



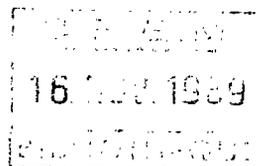
DIRECTION REGIONALE DE L'INDUSTRIE
ET DE LA RECHERCHE
NORD PAS-DE-CALAIS

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES DANGERS
D'INSTALLATIONS INDUSTRIELLES "A HAUT RISQUE"
SUR LE SITE DE LA SOCIETE NOROXO
HARNES (Pas-de-Calais)

P. MOUROUX/J.LEPLAT/S.GENTIER

PRISE EN COMPTE DE L'ALEA SISMIQUE

CALCUL DES SPECTRES DE REPONSE
ELASTIQUES DES SMHV ET SMS



octobre 1989

BUREAU DE RECHERCHES
GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

établissement public
à caractère industriel
et commercial

Siège : Tour Mirabeau
39-43, quai André-Citroën
75739 Paris cedex 15, France
Tél. : (33) 1 40.58.89.00
Télex : BRGM 780258 F
Télécopieur : (33) 1 40 58.89.33
R C 58 B 5614 Paris
SIRET : 58205614900419

Service Géologique Régional
Nord - Pas-de-Calais
Fort de Lézennes - Lézennes
59260 Hellemmes-Lille, France
Tél : (33) 20.91.38.19
Télécopieur : (33) 20.05.54.87

R. 30067
NPC-4S-89

R30067
NPC-4S-89

DIRECTION REGIONALE DE L'INDUSTRIE ET
DE LA RECHERCHE NORD-PAS-DE-CALAIS

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES DANGERS
D'INSTALLATIONS INDUSTRIELLES A HAUT RISQUE
SUR LE SITE DE LA SOCIETE NOROXO
A HARNES

PRISE EN COMPTE DE L'ALEA SISMIQUE

CALCUL DES SPECTRES DE REPONSE ELASTIQUES
DES S.M.H.V. et S.M.S.

par
P. MOUROUX, J. LEPLAT et S. GENTIER
avec la collaboration d'A. BOUGNOUX

Marseille, OCTOBRE 1989

R E S U M E

Cette étude, effectuée à la demande de la Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche Nord-Pas-de-Calais, fait suite à une étude globale sur la région Nord-Pas-de-Calais, intitulée : "Prise en compte de l'aléa sismique - Définition des séismes de référence selon une approche déterministe de l'aléa sismique régional", et comprenant 3 volumes :

- . Volume 1 : Résumé et principaux résultats de l'étude,
- . Volume 2 : Sismicité et sismotectonique régionales ; détermination des S.M.H.V. et des S.M.S. sur chaque site,
- . Volume 3 : Le cadre géologique.

La présente étude vise à compléter la définition des mouvements sismiques de référence, obtenus selon une approche déterministe de l'aléa sismique, sous la forme de spectres horizontaux de réponse élastiques pour le site de la Société NOROXO à HARNES:

- d'une part, au "rocher horizontal affleurant",
- d'autre part, en tenant compte des "conditions particulières du site", sous la forme d'un profil-type dont la géométrie et les caractéristiques mécaniques ont été déduites d'une analyse géologique et géotechnique, obtenue à partir de documents existants, sans nouvelle campagne complémentaire.

Le séisme de référence pris en compte dans l'étude sont deux séismes proches dont les foyers seraient situés à 30 km sous le site et conduisant à:

$$I_{SMHV} = VII, I_{SMS} = VIII$$

Les spectres ont été obtenus de la façon suivante:

- Pour les spectres élastiques au "rocher horizontal affleurant": en combinant 2 approches complémentaires, dont celle des règles RFS I-2c, de type empirico-statistique et une méthode de type spectral,

- Pour les spectres élastiques tenant compte des conditions de site: en partant des spectres au rocher et en considérant une colonne de sol visco-élastique, ainsi qu'à partir de spectres-types, dont les conditions de site se rapprochent de celles étudiées.

TABLE DES MATIERES

	pages
RESUME	
1. OBJET DE L'ETUDE	4
2. LE SITE DE HARNES.....	4
2.1 - Rappel sur la définition des séismes de référence	4
2.2 - Géologie et géotechnique du site	5
3. ESTIMATION D'UNE FOURCHETTE D'ACCELERATIONS MAXIMALES	6
A PRENDRE EN COMPTE POUR LE CALAGE DES SPECTRES HORIZONTALS AU ROCHER	
4. DETERMINATION EFFECTIVE DES SPECTRES DE REPONSE ELASTIQUES	15
HORIZONTALS AU ROCHER HORIZONTAL AFFLEURANT	
4.1 - Présentation et historique du problème	15
4.1.1 - Approches statistiques	15
4.1.1.1 - Première approche	15
4.1.1.2 - Deuxième approche	19
4.1.2 - Approche par modélisation spectrale de la	22
source sismique	
4.1.2.1 - Introduction	22
4.1.2.2 - Modèle spectral de source	23
4.2 - Application des méthodes précédentes pour la détermination ..	29
des spectres SMHV et SMS au "rocher horizontal affleurant"	
4.2.1 - Méthodes et paramètres utilisés	29
4.2.2 - Choix du spectre SMHV	30
4.2.3 - Choix du spectre SMS	38
5. DETERMINATION EFFECTIVE DES SPECTRES DE REPONSE ELASTIQUES	38
TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SITE	
5.1 - Présentation du problème	38
5.2 - Application de ces méthodes pour la détermination	42
des spectres SMHV et SMS, avec conditions de site pour le site de HARNES	
5.2.1 - Détermination des spectres SMHV	42
5.2.2 - Détermination des spectres SMS	52
6. CONCLUSIONS	52
Bibliographie	56

Liste des figures

	Pages
2.1 - Site de Harnes	7
3.1 - Corrélation statistique entre intensité macrosismique 9 et accélération horizontale maximale, MURPHY et O'BRIEN (1977)	9
3.2 - Diverses lois de corrélation entre intensité macrosismique 9 et accélération horizontale maximale, MURPHY et O'BRIEN (1977)	9
3.3 - Corrélation entre intensité macrosismique et accélération11 horizontale maximale ; Mise en évidence de la spécificité des séismes européens et méditerranéens, MURPHY et O'BRIEN (1977)	11
3.4 - Corrélation entre intensité macrosismique et accélération11 maximale horizontale obtenue pour les séismes du Friul, d'Ancone et de la ceinture alpine, CHIARUTTINI et SIRO (1981)	11
3.5 - Corrélations magnitude/accélération horizontale maximale/13 distance à la source sismique	13
4.1 - Spectre NEWMARK "NUREG 003" - 1976 : diagramme16 quadrilogarithmique (amortissement : 5%)	16
4.2 - Spectre NEWMARK "NUREG 003" - 1976 : diagramme17 normal en accélération (amortissement : 5%)	17
4.3 - Spectre d'accélération moyen pour différentes conditions18 de site - SEED et al (1976)	18
4.4 - Comparaison de spectres moyens avec des spectres réels18 pour des sites avec argiles molles à moyennement consistantes SEED et al (1976)	18
4.5 - Variation en fonction de la magnitude et de la distance focale des spectres correspondant à l'intensité VII20	20
4.6 - Variation en fonction de la magnitude et de la distance focale des spectres correspondant à l'intensité VII-VIII.....21	21
4.7 - $\text{Log}(S) = g (\log (f))$26	26
4.8 - $\text{Log} (S^*) = g (\log(f))$26	26
4.9 - Domaine de sensibilité des différents paramètres26	26
4.10 - Spectres en répartition gaussienne31	31
4.11 - Spectres moyens et moyens + écart-type32	32
4.12 - Spectres en répartition gaussienne33	33
4.13 - Spectres moyens et moyens + écart-type34	34
4.14 - Comparaison de spectres type S.M.H.V "Rocher horizontal35 affleurant"	35
4.15 - Spectre de réponse élastique horizontal "au rocher36 horizontal affleurant" du SMHV	36
4.16 - Spectre de réponse élastique horizontal "au rocher39 horizontal affleurant" du SMS	39
5.1 - Fonction de transfert T(f)44	44
5.2 - Spectres en répartition gaussienne - Amortissement : 5%45 "Rocher + fonction de transfert"	45

5.3 - Spectres moyens et moyens + écart-type - Amortissement: 5%	46
"Rocher + fonction de transfert"	
5.4 - Spectres en répartition gaussienne - Amortissement : 5%	47
"Rocher + fonction de transfert"	
5.5 - Spectres moyens + écart-type (amortissement : 5%)	48
"Rocher + fonction de transfert"	
5.6 - Comparaison des spectres type SMHV "compte tenu des	49
conditions de site"	
5.7 - Spectre de réponse élastique horizontal "Compte tenu des	50
conditions de site" du SMHV	
5.8 - Spectre de réponse élastique horizontal "Compte tenu des	51
conditions de site" du SMS	

Liste des tableaux

3.1 - Détermination d'une accélération maximale horizontale	12
au rocher par diverses lois de corrélation intensité macrosismique/accélération	
3.2 - Détermination d'accélération maximale au rocher par	14
diverses lois de corrélation	
4.1 - Site de Harnes	
Spectre de réponse élastique horizontal "au rocher horizontal affleurant" du SMHV.....	37
4.2 - Site de Harnes	
Spectre de réponse élastique horizontal "au rocher horizontal affleurant" du SMS	40
5.1 - Site de Harnes	
Spectre de réponse élastique horizontal "compte tenu des conditions de site" du SMHV.....	53
5.2 - Site de Harnes	
Spectre de réponse élastique horizontal "compte tenu des conditions de site" du SMS.....	54

1. OBJET DE L'ETUDE

L'objet de l'étude réalisée dans le présent volume est la détermination de spectres horizontaux de réponse élastiques :

- Au "rocher horizontal",
- En tenant compte, des "conditions particulières du site" déduites d'une étude géologique et géotechnique réalisée à partir de documents existants, sans nouvelle campagne complémentaire.

2. LE SITE DE HARNES

2.1 - Rappel sur la définition des séismes de référence

L'étude de la sismicité du site a été réalisée dans le cadre du volume 2 et résumée dans le volume 1 de l'étude globale de l'aléa sismique régional.

A partir de cette étude et pour le site de HARNES, les séismes de référence peuvent se réduire essentiellement à des séismes correspondant aux unités sismotectoniques suivantes :

1) Le cisaillement Nord-Artois

Le séisme de référence de cette unité est celui du 6 avril 1580, dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

- Intensité épiscoptrale : $I_0 = \text{VII-VIII MSK}$
- Magnitude : $M = 5.6 \pm 0.3$
- Profondeur focale : $h = 25 \pm 5 \text{ km}$

Compte tenu de la localisation de cette unité, le site sera ainsi situé à une distance focale de 30 km. Ce séisme de référence constitue donc un séisme maximum historiquement vraisemblable d'intensité VII.

2) Le domaine Manche orientale - Artois et Picardie

Les séismes de référence de cette unité sont ceux du 30 Avril 1756 et du 2 Septembre 1896, dont les principales caractéristiques sont les suivantes:

- Intensité épiscoptrale : $I_0 = \text{VII MSK}$
- Magnitude : $M = 4.8 \pm 0.1$
- Profondeur focale : $h = 10 \pm 5 \text{ km}$.

Compte tenu de la localisation de cette unité, ce séisme sera amené sous le site et constitue donc un séisme maximum historiquement vraisemblable d'intensité $I_{SMHV} = VII$.

Les autres séismes provenant d'autres unités sismotectoniques, sont soit proches ou lointains mais avec des intensités équivalentes (Zone faillée du Pas-de-Calais, Massif London-Brabant - Artois et Picardie) soit lointains avec des intensités plus élevées (Liège-Aachen), mais dont la distance est telle (160 km) que les effets seront nettement inférieurs, même dans le domaine des basses fréquences : ils n'ont donc pas été pris en compte pour l'évaluation des spectres.

2.2 - Géologie et géotechnique du site

Les sondages disponibles montrent que le substratum est représenté par les craies sénoniennes, pratiquement affleurantes côté sud (sondages 20.5.61 et 90), masquées par une couverture limoneuse peu épaisse (3,5 m au sondage 19.8.105) côté nord. Des remblais épais de plus de 6 mètres recouvrent la craie au sondage 19.8.162.

On notera que la craie saine n'apparaît qu'à des profondeurs variant de 6 à 9 m environ; au dessus, les coupes font état d'une fragmentation plus poussée ("marnettes ébouleuses"), et d'infiltrations limoneuses ("marne argileuse").

Les "Bleus" (alternances marnes-craies marneuses du Turonien moyen), suivis des "dièves" (marnes argileuses du Turonien inférieur), sont atteints vers 67 m de profondeur au point 20.5.61; le substrat primaire (Houiller) vers 153 m.

Pour les besoins de la modélisation, nous avons considéré la configuration moyenne suivante:

- de 0 à 5 m: sols de faibles caractéristiques mécaniques composés de limons plus ou moins sableux.

Pour cette formation, nous avons retenu les caractéristiques suivantes:

V_s = vitesse des ondes de cisaillement = 150 m/s

Q = facteur de qualité = 5

ρ = masse spécifique = 1.700 kg/m³

- de 5 à 9m: sols de caractéristiques mécaniques moyennes; composés de craie altérée.
Pour cette formation, nous avons retenu:
 $V_s = 400$ m/s
 $Q = 20$
 $\rho = 1.950$ kg/m³
- Substratum: composé de craie; nous avons retenu:
 $V_s = 1.000$ m/s
 $Q = 80$
 $\rho = 2.200$ kg/m³

3. ESTIMATION D'UNE FOURCHETTE D'ACCELERATIONS MAXIMALES A PRENDRE EN COMPTE POUR LE CALAGE DES SPECTRES HORIZONTAUX AU ROCHER

L'intensité macrosismique, utilisée ci-dessus pour caractériser les séismes de référence, a pour principal avantage d'être une mesure de la force destructrice d'un tremblement de terre en un lieu donné, qui peut s'évaluer à partir de seules observations, témoignages ou descriptions (orales ou écrites) ; ce n'est cependant pas une grandeur physique et, à ce titre, elle est insuffisante pour les besoins du génie parasismique (GODEFROY et LEVRET, 1985).

Malheureusement, c'est le seul paramètre qui soit directement utilisable pour décrire les tremblements de terre historiques ou les séismes contemporains survenant dans des régions dénuées d'équipement instrumental. L'exploitation des données macrosismiques et leur traduction en terme d'intensité est donc une étape préalable indispensable à toute évaluation de l'aléa sismique ; mais, par la suite, il reste nécessaire d'établir un lien entre cette donnée d'observation et des "mesures réelles" de grandeurs physiques utilisables dans des calculs de dynamique des structures.

C'est en fait l'accélération maximale horizontale qui est le paramètre le plus utilisé, comme paramètre de calage des spectres de réponse élastique horizontaux, l'ensemble constituant le "mouvement sismique de référence".

Cette accélération de calage est généralement obtenue à partir de la confrontation de deux approches :

- une corrélation directe entre accélération horizontale et intensité macrosismique, dont on sait combien elle peut être critiquable mais

dont on remarquera que l'application ici correspond à des niveaux d'intensité et à des classes de magnitude et de distance épacentrale qui sont statistiquement les mieux représentés dans les échantillons qui servent à l'établissement de ces corrélations empiriques,

- un calcul reposant sur un modèle d'atténuation et une loi de corrélation entre accélération, distance et magnitude.

En ce qui concerne la première approche, l'étude à ce jour la plus exhaustive et la mieux documentée reste celle de MURPHY et O'BRIEN (1977) ; malgré la grande dispersion des données, due entre autre à l'inhomogénéité des sols et des types de séismes, la figure 3-1 conduit aux résultats suivants en ce qui concerne les valeurs moyennes :

- . 0.20 g pour l'intensité VIII,
- . 0.16 g pour l'intensité VII-VIII,
- . 0.12 g pour l'intensité VII,

ainsi que les valeurs limites enfermant 80% de l'échantillon :

- . 0.40 g pour l'intensité VIII,
- . 0.30 g pour l'intensité VII-VIII,
- . 0.19 g pour l'intensité VII,

MURPHY et O'BRIEN (1977) ont par ailleurs rassemblé sur une même figure (figure 3-2) plusieurs lois de corrélation établies par divers auteurs ; on obtient les valeurs moyennes suivantes :

- . 0.22 g pour l'intensité VIII,
- . 0.17 g pour l'intensité VII-VIII,
- . 0.12 g pour l'intensité VII,

ainsi que les valeurs extrêmes :

- . 0.10 g et 0.60 g pour l'intensité VIII,
- . 0.07 g et 0.45 g pour l'intensité VII-VIII,
- . 0.05 g et 0.32 g pour l'intensité VII.

Il faut dire également que MURPHY et O'BRIEN ont souligné, par leur étude statistique, les caractéristiques propres des séismes européens et du pourtour méditerranéen par rapport à ceux de Californie et du Japon. Ces séismes montrent généralement des pics d'accélération plus élevés pour des durées de mouvement fort plus courtes. Ainsi, les données expérimentales relatives aux séismes péri-méditerranéens se regroupent en un nuage de points situés dans la partie supérieure des graphes de corrélation (figure 3-3). Il faut cependant noter que compte tenu du faible nombre de données, ces corrélations ne différencient pas les réponses selon les conditions de site et les valeurs obtenues sont vraisemblablement supérieures à celles que l'on obtiendrait au rocher.

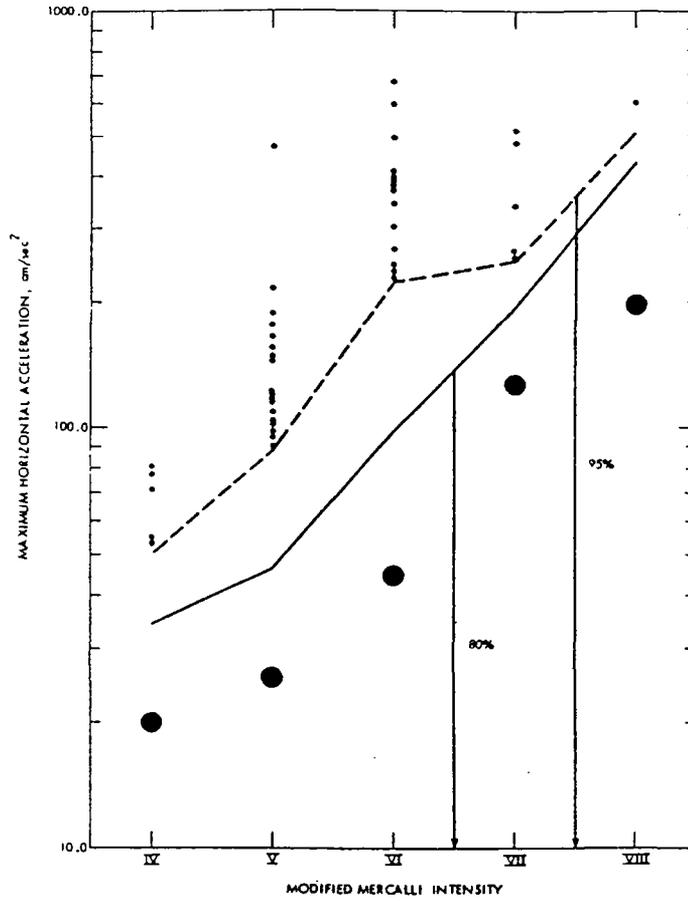


Fig.3-1- CORRELATION STATISTIQUE ENTRE INTENSITE MACROSISMIQUE ET ACCELERATION HORIZONTALE MAXIMALE, MURPHY et O'BRIEN (1977)

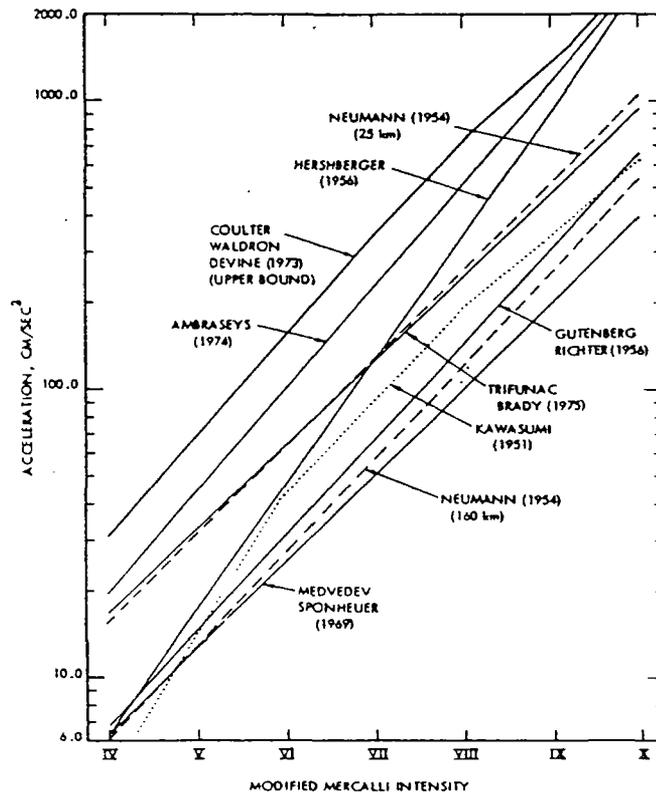


Fig.3-2- DIVERSES LOIS DE CORRELATION ENTRE INTENSITE MACROSISMIQUE ET ACCELERATION HORIZONTALE MAXIMALE, MURPHY et O'BRIEN (1977)

Ces résultats concernant les séismes péri-méditerranéens sont également confirmés par ceux rassemblés par CHIARUTTINI et SIRO (1981), pour les séismes du Frioul, d'Ancône et de la ceinture alpine (figure 3-4) ; on obtient les valeurs moyennes suivantes :

- . 0.32 g pour l'intensité VIII,
- . 0.24 g pour l'intensité VII-VIII,
- . 0.16 g pour l'intensité VII,

Il faut noter cependant que les accélérations enregistrées lors des crises du Frioul sont bien inférieures aux autres échantillons pour les mêmes intensités et que les conditions de site n'apparaissent pas dans ces corrélations.

On a présenté enfin sur le tableau 1, un ensemble de valeurs d'accélération maximales horizontales correspondant aux intensités MSK (ou équivalentes MSK), VII, VII-VIII et VIII.

