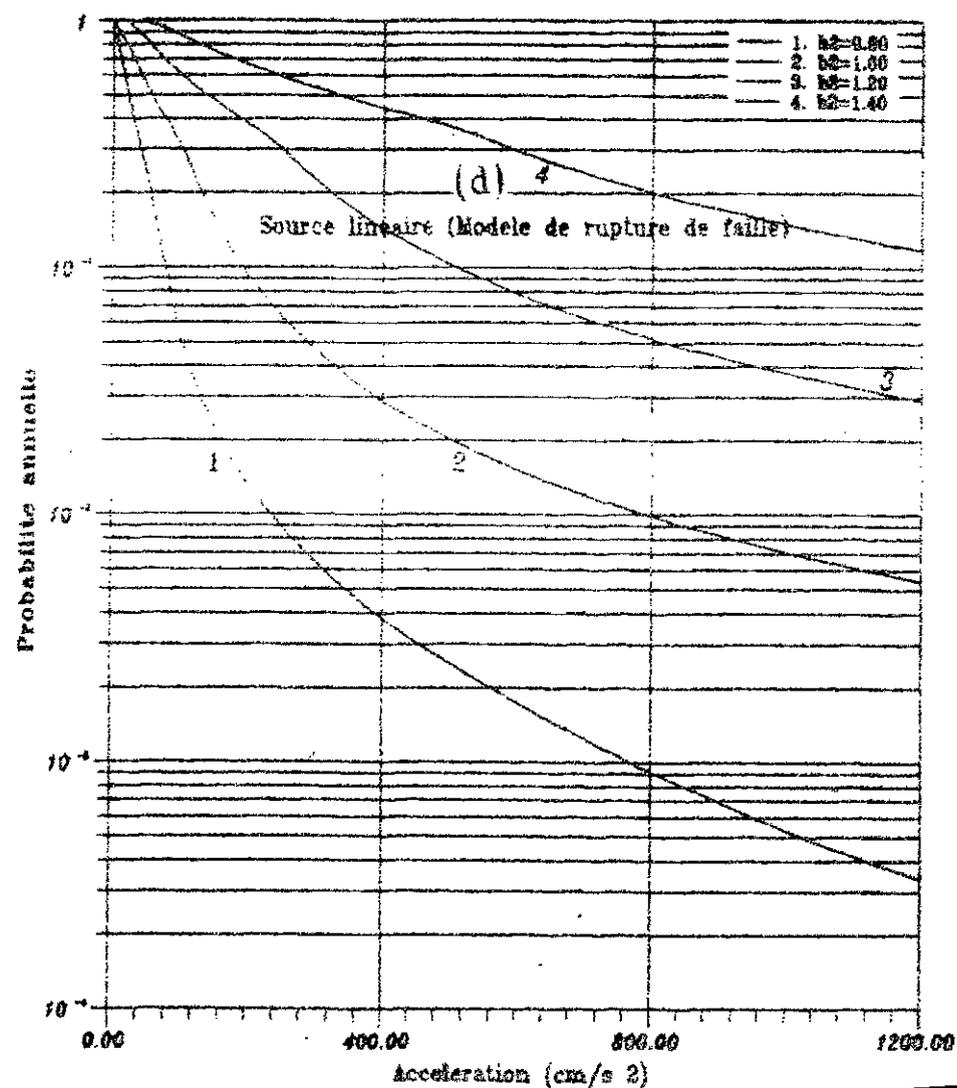
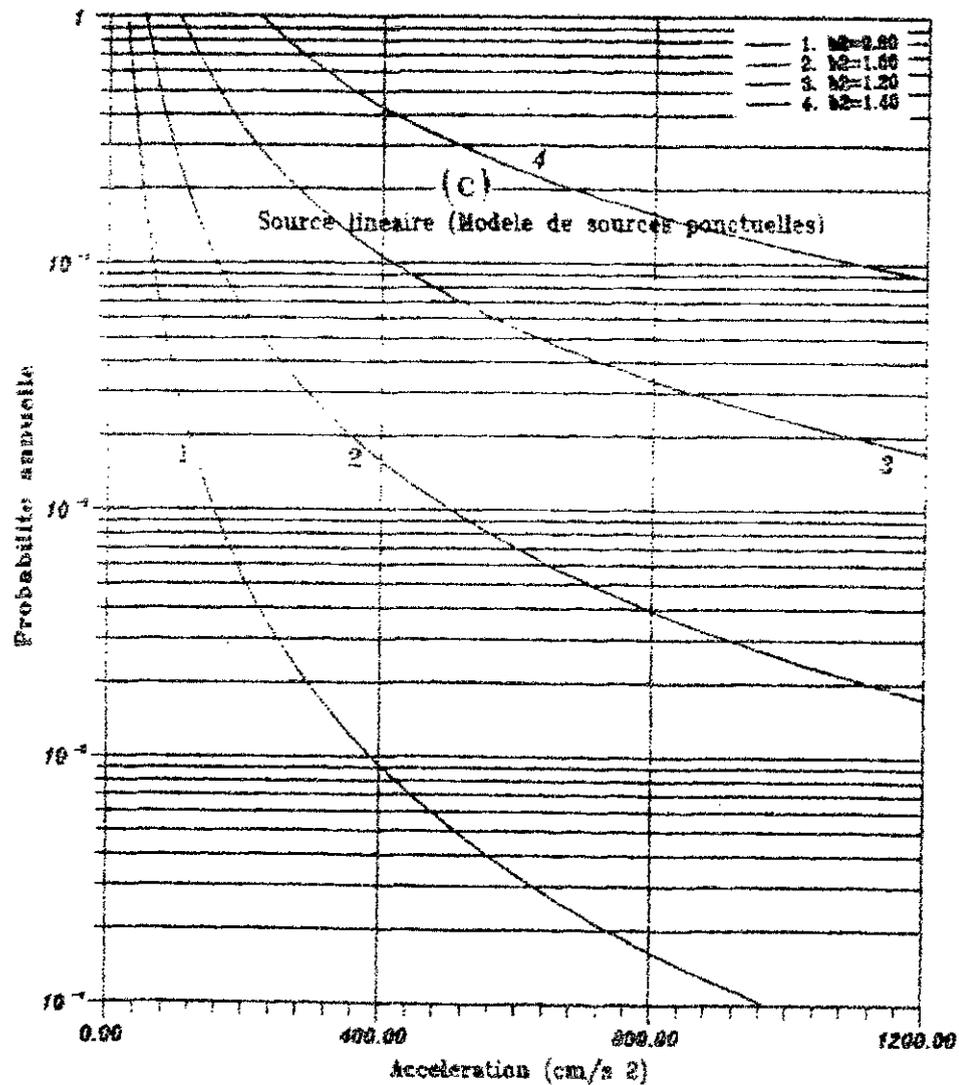


