

MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR
Direction de la Sécurité civile
Sous-direction des risques naturels
et technologiques

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
Délégation
aux risques majeurs



**CONTRIBUTION A L'ETUDE DES DANGERS D'INSTALLATIONS
INDUSTRIELLES A HAUT RISQUE SUR LES SITES DE
THANN, STEINBACH, CERNAY NORD ET SUD, STAFFELFELDEN
WITTELSHEIM, MULHOUSE OUEST ET EST, CHALAMPE, OTTMARSHEIM
VILLAGE NEUF ET HUNINGUE NORD ET SUD
(département du Haut-Rhin)**

**PRISE EN COMPTE DE L'ALEA SISMIQUE
DEFINITION DES SEISMES DE REFERENCE SELON UNE APPROCHE DETERMINISTE
DE L'ALEA SISMIQUE REGIONAL ET CALCUL DES SPECTRES DE REFERENCE**

Volume 1 "RESUME ET PRINCIPAUX RESULTATS DE L'ETUDE"

par J.L. BLES, P. GODEFROY, P. MOUROUX

*avec la collaboration de
J.F. GUEGUEN, P. HOANG-TRONG, J. LAMBERT, B. SAURET*

R 30365 ENV 4S 90

**BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINÈRES
Département Environnement et Risques**

Domaine de Luminy · 1 Av de Luminy - 13009 Marseille
Tél. : 91.41.24.46 - Télex : BRGM 401585 F
Télécopieur 91.41.15.10

MINISTERE DE L'INTERIEUR
Direction de la Sécurité civile
Sous-Direction des risques naturels
et technologiques
1, place Beauveau 75800 PARIS

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT
Délégation
aux risques majeurs
14, bd du Général Leclerc
92254 NEUILLY-SUR-SEINE

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DES DANGERS D'INSTALLATIONS INDUSTRIELLES
A HAUT RISQUE SUR LES SITES DE THANN, STEINBACH, CERNAY NORD ET SUD,
STAFFELFELDEN, WITTELSHEIM, MULHOUSE OUEST et EST, CHALAMPE,
OTTMARSHEIM, VILLAGE NEUF ET HUNINGUE NORD ET SUD
(département du Haut-Rhin)**

PRISE EN COMPTE DE L'ALEA SISMIQUE

DEFINITION DES SEISMES DE REFERENCE SELON UNE APPROCHE DETERMINISTE

DE L'ALEA SISMIQUE REGIONAL ET CALCUL DES SPECTRES DE REFERENCE

Volume 1 "RESUME ET PRINCIPAUX RESULTATS DE L'ETUDE"

par J.L. BLES, P.GODEFROY, P. MOUROUX
avec la collaboration de J.F. GUEGUEN, P. HOANG-TRONG,
J. LAMBERT, B. SAURET

R 30365 ENV 4S 90

janvier 1990

R E S U M E

Cette étude effectuée à la demande de la Délégation aux Risques Majeurs, Ministère de l'Environnement, et de la Direction de la sécurité civile, Ministère de l'Intérieur, vise à estimer les paramètres permettant de prendre en compte l'aléa sismique, dans le cadre des "études des dangers" appliquées à des unités industrielles classées "à haut risque", conformément à la directive européenne "SEVESO", sur les sites de THANN, STEINBACH, CERNAY Nord et Sud, STAFFELFELDEN, WITTELSHEIM, MULHOUSE Ouest et Est, CHALAMPE, OTTMARSHEIM, VILLAGE NEUF et HUNINGUE Nord et Sud (Haut Rhin).

La démarche suivie est conforme à la pratique réglementaire en matière de sûreté nucléaire (règle fondamentale de sûreté n°I-2c dont les principes sont étendus aux installations industrielles "à haut risque") et s'appuie sur une évaluation déterministe de l'aléa sismique régional, reposant sur un bilan de la sismicité et une analyse sismotectonique conduits dans un rayon de plus de 150 kilomètres autour des sites (présentés en détail dans les volumes 2 à 7 du rapport).

Les résultats, exprimés sous forme des caractéristiques focales des séismes de référence (S.M.H.V. : séisme maximum historiquement vraisemblable) et des intensités des S.M.H.V. et S.M.S. (séisme majoré de sécurité) proches et lointains, sur chaque site, sont résumés sur les tableaux 4, 5 et 6 du volume 1.

L'incertitude dont souffre l'estimation de ces paramètres a été, autant que faire se peut, mise en évidence. Ainsi, les valeurs proposées en guise de conclusion, restent sujettes à une discussion, dans une marge dont les limites ont été fixées.

Trois classes de spectres élastiques horizontaux ont pu être mises en évidence pour l'ensemble des sites. Les spectres S.M.H.V. et S.M.S. sont ainsi donnés pour ces trois classes, au paragraphe 5. Ces spectres doivent être considérés au "rocher horizontal affleurant" et il conviendra éventuellement de les modifier pour tenir compte des conditions géologiques et géotechniques locales propres à chaque site, ce qui constitue la phase d'étude de l'aléa sismique local.

Enfin, il conviendra de replacer cette phase d'étude de l'aléa dans la chaîne complète d'étude du risque sismique dont elle ne peut être dissociée (cf "conclusions").

S O M M A I R E

1. INTRODUCTION - PRISE EN COMPTE DE L'ALEA SISMIQUE DANS LE CADRE D'UNE ETUDE DES DANGERS D'INSTALLATIONS CLASSEES	5
1.1. ETUDES DES DANGERS ET DIRECTIVE "SEVESO"	5
1.2. ALEA SISMIQUE ET OUVRAGES A "HAUT RISQUE"	7
1.3. ORIENTATION RETENUE DANS L'ETUDE POUR LA PRISE EN COMPTE DE L'ALEA SISMIQUE	14
2. BILAN DE LA SISMICITE REGIONALE	18
2.1. DONNEES MACROSISMIQUES HISTORIQUES ET CONTEMPORAINES	18
2.1.1. DONNEES UTILISEES	18
2.1.2. PRINCIPALES ZONES SISMIQUES INDIVIDUALISABLES A L'ECHELLE REGIONALE	18
2.1.3. CONCLUSION : SEISMES HISTORIQUES INTERESSANT LES SITES	20
2.2. DONNEES INSTRUMENTALES	20
2.2.1. DONNEES UTILISEES	20
2.2.2. APPORT DE LA SISMICITE INSTRUMENTALE	21
2.3. CONCLUSIONS	21
3. ANALYSE SISMOTECTONIQUE REGIONALE	22
3.1. CADRE STRUCTURAL	22
3.2. DONNEES NEOTECTONIQUES	24
3.3. CONCLUSIONS	25
3.4. DEFINITION D'UNITES SISMOTECTONIQUES	26
4. DETERMINATION DES SEISMES DE REFERENCE (SMHV ET SMS) SUR CHAQUE SITE ET DE LEURS PRINCIPALES CARACTERISTIQUES	28
4.1. UNITES SISMOTECTONIQUES A CONSIDERER POUR CHAQUE SITE	28
4.2. CARACTERISTIQUES FOCALES DES SEISMES DE REFERENCE ASSOCIES AUX UNITES SISMOTECTONIQUES RESTANT A CONSIDERER	30
4.2.1. PROFONDEUR FOCALE	31
4.2.2. MAGNITUDE	31
4.3. DETERMINATION DES SEISMES DE REFERENCE RETENUS SUR CHAQUE SITE	33
5. CALCUL DES SPECTRES HORIZONTAUX DE REPONSE ELASTIQUES DES SMHV ET DES SMS POUR CHACUN DES SITES	38
6. CONCLUSIONS	53

BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 - Distribution des probabilités de dépassement de l'intensité macrosismique I supposées représentatives des différentes zones de sismicité	11
Fig. 2 - "Zonage physique" de la France pour l'application des règles parasismiques de construction (ouvrages "courants" ou "à risque normal")	15

Fig. 3 - Coupe de la croûte terrestre sous le fossé rhéno-méridional : d'après les interprétations des explosions sismiques effectuées depuis 1966 (Sittler, in Debelmas, 1974)	23
Spectre de réponse élastique horizontal au "rocher horizontal affleurant" du SMHV :	
Fig. 4 - classe I	41
Fig. 5 - classe II	43
Fig. 6 - classe III	45
Spectre de réponse élastique horizontal au "rocher affleurant" du SMS :	
Fig. 7 - classe I	47
Fig. 8 - classe II	49
Fig. 9 - classe III	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1a - Accélérations nominales a_w proposées pour les règles parasismiques françaises en préparation	12
Tableau 1b - Coefficients d'intensité, proposés pour les règles parasismiques françaises en vigueur	12
Tableau 2 - Représentation schématique du problème du dimensionnement des installations "à haut risque"	14
Tableau 3 - Unités sismotectoniques retenues et distances aux sites des séismes de référence	29
Tableau 4 - Caractéristiques focales des séismes de référence	32
Tableau 5 - Détermination des SMHV par groupements de sites	36
Tableau 6 - Synthèse des configurations de calcul des spectres des SMHV après regroupement des cas équivalents	37
Spectre de réponse élastique horizontal au "rocher horizontal affleurant" du SMHV :	
Tableau 7 - classe I	42
Tableau 8 - classe II	44
Tableau 9 - classe III	46
Spectre de réponse élastique horizontal au "rocher horizontal affleurant" du SMS :	
Tableau 10 - classe I	48
Tableau 11 - classe II	50
Tableau 12 - classe III	52

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 - Politique de l'administration en matière de protection parasismique des établissements industriels à haut niveau de risque (J. Mansot, 1987)
- Annexe 2 - Principes de détermination de l'intensité de calcul optimale (d'après Despeyroux et Godefroy, 1986).

LISTE DES PLANCHES HORS TEXTE

- Planche I - Carte de sismicité historique à 1/1 000 000
- Planche II - Carte de sismicité instrumentale à 1/1 000 000
- Planche III - Schéma sismotectonique régional à 1/1 000 000
- Planche IV - Carte des unités sismotectoniques à 1/1 000 000

1. INTRODUCTION

PRISE EN COMPTE DE L'ALEA SISMIQUE DANS LE CADRE D'UNE ETUDE DES DANGERS D'INSTALLATIONS CLASSEES

1.1. ETUDES DES DANGERS ET DIRECTIVE "SEVESO"

La présente étude est effectuée à la demande de la direction de la Sécurité Civile et de la Délégation aux Risques Majeurs dans le cadre général des "études des dangers" à développer sur les sites d'unités industrielles dites "à haut risque", de THANN, STEINBACH, CERNAY Nord et Sud, STAFFELFELDEN, WITTELSHEIM, MULHOUSE Ouest et Est, CHALAMPE, OTTMARSHEIM, VILLAGENEUF et HUNINGUE Nord et Sud (Département du Haut-Rhin).

Ces études des dangers sont une des premières applications concrètes de la directive européenne relative aux risques d'accidents majeurs de certaines activités industrielles, dite "directive SEVESO"*, à 327 usines implantées sur le territoire français (322 en métropole et 5 dans les départements d'Outre-mer) que le Ministère de l'environnement a recensées comme devant répondre à ses exigences.

Prenant place dans la procédure d'autorisation préalable délivrée par le Commissaire de la République pour l'exploitation des établissements soumis à la législation relative aux installations classées pour la protection de l'environnement**, ces études des dangers permettent l'application du texte communautaire, en jouant le rôle de la "notification préalable à l'exploitation de certaines installations dangereuses" qu'il prévoit.

Le Ministre de l'environnement a adressé ses instructions aux Commissaires de la République***, en précisant le contenu à attendre des études des dangers, autant en regard du fonctionnement propre des établissements qu'en ce qui concerne la prise en compte d'évènements d'origine externe comme inondations, gel, séismes, chutes d'avion, voire actes de malveillance, etc.

La directive "SEVESO" prévoit la mise à jour régulière des études des dangers déjà effectuées et la réalisation de telles études, avant juillet 1989, pour les installations existantes qui n'en sont pas dotées.

Ces études doivent permettre d'identifier dans les usines, les sources de risques, les scénarios d'accident envisageables et leurs effets sur le voisinage. Les accidents peuvent être d'origine interne ou résulter d'une cause externe telle que séismes, chutes d'avion et risques liés à la proximité d'installations dangereuses ou d'ouvrages de transport, sans omettre les actes malveillants et les attentats.

* 82/501/CEE du 24 juin 1982,

** loi du 19 juillet 1976 et décret du 21 septembre 1977,

*** circulaire du 28 décembre 1983

La circulaire ministérielle suggère également de prendre en considération la combinaison d'évènements élémentaires, pouvant rester peu graves en eux-mêmes mais dont la conjonction se traduit par un accident majeur. De telles combinaisons peuvent être décrites de façon systématique par la construction d'arbres de défaillance (Fault tree analysis : F.T.A.) ou d'arbres de cause ou d'évènements (Event tree analysis : E.T.A.), ce qui suppose que soit associée à chaque évènement élémentaire une probabilité d'occurrence.

Enfin l'étude des dangers doit comporter une analyse des conséquences des accidents envisagés, en décrivant la nature et l'extension.

Pour certaines industries présentant les risques les plus importants la décision d'autorisation accordée à l'exploitant sera subordonnée à la fourniture d'une véritable étude de sûreté comportant une étude des dangers très complète, justifiée par un rapport de sûreté et la contre-expertise de ce rapport par un organisme extérieur choisi en accord avec l'administration.

Des circulaires et directives précédentes, il ressort que si les séismes sont à intégrer comme évènements élémentaires pouvant entrer dans une chaîne conduisant à un accident, il n'est pas précisé, à ce niveau des textes, sous quelle forme l'aléa sismique doit être défini.

La circulaire du chef de service de l'environnement industriel du 25 mars 1986*, adressée aux DRIR, apporte les compléments nécessaires relatifs aux orientations à suivre :

- "pour les installations nouvelles, les moyens de prévention doivent, en première analyse, être calculés pour permettre d'assurer une absence d'effets sur le voisinage, de séismes du niveau S.M.S. (séisme majoré de sécurité), soit, sur l'échelle MSK, un degré de plus que le niveau S.M.H.V. (séisme maximum historiquement vraisemblable).

- pour les installations existantes visées par l'article 5 de la directive SEVESO, la sismicité du site doit être évaluée ; la tenue des installations à divers niveaux de séismes et en particulier, au S.M.S., doit être étudiée et le coût des améliorations possibles estimé".

* Circulaire du Chef du Service de l'Environnement industriel à MM. les directeurs régionaux de l'industrie et de la recherche, 25 mars 1986. Ministère de l'environnement, Direction de la prévention des pollutions, n°1293/DPP/SEI/TD/MF.

Enfin un projet de texte préparé par Monsieur MANSOT* (DRIR de l'Isère, où a été mise en oeuvre une première application pratique de la prise en compte des actions sismiques dans le cadre de la directive SEVESO, sur les sites industriels de Pont-de-Claix (Rhône-Poulenc), Jarrie et Brignoud (Atochem)), constitue également un guide de réflexion précieux (cf. annexe 1).

Il convient donc dans un premier temps de détailler quelque peu cette question, qui conditionne la façon dont notre étude devra être menée.

1.2. ALEA SISMIQUE ET OUVRAGES A "HAUT RISQUE"

Concernant les principes de sécurité des constructions en zone sismique, il est possible d'emprunter à J. DESPEYROUX (1, 2, 3) quelques énoncés posant clairement le problème.

L'action sismique se singularise par les particularités suivantes :

- c'est une action qui entraîne des conséquences catastrophiques, lorsqu'elle atteint une certaine intensité mais qui ne se manifeste que très rarement**, en un point donné, avec cette intensité ("action accidentelle").

- c'est une action multiforme dont la description, même très simplifiée, nécessite l'introduction de plusieurs paramètres susceptibles de varier indépendamment les uns des autres dans de fortes proportions et présentant eux-mêmes une forte dispersion.

La nécessité de couvrir les multiples éventualités qui en résultent pose la question de la rentabilité des suppléments de dépense engagés en terme d'analyse coût/bénéfices.

A cet égard, il est d'usage d'opérer dès l'abord, une distinction entre :

- les ouvrages "à haut risque", pour lesquels un dommage, même mineur, peut avoir pour la population ou l'environnement des conséquences catastrophiques et hors de proportion avec les dégâts subis par l'ouvrage lui-même (par exemple : industries chimiques traitant ou stockant des produits hautement toxiques et susceptibles de se répandre, industries nucléaires, barrages, etc.).

* J. MANSOT, 1987 - Politique de l'administration en matière de protection parasismique des établissements industriels à haut niveau de risque. Centre de formation et de documentation sur l'environnement industriel (C.F.D.E.), stage n° 23-87 "Risques sismiques ; prise en compte dans la construction des bâtiments et équipements industriels", Paris, 8/9 décembre 1987.

** A l'échelle de la durée de vie moyenne des ouvrages.

- les ouvrages à risque dit "normal", pour lesquels les conséquences d'un sinistre restent circonscrites à l'ouvrage lui-même, ses occupants et son environnement tout à fait immédiat.

Pour les premiers, on est conduit, par la force des choses et quoi qu'il en coûte, à rechercher une sécurité consistant à maintenir à un niveau exceptionnellement bas les probabilités d'accident.

Pour les seconds, qui représentent l'immense majorité des constructions, on doit se contenter d'objectifs moins ambitieux en ce qui concerne non seulement les probabilités de sinistre mais aussi les exigences de comportement. En particulier, on est conduit à accepter que les structures puissent subir des déformations se situant franchement dans le domaine post-élastique avec toutes les conséquences qui peuvent en résulter : fissurations, destructions de certains éléments non structuraux, déformations permanentes, etc.

Ceci amène à bien distinguer les principes de protection associés à l'une et l'autre catégories d'ouvrages :

- "protection statistique" des ouvrages courants (à risque "normal") entrant dans le champ d'application des règles parasismiques de construction, dont les résultats doivent s'apprécier globalement en fonction du comportement d'un ensemble de bâtiments soumis à l'épreuve du tremblement de terre (par exemple à l'échelle d'une ville) ; un certain pourcentage d'apparition de désordres structuraux nécessitant réparation, voire d'effondrements graves est ainsi toléré ; il dépend de la protection nominale imposée forfaitairement par la Puissance Publique traduite sous forme d'exigences de comportement.

- "protection intrinsèque" des ouvrages "à haut risque", définissant, au cas par cas, des exigences de sécurité pour chaque construction considérée individuellement, en fonction de la nature du risque associé : élément constituant le risque et liens avec le comportement de la structure.

Cependant, dans tous les cas, le niveau de protection retenu traduira un choix : celui de la sévérité de l'action contre laquelle on entend se prémunir, ici celle de la secousse sismique, résultant d'un compromis (ou d'un arbitrage) entre :

. des critères physiques, représentés par l'aléa sismique lui-même*, sur lequel il n'y a aucune possibilité d'agir ;

* Soit la possibilité pour un site d'être exposé à une secousse sismique de caractéristiques données ; que l'on peut exprimer, par exemple, par la distribution de probabilités de dépassement de différents seuils d'intensité au cours d'une période de référence (4, 5).

. **des critères économiques**, constitués par la mise en rapport du surcoût des mesures de protection aux bénéfices que l'on peut escompter en tirer ;

. **des critères politiques**, reflétant l'intérêt accordé à cette protection.

Ce choix est du ressort des décideurs et n'incombe en rien aux techniciens qui, en la matière, ne peuvent que se borner à fournir les bases scientifiques et techniques les plus solides pour l'application de ces critères. En l'occurrence, notre étude se limitera à la description, aussi satisfaisante que possible en fonction des données disponibles, de l'aléa sismique sur les sites considérés.

Néanmoins cette description, et c'est là tout le vice du problème, comporte déjà en elle-même une certaine forme d'anticipation sur la prise en compte de l'aléa sismique.

En effet, l'aléa sismique peut être décrit selon une approche déterministe ou probabiliste (4), soit :

- en essayant de fixer, dans le premier cas, une borne supérieure au mouvement maximum du sol, raisonnablement envisageable ;

- en associant, dans le second cas, à différentes amplitudes de mouvement du sol, des probabilités de dépassement ou de non-dépassement au cours d'une certaine période de référence.