Pour cette **première approche**, à partir des considérations précédentes et compte tenu du contexte sismotectonique rappelé au volume 2, il est alors justifié de retenir les valeurs suivantes d'accélération maximale horizontale **moyenne au rocher** :

$a_{max} = 0.10$ g pour I = VII
$a_{max} = 0.15$ g pour I = VII-VIII
$a_{max} = 0.08$ g pour I = VI-VII

avec les fourchettes approximatives suivantes :

- . $a_{max} = 0.05$ à 0.17 g pour I = VII
- . $a_{max} = 0.08$ à 0.24 g pour I = VII-VIII
- . $a_{max} = 0.03$ à 0.12 g pour I = VI-VII

Pour la **deuxième approche**, basée sur une relation directe accélération, magnitude, distance épacentrale, plusieurs modèles existants ont été utilisés. Les résultats correspondants ont été rassemblés sur le tableau 3-2. Les modèles les plus utilisés actuellement (CAMPBELL, 1981 ; JOYNER et BOORE, 1981), dont les lois sont présentées sur la figure 3-5, conduisent à des valeurs moyennes cohérentes avec celles de la première approche, présentée ci-dessus, pour l'intensité VII-VIII.

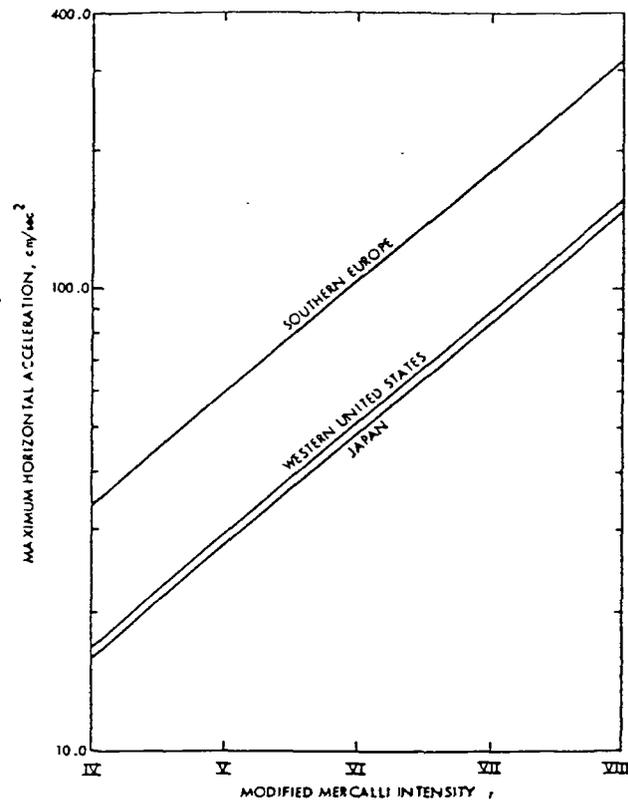


Fig.3-3- CORRELATION ENTRE INTENSITE MACROSEISMIQUE ET ACCELERATION HORIZONTALE MAXIMALE; MISE EN EVIDENCE DE LA SPECIFICITE DES SEISMES EUROPEENS ET MEDITERRANEENS, MURPHY et O'BRIEN (1977)

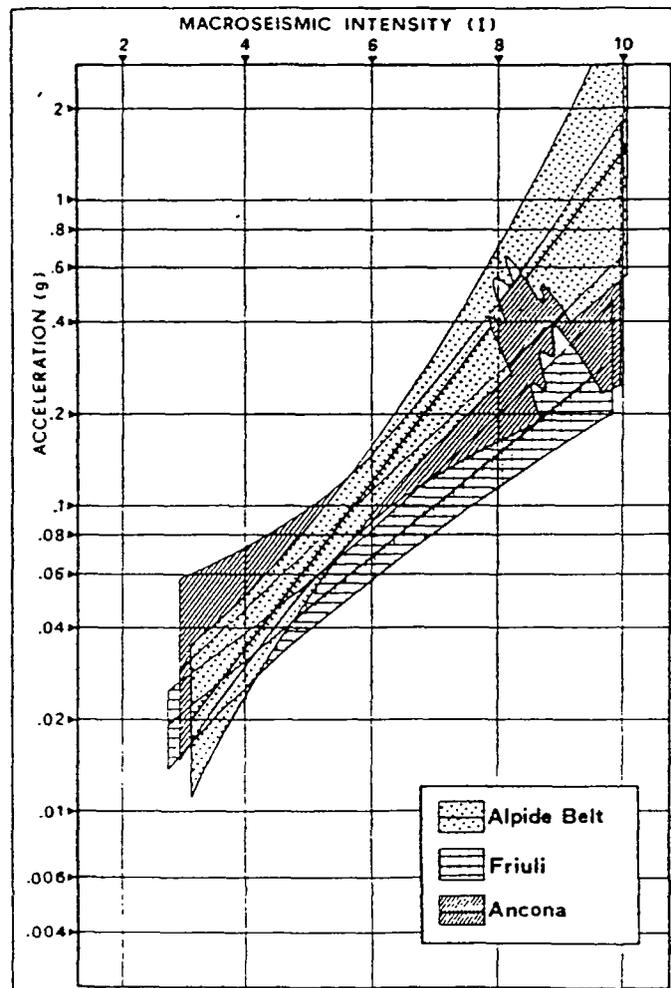
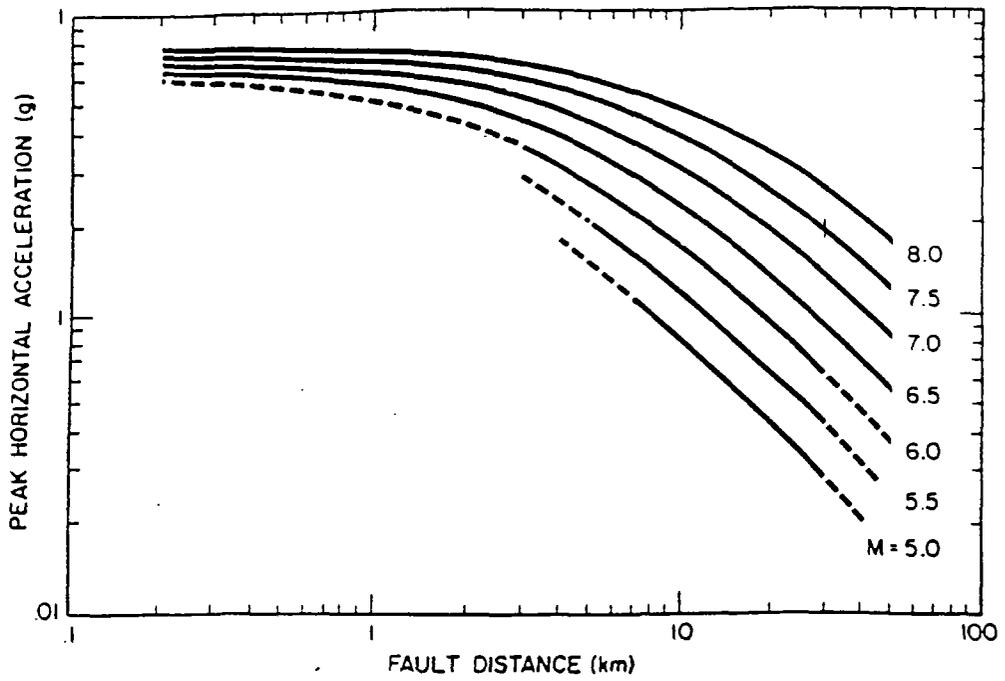


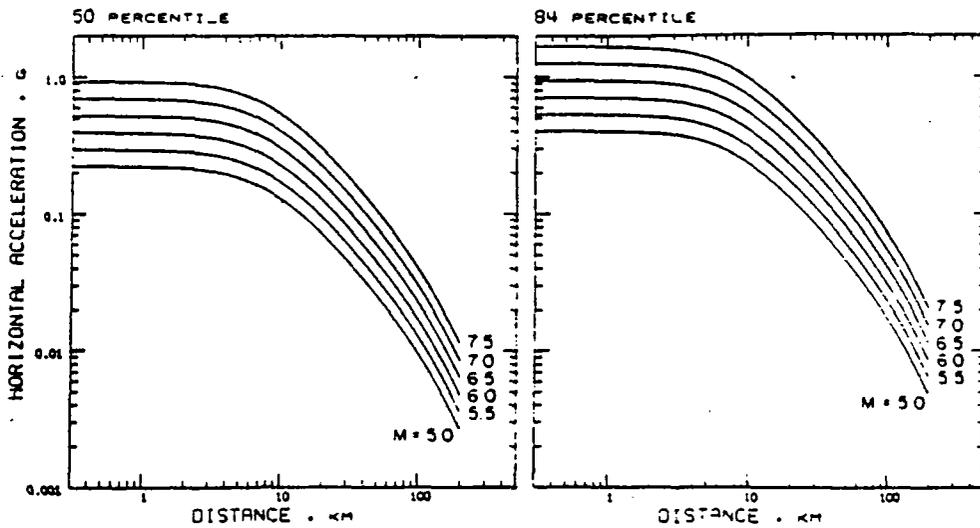
Fig.3-4- CORRELATION ENTRE INTENSITE MACROSEISMIQUE ET ACCELERATION MAXIMALE HORIZONTALE OBTENUE POUR LES SEISMES DU FRIUL, D'ANCONE et de LA CEINTURE ALPINE, CHIARUTTINI et SIRO (1981)

TABLEAU 3-1
 DETERMINATION D'UNE ACCELERATION MAXIMALE HORIZONTALE AU ROCHER
 PAR DIVERSES LOIS DE CORRELATION INTENSITE MACROSISMIQUE/ACCELERATION

REFERENCE	LOI DE CORRELATION	ACCELERATION MAXIMALE		
		I = VII	I=VII=VIII	I = VIII
NEUMANN (1954)	r = 25 km (1) $\log a = 0.308 I - 0.041$ (cm/s ²)	0.13 g	0.18 g	0.26 g
MEDVEDEV et SPONHEUER (1969)	Loi imposée pour une progression régulière entre intensité et accélération : (2) $\log a = 0.301 I - 0.408$ (cm/s ²)	0.05 g	0.07 g	0.10 g
AMBRASEYS (1974)	(3) $\log a = 0.30 I + 0.05$ (cm/s ²)	0.14 g	0.20 g	0.28 g
TRIFUNAC et BRADY (1975)	(4) $\log a = 0.300 I + 0.014$ (cm/s ²)	0.13 g	0.18 g	0.26 g
HAC GUIRE (1978)	sols "moyens" : (5) $\log a = 0.370 I - 0.361$ (cm/s ²)	0.17 g	0.26 g	0.39 g
MURPHY et O'BRIEN (1977)	. Ouest Etats-Unis : (6) $\log a = 0.24 I + 0.26$ (cm/s ²) . Europe sud-est : (7) $\log a = 0.24 I + 0.57$ (cm/s ²) . Loi générale : (8) $\log a = 0.25 I + 0.25$ (cm/s ²)	0.09 g 0.18 g 0.10 g	0.11 g 0.23 g 0.13 g	0.15 g 0.31 g 0.18 g
SCHENK et SCHENKOVA (1981)	(9) $\log a = 0.194 I + 0.622$ ^{+0.223} (cm/s ²) _{-0.229}	0.09g ^{0.16g} 0.06g	0.12g ^{0.20g} 0.07g	0.15g ^{0.25g} 0.08g
CHIARUTTINI et SIRO (1981)	. Friul (loi générale): (10) $\log a = 0.17 I - 0.19$ (g) . Friul (rocher) : (11) $\log a = 0.14 I - 0.07$. "Ceinture alpine" (loi générale) : (12) $\log a = 0.27 I - 0.55$. "Ceinture alpine" (rocher) : (13) $\log a = 0.24 I - 0.18$	0.10 g 0.08 g 0.22 g 0.32 g	0.12 g 0.09 g 0.29 g 0.41 g	0.15 g 0.11 g 0.40 g 0.54 g
Futures Règles parasismiques	(14) $\log a = 0.301 I$	0.13 g	0.18 g	0.25 g



5A



5B

Fig 3-5- CORRELATIONS MAGNITUDE/ACCELERATION HORIZONTALE MAXIMALE/DISTANCE A LA SOURCE SISMIQUE (cf. tableau 3-2)

A : d'après Campbell, 1981

B : d'après Joyner et al, 1981

Tableau 3-2
 DETERMINATION D'ACCELERATIONS MAXIMALES AU ROCHER
 PAR DIVERSES LOIS DE CORRELATION

REFERENCE	LOI UTILISEE et VALIDITE	ACCELERATION MAXIMALE	
		UNITES SISMOTECTONIQUES	
M _L = Magnitude locale M _R = Magnitude de Richter M _W = Magnitude de moment M _S = Magnitude d'onde de surface	R _h = distance hypocentrale (km) R _S = plus courte distance à la trace en surface du plan de rupture (km) R _f = plus courte distance à la zone de rupture (km) a = accélération maximale (cm/s ²)	MANCHE ORIENTALE ARTOIS et PICARDIE	CISAILLEMENT NORD-ARTOIS
		M = 4.8 R _h = 10 km	M = 5.8 R _h = 30 km
Mc GUIRE (1978)	Ouest U.S. M = M _R = 4.5 - 7.7 R = R _h = 10 - 200 km a = 30.0 x exp (0.89 M) x R ^{-1.17}	a = 145 cm/s ²	a = 98 cm/s ²
CORNELL et al (1979)	Ouest U.S. tous sols M = M _R = 3.0 - 7.7 R = R _h = 20 - 200 km a = 847 x exp (0.86 M) x (R + 25) ^{-1.80}	a = 87 cm/s ²	a = 92 cm/s ²
CAMPBELL (1981)	Monde entier rocher M = M _L (M < 6) M = M _S (M > 6) M = 5.0 - 7.7 R = R _f ≤ 50 km a = 15.6 x exp (0.868 M) x [R + C(M)] ^{-1.09} C(M) = 0.0606 x exp (0.7 M) (composante horizontale moyenne)	R _f = 7 km a = 95 cm/s ²	R _f = 25 km a = 62 cm/s ²
HASEGAWA et al (1981)	Canada Est M = m _b = 4.0 - 7.0 R = R _h = 10 - 200 km a = 3.40 x exp (1.3 M) x R ^{-1.1} Canada Ouest M = M _L = 4.0 - 7.0 R = R _h = 10 - 200 km a = 10.0 x exp (1.3 M) x R	a = 138 cm/s ²	a = 152 cm/s ²
JOYNER et BOORE (1981)	Ouest antl. Nord rocher et sol M = M _W = 5.0 à 7.7 R = R _S ≤ 370 km a = 93.7 x exp(0.573M) x D ⁻¹ x exp (- 0.00587 D) D = (R ² + (7.3) ²) ^{0.5}	R _S = 3 km (pendage faille # 15°) a = 177 cm/s ²	R _S = 20 km (pendage faille # 15°) a = 167 cm/s ²

4. DETERMINATION EFFECTIVE DES SPECTRES DE REPOSE ELASTIQUES HORIZONTALS AU ROCHER HORIZONTAL AFFLEURANT

4.1 - Présentation et historique du problème

4.1.1 - Approches statistiques

4.1.1.1 - Première approche

(NEWMARK et al, 1972 et 1976)

Les spectres utilisés en génie parasismique peuvent tout d'abord être obtenus en étudiant statistiquement les spectres des accélérogrammes réels disponibles. Leur représentativité dépend donc sensiblement de leur nombre, de leur distribution spatiale, du type de mécanisme à la source et des caractéristiques du site de mesure.

Jusqu'à ces dernières années, l'essentiel des données de mouvements forts disponibles est d'origine américaine ; ce sont ces données qui ont en particulier permis à NEWMARK et al, 1973 et 1976 de proposer à l'U.S. Atomic Energy Commission puis à l'U.S. Nuclear Regulatory Commission, des spectres de réponse élastiques utilisables pour les installations nucléaires aux Etats Unis.

Le spectre "NUREG 0003" (1976), normalisé, est ainsi représenté sur les figures 4-1 et 4-2 en diagramme "quadrilogarithmique" et "normal", en fonction de la période : il correspond à la moyenne plus un écart-type (amortissement : 5%) d'un ensemble de spectres d'accélérogrammes provenant de 56 stations, pour des magnitudes variant entre 5.3 et 7.7.

Ce type d'analyse permet de ne faire aucune hypothèse a priori sur l'influence respective des différents paramètres (en particulier, la source, sa distance et les conditions de site sur lequel est placé l'accéléromètre) ; et de fait, compte tenu du faible nombre d'accélérogrammes disponibles dans chacune des classes correspondant à ces différents paramètres, aucun résultat pratique les prenant en compte n'avait pu être tiré ; seule une différenciation concernant les conditions de site (alluvions, rocher) avait pu être donnée par NEWMARK et al en 1973; SEED et al (1976), à partir de résultats de 104 accélérogrammes, ont pu par ailleurs mettre en évidence 4 types de site présentant des spectres différents de réponse élastique (figures 4-3 et 4-4).

Ce type d'analyse pouvait être proposé, il y a une dizaine d'années, pour une protection intrinsèque vis-à-vis d'installations nucléaires (compte-tenu du faible nombre de données) ou depuis quelques années pour une protection statistique d'un ensemble de constructions, dans le cadre de règles parasismiques de construction (ATC 3-06 (1978), futures règles parasismiques françaises).

Actuellement, pour une protection intrinsèque d'ouvrages à "haut risque", il faut envisager un autre type d'analyse, lorsqu'on a pu définir plus précisément l'origine des séismes et en particulier lorsque ces derniers peuvent se produire dans le champ proche du site étudié.

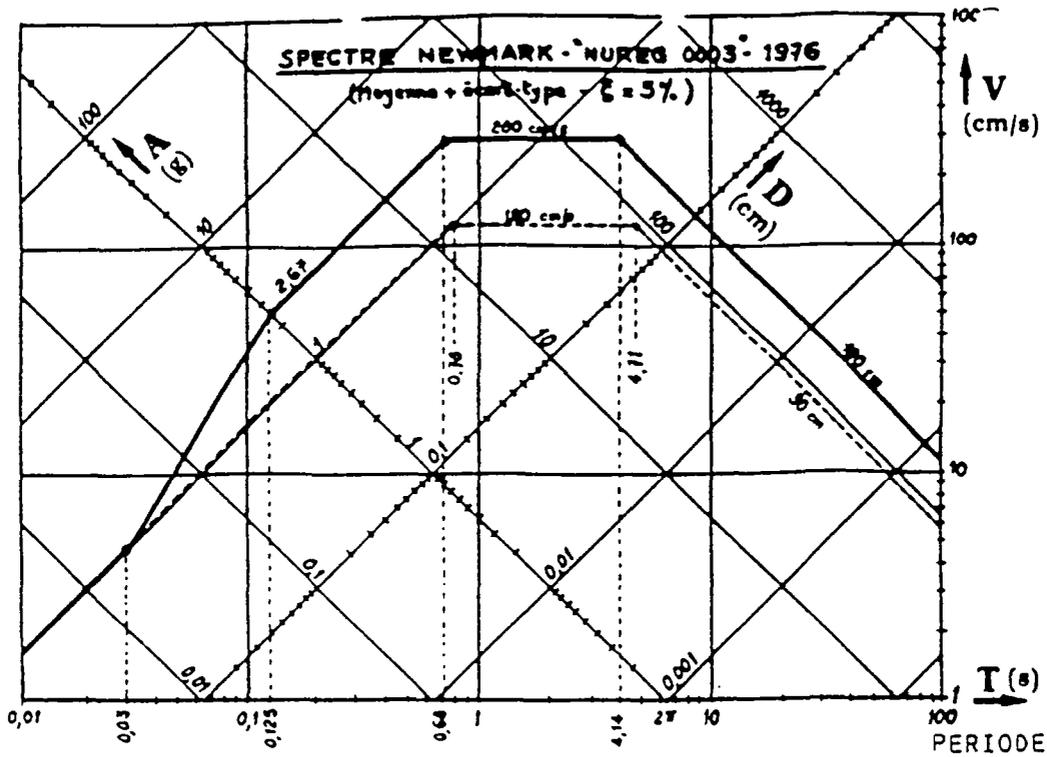


Figure 4-1

SPECTRE NEWMARK "NUREG 003" - 1976 : DIAGRAMME QUADRILOGARITHMIQUE
(AMORTISSEMENT : 5%)

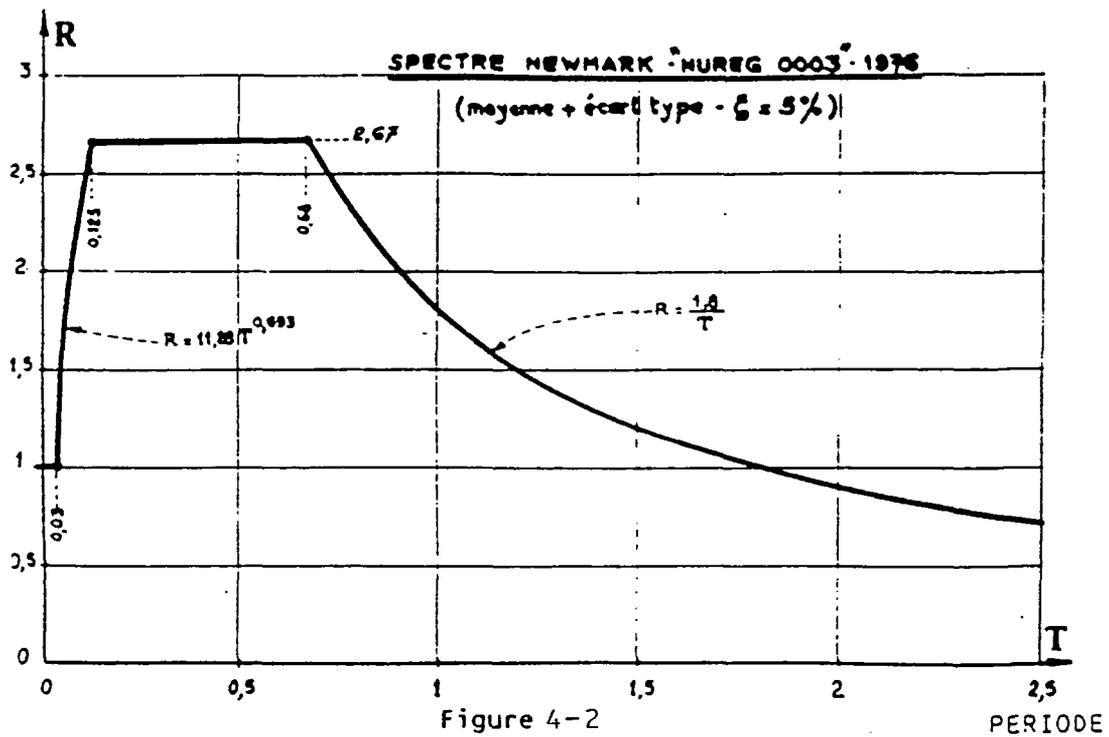


Figure 4-2
SPECTRE NEWMARK "NUREG 003" - 1976 : DIAGRAMME NORMAL EN ACCELERATION
(AMORTISSEMENT : 5%)

