

Université Mohammed Boudiaf

Faculté de technologie

Département de Génie Civil

Cours Alea sismique-Partie02

Présenté par Docteur Menasri

Master 1

Année universitaire 2023-2024

INFLUENCE DES CONDITIONS LOCALES DU SITE SUR LES PARAMETRES DU MOUVEMENT SISMIQUE

2.1.1. Considérations générales.

L'observation des séismes dans le temps révèle souvent d'une façon très marquée une dispersion régionale de leur intensité et de leurs effets destructifs,

Lors d'un séisme, un grand nombre de structures peuvent être fortement endommagées ou détruites sur une zone localisée tandis que dans d'autres régions, pourtant adjacentes à celle-ci, des structures similaires auront assez bien résisté aux secousses du séisme.

De même dans une zone donnée certaines catégories de structures peuvent être beaucoup plus touchées que les autres seulement une petite partie de cette variation peut être attribuée à la variation de la résistance réelle des structures ou à des défauts de construction. Ou à de petites ruptures ou glissements locaux des sols.

D'autre part, les enregistrements sismiques montrent généralement des particularités distinctes pour chaque localité au niveau des amplitudes et du contenu fréquentiel selon les caractéristiques de chaque site.

Nous avons déjà vu qu'il est d'usage de classer l'ensemble des facteurs qui influencent les paramètres du mouvement sismique du sol en trois catégories :

- Les facteurs reliés aux mécanismes de génération du séisme ou facteurs de source.
- Le chemin du parcours des ondes sismiques.
- Les particularités locales du site que nous envisageons d'étudier dans ce chapitre.

Il faut noter qu'il est difficile de bien séparer la part d'incidence de chacune de ces trois séries de facteurs sur les paramètres du mouvement sismique enregistré sur un site, étant donné leur complexité et leur interaction.

Il est difficile de déterminer les limites géométriques de la prédominance de chacun de ces facteurs.

On peut seulement admettre qu'au voisinage de la faille génératrice, les facteurs de la source influenceront le plus les caractéristiques importantes du mouvement sismique.

Mais beaucoup d'incertitude réside quant à la définition et la distinction entre les effets du chemin de parcours et ceux des Conditions locales, ceci a créé un sujet de désaccord entre les spécialistes quant au rôle des deux derniers facteurs mentionnés selon la définition ou la prépondérance qu'ils attribuent à chacun

Par ailleurs, à l'origine de la variation de certains facteurs reliés aux conditions locales du site a concentré l'attention des divers chercheurs ceci à cause des moyens limités utilisables pour les études sismiques. Il en a résulté des généralisations qui ont poussé d'autres auteurs à continuer à mettre en doute le bien fondé de l'influence des conditions locales du sol sur les paramètres du mouvement sismique, ou de dénoncer l'importance exagérée qu'on leur prête parfois.

Housner[21] attribuait les différences rencontrées dans les enregistrements pris en points presque adjacents à l'effet du chemin de parcours et au fait du hasard dû à la superposition accidentelle de divers trains d'ondes qui parcourent un sol de propriétés et de géométrie complexe et difficilement détectable.

Ailleurs en entreprenant une comparaison rapide des enregistrements sur quelques sites rocheux, il déduisait:

La différence entre les enregistrements sur un site donné pour deux séismes différents peut être aussi grande que celle de deux sites différents au cours d'un même séisme". Ce qui ne suffit pas pourtant pour désavouer l'influence des conditions locales du sol, étant donné que dans un cas ce sont les facteurs de la source et du chemin de parcours qui peuvent causer la différence et dans l'autre essentiellement l'influence des conditions locales du sol.

Trifunac[7] avec une autre approche, insiste sur l'influence prépondérante du chemin de parcours, de l'hétérogénéité de taille géologique et le peu d'influence.

D'après Crouse [8] une partie de l'influence prêtée aux conditions locales du sol est due à l'interaction sol structure et au filtrage des ondes par les fondations tout en incorporant l'influence de l'interaction sol structure dans l'ensemble des facteurs intervenant dans les conditions locales du site.

Ajoutons que l'influence du filtrage des fondations intervenant sur les valeurs des accélérations et des ordonnées spectrales, influence rapportée par Crouse, disparaît pour les périodes plus élevées de 0,3 à 0,5 secondes Or les effets des conditions locales du site sont généralement plus prononcés pour les périodes du mouvement sismique plus élevées que les limites citées

De telles discordances dont nous avons essayé auparavant d'expliquer les origines ne doivent pas mettre en cause l'influence établie des conditions locales du sol sur les caractéristiques du mouvement sismique, ce qui est corroboré par de très nombreuses observations et études analytiques.

Ceci constitue d'ailleurs le point de départ de l'ensemble des méthodes modernes de calcul sismique du sol.

Dans ce qui suit nous donnerons un aperçu historique rapide et quelques exemples concrets qui mettent en évidence l'influence des conditions locales du site sur les caractéristiques du mouvement et sur les dégâts qu'il occasionne.

2.1.2. Exemples de l'influence des conditions locales du site.

En étudiant les dégâts de San Francisco de 1906, Wood attribuait déjà en 1908 la variation des effets destructifs du séisme selon les différentes zones de la ville à des caractéristiques locales du sol.

Depuis les années 30, la littérature Japonaise est abondante en observations faisant allusion au rôle des formations géologiques ou la nature du sous-sol sur l'ampleur des dégâts du séisme, Ishimoto (1932,1937), Sita et Matsuo (1941), Omote (1946,1949) ; T. Minakami (1950).

Kanai (1952,1956) s'est penché avec plus de rigueur sur ce domaine, suivi par Duke (1958) et Duke et Leeds (1962) .Ces auteurs ont utilisé des procédures analytiques simplifiées pour évaluer l'influence des conditions locales du site et les comparer avec les résultats de microséismes ou avec l'allure générale des observations faites lors de séismes antérieurs.

Vers les années 70, des études analytiques avec des méthodes plus évoluées ont été menées par un certain nombre de chercheurs pour démontrer l'influence des conditions locales du site, Idriss et Seed (1968), Seed et Idriss (1969), Tsai (1970). ..