Si la deuxième solution permet ensuite de choisir le niveau de dimensionnement en fonction d'un "risque" clairement exprimé, dont il est ainsi possible de s'assurer qu'il est traité de façon homogène avec d'autres facteurs intervenant dans la sûreté de l'ouvrage, la première ne laisse plus que la possibilité d'un ajustement :

- soit sous forme d'une majoration du mouvement maximum vraisemblable : c'est, par exemple en France, la démarche maximaliste de la sûreté nucléaire applicable aux tranches nucléaires comportant un réacteur à eau sous pression (6) ;

- soit sous forme d'une réduction mais il devient alors difficile d'apprécier exactement comment se situe le niveau de dimensionnement retenu.

Finalement, et c'est là l'essentiel de la démarche, ce mouvement maximal du sol raisonnablement envisageable, majoré ou non, doit servir de référence pour satisfaire des exigences de comportement des structures à dimensionner. Ainsi, sur une même unité industrielle, ces exigences de comportement peuvent être modulées selon les différentes structures composant l'installation (constructions et équipements), en fonction de leur propre vulnérabilité au séisme et de leur rôle spécifique dans l'importance du risque ; on peut ainsi admettre différents types de réponse à différents niveaux de séisme : absence de déformation, déformation restant dans le domaine élastique, incursion dans le domaine post-élastique, etc., en cas de S.M.H.V. ou de S.M.S.

A noter également que le nouveau zonage sismique de la France établi pour l'application des règles parasismiques de construction* et la mise en oeuvre des plans d'exposition aux risques (P.E.R.), s'appuie simultanément sur une démarche déterministe, en prenant en compte les effets maximum connus et vraisemblables, et probabiliste (ou simplement statistique), en considérant également les fréquences (observées historiquement) de secousses ayant atteint ou dépassé différents seuils d'intensité (3). Cette approche permet de donner pour chaque "zone" ou "classe" de sismicité ainsi définie, une représentation probabiliste "approchée" (fig.1).

A chacune de ces zones sont alors associées des valeurs nominales des paramètres de dimensionnement (tableaux 1A et 1B), c'est-à-dire imposées forfaitairement par la Puissance Publique, suite au compromis évoqué précédemment résultant de la confrontation des critères physiques, économiques et politiques. L'annexe 2 présente, très schématiquement, le raisonnement permettant de justifier la détermination d'une intensité de calcul (ou intensité de dimensionnement) optimale.

La comparaison des niveaux de dimensionnement requis et de la représentation probabiliste des zones de sismicité permet d'apprécier clairement la situation du seuil de protection exigé par rapport à l'aléa décrit de façon aussi exhaustive que possible, en fonction des données disponibles**.

Ceci étant, les deux approches, déterministe et probabiliste, souffrent de nombreux inconvénients lors de leur application pratique (3, 4), qu'il est indispensable de garder présents à l'esprit avant toute discussion du niveau de dimensionnement. L'approche probabiliste se montre particulièrement fragile dans le contexte d'une sismicité modérée ; la description statistique de l'occurrence des séismes sur une source donnée, par une loi de distribution fréquence/magnitude, est très souvent sujette à caution pour les événements rares et très forts (les plus gênants au plan du risque), en raison des échantillons de données utilisables : données de sismicité instrumentale sur quelques années, voire quelques dizaines d'années, données de sismicité historique couvrant au mieux quelques siècles. Ainsi bien que largement galvaudée en génie parasismique, cette approche ne fournit très souvent (surtout si une attention suffisante n'a pas été accordée à la qualité et la représentativité des données) que des résultats entachés d'une forte incertitude, voire très peu significatifs.

* Applicables seulement aux ouvrages "à risque normal" (ouvrages courants).

** Par exemple, les coefficients d'intensité sismique (coefficient α ou accélération nominale a_N) appliqués en zone II à des ouvrages de classe A, correspondent à une intensité macrosismique VIII MSK qui représenterait donc l'intensité de dimensionnement retenue. La période de retour de cette même intensité VIII est sensée être comprise, dans cette zone, entre 1 siècle et 2,5 siècles, celle de l'intensité IX étant supérieure à 2,5 siècles mais inférieure à 10 siècles.

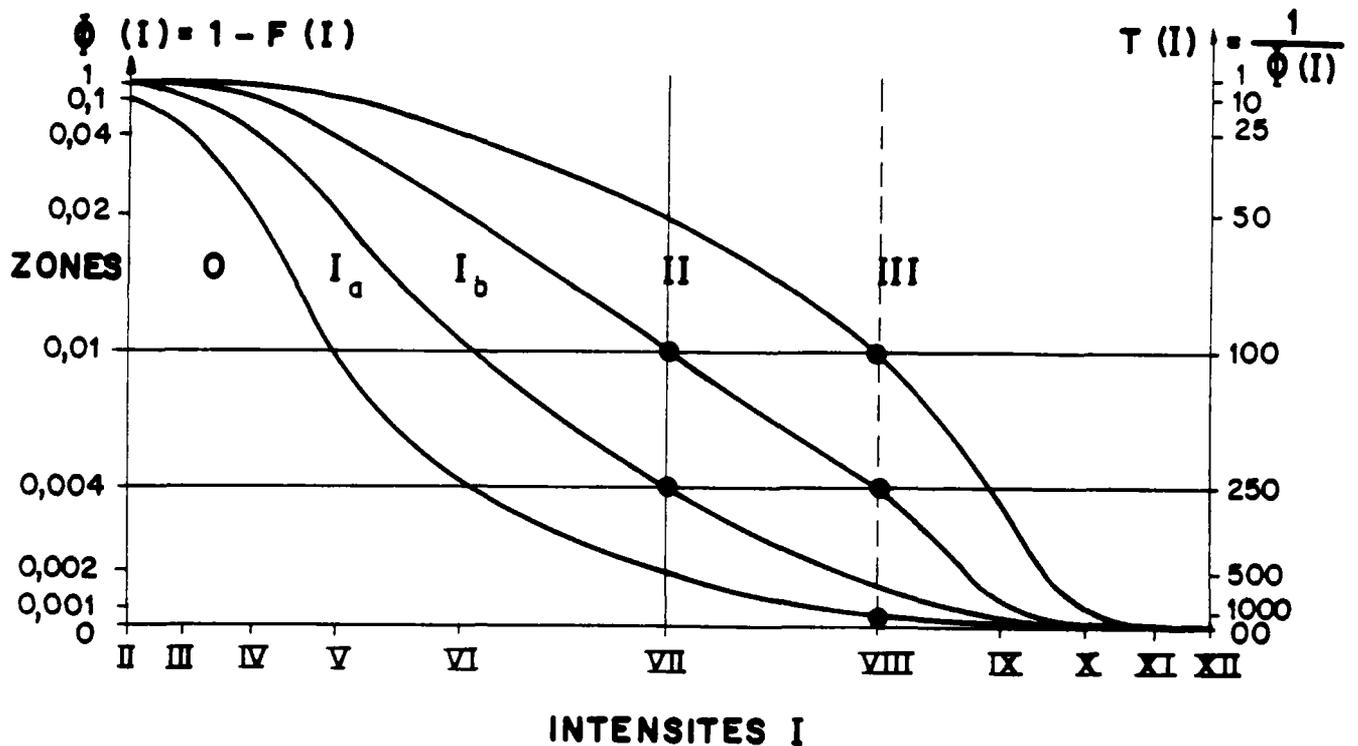


Figure 1
 DISTRIBUTION DES PROBABILITES DE DEPASSEMENT DE L'INTENSITE
 MACROSISMIQUE I SUPPOSEES REPRESENTATIVES DES DIFFERENTES ZONES DE
 SISMICITE

(Nouveau zonage sismique de la France pour l'application des règles
 parasismiques de construction, in : (3))

$\phi(I) = 1 - F(I) = P(i > I)$ probabilité annuelle de dépassement de l'intensité I

$F(I)$: fonction de distribution

$T(I) = 1/\phi(I)$: période de retour d'une secousse d'intensité supérieure ou égale à I .

NB. La partie sud du département du Haut-Rhin est classée dans les zones I_b et II
 Par contre pour les ouvrages "à haut risque", des paramètres de dimensionnement aux
 actions sismiques doivent y être définis, au cas par cas.

ZONES DE SEISMICITE		CLASSE DES BATIMENTS		
		A	B	C
O	Séismicité négligeable			
Ia	Très faible séismicité, mais non négligeable	0,10 g	0,15 g	0,20 g
Ib	Faible séismicité	0,15 g	0,20 g	0,25 g
II	Séismicité moyenne	0,25 g	0,30 g	0,35 g
III	Forte séismicité	0,35 g	0,40 g	0,45 g

Tableau 1A
 ACCELERATIONS NOMINALES a_N PROPOSÉES POUR LES
 REGLES PARASISMIQUES FRANCAISES EN PREPARATION

ZONES DE SEISMICITE		CLASSE DES BATIMENTS		
		A	B	C
O	Séismicité négligeable			
Ia	Très faible séismicité, mais non négligeable	0,5	0,5	0,75
Ib	Faible séismicité	0,5	0,75	1,0
II	Séismicité moyenne	1,0	1,2	1,5
III	Forte séismicité	1,5	1,7	2,0

Tableau 1B
 COEFFICIENTS D'INTENSITE α PROPOSÉS POUR LES
 REGLES PARASISMIQUES FRANCAISES EN VIGUEUR

Pour les mêmes raisons, liées aux données d'observation, l'approche déterministe pose de délicats problèmes dans les régions de sismicité modérée où ces échantillons (séismes historiques et contemporains) ne sont pas suffisants pour identifier les sources potentielles et caractériser leur activité. D'où le recours à l'analyse sismotectonique, intégrant des critères géologiques liés aux déformations tectoniques observées dans un passé récent (jusqu'à quelques millions à une dizaine de millions d'années, soit une échelle de temps bien plus grande). Le problème le plus critique reste celui de la **détermination du séisme maximum plausible**, clef de voûte de la démarche. Les données disponibles ne permettent de considérer aucune des méthodes actuellement proposées comme totalement satisfaisante.

Ainsi, il faut bien saisir que c'est par défaut, qu'une attitude maximaliste est adoptée face à certaines exigences de sûreté, comme dans le domaine nucléaire par exemple. Il ne faut pas se cacher non plus qu'une telle attitude, conduite avec "jusqu'au-boutisme", débouche, non sans incohérence, sur des situations inextricables compte-tenu de contingences pratiques.

Malgré tout, la démarche déterministe est bien "rodée" et son application à de nombreux ouvrages dans le contexte de la sismicité française ou du Nord-Ouest de l'Europe, fournit un guide précieux. Il reste à adapter, au cas par cas, les conclusions et décisions que l'on bâtit aux résultats qu'elle fournit, d'une part, et à la spécificité du problème posé, d'autre part.

En conclusion, il ressort des différents points énoncés précédemment :

- que la protection intrinsèque nécessaire pour les ouvrages "à haut risque" est à discuter au cas par cas, en fonction de la cause principale du danger et des conséquences qu'elle peut engendrer dans l'environnement externe, selon la nature des défaillances du comportement de l'ouvrage sollicité par des actions sismiques ; en limite, deux installations distinctes sur le même site, donc exposées au même aléa, pourraient être dimensionnées à des niveaux différents si elles présentent des risques différents ;

- que cette protection, qui peut donc varier dans une marge assez large, connaît néanmoins deux bornes a priori :

. une borne inférieure (avec inégalité stricte) définie par la protection requise pour les ouvrages courants ;

. une borne supérieure (avec inégalité large) définie par la protection exigée dans le domaine de la sûreté nucléaire des tranches comportant un réacteur à eau sous pression. Ce que schématise le tableau 2.

Dimensionnement	Id (ouvrages courants)	< (ouvrages à haut risque)	≤ (tranches nucléaires comportant un réacteur à eau sous pression)
Réglementation (française)	Règles parasismiques de construction (PS69/82 et futures PS 88)	non encore "officialisée"	R.F.S. n°I-2c

Tableau 2
REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROBLEME DU DIMENSIONNEMENT DES INSTALLATIONS
"A HAUT RISQUE"

Cette marge dans laquelle peuvent se situer les paramètres de dimensionnement, est donc susceptible, dans certain cas, d'atteindre des proportions importantes. Par exemple, la majeure partie du Centre-Ouest et du Nord de la France (fig.2) appartient à la zone 0 du nouveau zonage sismique associé à l'application des règles PS, soit dans une zone dite "de sismicité négligeable" (négligeable pour les ouvrages courants, s'entend). Ce qui signifie en fait que l'intensité maximale et la fréquence des secousses dommageables sont telles que, face aux contraintes économiques, la Puissance Publique ne juge pas nécessaire d'imposer à tous les ouvrages une protection contre ces actions, jugées exceptionnelles.

L'application de la RFS I-2c à laquelle sont soumises certaines installations nucléaires peut, par contre, conduire dans certains secteurs de ces régions, à retenir un "séisme maximum historiquement vraisemblable" (S.M.H.V.) d'intensité VIII MSK et par conséquent, dans l'absolu, un séisme majoré de sécurité (S.M.S.) d'intensité IX. Entre ces deux extrêmes, la place est large pour les installations "à haut risque" et de nombreuses modulations sont envisageables.

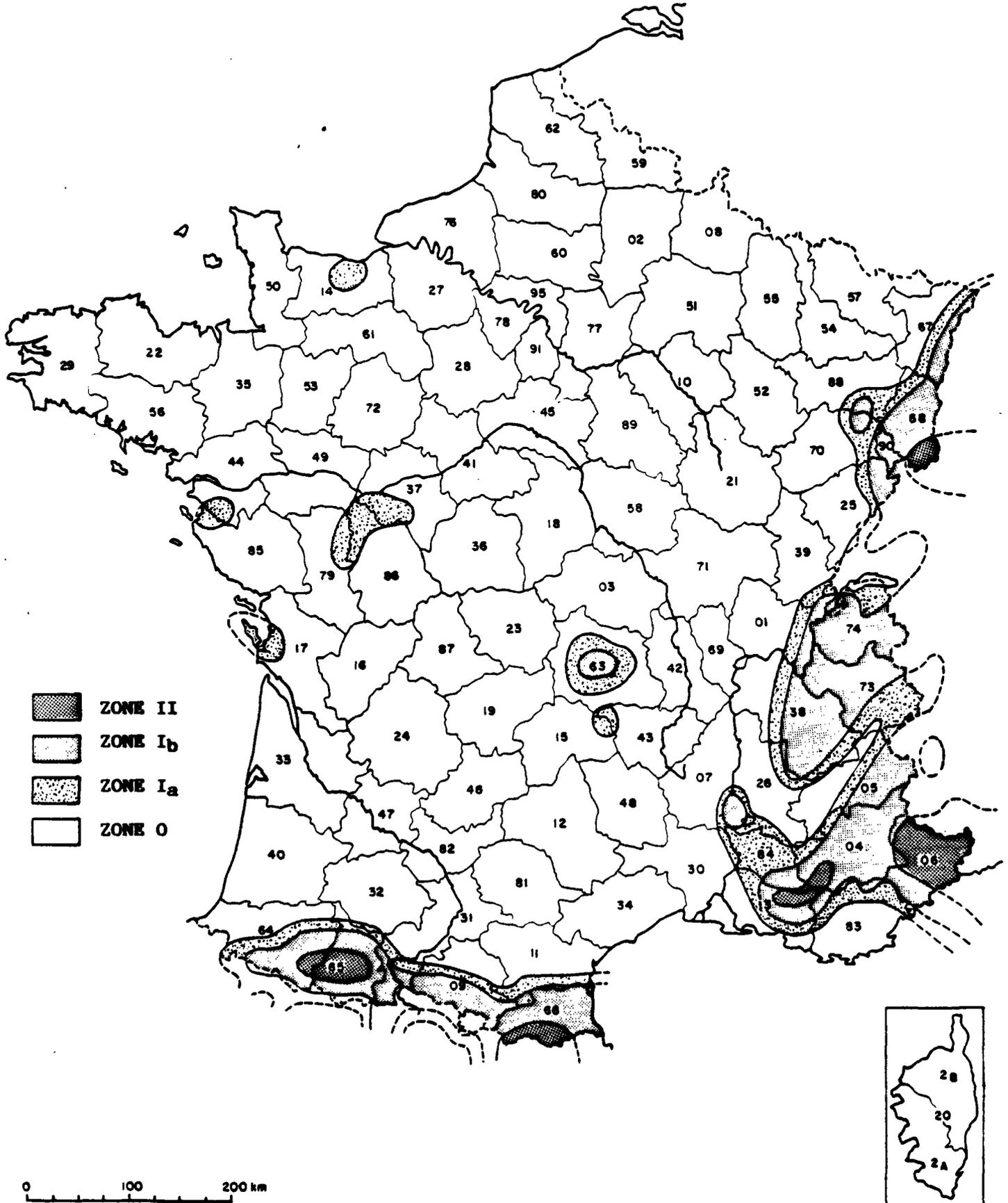
1.3. ORIENTATION RETENUE DANS L'ETUDE POUR LA PRISE EN COMPTE DE L'ALEA SISMIQUE

Dans le contexte sismique et sismotectonique des sites, le peu de crédibilité d'une approche probabiliste et la difficulté de quantifier les incertitudes inhérentes à sa mise en oeuvre nous font opter, d'entrée, pour une approche déterministe de l'aléa sismique régional.

Cette approche vise, en s'inspirant des règles de sûreté appliquées aux installations nucléaires en France*, à déterminer les caractéristiques du (des) séisme(s) maximum historiquement vraisemblable(s) (SMHV) applicable(s) aux installations : caractéristiques focales (localisation et profondeur du foyer), intensité épiscoptrale et magnitude, distance

* R.F.S. n°I-2c (6)

Figure 2
"ZONAGE PHYSIQUE" DE LA FRANCE POUR L'APPLICATION DES REGLES
PARASISMQUES DE CONSTRUCTION
(ouvrages "courants" ou "à risque normal")



source-site minimale envisageable et intensités maximales* en résultant au niveau des structures, éventuellement caractéristiques dynamiques de la source (mécanisme au foyer).

Elle repose sur une analyse sismotectonique régionale conduite dans un rayon de 100 à 150 km autour des sites. Elle débouche sur l'évaluation de mouvements de référence du sol en surface, décrits par des spectres de réponse élastiques définis dans un premier temps au rocher horizontal.

Cette analyse sismotectonique régionale conduite dans un rayon de 100 à 150 kilomètres, suppose que soient développées les étapes suivantes :

♦ **Bilan de la sismicité régionale**

Etabli dans un rayon de 100 km à 150 km autour des sites, il comporte deux volets : données macrosismiques historiques et contemporaines et données instrumentales.

Pour les premières, le fichier informatisé SIRENE du BRGM, mis à jour régulièrement et considérablement enrichi en 1986 par la révision complète des archives originales relatives aux enquêtes macrosismiques consacrées par le Bureau central sismologique français aux tremblements de terre du XXe siècle** a été utilisé. Les données relatives au séisme de Bâle de 1356, proche des sites de HUNINGUE et du VILLAGE NEUF ont été révisées. Les nouveaux résultats sont exposés dans le volume 2.

Pour les secondes, une révision synthétique des données instrumentales disponibles couvrant la période 1962-1988 a été effectuée à notre demande par l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (GUEGUEN et HOANG-TRONG) en 1989. Les résultats de cette étude portant sur 27 années d'enregistrement font l'objet de l'annexe 2 du volume 6 consacré à la sismicité et à la sismotectonique régionales.

♦ **Aperçu du contexte sismotectonique régional et définition d'unités sismotectoniques**

Une attention particulière sera portée à la description du cadre structural profond (géophysique) et superficiel (géologie classique) ainsi qu'aux données néotectoniques, témoins des déformations les plus récentes et support de l'interprétation des déformations actuelles par les informations relatives au champ de contraintes régional qu'elles fournissent. On s'efforcera ainsi de mettre en relief la validité des éléments utilisables pour justifier l'individualisation d'unités sismotectoniques.

* Intensité macrosismique et paramètres de mouvement du sol : pics d'accélération, vitesse et déplacement, et spectres.

