

**12^e session d'étude
sur les techniques de sautage**

**Correspondance entre les vibrations engendrées par
les séismes et par les tirs à l'explosif**

**Jean-Yves Chagnon, ing., professeur;
Université Laval.**

CORRESPONDANCE ENTRE LES VIBRATIONS ENGENDREES
PAR LES SEISMES ET PAR LES TIRS A L'EXPLOSIFS

Le but de cet article est de souligner les correspondances entre les vibrations dues aux séismes et celles qui sont provoquées lors de tirs à l'explosif. Plusieurs pensent qu'il s'agit de vibrations identiques, que la perception que l'on en a est la même et que leurs "forces" respectives se mesurent de la même manière. Il y a plusieurs similitudes entre les ondes engendrées par des mécanismes divers, mais il y a aussi plusieurs différences, soit dans le contenu du train d'ondes, son mode de propagation, sa teneur en fréquence et dans les paramètres des ondes au site de la perception. Les comparaisons doivent se faire aux niveaux de la source, de la quantité d'énergie, des types d'ondes engendrées, de la propagation, des paramètres ondulatoires (fréquence, accélération, vitesse des ondes, vitesse des particules, amplitudes, etc..) tout en tenant compte de la sensibilité des capteurs (humains) ou de la susceptibilité aux dommages des édifices.

LA SOURCE

La source d'un séisme est située dans l'écorce terrestre ou dans la partie supérieure du manteau, soit à des profondeurs variant de 3 à 700 km. On considère que les séismes dont le foyer est à une profondeur inférieure à 70 km sont peu profonds, que ceux dont le foyer est entre 70 et 300 km sont de profondeur intermédiaire et que ceux dont le foyer excède 300 km sont très profonds. Au Québec les séismes sont souvent près de la surface, soit de 5 à 20 km. Le séisme du Saguenay, le 25 novembre 1988, avait un foyer à une profondeur de l'ordre de 28 km, ce qui serait inhabituel d'après les séismologues. La source des ondes est donc presque toujours assez éloignée des sites où elle est perçue, le site le plus rapproché étant l'épicentre situé verticalement au-dessus du foyer. Le séisme peu profond résulte généralement d'un déplacement le long d'une faille suite à une accumulation d'énergie en excès de la résistance de la roche ou de sa friction au niveau de la faille. L'origine de l'énergie est le plus souvent liée aux mouvements des plaques tectoniques. La source du séisme est donc une rupture selon un plan et elle n'est pas ponctuelle même si elle est ainsi considérée pour fins de calcul. La source ne montre donc pas de symétrie.

Dans le cas d'un dynamitage, la source du relâchement de l'énergie est une réaction chimique rapide généralement localisée près de la surface. Les tirs dans les mines les plus profondes sont à la limite inférieure de la profondeur à laquelle se produisent les séismes. Dans le cas des tirs superficiels (carrières) une bonne partie de l'énergie se dissipe rapidement en surface et se manifeste sous forme d'ondes acoustiques, surtout si les roches y sont passablement fracturées, et seule une faible proportion sert à engendrer des ondes élastiques. Plus le choc est profond plus grande est la quantité d'énergie disponible pour la génération d'ondes mécaniques. Lors d'un tir à l'explosif la source est ponctuelle et elle montre une symétrie sphérique qui se traduira par une propagation plus uniforme des ondes dans toutes les directions.

QUANTITE D'ENERGIE

Les séismes violents dégagent de grandes quantités d'énergie et on utilise souvent la bombe atomique comme point de comparaison. La quantité d'énergie est donnée par la "Magnitude" du séisme qui s'exprime selon l'échelle de Richter. Ainsi un séisme de magnitude 5.5 dégagerait 10^{20} ergs alors que l'explosion atomique à Bikini en 1946 dégagerait 10^{19} ergs. Le séisme de magnitude 8.5 en Alaska en 1964 était équivalent à 4,438 bombes atomiques et celui de Sanriku au Japon en 1933 (M=8.9) aurait été équivalent à 17,625 bombes atomiques (1). Selon Bolt (2) un séisme de magnitude -2 dégage la même quantité d'énergie qu'une brique qui tomberait au sol de la hauteur d'une table. Les dommages aux biens commencent à se manifester quand la magnitude d'un séisme est supérieure à 5.5, soit environ 10^{20} ergs en terme d'énergie.

Ces valeurs sont tellement considérables qu'elles sont difficiles à apprécier. Bath (3) utilise une unité de mesure qui est plus familière, soit la consommation électrique de la ville d'Uppsala en Suède (population d'environ 100,000 en 1966). Selon lui, un séisme de M=1.6 équivaut à l'électricité consommée en une seconde, un séisme de M = 6.8 correspond à 290 millions de kilowatt-heures (la consommation d'Uppsala pour un an) et un séisme de M=8.75 pourrait alimenter la ville pendant 670 ans.

Diverses valeurs sont données quant à l'équivalence entre la magnitude d'un séisme et l'énergie dégagée par la dynamite. On estime que 1,000 tonnes de TNT donnent 4.2×10^{19} ergs et que 1 million de tonnes de TNT donnent 4.2×10^{22} ergs (4). Le tableau 1 tiré et traduit de Berlin (1) présente une correspondance en fonction de la magnitude.

Enfin la figure 1 tirée de Gere & Shah (5) montre diverses relations entre les séismes, les bombes atomiques et la consommation électrique.