Ces dernières années des études plus systématiques d'enregistrements de séismes de forte magnitude ont été entreprises dans le but des prévisions des risques sismiques. Les études ont mis en évidence l'influence des conditions locales du site, même s'il reste encore beaucoup d'incertitude sur la façon dont chacune des caractéristiques du site intervient au niveau des différents paramètres du mouvement sismique Nous citerons brièvement quelques exemples concrets en vue d'une meilleure compréhension des caractéristiques locales du site.

La figure (2-1) montre la géologie superficielle de la région la plus sinistrée lors du séisme de Tonankai de 1944 au Japon.

Le pourcentage des structures endommagées, variable avec la nature du sous-sol est illustré par les chiffres suivants :

Terrain argileux	→	26,1 %
Terrain sablonneux	→	3,5 %
Sable graveleux	→	1,4 %

Sol dur (diluvial ou rocheux) → 0,2 %

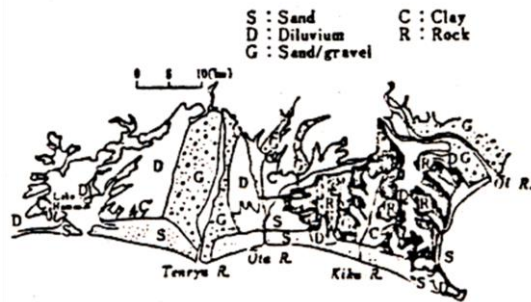


Fig. 2-1 la géologie superficielle de la région la plus sinistrée lors du séisme de Tonankai de 1944 au Japon.

Les intensités macrosismiques présentait une allure décroissante avec l'accroissement de la raideur du site [22].

Lors du séisme de 1957 de San Francisco, des variations de l'ordre de 100% ont été observées sur les enregistrements de points adjacents situés à la même distance de la source du séisme).

Ces différences ne pouvaient être attribuées qu'à la variation des conditions locales du site, [22].

D'ailleurs on constate sur cette figure que les valeurs et les formes des spectres de réponses changent avec la profondeur du rocher et l'épaisseur des différentes couches d'alluvions.

Par exemple pour la période de 1,2 sec, l'accélération spectrale est 3 fois plus grande sur le site de Southen Pacific Building que sur le site de l'Alexandre Building.

Le séisme du 29 Juillet 1967 de Venezuela avec ses effets destructifs pour la ville de Caracas, a offert une nouvelle occasion pour réaffirmer l'influence des conditions locales du site et la capacité des nouvelles méthodes de calcul à prévoir quelques caractéristiques de ces effets.

Plusieurs études ont été effectuées sur le séisme de Caracas,. Le séisme avait une magnitude de 6,3 et son épicentre était situé à près de 55 Kms de la ville de Caracas, , l'accélération maximale ne dépassait pas 0,08g à la surface du sol au niveau de la ville de Caracas, qui est bâtie sur une vallée alluvionnaire de profondeur variable.

Les dégâts du séisme étaient concentrés sur certaines zones précises de la ville et cela chaque fois pour une catégorie particulière de structure. Toutes ces structures étaient calculées d'après les codes parasismiques existants.

Ainsi dans certaines zones de la ville, les structures élevées avaient le plus souffert des dégâts du séisme tandis que les structures peu élevées étaient pratiquement épargnées.

Dans d'autres zones, les structures peu élevées avaient le plus souffert des dégâts du séisme tandis que les structures élevées étaient pratiquement épargnées.

Dans d'autres zones, la situation inverse s'était produite. Une étude détaillée par Seed et Withman et Al [23] a pu montrer que la profondeur du sol sous-jacent était un paramètre très important pour déterminer la réponse du site et la distribution des dégâts.

Les structures étagées étaient touchées par le séisme surtout dans le quartier de Palos Grandes où la profondeur du sol se situant entre 200 et 250 m. Dans ce quartier, les structures basses ont bien résisté aux secousses du séisme tandis qu'elles ont subi des dégâts importants dans la partie ouest de la ville sur les alluvions peu profonds où les structures élevées avaient bien résisté.

Ainsi dans le cas du séisme de Caracas, dans chaque zone de la ville, les conditions locales du sol sont intervenues pour modifier les paramètres du mouvement sismique d'une part et la période naturelle des immeubles (Par l'interaction sol structure) d'autre part pour créer des cas critiques des pseudo résonances localisées.

La fig. (2-2) montre les enregistrements de l'histoire des accélérations en surface et à une profondeur de 37 m à Urayasu au Japon, d'après Okamoto[24].

La modification produite par la couche superficielle du sol sur les amplitudes des ondes sismiques incidentes se manifeste clairement par une nette amplification.

La figure (2-3) représente les enregistrements faits à Union Bay à Seattle (USA) d'après Tsai (1969).

Ici, l'influence du sol se manifeste par une amplification pour la couche d'argile et une forte atténuation pour la couche de Tourbe

Les exemples cités montrent clairement l'influence des caractéristiques du site sur les paramètres du mouvement sismique en surface du sol, Cette influence peut se traduire par une amplification ou une atténuation au niveau des secousses en surface et une variation du contenu fréquentiel des vibrations. Des cas dangereux de pseudo-résonance peuvent être provoqués par une coïncidence de la période propre des sols avec certaines fréquences importantes du mouvement sismique.

2.1.3. Facteurs destructifs des conditions locales du site.

On peut diviser l'ensemble des facteurs liés aux conditions locales du site. Qui affectent le mouvement sismique en trois catégories :

a)-Les caractéristiques ou conditions locales du sol.

b)-Les variations topographiques.

c)-L'interaction sol structure.

d) Les effets de la topographie sont assez mal connus et il existe souvent une divergence entre les suggestions des chercheurs qui ont entrepris des études dans ce domaine.

Nous essaierons d'aborder brièvement ce problème qui fait intervenir la taille de l'hétérogénéité qui doit être considérée dans ce genre d'étude.