** Archives conservées à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (B.C.S.F.)

♦ Détermination des séismes de référence et description du (des) séisme(s) maximum historiquement vraisemblable(s) (S.M.H.V.)

Pour chaque unité sismotectonique, il sera défini les caractéristiques focales des séismes de référence puis, pour chaque site, on décrira le S.M.H.V. par application de modèles appropriés d'atténuation de l'énergie depuis les sources identifiées, en portant une attention particulière, s'il y a lieu, aux problèmes d'atténuation en champ proche.



2. BILAN DE LA SISMICITE REGIONALE

Ce bilan est décrit de façon détaillée dans le volume 6 du présent rapport qui comporte également la liste exhaustive des références bibliographiques sur lesquelles il s'appuie.

2.1. DONNEES MACROSISMQUES HISTORIQUES ET CONTEMPORAINES

2.1.1. Données utilisées

Ce sont celles du fichier informatisé SIRENE du BRGM régulièrement mis à jour et considérablement enrichi en 1986 par la révision complète des archives originales relatives aux enquêtes macrosismiques consacrées par le Bureau central sismologique français (B.C.S.F.) aux tremblements de terre du XXe siècle (Archives conservées à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg).

De plus l'intensité épacentrale et parfois la localisation des séismes les plus importants ont été révisées et notamment celles du séisme de Bâle du 18 octobre 1356 dont les caractéristiques déduites des données révisées par J. LAMBERT sont exposées dans le volume 2. De même, les séismes du 3 août 1728 et du 9 octobre 1886 qui ont eu lieu près de Strasbourg, ont été réexaminés par J. LAMBERT et les résultats de cette révision sont exposés dans le volume 6.

La planche I comporte tous les épacentres macrosismiques de localisation et d'intensité fiables à relativement fiables (catégories A à D pour la localisation et A à C pour l'intensité).

2.1.2. Principales zones sismiques individualisables à l'échelle régionale

2.1.2.1. Fossé rhénan

Le fossé rhénan dans son ensemble montre une sismicité bien individualisée et relativement uniforme (planche I). Toutefois, il est possible de distinguer, tant par le nombre que par l'intensité des séismes, plusieurs centres sismiques à l'intérieur du fossé. Ce sont, du Nord vers le Sud :

- la région à l'Ouest de Karlsruhe avec des séismes d'intensité VII et VIII*, mais ceux-ci sont situés à plus de 150 km des sites ;

- la région de Strasbourg à laquelle était attribuée jusqu'ici des séismes d'intensité VII et VIII mais dont les plus importants, ceux du 3 août 1728 et du 9 octobre 1886 ont été ramenés à des séismes d'intensité VII et VI respectivement suite à la révision effectuée par J. LAMBERT, dans le cadre de cette étude ; ces séismes sont situés à près de 100 km des sites ;

* Dans cette étude, comme dans le fichier SIRENE, toutes les intensités des séismes se rapportent à l'échelle M.S.K.

- le secteur au Nord-Ouest de Fribourg, où les séismes du 14 février 1899 et du 28 juin 1926, d'intensité VII, se situent sur les bordures du massif volcanique du Kaiserstuhl, à une cinquantaine de kilomètres au Nord des sites ;

- la région de Mulhouse, dans laquelle le séisme du 15 juillet 1980 survenu près de SIERENTZ avec une intensité VII, a été bien étudiée par la sismicité instrumentale ;

- le secteur au Sud de Bâle qui comprend l'important séisme du 18 octobre 1356 dont l'intensité épicertrale était supérieure à VIII.

2.1.2.2. Vosges et bordure est du Bassin de Paris

Si l'on excepte leur bordure ouest, les Vosges ont une sismicité plus faible en intensité et en fréquence que le Fossé rhénan.

Le séisme le plus important a été celui du 18 janvier 1757 d'intensité supérieure à VI-VII et situé dans le Sud du massif.

La bordure ouest des Vosges qui correspond également à la bordure est du Bassin de Paris comporte d'assez nombreux séismes historiques localisés dans la région d'Epinal et de Remiremont où s'est produit le 12 mai 1682 un séisme d'intensité VIII.

2.1.2.3. Forêt Noire

Ce massif paraît posséder une sismicité historique moins importante que celle des Vosges mais il faut considérer que le fichier SIRENE comporte moins d'indications sur les séismes de faible intensité, dans les pays frontaliers qu'en France même.

Le séisme historique le plus important est celui du 30 décembre 1935 situé dans le Nord de la Forêt Noire et dont l'intensité était supérieure à VII.

2.1.2.4. Jura Souabe

La région du Jura Souabe comporte un centre sismique important situé près de ALBSTADT (= TAILFINGEN + EBINGEN). Les séismes y sont nombreux sur une surface réduite et leur intensité est forte.

Le plus important des séismes historiques est celui du 16 novembre 1911 d'intensité VIII.

Ce centre sismique est situé à un peu moins de 150 km au Nord-Est des sites.

2.1.2.5. Régions au Sud du Fossé rhénan

Les régions du Jura central et septentrional, de la plaine molassique et des préAlpes suisses ont connu des séismes peu fréquents pour le Jura septentrional mais parfois importants notamment pour les préAlpes avec celui du 10 septembre 1774 d'intensité VIII.

Toutefois, ce séisme est situé à près de 150 km au Sud-Est des sites et son intensité est plus faible que celle du séisme de Bâle de 1356 qui est bien plus proche des sites.

2.1.3. Conclusion : Séismes historiques intéressant les sites

En conclusion, les séismes historiques qui sont susceptibles de servir de référence pour la sismicité des sites considérés sont les suivants :

- séisme du 15 juillet 1980 d'intensité VII, situé entre Sierentz et Mulhouse, pour le fossé rhénan ;
- séisme du 18 octobre 1356 (VIII-IX) situé au Sud de Bâle, près du passage du Fossé rhénan au Jura septentrional ;
- séisme du 18 janvier 1757 (> VI-VII), situé dans le Sud des Vosges ;
- séisme du 12 mai 1682 (VIII), de la bordure ouest des Vosges ou bordure est du Bassin de Paris ;
- séisme du 30 décembre 1935 (> VII) situé dans le Nord de la Forêt Noire ;
- séisme du 16 novembre 1911 (VIII) qui fait partie de l'important centre sismique du Jura Souabe.

2.2. DONNEES INSTRUMENTALES

2.2.1. Données utilisées

Les données utilisées proviennent des réseaux des organismes suivants :

- Laboratoire de Détection géophysique (L.D.G.) du Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.) ;
- Université de Karlsruhe ;
- Institut de géophysique de Zurich ;
- Institut de Physique du Globe de Strasbourg (I.P.G.S.).

Ces données ont été révisées et synthétisées par J.F. GUEGUEN et P. HOANG-TRONG à l'Institut de physique du globe de Strasbourg dans le cadre de la présente étude. La démarche effectuée et les résultats sont exposés dans le volume 6 et en particulier dans l'annexe 2.

La planche II montre la répartition des séismes de toute magnitude ressentis dans le Sud du Fossé rhénan et les régions voisines pour la période allant de 1962 à 1988.

2.2.2. Apport de la sismicité instrumentale

Les données de sismicité instrumentale confirment et complètent les données historiques. Elles mettent en relief l'importance sismique des zones d'Epinal-Remiremont, à la bordure ouest des Vosges, et du Jura Souabe, à l'Est de la Forêt Noire (planche II).

Elles confirment la grande fréquence des séismes dans le Fossé rhénan. Toutefois, elles semblent indiquer un passage assez progressif entre la sismicité du fossé et celle des bordures des Vosges et de la Forêt Noire. De plus, les données de la planche II montrent que la fréquence et l'intensité des séismes dans le massif de la Forêt Noire sont globalement comparables à celles des séismes des Vosges.

Enfin par le calcul du mécanisme au foyer et la définition des profondeurs (entre 5 et 20 km), de la forme et de l'extension des zones de rupture sismogènes (séismes du 3 septembre 1978 dans le Jura Souabe et du 29 décembre 1984 dans le secteur de Remiremont, par exemple) les études de sismicité instrumentale fournissent des données d'importance primordiale pour l'étude sismo-tectonique qui est développée dans le volume 6 et résumée dans le chapitre 3 de ce volume 1.

2.3. CONCLUSIONS

Les données macrosismiques historiques et contemporaines, comme les données instrumentales, mettent en évidence la sismicité du Fossé rhénan à l'intérieur même duquel il est possible de distinguer des centres sismogènes comme celui de Bâle au Sud et celui de Mulhouse-Sierentz.

Pour les régions plus éloignées des sites les données sismiques amènent à prendre en compte la zone d'Epinal-Remiremont à l'Ouest et celle du Jura souabe à l'Est.

3. ANALYSE SISMOTECTONIQUE REGIONALE

Les principaux éléments résumés dans ce chapitre sont reportés sur la planche III (hors-texte) qui confronte une sélection d'épicentres macrosismiques et instrumentaux fiables et relativement fiables aux grands traits structuraux, dans un rayon d'au moins 100 à 150 km autour des sites. A été rajoutée sur cette planche une sélection de mécanismes au foyer de séismes calculés par divers auteurs.

3.1. CADRE STRUCTURAL

Les données relatives au cadre structural de l'ensemble du secteur considéré, y compris celles intéressant les structures profondes définies à l'échelle crustale sont exposées en détail dans les volumes 3 et 6. Seuls seront repris ici les grands traits structuraux susceptibles de jouer un rôle sismotectonique.

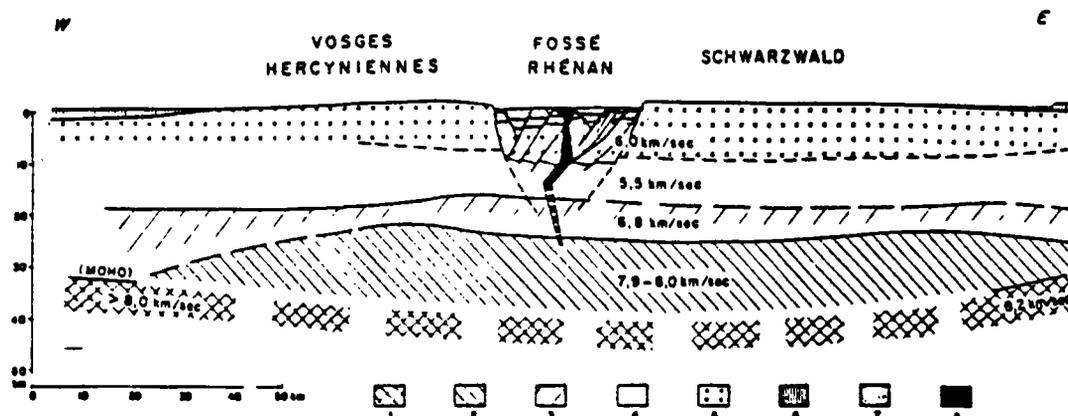
L'ensemble Vosges-Fossé rhénan-Forêt Noire correspond en profondeur à un amincissement de la croûte terrestre qui passe de plus de 30 km d'épaisseur, dite "normale", à moins de 25 km (fig.3). Cet amincissement et la formation du fossé ainsi que la surrection des bordures Vosges et Forêt Noire, sont liées génétiquement. Toutefois la création et le fonctionnement du fossé et des failles normales s'est effectué à l'Eocène supérieur et à l'Oligocène inférieur (entre 40 et 30 Ma), tandis que l'amincissement crustal décelé actuellement par géophysique profonde (sismique réfraction) a pu ne débuter qu'au Miocène (25 à 5 Ma environ). La surrection des Vosges et de la Forêt Noire, très vraisemblablement due au réajustement isostatique induit par cet amincissement, a connu son paroxysme pendant le Pliocène (5 à 1,8 ma) et cette surrection se continue actuellement (cf. volume 5 : Mouvements verticaux actuels).

Du point de vue des grands accidents potentiellement sismogènes, on retiendra que :

- le Fossé rhénan proprement dit est affecté par des failles plurikilométriques parallèles aux grandes failles de ses bordures est et ouest ; les directions de ces failles varient de N-S à NE-SW (direction NNE-SSW, rhénane) ; il existe aussi quelques failles de direction NW-SE, dont la continuité est généralement plus faible que celle des précédentes ;

- le massif hercynien des Vosges est parcouru par de grandes failles NNE-SSW sensiblement parallèles à celles du fossé mais moins nombreuses que ces dernières ;

- la bordure ouest des Vosges qui correspond aux confins orientaux du Bassin parisien paraît dominée par l'existence d'une zone de failles N-S à NNE-SSW ; cette zone est marquée au Nord, dans la région d'Epinal, par l'existence de grandes failles profondes décelées par géophysique (gravimétrie et/ou magnétisme) et au Sud par de nombreuses failles affectant la couverture mésozoïque des environs de Vesoul ; les plus



Selon les vitesses des ondes P on distingue :

1. Manteau supérieur, sous la discontinuité de Mohorovicic, caractéristique de part et d'autre du fossé vers 30-35 km de profondeur.
2. Zone de transition à vitesses élevées, attribuée à la Croûte inférieure ; limitée à la région du fossé, elle s'étend de 22 à 30-35 km.
3. Zone à vitesses importantes, par rapport aux couches supérieures ; attribuée à la Croûte moyenne (dite basaltique ou océanique), elle est relativement mince sous le fossé où elle atteint 22-25 km de profondeur.
4. Canal à faibles vitesses dans la zone sialitique de la Croûte supérieure, profondeur 18-20 km.
5. Socle cristallin de la Croûte supérieure (dite granitique ou continentale) atteignant environ 10 km de profondeur.
6. Couverture sédimentaire mésozoïque (Trias et Jurassique).
7. Remplissage tertiaire et quaternaire du fossé.
8. Volcanisme basaltique, probablement issu du Manteau.

Figure 3

COUPE DE LA CROÛTE TERRESTRE SOUS LE FOSSE RHÉNAN MERIDIONAL :
D'APRES LES INTERPRETATIONS DES EXPLOSIONS SISMIQUES EFFECTUEES DEPUIS 1966,
(d'après SITTNER, in DEBELMAS, 1974)

orientales de ces failles paraissent prolonger vers le Nord la grande faille de décrochement jurassienne de Pontarlier ;

- le massif ancien de la Forêt Noire est, comme celui des Vosges, affecté par des failles de continuité plurikilométrique essentiellement développées dans sa partie centrale et septentrionale ; par contre, la partie méridionale de ce massif montre de grandes failles dont l'orientation varie de NW-SE à E-W. ;

- les plateaux calcaires mésozoïques du Jura souabe sont affectés, au Nord, par un grand linéament NE-SW, à l'Ouest, par quelques grandes failles NW-SE et, en leur centre (région de Gammertingen et Sigmaringen) par de nombreuses failles plurikilométriques N-S et NNE-SSW qui constituent une zone se prolongeant vers le Sud, à travers la plaine molassique, au-delà de Constance ;

- au Sud du Fossé rhénan, le Jura central et septentrional est caractérisé par des failles inverses et des chevauchements E-W à NE-SW actifs au Pliocène supérieur (vers 2 Ma) et pendant le Quaternaire ; quelques failles de décrochement N-S à NE-SW affectent les bordures ouest et nord du Jura septentrional.

3.2. DONNEES NEOTECTONIQUES

Ces données sont présentées en détail dans les volumes 4 et 5, pour la partie méridionale du Fossé rhénan. Les mécanismes au foyer des séismes sont traités pour partie dans l'annexe 2 du volume 6 et également dans des publications récentes. Toutes ces données sont reprises et synthétisées dans le volume 6.

Les faits les plus marquants qui constituent la base de l'étude sismotectonique sont les suivants :

- il existe de nombreux indices géomorphologiques de mouvements verticaux quaternaires des failles NW-SE et surtout N-S à NE-SW du Fossé rhénan méridional ;

- sur la bordure occidentale du fossé, à 10 et 25 km au Nord-Est de Thann, quelques failles N-S et NNE-SSW affectent des formations quaternaires, dont l'âge varie de 100.000 à 10.000 ans ;

- les chevauchements les plus septentrionaux du Jura, qui s'effectuent en direction du Nord, vers le Fossé rhénan, et qui ont débuté au Pliocène supérieur (vers 2 Ma) paraissent actifs pendant le Pléistocène inférieur et peut être moyen (âge compris entre 1,8 Ma et 100.000 ans) ;

- l'étude comparative des nivellements (géodésie, volume 5), en accord avec les données géomorphologiques, montre que la partie sud des Vosges continue à se soulever actuellement par rapport à la fosse de Dannemarie, entre Montbéliard et Mulhouse, laquelle s'effondre relativement ; cette étude indique également, pour les dernières décennies, une instabilité de failles N-S à NE-SW situées : au Nord-Ouest de Thann, dans le secteur de Belfort, et entre Altkirch et Mulhouse.

- les mécanismes au foyer des séismes montrent qu'actuellement le Fossé rhénan ainsi que les Vosges, la Forêt Noire et le Jura souabe comme l'ensemble de la plaque ouest-européenne sont soumis à une compression orientée N 155° E en moyenne ;

- sous l'effet de cette compression NNW-SSE, les failles N-S à NE-SW jouent actuellement en décrochements sénestres ; ces failles sénestres dominent dans le Fossé rhénan méridional, tandis qu'au Nord de Strasbourg prédomine un rejeu normal des failles NW-SE ; au Sud, au front des chevauchements jurassiens, dans la région de Delle à l'Ouest de Bâle (BG29, planche III) et à l'Est dans le Dinkelberg (BG32, planche III), des séismes sont produits par des failles inverses de direction proche d'E-W ;

- les failles responsables des séismes de Remiremont du 29 décembre 1984 et du Jura souabe du 3 septembre 1978 sont des failles relativement profondes (failles du socle cristallin avec ruptures situées entre 5 et 10 km de profondeur) ; leurs directions varient de N-S à NNE-SSW et le mouvement principal était décrochant sénestre.

3.3. CONCLUSIONS

Le Fossé rhénan s'est individualisé il y a 30 à 40 millions d'années (Ma) sous l'effet d'une extension de direction E-W, accompagnée d'un amincissement de la croûte terrestre et induisant un jeu normal des failles N-S à NE-SW qui l'affectent. La surrection des massifs des Vosges et de la Forêt Noire consécutives à l'amincissement crustal se poursuit actuellement. Toutefois, depuis environ 2 Ma, les nombreuses failles de la partie méridionale du fossé jouent en décrochements sénestres sous l'effet d'une compression NNW-SSE qui se continue actuellement avec une direction moyenne N 155° E. De même, les grandes failles de direction N-S à NE-SW atteignant ou non la surface et affectant les massifs anciens des Vosges ou de la Forêt Noire ainsi que les zones de failles d'Epinal-Remiremont-Vesoul et du Jura souabe, jouent en décrochements sénestres. Ces failles sont sismogènes, les foyers des séismes se situent principalement entre 5 et 20 km de profondeur.

Vers le Sud, à l'Ouest et à l'Est de Bâle, à l'approche des chevauchements du Jura, quelques failles sismogènes relativement profondes, ont des directions E-W et jouent en failles inverses, à côté de failles sismogènes décrochantes sénestres.

On notera enfin la correspondance entre les grandes zones faillées d'Epinal-Remiremont-Vesoul à l'Ouest des Vosges et de Sigmaringen-Gammertingen, dans le Jura souabe, avec la fin de l'amincissement crustal vers l'Ouest et vers l'Est.