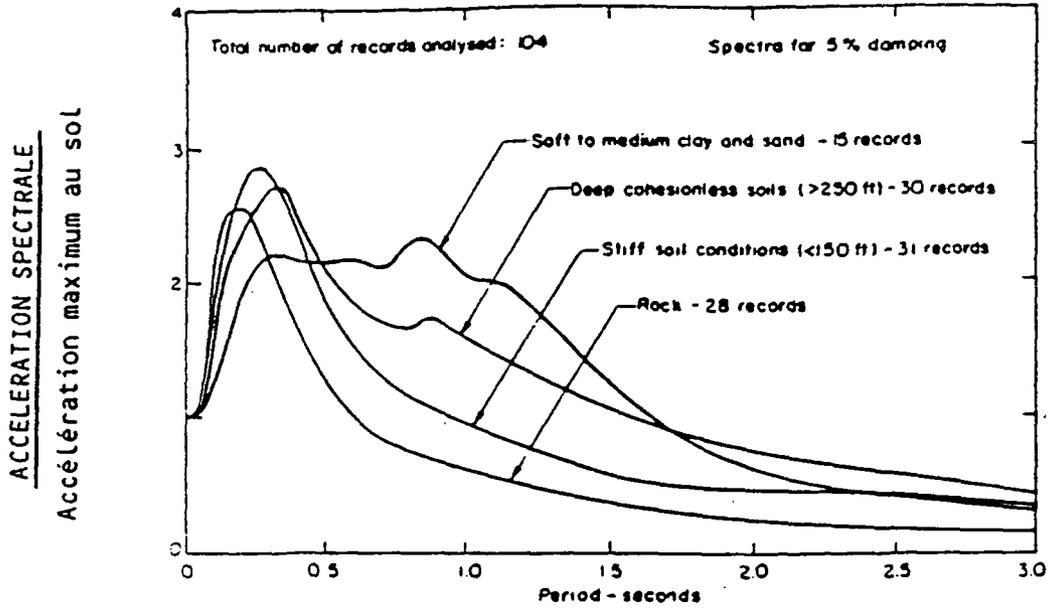


Figure 4-3
SPECTRE D'ACCELERATION MOYEN POUR
DIFFERENTES CONDITIONS DE SITE - SEED et al (1976)

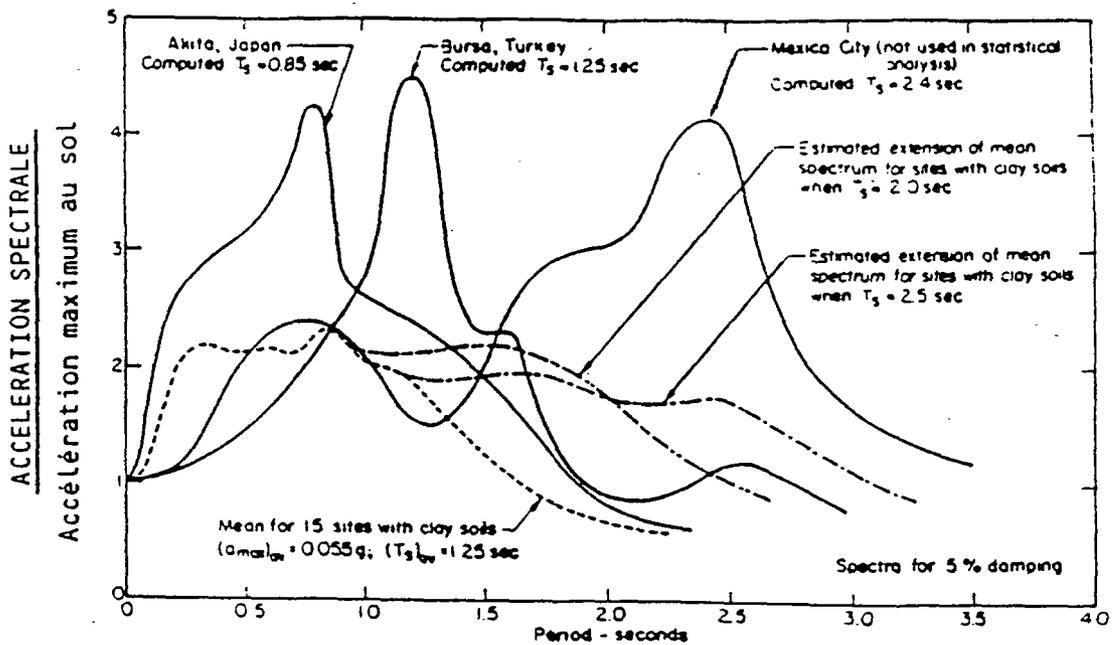


Figure 4-4
COMPARAISON DE SPECTRES MOYENS AVEC DES SPECTRES REELS POUR DES SITES
AVEC ARGILES MOLLES A MOYENNEMENT CONSISTANTES - SEED et al (1976)

D'autres approches étaient donc nécessaires dans un tel contexte.

4.1.1.2 - Deuxième approche

(1) Méthode de B. et G. MOHAMMADIOUN, 1980

Cette approche reste toujours statistique. Elle est basée sur une analyse de 576 observations aux Etats-Unis (bande NRC), pour des intensités allant de III à X.

Cette analyse a permis tout d'abord d'établir la corrélation suivante entre la magnitude (M), l'intensité au site d'enregistrement (I) et la distance focale (R) :

$$M = a I + b \log_{10} R + c$$

Les valeurs des coefficients de corrélation sont :

$$\begin{aligned} a &= 0.55 \\ b &= 2.20 \\ c &= - 1.14 \end{aligned}$$

avec un écart-type sur M de l'ordre de 0,43.

Puis, pour différentes classes d'intensité, une corrélation a été établie entre le spectre de réponse (correspondant aux composantes horizontales exclusivement), la magnitude et la distance focale.

Nous avons ainsi présenté sur les figures 4-5, 4-6 (diagramme quadrilogarithmique en fréquence) les spectres de réponse élastique (à 5% d'amortissement) correspondant aux classes d'intensité VI-VII ET VII. L'intensité VII est celle des séismes de référence SMHV, rappelés ci-dessus au paragraphe 2.

Ces figures mettent bien en évidence le décalage des spectres de réponse élastiques vers les basses fréquences, lorsque la distance à la source ainsi que la magnitude augmentent.

Les auteurs ont par ailleurs donné une relation simple liant la pseudo-vitesse relative (V), la magnitude (M) et la distance focale (R):

$$\log_{10} V(f) = K(f) + \alpha (f) M + n(f) \log_{10} R$$

Cette loi empirique, comme tout résultat d'analyse de régression fait cependant disparaître l'influence d'éventuels paramètres physiques autres que la magnitude et la distance focale dans les fluctuations statistiques autour de la courbe moyenne. Elle ne différencie pas par ailleurs les conditions de site et apparaît comme une loi moyenne qui ne correspond pas exactement à ce que l'on obtiendrait au rocher.

Variation, en fonction de la magnitude et de la distance focale, des spectres correspondant à l'intensité VI-VII :

- 1) $M = 4,64$; $R = 10\text{ km}$
- 2) $M = 5,03$; $R = 15\text{ km}$
- 3) $M = 5,52$; $R = 25\text{ km}$
- 4) $M = 6,18$; $R = 50\text{ km}$
- 5) $M = 6,63$; $R = 80\text{ km}$
- 6) $M = 7,02$; $R = 120\text{ km}$
- 7) $M = 7,51$; $R = 200\text{ km}$

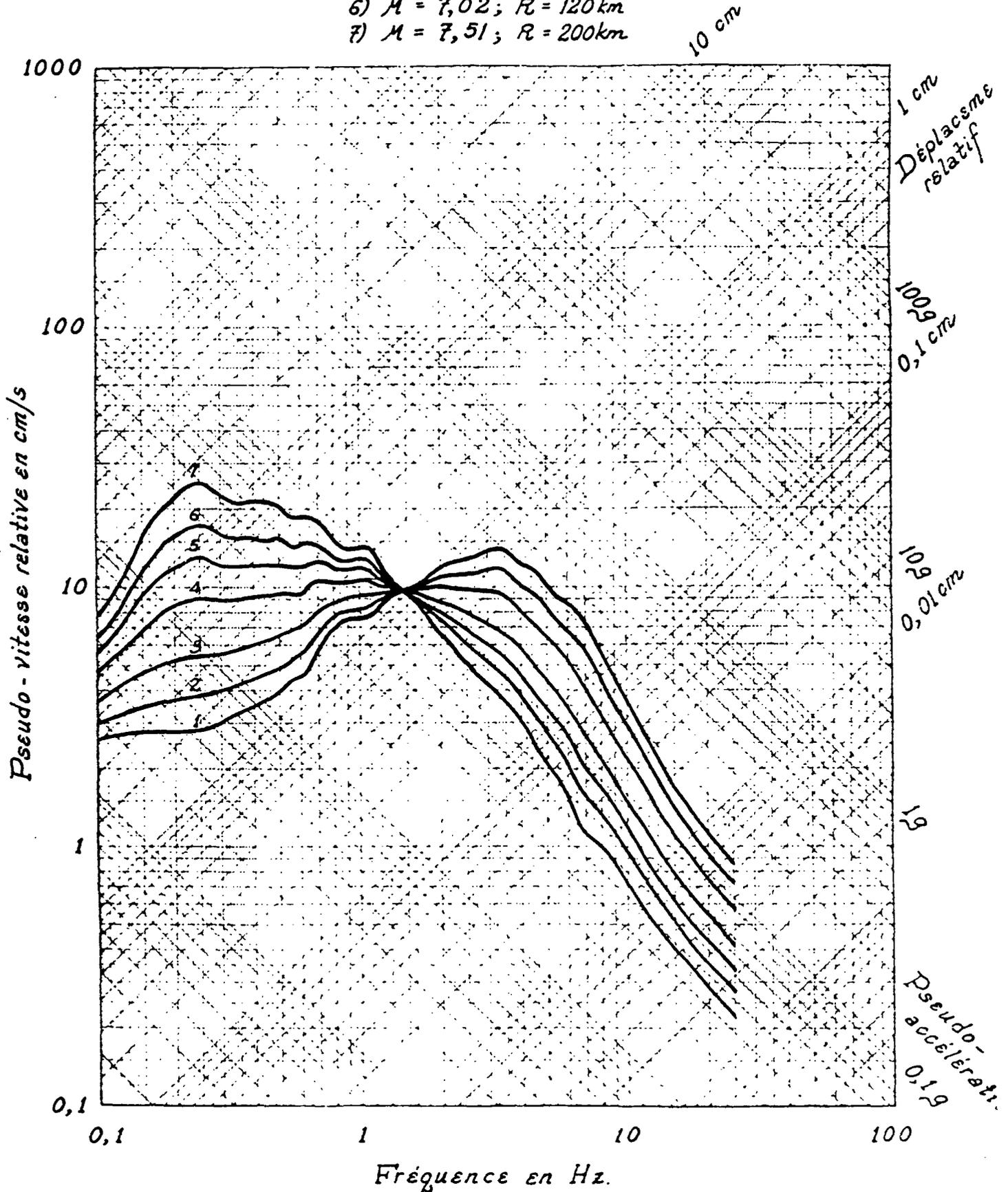


Fig.4-5 : (d'après B. et G. MOHAMMADIOUN)

Variation, en fonction de la magnitude et de la distance focale, des spectres correspondant à l'intensité VII :

- 1) $M = 4,92 ; R = 10\text{km}$
- 2) $M = 5,30 ; R = 15\text{km}$
- 3) $M = 5,80 ; R = 25\text{km}$
- 4) $M = 6,45 ; R = 50\text{km}$
- 5) $M = 6,90 ; R = 80\text{km}$
- 6) $M = 7,30 ; R = 120\text{km}$
- 7) $M = 7,78 ; R = 200\text{km}$

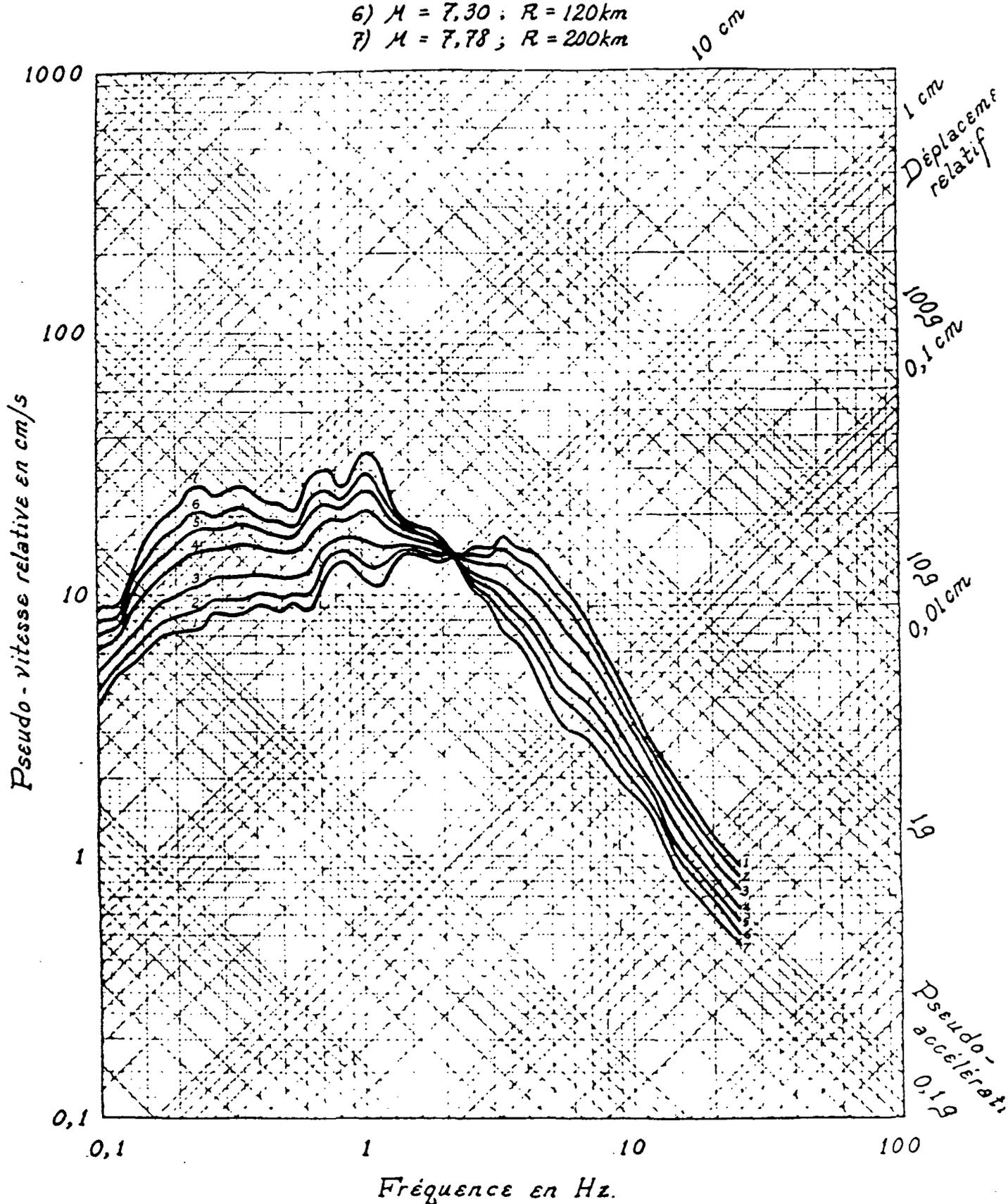


Fig. 4-6 : (d'après B. et G. MOHAMMADIOUN)

Par ailleurs, compte tenu du nombre encore limité de données correspondant à chaque classe d'intensité pour différentes distances focales, même pour les classes les plus documentées, une analyse statistique du spectre de pseudo-vitesse, pour une distance focale donnée, n'est pas encore envisageable globalement et donc encore moins si l'on veut différencier 3 ou 4 types de site dont le rocher.

Dans une approche nouvelle et complémentaire basée sur des considérations plus théoriques, on se propose de prendre en compte d'autres paramètres physiques tels que la durée de la source, le facteur de qualité lié à l'amortissement lors de la propagation, la fréquence de coupure liée à l'atténuation très forte près de la source ou de la surface, pour la définition de spectres au rocher (paragraphe 4.1.2).

(2) Méthode de D. PETROVSKI, 1986

Cette approche est également statistique : elle est basée sur une analyse de 120 enregistrements accélérométriques à 3 composantes, issus de 46 séismes de magnitudes variant de 3.0 à 7.0 et provenant de Yougoslavie, d'Italie du Nord et de la Grèce du Nord.

Les ordonnées spectrales correspondant aux spectres de pseudo-vitesse relative, pour un amortissement donné, sont représentées par la relation suivante :

$$\text{Log PSV}(f) = b'(f) + b_2(f) M + b_3(f) \text{Log}(R_h + c(f))$$

avec : PSV(f) = pseudo-vitesse relative (cm/s)
M = magnitude (sans qu'il soit précisé laquelle)
R_h = distance hypocentrale (km)
b'₁, b₂, b₃, c, étant des paramètres dépendant de la fréquence et précisés dans différents tableaux.

Les spectres obtenus peuvent être considérés sur des sites de "réponse moyenne", sans que cela ait pu être quantifié.

4.1.2 - Approche par modélisation spectrale de la source sismique

4.1.2.1 - *Introduction*

L'analyse récente des enregistrements de séismes à faible distance des sources sismiques a permis aux sismologues de mieux connaître le détail du mécanisme de rupture et a donné lieu à de nombreux modèles déterministes, faisant intervenir la propagation d'un front de rupture, et la répartition des chutes de contrainte et des dislocations sur le plan de faille. La forme spatiotemporelle de ces fonctions est calculée théoriquement pour des modèles dynamiques, ou bien imposée pour des modèles cinématiques ou quasidynamiques. Le rayonnement de telles sources est ensuite propagé à travers le milieu jusqu'au site désiré pour le calcul de l'accélérogramme.

Les modèles initiaux de source circulaire ou rectangulaire se compliquent en incluant barrières et aspérités, une vitesse de rupture variable, et accroissent ainsi le nombre de paramètres nécessaires à leur détermination. Pour conserver le caractère complexe de la rupture tout en réduisant le nombre de paramètres, il a été proposé de nombreux modèles stochastiques de source où certaines fonctions sont remplacées par leur valeur moyenne et leur écart-type. Ces paramètres statistiques peuvent être déduits de considérations dynamiques, ou inversement peuvent être adaptés pour que les spectres des accélérogrammes correspondants soient ajustés aux spectres réels.

Ces modèles stochastiques ont l'avantage, par rapport aux analyses statistiques d'enregistrements réels, de proposer une forme analytique du module du spectre de Fourier de l'accélération dépendant de peu de paramètres et donc contrôlables et ajustables plus facilement.

Cependant, il n'existe pas de formulation entièrement satisfaisante pour toutes les gammes de magnitude-distance qui permette de retrouver simultanément l'accélération maximale du sol, le niveau du plateau en réponse spectrale de vitesse, et la forme générale de la réponse spectrale en accélération.

4.1.2.2 - *Modèle spectral de source*

(a) Le principe

La formulation la plus simple du spectre ne fait intervenir qu'un seul paramètre décrivant la source (la magnitude M) et quelques paramètres associés à la propagation de l'onde sismique.

L'accélération $A(t)$ du sol en un site donné au rocher peut s'exprimer par la convolution d'une fonction source $S(t)$ et d'une fonction de propagation $P(t)$ associée aux fonctions de Green du problème.

$$A(t) = S(t) \times P(t) \quad \text{où } t \text{ est le temps}$$

Ceci devient un simple produit dans le domaine des fréquences :

$$A(f) = S(f) \times P(f) \quad \text{où } f \text{ est la fréquence.}$$

Dans la suite, les fonctions de la fréquence f seront comprises comme les modules des fonctions complexes associées.

(b) La fonction source = $S(f)$

L'hypothèse de chute de contrainte constante permet de déduire, à partir de la seule donnée du moment sismique M_0 , la dimension de la faille, la valeur de la dislocation, et le temps de l'émission du signal. Ce dernier intervient par son inverse f_c dans la fonction $S(f)$:

$$S(f) = S_0 \times \frac{f^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \times M_0$$

où f_c est la fréquence coin et M_0 , le moment sismique.

$$S_0 = \frac{\text{RAD} \times \text{SURF}}{\sqrt{2} \times 4\pi \times \rho \times V^3} \quad \text{pour une composante horizontale.}$$

Nous traiterons dans ce qui suit le cas des ondes de cisaillement, supposées horizontale ; une analyse analogue peut se faire pour les ondes de compression.

- RAD est la valeur moyenne du diagramme de rayonnement (RAD = 0.63),
- SURF est l'effet de surface libre (SURF = 2),
- ρ est la masse spécifique ($\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$),
- V est la vitesse des ondes ($V_s = 3.0 \text{ km/s}$),
- $\frac{1}{\sqrt{2}}$ prend en compte la projection sur une composante.

La fréquence coin est reliée à la magnitude par le moment sismique M_0 grâce aux formules :

$$M_0 = 10^{1.5M - 16.05}$$

et, pour les petits séismes ($M < 6.5$) :

$$f_c = 4.9 \times 10^6 \times V \times \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0}\right)^{1/3}$$

où $\Delta\sigma$ est la chute de contrainte.

Ce modèle a été construit pour redonner à basse fréquence l'énergie rayonnée par la source, et à haute fréquence un spectre plat en accélération (l'accélérogramme est assimilé à un bruit blanc).