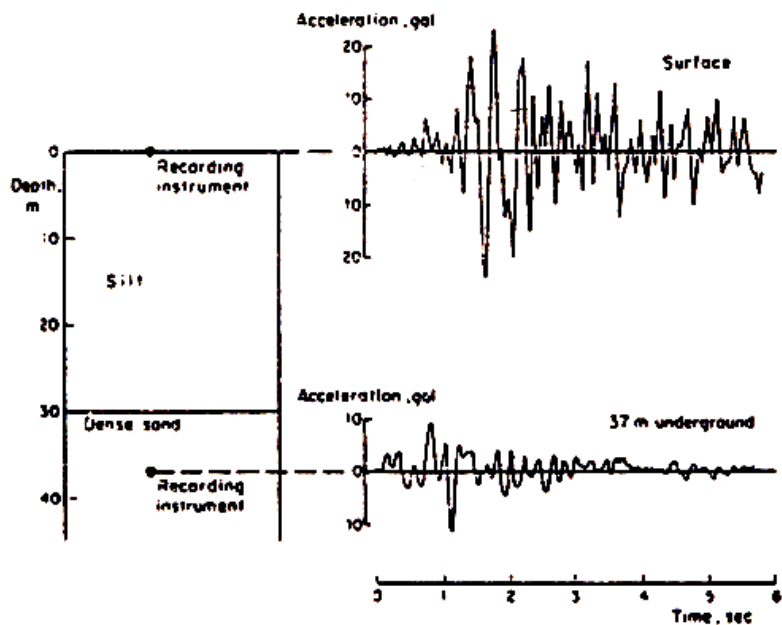


Fig.2-2 Comparaison des accélérations enregistrées en profondeur et en surface de Urayasu au Japon (d'après Okamoto 1973).

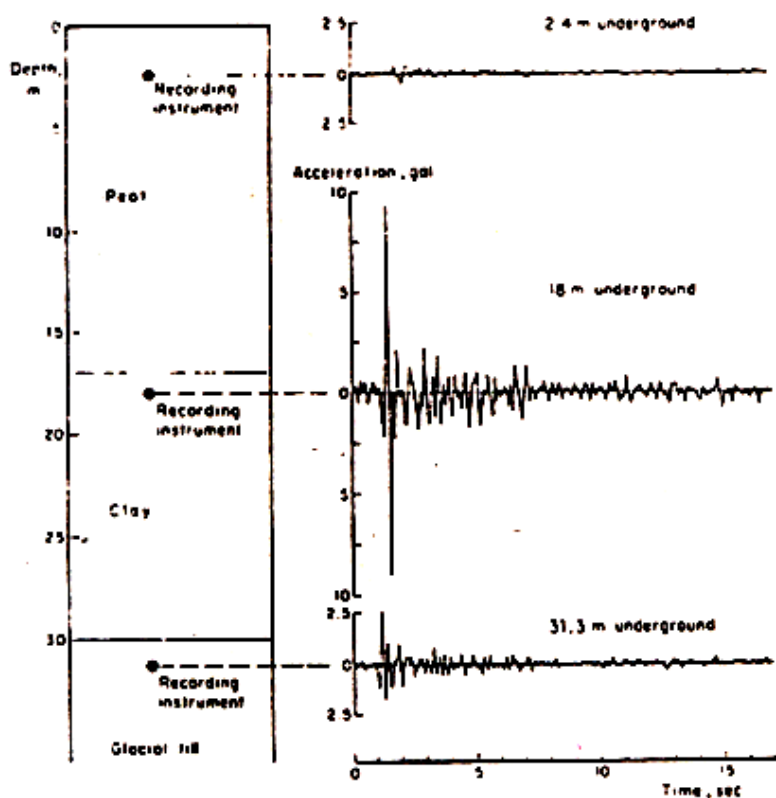


Fig.2.3 –Les accélérations enregistrées a différentes profondeurs du site de Union Bay, Seattle, lors d'un séisme local (d'après Tsai, 1969).

2.1.4. La taille de la non homogénéité.

Une divergence de point de vue peut être rencontrée entre le sismologue et l'ingénieur mécanicien du sol quant aux dimensions de non homogénéité qui doivent être prises en compte pour l'étude des effets des conditions locales du site sur les vibrations sismiques.

Dans la vision du sismologue, les variations des propriétés locales du sol pour des dimensions ne dépassant pas la centaine de mètres ne peut avoir que peu d'effet en comparaison de la taille des non homogénéités rencontrées par les ondes sismiques le long de leur chemin de parcours depuis la source, [7].

De même que les autres facteurs concernant la propagation des ondes, les amplitudes des ondes sismiques de forte intensité une fois émises par la source dépendront de l'éventail de la variation des propriétés et de la taille des non homogénéités qu'elles rencontreront le long de leur chemin de parcours.

En adoptant l'approche du sismologue, on est amené ainsi à admettre que, si la variation des caractéristiques des terrains le long d'une surface de discontinuité est suffisamment élevée et si l'étendue de la non homogénéité est du même ordre de grandeur ou plus grande que la longueur d'onde de l'onde incidente, des changements significatifs interviendront sur l'amplitude du mouvement en raison des réflexions totales et des dispersions.

Or, on peut situer les fréquences des fortes secousses ayant un intérêt pour l'étude parasismique entre 0,2 et 20 Hz.

Comme la vitesse des ondes sismiques au voisinage de la surface du sol varie entre environ 100 m/s et 3 Km/s, les longueurs d'onde correspondantes seront de l'ordre de 5 m à 15 Km. Par conséquent, pour une étude plus rigoureuse, il faut envisager les modèles du site de dimensions beaucoup plus élevées que celles qui sont actuellement pratiquées en génie parasismique.

Ceci implique alors l'incorporation d'une partie du chemin de parcours et de la géologie locale de la zone intéressée dans l'étude des conditions locales du site.

Des modèles tridimensionnels de grandes dimensions prennent en compte la topographie, seront utilisés pour les études analytiques. Cependant, nos possibilités actuelles, aussi bien au niveau des connaissances de la géologie détaillée du site que les moyens et le coût des calculs permettent difficilement une telle approche.

La deuxième approche vise, d'un point de vue plus pratique que rigoureuse, à simplifier le problème et à dissocier les différents facteurs influents pour pouvoir les étudier séparément, en rapport avec les possibilités existantes.

Par exemple, on admet qu'à l'échelle purement locale la surface de discontinuité la plus marquée, rencontrée pour divers sites de terrains meubles est celle qui sépare la base rocheuse et le sol.

