Zeitschrift: IABSE reports of the working commissions = Rapports des commissions de travail AIPC = IVBH Berichte der Arbeitskommissionen

Band: 3 (1969)

Artikel: Séismes

Autor: Despeyroux, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-5008

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 20.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Les sollicitations; données statistiques; probabilité des sollicitations défavorables

Äussere Belastungen; statistische Werte, Wahrscheinlichkeit für das Auftreten ungünstiger Belastungskombinationen

Loads and Other Acting Forces; Statistical Data; Probability of Unfavourable Combinations of Forces

PARTIE – TEIL – PART

Séismes
Erdbeben
Earthquakes

J. DESPEYROUX
Ingénieur Civil des Ponts et Chaussées
Délégué Technique du Bureau Sécuritas

INTRODUCTION

Les tremblements de terre sont connus pour occasionner des dégâts importants et même des destructions graves avec pertes de vies humaines dans les régions du globe où ils se manifestent. Encore qu'ils apparaissent le plus souvent comme des phénomènes exceptionnels, il convient de tenir compte de leurs effets éventuels dans la préparation des projets des constructions en cause et d'introduire les sollicitations correspondantes dans les calculs.

La probabilité d'apparition de sollicitations défavorables liées à une secousse tellurique revêt plusieurs aspects :

- distribution des séismes dans l'espace et dans le temps (aspects résumés dans la notion de séismicité d'une région),

- réponse de la structure à une excitation d'origine sismique considérée comme une excitation aléatoire non-stationnaire,

- combinaison des sollicitations d'origine sismique avec des sollicitations d'autre nature (problème de rencontre, au sens probabiliste du mot).

1. DISTRIBUTION DES SEISMES DANS L'ESPACE ET DANS LE TEMPS

1.1 Distribution des séismes dans l'espace

1.11 Les ceintures sismiques

Les séismes n'affectent pas indifféremment n'importe quelle région de la surface terrestre. Ils se manifestent préférentiellement à l'intérieur d'étroites et longues ceintures contournant d'immenses régions pratiquement stables.

Ces ceintures sismiques correspondent à des lignes de dislocation de l'écorce terrestre. Deux d'entre elles revêtent une importance particulière puisqu'il s'y libère environ 95 % de l'énergie mise en jeu par les séismes à la surface de la planète : ce sont la ceinture circum-Pacifique avec ses différents rameaux contournant des zones effondrées et la ceinture eurasiatique (ou ceinture alpine) qui s'étend des Açores aux iles de la Sonde. Leur tracé est suffisamment connu pour qu'il soit utile de le rappeler dans cet exposé. Il convient de citer une troisième ceinture sismique, d'importance bien moindre, qui suit les dorsales sous-marines de l'Atlantique et de l'Océan Indien et se retourne vers la ligne de cassure des grands lacs africains.

1.12 Relations entre séismes et tectonique

On s'accorde à considérer que les tremblements de terre tirent leur origine des lentes déformations qui, pour des raisons diverses, affectent l'écorce terrestre. Au cours de ces mouvements, l'énergie de déformation s'accumule dans les matériaux constitutifs de l'écorce jusqu'à ce qu'en un point, plus faible ou plus fortement sollicité que les autres, généralement le long d'une faille géologique, se produise la rupture. C'est à la brutale libération d'énergie qui accompagne cette rupture qu'est dû l'ébranlement sismique.

On conçoit dès lors, et ce point est abondamment confirmé par l'expérience, qu'il existe une relation étroite entre la séismicité d'une région et sa tectonique. L'étude de ces relations constitue une branche commune de la séismologie et de la géologie appliquées. Elle est basée d'une part sur l'étude statistique des secousses ressenties par le passé dans une région donnée et de leurs effets et d'autre part sur l'étude approfondie des accidents géologiques avoisinants. Elle se concrétise sous la forme de cartes séismotectoniques qui sont à la base de toute classification des diverses régions d'un même territoire en zones de différentes séismicités pour l'application des règles de construction parasismique.

Il convient de noter qu'étant donné que les séismes sont la manifestation perceptible de phénomènes qui se poursuivent à l'échelle des temps géologiques, la période sur laquelle nous pouvons avoir des renseignements - la période historique s'il s'agit de retrouver la trace des grands séismes ; moins d'un siècle à peine, si l'on parle d'études de caractère scientifique - est trop brève pour que l'on puisse la considérer comme un échantillon parfaitement représentatif. Si donc l'on doit envisager comme une certitude que de nouveaux séismes se produiront dans une région où il en a déjà été enregistré, on ne peut par contre tenir pour assuré qu'il n'en surviendra pas dans une région où nulle activité sismique n'a été décelée jusque là. Les exemples ne sont pas rares de zones réputées géologiquement stables qui sont brusquement devenues le siège de séismes destructeurs.