Fig.17 - Influence du rapport  $b_2/\beta$  sur le risque sismique

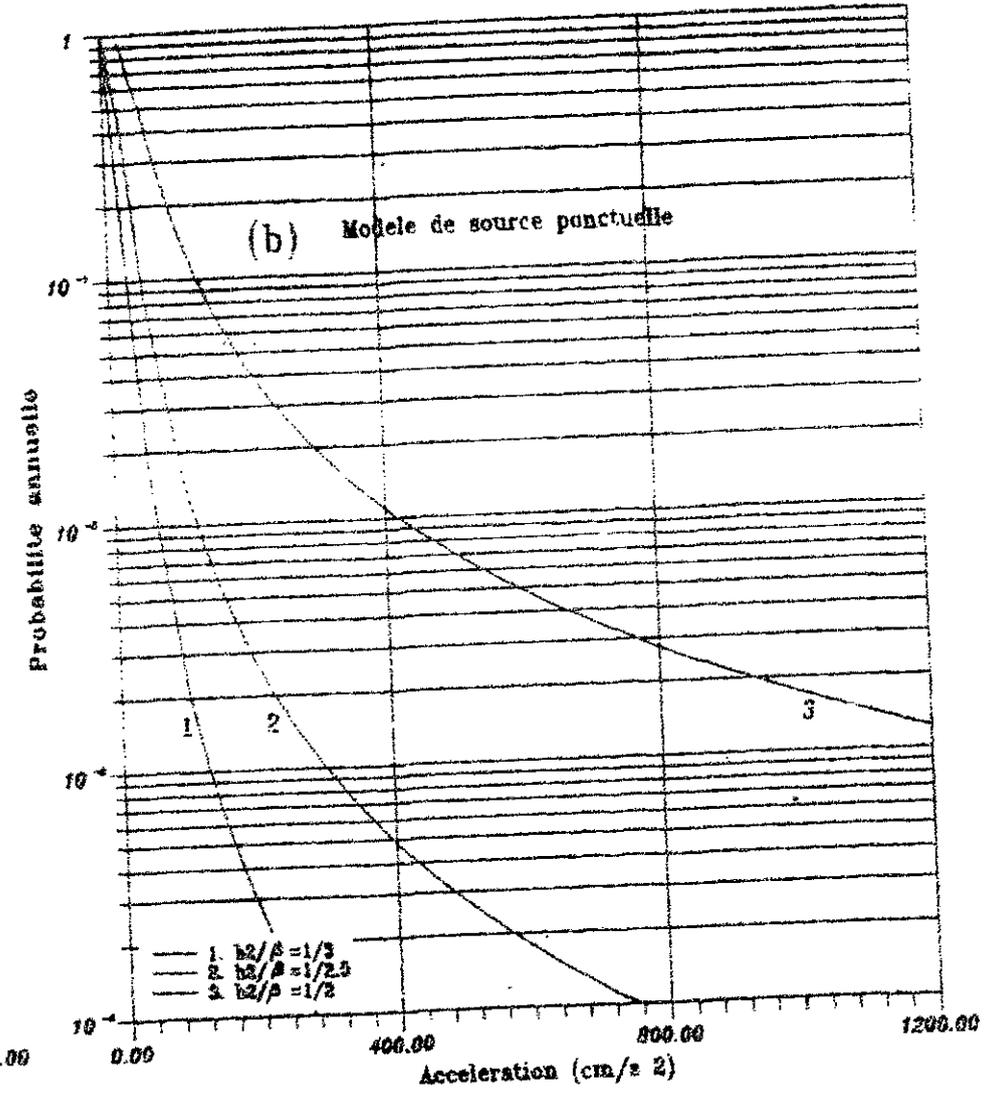
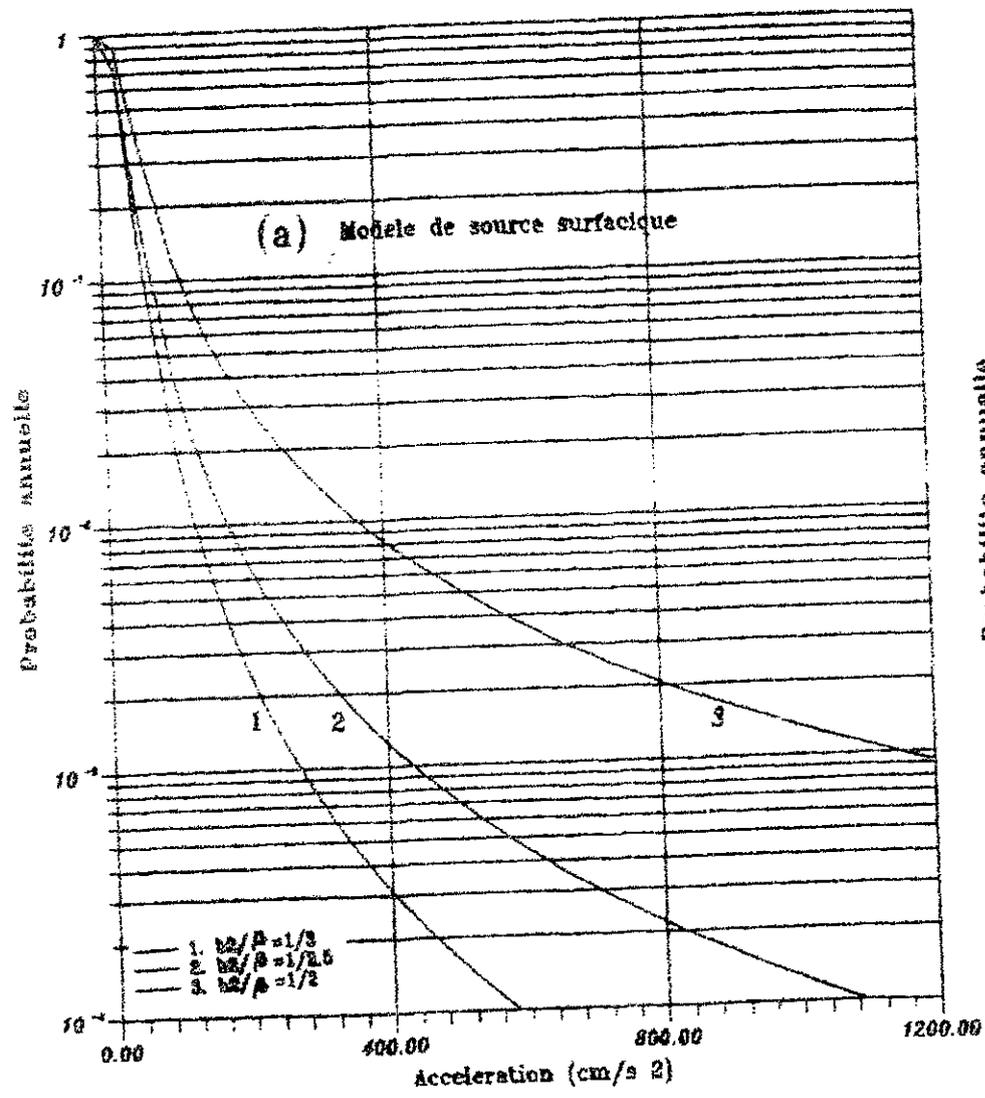
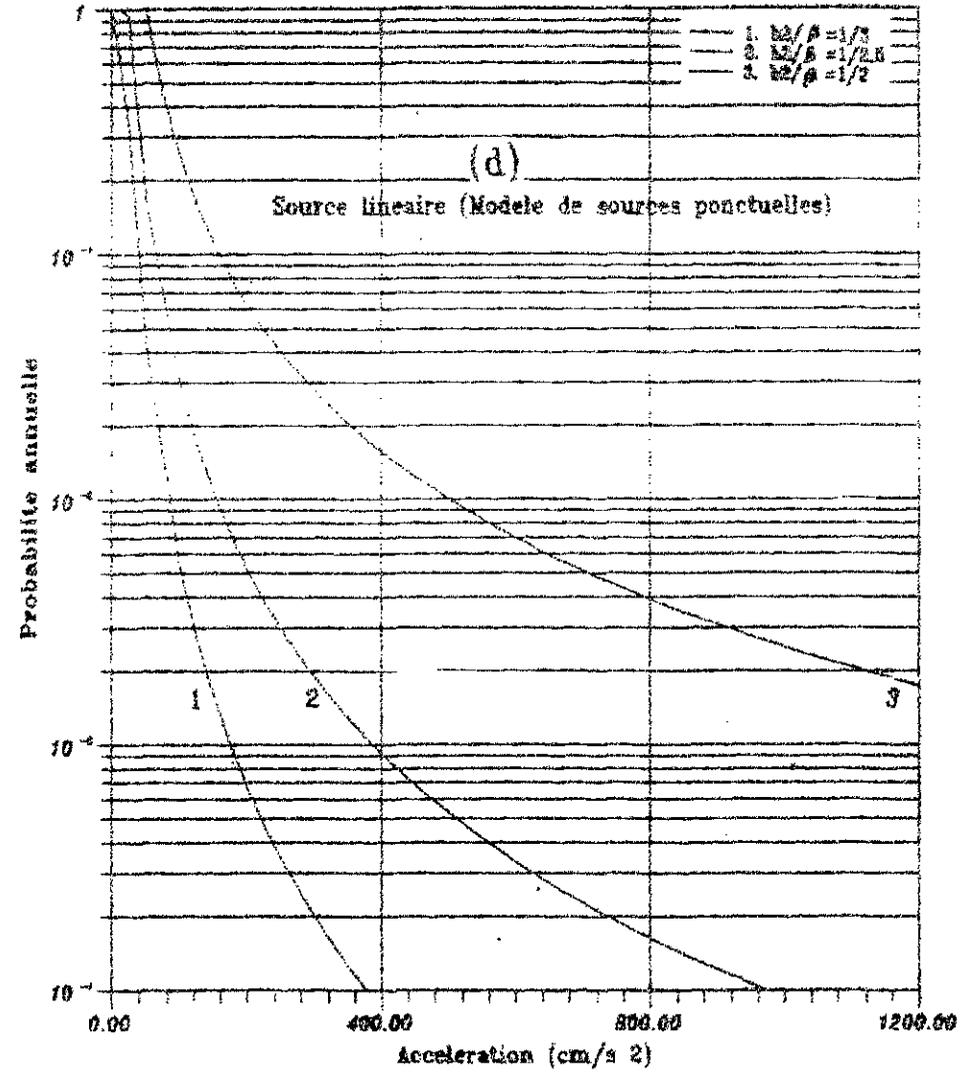
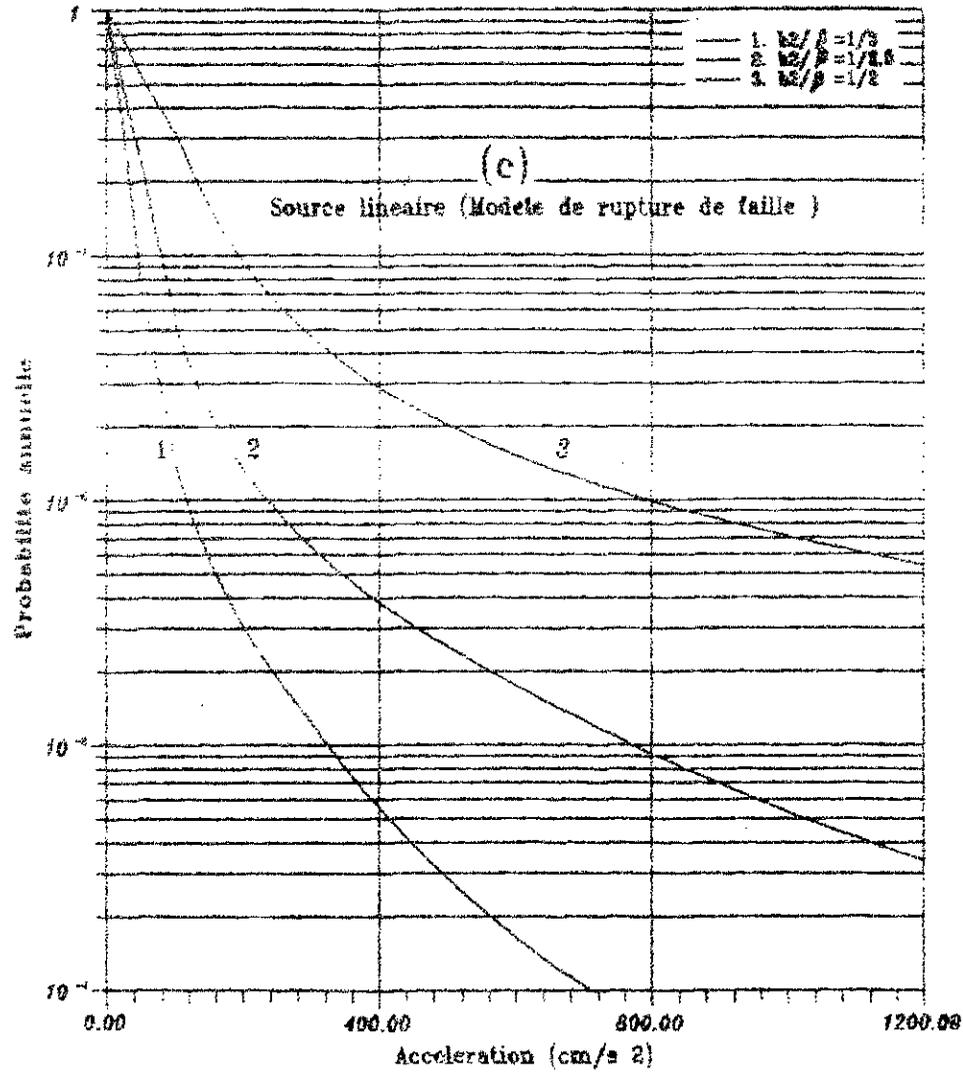