Les ondes sismiques ne subissent généralement pas de variation considérable le long de leurs derniers kilomètres de parcours au sein du massif rocheux, à condition que les propriétés et la géométrie de ce dernier ne soient pas très variables tandis que les calculs aussi bien que les observations sur site montrent qu'elles peuvent subir des changements assez significatifs entre le substratum rocheux et la surface des terrains meubles qui sont le plus souvent constitués par la superposition de couches de propriétés variables. Là où le substratum rocheux n'existe pas à une profondeur accessible, le choix des dimensions pour l'étude des conditions locales du site sera plus difficile et doit être mené avec plus de précautions.

Une autre conclusion de la première discussion est que les facteurs liés aux conditions locales dépendent des périodes du mouvement sismique. Ainsi, pour le cas des structures élevées ou des barrages et des ponts, les dimensions des conditions locales du site à envisager doivent être plus grandes que pour les cas des structures rigides ou de petite taille. En effet, les modèles de petite taille sont plus susceptibles aux fréquences élevées.

Enfin il faut mentionner qu'une chute brutale des propriétés du sol, même sur une petite longueur peut avoir des effets non négligeables sur les paramètres du mouvement sismique suite à des réflexions partielles accentuées, ou à des absorptions[1], aussi bien au niveau des couches superficielles qu'au niveau géologique.

2.2.1. Influence de la Topographie.

Par effet de la Topographie, nous entendons l'influence de la variation de la topographie de la surface du sol, mais aussi celle du substratum rocheux sur les paramètres du mouvement sismique.

La diversité des configurations susceptibles de se produire dans la nature et le nombre restreint des recherches déjà effectuées ainsi que leurs résultats parfois contradictoires ne permet actuellement aucun classement des sites ou aucune déduction par comparaison pour une configuration de la topographie rencontrée sur un site donné.

A cause de nos possibilités limitées, la plupart des chercheurs ont abordé ce problème en se basant sur des calculs analytiques avec des configurations simplifiées et en assimilant le plus souvent un comportement linéaire élastique pour le sol et des mouvements harmoniques pour le séisme.

Ainsi Bouchon [25] se base sur des calculs analytiques prenant en compte différents angles d'incidence et des configurations topographiques allant d'une crête à une vallée, et suggère que les déplacements en surface du sol sont beaucoup influencés par la topographie. Dans le cas d'une anomalie en forme de crête, il trouve une zone d'amplification près du sommet et dans le cas d'une dépression une zone d'atténuation au fond.

L'influence de la topographie sur les enregistrements sismiques a été étudiée dans quelques cas comme celui du séisme de Frioul en Italie, où Muzzi et Vallini (1977) ont utilisé les enregistrements du séisme parallèlement à un certain nombre de calculs pour expliquer quelques effets de la variation de la topographie sur les enregistrements. Quelques études ont été effectuées au Japon mais les résultats dispersés ont conduit certains auteurs à nier en partie l'influence de la topographie Irikura (1980).

Il en a été de même pour l'étude de la vallée de San Fernando en Californie lors du séisme de 1971.

Davis et West [26] ont dépouillé les enregistrements des répliques du séisme de San Fernando de 1971 à la base et au sommet de trois collines de tailles différentes. Ils en déduisent que l'effet de la forme de l'anomalie n'est pas déterminant.

Mais les reliefs ont eu un effet d'amplification considérable sur les enregistrements, ce qui varie dans la gamme des fréquences avec leurs tailles.

Une petite élévation amplifie les vibrations sismiques dans un intervalle de fréquence plus étroit et pour une période moyenne moins élevée. Tandis qu'avec l'augmentation de la taille de la colline, la gamme de fréquences marquées par l'amplification est plus étalée et la période la plus marquée augmente.

Boore[20] a étudié aussi l'influence de la topographie sur le mouvement sismique lors du même séisme de San Fernando de 1971 pour la vallée de Pakoima. Il établit que la topographie a une influence non négligeable sur le mouvement sismique en surface du sol et cela surtout pour les fréquences élevées qui peuvent être amplifiées de près de 50%. Mais cette influence est négligeable sur les basses fréquences.

Trifunac[7] d'après une étude analytique et les observations sur le site de Pakoima a conclu que la topographie n'a pas d'effets significatifs sur les enregistrements sismiques.

Mais Chang[27] en se basant aussi sur les enregistrements du séisme de San Fernando à San Gabriel Mountain Range et une extrapolation difficilement justifiable trouve une relation linéaire entre les paramètres du mouvement sismique, comme le déplacement et les accélérations maximales, et l'altitude des points, dans la vallée de San Fernando fig.(2-3).

Les accélérations s'accroissent avec la cote des points pour atteindre la valeur impressionnante de 2,29g au sommet de la montagne.