Tableau 1 - Correspondance entre la magnitude d'un séisme et la quantité de dynamite		
Quantité de dynamite		
Magnitude	s. anglais	s. métrique
1.0	6 oz	171 g
1.5	2 lb	909 g
2.0	13 lb	6 kg
2.5	63 lb	29 kg
3.0	397 lb	180 kg
3.5	1,990 lb	905 kg
4.0	6 t	5 t
4.5	32 t	29 t
5.0	199 t	181 t
5.5	1,000 t	909 t
6.0	6,270 t	5,700 t
6.5	31,550 t	28,682 t
7.0	199,000 t	180,909 t
7.5	1,000,000 t	909,091 t
8.0	6,270,000 t	5,700,000 t
8.5	31,550,000 t	28,681,818 t
9.0	199,000,000 t	180,909,091 t

TYPES D'ONDES - PROPAGATION

Lors d'un séisme plusieurs types d'ondes sont engendrées: des ondes de profondeur ou de volume et des ondes de surface. Les ondes de profondeur sont les ondes de compression (P) aussi dites ondes longitudinales ou de condensation et les ondes de cisaillement (S). Les ondes de surface sont les ondes Love (L) et Rayleigh (R) et elles sont toutes deux engendrées par l'interaction des ondes de volume avec des discontinuités séparant des milieux de propriétés élastiques différents. Les ondes Love ont un mouvement de type cisaillement. Ces quatre types d'ondes sont réfractés et réfléchis lors de leur passage aux discontinuités qui séparent les enveloppes internes de la terre. Le résultat est un train d'onde d'une grande complexité mais dont les phases initiales peuvent se reconnaître facilement car chaque onde a une vitesse de propagation différente. L'onde de compression est la plus rapide et est enregistrée en premier, l'onde S suit et est souvent enregistrée en second. Il est cependant possible que des composantes réfractées ou réfléchies de P arrivent

avant l'onde S. Les ondes longues (L et R) sont enregistrées en dernier.

A proximité de l'épicentre il est difficile de distinguer ces ondes car elles sont très rapprochées. A distance les ondes P et S s'atténuent et les ondes L et R deviennent importantes et elles sont alors la cause d'une partie des effets d'un séisme. Un séisme éloigné sera alors fort différent d'un tir à l'explosif rapproché.

Lors d'un tir à l'explosif les ondes engendrées s'atténuent rapidement (quelques mètres) et ne sont pas perçues à distance. On a longtemps cru que les explosions chimiques n'engendraient que des ondes de compression car le mécanisme est principalement une source d'énergie compressive. On sait maintenant (6) que des ondes S sont aussi engendrées, probablement par la propagation de fissures irradiant de la source. Des ondes R et L sont aussi engendrées aux discontinuités. Kisslinger et al. (7) ont effectué de nombreux essais de tirs dans des sols et des roches. Ils ont conclu que:

- a: Dans un milieu dense, fragile et rigide le mouvement du sol est plus faible que dans un matériel non consolidé.
- b: La fréquence des ondes est plus élevée dans un milieu rigide.
- c: L'onde P s'atténue peu dans un milieu rigide et beaucoup dans un milieu mou.
- d: Le rapport de l'amplitude des ondes P à celle des ondes R est plus élevé dans un milieu rigide.
- e: Les ondes de cisaillement (S et L) sont de plus forte amplitude que P dans un milieu rigide.

Ces conclusions indiquent que les effets de site que l'on observe lors de séismes, à savoir amplification des ondes à cause de la géométrie du socle rocheux et de la nature des dépôts meubles, se retrouvent dans le cas de tirs à l'explosifs.

Allard (8) mentionne qu'à courte distance d'un point de tir (quelques mètres) les vibrations ont des niveaux élevés sur des fréquences de 200 à 500 Hz, mais après une propagation de plusieurs dizaines de mètres la vibration est filtrée et les fréquences sont atténuées surtout si le milieu est peu compact. Il y aurait une relation entre la vitesse de propagation de l'onde et sa plage de fréquence. Ainsi une onde dont la vitesse est inférieure à 2000 m/s aurait une fréquence équivalente de 20 Hz alors qu'une onde de vitesse supérieure à 3500 m/s aurait une fréquence équivalente de 80 Hz.

Selon Allard (8) l'énergie transmise par une vibration en surface est répartie à 67% dans l'onde de Rayleigh, 26% dans l'onde de cisaillement et 7% dans l'onde de compression.

PARAMETRES

Les paramètres des ondes émises par un séisme sont tellement complexes en terme de contenu fréquentiel et d'amplitude de l'accélération et/ou de la vitesse, que l'on doit utiliser des appareils conçus spécialement pour capter et amplifier la partie du signal la plus utile à l'atteinte des buts recherchés. En séismologie on cherche à déterminer la magnitude et la position de l'épicentre d'un séisme. Il faut donc enregistrer une bonne partie du train d'ondes (ondes P et S) avec une trace lisible qui permettra de mesurer l'amplitude maximale du déplacement. La durée des vibrations d'un séisme peut être de plusieurs dizaines de secondes. Dans le domaine du génie on cherche surtout à connaître les paramètres tels que accélération et vitesse de déplacement des particules dans une gamme de fréquences située entre 1 à 500 Hz avec une accélération maximale de 2 g. On doit donc utiliser des instruments qui permettent d'arriver à ces fins.