Fig.17 - Influence du rapport  $b_2/\epsilon$  sur le risque sismique



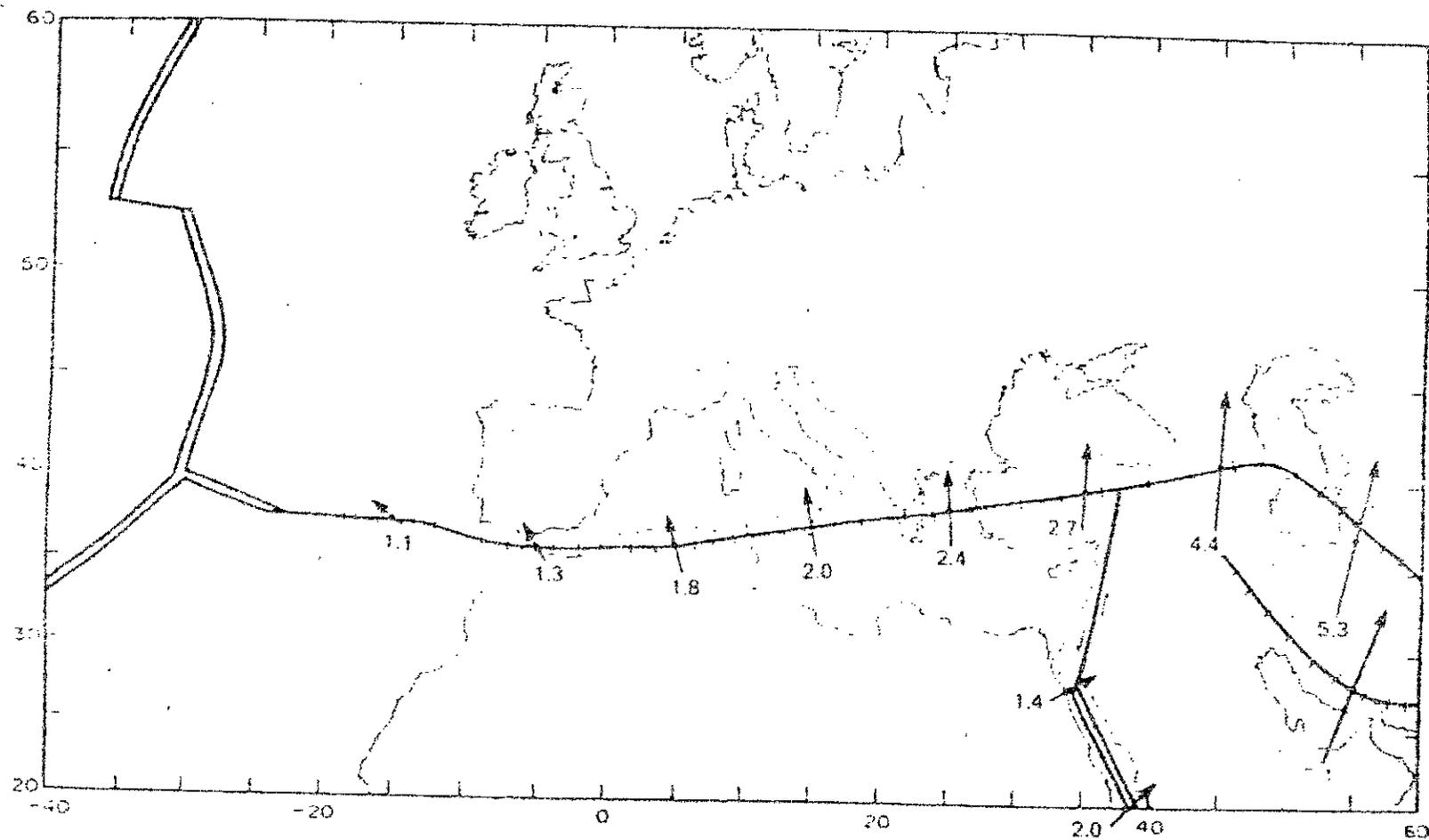
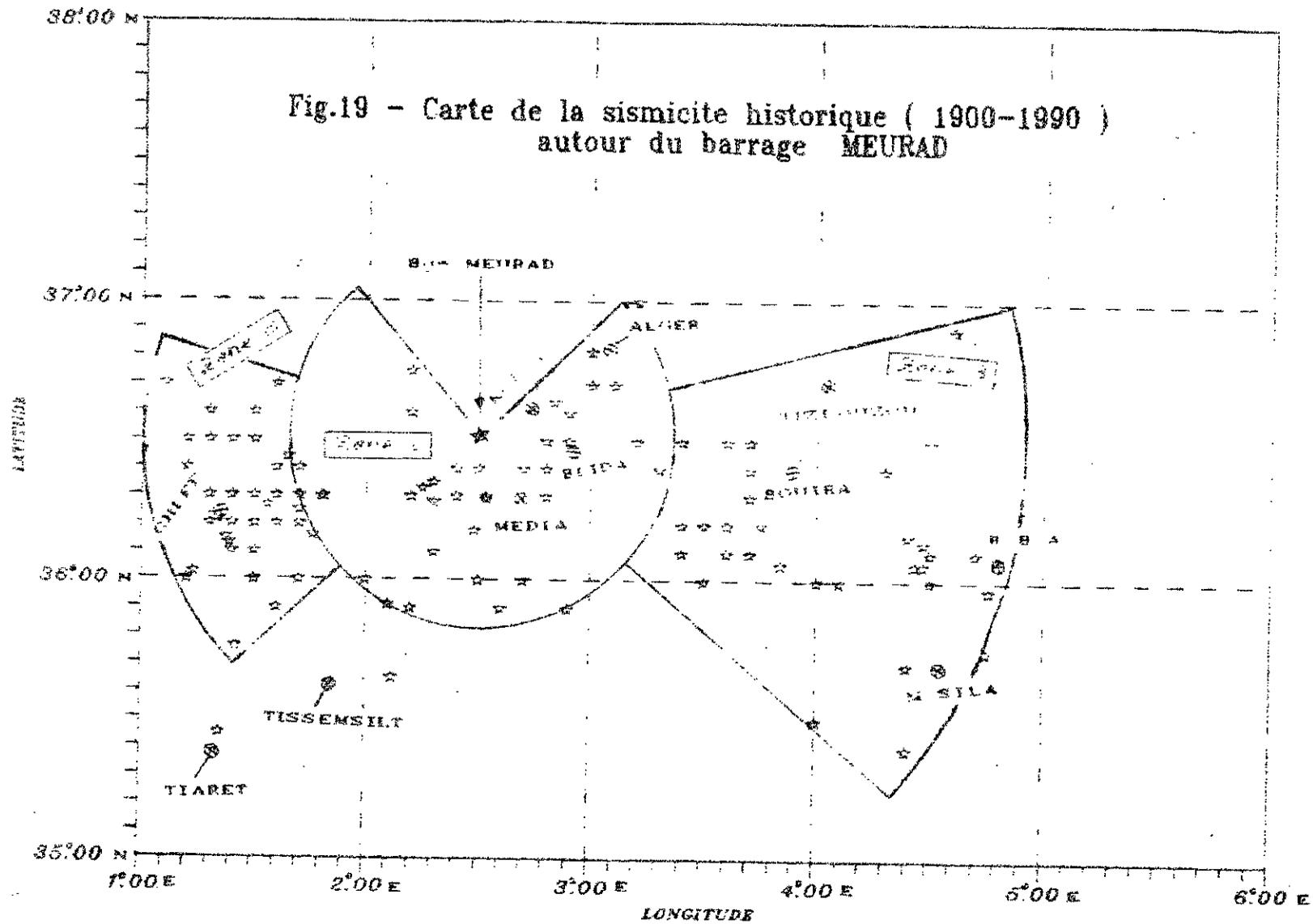
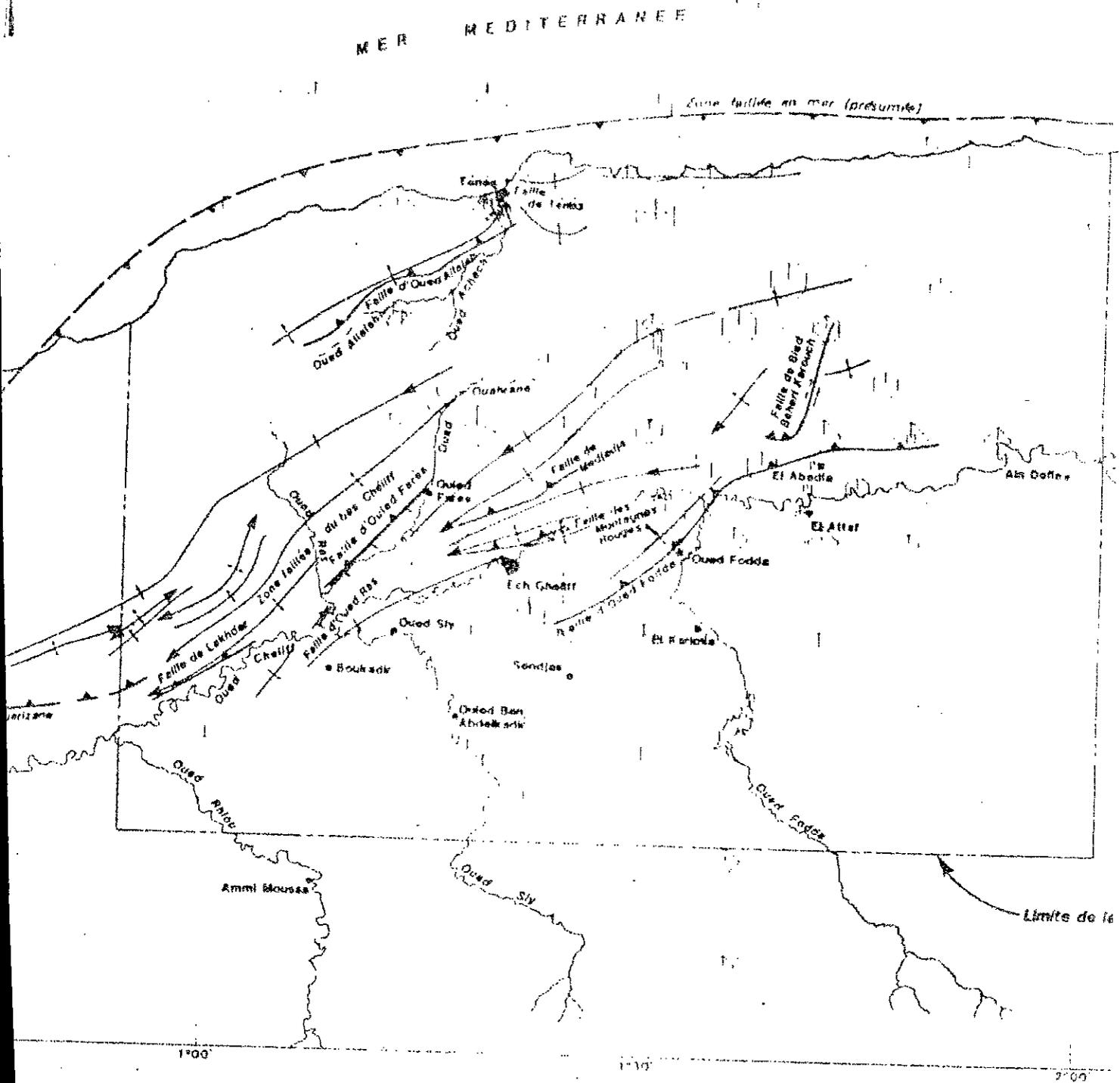