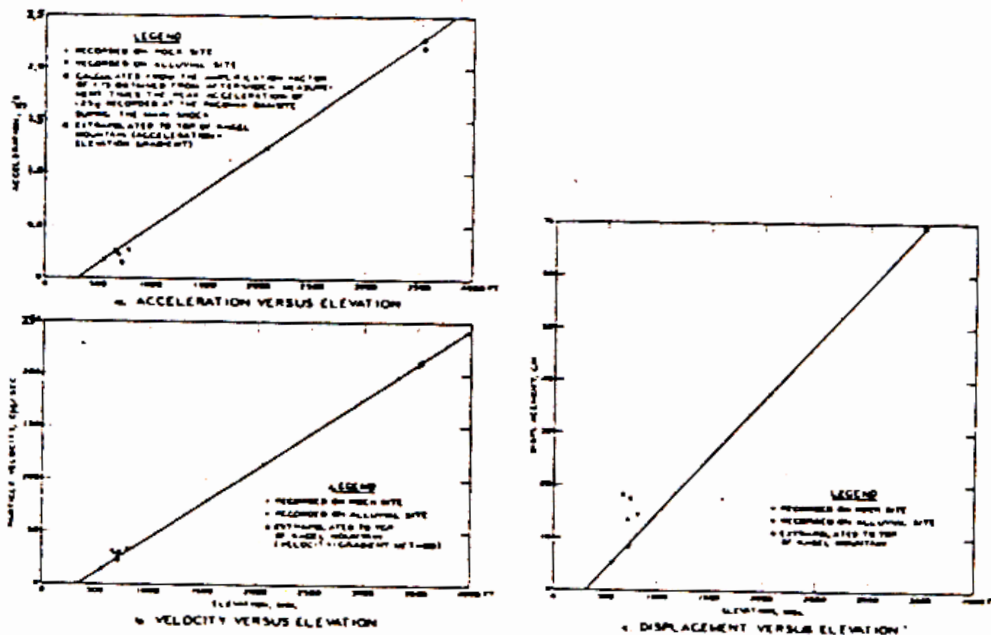


Fig.2-3a Accélération, vitesse, et déplacement

2.2.2. Effet de la topographie de surface :

Un grand nombre de séismes destructeurs survenus depuis le début du siècle ont été l'occasion pour les observateurs de constater une augmentation notable des dégâts au sommet des reliefs topographiques. On peut citer par exemple les séismes de Cambec (1909 Communes de Rognes et Verneuges) de San Fernando (1971) d'Irpinia (1980).

Ces observations très qualitatives ont incité les sismologues à réaliser des expériences pour mieux quantifier ce phénomène.

Il en ressort les principaux résultats suivants :

- a)-Les mouvements sismiques enregistrés au sommet des reliefs sont systématiquement plus importants que ceux enregistrés au pied des mêmes reliefs.
- b)-Cette amplification est plus importante sur les composantes horizontales que sur la composante verticale.
- c)-Cet effet topographique est sauf cas particulier (Bard et Turcker) à un effet sur une large bande se manifestant dans la plage de fréquences où la longueur d'onde λ est comparable à la dimension horizontale $2l$ du relief ($1/3 < \lambda/2l < 3$) environ.
- d)-Cet effet semble relativement stable par rapport à la sollicitation sismique: il reste sensiblement identique quels que soient la taille, la distance et l'azimut du séisme.
- e)-Enfin, au point de vue quantitatif, cet effet peut être extrêmement important, puisque les amplifications crêtes/base mentionnées dans la littérature dépassent parfois 20 dans le domaine spectral et 4-5 dans le domaine temporel.

Tous ces résultats expérimentaux montrent, à l'évidence l'intérêt et l'importance de ces effets topographiques pour le génie parasismique. Mais la prédiction de ces amplifications nécessite au préalable une bonne compréhension physique du phénomène et des modèles numériques en accord avec les observations.

2.3.1. Procédures d'étude de l'influence des conditions locales sur les paramètres du mouvement sismique.

En réalité, pour être plus objective, l'étude de l'influence des conditions locales du sol sur les paramètres du mouvement sismique devrait se faire par l'accumulation et la comparaison des enregistrements des séismes destructifs de forte intensité.

Nous appellerons cette méthode la méthode empirique en opposition à diverses procédures analytiques qui ont prospéré à cause des moyens insuffisants mis en œuvre pour grouper des données expérimentales fiables. .

2.3.2. Les études empiriques

Ces dernières années, des études empiriques ont enrichi nos connaissances dans le domaine sismique en apportant des éléments positifs montrant notamment l'influence des conditions locales du sol sur les paramètres du mouvement sismique éléments toutefois insuffisants pour éclaircir la majorité des questions posées et servir comme guide dans l'étude sismique d'intensité donnée.

En effet, si nous disposions d'un grand nombre d'enregistrements de fortes secousses sismiques sur des sites de natures différentes situés à des distances variables de l'épicentre pour des séismes à profondeur de foyer variable on aurait pu entreprendre une étude comparative de l'ensemble des différents facteurs, y compris les conditions locales du site sur les caractéristiques du mouvement sismique Nous aurions alors pu entreprendre des prévisions plus réalistes pour un site donné. Mais même dans ce cas les résultats des études sur une région sismique ne seront pas complètement applicables à d'autres régions vu l'intervention des particularités spécifiques des mécanismes de génération du séisme et la géologie globale de chaque région sismique sur les résultats obtenus.

En tout cas, à l'heure actuelle, nous ne disposons pas suffisamment de données fiables pour entreprendre une telle comparaison.

Les observations et les enregistrements qui ont été effectués au cours de différents séismes antérieurs peuvent et doivent nous guider dans nos recherches. Mais le plus souvent pour l'étude détaillée d'un cas concret, nous ne pouvons pas encore nous baser sur le peu d'enregistrements qui existent.

Une grande campagne d'investigations doit être menée dans différentes régions sismiques par l'installation d'appareils de mesure couvrant une large gamme de conditions locales du sol sur des sites variés pour lesquels nous devons disposer d'une connaissance détaillée des caractéristiques locales du sol.

L'accumulation de ces enregistrements pendant plusieurs décennies pour les séismes de grande taille éventuels permettra d'accomplir cette tâche.

En attendant. Pour résoudre les problèmes pratiques qui se posent pour la construction parasismique dans les zones de grands risques sismiques et pour élucider les conditions locales du sol d'une part nous pouvons utiliser des procédures analytiques, d'autre part la bibliothèque des données sismiques qui sont beaucoup plus fréquentes ou des microséismes naturels ou provoqués .C'est une procédure qui a été largement pratiquée au Japon.

Cependant, la forte linéarité du comportement du sol en ce qui concerne les relations contraintes déformation ne nous permet pas d'utiliser directement les résultats des microséismes pour lesquels les déformations sont petites afin d'évaluer le comportement des sites au cours de forts séismes destructifs qui induisent des déformations d'un niveau beaucoup plus élevé dans le sol, et dégâts dans la plupart des cas.

Les différentes possibilités regroupant les ondes de volume se propageant verticalement, les ondes de volume ayant un angle d'incidence et les ondes de surface de propagation horizontale ont été incorporées surtout le cas des ondes de volume de propagation verticale a été traité couramment avec des méthodes non linéaires ou semi non linéaires et des excitations sismiques réelles.

La plupart des méthodes de calcul sismique utilisent l'hypothèse de Kanai [28] de la propagation verticale des ondes sismiques. Elle se base sur le fait que pour des sites qui ne sont pas très proches de la source du séisme, les ondes sismiques au voisinage de la surface du sol ont une propagation verticale à la suite des réfractions successives sur les interfaces entre les différentes couches du sol de raideur décroissante.