Dans le cas de séismes les destructions sont associées à des fréquences très basses (0.1 Hz à 10 Hz), des accélérations de quelques centaines de cm/s^2 , des vitesses de quelques dizaines de cm/s et des déplacements de quelques centimètres. Cependant les échelles d'intensité (i.e. Mercalli) n'ont pas recours à ces valeurs mais sont basées seulement sur l'observation des effets d'un séisme sur les hommes et les constructions. L'échelle de Magnitude Richter utilisée en séismologie est basée sur l'accélération maximale du sol, même si plusieurs admettent que ce paramètre à lui seul ne peut permettre de quantifier adéquatement un séisme. Dans le cas de tirs les fréquences sont rarement inférieures à 5 Hz étant souvent entre 10 et 100 Hz et les vitesses dépassent rarement quelques cm/s . Les accélérations sont à peu près les mêmes que celles des séismes mais le spectre de fréquence est si différent que ce paramètre est peu significatif (les déplacements sont très faibles). Les critères de dommage les plus utilisés sont exprimés en terme de vitesse particulière (9) et négligent les fréquences qui jouent pourtant un rôle important; les appareils utilisés doivent alors être capables de mesurer directement la vitesse ou permettre son calcul simplement.

Pour la surveillance des séismes certains appareils servent à mesurer les petites manifestations dont l'épicentre est à moins de 100 km, d'autres, tels les séismographes Wood-Anderson, servent à mesurer les séismes modérés à plusieurs centaines de kilomètres. Les appareils standards à courte et à longue période du réseau international enregistrent les séismes modérés peu importe leur origine. En général ces appareils enregistrent en continu. Des appareils spéciaux, tels les accélérographes, sont utilisés pour enregistrer les vibrations fortes près des épicentres.

Ces accélérographes sont aussi utilisés pour enregistrer les tirs à l'explosif. Le temps d'enregistrement est limité à la durée des vibrations fortes qui n'est que de quelques secondes.

La figure 2, tirée de Boore (10), illustre les courbes de réponse de différents types d'instruments.

Les relations entre ces paramètres sont illustrées à la figure 3 tirée de Baron (11). Ce nomogramme indique que pour une accélération donnée ~~l'accélération~~ ^{amplitude} et la vitesse seront plus élevées pour une fréquence basse comparative-ment à une fréquence élevée. Ces relations sont vérifiées lors de séismes et sont valables aussi pour les tirs.

La perception des ondes par les humains est un facteur important mais très variable (12) dans l'évaluation des effets d'un séisme ou d'un tir. On exprime généralement ces effets en terme de fréquence et de vitesse de déplacement des particules lors du passage des ondes. Le corps humain est sensible aux fréquences de 1 à 10 Hz, surtout celles de 4 à 5 Hz (13), donc à celles qui sont plus caractéristiques des séismes que des tirs. A noter que la sensibilité à une fréquence spécifique varie selon que la personne est debout, assise ou penchée. Oriard (14) a présenté un guide simplifié, reproduit à la figure 4, permettant d'évaluer les effets des séismes et des tirs en fonction de la vitesse particulière. La figure 5, tirée de Whiffin & Leonard (15), illustre la sensibilité des personnes aux vibrations verticales selon Reiher et Meister. La plage de sensibilité sur ce graphique est de 2 à 80 Hz. La figure 6, tirée de Von Gierke & Goldman (13), est un modèle mécanique du corps humain debout sur une table vibrant verticalement. Ces considérations ne sont introduites ici que pour souligner la complexité du sujet.

Pour les effets des tirs sur les structures (surtout résidentielles) on utilise uniquement la vitesse particulière en présumant qu'elle ne dépend pas des fréquences et de la distance selon Bollinger (16). Ceci n'est pas exact et la fréquence est importante et on en tient compte dans l'étude de l'effet des séismes. Le graphique en figure 7, extrait de Bertrand (17), montre les relations entre les vibrations et leurs effets sur les personnes et les structures pour des fréquences variant de 0 à 130 Hz.

CONCLUSIONS

Le tableau 2 résume les principales différences entre les séismes et les tirs à l'explosif. On constate des similitudes et des différences. Au niveau de la perception par les humains et des dommages aux structures les séismes et les tirs se recoupent. Les durées sont fort différentes mais les vitesses particulières peuvent atteindre des niveaux comparables.

Tableau 2 - Caractéristiques des séismes et des tirs

	SEISMES	TIRS
Source	Profonde Asymétrique	Superficielle Symétrie sphérique
Energie	Enorme	Faible
Ondes	P,S,L,R, Longue durée Atténuation lente et inégale	P,S,L,R, Courte durée Atténuation rapide
Effets de site	Possibles	Possibles
Perception	A grande distance	Sur de faibles distances
Paramètres		
Fréquence	0.1 à + 1000 Hz	5 à + 500 Hz
Accélérat.	0.0001 - 2g	0.0001 - 2 g
Vitesse des particules	0.05 - 50 cm/s	0.05 - 30 cm/s

Un séisme d'une certaine magnitude engendrant un train d'onde à teneur de fréquences bien étalées pourrait être perçu de la même manière qu'un tir moins fort mais plus rapproché parce que les accélérations les plus fortes à un niveau de fréquence précis sont identiques et correspondent à un niveau où la sensibilité des humains et des structures est grande. En général les vibrations à basse fréquence, soit de l'ordre du Hertz sont celles qui ont les accélérations les plus grandes. Elles sont présentes en grande quantité lors de séismes et à peu près absentes dans les tirs à l'explosif. D'autres vibrations engendrées par un séisme pourraient être perçues à cause de la durée du phénomène alors qu'une grande partie des ondes (à fréquence élevée) ne serait pas ressentie ou n'aurait pas d'effets appréciables. Le tir à l'explosif à cause de la courte durée et de la forte atténuation des ondes engendrées offre une gamme étroite de vibrations dommageables et ce à une fréquence supérieure à celle des séismes.