Fig.18 : Carte indiquant les mouvements relatifs des plaques (D'après McKENZIE, 1972). [10]

Fig.19 - Carte de la sismicite historique ( 1900-1990 )  
autour du barrage MEURAD



**Fig.20 : Localisation des failles dans la region d'EL ASNAM. [10]**



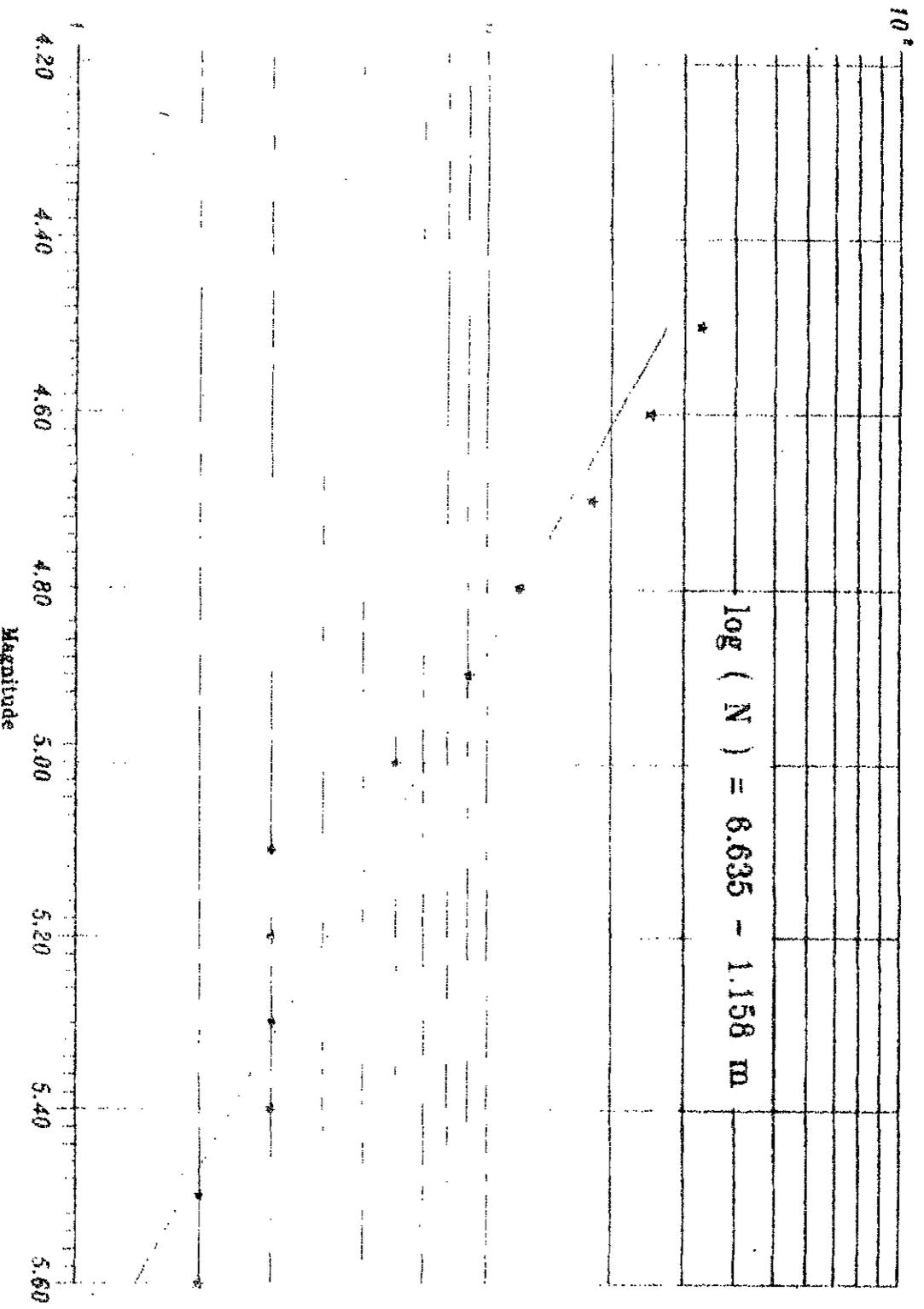


Fig. 21 - Loi de GUTENBERG et RICHTER de la zone (1)