Cette fonction source peut être filtrée pour tenir compte d'une possible chute du rayonnement à haute fréquence à l'émission, qui peut être liée à l'absorption au voisinage de la faille par le milieu très fracturée, ou par le comportement anélastique de la rupture en bout de fissure. On peut décrire quantitativement cet effet par la loi empirique :

$$S^*(f) = S(f) \times \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{\max}}\right)^2}}$$

où f_{\max} est la fréquence caractéristique de coupure :

f_{\max} variera généralement entre 5 et 30 Hz

(c) La fonction de propagation P(f)

Elle fait intervenir essentiellement la distance R entre la source et le site, et l'amortissement du milieu décrit par le facteur de qualité Q indépendant de f :

$$P(f) = \frac{1}{R} \times e^{-\pi \frac{fR}{QV}}$$

L'atténuation affecte donc plus les hautes fréquences à distance constante.

$1/R$ est la décroissance géométrique tridimensionnelle, V la vitesse des ondes sismiques. Cette formulation est correcte pour les courtes distances, pour lesquelles l'effet des structures superficielles est réduit.

Par contre, à grande distance, cette formule sous-estime le niveau d'accélération maximal, même pour un milieu transparent ($Q = \infty$), ce qui signifie que la décroissance en $1/R$ est trop forte. Ceci peut s'expliquer par un piégeage des ondes dans les couches superficielles par réflexions multiples à grande incidence, et transfert d'énergie des basses fréquences aux hautes fréquences par diffraction sur les hétérogénéités des premiers kilomètres de la croûte terrestre. (le premier phénomène donne à la limite des ondes de surface de décroissance $1/\sqrt{R}$ pour les fréquences résonnantes du milieu).

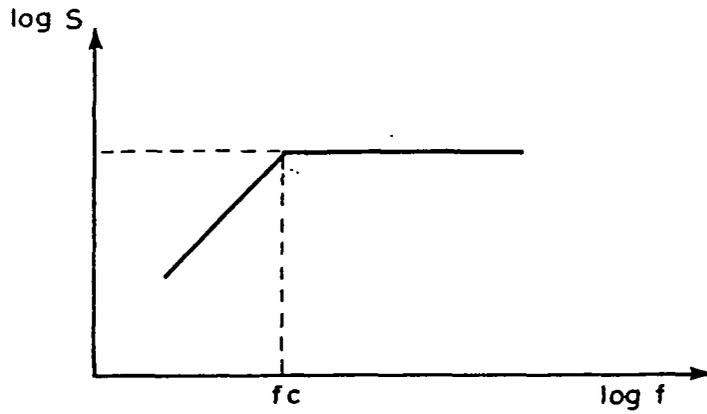


Figure 4.7 : $\log S = g(\log f)$

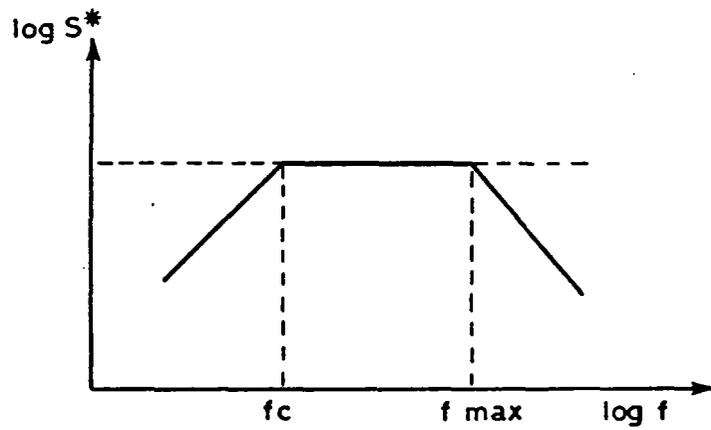


Figure 4.8 : $\log S^* = g(\log f)$

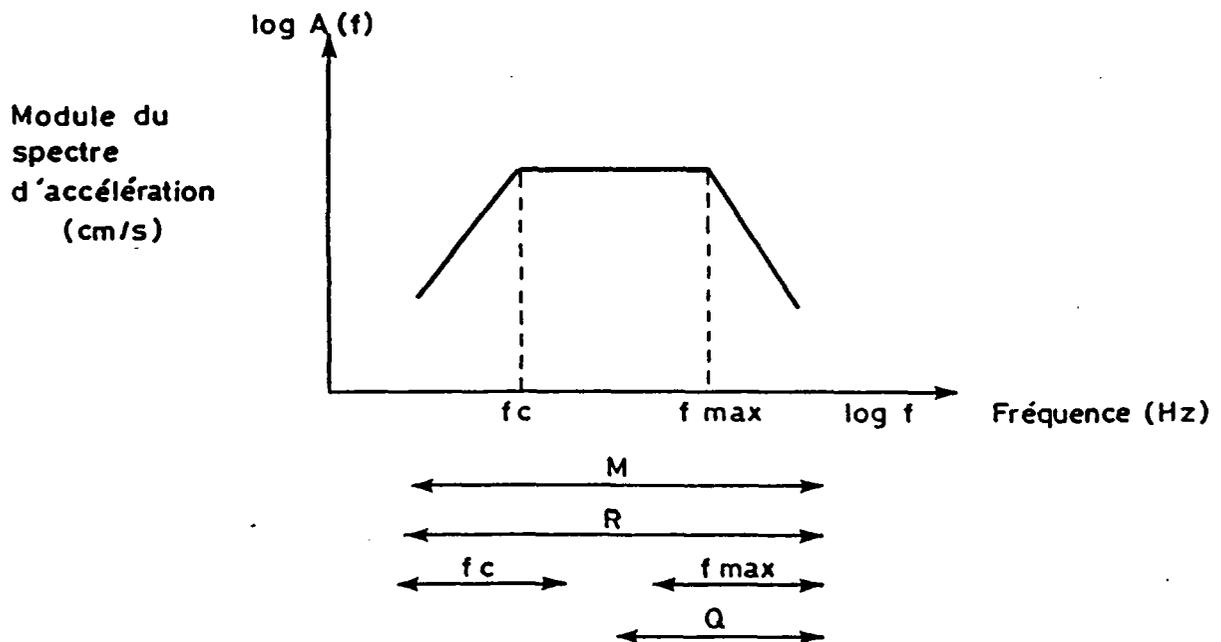


Figure 4.9 : Domaine de sensibilité des différents paramètres

Pour prendre en compte cet effet de décroissance moins importante à grande distance, plusieurs solutions ont été proposées dont celle d'ajouter un terme supplémentaire à la fonction P(f).

Une solution, proposée par BOORE (1984) puis P. BERNARD (1986) est d'utiliser une fonction Q dépendant de la fréquence f, avec un minimum pour une fréquence caractéristique f_0 de l'ordre de 0.3 Hz et une croissance en f^n calée à 1 Hz pour Q_1 , et dont la forme est la suivante:

$$\frac{1}{Q} = A \frac{(f/f_0)^2}{1 + (f/f_0)^{d+2}}$$

avec :

$$A = \frac{1}{Q_1} \times \frac{1 + (1/f_0)^{d+2}}{(1/f_0)^2}$$

$$d \# \frac{\log(Q_{100}/Q_1)}{2}, \text{ pour } f_0 \# 0.3 \text{ Hz}$$

Q_{100} étant la valeur de Q à 100 Hz.

Ainsi, si l'on considère par exemple les valeurs suivantes :

$$Q_1 = 300, \text{ pour } f = 1 \text{ Hz}$$

$$Q_{100} = 5000, \text{ pour } f = 100 \text{ Hz}$$

$$\text{On obtient : } d \# 0.62$$

$$A \# 7.3 \times 10^{-3} \text{ (1/A \# 136)}$$

$$\text{Soit : } Q = 136 ((f_0/f)^2 + (f/f_0)^{0.62})$$

$$\text{avec : } f_0 = 0.3 \text{ Hz}$$

Par ailleurs, d'autres solutions du modèle spectral ont été proposées ; en particulier par ANDERSON et HOUGH (1984) pour prendre en compte les effets de surface (cf. P. BERNARD et P. MOUROUX, 1988) :

. une amplification Z, lors de la progression des ondes vers les couches superficielles plus lentes de la croûte,

. un effet d'atténuation important des hautes fréquences dans les couches très superficielles (100 m - 1 km) fissurées et altérées :

$$P^*(f) = e^{-(\pi \kappa z)} \text{ pour } f > f_0$$

$$P^* = 1, \text{ à basse fréquence}$$

avec : $K = 0.04$ au rocher
 $= 0.08$ sur les sédiments récents
 f_0 , variable entre 1 et 5 Hz

(d) Discussion du modèle spectral

En conclusion des paragraphes précédents, le module du spectre de Fourier de l'accélération s'écrit :

(1) MODELE DE BOORE

$$A(f) = S_0 \times \frac{M}{R} \times \frac{f^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \times \frac{e^{-\pi fR/QV}}{1 + \left(\frac{f}{f_{max}}\right)^8}$$

Cette formule est celle qui a été proposée par BOORE (1983) qui avait effectivement limité son étude aux courtes distances.

On vient de voir que les effets à longue distance pouvaient être pris en compte par une fonction Q dépendant de f et présentée ci-dessus.

(2) MODELE D'ANDERSON

$$A(f) = S_0 \times Z \times \frac{M_0}{R} \times \frac{f^2}{1 + f/f_c} \times e^{-\pi R/VQ} \times e^{-\pi Kf}$$

avec une coupure du même type que celle introduite par f_{max} , par l'intermédiaire de f_c en-dessous de laquelle le dernier terme est égal à 1.

La donnée du module du spectre $A(f)$ permet de générer des accélérogrammes synthétiques dont la moyenne des spectres est égale à $A(f)$ et la durée limitée à environ $1/f_c$. Ceci peut se réaliser grâce à une méthode proposée par BOORE (1983), à partir d'un signal filtré de phase aléatoire.

Cette technique n'est pas applicable à partir du spectre de réponse en vitesse, à moins d'hypothèses supplémentaires liant statistiquement ceux-ci aux spectres de Fourier.

Il est par contre facile de calculer le spectre de réponse en vitesse à partir du spectre d'accélération en passant simplement par l'accélérogramme en temps.

Il est ainsi remarquable que l'expression analytique de $A(f)$, déduite de considérations théoriques et d'observations, puisse rendre compte correctement avec un nombre minimal de paramètres à la fois de la forme générale du spectre de Fourier de l'accélération, et de la valeur de l'accélération maximale du sol, pour une grande gamme de couples (M, R) comme cela a été montré dans différentes applications (séismes d'Imperial Valley (1979), du Frioul (1976) et d'Irpinia (1980)).

4.2 - Application des méthodes précédentes pour la détermination des spectres SMHV et SMS au "rocher horizontal affleurant"

4.2.1 - Méthodes et paramètres utilisés

Pour le site de HARNES, nous avons alors appliqué les méthodes précédentes en tenant compte du séisme de référence, rappelé au paragraphe 2.1 de ce rapport.

■ La méthode de B. et G. MOHAMMADIOUN (1980), qui correspond à la règle de sûreté des installations nucléaires, pour les intensités VII, avec les 2 couples de magnitude et de distance focale, correspondant aux 2 séismes de référence :

$$. M = 4.8 \quad \text{et} \quad R = 10 \text{ km}$$

$$. M = 5.8 \quad \text{et} \quad R = 30 \text{ km}$$

■ La méthode de D. PETROVSKI, avec les mêmes couples de valeurs.

■ La méthode spectrale de BOORE (1983) et P. BERNARD (1987), en utilisant statistiquement 21 accélérogrammes calculés et leurs spectres de réponse élastiques horizontaux correspondants, obtenus en considérant une répartition gaussienne de la magnitude avec un écart-type $\sigma_M = 0.2$ pour les 2 couples de paramètres suivants (méthode ANDERSON) :

$$. M = 4.8, R = 10 \text{ km}, Q_1 = 300, K = 0.04, f_{\epsilon} = 4 \text{ Hz}$$

$$. M = 5.8, R = 30 \text{ km}, Q_1 = 300, K = 0.04, f_{\epsilon} = 4 \text{ Hz}$$

Les résultats de l'analyse de la méthode spectrale sont présentés sous les 3 formes, quadrilogarithmiques en fréquence et logarithmique en

pseudo-accélération fonction de la période (réelle et normalisée), avec amortissement de 5%.

- . Pour l'ensemble des spectres issus directement des 21 accélérogrammes (figures 4-10 et 4-11),
- . Pour les spectres moyens et moyens + écart-type (figures 4-12 et 4-13).

4.2.2 - Choix du spectre SMHV au "rocher horizontal affleurant"

Pour le site de HARNES, nous avons alors reporté sur une même figure 4-14, pour des spectres à 5% d'amortissement :

- Les courbes (1) et (2) de la méthode RFS I-2c,
- Les courbes (3) et (4) de la méthode PETROVSKI,
- Les courbes (5) et (6) de la méthode spectrale.

Cette figure indique quelques différences pour l'ensemble des spectres, mais essentiellement dans le domaine des basses fréquences, ce qui est normal compte tenu du fait que les 2 premières méthodes ne différencient pas les conditions de site.

Nous proposerons donc un spectre SMHV "au rocher horizontal affleurant" comme indiqué sur la figure 4-14, pour un amortissement de 5% et présenté globalement pour des amortissements de 2, 5, 10 et 20% sur la figure 4-15.

Pour des amortissements différents de 5%, on adoptera les coefficients de passage suivants, adaptés de ceux trouvés par NEWMARK et al (1976) ou proposés dans les futures règles parasismiques françaises :

- . Pour les profils (1), (2) et (3) de la figure 4-15 :
 - passage de 2 à 5% : 1.20,
 - passage de 5 à 10% : 1.20,
 - passage de 10 à 20% : 1.20.
- . Pour les profils (4) et (5) de la figure 4-15 :
 - passage de 2 à 5% : 1.37,
 - passage de 5 à 10% : 1.37,
 - passage de 10 à 20% : 1.37.

Les valeurs correspondantes de V et A en fonction de la fréquence F sont précisées sur le tableau 4-1 pour chacun des spectres à 2, 5, 10 et 20% d'amortissement, qui sont par ailleurs présentés sur la figure 4-15; on intrapolera linéairement sur les diagrammes logarithmiques, pour les valeurs intermédiaires.

SPECTRE DE REPONSE

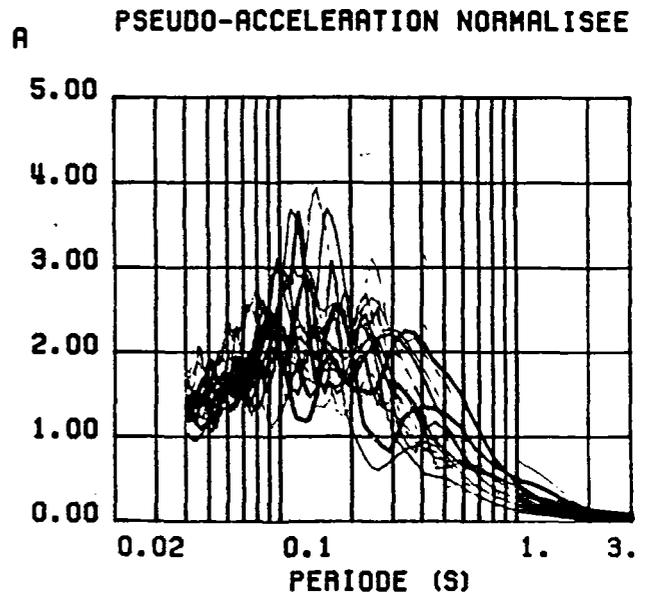
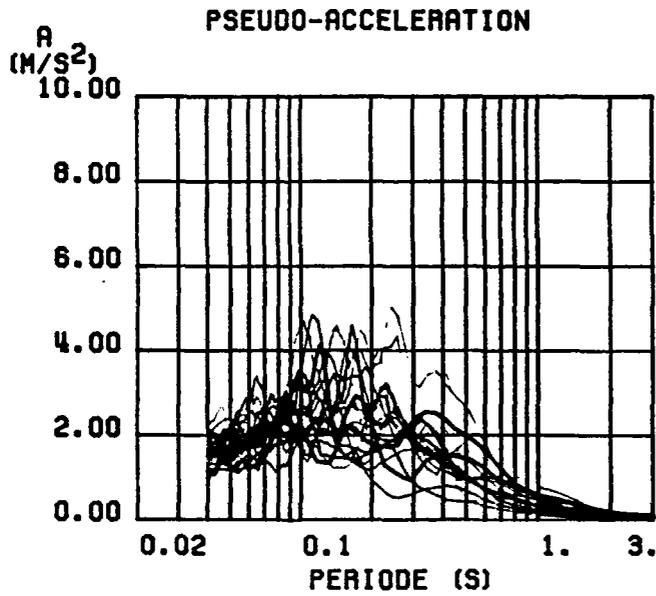
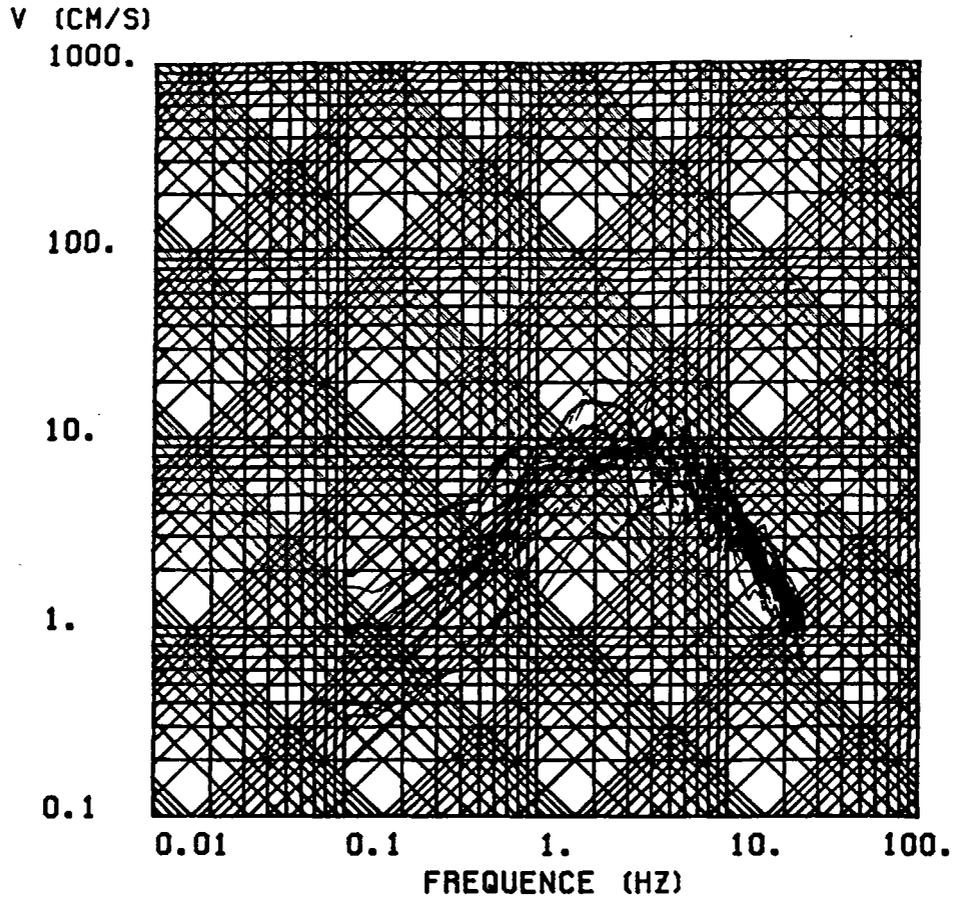


Figure 4-10
SPECTRES EN REPARTITION GAUSSIENNE : AMORTISSEMENT : 5%
"ROCHER HORIZONTAL AFFLEURANT"
M = 4.8 R = 10 km
K = 0.04 f_E = 4 Hz
Q = 300