3.4. DEFINITION D'UNITES SISMOTECTONIQUES (Planche IV)

Au vu de ce qui précède, les unités sismotectoniques suivantes ont été définies (pour plus de détail, se reporter au chapitre 3.3. du volume 6) :

- Unité I (Est du Bassin de Paris) : elle correspond aux confins orientaux du Bassin parisien, dans lequel il n'existe pas d'amincissement crustal ;

- Unité II (Fossé rhénan septentrional) : elle comprend uniquement la partie septentrionale du Fossé rhénan dont l'amincissement crustal est bien moins étendu que celui de la partie méridionale ; de plus, dans cette partie septentrionale, domine actuellement une extension ENE-WSW (perpendiculaire à la compression NNW-SSE régnant dans les régions voisines) ce qui entraîne la prédominance du rejeu normal des failles NW-SE ;

- Unité III (Nord du Jura souabe) : elle est située au Nord de la Forêt Noire et du Jura souabe, en dehors de la zone à croûte amincie ;

- Unité IV (Vosges) : elle correspond sensiblement au massif des Vosges et à la zone à croûte amincie située à l'Ouest du fossé méridional ;

- Unité V (Fossé rhénan méridional) : c'est la partie du fossé située au coeur de l'amincissement crustal et affectée principalement par des failles simogènes NNE-SSW sénestres ; cette unité contient la majeure partie des sites industriels objet de l'étude ;

- Unité VI (Forêt Noire et Jura souabe occidental) : elle comprend le massif ancien de la Forêt Noire ainsi que la partie du Jura souabe située à la verticale de la zone à croûte amincie ;

- Unité VII (Zone de transition Jura-Fossé rhénan) : elle a été individualisée en raison de la coexistence de failles sismogènes N-S à NE-SW sénestres, de type "rhénan", et E-W inverses ou chevauchantes, de type "jurassien", l'interaction de ces failles les unes sur les autres paraissant produire une sismicité particulièrement développée dans la région de Bâle ;

- Unité VIII (Jura central et septentrional) : elle correspond au Jura et elle est caractérisée par de nombreux chevauchements et une relativement faible sismicité ;

- Unité IX (avant-fosse molassique) : c'est la grande avant-fosse molassique alpine qui comporte des séismes non négligeables assez régulièrement répartis ; quelques uns de ces séismes se situent de préférence le long de la faille normale quaternaire séparant cette unité de celle du Jura ;

- Unité X (Préalpes suisses) : elle correspond aux Préalpes et comporte quelques séismes de forte intensité ;

- Unité XI (Fossé bressan et nord-rhodanien) : cette unité distante d'au moins une centaine de kilomètres des sites n'est que très partiellement représentée.

De plus, deux grandes zones de failles N-S à NNE-SSW ont été individualisées en raison de leur correspondance avec les terminaisons ouest et est de l'amincissement crustal rhénan. Ce sont :

- la zone de failles (1) d'Epinal-Remiremont-Vesoul qui marque la limite ouest de l'Unité IV des Vosges ;

- la zone de failles (2) Gammertingen-Sigmaringen limitant à l'est l'unité de la Forêt Noire et du Jura souabe occidental, mais se prolongeant également vers le Sud à travers l'Unité IX de l'avant-fosse molassique.

4. DETERMINATION DES SEISMES DE REFERENCE (SMHV et SMS) SUR CHAQUE SITE ET DE LEURS PRINCIPALES CARACTERISTIQUES

4.1. UNITES SISMOTECTONIQUES A CONSIDERER POUR CHAQUE SITE

Le tableau 3 présente les unités sismotectoniques qu'il est nécessaire de considérer pour chaque site. La sélection de ces unités est faite en fonction de leur distance minimale (Δ_{min}) à chacun des sites ou groupe de sites et de l'intensité épacentrale de la secousse la plus forte propre à chaque unité ($I_0 \text{ max}$). Sont éliminées, les unités sismotectoniques dont le couple ($I_0 \text{ max}$, Δ_{min}) engendre les intensités les plus faibles sur les sites.

Les unités sismotectoniques qui ont été conservées sont les suivantes :

a) Pour les zones de failles sismogènes

- la zone faillée Epinal-Remiremont-Vesoul (unité 1) à laquelle on attribue comme séisme de référence le tremblement de terre du 12 mai 1682 d'intensité épacentrale VIII ;

- la zone faillée SIGMARINGEN-GAMMERTINGEN (unité 2) pour laquelle on retiendra comme séisme de référence celui du 16 novembre 1911, d'intensité épacentrale VIII.

b) Pour les domaines sismotectoniques

- l'unité des Vosges (unité IV) qui contient la partie sismogène de la zone faillée Epinal-Remiremont-Vesoul ; le séisme de référence, d'intensité VI-VII, est celui du 18 janvier 1757 dans le Sud des Vosges ;

- l'unité du Fossé rhénan méridional (unité V) dont le séisme de référence est celui du 15 juillet 1980 qui s'est produit près de Sierentz avec une intensité VII ; ce séisme enregistré présente les caractéristiques instrumentales suivantes : $M_L = 4,7$ à $4,9$ et 10 à 12 km de profondeur focale selon les déterminations ;

- l'unité Forêt Noire-Jura souabe occidental (unité VI) inclut la zone faillée Sigmaringen-Gammertingen, associée aux séismes importants de 1911, 1943 et 1978 ; le séisme le plus fort connu est celui du 16 novembre 1911, d'intensité épacentrale VIII ; d'après SCHNEIDER (1979) et HAESSLER et al (1980), sa magnitude locale est de 6,1 et la profondeur du foyer est de 10 km ; en dehors de cette zone faillée, un autre séisme important s'est produit dans le Nord du massif de la Forêt noire, le 30 décembre 1935, avec une intensité supérieure à VII ;

- l'unité de transition Jura-Fossé rhénan (unité VII) comprend le séisme de Bâle du 18 octobre 1356 dont l'intensité épacentrale est supérieure à VIII (VIII-IX) et qui sera pris comme séisme de référence.

Tableau 3 - UNITES SISMOTECTONIQUES RETENUES ET DISTANCES AUX SITES DES SEISMES DE REFERENCE

UNITES SISMO- TECTONIQUES RETENUES ET SEISMES DE REFERENCE	SITES CONSIDERES											
	SITES 2 et 11 : THANN et STEINBACH		SITES 1 et 12 CERNAY Sud et Nord		SITES 9 et 10 STAFFELFEDEN et WITTELSHEIM		SITES 3 et 13 MULHOUSE Ouest et Est		SITES 4 et 5 OTTMARSHEIM et CHALAMPE		SITES 6, 7 et 8 HUNINGUE N et S et VILLAGE NEUF	
	DERS	DMSE	DERS	DMSE	DERS	DMSE	DERS	DMSE	DERS	DMSE	DERS	DMSE
IV: VOSGES 18.01.1757 (> VI-VII)	30	0	35	3	40	7	45	15	60	25	65	40
V : FOSSE RHENAN MERIDIONAL 15.07.1980 (VII)	22	0	18	0	15	0	5	0	12	0	20	0
VI: FORET NOIRE ET JURA SOUABE OCCIDENTAL 30.12.1935 (>VII)	120	40	120	35	115	30	115	23	105	10	125	8
VII: ZONE DE TRAN- SITION JURA-FOSSE RHENAN 18.10.1356 (>VIII)	45	27	40	27	40	27	30	20	30	20	8	0
1 = ZONE FAILLEE EPINAL-REMIREMONT - VESOUL 12.05.1682 (VIII)	50	45	55	50	60	55	65	60	80	75	90	85
2 = ZONE FAILLEE GAMMERTINGEN - SIGMARINGEN 16.11.1911 (VIII)	145	120	145	120	140	115	135	105	120	90	125	90

DERS = distance épacentrale réelle au site (en km)

DMSE (Δ_e) = distance épacentrale minimale au site envisageable (en km)

En regard des unités sismotectoniques proches des sites et des zones faillées qui viennent d'être décrites, les autres unités, plus lointaines, ont des effets négligeables sur les sites et ne seront plus prises en compte.

4.2. CARACTERISTIQUES FOCALES DES SEISMES DE REFERENCE ASSOCIES AUX

UNITES SISMOTECTONIQUES RESTANT A CONSIDERER

Deux hypothèses sont envisagées pour déterminer les S.M.H.V. à retenir sur chaque site :

- la moins pénalisante consiste à rattacher respectivement le séisme de Remiremont (12 mai 1682) et celui du Jura Souabe (16 novembre 1911) à la zone faillée Epinal - Remiremont - Vesoul d'une part et à la zone Sigmaringen-Gammertingen d'autre part ; dans cette configuration, les séismes de référence des domaines sismotectoniques limitrophes, à l'Ouest et à l'Est, de celui auquel appartiennent les sites (Fossé Rhénan méridional) deviennent respectivement : celui du 18 janvier 1757 (I_0 : + VI-VII) pour les Vosges et celui du 30 décembre 1935 (I_0 : +VII) pour la Forêt Noire et le Jura Souabe occidental ;

- la plus pénalisante revient à admettre que les séismes de Remiremont et du Jura Souabe constituent les séismes de référence des domaines sismotectoniques IV (Vosges) et VI (Forêt Noire/Jura Souabe) et peuvent donc être déplacés jusqu'à leur frontière avec l'unité sismotectonique V à laquelle sont rattachés les sites (Fossé Rhénan méridional), frontière correspondant aux grandes failles bordières du fossé.

Dans l'un et l'autre cas, il apparaît possible de pratiquer une sélection parmi les séismes de référence associés à chacune des unités sismotectoniques définies (domaine ou zone faillée), pour ne conserver que ceux susceptibles d'engendrer les intensités les plus fortes sur les sites, en termes de S.M.H.V. Cette sélection repose donc sur les valeurs du couple (I_0 : intensité épacentrale, Δ_0 : distance épacentrale minimale au site) obtenues pour chacun d'eux.

Au sein du Fossé Rhénan méridional même (unité V), auquel appartiennent la plupart des sites (à l'exception des n° 6, 7 et 8 : Huningue et Village-Neuf), la révision des séismes historiques pratiquée dans le cadre de cette étude a montré que les tremblements de terre du 3 août 1728 et du 9 octobre 1886 n'avaient finalement qu'une intensité épacentrale VII et VI respectivement. Ils deviennent donc négligeables, en termes de S.M.H.V., devant le séisme de Sierentz du 15 juillet 1980 d'intensité épacentrale VII, plus proche des sites et beaucoup mieux connu (notamment grâce aux nombreuses données instrumentales disponibles).

En résumé, ne restent donc à considérer comme séismes de référence associés aux domaines sismotectoniques des sites et limitrophes, que les séismes suivants :

Unité sismotectonique	Séisme	Intensité épacentrale (I ₀)
V : Fossé Rhénan méridional	15 juillet 1980 (Sierentz)	VII
IV: Vosges	12 mai 1682 (Remiremont)	VIII
VI: Forêt Noire et Jura Souabe	16 novembre 1911 (Jura Souabe)	VIII
VII: Zone de transition Jura/ Fossé Rhénan	18 octobre 1356 (Bâle)	VIII-IX
1 : Zone faillée Epinal - Remiremont - Vesoul	12 mai 1682 (Remiremont)	VIII
2 : Zone faillée Sigmaringen - Gammertingen	16 novembre 1911 (Jura Souabe)	VIII

Tous les autres séismes ont des effets négligeables devant ceux-là en termes de S.M.H.V. sur les sites considérés.

4.2.1. Profondeur focale

Pour la détermination des profondeurs focales, on s'est appuyé :

- sur les données instrumentales disponibles, pour le séisme de Sierentz (15 juillet 1980) d'une part ;

- sur l'application de la relation de Blake-Shebalin et de la méthode de Sponheuer aux données macrosismiques utilisables pour les séismes historiques de 1682 (Remiremont), 1356 (Bâle) et 1911 (Jura Souabe), d'autre part.

Les résultats sont résumés sur le tableau 4. Dans tous les cas, l'application de ces méthodes conduit à une **assez forte dispersion sur les résultats**. Les valeurs retenues correspondent à des **valeurs moyennes entachées d'une forte incertitude**. Cette dispersion résulte probablement du trop faible nombre d'intensités ponctuelles connues en dehors de la zone épacentrale, pour les séismes de 1356 et 1682, et d'une surestimation possible de nombreuses intensités supérieures à V pour le séisme de 1911.

4.2.2. Magnitude

De la même façon, les magnitudes attribuées aux séismes de référence ont été obtenues :

- à partir de la valeur déterminée instrumentalement pour le séisme de Sierentz du 15 juillet 1980 ;

- à partir de corrélations entre intensité épacentrale et magnitude pour les séismes historiques de 1356, 1682 et 1911, faisant éventuellement intervenir la profondeur focale du séisme, en prêtant attention aux domaines de validité des lois utilisées.

Là aussi, une assez forte dispersion est observée, résultant en particulier de l'incertitude sur la profondeur focale.

Les résultats finalement retenus sont présentés sur le tableau 4 ci-dessous :

Tableau 4 - CARACTERISTIQUES FOCALES DES SEISMES DE REFERENCE

SEISME	INTENSITE EPICENTRALE Io (M.S.K.)	PROFONDEUR FOCALE h (km)	MAGNITUDE M
15 juillet 1980 (SIERENTZ)	VII	12	4.7
18 octobre 1356 (BALE)	VIII-IX	18 ± 4	6.2 ± 0.3
12 mai 1682 (REMIREMONT)	VIII	18 ± 6	5.8 ± 0.4
16 novembre 1911 (JURA SOUABE)	VIII	25 ± 5	5.8 ± 0.4

Les séismes du 12 mai 1682 et du 16 novembre 1911 sont donc tout à fait équivalents et le parallélisme entre les zones de Remiremont et du Jura Souabe est encore souligné.

Pour le séisme de 1911, la magnitude obtenue à partir des données macrosismiques est en bon accord avec les données publiées par ailleurs (SCHNEIDER, 1979 ; HAESSLER et al., 1980). La profondeur calculée ici est, par contre, beaucoup plus forte. Ce résultat étant très incertain compte-tenu de la dispersion des données, on conservera forfaitairement la valeur de 20 km.

4.3. DETERMINATION DES SEISMES DE REFERENCE RETENUS SUR CHAQUE SITE

Compte-tenu de la position respective de chaque site par rapport aux unités sismotectoniques considérées, plusieurs d'entre eux ont été regroupés puisque situés à une distance minimale de ces unités équivalente.

Le tableau 5 présente les valeurs obtenues pour chaque groupement de sites, en fonction des deux types d'hypothèse (plus ou moins pénalisante). Il fait apparaître finalement un nombre limité de cas à considérer, résultant de configurations (I_0 , M, Δ_0 , I_s)* équivalentes pour plusieurs groupements de sites, numérotés de 1 à 9. De plus, pour un groupement de sites donné, certains des cas définis sont négligeables devant d'autres. Finalement, dans l'optique du calcul des spectres de réponse des S.M.H.V. et S.M.S., il est possible de simplifier notablement la présentation initiale.

Ce résultat synthétique est donné par le tableau 6. Les simplifications admises sont les suivantes :

- les configurations 3, 4 et 5 sont équivalentes, compte-tenu de la profondeur focale du séisme de référence ;

- les configurations 2 et 6 sont équivalentes (faible variation de la distance focale au séisme de référence, même intensité produite sur le site) ;

- pour les sites 2 et 11, 1 et 12, 9 et 10, dans l'hypothèse H_2 , la configuration 2 est équivalente aux configurations 3, 4 et 5 (S.M.H.V. lointain un peu plus fort en magnitude : 6.2 pour 5.8, à une distance focale bien plus grande : 32 km pour 18 km et pour la même intensité sur le site) ; de plus, la configuration 2 aura déjà été prise en compte dans l'hypothèse H_1 ;

- pour les sites 3 et 13, dans l'hypothèse H_2 , la configuration 7 est négligeable devant la configuration 6 (compte-tenu du faible écart sur les distances épacentrales et focales des S.M.H.V. considérés comme "proche" et "lointain" : 15 pour 20 km et 23 pour 27 km, de l'intensité plus faible engendrée sur les sites par le S.M.H.V. "proche" : VII-VIII pour VIII, et de la magnitude plus élevée du S.M.H.V. "lointain" : 6.2 pour 5.8) ;

* I_0 : intensité épacentrale du séisme de référence

M : magnitude du séisme de référence

Δ_0 : distance épacentrale minimale au S.M.H.V.

I_s : intensité du S.M.H.V. sur le site. Lorsque la détermination de cette intensité a nécessité l'emploi d'une loi d'atténuation, on a utilisé préférentiellement une translation directe des isoséistes connues pour le séisme de référence, conformément aux principes de la RFS n° I-2c.

- pour les sites 4 et 5, dans l'hypothèse H_2 , la configuration 8 est équivalente à la configuration 6 en termes de paramètres utiles au calcul du spectre (distance focale peu différente : 22 pour 27 km mais magnitude plus faible : 5.8 pour 6.2 et même intensité produite sur le site) ;

- pour les sites 6, 7 et 8, dans l'hypothèse H_2 , la configuration 8 est négligeable devant la configuration 9 et finalement, quelle que soit l'hypothèse envisagée, H_1 ou H_2 , seul le S.M.H.V. proche reste à considérer.

En conclusion, selon l'hypothèse retenue H_1 ou H_2 , il n'y aura finalement que 4 types de spectres différents à déterminer pour traiter le cas des 13 sites industriels concernés.

Tableau 5 - DETERMINATION DES S.M.H.V. PAR GROUPEMENTS DE SITES

Les résultats sont présentés en fonction des 4 séismes de référence retenus qui, selon les sites considérés, constituent les S.M.H.V. "proche" ou "lointain". Les caractéristiques focales de ces séismes étant fixées, ne sont rappelés, pour chaque groupements de sites, que les paramètres susceptibles de varier :

- Δ_e : distance épacentrale minimale au site ;
- r : distance focale au site ;
- I_0 : intensité du S.M.H.V. sur le site.

A chaque triplet de valeurs (Δ_e , r , I_0) correspond une configuration de calcul numérotée de 1 à 9. Lorsque ce triplet se répète pour un autre site, seul le numéro de la configuration est rappelé.

(1) Groupements de sites considérés

- n° 2 et 11 : Potasse et Produits chimiques (P.P.C.) de THANN et Rollin de STEINBACH ;
- n° 1 et 12 : Dupont de Nemours de CERNAY et Bima de CERNAY ;
- n° 9 et 10 : Mines de Potasse d'Alsace de STAFFELFELDEN et WITTELSHEIM ;
- n° 3 et 13 : Industries chimiques DORNACH ICND de Mülhouse et BEVALOIDE de Mülhouse
- n° 4 et 5 : Produits et Engrais chimiques du Rhin (PEC Rhin) de OTTMARSHEIM et Rhône-Poulenc d CHALAMPE ;
- n° 6,7 et 8 : Ciba Geigy France de HUNINGUE, Sandoz France de HUNINGUE et Roche France de VILLAGE-NEUF

(2) Hypothèses considérées

- (H_1) : rattachement des séismes de Remiremont (12.5.1682) et du Jura Souabe (16.11.1911) respectivement aux zones faillées de Remiremont - Epinal - Vesoul et Sigmaringen - Gammertingen.
- (H_2) : rattachement des séismes de Remiremont et du Jura Souabe respectivement aux unités sismotectoniques IV (Vosges) et VI (Forêt Noire/Jura Souabe).

(3) Types de S.M.H.V.

- P : "proche" : sous le site ou à une distance épacentrale inférieure à une vingtaine de kilomètre
- L : "lointain" : à une distance épacentrale supérieure à une vingtaine de kilomètres.