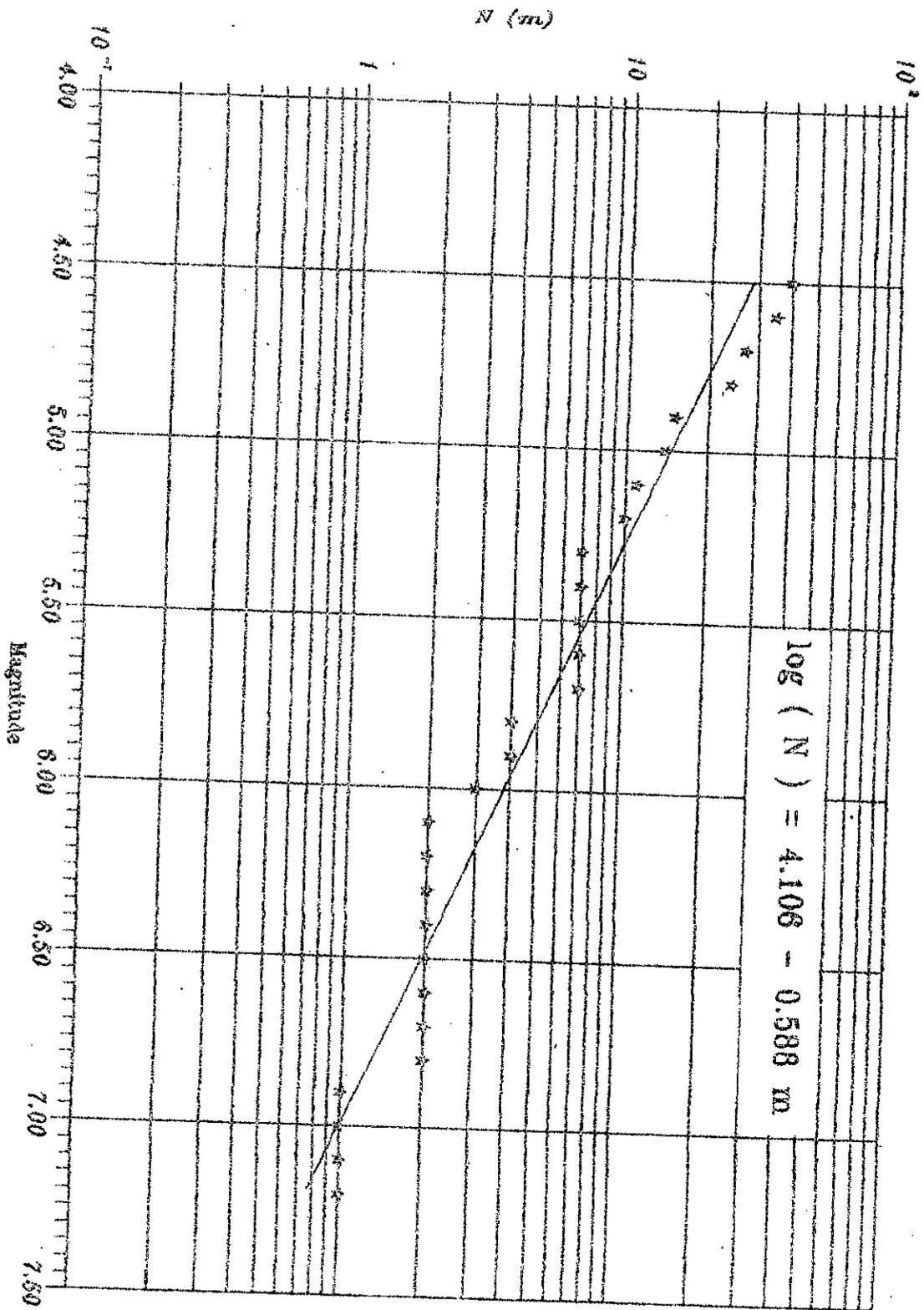


FIG. 22 - Loi de GUTENBERG et RICHTER de la zone (2)

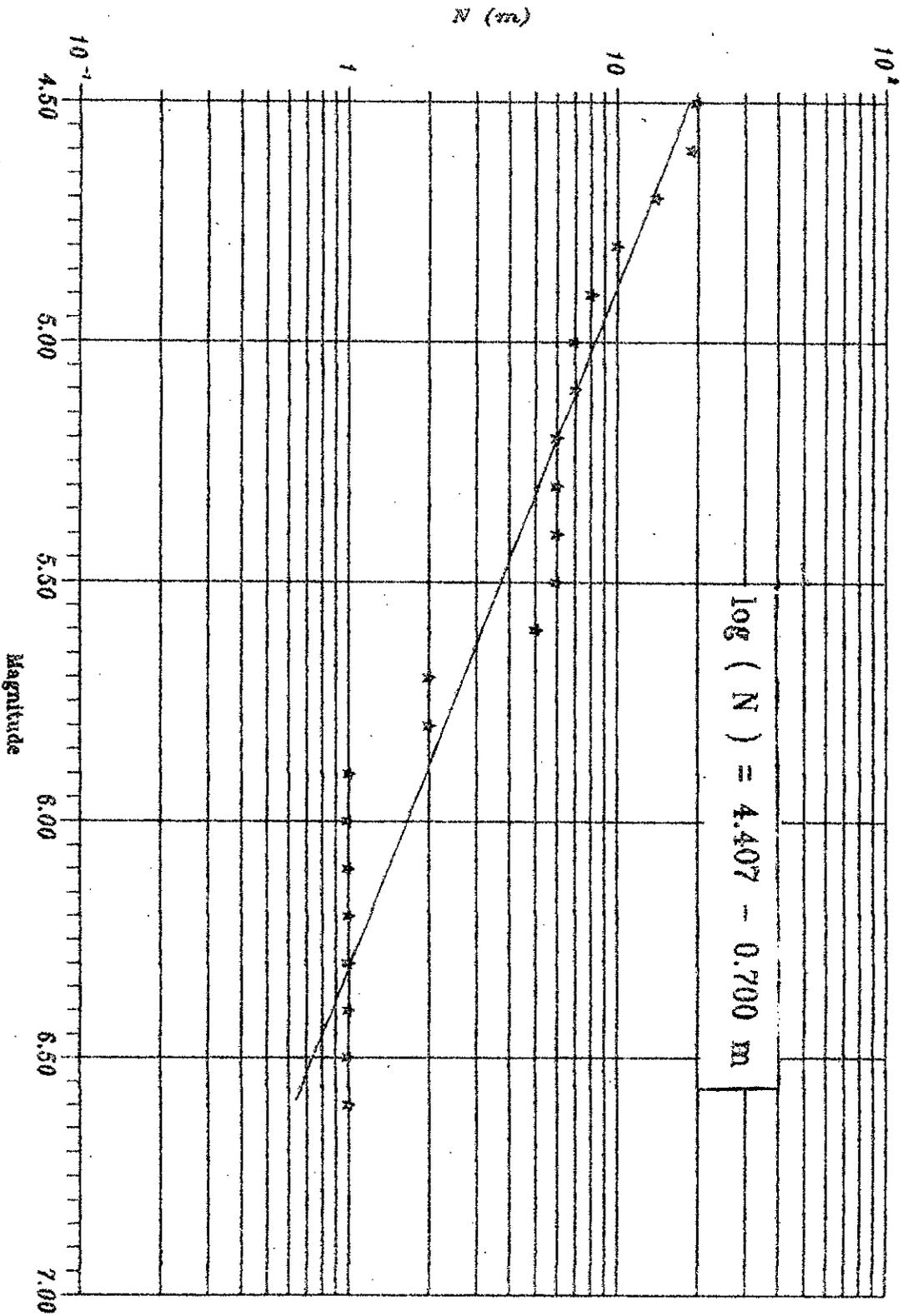


Fig. 23 - Loi de GUTENBERG et RICHTER de la zone (3)