SPECTRE DE REPONSE

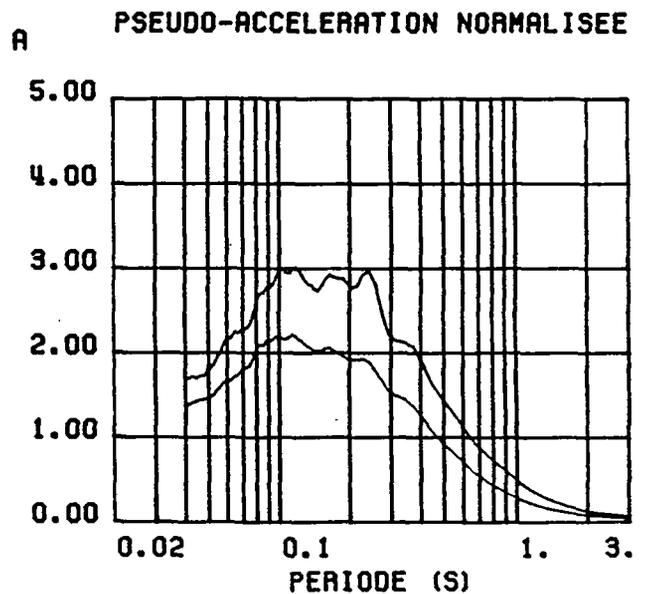
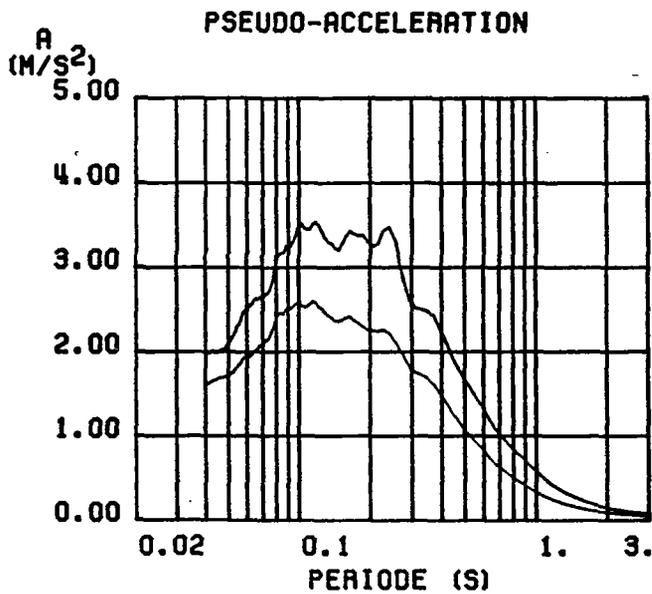
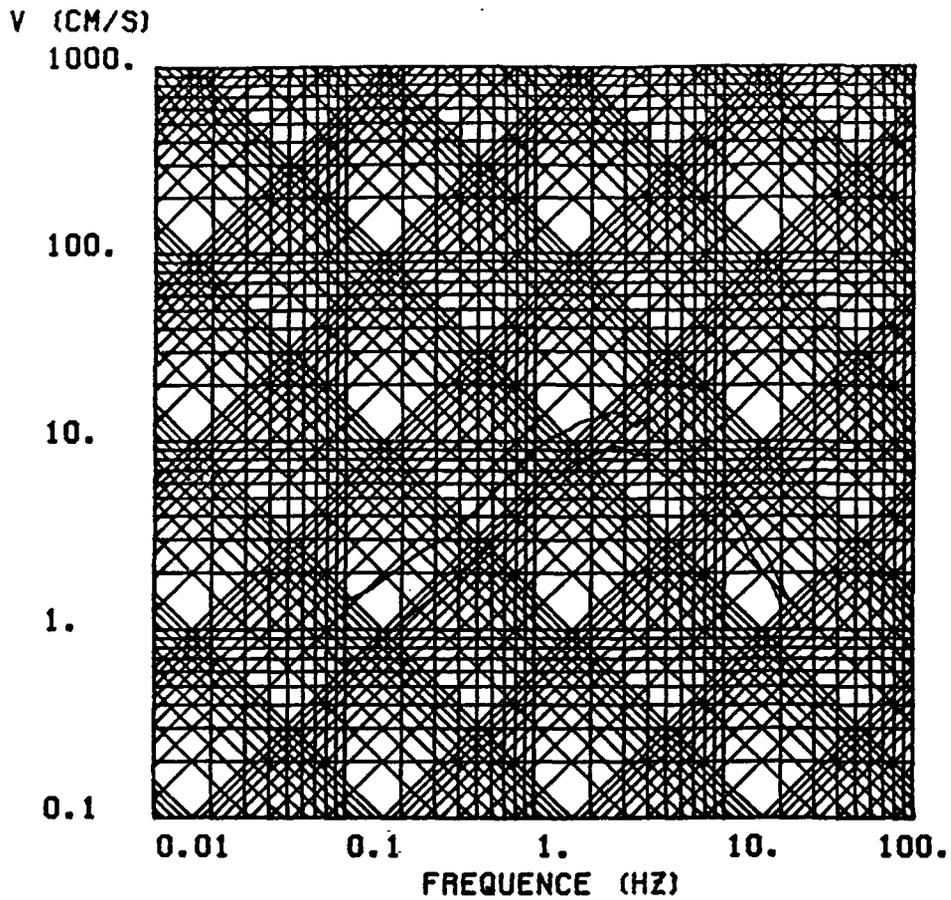


Figure 4-11
SPECTRES MOYENS ET MOYENS + ECART-TYPE
(AMORTISSEMENT : 5%)
"ROCHER HORIZONTAL AFFLEURANT"
M = 4.8 R = 10 km
K = 0.04 f_E = 4 Hz
Q = 300

SPECTRE DE REPONSE

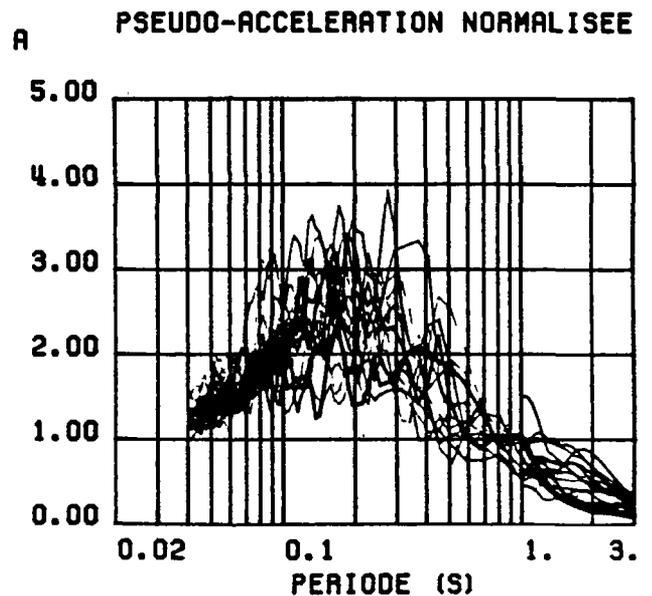
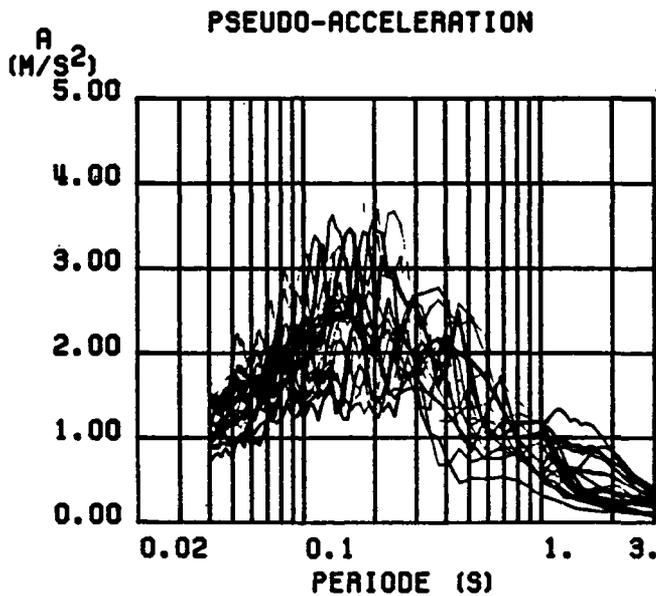
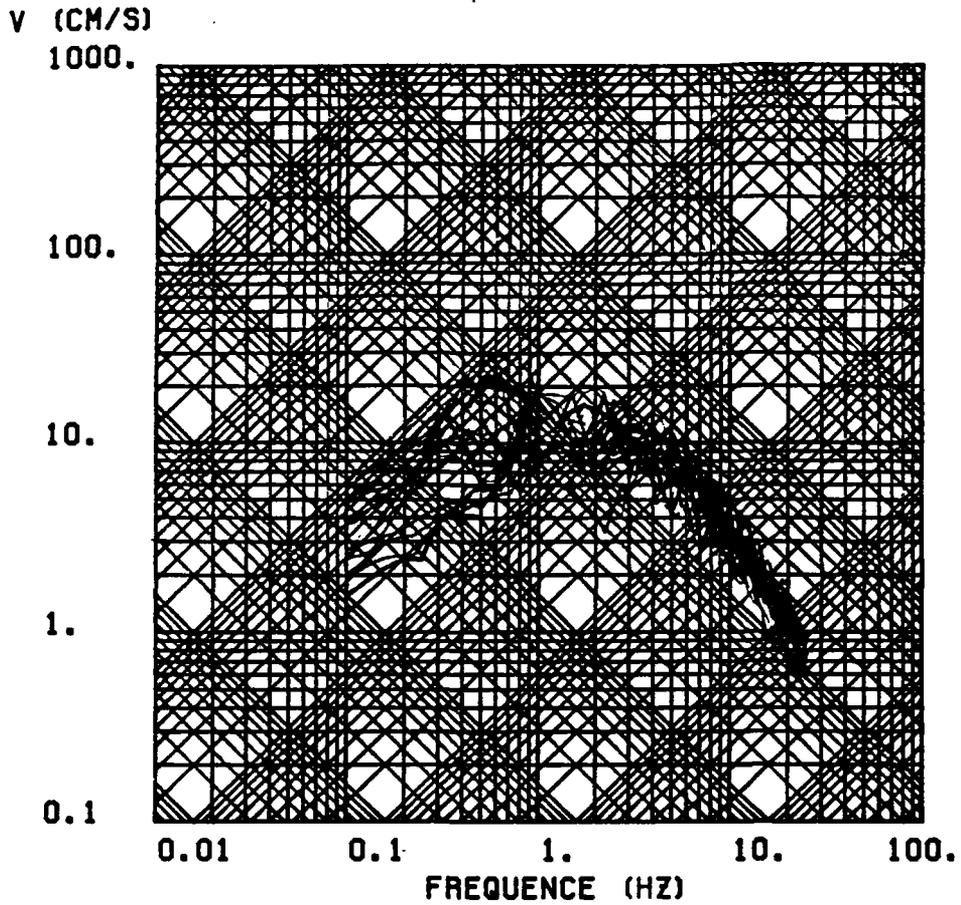


Figure 4-12
SPECTRES EN REPARTITION GAUSSIENNE : AMORTISSEMENT : 5%
"ROCHER HORIZONTAL AFFLEURANT"

$M = 5.8$

$R = 30 \text{ km}$

$K = 0.04$

$f_E = 4 \text{ Hz}$

$Q = 300$

SPECTRE DE REPONSE

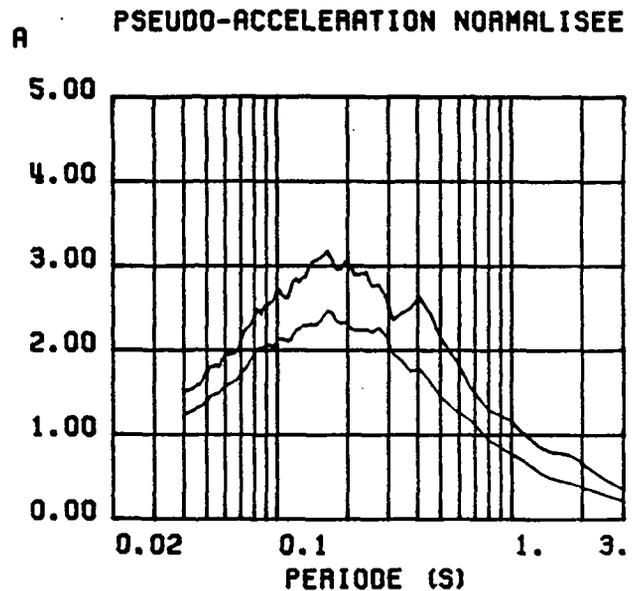
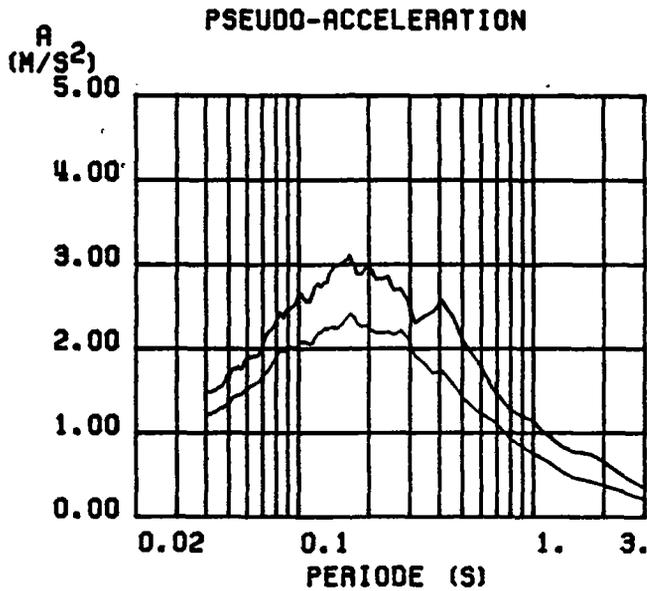
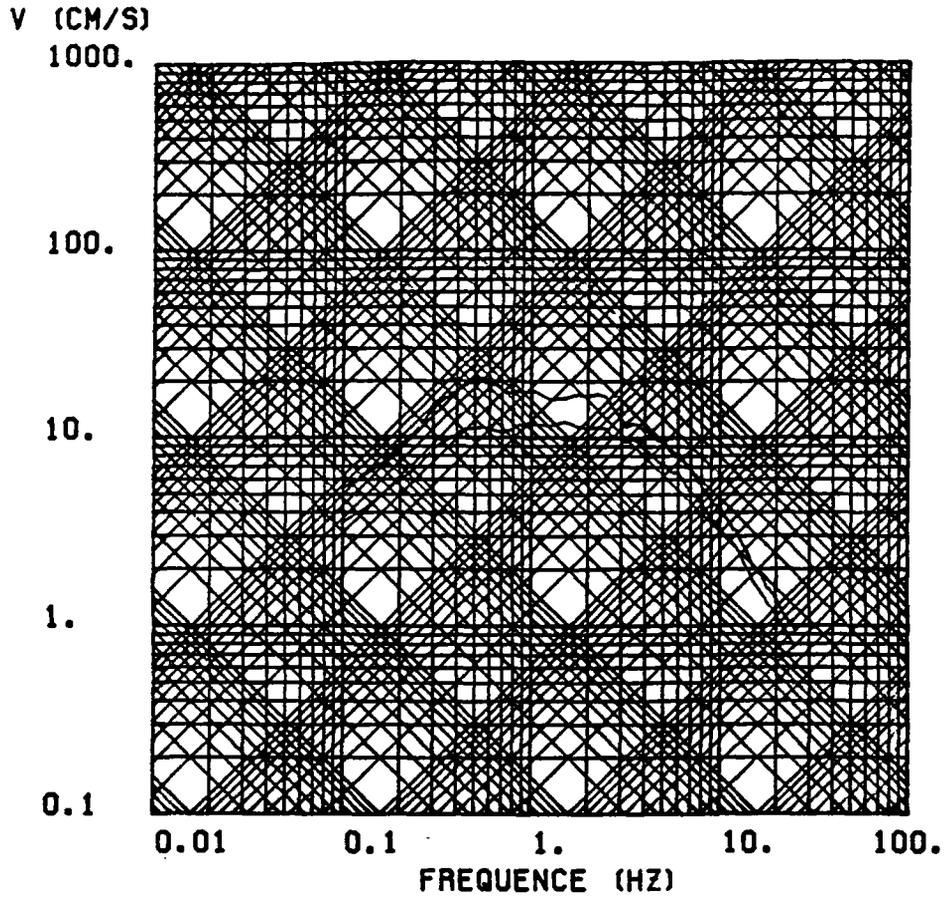


Figure 4-13
SPECTRES MOYENS ET MOYENS + ECART-TYPE (AMORTISSEMENT : 5%)
"ROCHER HORIZONTAL AFFLEURANT"

$M = 5.8$

$R = 30 \text{ km}$

$K = 0.04$

$f_E = 4 \text{ Hz}$

$Q = 300$

Figure 4.14

COMPARAISON DE SPECTRES
TYPE SMHV
"ROCHER HORIZONTAL AFFLEURANT"

- ① RFS 12 c - (M = 5.8, R = 30 km)
- ② RFS 12 c - (M = 4.8, R = 10 km)
- ③ PETROVSKI - (M = 5.8, R = 30 km)
- ④ PETROVSKI - (M = 4.8, R = 10 km)
- ⑤ METHODE SPECTRALE (M = 5.8, R = 30 km)
- ⑥ METHODE SPECTRALE (M = 4.8, R = 10 km)

--- SPECTRE PROPOSE

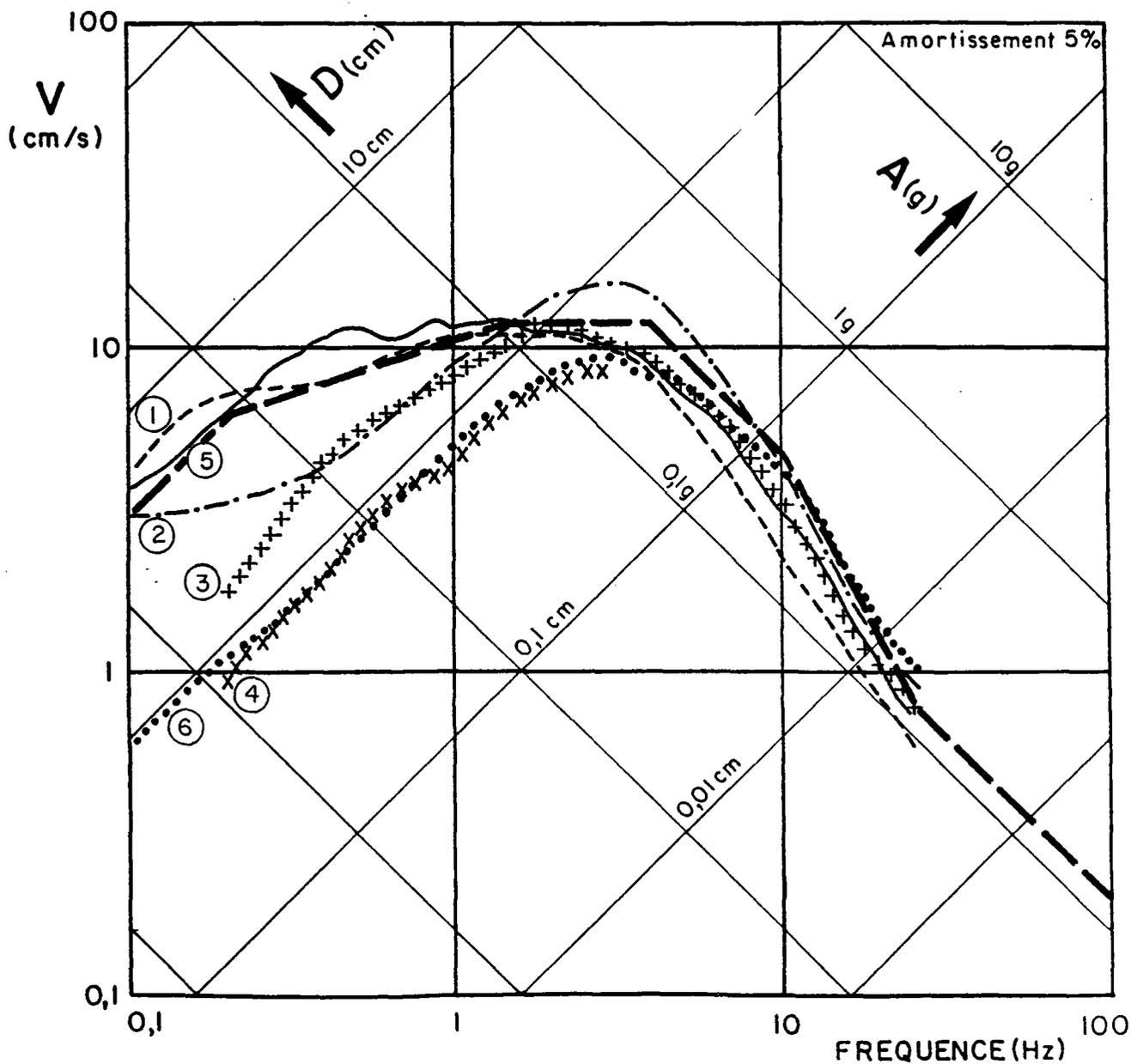


Figure 4.15

SITE DE HARNES

SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE HORIZONTAL

"AU ROCHER HORIZONTAL AFFLEURANT"

DU SMHV

Les valeurs de V et A pour les différents amortissements 2,5,10 et 20% sont précisées sur le tableau 4.1

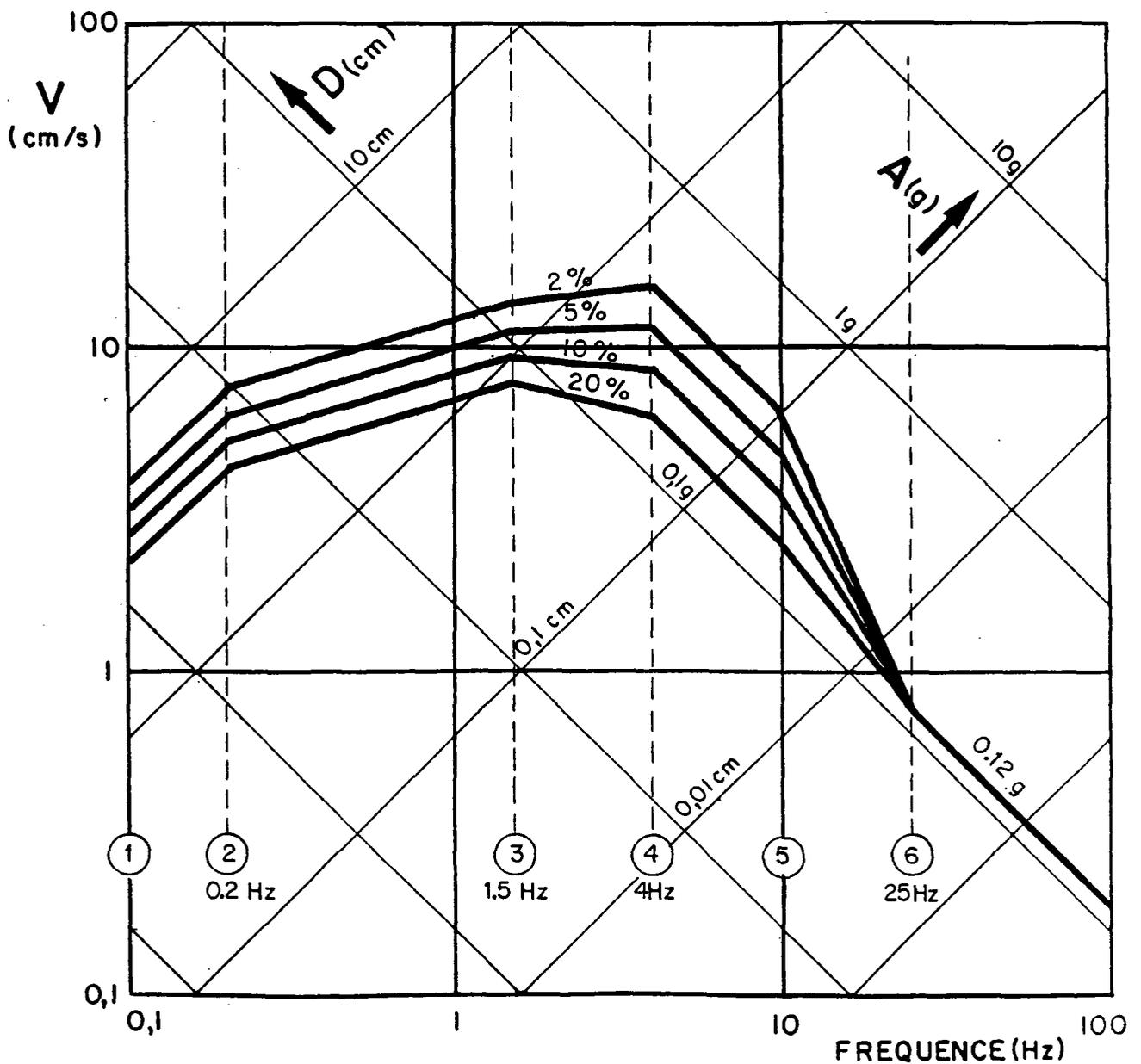


TABLEAU 4.1

SITE DE HARNES

SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE HORIZONTAL
 "AU ROCHER HORIZONTAL AFFLEURANT" DU S.M.H.V.