Il y a une relation entre la magnitude d'un séisme et ses effets destructeurs, donc entre la magnitude et la vitesse particulaire. Toutefois cette relation est souvent faussée par le jeu des effets de site qui fait en sorte que des séismes de magnitude faible, soit de l'ordre de 5 peuvent engendrer localement des accélérations et des vitesses particulières élevées à cause d'une amplification attribuable à la nature du sol, son épaisseur et à la géométrie du roc sous-jacent. Ces effets agissent principalement sur les fréquences basses, donc sont plus susceptibles de se produire lors d'un séisme que lors d'un tir.

REFERENCES

- 1- Berlin, G.L., 1980, Earthquakes and the Urban Environment, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, Vol. I, 211 p.
- 2- Bolt, B.A., 1988, Earthquakes, W.H. Freeman and Co., 282 p.
- 3- Bâth, M., 1979, Introduction to Seismology, Birkhäuser Verlag, Basel, 428 p.
- 4- Glasstone, S., (ed.), 1962, The effects of Nuclear Weapons, U.S. Dept. of Defense, Govt. Printing Office, Washington, D.C.
- 5- Gere, J.M. & Shah, H.C., 1984, Terra Non Firma, Understanding and Preparing for Earthquakes, W.H. Freeman and Co., 203 p.
- 6- Stauder, W. and Kisslinger, C., 1962, Some P and S wave studies of the mechanism of earthquakes and small chemical explosions, Procs. Colloquium on Detection of Underground Nuclear Explosions, VESIAC Special Report 4410 36-X, pp. 125-159.
- 7- Kisslinger, C., Mateker, E.J. and McEvelly, T.V., 1963, Seismic waves generated by chemical explosions, AF Cambridge Res. Lab., Bedford, Mass, Report No. AFCRL-63-701, 171 p.
- 8- Allard, P., 1988, Etude des vibrations engendrées par les tirs de mines - Applications aux grands chantiers autoroutiers, CETE Méditerranée, GSC 09 - Mécanique des roches, 148 p.

- 9- Duvall, W.I., Atchison, T.C. and Fogelson, D.E., 1966, Empirical Approach to Problems in Blasting Research, in Failure and Breakage of Rock, Procs. Eight Symp. on Rock Mechanics, Am. Inst. Mining, Metallurgy a. Petr. Eng., 581 p.
- 10- Boore, D.M., 1978, Le mouvement du sol pendant les tremblements de terre, Pour la science, no. 4, pp. 40-51.
- 11- Baron, R., 1975, Recording Ground Vibration Levels, Atlas Copco ABEM, Stockholm, Article No. A4-75, 16p.
- 12- Miller, C.H. and Osterwald, F.W., 1980, Tremors from earthquakes and blasting in the Powder River Basin of Wyoming and Montana, Earthquake Information Bulletin, Vol. 12, No. 6, pp. 212-219.
- 13- Von Gierke, H.E. and Goldman, D.E., 1987, Effects of shock and vibration on man, in Shock and Vibration Handbook, 3rd edition, McGraw-Hill Book Co., Montreal, pp. 44-1 - 44-58.
- 14- Oriard, L.L., 1972, Blasting operations in the urban environment, Assoc. of Engineering Geologists, Vol. 9, No.1, pp. 27-46.
- 15- Whiffin, A.C. and Leonard, D.R., 1971, A survey of traffic-induced vibrations, Road Research Laboratory, Crowthorne, England, RRL Report LR 418, 55p.
- 16- Bollinger, G.A., 1971, Blast Vibration Analysis, Southern Illinois University Press, 132 p.
- 17- Bertrand, R., 1975, Les nuisances provoquées par les tirs de mines, Techniques et expérimentations, France, TEX, No. 2, pp. 22-28.