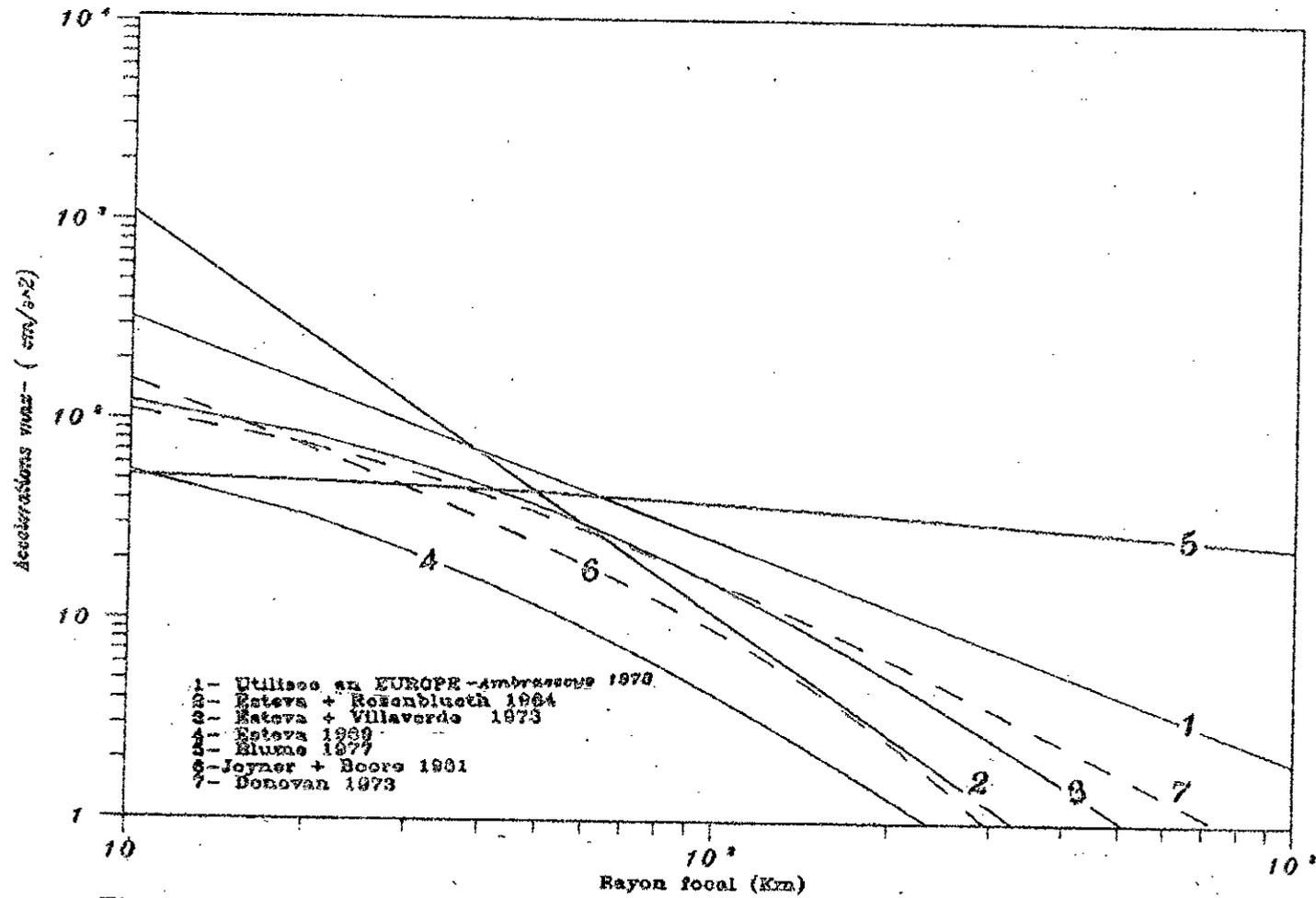


Fig.24 - Equations d'attenuation pour une magnitude M=5

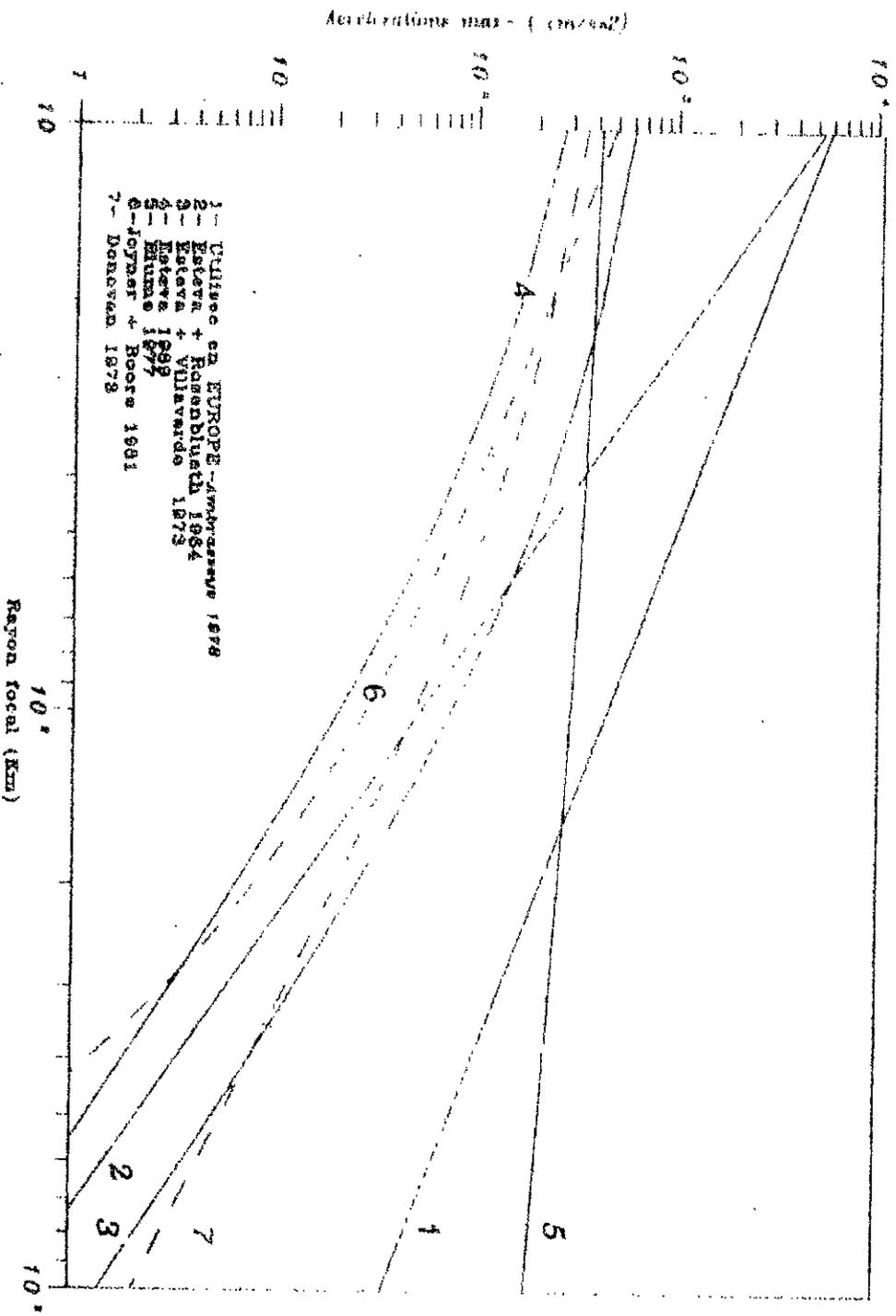
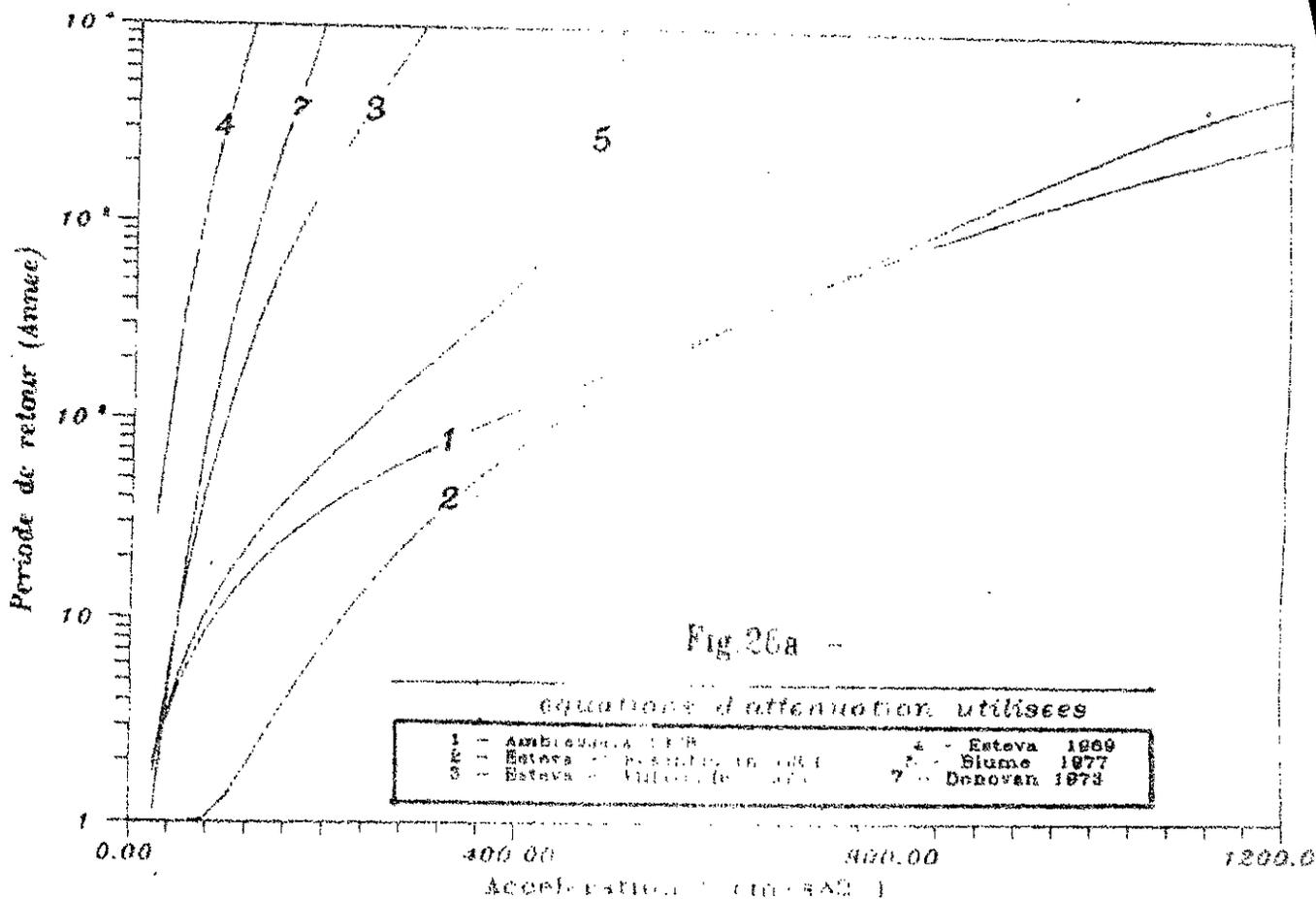
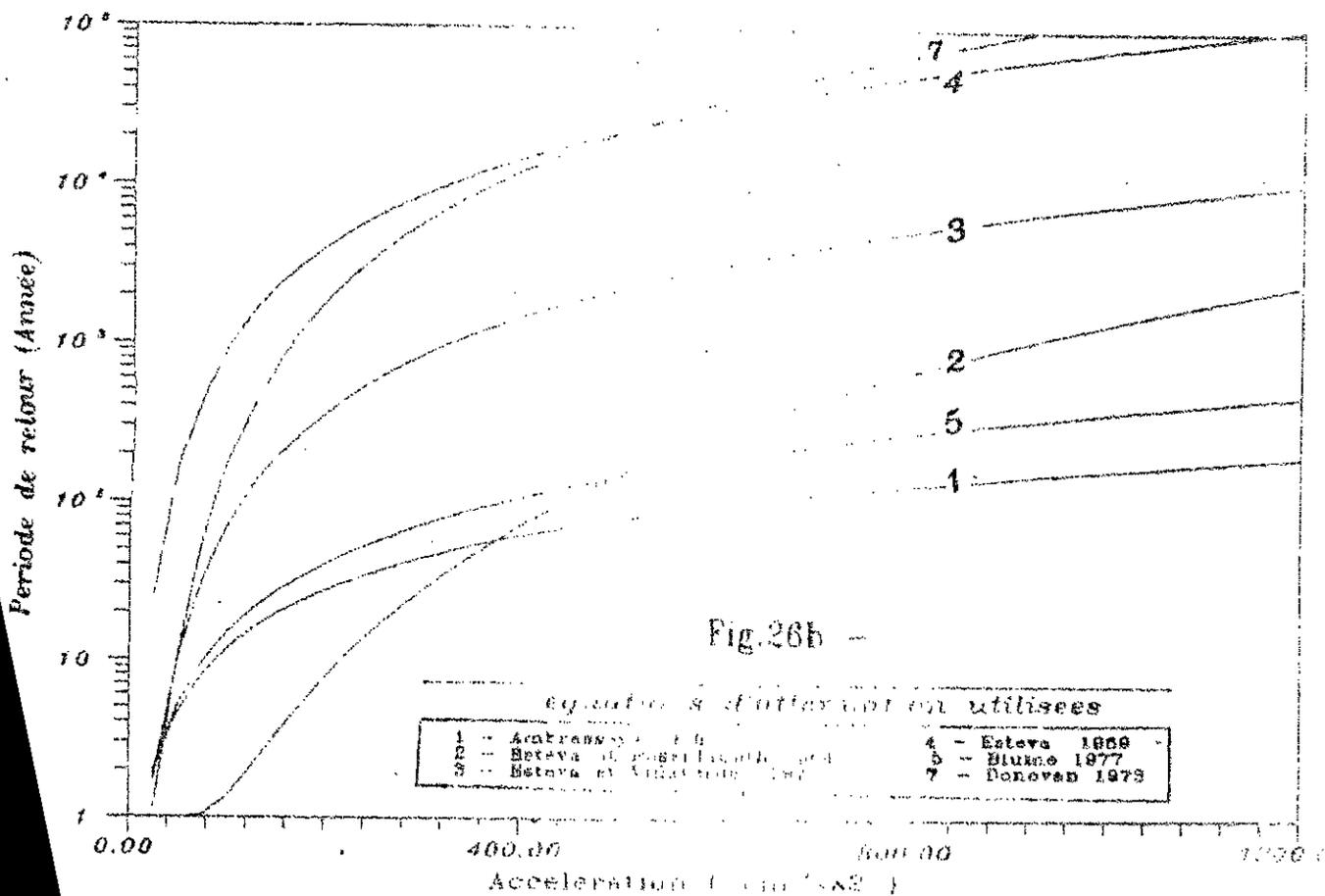