VALEURS DE A, V et D EN FONCTION DE F
 POUR DIFFERENTS AMORTISSEMENTS 2-5-10-20 %

PROFIL (Figure 4.15)	F (Hz)	AMORTISSEMENT (ksi %)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
(1)	0.10	2	0.00237	3.77	6.00
(1)	0.10	5	0.00197	3.14	5.00
(1)	0.10	10	0.00164	2.62	4.16
(1)	0.10	20	0.00137	2.18	3.47
(2)	0.20	2	0.00947	7.54	6.00
(2)	0.20	5	0.00789	6.28	5.00
(2)	0.20	10	0.00658	5.23	4.16
(2)	0.20	20	0.00548	4.36	3.47
(3)	1.50	2	0.13572	14.40	1.53
(3)	1.50	5	0.11310	12.00	1.27
(3)	1.50	10	0.09425	10.00	1.06
(3)	1.50	20	0.07854	8.33	0.88
(4)	4.00	2	0.41318	16.44	0.65
(4)	4.00	5	0.30159	12.00	0.48
(4)	4.00	10	0.22014	8.76	0.35
(4)	4.00	20	0.16069	6.39	0.25
(5)	10.00	2	0.41318	6.58	0.10
(5)	10.00	5	0.30159	4.80	0.08
(5)	10.00	10	0.22014	3.50	0.06
(5)	10.00	20	0.16069	2.56	0.04
(6)	25.00	V ksi	0.12000	0.76	0.00

4.2.3 - Choix du spectre S.M.S.

D'après la règle de sûreté n° I-2c, les spectres S.M.S. sont obtenus directement à partir du spectre S.M.H.V..

Compte tenu par ailleurs du fait que les données disponibles concernant en particulier les profondeurs focales sont insuffisantes, nous proposons de passer du spectre S.M.H.V. au spectre S.M.S. en utilisant un coefficient multiplicateur de 2 pour toutes les fréquences, comme cela est précisé à l'alinéa c) du paragraphe 2.3 des règles de sûreté.

D'où les spectres S.M.S. au "rocher horizontal affleurant", présentés sous la forme quadrilogarithmique sur la figure 4-16.

Les valeurs des accélérations (A) et de vitesses (V) pour les amortissements 2, 5, 10 et 20% sont par ailleurs précisées sur le tableau 4-2.

On intrapolera linéairement sur les diagrammes logarithmiques, pour les valeurs intermédiaires.

5. DETERMINATION EFFECTIVE DES SPECTRES DE REPONSE ELASTIQUES TENANT

COMPTE DES CONDITIONS DE SITE

5.1 - Présentation du problème

Comme cela a été évoqué au paragraphe 4-1, les méthodes proposées ne différencient généralement pas les conditions de site, sauf celle de SEED et al (1976) et la méthode spectrale qui permet de générer des accélérogrammes au "rocher horizontal affleurant".

Lorsque les conditions de site ne sont pas trop défavorables, on peut effectivement concevoir l'utilisation de méthodes mettant plus en évidence les caractéristiques de la source sismique et la distance du site à cette source, avec un traitement statistique de données d'un grand nombre d'accélérogrammes utilisés globalement.

Lorsque les conditions de site sont très différentes des conditions au "substratum", comme cela est le cas pour le site de HARNES (paragraphe 2.2), il faut utiliser d'autres méthodes permettant de prendre en compte ces conditions de site.

On peut utiliser :

(i) Des méthodes empirico-statistiques :

Figure 4.16

SITE DE HARNES

SPECTRE DE REPOSE ELASTIQUE HORIZONTAL

"AU ROCHER HORIZONTAL AFFLEURANT"

DU **SMS**

Les valeurs de V et A pour les différents amortissements 2,5,10 et 20% sont précisées sur le tableau 4.2

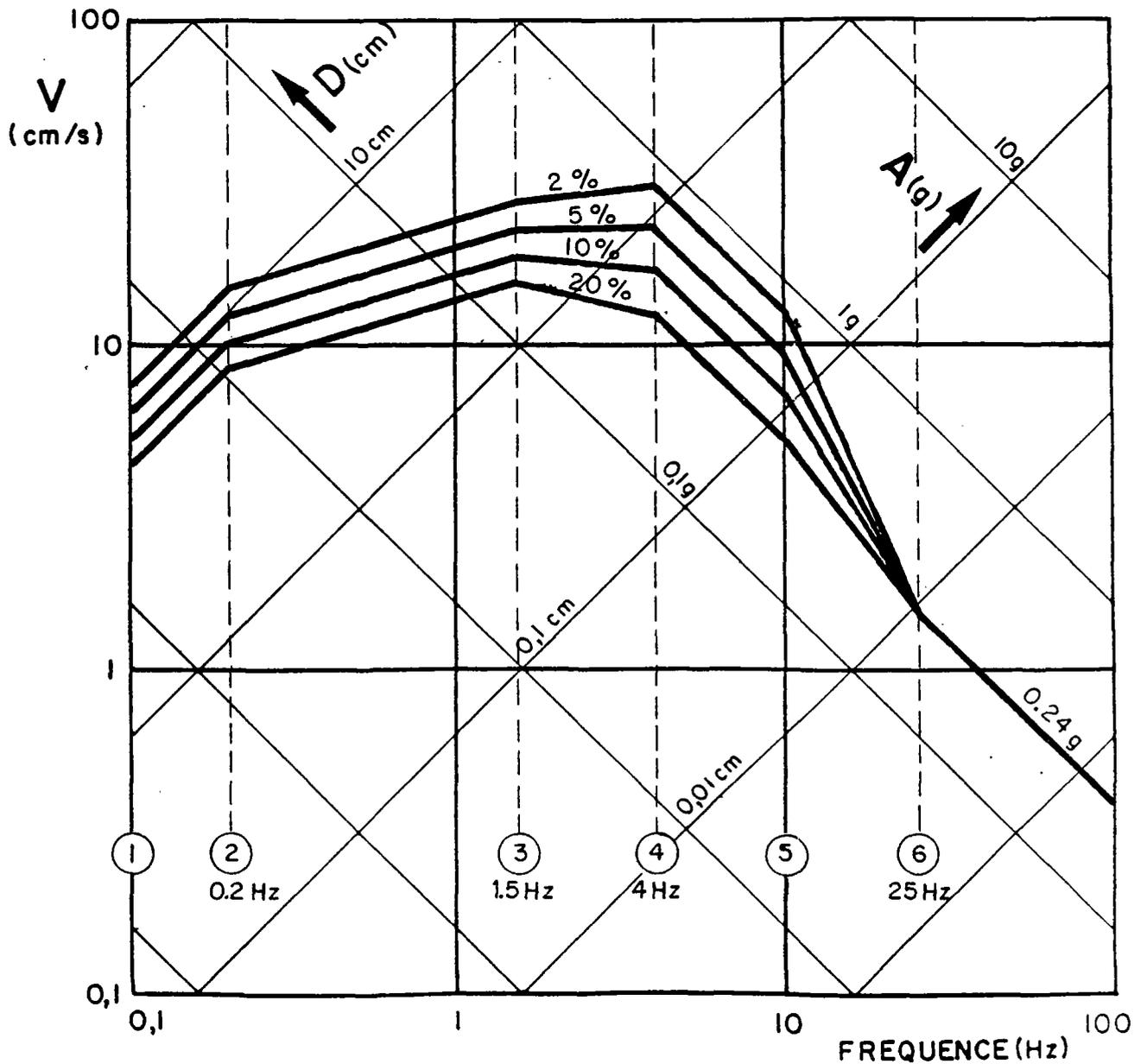


TABLEAU 4.2

SITE DE HARNES

SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE HORIZONTAL
 "AU ROCHER HORIZONTAL AFFLEURANT" DU S.M.S.

VALEURS DE A, V et D EN FONCTION DE F
 POUR DIFFERENTS AMORTISSEMENTS 2-5-10-20 %

PROFIL (Figure 4.16)	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)	0.20	2	0.01894	15.07	11.99
(2)	0.20	5	0.01578	12.56	9.99
(2)	0.20	10	0.01315	10.47	8.33
(2)	0.20	20	0.01096	8.72	6.94
(3)	1.50	2	0.27143	28.80	3.06
(3)	1.50	5	0.22619	24.00	2.55
(3)	1.50	10	0.18849	20.00	2.12
(3)	1.50	20	0.15708	16.67	1.77
(4)	4.00	2	0.82636	32.88	1.31
(4)	4.00	5	0.60318	24.00	0.95
(4)	4.00	10	0.44028	17.52	0.70
(4)	4.00	20	0.32137	12.79	0.51
(5)	10.00	2	0.82636	13.15	0.21
(5)	10.00	5	0.60318	9.60	0.15
(5)	10.00	10	0.44028	7.01	0.11
(5)	10.00	20	0.32137	5.11	0.08
(6)	25.00	V ksi	0.24000	1.53	0.01

■ méthode de SEED et al (1976) :

Elle est basée sur l'analyse d'une quinzaine d'enregistrements sur des sols constitués d'argile molle et de sable, avec cependant des épaisseurs de sol beaucoup plus importantes (40 à 200 m) que celle du site étudié. La courbe obtenue calée à g a déjà été présentée sur la figure 4-3 (soft and medium clay and sand).

■ méthode de FACCIOLI (1978) :

Elle est intéressante parce qu'elle donne les paramètres spectraux (pseudo-vitesse relative), ainsi d'ailleurs que l'accélération maximale, la vitesse maximale et le déplacement maximal, en fonction de la magnitude, M , et de la distance focale, R , par une relation du type :

$$y = a \times 10^b \times M \times (R + 25)^{-c}$$

où y peut représenter alternativement la pseudo-vitesse (PSV) ou les autres paramètres (A_{max} , V_{max} , D_{max}).

Elle s'applique à des sols dont la vitesse des ondes de cisaillement est de l'ordre de 100 m/s, et pour des épaisseurs de sol inférieures à 10 m.

(2) Des méthodes numériques

Elles dépendent essentiellement du type de comportement pris en compte pour le sol :

- linéaire (élastique ou visco-élastique),
- non linéaire (linéaire équivalent, élasto-plastique).

Les méthodes non linéaires et en particulier la méthode linéaire équivalente, développée par SEED (cf. SCHNABEL et al, 1972 ; LYSMER et al, 1975), auraient nécessité une meilleure connaissance des caractéristiques non linéaires des sols et donc une campagne de reconnaissance complémentaire des sols qui n'a pu être envisagée dans le cadre de cette étude.

Nous avons donc utilisé un modèle de sol linéaire visco-élastique multicouches, comprenant ainsi n types de sol reposant sur un rocher également visco-élastique. Les modules de cisaillement G (ou les vitesses d'onde de cisaillement V_s , avec $G = V_s^2 \rho$, étant la masse spécifique) et les taux d'amortissement D (ou les facteurs de qualité Q , avec

Q = 1/2 D), ont été évalués à partir des résultats de différents essais (voir paragraphes 2.2).

Ce modèle permet d'obtenir numériquement une fonction de transfert multicouches $T(\omega)$, permettant le passage des "conditions rocher horizontal affleurant" aux "conditions particulières de site" et donc leur prise en compte effective.

A titre indicatif, nous présentons ci-dessous analytiquement cette fonction de transfert pour un bicouche sol (1) - rocher (2) :

$$T(\omega) = \frac{1}{\cos(\omega H/V_{s1}^*) + i.p. \sin(\omega H/V_{s1}^*)}$$
$$p = \sqrt{\frac{\rho_1 G_1^*}{\rho_2 G_2^*}}$$

avec : ω = fréquence angulaire
 H = épaisseur de la couche de sol 1
 V_{s1}^* = vitesse complexe des ondes de cisaillement pour le sol 1
 V_{s2}^* = idem pour le rocher 2
 ρ_1 = masse spécifique du sol 1
 ρ_2 = idem pour le rocher 2
 G_1^* = module de cisaillement complexe du sol 1
 G_2^* = idem pour le rocher 2
 i^2 = - 1

On a par ailleurs les relations :

$$G^* = G(1 + 2 D.i)$$

$$G^* = (V_{s}^*)^2$$

avec : G = module de cisaillement
 D = taux d'amortissement critique

5.2 - Application de ces méthodes pour la détermination des spectres SMHV et SMS, avec conditions de site : sols "mous" pour le site de HARNES

5.2.1 - Détermination des spectres SMHV

1) Méthodes et paramètres utilisés

■ Méthode de SEED :

Elle a été utilisée directement à partir d'un calage à 0.12 g de la courbe correspondant aux sols mous de la figure 4.3.

■ Méthode de FACCIOLI :

Elle a été utilisée directement avec les paramètres suivants :

- M = 4.8, R = 10 km
- M = 5.8, R = 30 km

■ Méthode numérique :

Elle a été mise en oeuvre de la manière suivante :

♦ Utilisation des 21 accélérogrammes et des spectres de Fourier pour la méthode spectrale "au rocher horizontal affleurant", comme indiqué au paragraphe 4.2.1 ci-dessus, avec les 2 couples de valeur (M = 4.8 et R = 10 km) et (M = 5.8 et R = 30 km),

♦ Multiplication des spectres de Fourier ainsi obtenus par la fonction de transfert T (f) correspondant aux conditions de site, à savoir 2 couches reposant sur un sol considéré comme le substratum, avec les caractéristiques suivantes :

- couche 1 : $V_{s1} = 150$ m/s $Q_1 = 5$ $\rho_1 = 1700$ kg/m³
- couche 2 : $V_{s2} = 400$ m/s $Q_2 = 20$ $\rho_2 = 1950$ kg/m³
- substratum: $V_{s3} = 1000$ m/s $Q_4 = 80$ $\rho_3 = 2200$ kg/m³

Le module de cette fonction de transfert obtenue à partir des caractéristiques des 2 couches et du rocher est présenté sur la figure 5-1 en fonction de la fréquence f.

On voit ainsi que la fréquence fondamentale des 2 couches est de l'ordre de 6 à 7 Hz.

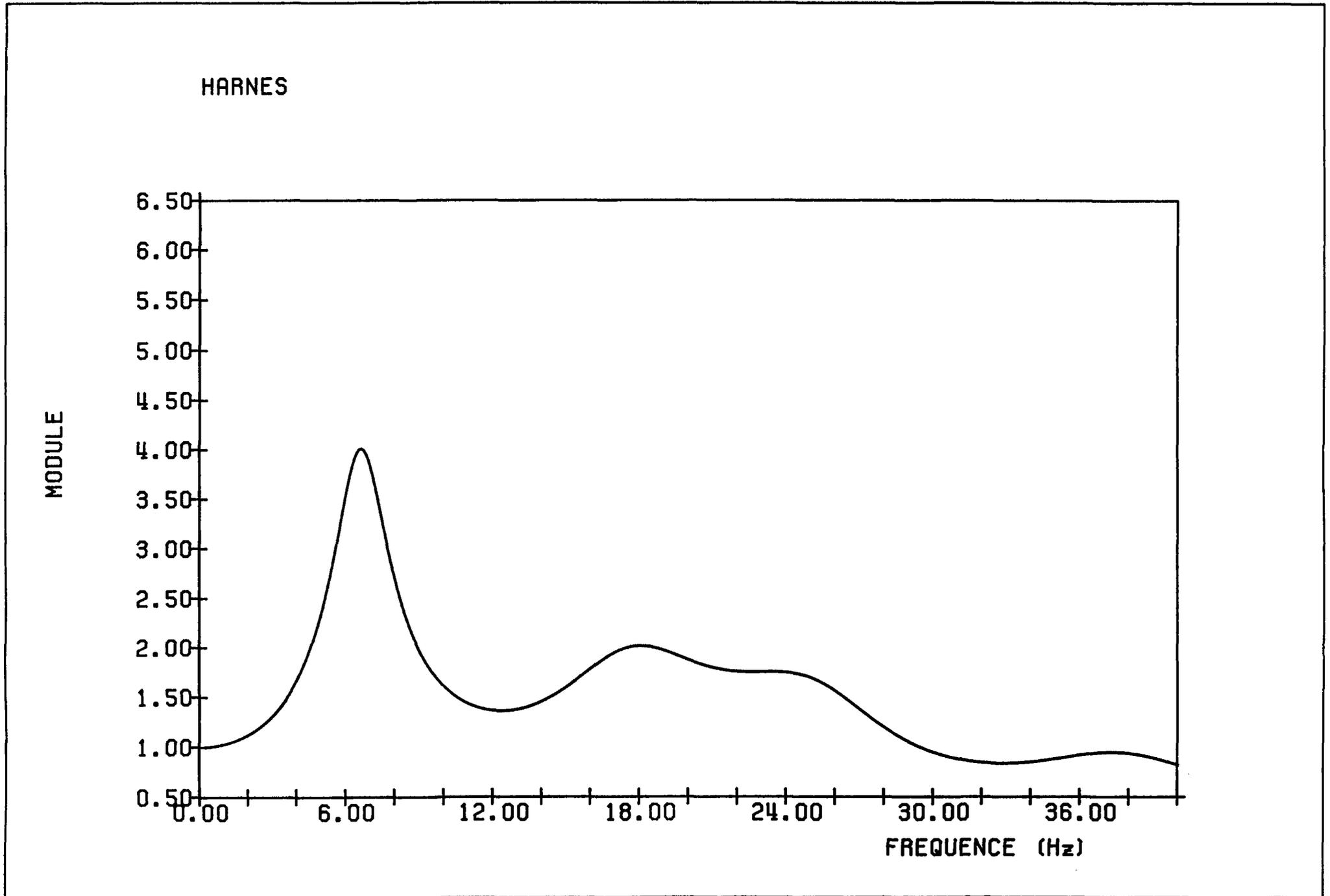
♦ Calcul des spectres de réponse d'oscillateur pour les 21 signaux fréquentiels dépendant des conditions de site : figures 5-2, 5-3, 5-4 et 5-5, pour les 2 couples de paramètres.

2) Comparaison des spectres - Choix du spectre SMHV dépendant des conditions de site

Les spectres obtenus à partir des 3 méthodes précédentes ont été reportés sur un même graphique (figure 5-6) :

- courbes (1) et (2) de la méthode FACCIOLI
- courbe (3) de la méthode SEED
- courbes (4) et (5) de la méthode spectrale avec conditions de site.