Tableau 5 - DETERMINATION DES S.M.H.V. PAR GROUPEMENTS DE SITES

				SEISMES DE REFERENCE ET CARACTERISTIQUES FOCALES			
				15 juillet 1980 (SIERENTZ)	18 octobre 1356 (BALE)	12 mai 1682 (REMIREMONT)	16 novembre 1911 (JURA SOUABE)
SITES (1)	HYPOTHESES (2)	S.M.H.V. (3)	DISTANCES, INTENSITE	$I_0 = VII$ $h = 12 \text{ km}$ $M = 4,7$	$I_0 = VIII-IX$ $h = 18 \pm 4 \text{ km}$ $M = 6,2 \pm 0,3$	$I_0 = VIII$ $h = 18 \pm 6 \text{ km}$ $M = 5,8 \pm 0.$	$I_0 = VIII$ $h = 20 \text{ km}$ $M = 5,8 \pm 0,4$
2 et 11	(H ₁)	P	Δ_e, r I_s	0, 12 VII	/ 1		
		L	Δ_e, r I_s		27, 32 VIII	/ 2	
	(H ₂)	P	Δ_e, r I_s			0, 18 VIII	/ 3
		L	Δ_e, r I_s		(2)		
1 et 12	(H ₁)	P		(1)			
		L			(2)		
	(H ₂)	P	Δ_e, r I_s			3, 18 VIII	/ 4
		L			(2)		
9 et 10	(H ₁)	P		(1)			
		L			(2)		
	(H ₂)	P	Δ_e, r I_s			7, 19 VIII	/ 5
		L			(2)		
3 et 13	(H ₁)	P		(1)			
		L	Δ_e, r I_s		20, 27 VIII	/ 6	
	(H ₂)	P	Δ_e, r I_s			15, 23 VII-VIII	/ 7
		L			(6)		
4 et 5	(H ₁)	P		(1)			
		L			(6)		
	(H ₂)	P	Δ_e, r I_s				10, 22 VIII
		L			(6)		/ 8
6, 7 et 8	(H ₁)	P	Δ_e, r I_s		0, 18 VIII-IX	/ 9	
		L		N E G L I G E A B L E			
	(H ₂)	P			(9)		
		L					(8)

Tableau 6 - SYNTHÈSE DES CONFIGURATIONS DE CALCUL DES SPECTRES DES S.M.H.V. APRES REGROUPEMENT DES CAS EQUIVALENTS

spectres types hypothèses	(1) + (6)	(3)	(6)	(9)
(H₁)	Sites n°1, 2,3,4,5,9, 10,11,12, 13			Sites n°6, 7 et 8
(H₂)		Sites n°1, 2,9,10,11, 12	Sites n°3, 4, 5 et 13	Sites n°6, 7 et 8

En résumé, il ne resterait donc que 4 spectres différents à calculer :

CONFIGURATION	MAGNITUDE M	DISTANCE FOCALE r (km)	INTENSITE AU SITE Is
(1)	4,7	12	VII
(3)	5,8	18	VIII
(6)	6,2	27	VIII
(9)	6,2	18	VIII-IX

5. CALCUL DES SPECTRES HORIZONTAUX DE REPOSE ELASTIQUES DES SMHV ET DES SMS, POUR CHACUN DES SITES

La détermination des différents spectres pour chacun des sites est détaillée dans le volume 7. Par ailleurs, compte tenu de la localisation respective des sites par rapport aux séismes de référence, il a été mis en évidence, dans le volume 6, qu'il n'y avait finalement que quatre spectres différents à calculer pour l'ensemble des sites.

Ces spectres ont été évalués pour une condition standard de site que nous avons appelée "*rocher horizontal affleurant*"; cette condition comprenant à la fois des sites sur le rocher compact, altéré, et sur des bons sols.

Dans une phase ultérieure d'étude, pour passer à l'utilisation pratique de ces spectres pour des calculs de structures, il est particulièrement important de contrôler si le site peut effectivement être considéré comme "bon" par une étude géotechnique spécifique.

Dans le cas contraire, il conviendrait de rechercher des nouveaux spectres, "tenant compte des conditions de site" et prenant en compte les caractéristiques mécaniques et géométriques des sols, ainsi que le mouvement de référence au "rocher".

Les séismes récents (en particulier au Mexique -1985- et à Loma Prieta -Californie, 1989-) ont rappelé l'importance de ce que l'on appelle les "effets de site" qui peuvent conduire à des amplifications temporelles et fréquentielles (spectrales) très significatives.

Pour la détermination des spectres de référence, deux types de méthode ont été utilisés (voir volume 7).

■ *Méthodes empiriques-statistiques*

Ces méthodes sont basées sur une analyse statistique d'observations accélérométriques, pour des classes données d'intensité, de magnitude et de distance à la source (le plus souvent focale). Compte tenu du faible nombre de données, ces méthodes ne prennent généralement pas en compte différentes conditions de site.

Nous avons utilisé les résultats des méthodes de B. et G. MOHAMMADIOUN (1980), à l'origine de ce qui est préconisé dans les règles RFS n° I-2-c (applicables aux installations nucléaires) et de D. PETROVSKI (1986).

■ *Méthodes spectrales*

Ces méthodes utilisent un modèle physique de la source et du trajet source-site, dans le domaine fréquentiel, appelé modèle spectral, calé sur des enregistrements réels.

Ce modèle permet de générer des accélérogrammes synthétiques au "rocher horizontal affleurant" prenant en compte des paramètres simples de la source sismique, comme la magnitude et la distance focale. Un premier modèle avait été mis au point par BOORE (1983) ; il a été amélioré par la suite par P. BERNARD (1987) et le B.R.G.M.

Les quatre spectres dont il a été question ci-dessus correspondent aux quatre configurations sismiques suivantes (cf tableau 6 précédent).

CONFI- GURATION	SEISME	MAGNITUDE	DISTANCE FOCALE (km)	INTENSITE AU SITE
(1)	SIERENTZ (1980)	4.7	12	VII
(3)	REMIREMONT	5.8	18	VIII
(6)	BALE (1356)	6.2	27	VIII
(9)	BALE (1356)	6.2	18	VIII-IX

Par ailleurs, la combinaison de ces spectres en ne gardant que les branches de spectres les plus défavorables, conduit à retenir seulement trois classes de spectres pour l'ensemble des sites.

Ces classes sont les suivantes (les numéros de sites sont ceux de la planche I du volume 6) :

- ♦ **CLASSE I** : elle correspond au séisme de Bâle (avec $M = 6,2$; distance focale = 27 km) et est utilisable pour les sites n° 3, 4, 5 et 13 ;
- ♦ **CLASSE II** : elle correspond à une combinaison des deux séismes de Bâle ($M = 6,2$; distance focale = 27 km) et de Remiremont ($M = 5,8$; distance focale = 18 km) ; elle est utilisable pour les sites n° 1, 2, 9, 10, 11 et 12 ;
- ♦ **CLASSE III** : elle correspond au séisme de Bâle (avec $M = 6,2$; distance focale = 18 km) ; elle est utilisable pour les sites n° 6, 7 et 8.

On voit que le séisme de Sierentz n'intervient pas dans la définition des spectres des différentes classes et que celui de la classe III est le plus défavorable.

Les spectres correspondant aux différentes classes sont présentés :

♦ pour les spectres **SMHV**, sur les figures 4 (classe I), 5 (classe II) et 6 (classe III), ainsi que sur les tableaux 7 (classe I, 8 (classe II) et 9 (classe III) ;

♦ pour les spectres **SMS**, sur les figures 7 (classe I), 8 (classe II) et 9 (classe III), ainsi que sur les tableaux 10 (classe I), 11 (classe II) et 12 (classe III).

FIGURE 4

CLASSE I

SPECTRE DE REPOSE ELASTIQUE
HORIZONTAL AU "ROCHER HORIZONTAL
AFFLEURANT" DU SMHV

Valeurs de A, V et D
en fonction de F

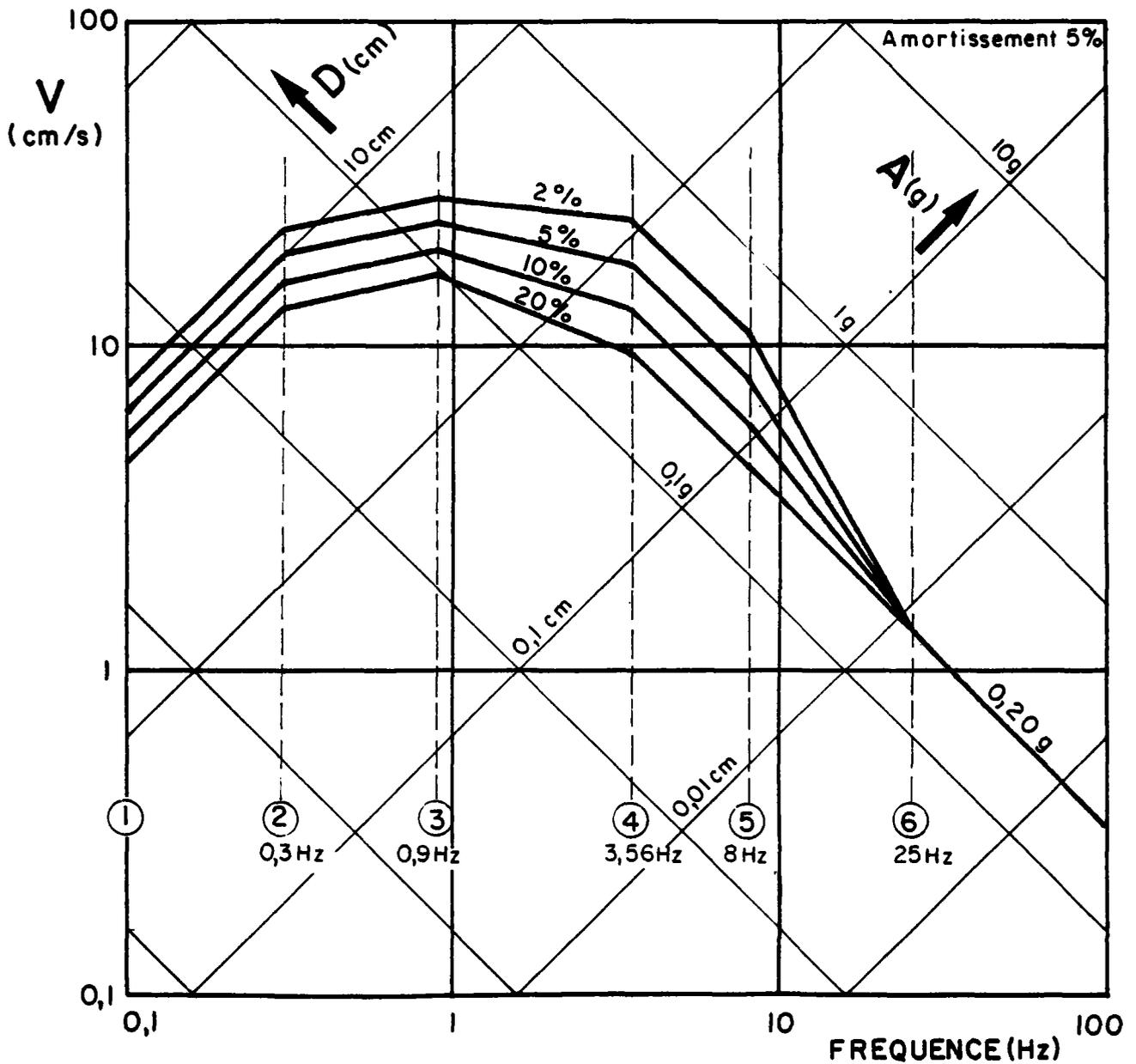


TABLEAU 7

CLASSE I

**SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE
HORIZONTAL AU "ROCHER HORIZONTAL
AFFLEURANT" DU SMHV**

**Valeurs de A, V et D
en fonction de F**

PROFIL (figure 4)	F (Hz)	AMORTISSEMENT (ksi %)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
(1)	0.10	2	0.00474	7.54	12.00
(1)	0.10	5	0.00395	6.28	10.00
(1)	0.10	10	0.00329	5.24	8.33
(1)	0.10	20	0.00274	4.36	6.94

(2)	0.30	2	0.04264	22.62	12.00
(2)	0.30	5	0.03553	18.85	10.00
(2)	0.30	10	0.02961	15.71	8.33
(2)	0.30	20	0.02467	13.09	6.94

(3)	0.90	2	0.16286	28.80	5.09
(3)	0.90	5	0.13572	24.00	4.24
(3)	0.90	10	0.11310	20.00	3.54
(3)	0.90	20	0.09425	16.67	2.95

(4)	3.56	2	0.54803	24.51	1.10
(4)	3.56	5	0.40002	17.89	0.80
(4)	3.56	10	0.29199	13.06	0.58
(4)	3.56	20	0.21313	9.53	0.43

(5)	8.00	2	0.54800	10.90	0.22
(5)	8.00	5	0.40000	7.96	0.16
(5)	8.00	10	0.29197	5.81	0.12
(5)	8.00	20	0.21312	4.24	0.08

(6)	25.00	V ksi	0.19999	1.27	0.01

FIGURE 5

CLASSE II

SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE
HORIZONTAL AU "ROCHER HORIZONTAL
AFFLEURANT" DU SMHV

Valeurs de A, V et D
en fonction de F

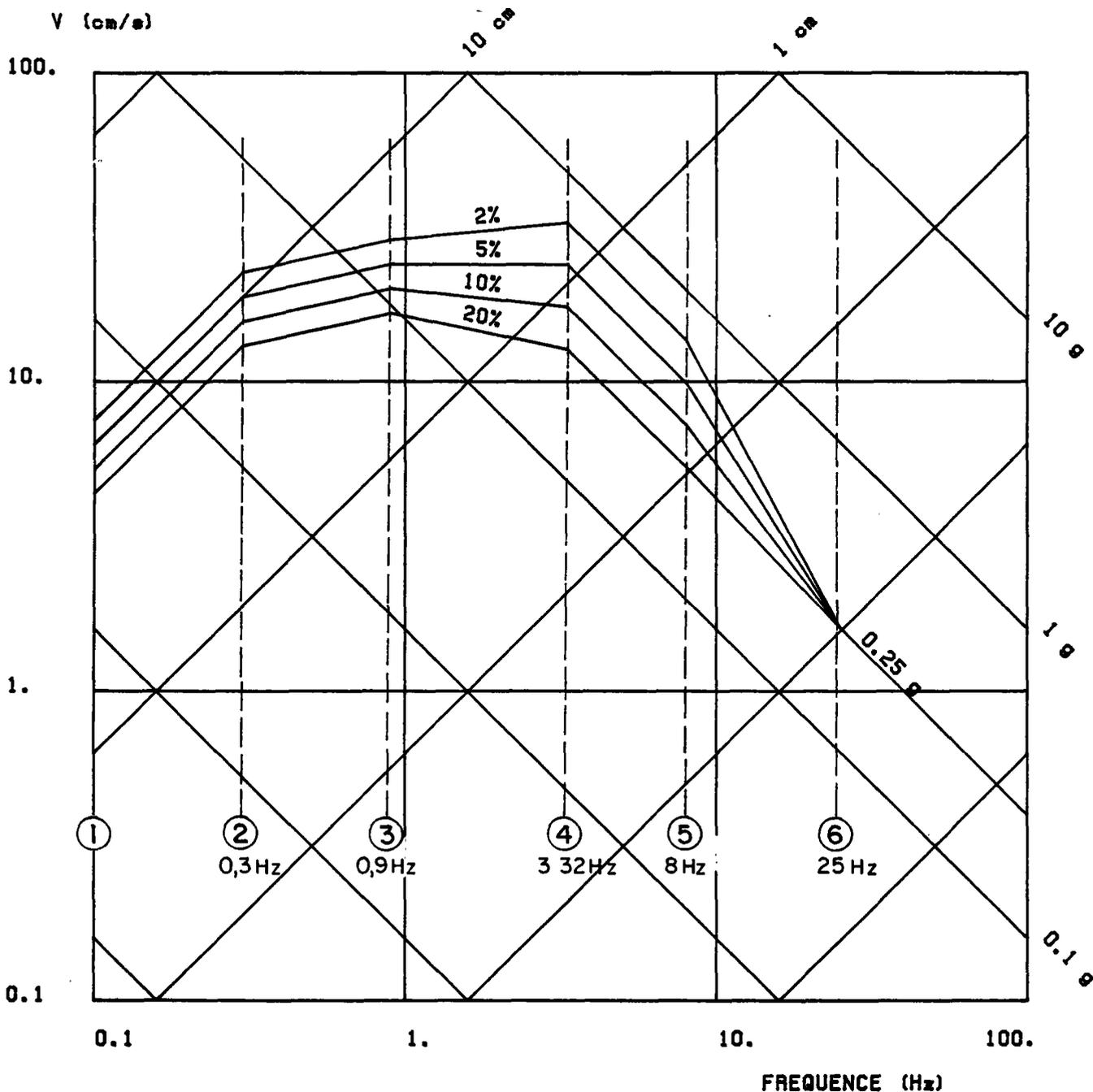


TABLEAU 8

CLASSE II

**SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE
HORIZONTAL AU "ROCHER HORIZONTAL
AFFLEURANT" DU SMHV**

**Valeurs de A, V et D
en fonction de F**

PROFIL (Figure 5)	F (Hz)	AMORTISSEMENT (ksi %)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
(1)	0.10	2	0.00474	7.54	11.99
(1)	0.10	5	0.00395	6.28	9.99
(1)	0.10	10	0.00329	5.23	8.33
(1)	0.10	20	0.00274	4.36	6.94

(2)	0.30	2	0.04264	22.62	12.00
(2)	0.30	5	0.03553	18.85	10.00
(2)	0.30	10	0.02961	15.71	8.33
(2)	0.30	20	0.02467	13.09	6.94

(3)	0.90	2	0.16286	28.80	5.09
(3)	0.90	5	0.13572	24.00	4.24
(3)	0.90	10	0.11310	20.00	3.54
(3)	0.90	20	0.09425	16.67	2.95

(4)	3.32	2	0.68500	32.88	1.58
(4)	3.32	5	0.50000	24.00	1.15
(4)	3.32	10	0.36496	17.52	0.84
(4)	3.32	20	0.26640	12.79	0.61

(5)	8.00	2	0.68500	13.63	0.27
(5)	8.00	5	0.50000	9.95	0.20
(5)	8.00	10	0.36496	7.26	0.14
(5)	8.00	20	0.26640	5.30	0.11