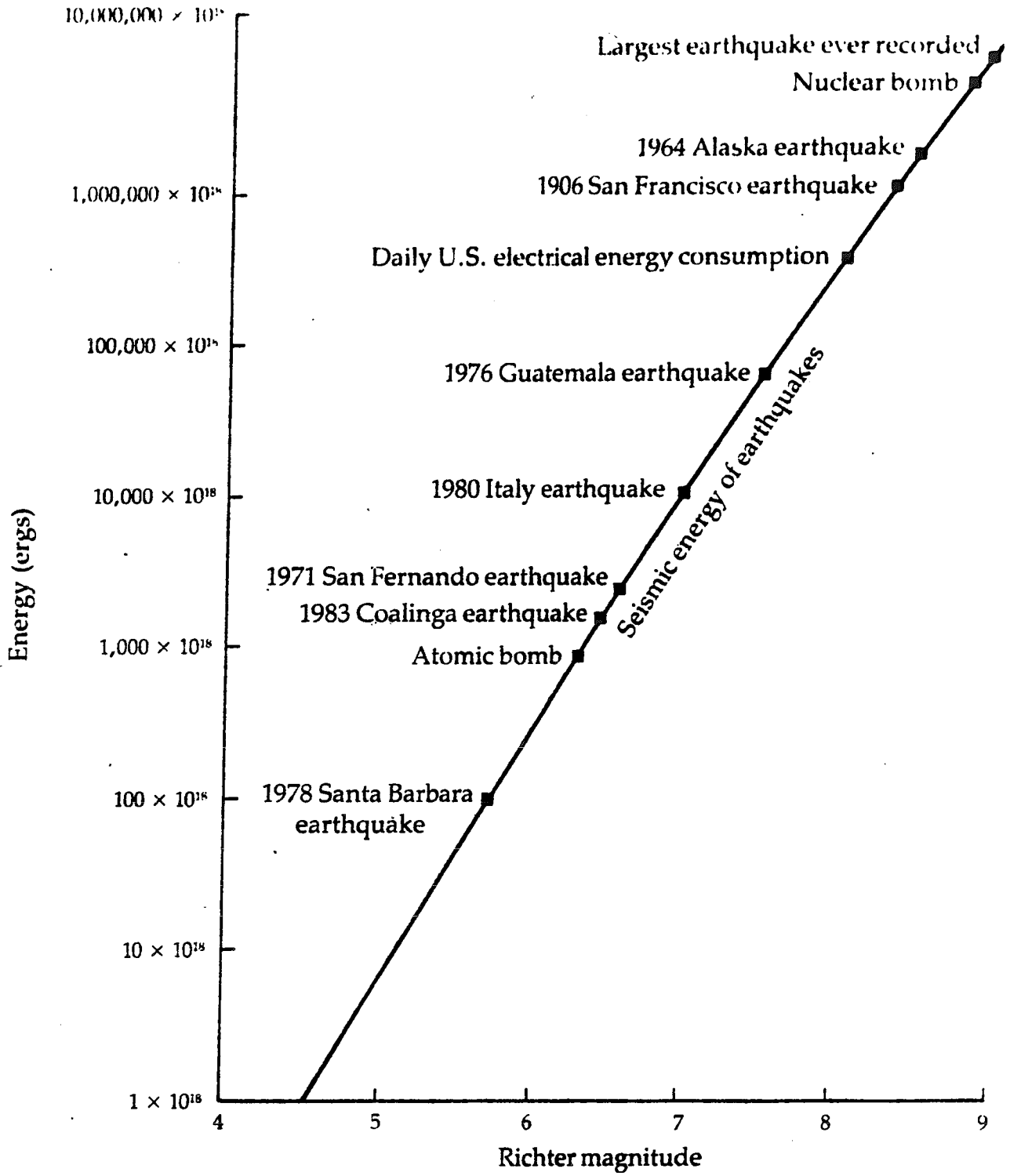


Figure 1 - Energie dégagée lors d'un séisme vs. Magnitude à l'échelle de Richter. L'échelle d'énergie est logarithmique.
de: Gere & Shah, 1984