Figure 5.1.: Fonction de transfert T (f)



SPECTRE DE REPONSE

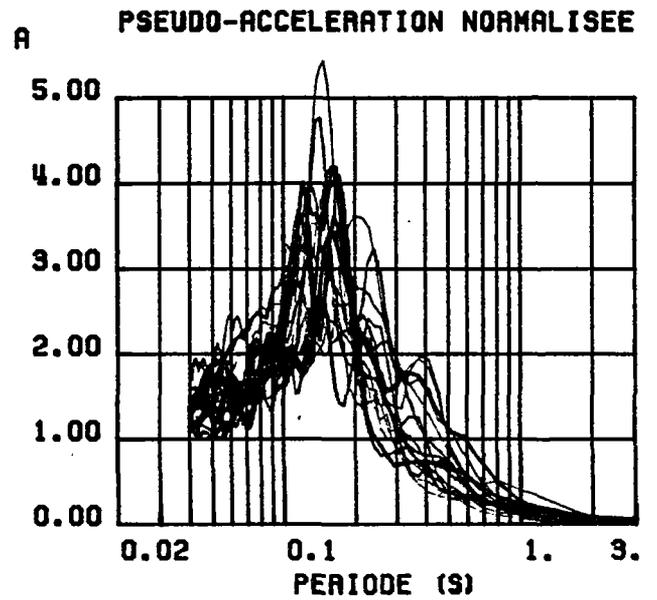
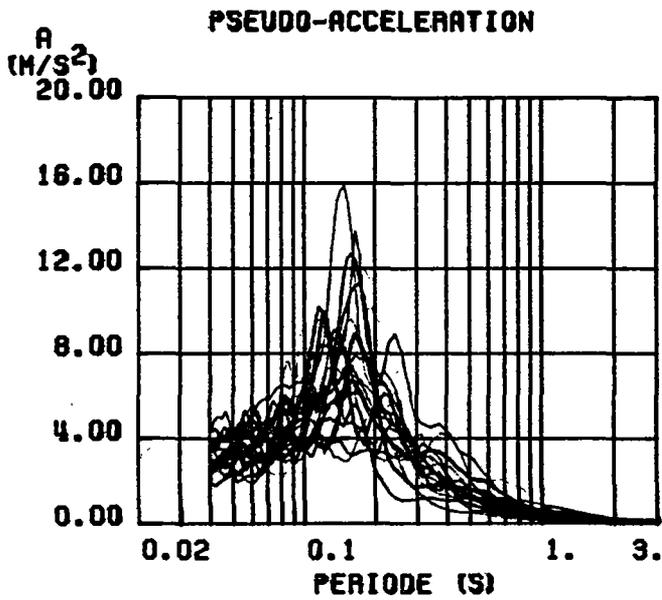
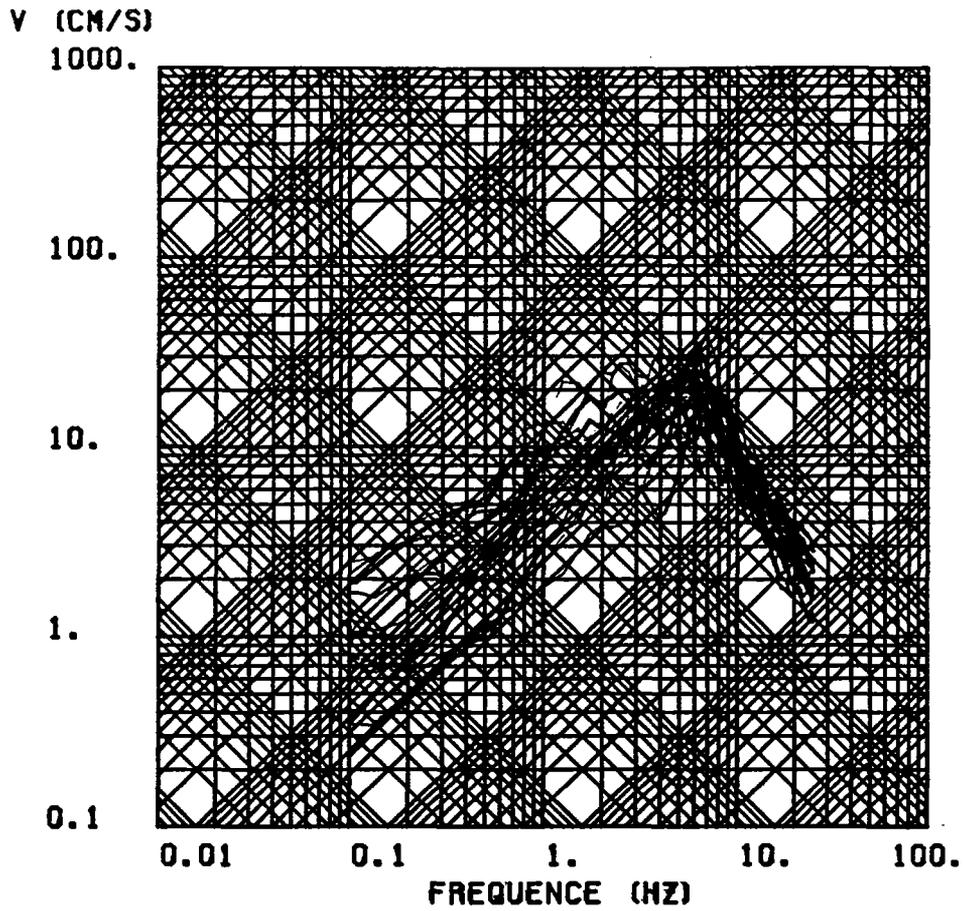


Figure 5.2

SPECTRES EN REPARTITION GAUSSIENNE : AMORTISSEMENT 5%

"ROCHER + FONCTION DE TRANSFERT"

M = 4.8 R = 10 km

SPECTRE DE REPONSE

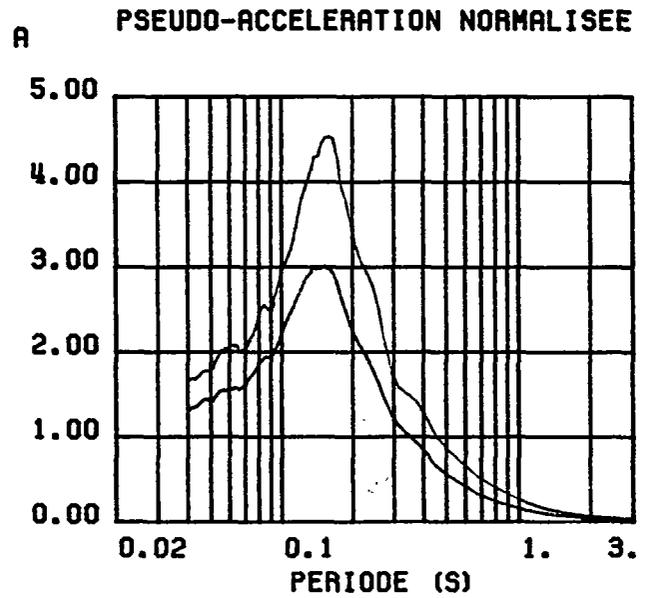
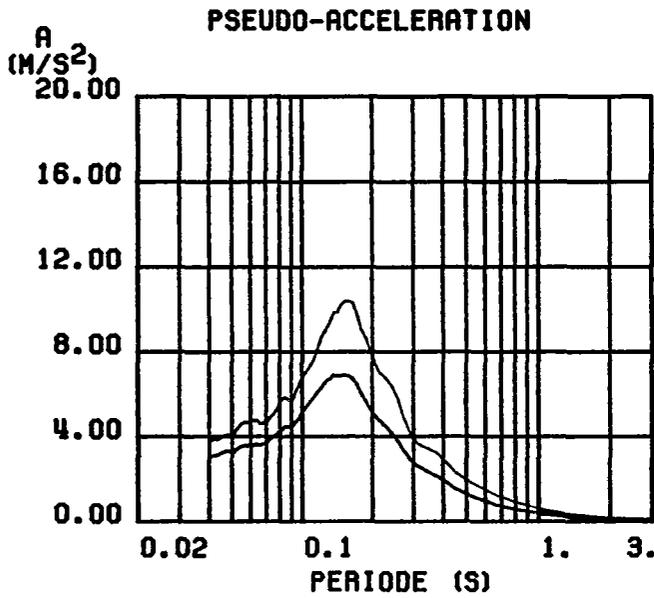
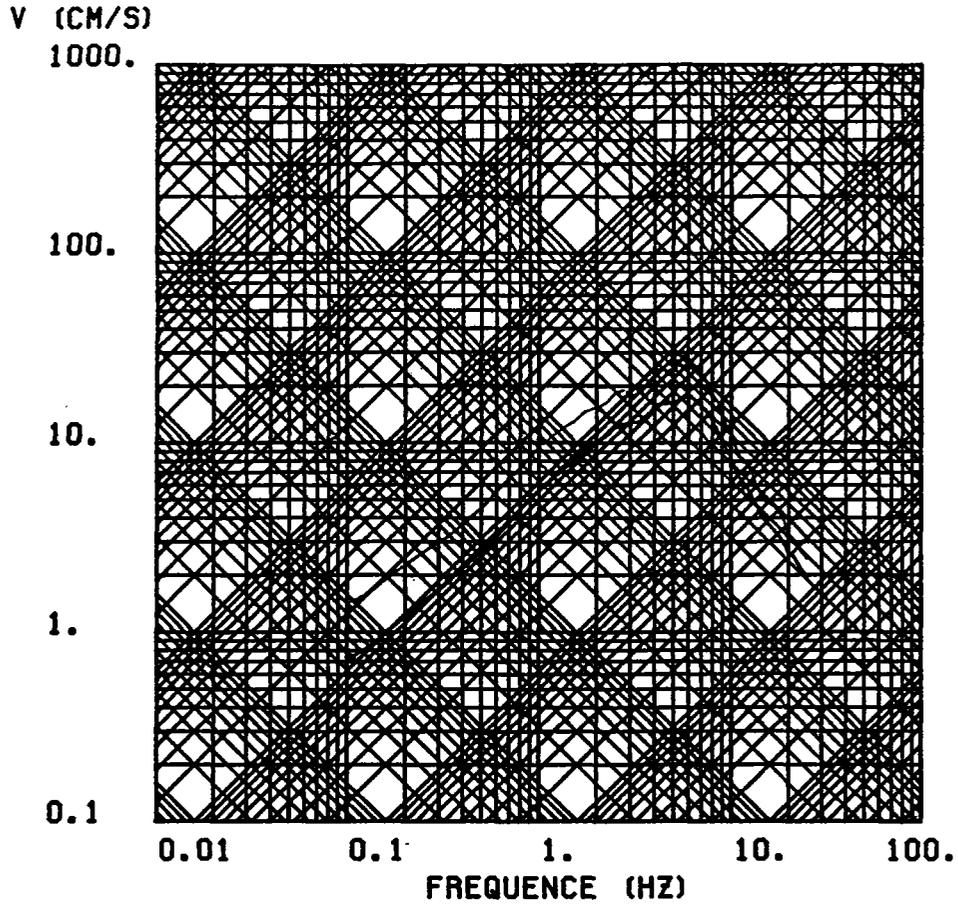


Figure 5.3

SPECTRES MOYENS ET MOYENS + ECART TYPE

(AMORTISSEMENT : 5%)

"ROCHER + FONCTION DE TRANSFERT"

M = 4.8 R = 10 km

SPECTRE DE REPONSE

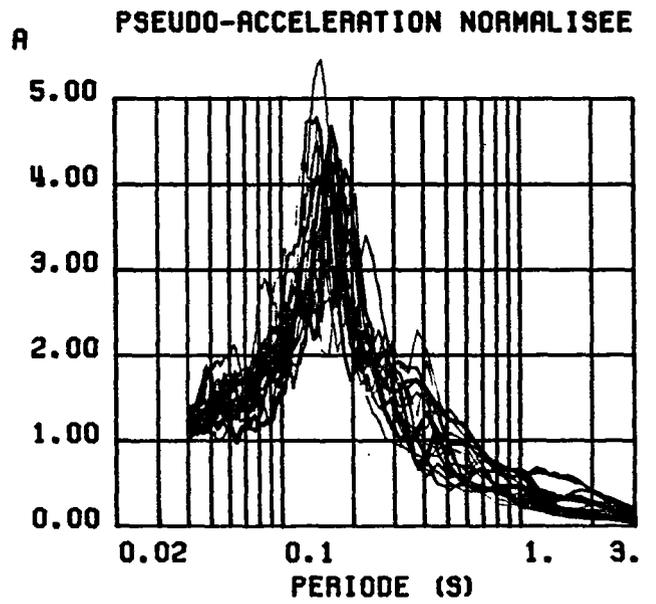
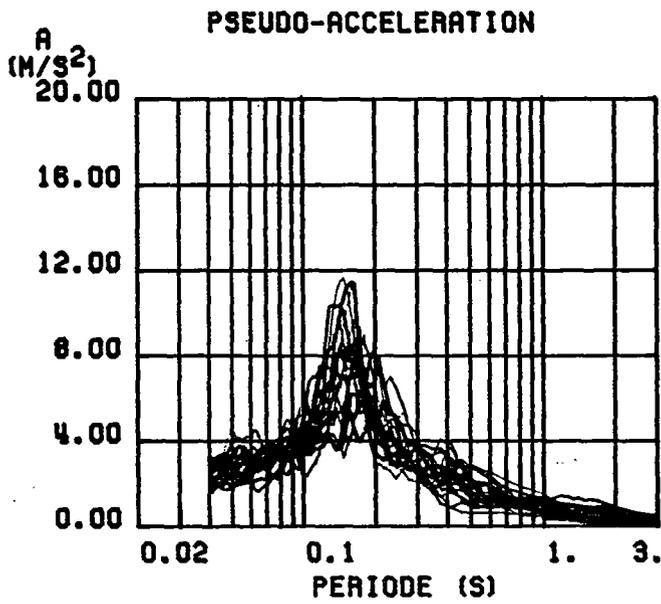
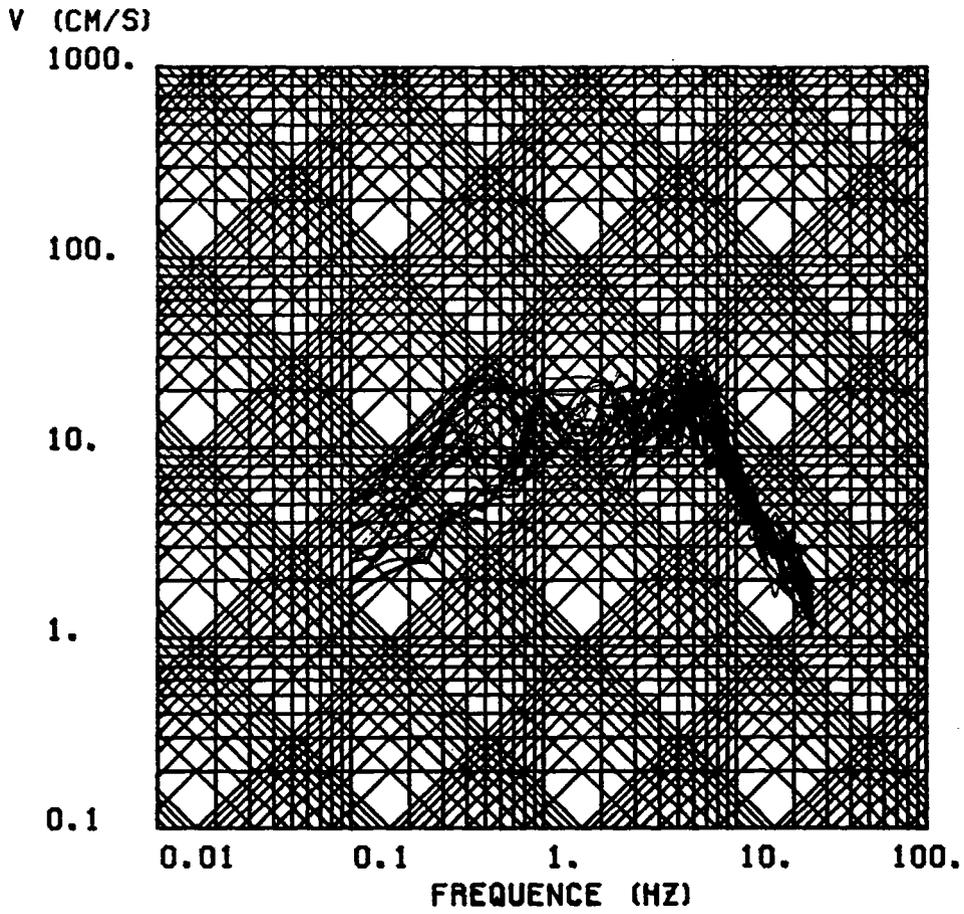


Figure 5.4

SPECTRES EN REPARTITION GAUSSIENNE : AMORTISSEMENT 5%

"ROCHER + FONCTION DE TRANSFERT"

M = 5.8 R = 30 km

SPECTRE DE REPONSE

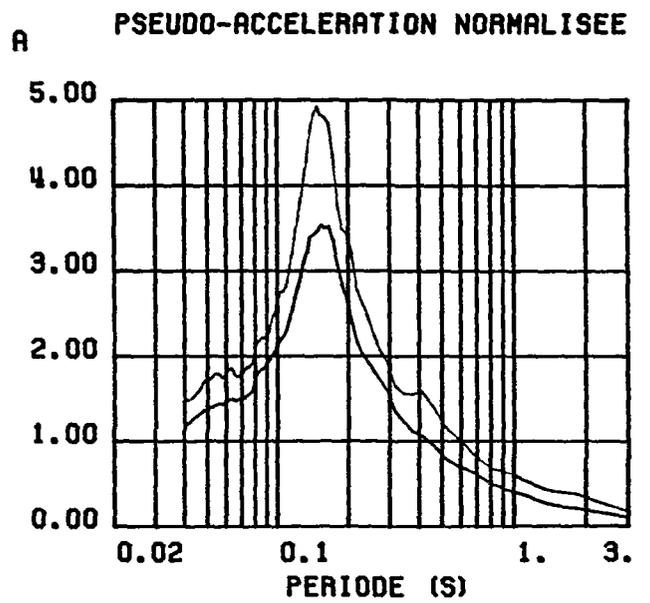
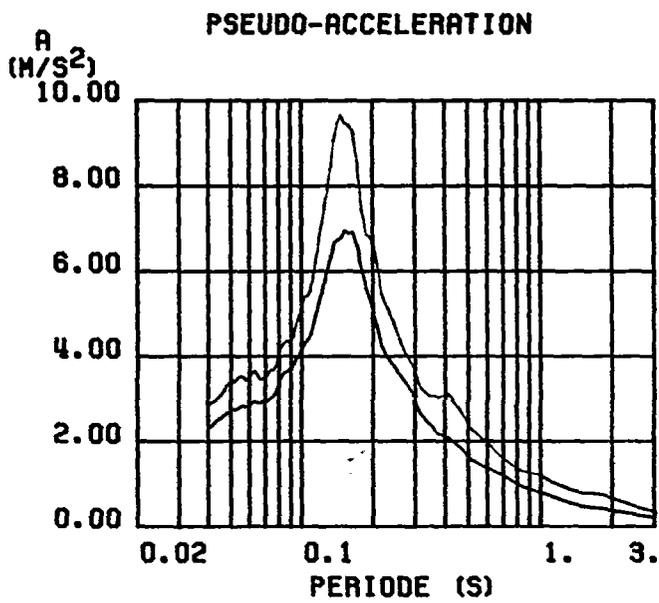
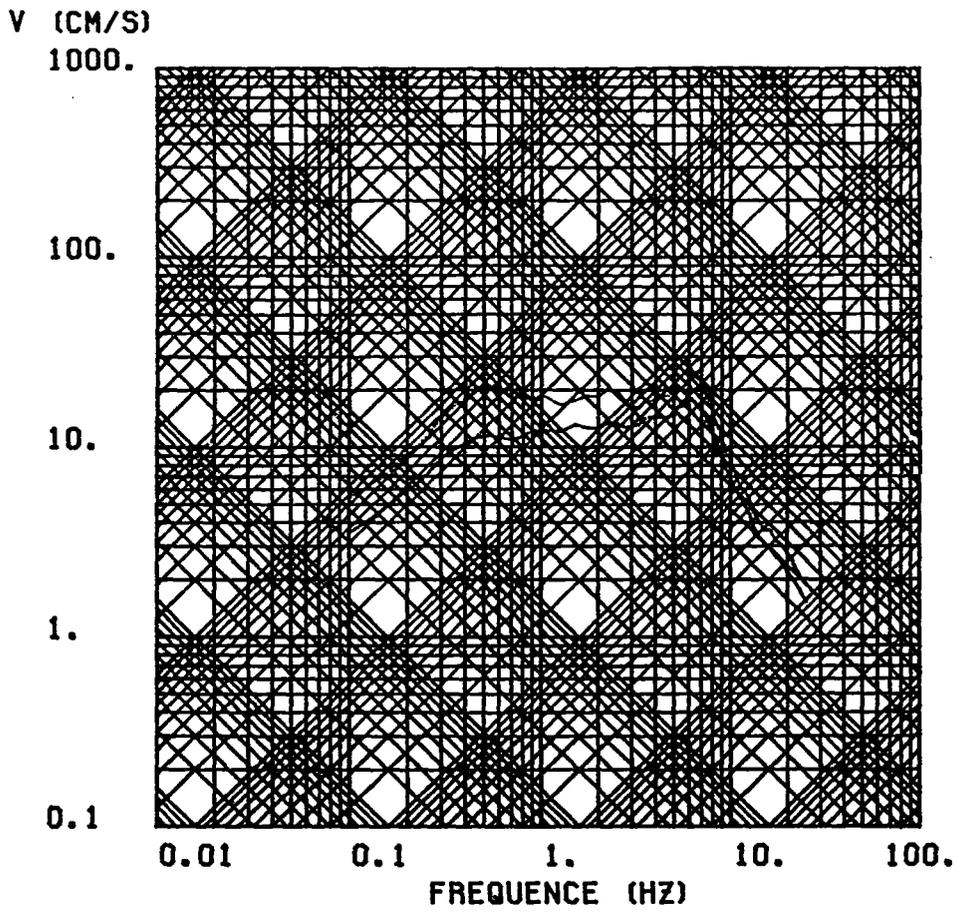


Figure 5.5

SPECTRES MOYENS + ECART-TYPE (AMORTISSEMENT 5 %)

"ROCHER + FONCTION DE TRANSFERT"

M = 5.8 R = 30 km

Figure 5.6

COMPARAISON DE SPECTRES TYPE SMHV

"COMPTE TENU DES CONDITIONS DE SITE"

- ① FACCIOLI - (M = 5.8 , R = 30 km)
- ② FACCIOLI - (M = 4.8 , R = 10 km)
- ③ SEED - 0.12g
- ④ METHODE SPECTRALE (M = 5.8 , R = 30 km)
+ FONCTION DE TRANSFERT DU SITE
- ⑤ METHODE SPECTRALE (M = 4.8 , R = 10 km)
+ FONCTION DE TRANSFERT DE SITE

----- SPECTRE PROPOSE

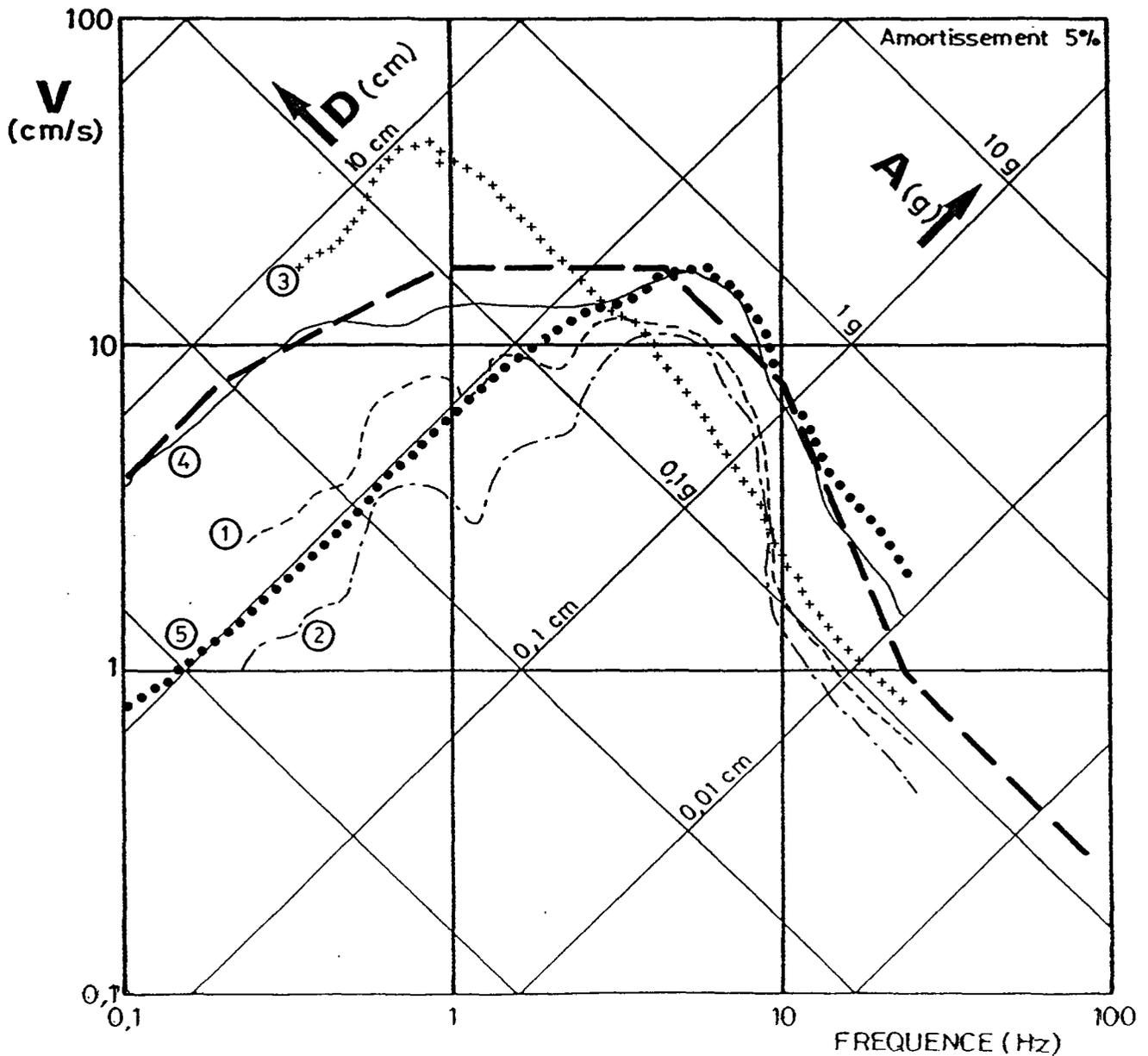


Figure 5.7

SITE DE HARNES

SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE HORIZONTAL
"COMPTE TENU DES CONDITIONS DE SITE"