(6)	25.00	V ksi	0.25000	1.59	0.01

FIGURE 6

CLASSE III

SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE
HORIZONTAL AU "ROCHER HORIZONTAL
AFFLEURANT" DU SMHV

Valeurs de A, V et D
en fonction de F

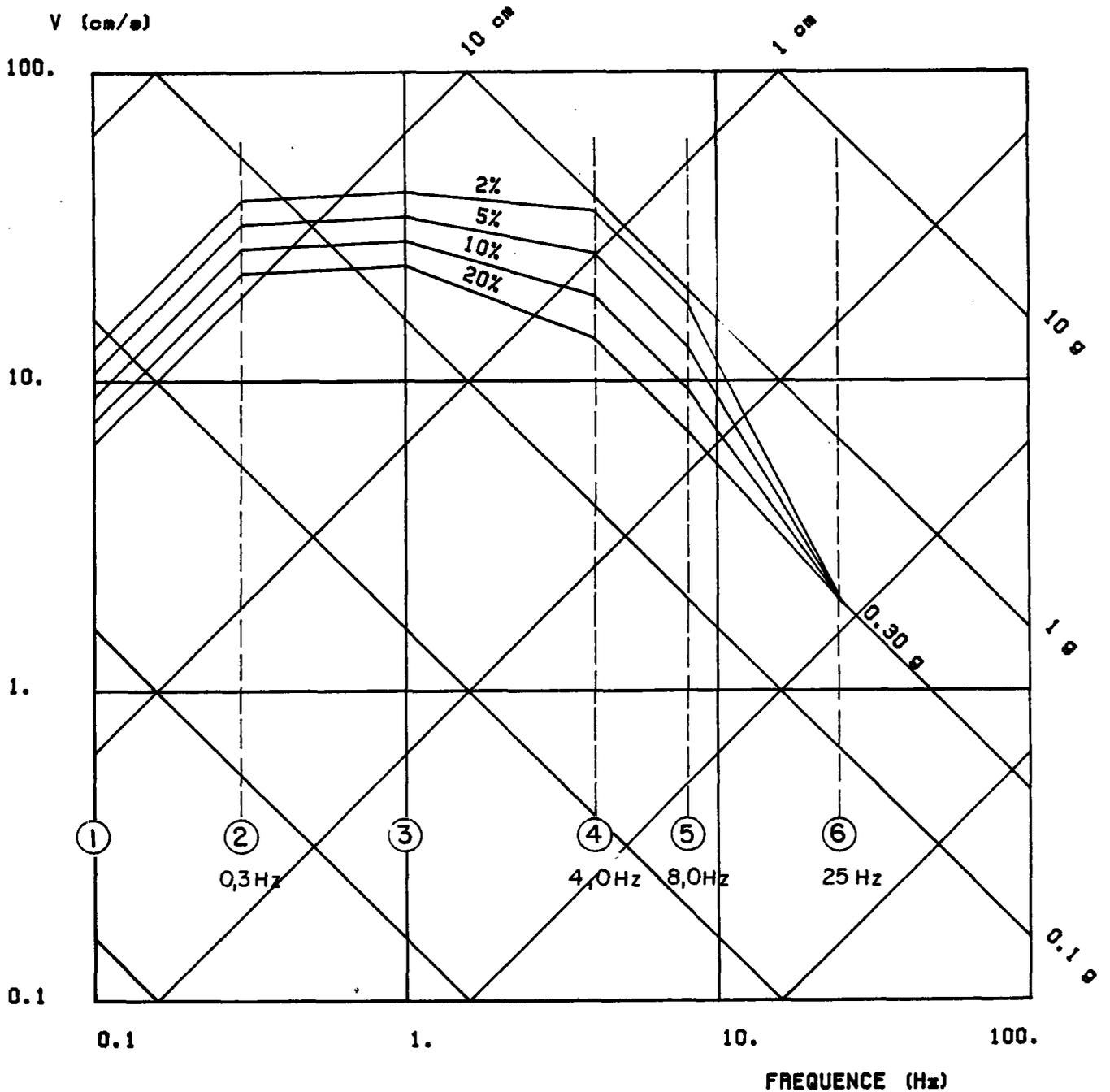


TABLEAU 9

CLASSE III

**SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE
HORIZONTAL AU "ROCHER HORIZONTAL
AFFLEURANT" DU SMHV**

**Valeurs de A, V et D
en fonction de F**

PROFIL (Figure 6)	F (Hz)	AMORTISSEMENT (ksi %)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
(1)	0.10	2	0.00805	12.82	20.40
(1)	0.10	5	0.00671	10.68	17.00
(1)	0.10	10	0.00559	8.90	14.17
(1)	0.10	20	0.00466	7.42	11.81
(2)	0.30	2	0.07248	38.45	20.40
(2)	0.30	5	0.06040	32.04	17.00
(2)	0.30	10	0.05033	26.70	14.17
(2)	0.30	20	0.04195	22.25	11.81
(3)	1.00	2	0.25635	40.80	6.49
(3)	1.00	5	0.21363	34.00	5.41
(3)	1.00	10	0.17802	28.33	4.51
(3)	1.00	20	0.14835	23.61	3.76
(4)	4.00	2	0.89050	35.43	1.41
(4)	4.00	5	0.65000	25.86	1.03
(4)	4.00	10	0.47445	18.88	0.75
(4)	4.00	20	0.34631	13.78	0.55
(5)	8.00	2	0.89050	17.72	0.35
(5)	8.00	5	0.65000	12.93	0.26
(5)	8.00	10	0.47445	9.44	0.19
(5)	8.00	20	0.34631	6.89	0.14
(6)	25.00	V ksi	0.30000	1.91	0.01

FIGURE 7

CLASSE I

**SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE
HORIZONTAL AU "ROCHER HORIZONTAL
AFFLEURANT" DU SMS**

Valeurs de A, V et D
en fonction de F

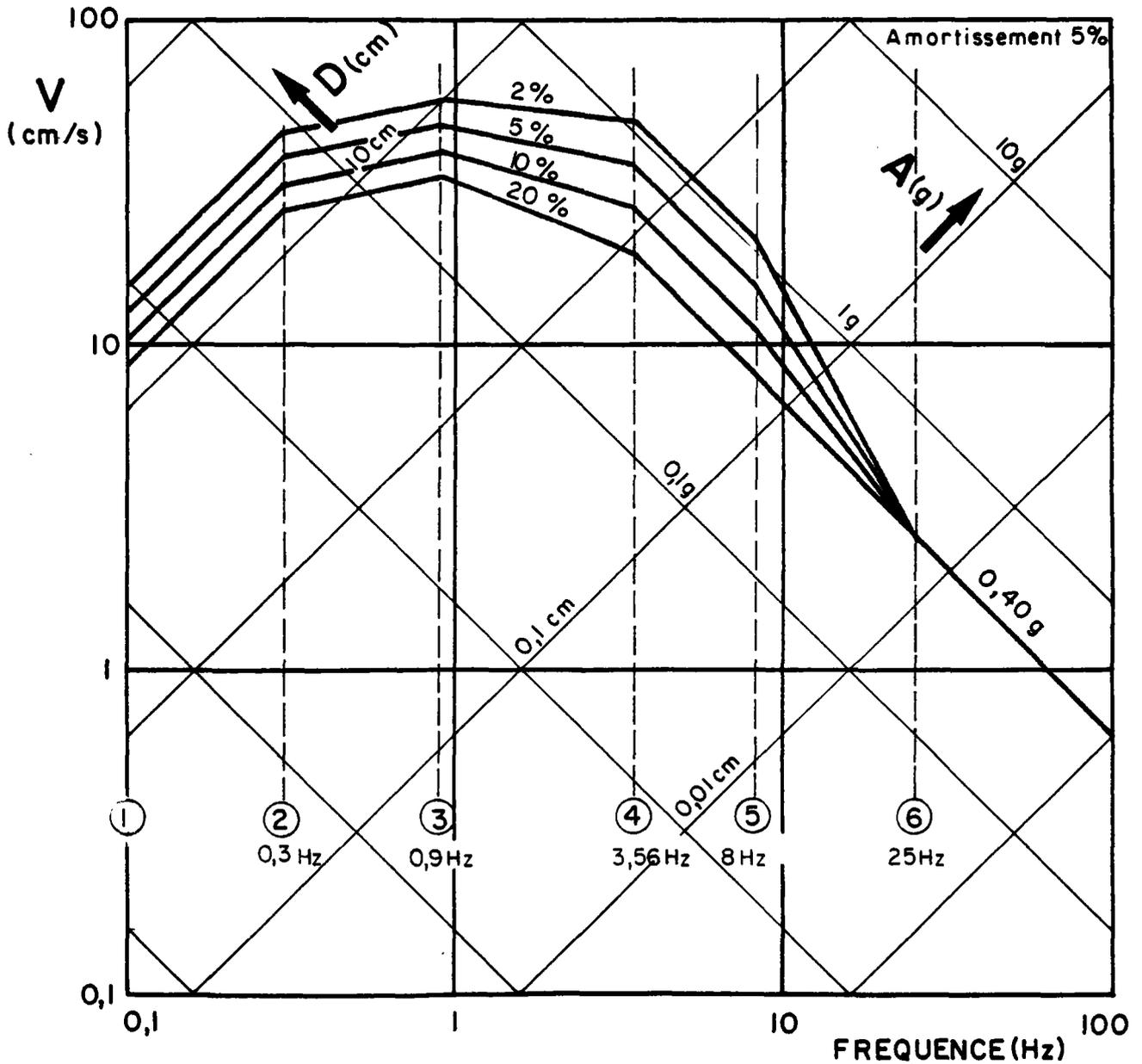


TABLEAU 10

CLASSE I

**SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE
HORIZONTAL AU "ROCHER HORIZONTAL
AFFLEURANT" DU SMS**

**Valeurs de A, V et D
en fonction de F**

PROFIL (Figure 7)	F (Hz)	AMORTISSEMENT (ksi %)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
(1)	0.10	2	0.00947	15.08	24.00
(1)	0.10	5	0.00790	12.57	20.00
(1)	0.10	10	0.00658	10.47	16.67
(1)	0.10	20	0.00548	8.73	13.89

(2)	0.30	2	0.08527	45.24	24.00
(2)	0.30	5	0.07106	37.70	20.00
(2)	0.30	10	0.05922	31.42	16.67
(2)	0.30	20	0.04935	26.18	13.89

(3)	0.90	2	0.32572	57.60	10.19
(3)	0.90	5	0.27143	48.00	8.49
(3)	0.90	10	0.22619	40.00	7.07
(3)	0.90	20	0.18849	33.33	5.89

(4)	3.56	2	1.09605	49.01	2.19
(4)	3.56	5	0.80004	35.78	1.60
(4)	3.56	10	0.58397	26.11	1.17
(4)	3.56	20	0.42626	19.06	0.85

(5)	8.00	2	1.09599	21.80	0.43
(5)	8.00	5	0.80000	15.92	0.32
(5)	8.00	10	0.58394	11.62	0.23
(5)	8.00	20	0.42623	8.48	0.17

(6)	25.00	V ksi	0.39999	2.55	0.02

FIGURE 8

CLASSE II

SPECTRE DE REPOSE ELASTIQUE
HORIZONTAL AU "ROCHER HORIZONTAL
AFFLEURANT" DU SMS

Valeurs de A, V et D
en fonction de F

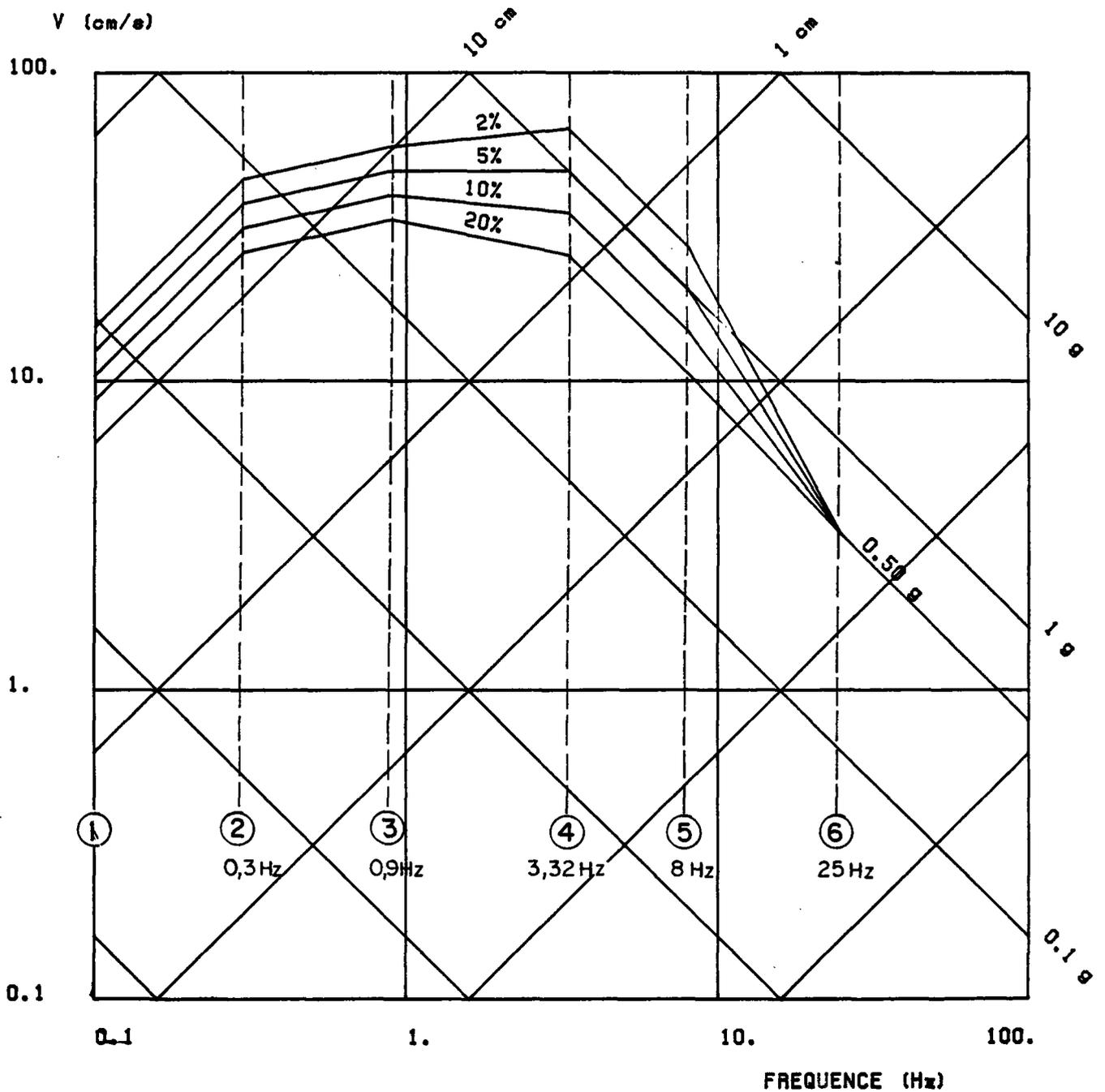


TABLEAU 11

CLASSE II

**SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE
HORIZONTAL AU "ROCHER HORIZONTAL
AFFLEURANT" DU SMS**

Valeurs de A, V et D
en fonction de F

PROFIL (Figure 8)	F (Hz)	AMORTISSEMENT (ksi %)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
(1)	0.10	2	0.00947	15.07	23.99
(1)	0.10	5	0.00789	12.56	19.99
(1)	0.10	10	0.00658	10.47	16.66
(1)	0.10	20	0.00548	8.72	13.88
(2)	0.30	2	0.08528	45.24	24.00
(2)	0.30	5	0.07106	37.70	20.00
(2)	0.30	10	0.05922	31.42	16.67
(2)	0.30	20	0.04935	26.18	13.89
(3)	0.90	2	0.32572	57.60	10.19
(3)	0.90	5	0.27143	48.00	8.49
(3)	0.90	10	0.22619	40.00	7.07
(3)	0.90	20	0.18849	33.33	5.89
(4)	3.32	2	1.37000	65.76	3.16
(4)	3.32	5	1.00000	48.00	2.30
(4)	3.32	10	0.72993	35.04	1.68
(4)	3.32	20	0.53279	25.57	1.23
(5)	8.00	2	1.37000	27.26	0.54
(5)	8.00	5	1.00000	19.89	0.40
(5)	8.00	10	0.72993	14.52	0.29
(5)	8.00	20	0.53279	10.60	0.21
(6)	25.00	V ksi	0.50000	3.18	0.02

FIGURE 9

CLASSE III

**SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE
HORIZONTAL AU "ROCHER HORIZONTAL
AFFLEURANT" DU SMS**

Valeurs de A, V et D
en fonction de F

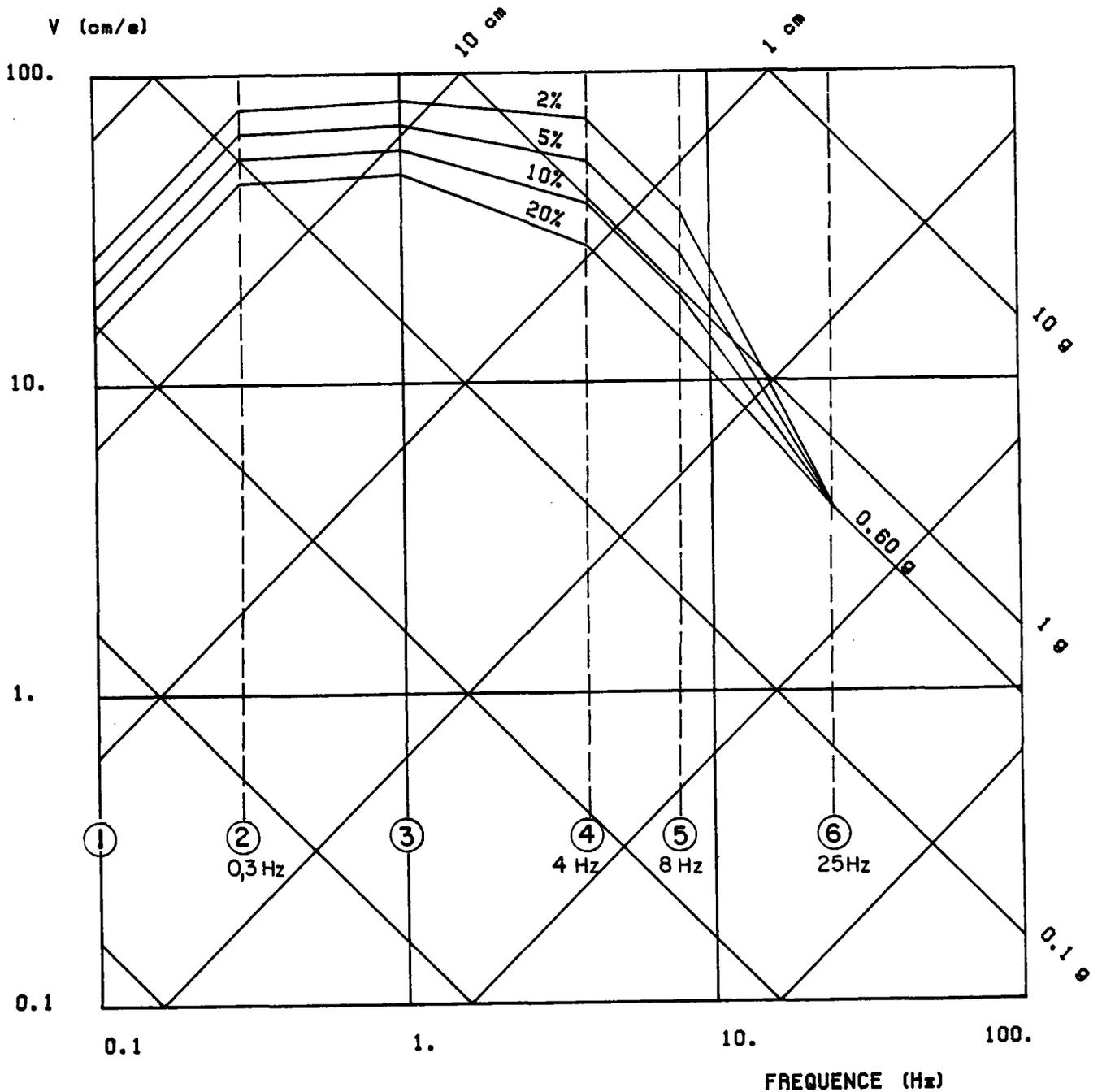


TABLEAU 12

CLASSE III

**SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE
HORIZONTAL AU "ROCHER HORIZONTAL
AFFLEURANT" DU SMS**

**Valeurs de A, V et D
en fonction de F**

PROFIL (Figure 9)	F (Hz)	AMORTISSEMENT (ksi %)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
(1)	0.10	2	0.01611	25.64	40.80
(1)	0.10	5	0.01342	21.36	34.00
(1)	0.10	10	0.01119	17.80	28.33
(1)	0.10	20	0.00932	14.84	23.61
(2)	0.30	2	0.14496	76.91	40.80
(2)	0.30	5	0.12080	64.09	34.00
(2)	0.30	10	0.10067	53.41	28.33
(2)	0.30	20	0.08389	44.51	23.61
(3)	1.00	2	0.51271	81.60	12.99
(3)	1.00	5	0.42726	68.00	10.82
(3)	1.00	10	0.35605	56.67	9.02
(3)	1.00	20	0.29671	47.22	7.52
(4)	4.00	2	1.78100	70.86	2.82
(4)	4.00	5	1.30000	51.73	2.06
(4)	4.00	10	0.94890	37.76	1.50
(4)	4.00	20	0.69263	27.56	1.10
(5)	8.00	2	1.78100	35.43	0.70
(5)	8.00	5	1.30000	25.86	0.51
(5)	8.00	10	0.94890	18.88	0.38
(5)	8.00	20	0.69263	13.78	0.27
(6)	25.00	V ksi	0.60000	3.82	0.02



6. CONCLUSIONS

Le présent volume résume les principaux résultats obtenus concernant la prise en compte de l'aléa sismique dans le cadre d'une étude des dangers pour des installations industrielles à "haut risque".

La démarche suivie est conforme à la pratique réglementaire en matière de sûreté nucléaire (règle fondamentale de sûreté n° I-2-c) ; elle s'appuie sur une évaluation déterministe de l'aléa sismique régional.

Les caractéristiques des différents séismes retenus sont résumées sur les tableaux 4, 5 et 6, avec les incertitudes correspondantes.

Enfin, trois classes de spectres élastiques horizontaux ont pu être mises en évidence à partir de l'analyse de l'influence de chacune des sources sismiques (cf § 5). Ces spectres peuvent être considérés au "rocher horizontal affleurant".