L'étude de la tectonique d'une région revêt de ce point de vue autant d'importance que celle des séismes passés. On peut citer des cas où des régions dans lesquelles aucune activité sismique n'avait été enregistrée, ont été classées en zone sismique du point de vue réglementaire simplement en raison de la très forte présomption de séismicité résultant des traits de leur géologie et de leur tectonique.

1.13 Séismes d'autre nature que les séismes tectoniques

Nous ne les mentionnerons que pour mémoire car ils ne s'accompagnent généralement pas d'effets destructeurs. Nous nous bornerons à citer les séismes d'origine volcanique, qui atteignent très rarement des intensités

élevées, mais nous ferons une place à part aux séismes dus à la main de l'homme, tels que ceux que l'on peut songer à attribuer à la réalisation d'une grande retenue hydraulique, comme ce fut le cas pour le séisme de Koyna en INDE. Le Professeur ROTHE a présenté au 4ème Congrès Mondial du Génie Sismique à Santiago du Chili, un mémoire qui établit un parallèle saisissant entre les séismes ressentis au voisinage de grands barrages et les diverses phases de leur mise en eau. Il semble que l'on doive en effet considérer que l'apport de l'importante surcharge que constitue la retenue peut entrainer un réarrangement dans les profondeurs du sol sous-jacent, voire des subsidences, et provoquer la libération de quantités d'énergie comparables à celles mises en jeu dans les grands séismes tectoniques.

1.2 Grandeurs caractéristiques d'un séisme

1.21 Intensité et Magnitude

Les notions, subjectives, d'importance ou de violence d'un séisme sont précisées gr-ace aux concepts de magnitude et d'intensité. La magnitude caractérise la puissance du séisme dans son ensemble. L'intensité caractérise la violence avec laquelle il est ressenti en un point donné.

Nous rappellerons brièvement que l'intensité d'un séisme en un lieu donné s'évalue par comparaison des effets observés (effets sur les constructions notamment) aux effets décrits dans une échelle de référence normalisée. L'échelle à peu près universellement utilisée à l'heure actuelle est l'Echelle Macrosismique Internationale d'Intensité (connue dans la littérature anglo-saxone sous le nom de Mercalli's Modified Intensity Scale). Elle comporte 12 degrés. Ceux qui intéressent l'ingénieur sont les six derniers qui correspondent à des intensités destructrices. Une version de cette échelle plus précise et mieux adaptée aux besoins de l'ingénieur (notamment en ce qui concerne l'appréciation de la résistance des constructions) a été élaborée sous le nom d'échelle M.S.K. (Medvedev - Sponhauer - Karnik). Son usage à titre expérimental simultanément avec l'échelle EMI a té préconisé par un groupe de travail de l'UNESCO en 1965.

A la différence de l'intensité, dont l'évaluation reste quelque peu subjective, la magnitude résulte de données instrumentales. Nous nous dispenserons d'en donner la définition, au demeurant peu évocatrice en elle-même, et nous bornerons à en rappeler qu'il existe une relation entre la magnitude et la quantité totale d'énergie mise en jeu dans le séisme. On peut citer comme étant le plus couramment admises pour exprimer cette relation, les formules empiriques suivantes (Gutenberg)

$$\log E = 9{,}9 + 1{,}9\ M - 0{,}024\ M^2$$

ou encore

$$\log E = 9{,}1 + 1{,}75\ M + \log\ (9-M)$$

dans lesquelles M désigne la magnitude et E l'énergie exprimée en ergs.

Pour fixer les idées nous rappellerons (cette énumération est loin d'être exhaustive) les magnitudes de quelques séismes célèbres : Agadir 1960 : 5,75 - Skopje 1963 : 6,0 - Orléansville 1954 : 6,75 - Tokyo 1923 : 8,2 San Francisco 1906 : 8,25 - Colombie 1906 ; Chili 1906 ; Haut Assam 1950 : 8,6 - Alaska 1964 : 8,7 - Chili 1960 : 8,75. Il convient de remarquer que la quantité d'énergie libérée croit très rapidement avec la magnitude : elle est 50.000 fois plus grande pour le séisme du Chili de 1960 que pour celui qui détruisit Agadir la même année. Le séisme d'Agadir apparaît comme un petit séisme. Il n'a donné lieu à de fortes intensités qu'en raison de la faible profondeur de son foyer (voir paragraphe suivant). Il en est de même de celui de Skopje.