DU SMHV

Les valeurs de V et A pour les différents amortissements 2,5,10 et 20% sont précisées sur le tableau 5.1

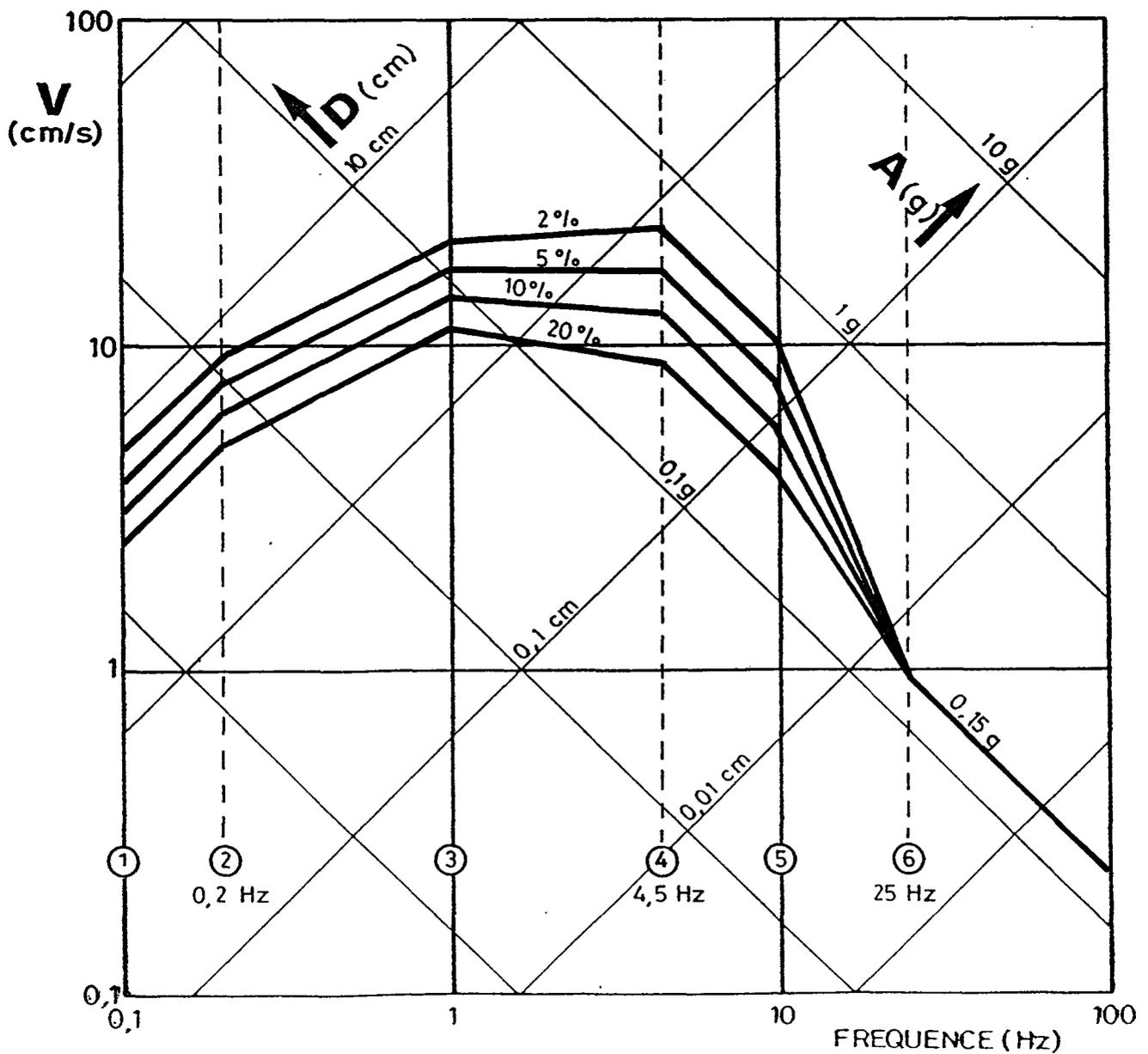


Figure 5.8

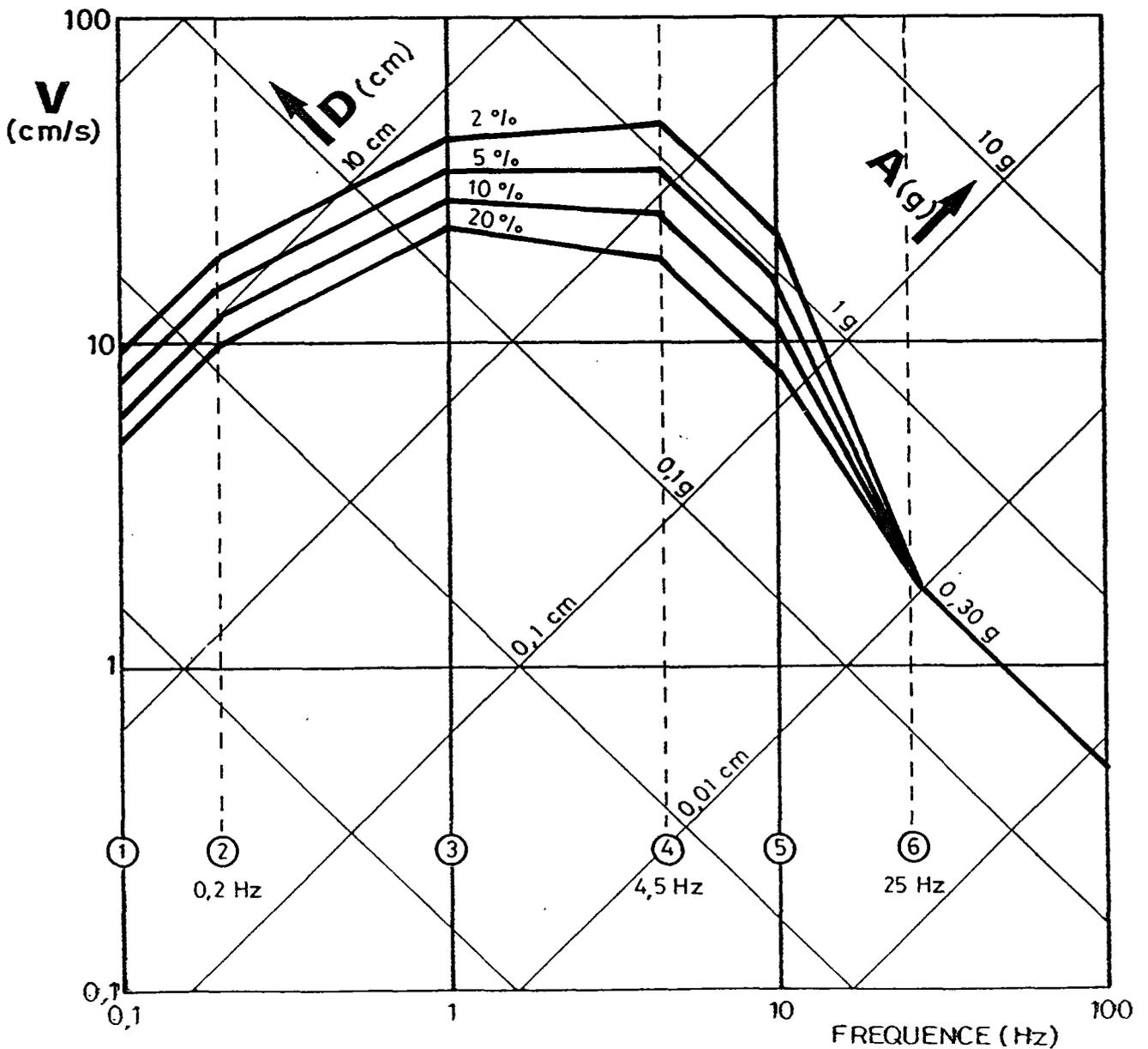
SITE DE HARNES

SPECTRE DE REPOSE ELASTIQUE HORIZONTAL

"COMPTE TENU DES CONDITIONS DE SITE"

DU SMS

Les valeurs de V et A pour les différents amortissements 2,5,10 et 20% sont précisées sur le tableau 5.2



Les spectres obtenus par la méthode de FACCIOLI et la méthode spectrale sont finalement assez voisins pour chacun des couples magnitude-distance; il faut seulement noter une amplification un peu plus importante dans les hautes fréquences (à partir de 4 à 5 Hz) pour la méthode spectrale. Par ailleurs le spectre obtenu par la méthode de SEED est assez décalé dans les basses fréquences, ce qui est vraisemblablement dû au fait que certaines épaisseurs de sol mou prises en compte sont plus importantes.

Nous proposerons le spectre SMHV tel qu'il est indiqué en pointillé sur la figure 5-6 pour un amortissement de 5%. L'ensemble des spectres obtenus pour les amortissements de 2, 5, 10 et 20%, à partir des considérations du paragraphe 4.2.2, sont présentés sur la figure 5-7.

Les valeurs de V et A sont par ailleurs précisées sur le tableau 5-1 en fonction de F et T pour chacun des spectres à 2, 5, 10 et 20% d'amortissement.

On intrapolera linéairement sur les diagrammes logarithmiques, pour les valeurs intermédiaires.

5.2.2 - Détermination des spectres S.M.S

On suivra la règle de sûreté n° I-2c, comme pour les spectres au "rocher horizontal affleurant" (paragraphe 4.2.3). Les spectres S.M.S. sont obtenus directement à partir du spectre S.M.H.V., en utilisant un coefficient multiplicateur de 2 pour toutes les fréquences.

D'où les spectres S.M.S. dépendant des conditions de site, présentés sous la forme quadrilogarithmique sur la figure 5-8.

Les valeurs des vitesses (V) et des accélérations (A) pour les amortissements 2, 5, 10 et 20% sont par ailleurs précisées sur le tableau 5-2.

On intrapolera linéairement sur les diagrammes logarithmiques, pour les valeurs intermédiaires.

6. CONCLUSIONS

Des spectres S.M.H.V. et S.M.S. ont été obtenus à partir des éléments propres à l'analyse sismotectonique régionale du site de HARNES et de différentes méthodes :

- Pour les spectres élastiques "au rocher horizontal affleurant", en combinant 3 approches complémentaires, dont celle des règles RFS I-2c, de type empirico-statistique et une méthode de type spectral. Ces spectres sont présentés sur les figures 4-15 (spectres S.M.H.V.) et 4-16 (spectres S.M.S.).

TABLEAU 5.1

SITE DE HARNES

SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE HORIZONTAL
 "AU ROCHER HORIZONTAL AFFLEURANT" DU S.M.H.V.

VALEURS DE A, V et D EN FONCTION DE F
 POUR DIFFERENTS AMORTISSEMENTS 2-5-10-20 %

PROFIL (Figure 5.7)	F (Hz)	AMORTISSEMENT (ksi %)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
(1)	0.10	2	0.00284	4.52	7.20
(1)	0.10	5	0.00237	3.77	6.00
(1)	0.10	10	0.00197	3.14	5.00
(1)	0.10	20	0.00164	2.62	4.17
(2)	0.20	2	0.01137	9.05	7.20
(2)	0.20	5	0.00948	7.54	6.00
(2)	0.20	10	0.00790	6.28	5.00
(2)	0.20	20	0.00658	5.24	4.17
(3)	1.00	2	0.12818	20.40	3.25
(3)	1.00	5	0.10681	17.00	2.71
(3)	1.00	10	0.08901	14.17	2.25
(3)	1.00	20	0.07418	11.81	1.88
(4)	4.50	2	0.65851	23.29	0.82
(4)	4.50	5	0.48066	17.00	0.60
(4)	4.50	10	0.35085	12.41	0.44
(4)	4.50	20	0.25609	9.06	0.32
(5)	10.00	2	0.65851	10.48	0.17
(5)	10.00	5	0.48066	7.65	0.12
(5)	10.00	10	0.35085	5.58	0.09
(5)	10.00	20	0.25609	4.08	0.06
(6)	25.00	V ksi	0.15000	0.95	0.01

TABLEAU 5.2

SITE DE HARNES

SPECTRE DE REPONSE ELASTIQUE HORIZONTAL
 "AU ROCHER HORIZONTAL AFFLEURANT" DU S.M.S.

VALEURS DE A, V et D EN FONCTION DE F
 POUR DIFFERENTS AMORTISSEMENTS 2-5-10-20 %

PROFIL (Figure 5.8)	F (Hz)	AMORTISSEMENT (ksi %)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
(1)	0.10	2	0.00569	9.05	14.40
(1)	0.10	5	0.00474	7.54	12.00
(1)	0.10	10	0.00395	6.28	10.00
(1)	0.10	20	0.00329	5.24	8.33
(2)	0.20	2	0.02274	18.10	14.40
(2)	0.20	5	0.01895	15.08	12.00
(2)	0.20	10	0.01579	12.57	10.00
(2)	0.20	20	0.01316	10.47	8.33
(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)	4.50	2	1.31702	46.58	1.65
(4)	4.50	5	0.96133	34.00	1.20
(4)	4.50	10	0.70170	24.82	0.88
(4)	4.50	20	0.51219	18.11	0.64
(5)	10.00	2	1.31702	20.96	0.33
(5)	10.00	5	0.96133	15.30	0.24
(5)	10.00	10	0.70170	11.17	0.18
(5)	10.00	20	0.51219	8.15	0.13
(6)	25.00	V ksi	0.30000	1.91	0.01

- Pour les spectres élastiques tenant compte des conditions de site en sols mous à partir de 2 méthodes de type empirico-statistique et d'une méthode numérique prenant en compte une colonne de sol visco-élastique. Ces spectres sont présentés sur les figures 5-5 (spectres S.M.H.V.) et 5-6 (spectres S.M.S.).

Pour cette dernière méthode, un comportement linéaire visco-élastique du sol a été considéré, compte tenu du type d'essais géotechniques disponibles.

BIBLIOGRAPHIE

- AKI K., 1967 - "Scaling law of seismic spectrum", *J. Geophys. Res.* 72, 1217-1231
- AMBRASEYS N.N., 1974 - "The correlation of intensity with ground motions", in : *Advancements in engineering seismology in Europe, Trieste.*
- AMBRASEYS N.N., 1975 - "Characteristics of strong ground motions in the near-field of small magnitude earthquakes" - *Proc. of the 5th Conf. of the european committee on earthquake engineering, Istanbul, Turquie.*
- BERARDI R., BERENZI A., CAPOZZA F., mai 1981 - "Campania - Luciana earthquake on 23 november 1980 - Accelerometric recordings of the main quake and relating processing", *ENEA-ENEL Commission.*
- BERNARD P., 1987 - "Du caractère complexe et agressif des sources sismiques", *Thèse de doctorat d'état, Université Paris VII.*
- BERNARD P., MADARIAGA R., 1984 - "A new asymptotic method for the modeling of near field accelerograms", *BSSA*, 74, pp. 539-557.
- BERNARD P. et MOURoux P., 1988 - "Un modèle spectral de source pour le calcul d'accélérogrammes synthétiques et des spectres de réponse associés". *Réunion-Débat - A.F.P.S. - Les mouvements sismiques pour l'ingénieur (Mars 1988).*
- BOATWRIGHT J., 1980 - "A spectral theory for circular seismic sources ; simple estimates of sources dimensions, dynamic stress drop and radiated energy" *Bull. Seismol. Soc. Am.* 70, pp. 1-27.
- BOATWRIGHT J., 1982 - "A dynamic model for far-field acceleration", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 72, pp. 1049-1068.
- BOORE D.M., déc. 1983 - "Stochastic simulation of high frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 73, n°6, pp. 1865-1894.
- BOUCHON M., 1978 - "A dynamic source model for the San Fernando earthquake", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 68, pp. 1555-1576.
- BRUNE J.N., 1970 - "Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes", *J. Geophys. Res.* 75, pp. 4997-5009.
- CAMPBELL K.W., 1981 - "Near-source attenuation of peak horizontal acceleration", *BSSA*, vol.71, n°6, pp. 2039-2070.
- CHIARUTTINI C., SIRO L., 1981 - "The correlation of peak ground horizontal acceleration with magnitude, distance and seismic intensity for Friuli and Ancona, Italy, and the alpid belt", *BSSA*, vol. 71, n°6, pp.1993-2009.
- FACCIOLI E., 1978 - "Response spectra for soft soil sites", *Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE Specialy Conference, PASADENA.*

- FREUND B., 1979 - "The mechanics of dynamic shear crack propagation", *J. Geophys. Res.* 84, pp. 2199-2209.
- GODEFROY P., LEVRET A., 1985 - "Nature et définition de l'aléa sismique", in : *Le Génie Parasismique*", sous la direction de V. DAVIDOVICI, Presses de l'E.N.P.C., Paris.
- HANKS T.C., 1982 - " f_{max} ", *Bull. Seism. Soc. Am.* 72, pp.1867-1879.
- HANKS T.C., Mc GUIRE R.K., 1981 - "The character of high frequency strong ground motion", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 71, pp. 2071-2095.
- HARTZELL S., HELMBERGER D.V., 1982 - "Strong-motion modeling of the Imperial Valley earthquake of 1979", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 72, pp. 571-596.
- JOYNER W.B., BOORE D.M., 1980 - "A stochastic source model for synthetic strong motion seismograms", *Proc. of 7th World Conf. on Earthquakes Eng.*, pp.1-8.
- JOYNER W.B., BOORE D.M., 1981 - "Peak horizontal acceleration and velocity from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake", *BSSA*, vol. 71, n°6, pp. 2011-2038.
- KAWASHIMA K., AIZAWA K., TAKAHASHI K., 1986 - "Attenuation of peak ground acceleration, velocity and displacement based on multiple regression analysis of japanese strong motion records", *E.E.S.D.*, vol.14, 199-215.
- KOSTROV B.V., 1964 - "Self-similar problems of propagation of shear cracks", *J. Appl. Math. Mech.* 28, pp. 1077-1087.
- KOSTROV B.V., 1975 - "On the crack propagation with variable velocity", *Int. J. Fracture Mech.* 14, pp. 47-56.
- LYSMER J. et al, 1975 - "Flush" - A computer program for approximate 3D Analysis of soil structure interaction problems. *EERC 75-30*.
- MADARIAGA R., 1976 - "Dynamics of an expanding circular fault", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 65, pp. 163-182.
- MADARIAGA R., 1977 - "High-frequency radiation from crack (stress drop) models of earthquake faulting", *Geophys. J.R. astr. Soc.* 51, pp. 625-651.
- Mc GUIRE R.K., 1978 - "Seismic ground motion parameter relations", *J. Geotechn. Engr. div., proceedings of the American society of civil engineers*, 104, pp. 481-490.
- MEDVEDEV A.V., SPONHEUER W., 1969 - "Scale of seismic intensity", *Proc. of the 4th World Conf. Earthquake eng.*, Santiago, Chili.
- MOHAMMADIOUN B., MOHAMMADIOUN G., mars 1980 - "Analyse des données sur les mouvements forts actuellement disponibles au DSN/SESRS/BERSIN", *Rapport technique SESRS n°15*.
- MOHAMMADIOUN B., 1985 - "Calcul du mouvement du sol. Etat de l'art", *Génie parasismique*, sous la direction de V. DAVIDOVICI, Presses de l'E.N.P.C..

- MURPHY J.R., O'BRIEN L.J., 1977 - "The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters", *BSSA*, vol. 67, n° 3, p. 877-915.
- NEUMANN F., 1954 - "Earthquake intensity and related ground motion", *University press, Seattle, Washington*.
- NEWMARK N.M., BLUME J.A., KAPUR K.K., nov. 1973 - "Seismic design spectra for nuclear power plants", *Journal of the power division, ASCE*, 99, n°P02.
- NEWMARK N.M., HALL W.I., MOHRAZ B., 1976 - "Statistical studies of vertical and horizontal earthquake spectra", *Report for the Division of Safety U.S.N.R.C., Washington D.C., 20 555*.
- PAPAGEORGIOU A.S., AKI K., 1983 - "A specific barrier for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. II. Applications of the model", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 73, pp. 953-978.
- PETROVSKI D., 1986 - "Probabilistic approach for evaluation of seismic design parameters", *Specialists meeting on earthquake ground motion and anti-seismic evaluation of nuclear power plants, Moscou, U.R.S.S., Mars 1986*.
- SCHENK V., SCHENKOVA Z., 1981 - "Relation between intensity and ground motion parameters ; review and generalization", *Gerlands Beitr. geophysik*, vol.90 n°3, p. 247-254.
- SEED H.B., UGAS C., LYSMER J., 1976 - "Site dependant spectra for earthquake resistant design", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. n°66, n°1, pp. 221-244.
- SCHNABEL P., SEED H.B., LYSMER J. - "SHAKE" - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. *EERC Report 72-12, University of California, Berkeley, Cal.*
- TRIFUNAC M.D., BRADY A.G., 1975 - "On the correlation of seismic intensity scales with peaks of recorded strong ground motions", *BSSA*, vol. 65, p.139.