Dans toute phase ultérieure d'étude, il conviendra de contrôler si le site peut être considéré comme tel et, dans le cas contraire, de rechercher de nouveaux spectres en tenant compte des caractéristiques mécaniques et géométriques des sols, ce qui constitue la phase d'étude de l'aléa sismique local.

Par ailleurs, il faut bien voir que les mouvements de référence ainsi proposés doivent s'intégrer dans la chaîne complète d'évaluation du risque sismique. Ces rapports n'abordent pas le calcul et le comportement des structures soumises à ces mouvements, qui doivent faire l'objet de phases ultérieures d'étude concernant, en particulier :

- ♦ la vérification de la stabilité des sols de fondation des structures (liquéfaction et tassements éventuels) ;
- ♦ les méthodes de calcul des effets des mouvements sismiques sur les structures et équipements ;
- ♦ les combinaisons d'actions à retenir (cumul de ces effets avec les autres charges imposées à la structure) ;
- ♦ les critères de vérification des exigences de comportement (intégrité maintenu en ne considérant que la réponse élastique ou incursions limitées dans le domaine post élastique admises, en tenant compte de la ductilité des matériaux).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(chapitre 1 du volume 1 ; pour les références des autres chapitres se reporter aux volumes 6 et 7)

- (1) J. DESPEYROUX, 1985 - Le projet de construction parasismique, in : Génie parasismique, V. DAVIDOVICI (éd.), Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées.
- (2) J. DESPEYROUX, 1986 - Détermination de la sécurité, in : Règles relatives aux ouvrages à réaliser dans les régions sujettes aux séismes, PS 86, D.T.U. (sous presse).
- (3) J. DESPEYROUX, P. GODEFROY, 1985 - Nouveau zonage sismique de la France en vue de l'application des règles parasismique de construction et de la mise en oeuvre des plans d'exposition aux risques (P.E.R.), Rapport BRGM 85 SGN 508 GEG ; octobre 1985, Délégation aux risques majeurs, Paris.

J. DESPEYROUX, P. GODEFROY, 1986 - Nouveau zonage sismique de la France. La Documentation Française, Paris, 147 pp.
- (4) X. GOULA, P. GODEFROY, 1985 - Evaluation de l'aléa sismique régional ; zonage à petite échelle, in : Génie parasismique, V. DAVIDOVICI (éd.), Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées.
- (5) P. GODEFROY, A. LEVRET, 1985 - Nature et définition de l'aléa sismique, in : Génie parasismique, V. DAVIDOVICI (éd.), Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées.
- (6) Règle fondamentale de sûreté n°I-2c, 1981 - Détermination des mouvements sismiques à prendre en compte pour la sûreté des installations nucléaires comportant un réacteur à eau sous pression. Ministère de l'Industrie, Direction de la qualité et de la sécurité industrielle, Service central de sûreté des installations nucléaires, réf. SIN n° B 5149/81, 1er octobre 1981.

A N N E X E 1

C F D E /9 décembre 1987

RISQUE SISMIQUE

Politique de l'administration en matière de protection parasismique des établissements industriels à haut niveau de risque.

PREAMBULE

Le présent exposé ne concerne pas les installations nucléaires de base mais uniquement les installations classées pour la protection de l'environnement au titre de la loi du 19 juillet 1976. Il faut cependant remarquer que la politique de l'administration qui s'élabore progressivement pour les installations classées à haut niveau de risque s'inspire très directement des pratiques et méthodologies développées dans le nucléaire et, en particulier, pour les installations de production d'énergie électrique comportant un réacteur à eau sous-pression.

LE CADRE JURIDIQUE

La circulaire du 28 décembre 1983 relative aux installations classées (application de la directive communautaire "SEVESO") qui a contribué à une meilleure définition des objectifs et du contenu des études des dangers, a explicitement prévu que le **risque sismique** devait être pris en compte parmi les causes externes d'accident.

Pour chaque installation présentant un danger potentiel, le niveau de risque sismique de la zone d'implantation et la vulnérabilité des équipements à ce type d'agression doivent donc être examinés. Bien évidemment, comme cela est un principe général pour les études de dangers, le **niveau de détail avec lequel seront réalisées l'analyse des conséquences d'un séisme et la justification des mesures prises doivent être proportionnées aux enjeux.**

- 1 - La probabilité et l'importance de l'agression pouvant être subie ;
- 2 - Le potentiel de dangers de l'installation concernée ;
- 3 - Le niveau de vulnérabilité du site d'implantation (population exposée, environnement sensible, équipements importants...)

Ces trois critères sont pris en compte pour arrêter la position de l'administration mais il n'est pas possible de fixer des règles trop systématiques sur ce sujet. Chaque cas devant faire l'objet d'un examen spécifique, **il est toujours souhaitable qu'un contact avec l'inspecteur des installations classées ait lieu, le plus en amont possible dans le projet, et en particulier avant que des décisions irréversibles aient été prises à propos de la conception de l'installation.**

LE NIVEAU D'EXPOSITION AU RISQUE SISMIQUE

L'appréciation du niveau d'exposition au risque sismique est une affaire de spécialistes. Elle fait appel à des banques de données sur les séismes historiques et à des calculs auxquels l'exploitant n'a en général par accès. L'importance de ces études préliminaires impose qu'elles ne soient pas systématiques et l'on peut envisager un premier examen de l'implantation géographique prévue par rapport à un zonage sismique global. A ce titre, le nouveau zonage sismique de la France (1985) en vue de l'application des règles parasismiques de construction et de la mise en oeuvre des plans d'exposition aux risques (PER), peu servir de premier élément d'appréciation.

Il faut cependant souligner que ce zonage ne fait qu'établir une hiérarchie entre diverses zones géographiques et intègre un compromis entre le niveau de sécurité recherché et le surcoût économique des mesures de protection. Il ne faut donc pas dissocier l'approche "zonage parasismique" des installations et équipements concernés, et il faut souligner que **les installations à haut niveau de risque n'ont pas été intégrées dans la démarche.** Pour ces installations, comme dans le domaine de la sûreté nucléaire, c'est la prise en compte des effets maximaux possibles qui doit être la règle.

Compte tenu de la méthodologie développée pour établir le nouveau zonage parasismique, l'usage de cet important document pourrait être le suivant pour l'appréciation du risque sismique dans les études de dangers des installations à haut niveau de risque :

1 - Le secteur géographique concernée est située en zone 1 a, I b et à fortiori II, l'aléa sismique local doit alors faire l'objet d'une étude spécifique ;

2 - Le secteur géographique concerné est situé en zone 0, la décision ne peut être prise de façon systématique et l'avis d'un spécialiste sur la nécessité de faire une étude fine est nécessaire, en particulier pour les secteurs inclus dans les zones tectoniques ayant été affectées dans le passé, ou proches de celles-ci.

Pour ce qui concerne l'évaluation de l'aléa sismique local, les règles en vigueur pour évaluer le risque sismique sur les centrales nucléaires (règle fondamentale de sûreté - RFS.I.2.C - constituent une bonne pratique, même si, là encore, la prise en compte de la géologie locale peut apporter quelques correctifs aux conclusions résultant de la stricte application de ces règles

LE DANGER POTENTIEL DE L'INSTALLATION

L'appréciation du niveau de risque technologique à partir duquel un examen détaillé de la résistance au séisme d'une installation sera demandé peut se faire à partir des critères fixés par la directive CEE SEVESO pour répertorier les installations pouvant provoquer un accident majeur. Là encore ce seul critère ne peut suffire car :

- d'une part, le recensement effectué sur cette base ne peut être considéré comme exhaustif ;
- d'autre part, certaines installations visées par la directive présente un risque qui ne se manifesterait pas forcément lors d'un séisme (ex produits cancérogènes pour une exposition prolongée).

En définitive, la question déterminante est la suivante :

Est ce que dans l'hypothèse d'un séisme la défaillance de l'installation étudiée, ou de certains de ces équipements importants pour la sécurité, est susceptible d'aggraver notablement les conséquences premières du séisme sur les populations, l'environnement ou certains équipements publics essentiels ?

LES OBJECTIFS

La définition des objectifs à retenir pour dimensionner une installation au séisme comporte deux volets distincts :

1 - la définition des fonctions de sécurité qui doivent être maintenues après un séisme :

. il s'agit le plus souvent du maintien de l'intégrité des enveloppes participant au confinement (simple ou multiple) des produits toxiques dont la dispersion constituerait une circonstance aggravante du séisme. Les objectifs peuvent cependant concerner des organes importants pour la sécurité qui doivent rester "opérables" (dispositif d'isolement, d'arrêt de réaction, de décompression...).

2 - La définition du séisme de dimensionnement. Dans la grande majorité des cas c'est le séisme majoré de sécurité (SMS), tel que défini dans la règle fondamentale sûreté I 2 c qui sera retenu.

Rappelons que, pour chacun des SMHV déterminés les SMS associés sont déduits, en terme d'intensité MSK, par la relation simple suivante :

$$I_{SMS} = I_{SHV} + 1 \text{ (en unité d'intensité MSK)}$$

Ces séismes sont considérés comme les mouvements sismiques les plus agressifs, plausibles (au moment de l'étude) pouvant affecter l'installation considérée.

La définition des spectres de réponse associés aux SMS est bien sûr, au delà du simple affichage d'objectifs en terme de résistance à une Intensité MSK donnée, la condition nécessaire au calcul de dimensionnement des équipements importants pour la sécurité.

* *

*

En résumé, toute étude des dangers relative à une installation présentant un haut niveau de risque doit comporter :

- l'appréciation du niveau local de risque sismique (intensité MSK, spectres de référence),
- la liste des équipements essentiels à la sécurité et dont la défaillance entraînerait une aggravation notable des conséquences d'un séisme,
- la démonstration de la résistance de ces équipements aux sollicitations résultant d'un séisme de référence (SMS).

Pour les installations nouvelles les mesures constructives doivent être prévues dès la mise en exploitation.

Pour les installations anciennes les mesures de confortement sont souvent techniquement difficiles à définir et très coûteuses. Comme cela est la règle habituelle, les décisions ne seront prises qu'à l'issue d'une étude technico économique et après que les conséquences sur la santé et la sécurité publiques, l'environnement aient été correctement appréciées.

A N N E X E 2

Principes de détermination de l'intensité de calcul optimale

L'approche proposée ci-après comme cadre de raisonnement permet d'éviter les difficultés inextricables posées par la détermination effective des probabilités de sinistre. Elle est essentiellement basée sur la notion de vulnérabilité, exposée plus loin. Elle peut s'entendre comme pratiquée sur une structure particulière, ou sur un certain nombre de constructions similaires, ou sur une population de constructions composée de structures de propriétés diverses mais en proportions définies.

1. Remarque préliminaire

La détermination de l'intensité de calcul se présente dans les faits comme un problème d'optimum, c'est-à-dire comme la recherche de la valeur d'une variable indépendante — ici, sans préjuger de sa définition exacte, l'intensité I — qui rend minimale ou maximale une certaine fonction de cette variable. On sait que dans un tel problème une petite variation de la variable indépendante de part et d'autre de la valeur idéale I_{opt} pour laquelle se produit le maximum ou le minimum ne s'accompagne que d'une variation très faible de la valeur de la fonction par rapport à ce maximum ou à ce minimum eux-mêmes.

La détermination de I_{opt} est donc entachée de fortes incertitudes et l'apparente précision des artifices mathématiques ne doit pas faire illusion : la difficulté est inhérente à nature du problème et elle est incontournable. Inversement les conséquences de ces incertitudes ne doivent pas être considérées comme dramatiques, bien au contraire : ceci signifie qu'il existe en fait non pas seulement une valeur idéale I_{opt} pour laquelle l'optimisation est réalisée mais aussi toute une plage de valeurs de part et d'autre de I_{opt} pour lesquelles on peut considérer que les objectifs de l'optimisation sont pratiquement atteints. Cette circonstance permet donc de s'affranchir dans une certaine mesure des résultats théoriques et laisse place à une certaine liberté d'appréciation au stade des décisions.

2. Aléa sismique

La sismicité du site ou de la région géographique concernés est caractérisée par l'aléa sismique propre au site ou à la région. L'aléa sismique est en général défini par la fonction $\Phi(I) = 1 - F(I)$ qui représente la probabilité pour que la valeur I de l'intensité soit atteinte ou dépassée au cours de la période de référence. $F(I)$, qui représente la probabilité que l'intensité reste inférieure ou égale à la valeur I est la fonction de distribution de I . Sa dérivée

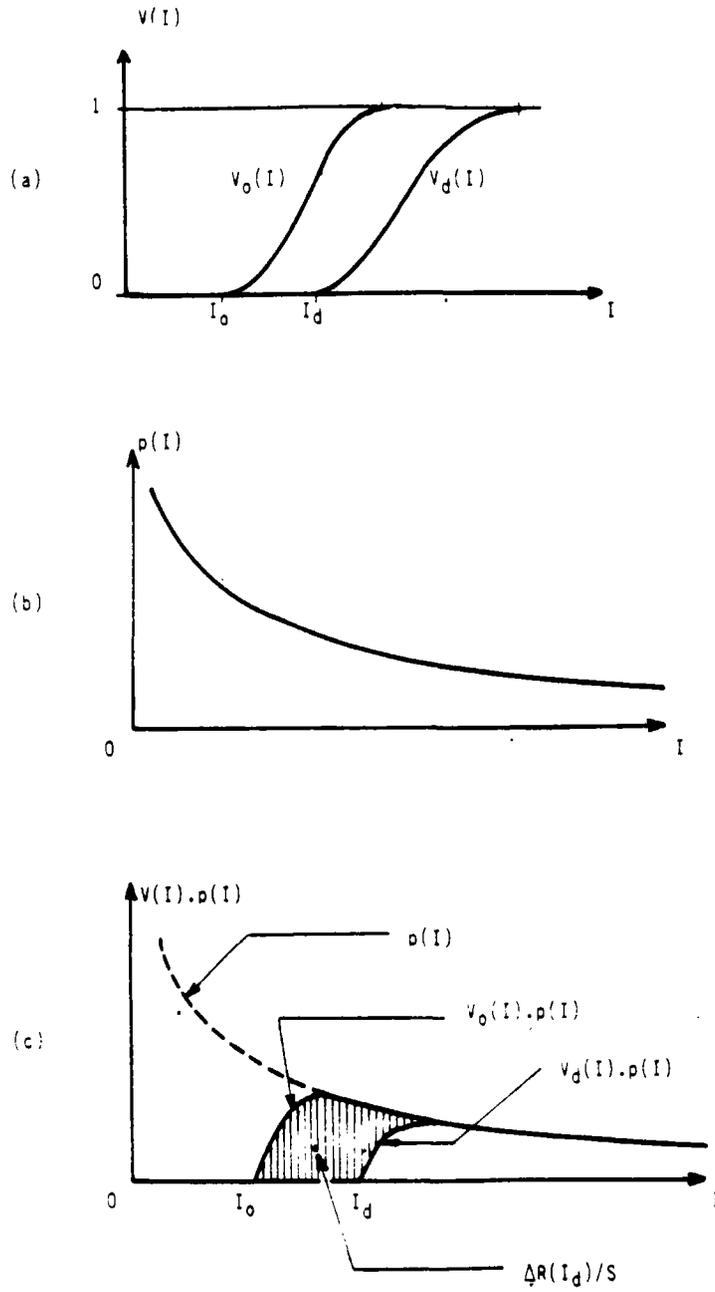
$$p = \frac{dF}{dI} = - \frac{d\Phi}{dI}$$

est la fonction densité de probabilité de I . Elle exprime la probabilité pour qu'au cours de la période de référence se produise une intensité comprise entre I et $I + dI$.

Figure II.6

Réduction du risque sismique en fonction de l'intensité de calcul.

- (a) Fonction vulnérabilité : V_0 : lorsque la construction n'a fait l'objet d'aucune mesure parasismique . V_d lorsqu'elle a été calculée pour l'intensité I_d
- (b) Aléa sismique défini par sa fonction densité de probabilité
- (c) $\Delta R(I_d)/S$: diminution du risque sismique unitaire lorsque la construction est calculée pour I_d .



3. Vulnérabilité

La destruction totale d'un ouvrage représente une perte maximale S dans laquelle on peut distinguer le coût C de l'ouvrage lui-même et les pertes d'autre nature A . Dans A figurent les frais de démolition et de déblaiement, les dommages à l'environnement, les conséquences économiques de l'arrêt de l'exploitation, etc., éventuellement le coût des sauvetages et des pertes en vies humaines si l'on accepte de considérer ces dernières autrement que sous leurs aspects subjectifs et affectifs. Dans la suite on pose :

$$S = C + A = C (1 + \alpha)$$

avec $\alpha = A/C$

Si se produit une intensité I , le coût moyen des sinistres (totaux ou partiels) occasionnés par cette intensité est désigné par $s(I)$. C'est une fonction monotoniquement croissante de I . Pour des valeurs suffisamment élevées de I , $s(I)$ correspond au sinistre total, de coût S . Aux valeurs de I inférieures à ces valeurs, $s(I)$ peut être exprimé sous la forme du rapport s/S . La fonction

$$V(I) = s(I)/S$$

monotoniquement croissante de 0 à 1 représente la vulnérabilité de la construction (ou de la classe de constructions, ou de la population de constructions) considérée (fig. II.6). Lorsque l'ouvrage n'a fait l'objet d'aucune mesure de protection parasismique, cette fonction est $V_0(I)$. Les échelles d'intensité macrosismique, en particulier l'échelle MSK, ne sont pas autre chose que des fonctions de vulnérabilité, au demeurant fort grossièrement définies.

Lorsque l'ouvrage est calculé à partir d'un certain ensemble de règles pour l'intensité de calcul I_d sa vulnérabilité est moindre et devient $V_d(I)$.

4. Risque sismique

Le risque sismique se définit comme l'espérance mathématique des pertes dues aux séismes pendant la durée de référence. Pour un ouvrage non parasismique, le risque sismique élémentaire dR attaché à la réalisation d'une intensité comprise entre I et $I + dI$ est :

$$dR = S \cdot V(I) \cdot p(I) \cdot dI$$

Le risque sismique présenté par l'ouvrage est donc :

$$R = S \int_0^{\infty} V(I) \cdot p(I) \cdot dI$$

Si l'on calcule l'ouvrage pour l'intensité de calcul I_d , à laquelle correspond la vulnérabilité $V_d(I)$, le risque sismique se trouve réduit de la quantité :

$$\Delta R(I_d) = S \int_0^{\infty} V_0(I) \cdot p(I) \cdot dI - S \int_0^{\infty} V_d(I) \cdot p(I) \cdot dI$$

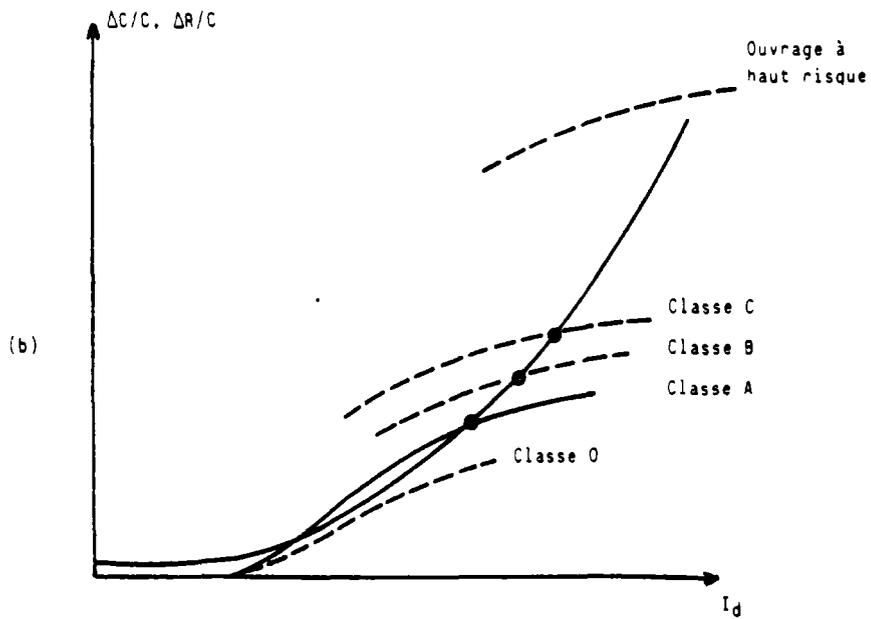
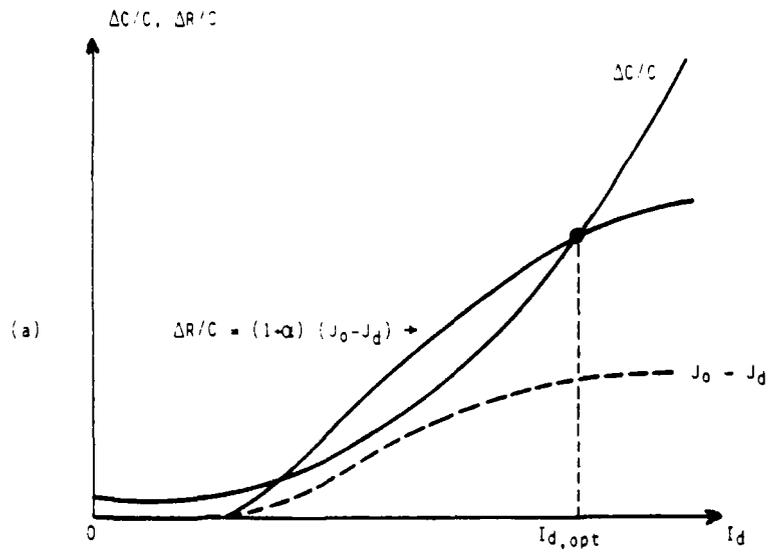
soit, en désignant les intégrales ci-dessus par J_0 et J_d respectivement :

$$\Delta R(I_d) = S (J_0 - J_d)$$

Figure II.7

(a) Détermination de l'intensité de calcul optimale $I_{d,opt}$. $\Delta C/C$: supplément de dépense (valeur capitalisée) par unité de capital investie. $\Delta R/C$: réduction de la perte probable, par unité de capital investie.