1.22 Relations diverses

On peut dire que, schématiquement, l'intensité avec laquelle un séisme est ressenti en un point donné dépend principalement :

- de la magnitude du séisme
- de la profondeur du foyer
- de la distance du point considéré à l'épicentre.

Dans ce schéma idéal, le contour des lignes d'égale intensité sont des cercles centrés sur l'épicentre. Toutefois, les conditions géologiques locales (accidents géologiques, diversité des formations géologiques traversées par l'ébranlement) peuvent modifier considérablement la forme et les dimensions des courbes isoséistes.

La formule de Shebalin

$$0{,}9 \log E - I_0 = 3{,}8 \log h - 3{,}3$$

dans laquelle E est l'énergie mise en jeu dans la secousse (exprimée cette fois en Mégajoules) et h la profondeur du foyer (en km) permet de relier, pour une profondeur de foyer donnée, l'intensité maximale dans la région épicentrale à la magnitude par l'intermédiaire de l'énergie E.

Il n' a pas été donné jusqu'ici de formule donnant l'intensité à une distance donnée de l'épicentre. La seule relation de cette nature est celle proposée par Gutenberg.

$$\frac{r}{h} = \sqrt{10^{\frac{I_0}{3} - \frac{1}{2}} - 1}$$

qui donne en fonction de l'intensité maximale I_0 à l'épicentre le rayon r de rayon moyen de la courbe isoséiste de degré 2, c'est-à-dire de la courbe enveloppant la région dans laquelle le séisme est ressenti avec une intensité supérieure ou égale à II. Il convient d'ailleurs de noter que cette formule est principalement utilisée pour retrouver la profondeur du foyer à partir des résultats de l'enquête macrosismique.

1.23 Fréquences et intensités prévisibles

Les relations empiriques rappelées ci-dessus montrent que la probabilité pour qu'un site donné soit soumis à une secousse d'intensité supérieure ou égale à une intensité donnée dépend des magnitudes et fréquences probables de ces magnitudes dans la région considérée. Ainsi qu'il l'a déjà été signalé dans ce rapport, les renseignements statistiques que nous possédons dans ce domaine n'apparaissent pas comme suffisamment complets pour être parfaitement significatifs puisque les observations n'ont porté que sur une période de temps très brève à l'échelle des temps géologiques. Toutefois, on a pu en déduire dès à présent des lois approchées, susceptibles d'amélioration au fur et à mesure que s'enrichira notre information.

Pour le globe dans son ensemble, et pour la plupart des régions sismiques considérées isolément la fréquence annuelle n des séismes de magnitudes supérieure ou égale à une magnitude donnée M peut être représentée par une loi de la forme

$$\log n = a - bM$$

Pour le globe dans son ensemble, Gutenberg propose :

$$\log n = 8,2 - M$$

et, à titre d'exemple, pour la Californie du Sud :

$$\log n = 4,77 - 0,85\ M$$

Housner adopte une forme différente et propose pour la Californie :

$$n = \frac{1}{46}\left[(8,7 - M)^2 - \frac{(8,7 - M)^3}{1,7} + \frac{(8,7 - M)^4}{1,06}\right]$$

Les séismes susceptibles d'apparaître dans une région donnée prenant généralement leur origine aux alentours d'une même profondeur (10 à 15 km dans le bassin Méditerranéen ; une trentaine de kilomètres en Californie, etc) les relations énoncées plus haut permettent de prévoir en une région donnée la fréquence des secousses d'une intensité donnée et l'étendue des régions affectées.

2. REPONSE DE LA STRUCTURE A L'EXCITATION SISMIQUE

2.1 Le mouvement du sol dans l'aire macroséiste

Le mouvement d'un point du sol au cours d'une secousse tellurique est caractérisé par une extrême irrégularité tant en ce qui concerne les déplacements (dans les trois directions de l'espace) que les vitesses et les accélérations. Il échappe à toute définition ou schématisation analytique et l'analyse harmonique elle-même ne permet pas de solution pratique du phénomène en raison du nombre singulièrement élevé des composantes qu'il y aurait lieu de retenir pour obtenir une représentation correcte.

Deux points distincts du sol sont animés de mouvements constamment différents et sont donc soumis à des déplacements relatifs qui peuvent ne pas être négligeables. Ces déplacements relatifs tiennent tout d'abord au temps de propagation de l'ébranlement sismique et ensuite au fait que les diverses composantes de l'onde sismique - notamment les ondes longitudinales et les ondes transversales - se propagent avec des vitesses différentes de sorte qu'elles ne se combinent pas de la même manière en deux points différents.