Ceci conduit à une modélisation monodimensionnelle des sites de taille moyenne horizontalement stratifiés. L'hypothèse des ondes de cisaillement à propagation verticale couramment utilisée ne reflète pas la complexité du mouvement sismique mais elle permet d'évaluer avec moins de difficulté les caractéristiques importantes de la réponse sismique pour un bon éventail de conditions locales du site surtout que les structures montrent une résistance moindre vis à vis des vibrations horizontales du mouvement sismique que vis à vis de sa composante verticale [19].

Pourtant les données des petits séismes ou des micro-séismes peuvent servir à contrôler la validité de certaines procédures analytiques, surtout pour les gammes inférieures de déformations et le couplage de leurs résultats avec ceux des méthodes analytiques peut permettre de recouvrir avec certaines précautions des extrapolations mais à eux seuls, ils ne peuvent procurer une base suffisamment valable pour des prévisions d'intérêt parasismique.

2.3.3. Etudes basées sur les calculs sismiques.

La difficulté d'établissement de relations empiriques grâce à l'accumulation de suffisamment de fortes secousses en un temps raisonnable et l'inadaptation de l'extrapolation des données de microséismes ont incité des efforts considérables pour le développement des procédures de calcul qui seront capables d'une évaluation relativement fidèle de la réponse des sols sous les chargements sismiques, en faisant intervenir les caractéristiques du sol et de l'excitation sismique.

Les difficultés à surmonter dans l'élaboration des méthodes de calcul sismique pour l'étude des effets des conditions locales du site sont :

L'évaluation et le choix de la modélisation de l'excitation sismique de référence et de comportement du sol ainsi qu'une meilleure représentation de la géométrie du modèle et l'utilisation de techniques numériques fiables.

-Le choix des types d'ondes qui seront introduits est d'une importance moyenne, en effet pour l'ensemble de la gamme de référence qui intéresse le génie sismique il était généralement très difficile de déterminer d'après les données sismologiques la contribution exacte des différents types d'ondes dans le mouvement sismique au voisinage de la surface du sol.

Les ondes de cisaillement sont cependant reconnues pour être la cause essentielle des différentes procédures de calcul comme la méthode des éléments finis avec des matrices de masses concentrées ou consistantes. La méthode des différences finies ou la méthode de propagation des ondes ont été élaborées en utilisant des techniques numériques disponibles.

On peut tenir compte de la non linéarité du sol par la méthode équivalente linéaire [22].

Des efforts ont été aussi effectués pour l'élaboration des méthodes non linéaires directes, Martin (1975), Taylor (1979). Mais il reste encore des progrès à faire dans l'élaboration dans les cas courants. La méthode d'équivalence linéaire (Surtout d'après l'insertion d'un amortissement variable, Idriss et Seed (1974a) [29] a été largement utilisée et a connu des succès remarquables dans la prévision de la réponse de différents sites à des excitations sismiques.

Sur la Fig.(2-4) on trouve un résumé des comparaisons des accélérations calculées par ces méthodes numériques avec celles enregistrées sur plusieurs sites au cours de quelques séismes de Elcentro (1940) ; San Francisco (1957) Mexico City(1962) ; Anchorage Alaska (1964) Nigata (1964) ; Caracas (1968) ; Union Bay Seattle

(1968) ; et plusieurs séismes Japonais d'après Idriss et Seed) [29] .

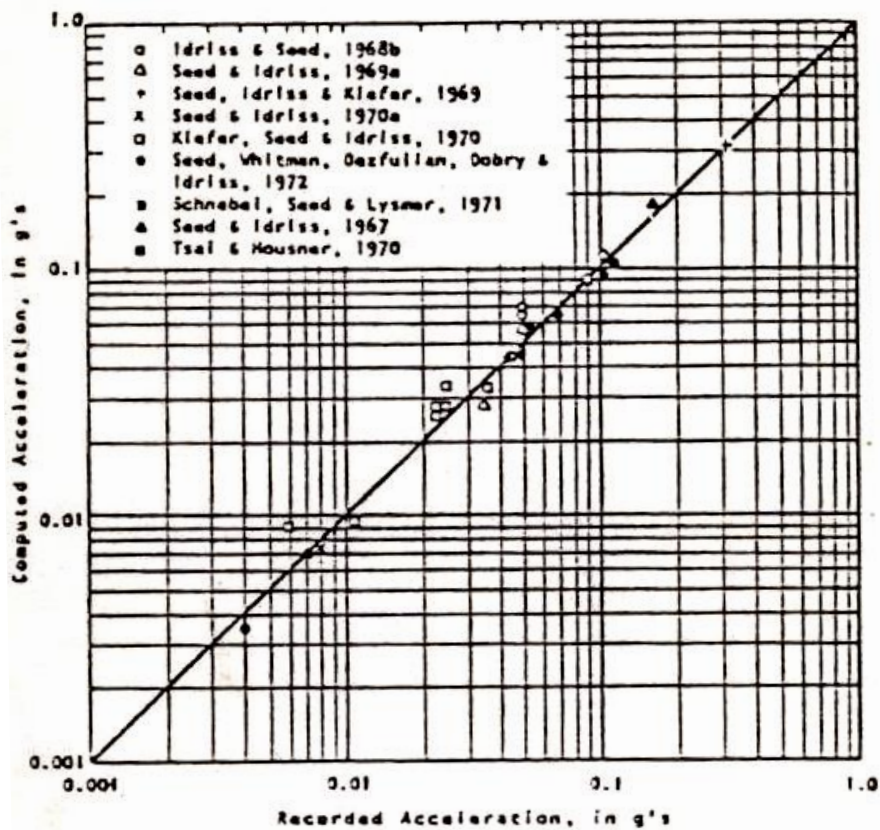


Fig.2.4 - Comparaison entre les accélérations enregistrées et les accélérations calculées (d'après Idriss et Seed, 1974).