(b) Arbitrage économique pour les diverses classes d'ouvrages.



Le gain réalisé sur le risque sismique est proportionnel à l'aire hachurée de la figure II.6 (c). On voit que, du fait de la décroissance de $p(I)$ le « rendement » de l'opération diminue au fur et à mesure que l'on considère des valeurs de I_d de plus en plus élevées. La courbe représentative des variations de ΔR en fonction de I_d a donc l'allure représentée dans la figure II.7 (a). Sa concavité est tournée vers le bas et elle présente une asymptote horizontale.

5. Détermination de l'intensité de calcul optimale

De son côté, le coût des mesures de protection, d'abord constant pour les valeurs de I_d très voisines de I_0 , puis croissant de façon modérée lorsque l'on prend en compte des valeurs de I_d elles-mêmes assez modérées, s'élève ensuite très rapidement lorsqu'on considère des valeurs de plus en plus élevées. Si l'on représente par ΔC la valeur du coût additionnel capitalisée sur la période de référence, la courbe représentative des valeurs de ΔC en fonction de I_d a l'allure représentée dans la figure II.7a avec une concavité dirigée vers le haut.

Les éléments de l'arbitrage économique sont les valeurs relatives :

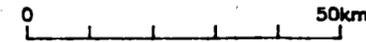
$$\Delta C/C \text{ et } \Delta R/C = (1 + \alpha) (J_0 - J_d)$$

La figure II.7 visualise cet arbitrage. Elle met en évidence le rôle du paramètre α et fait apparaître l'existence d'une intensité de calcul I_{dopt} au-delà de laquelle il n'est plus économiquement justifié de calculer les constructions. Cette limite est naturellement d'autant plus élevée que le terme α est important, ce qui justifie la distinction faite entre ouvrages à haut risque et ouvrages à risque normal, et, parmi ces derniers, la modulation opérée entre les classes A, B et C. La figure fait aussi apparaître l'existence d'ouvrages à bas risque pour lesquels la protection parasismique n'offre aucun intérêt économique (classe 0).

Planche I

CARTE DE SISMICITE HISTORIQUE
 Selection d'epicentres macrosismiques fiables
 (fichier SIRENE : code A a D) (cf. Annexe 1 du volume 6)

ECHELLE 1/1 000 000



LEGENDE

EPICENTRE MACROSISMIQUE

		INTENSITE EPICENTRALE	
		FIABLE (A ou B)	INCERTAINE (C)
LOCALISATION SIRENE	FIABLE (A ou B)	○	⊙
	INCERTAINE (C ou D)	□	⊠

INTENSITE EPICENTRALE

○	□	≤ IV - V
○	□	V et V - VI
⊙	□	VI et VI - VII
⊙	□	VII et VII - VIII
⊙	□	VIII et VIII - IX

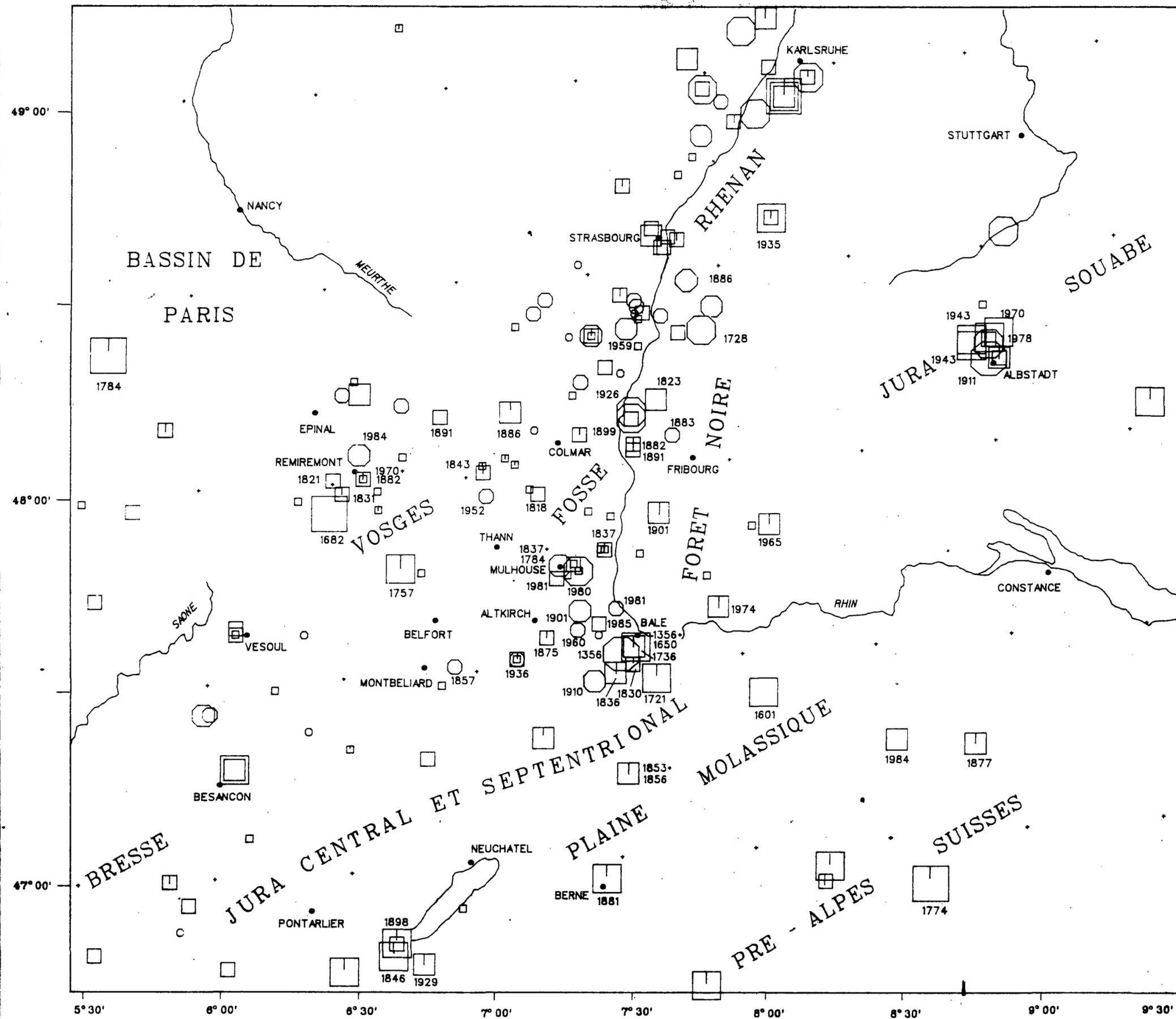


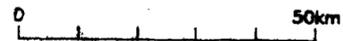
Planche II

CARTE DE SISMICITE INSTRUMENTALE
EPICENTRES DE TOUTES MAGNITUDES

(PERIODE 1962-1986)

(cf. Annexe 2 du Volume 1)

ECHELLE 1/1 000 000



LEGENDE

- ★ SERIE DE REPLIQUES
- EVENEMENT DE M - 3
- EVENEMENT DE M - 4
- EVENEMENT DE M - 5

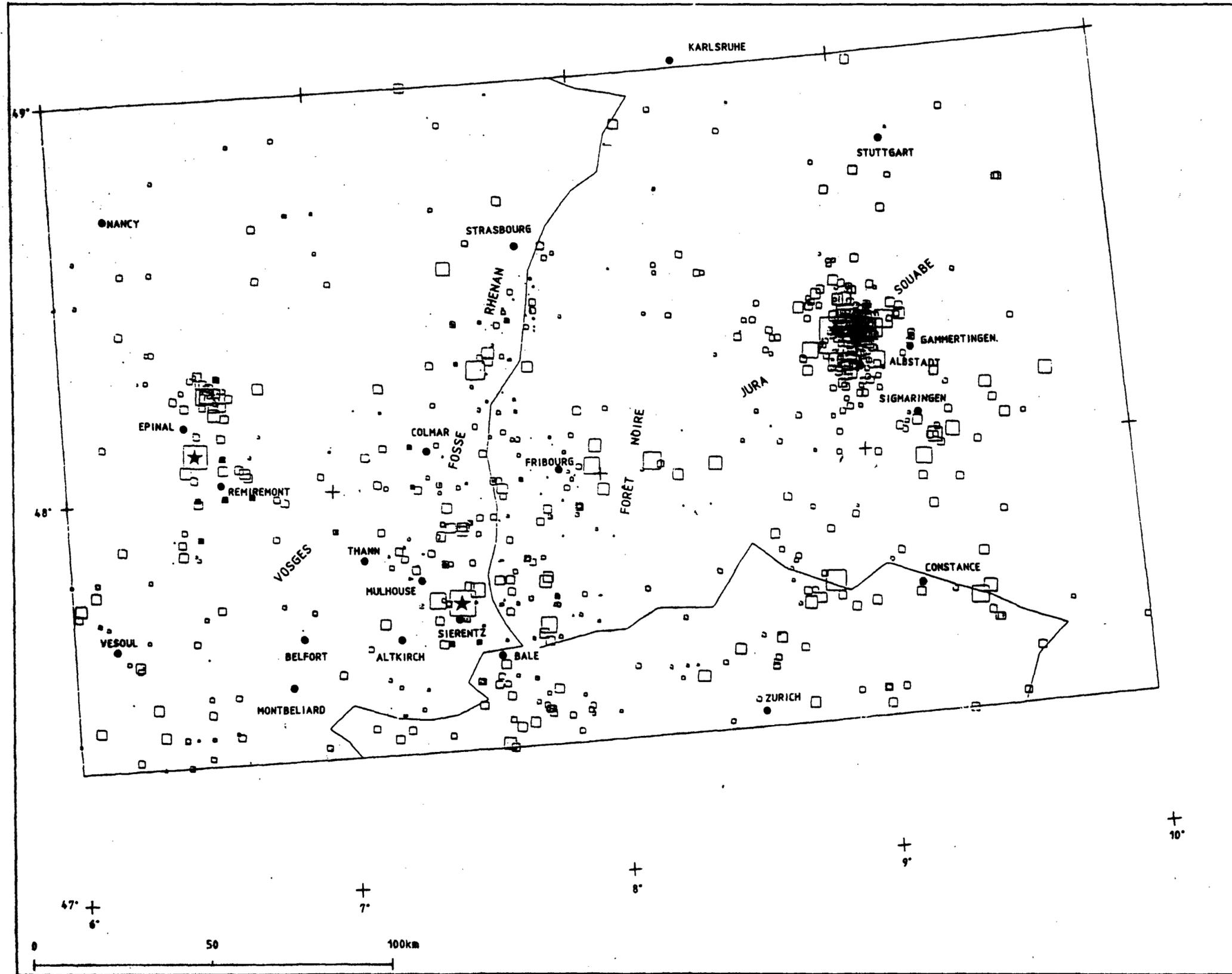


Planche III

SCHEMA SISMOTECTONIQUE REGIONAL

ECHELLE 1/1 000 000



Localisation des sites industriels:

- 1-Cernay Sud ; 2-Thann ; 3-Mulhouse Ouest ; 4-Ottmarsheim ;
- 5-Chalampé ; 6 et 7-Huningue ; 8-Village Neuf ; 9-Staffelfelden ;
- 10-Wiltelsheim ; 11-Steinbach ; 12-Cernay Nord ; 13-Mulhouse Est

CADRE STRUCTURAL:

Socle paléozoïque (Vosges, Forêt Noire)

Massif volcanique miocène du Kaiserstuhl

SELECTION D'ACCIDENTS STRUCTURAUX MAJEURS ET DE FAILLES A REJEU RECENT A ACTUEL:

Failles indifférenciées

Faille sans précision du mouvement

Faille normale

Faille inverse ou chevauchement

Faille de décrochement (sénestre)

Faille profonde décelée par géophysique (Autran et al., 1980)

} Failles actives potentiellement sismogènes

MECANISMES AU FOYER DES SEISMES:

Décrochement dextre NW-SE ou sénestre NE-SW

Faille inverse N-S de pendage 45° W ou 45° E

Faille normale-dextre NW-SE ou normale sénestre NE-SW

En noir : quadrant en distension - En blanc : quadrant en compression

BG20 Séisme avec calcul du mécanisme au foyer (ML ≥ 3.0) } SELECTION
BG19 Séisme avec calcul du mécanisme au foyer (ML < 3.0)
 (les numéros renvoient aux fichiers des auteurs)

AS- d'après AHORNER et SCHNEIDER (1974)

BA- d'après BONJER et APOPEI (1986)

BG- d'après BONJER et al. (1984)

HA- d'après HAESSLER et al. (1980)

HH- d'après HAESSLER et HOANG-TRONG (1985)

SELECTION D'EPICENTRES DE SEISMES DE LOCALISATION FIABLES:

(cf. texte et annexes 1 et 2 du VOLUME 6)

- Séisme historique d'intensité épicentrale égale ou supérieure à V
- △ Microsismicité (1962-1988 ; magnitude supérieure ou égale à 3)

PLANCHE III

BG17	BG19
BG20	BG21
BG23	BG25
BG29	BG32
HA	HH
AS9	AS10
BA1	BA4
BA20	BA22

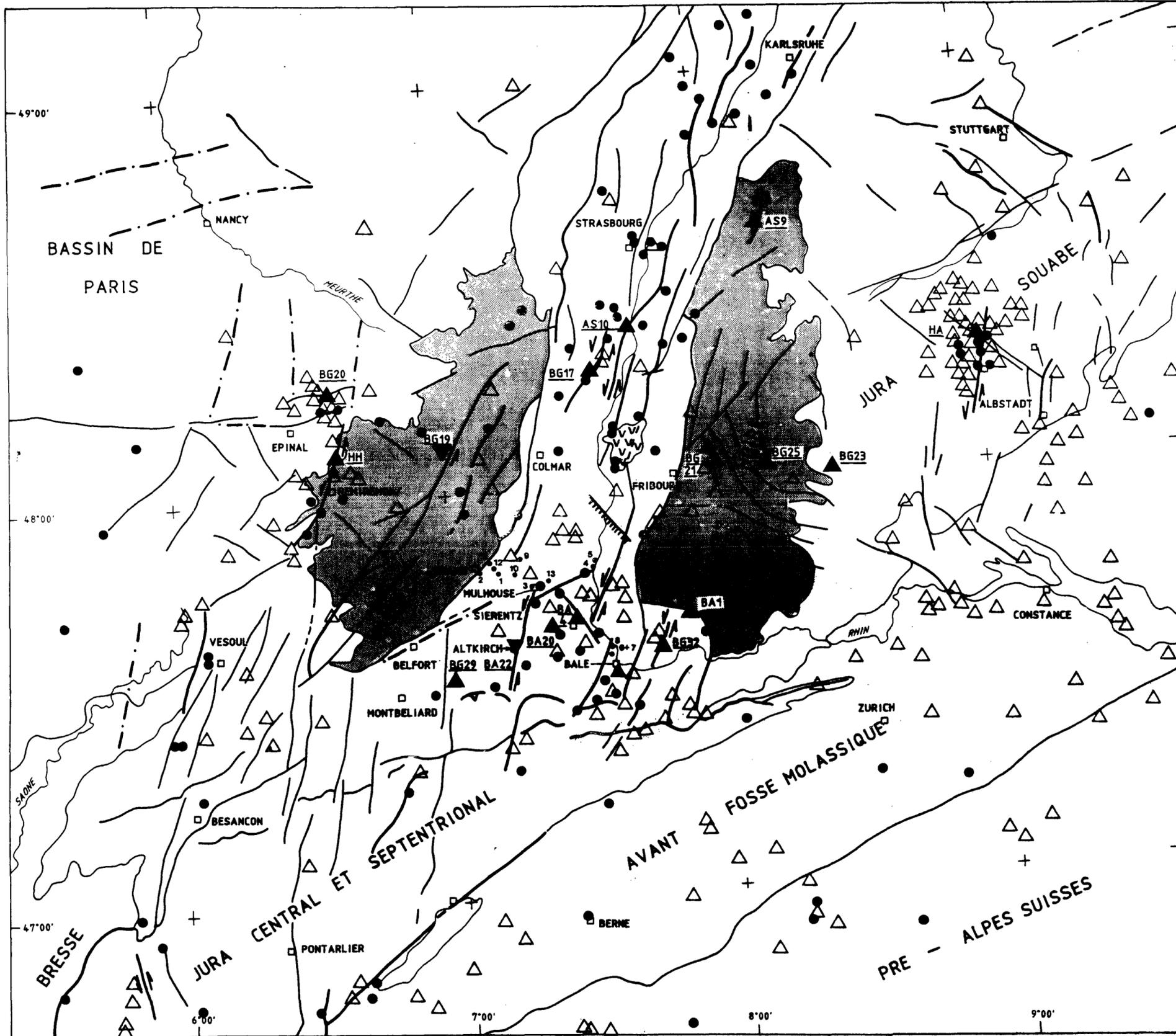


Planche IV
 UNITES SISMOTECTONIQUES POUVANT ETRE
 CONSIDEREES POUR LA DETERMINATION DES
 SEISMES DE REFERENCE SUR LES 13 SITES
 DU HAUT-RHIN

ECHELLE 1/1 000 000



- Limite schématique approximative d'unité sismotectonique
- Faille considérée potentiellement sismogène
- Limite d'unité se superposant à une structure potentiellement sismogène
- Zones de failles N-S à NE - SW

UNITES SISMOTECTONIQUES :

- I : Est du Bassin de Paris
- II : Fossé rhénan septentrional
- III : Nord du Jura souabe
- IV : Vosges
- V : Fossé rhénan méridional
- VI : Forêt noire et Jura souabe occidental
- VII : Zone de transition Jura - Fossé rhénan
- VIII : Jura central et septentrional
- IX : Avant-Fossé molassique
- X : Préalpes suisses
- XI : Fossé bressan et nord-rhodanien

ZONES DE FAILLES N-S à NE-SW :

- ① - Zone faillée Epinal - Remiremont - Vesoul
- ② - Zone faillée Gammertingen - Sigmaringen
- 1 à 13 : Emplacement des sites