Les données que nous possédons sur les mouvements du sol en un point où le séisme a atteint une intensité destructrice nous sont fournies sous la forme de diagrammes accélération en fonction du temps par des accéléro-

graphes, appareils conçus pour continuer à fonctionner même en cas de secousse de forte intensité. On enregistre les trois composantes du mouvement, soit deux composantes horizontales, généralement rectangulaires, et la composante verticale. Des réseaux d'observation particulièrement fournis se sont développés, notamment aux U.S.A. et au JAPON, et les enregistrements sont régulièrement publiés. Malgré cela, notre collection d'accélérogrammes ne s'enrichit que très lentement dans le domaine qui intéresse l'ingénieur, c'est-à-dire en ce qui concerne les accélérogrammes relatifs à des stations où la secousse a atteint une intensité destructrice.

Les résultats en notre possession permettent cependant une assez bonne prévision des sollicitations exercées sur une structure par un séisme, dans des conditons qui seront précisées plus loin.

Par contre, notre ignorance est totale en ce qui concerne les déplacements relatifs dans le sol lui-même, et l'on en est réduit sur ce point à de simples supputations ou déductions à caractère plus ou moins théorique. Le principe de certains séismographes comme celui de Benyoff est basé sur la mesure de semblables déplacements, mais ces appareils ont été conçus dans une tout autre intention et ne sont pas construits pour de fortes intensités.

Une commission de l'UNESCO, réunie à Tbilissi en 1965 a préconisé la mise sur pied d'un programme d'investigations expérimentales dans ce domaine.

2.2 Réponse de l'oscillateur simple. Spectres de réponse

La théorie montre que si l'on considère un oscillateur simple caractérisé par sa période propre d'oscillation T (ou par sa pulsation $\omega = \frac{2M}{T}$) et par son degré d'amortissement ν exprimé comme le rapport de l'amortissement réel de l'oscillateur à son amortissement critique, sa réponse à une excitation sismique supposée réduite à une composante et définie par la loi $\gamma(t)$ des accélérations du sol en fonction du temps au point considéré, est donnée par

$$x(t) = -\frac{1}{\omega'}\int_0^t \gamma(\tau)e^{-\nu\omega(t-\tau)}\operatorname{Sin}\omega'(t-\tau)d\tau$$

en ce qui concerne les déplacements par rapports au sol et

$$\ddot{\xi}(t) = \ddot{x}(t) + \gamma(t) = -\omega'^2\, x(t)$$

en ce qui concerne les accélérations absolues.

Dans ces expressions, τ est une variable d'intégration, ω' représente la pseud-pulsation $\omega' = \omega\sqrt{1-\nu^2}$ des oscillations libres amorties. Dans les constructions usuelles, on peut d'ailleurs le plus souvent poser $\omega' = \omega$

Le maximum de la valeur absolue de la fonction $x(t)$, (ou, ce qui revient au même, celui de $\ddot{\xi}(t)$, que nous désignerons par Γ) apparaît comme particulièrement significatif puisqu'il conditionne la sollicitation maximale à laquelle l'oscillateur en cause se trouve soumis du fait du séisme considéré.

On peut se proposer, pour un séisme donné - ou plus exactement pour sa composante $\gamma(t)$ - et pour un degré d'amortissement ν donné, de tracer les variations de Γ ou d'une grandeur équivalente en fonction de la période propre T de l'oscillateur. On obtient ainsi le spectre de réponse du séisme considéré pour le degré d'amortissement ν.

Les spectres le plus généralement tracés sont ceux de l'accélération absolue maximale Γ et de la vitesse relative maximale. Si l'on pose

$$S_V = \left| \int_0^t \gamma(\tau)\, e^{-\nu\omega(t-\tau)} \operatorname{Sin} \omega(t-\tau) d\tau \right|_{Max}$$

on a, à un terme négligeable près, les relations suivantes entre les diverses grandeurs envisagées :

$$|x|_{Max} = \frac{1}{\omega} S_V$$

$$|\dot{x}|_{Max} = S_V$$

$$\Gamma = \omega S_V = \omega^2 x_{Max}$$

Les spectres correspondant à $\nu = o$ sont caractérisés par une grande irrégularité de forme. Cette irrégularité s'atténue au fur et à mesure que ν s'élève. Bien entendu la réponse décroit avec l'amortissement.