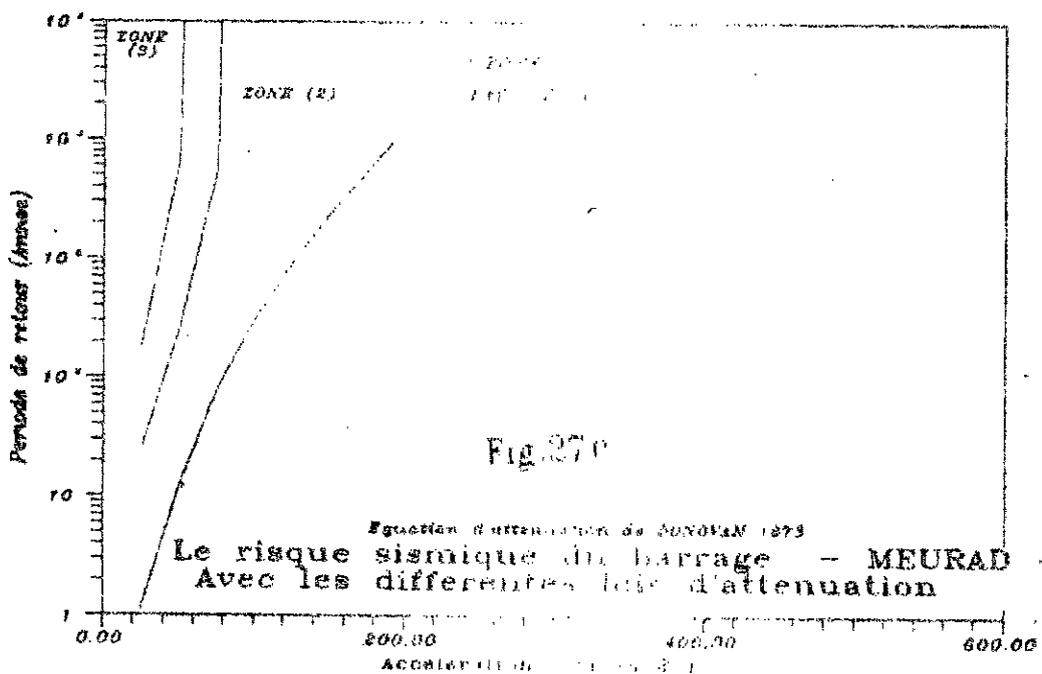
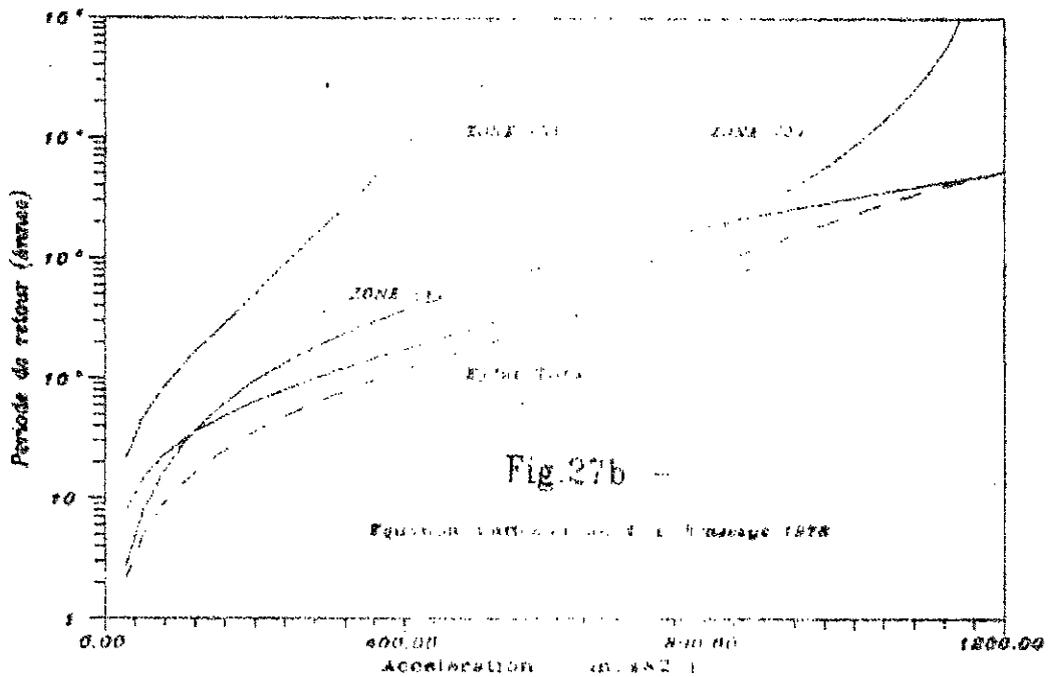
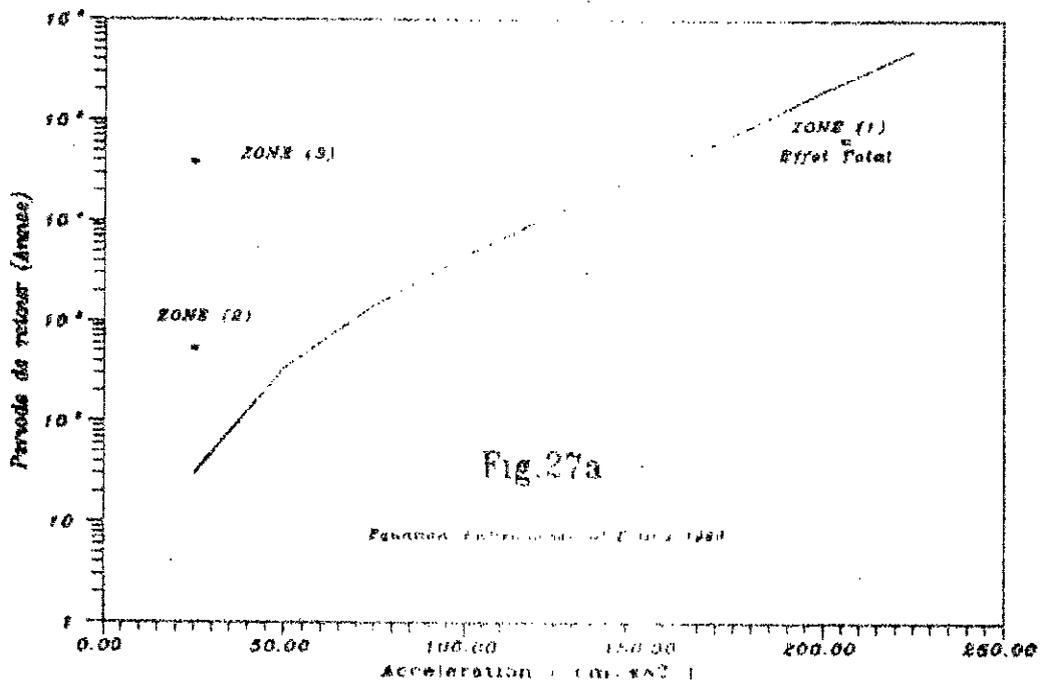
Fig.25 - Equations d'attenuation pour une magnitude M=7