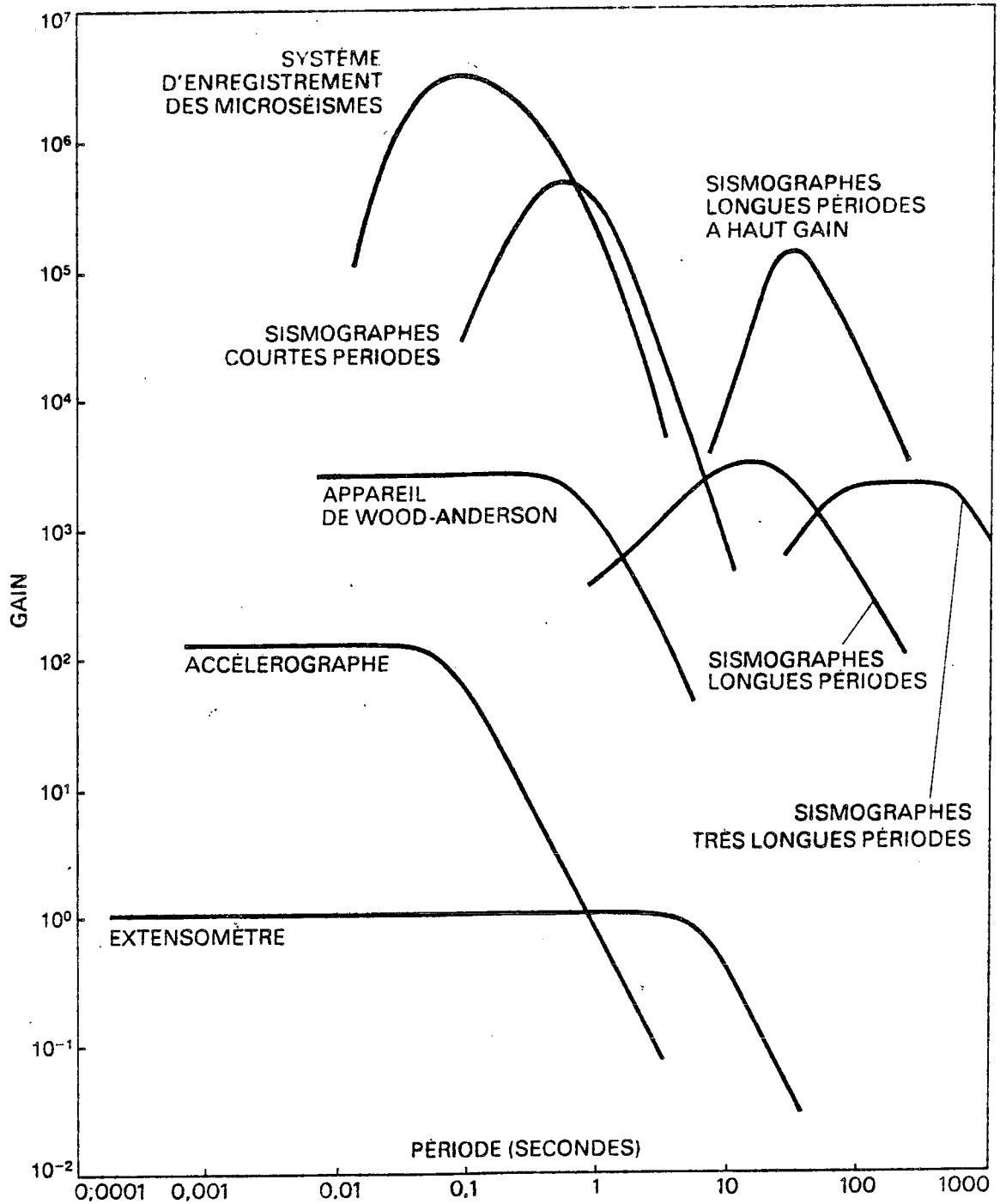


Figure 2 - Réponses des divers types de séismographes et accélérographes. Le gain est le facteur d'amplification.

de: Boore, 1978

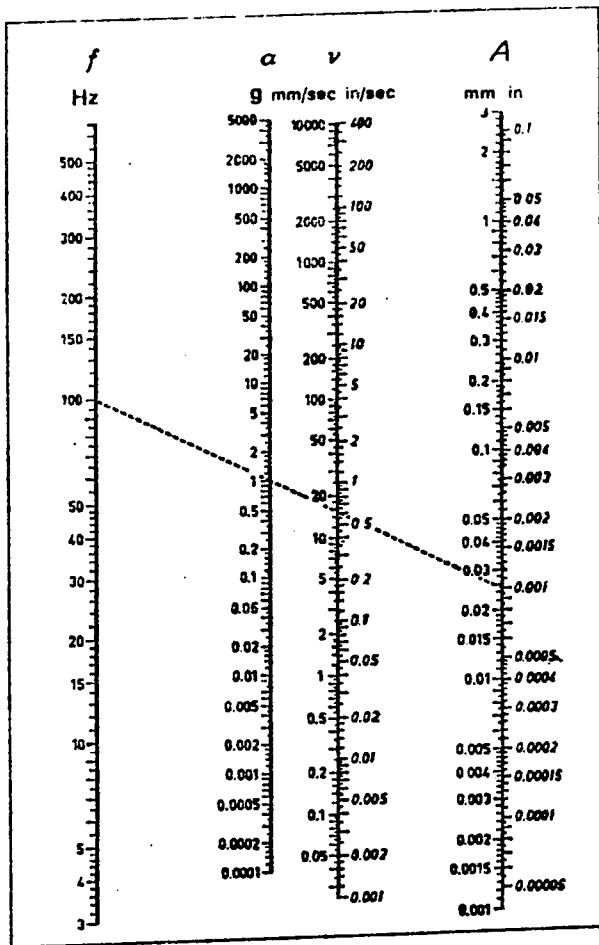


Figure 3 - Nomographes des relations entre la fréquence (f), l'accélération (a), la vitesse particulaire (v) et l'amplitude (A).
de: Baron, 1975

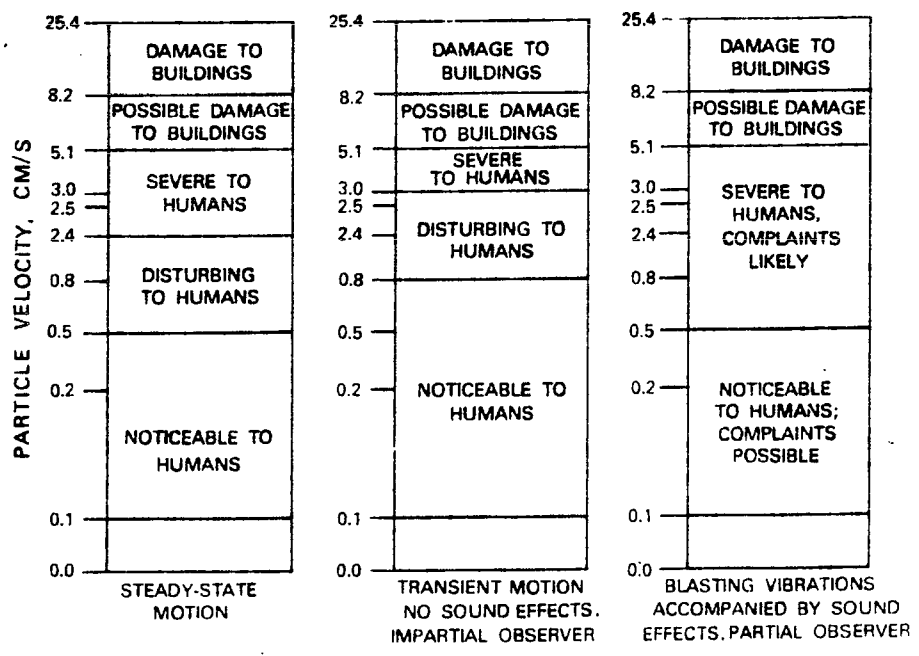


Figure 4 - Guide simplifié de la susceptibilité des personnes et des structures aux vibrations provoquées par les tirs à l'explosif.
de: Oriard, 1972