2.3 Intensité spectrale

L'irrégularité de la forme du spectre illustre la vanité de toute tentative pour caractériser la secousse par un nombre unique comme l'intensité. En particulier, l'accélération maximale au sol, souvent considérée, n'apparaît que comme la réponse d'un oscillateur de

rigidité infinie. Elle ne fournit aucun renseignement sur les sollicitations susceptibles d'agir sur les autres oscillateurs. Par ailleurs il apparaît que l'intensité d'une secousse ne dépend pas seulement de l'accélération maximale au sol, mais aussi, pour une au moins aussi large part, de la durée de cette secousse.

Une évaluation correcte passe donc nécessairement par la considération des spectres de réponse.

On désigne par intensité spectrale SI l'aire de la partie du spectre des vitesses relatives maximales S_v comprise entre les périodes T = 0,1 et T = 2,5 secondes. Cette grandeur fournit une évaluation moyenne de l'effet de la secousse sur les structures ayant des périodes de vibration comprises entre les limites ci-dessus.

Entre les intensités spectrales relatives aux valeurs ν = o et ν = 0,20 de l'amortissement existe la relation empirique :

$$(SI)_{0,2} = 0,44\ (SI)_0 - 0,012\ (SI)_0^2$$

et entre l'intensité spectrale $(SI)_{0,20}$ et l'intensité macrosismique I, la relation, assez grossièrement approchée il est vrai :

$$(SI)_{0,2} = 8,5\ \left(\frac{I}{11,5}\right)^3$$

Enfin il est possible de relier à la magnitude, par l'intermédiaire de l'énergie E exprimée en ergs l'intensité spectrale en un point donné situé à la distance d de l'épicentre, par la relation :

$$E = 0,11\ 10^{19,24}\ (SI)_0^2\ \left(\frac{h^2+d^2}{225}\right)^2$$

dans laquelle h est la profondeur du foyer. h et d sont exprimées en miles.

Ces formules, jointes à celles données pour les fréquences, permettent une prévision approchée de la distribution des secousses à attendre dans un secteur donné.

2.4 Spectres standard

La superposition des spectres relatifs à divers séismes, après leur avoir fait subir au préalable une affinité pour les amener à la même intensité spectrale, permet de leur donner une enveloppe moyenne. Cette

enveloppe constitue le spectre standard qui est censé définir la réponse de tout oscillateur simple à tout séisme futur d'intensité égale à celle pour laquelle le spectre a été dessiné.

Ces spectres standard ont été tracés par G.W. Housner en 1953. Ils n'ont pratiquement pas subi de modification depuis.

2.5 Réponse d'une structure à plusieurs degrés de liberté

Si l'on considère une structure possédant n degrés de liberté, numérotés de 1 à n, et si l'on désigne par $M_1, M_2, --- M_n$ les masses généralisées et par $y_1, y_2 --- y_n$ les déplacements généralisés correspondants, cette structure présente n modes principaux d'oscillation caractérisés chacun par sa pulsation et sa déformée.

Si l'on désigne par ω_j la pulsation du j^e mode, et par $Y_1^j, Y_2^j, --- Y_n^j$ un système de nombres proportionnels définissant la déformée du j^e mode, la réponse de la structure à une excitation sismique définie par la loi des accélérations $\gamma(t)$ est donnée par :

$$y_r(t) = \sum_j \mu_j \, Y_r^j \, x_j(t)$$

expression dans laquelle

$$\mu_j = \frac{\sum_r M_r \, Y_r^j}{\sum_r M_r (Y_r^j)^2}$$

cependant que $x_j(t)$ est la réponse de l'oscillateur simple de pulsation ω_j, et de même degré d'amortissement que l'oscillateur multiple, telle que définie au paragraphe 2.2.

2.6 Combinaisons de réponses élémentaires

2.61 Structures souples et élancées

Les expressions données en 2.5 permettent le calcul complet de la réponse de l'oscillateur multiple à un séisme donné. On conçoit que l'on pourrait opérer comme pour l'oscillateur simple et en déduire la réponse probable comme enveloppe de la réponse à plusieurs séismes de référence donnée.

Cette méthode représente un travail considérable. Aussi essaye-t-on de déduire la réponse de l'oscillateur multiple de celle des oscillateurs simples. On pourrait

en particulier écrire que le maximum de $\left| y_r(t) \right|$ est égal à la somme de n termes égaux à

$$R_j = \frac{\mu_j}{\omega_j} Y_r^j \Gamma(\omega_j)$$

correspondant chacun à l'un des modes d'oscillation mais le résultat obtenu apparaît comme beaucoup trop pessimiste. En effet les maximums $\Gamma(\omega_j)$ sont loin d'être atteints simultanément, les modes supérieurs répondant les premiers et le mode fondamental le dernier, alors que les réponses des autres modes sont en pleine décroissance. Comme par ailleurs les coefficients $\frac{\mu_j}{\omega_j} Y_r^j$ décroissent avec le rang du mode, on est conduit à considérer assez souvent que la réponse est essentiellement constituée par celle du mode fondamental.