Le risque sismique au Chili - MEURAD -  
(Distribution limitée des Magnitudes)



Le risque sismique au Chili - MEURAD -  
(Distribution limitée des Magnitudes)



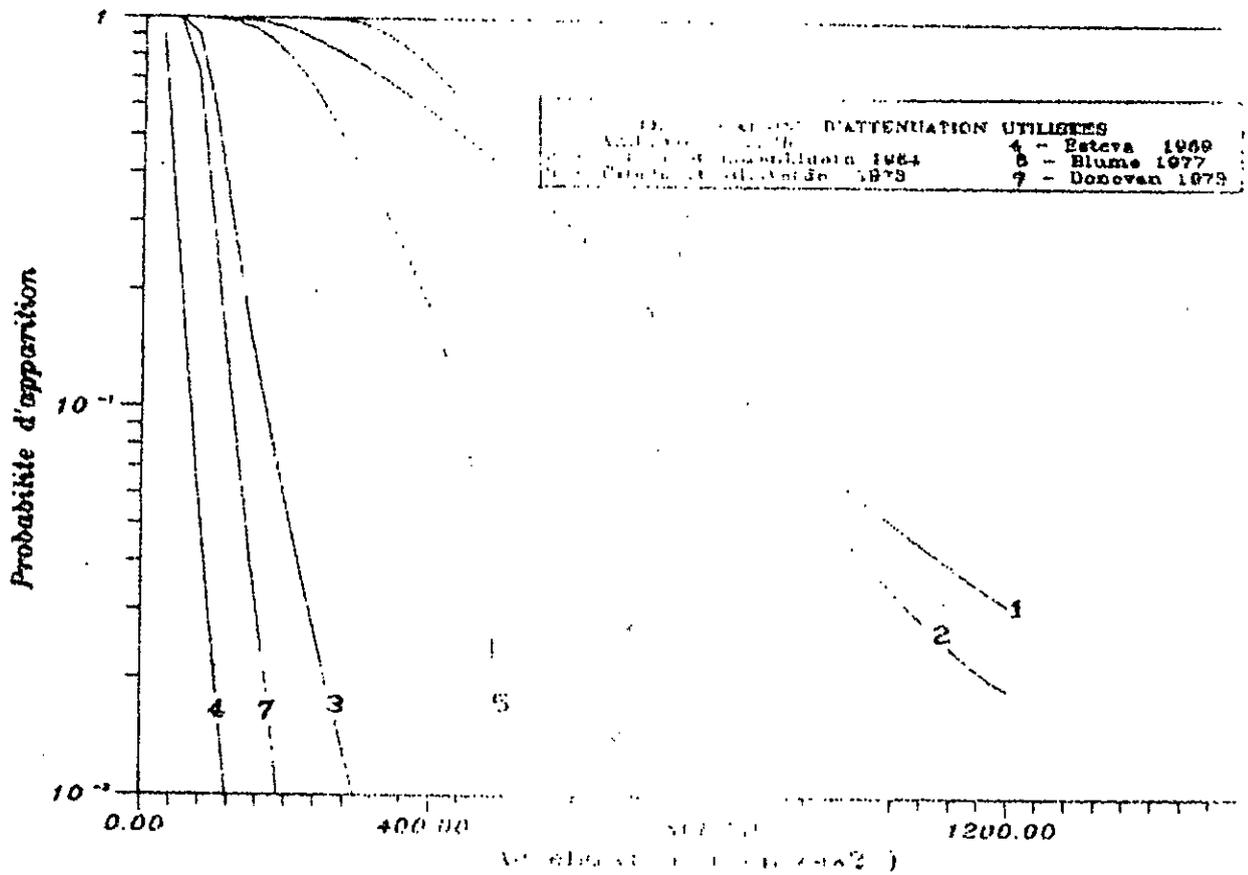


Fig.28 Probabilité d'apparition sur une Période de 100 années ( Barrage MEURAD )

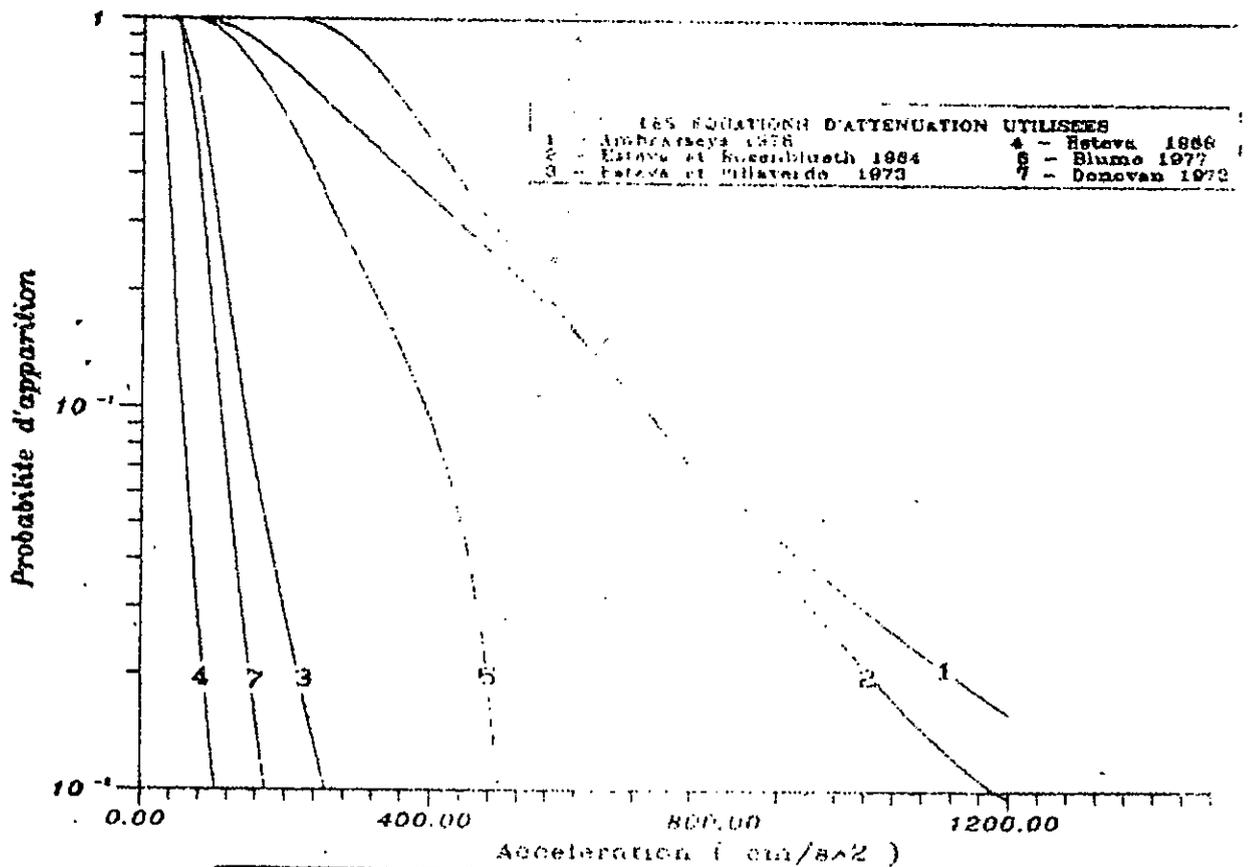


Fig.29 Probabilité d'apparition sur une Période de 50 années ( Barrage MEURAD )