Mais cet optimisme ne s'étend pas à toutes les méthodes de calcul en usage. Sur la fig.(2-5) les spectres au sous-sol du Southern Pacific Building (Un site d'alternance de sable et d'argile de 70 m) lors du séisme de San Francisco du 22 Mars 1957 dans les deux directions horizontales ont été comparés avec le spectre obtenu par un calcul monodimensionnel linéaire, Donovan[11] .Le résultat des calculs représente en gros l'allure des spectres enregistrés mais il montre une amplification plus élevée pour les périodes voisines de la période fondamentale de la couche du sol (1,25 sec) cette comparaison révèle aussi le point faible des modèles monodimensionnels qui ne font pas une distinction entre les deux directions du mouvement sismique.

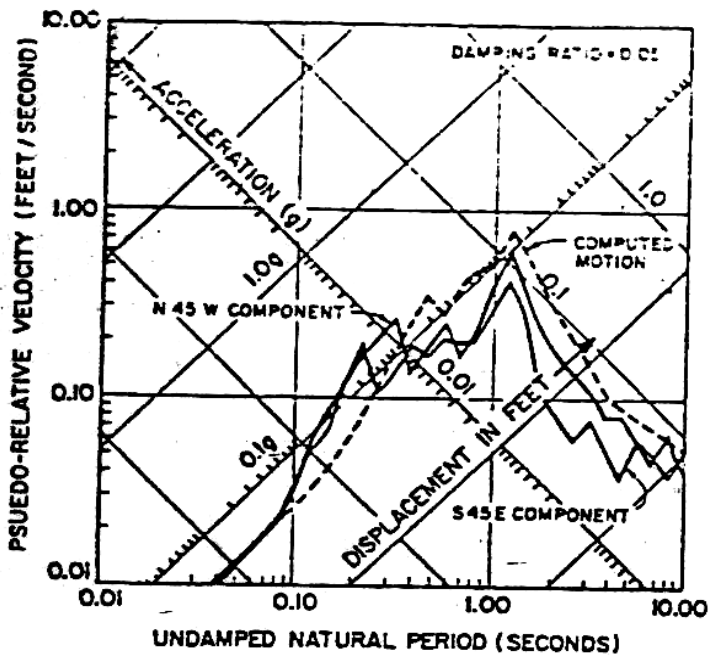


Fig. (2.5)-Comparaison entre le spectre de réponse obtenu par les calculs et ceux déduits des enregistrements (séisme du 22 Mars 1957 de San Francisco) (Donovan, 1978).

La figure. (2-6) représente la comparaison, pour un même site entre les enregistrements du séisme de 1969 de Santa Rosa et les résultats de calcul monodimensionnel linéaire dans ce cas, pour arriver à un bon accord entre les enregistrements et le calcul, il a fallu réduire dans les calculs la durée des excitations.

Chaque méthode de calcul détient un domaine plus ou moins restreint de validité au niveau des intensités des excitations envisageables par rapport à la loi de comportement incorporé.

Sur la figure (2-7) et la figure (2-8) nous reproduisons les résultats d'une comparaison des enregistrements du séisme du 4 Août 1974 sur le site d'Ohgishima au Japon avec les spectres de réponse calculés aux différentes profondeurs du sol en utilisant une loi de comportement élastique linéaire pour le sol et les ondes de cisaillement de propagation verticale. Les traits pleins correspondent aux valeurs enregistrées et les pointillés à celles des calculs.

Les calculs donnent avec une assez bonne précision les contenus fréquentiels et les intensités des mouvements sismiques enregistrés, même si on trouve des pics légèrement amplifiés par les calculs mais il faut noter que dans ce cas l'accélération maximale à la surface du sol ne dépassait pas 0,01g.

L'utilisation d'une loi élastique linéaire est ainsi justifiable pour les basses intensités du mouvement sismique: ceci ne justifie pas la tendance de certains chercheurs qui continuent à l'utiliser pour étudier les effets des conditions du site des séismes de fortes intensités.

Enfin, notons que les résultats des études faits à l'aide de modèles simplifiés ne faisant intervenir que les ondes de volume ou que les ondes de surface de Rayleigh, ne suffisent pas à eux seuls pour tirer des conclusions propres à l'établissement de règles de prévision des risques sismiques en fonction des conditions locales du site. Même s'ils tiennent compte de la non linéarité des propriétés du sol, ils ne suffisent pas pour fournir les données nécessaires aux calculs parasismiques comme les accélérogrammes ou les spectres de calcul liés au site.

Toutefois, ils peuvent éclaircir la complexité du phénomène et améliorer nos connaissances dans ce domaine. Leurs résultats peuvent être considérés comme un guide supplémentaire pour l'estimation des effets du Site sur le mouvement sismique, cela en l'absence des données empiriques suffisantes et parallèlement à des observations sur le terrain.

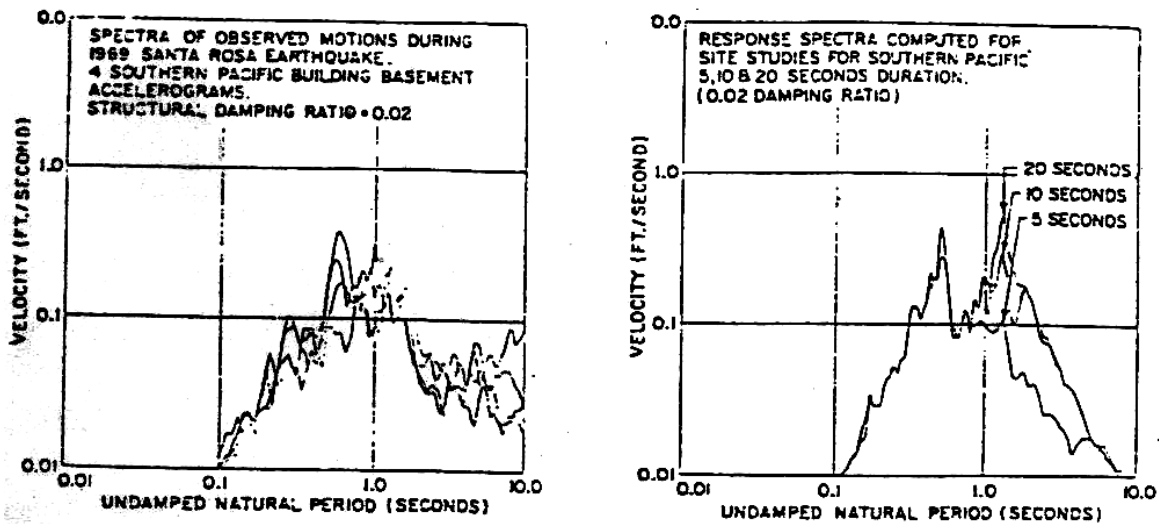


Fig.2.6- Spectre de réponse enregistré à Southern Pacific Building au cours du séisme de Santa Rosa en 1969, comparé avec les spectres obtenus par les calculs (Donovan, 1978).