Pour les structures pour lesquelles cette approximation cesse d'être admissible (cas des structures souples et élancées) on considère effectivement plusieurs des premiers modes d'oscillation, mais en ce cas on adopte comme valeur probable de la réponse la moyenne quadratique des termes R_j correspondants.

Cette façon de faire ne semble pas avoir été controuvée jusqu'ici par les vérifications qui ont pu être faites en ce sens qu'elle conduit à des résultats qui, tout en restant raisonnables, apparaissent encore comme du côté de la sécurité.

2.62 Composantes horizontales

Le séisme réel sollicite la construction dans les deux directions horizontales et non une seule. On considère souvent que les maximums de réponse dans ces deux directions ne sont pas atteints simultanément et l'on se dispense de superposer les deux réponses.

Cette hypothèse a de bonnes chances de se réaliser, surtout si la structure présente des propriétés dynamiques très différentes dans les deux directions, mais, à la différence de celle faite en 2.61, on conçoit qu'elle puisse plus facilement se trouver en défaut.

Nous manquons, à l'heure actuelle, d'éléments de jugement sûrs à ce sujet.

2.63 Composante verticale

C'est une tendance assez répandue que de négliger les effets de la composante verticale devant ceux des composantes horizontales. Il ne faut cependant pas perdre de vue que la composante verticale peut avoir une

grandeur égale ou supérieure à celle des composantes horizontales : c'est essentiellement une question de position de la structure par rapport à l'épicentre.

La composante verticale est caractérisée par une plus grande richesse en excitations de haute fréquence. Les structures étant nettement plus rigides vis-à-vis des déformations verticales que vis-à-vis des déformations latérales, leur réponse à la composante verticale peut atteindre des valeurs élevées. Ces accélérations verticales, combinées avec les accélérations horizontales elles peuvent donner des combinaisons défavorables (flexion composée).

Ici encore, les deux maximums de réponse ont très peu de chances de se produire simultanément, de sorte qu'il n'apparaît pas justifié de les superposer. Toutefois, il peut être dangereux de ne pas considérer en même temps que le maximum de réponse latérale, un résidu non négligeable de sollicitation verticale. Certains règlements prennent en compte cette éventualité.

2.64 Déplacements différentiels du sol

Des considérations analogues pourraient être développées à propos des déplacements différentiels du sol. Ainsi que nous l'avons dit, les éléments d'appréciation expérimentaux font totalement défaut. Le problème n'en existe pas moins à coup sûr pour les ouvrages de grande longueur, et certains codes contiennent sur ce point certaines dispositions basées sur des évaluations théoriques.

Il convient de signaler dans ce domaine les travaux de Barstein qui, traitant le mouvement sismique comme un phénomène aléatoire et moyennant certaines hypothèses de régularité a pu déterminer les caractéristiques statistiques des mouvements d'extension-compression dans le sol.

3. COMBINAISONS AVEC DES SOLLICITATIONS D'AUTRE NATURE

Les sollicitations d'origine sismique peuvent se superposer à des sollicitations d'autre nature. Lorsque ces dernières sont des sollicitations rapidement variables ou de caractère assez exceptionnel, on peut se demander quelle est la probabilité pour que se produise la combinaison la plus défavorable qui se puisse imaginer.

Le problème se pose de façon différente que pour la combinaison de diverses réponses élémentaires comme il en a été discuté en 2.6 . Dans ce dernier cas, le

phénomène moteur, à savoir le séisme, est unique et porte en lui les causes qui écartent les uns des autres, dans le temps, les maximums des réponses élémentaires, de sorte que l'apparition de la combinaison la plus défavorable demeure hautement improbable.

Dans le cas de la possibilité de coexistence de la sollicitation d'origine sismique avec des maximums de sollicitation dus à d'autres causes, le problème est simplement celui de la simultanéité de deux ou plusieurs phénomènes indépendants les uns des autres : c'est un problème de rencontre.

Il n'a pas été effectué d'étude statistique sur ce sujet. Néanmoins, on doit considérer que le séisme est un phénomène de brève durée par rapport aux sollicitations d'autre nature (une demi-minute à deux minutes). La pointe de réponse est de durée plus brève encore.