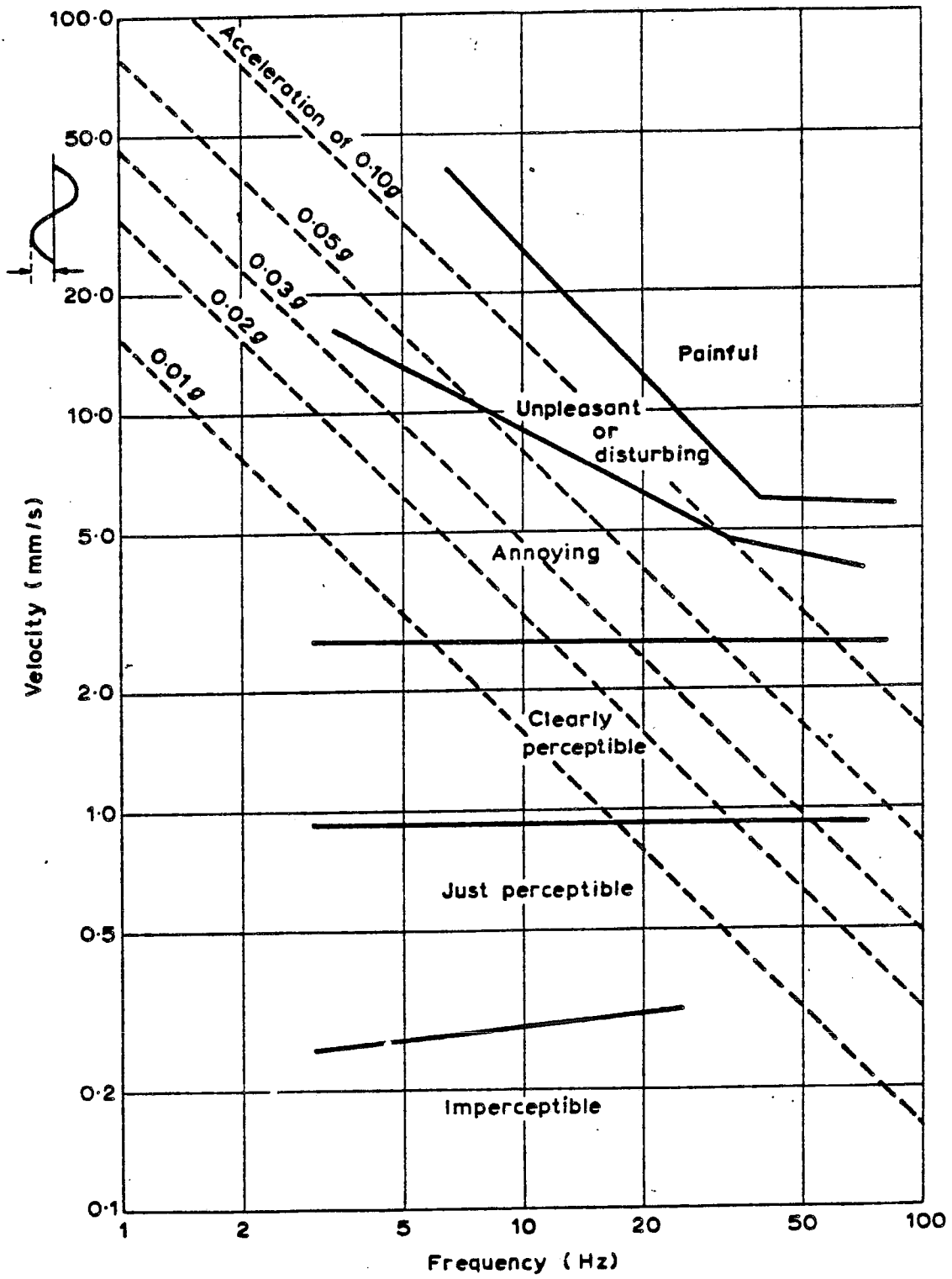


Figure 5 - Sensibilité des personnes aux vibrations verticales, selon Reiher et Meister.
de: Whiffin & Leonard, 1971