La solution dépend de la durée des autres sollicitations auxquelles peut théoriquement se superposer l'action sismique. C'est ainsi que l'on doit considérer que l'action sismique peut se superposer aux sollicitations maximales engendrées par les machines dans une usine en fonctionnement. Par contre, on peut s'interroger sur la nécessité d'envisager les charges d'exploitation maximales dans un bâtiment : la réponse à cette question sera différente suivant qu'il s'agit d'un magasin ou d'un entrepôt, où la charge maximale a de grandes chances d'être atteinte et maintenue pendant d'assez longues durées, ou qu'il s'agit d'habitations, ou la charge maximale a peu de chances d'être atteinte. Certains codes de construction parasismique établissent des distinctions entre des cas de cette nature.

La question se pose aussi de savoir si l'on a à superposer la sollicitation exceptionnelle que représente le séisme à des sollicitations telles que celles dues au vent. On conçoit très bien qu'une pointe de réponse sismique a très peu de chances de coïncider dans le temps avec la pointe de réponse à un vent exceptionnel, et c'est la raison pour laquelle la plupart des codes en vigueur ne prescrivent pas la prise en considération simultanée des effets du vent et des séismes. Mais ici, le souci de simplification l'emporte sur la rigueur, car on peut très bien imaginer que la probabilité pour que l'action sismique coïncide avec un vent modéré ou même assez fort reste assez élevée.

Ces diverses questions mériteraient une étude plus approfondie et il serait souhaitable que des investigations soient entreprises dans ce domaine.

4. CONCLUSIONS

NATURE DE LA PROTECTION PARASISMIQUE

Le but primordial de la protection parasismique est la sauvegarde du plus grand nombre possible de vies humaines ; accessoirement, elle vise à éviter la désorganisation d'une économie nationale ou régionale ou des atteintes graves au patrimoine immobilier, public ou privé.

Ceci explique que, dans la plupart des pays, même ceux qui sont situés en zone de forte séismicité, les séismes soient traités comme des évènements exceptionnels, et que, par suite, les vérifications de résistance correspondantes soient effectuées avec les jeux de coefficients de sécurité généralement admis pour ces évènements, c'est-à-dire avec des coefficients beaucoup plus proches de l'unité que pour les sollicitations dites normales. L'examen des lois statistiques rappelées dans le cours du présent exposé justifie ce point de vue.

Le coût des mesures de protection antisismique s'élève assez rapidement avec le niveau de sollicitation envisagé dans le calcul. Aussi, ne saurait-on raisonnablement envisager la construction d'édifices susceptibles de résister auxplus violentes secousses possibles : le degré de protection obtenu par l'application d'un code de construction antisismique résulte d'un compromis entre le désir de sécurité et l'économie générale de la construction. Ce compromis peut être différent d'un pays à l'autre : on conçoit que les pays disposant de ressources abondantes puissent pratiquer dans ce domaine une politique différente de ceux où l'attribution d'un toit à chacun pose encore de difficiles problèmes. Ce compromis doit être essentiellement le fait de la Puissance Publique, et nul ne peut se substituer à elle dans ce domaine.

Le fait qu'il soit économiquement impossible de protéger toutes les constructions situées en zone sismique contre les effets du plus violent séisme auquel on peut s'attendre dans la région ne justifie pas, en sens inverse le renoncement à toute mesure, car les intensités très élevées ne sont atteintes que dans des régions de surface assez restreintes, autour desquelles s'étendent des zones incomparablement plus étendues dans lesquelles la secousse est plus modérée, et où par conséquent la protection antisismique retrouve sa pleine efficacité et son intérêt.

La protection obtenue par l'application d'un code de construction antisismique est donc essentiellement de nature probabiliste et statistique. La possibilité d'apparition d'intensités plus élevées que celles prises en considération dans les projets, pour faible qu'elle doit, n'est pas nulle. Cet aspect probabiliste se retrouve dans les combinaisons de sollicitations prises en compte : l'apparition de cas plus défavorables que ceux envisagés dans les codes est très peu probable, mais n'est pas rigoureusement exclue. Des échecs isolés et rarissimes restent possibles. En langue française, on donne le nom de protection nominale à la protection ainsi obtenue.

Il est cependant des cas où l'échec ne saurait être admis : ce sont ceux des structures pour lesquelles un dommage, même mineur, pourrait avoir des conséquences incalculables. Il en est ainsi des réacteurs nucléaires dans lesquels une fuite incontrôlée de produits radioactifs peut représenter une menace biologique grave pour toute une population. On conçoit que dans ces ouvrages rien ne puisse être laissé au hasard, et que, dans leur cas, les combinaisons les plus défavorables doivent être sérieusement envisagées. Il leur correspond une conception différente de la sécurité et l'on donne le nom de protection intrinsèque, par opposition à la protection nominale définie plus haut, à la nature de la protection à laquelle conduit cette nouvelle philosophie de la sécurité.

BIBLIOGRAPHIE

B. GUTENBERG and C.F. RICHTER - Seismicity of the Earth Princeton N.I. 1954.

C.F. RICHTER - Elementary Seismology, San Francisco 1958.

J. COULOMB - L'étude de la Terre par les ondes sismiques. La Terre, Encyclopédie de la Pléiade, Paris 1959.

J.P. ROTHE - Les effets des tremblements de terre - La Terre, Encyclopédie de la Pléiade, Paris 1959.

J. DESPEYROUX - Notre expérience du comportement des constructions soumises à un ébranlement sismique - Annale de l'I.T.B.T.P. Paris 1964.

J.P. ROTHE - Communication au 4° Congrès Mondial du Génie Sismique, Santiago du Chili 1969 (en publication).

J.L. ALFORD, G.W. HOUSNER and R.R. MARTEL - Spectrum Analysis of Strong-Motion Earthquakes - Seismological Society of America, Avril 1953.

G.W. HOUSNER - Spectrum Intensities of Strong-Motion Earthquakes - Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures, Los Angeles 1952.

G.W. HOUSNER - Properties of Strong Ground Motion Earthquakes - Seismological Society of America, July 1955.

D.E. HUDSON and G.W. HOUSNER - Structural Vibrations produced by Ground Motion - American Society of Civil Engineers, Vol. 81, 1955.

G.W. HOUSNER - Earthquake Resistant Design Based on Dynamic Properties of Earthquakes - Proceedings American Concrete Institute, Vol. 53 1956-57.

R.W. CLOUGH - On the Importance of Higher Modes of Vibration in the Earthquake Response of a Tall Building - Seismological Society of American, Oct. 1955.

E. ROSENBLUETH - Some Applications of Probability Theory in Aseismic Design - World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco 1956.

C.H. NORRIS, R.J. HANSEN, M.J. HOLLEY, J.M. BIGGS, S. NASSUYETT, J.K. MINAMI - Structural Design for Dynamic Loads, New-York 1959.

W.C. HURTY, M.F. RUBINSTEIN - Dynamics of Structures - Prentice Hall, Englewood Cliffs N.J. 1964.

C.M. Harris and C.E. Crede - Shock and Vibration Handbook, New-York 1961.

J. DESPEYROUX - La Construction Parasismique, Annales des Ponts et Chaussées, 1967-II, Paris.

J. DESPEYROUX - The New Franch Aseismic Code - 3d World Conference on Earthquake Engineering, Auckland 1965.

J. DESPEYROUX - General Report on Theme 3. Proceedings 4th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago de Chile, 1969 (en publication).

International Association for Earthquake Engineering. Earthquake Resistant Regulations. A World List, Tokyo 1966.

RÉSUMÉ

Les séismes apparaissent, dans les régions où ils ont coutume de se manifester, comme gouvernés par les lois statistiques qui ont fait l'objet de diverses études de la part des séismologues. La réponse d'une structure à une excitation d'origine sismique elles-mêmes peuvent se combiner à d'autres sortes de sollicitations, soulevant ainsi le problème de la probabilité de l'apparition simultanée de plusieurs évènements défavorables.

Le présent rapport fait le point de l'état présent de nos connaissances dans ce domaine et indique comment les questions correspondantes ont été résolues dans la pratique courante.

ZUSAMMENFASSUNG

Erdbeben treten in gewissen Gebieten auf; ihr Vorkommen scheint - gemäss der Arbeiten mancher Seismologen - statistischen Gesetzen zu gehorchen. Hinsichtlich des Schwingungsverhaltens der Bauwerke lässt sich die von dem Erdbeben herrührende Erregung als eine unregelmässige instationäre Störfunktion definieren. Die Erdbebenlasten können zusammen mit anderen Lasten auftreten; dies führt zum Problem der Wahrscheinlichkeit der Gleichzeitigkeit mehrerer ungünstiger Vorkommnisse. Vorliegende Arbeit beschreibt den heutigen Stand unserer Erkenntnisse auf diesem Gebiet und zeigt praktische Lösungswege auf.

SUMMARY

Earthquakes appear, in the regions in which they have some possibility to occur, as governed by statistical laws which have been studied by seismologists. The response of a structure to a seismic excitation can be definied as the response to a non-stationary random disturbance. Seismic loadings themselves can be combined with other sorts of loadings, thus rising the problem of the simultaneity of occurence of unfavourable events. This report deals with the present state of our knowledge in this field and indicates how the corresponding problems have been solved in current practice.