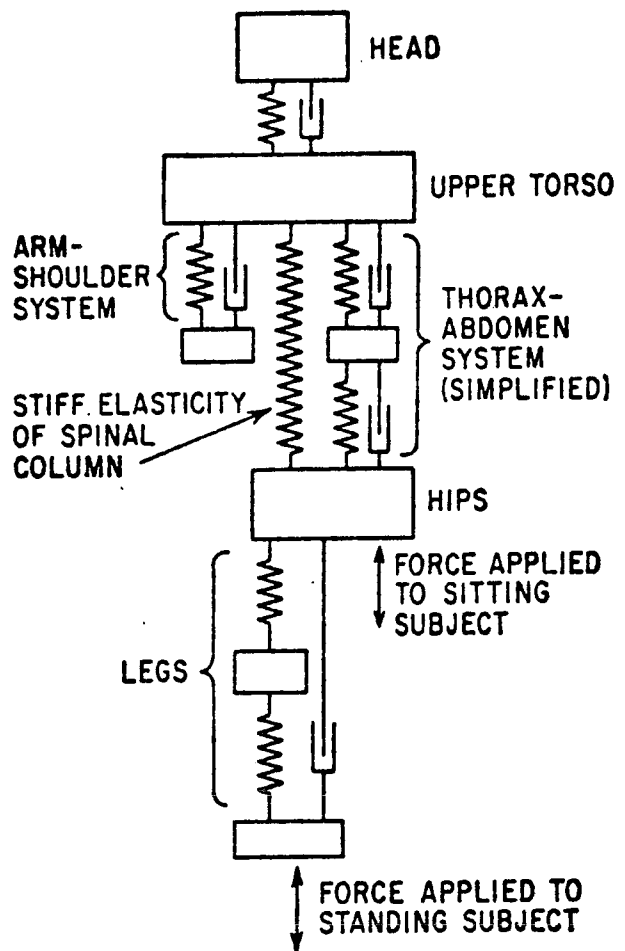


Figure 6 - Modèle mécanique du corps humain debout sur une table vibrant verticalement.
de: Von Gierke & Goldman, 1987

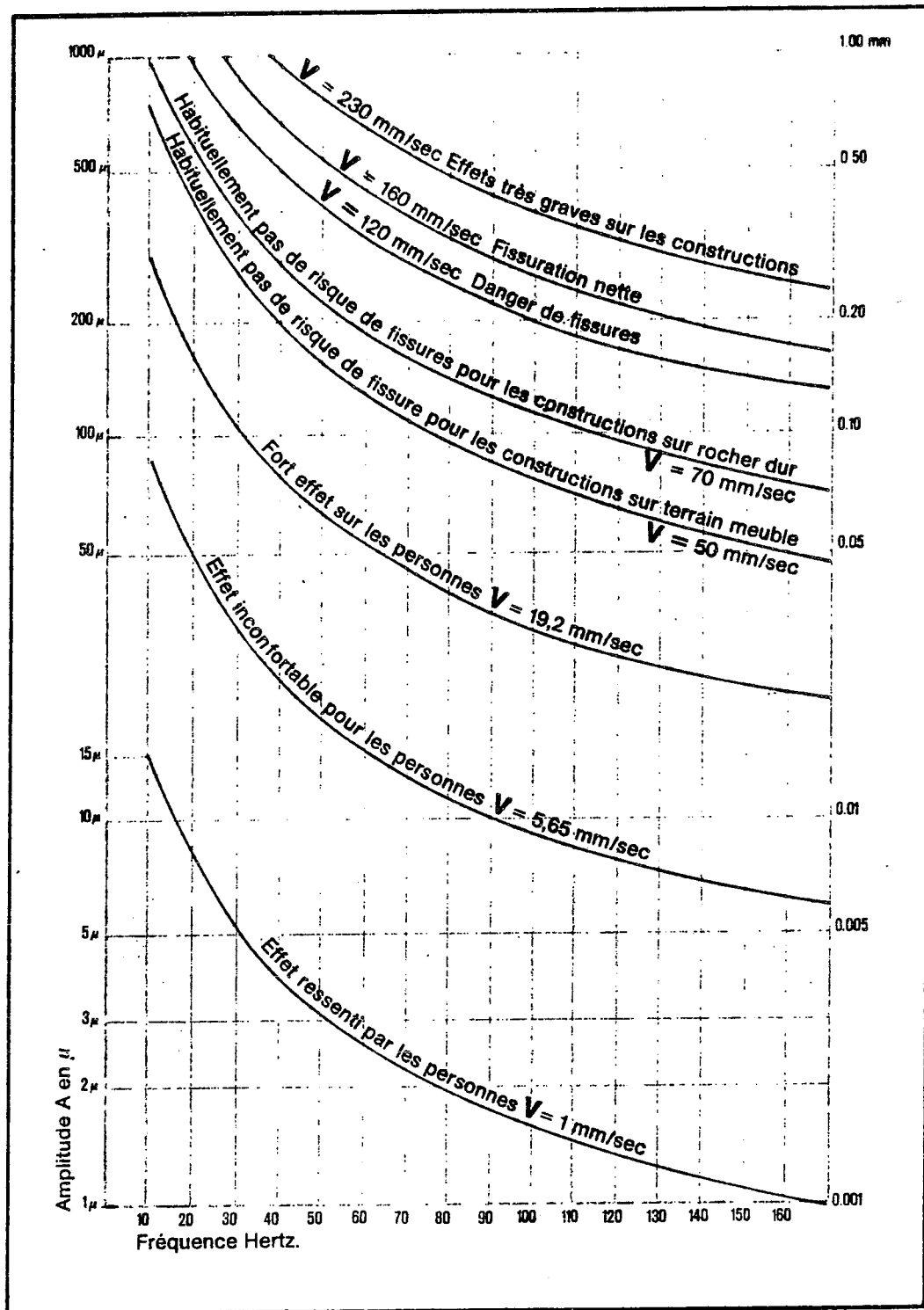


Figure 7 - Effet des vibrations sur les constructions et les personnes.

de: Bertrand, 1975