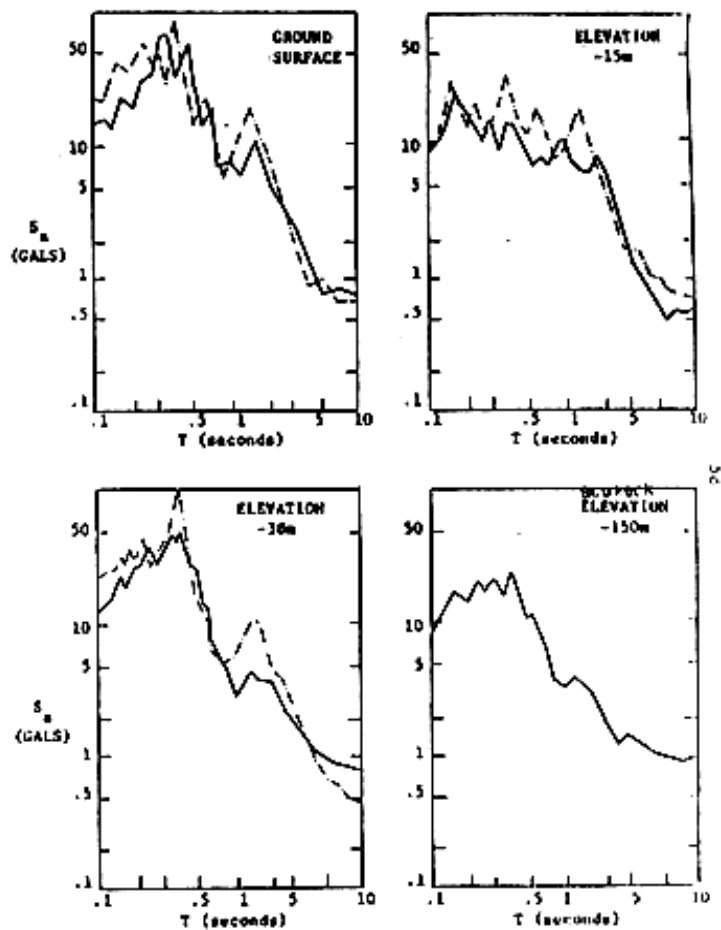


Fig. (2-7) le profil du site et la variation des vitesses des ondes de cisaillement avec la profondeur.

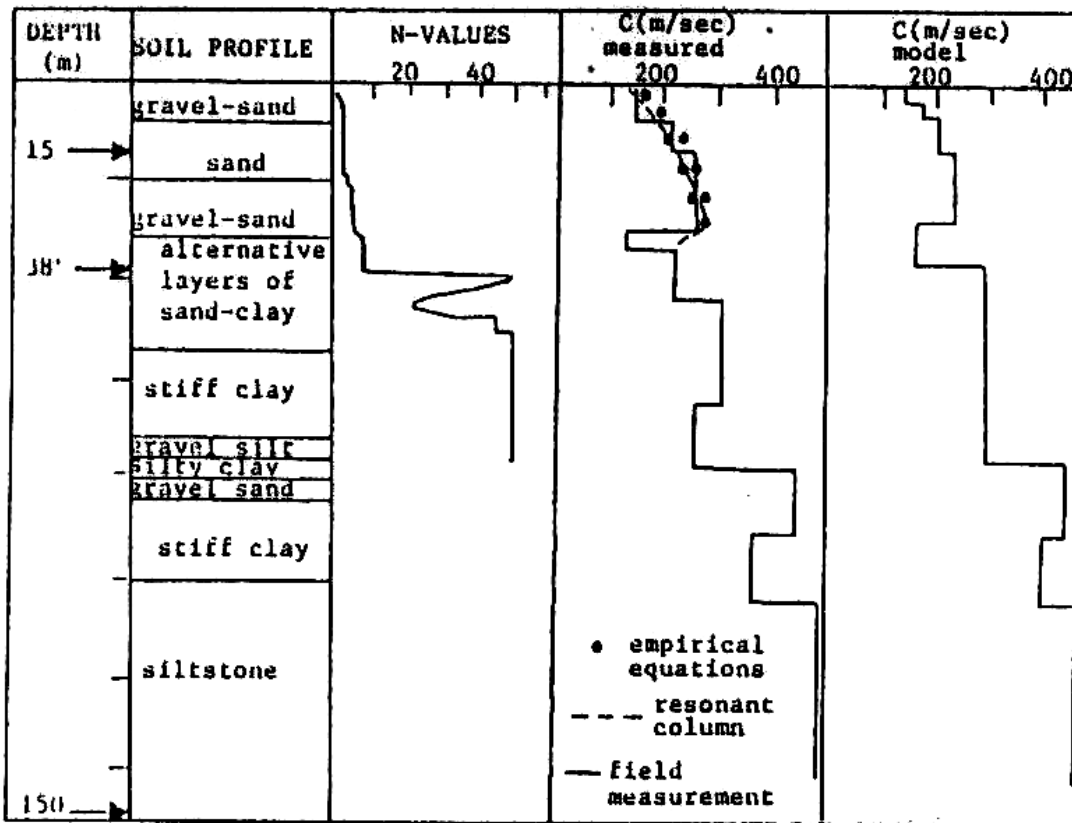


Fig. 2-8 Profil du site Ohgishima

2.3.4. Classification des sites

Les premières tentatives de considération de l'influence des conditions locales Chapitre 4-1-1 se sont traduites par une simple distinction entre les sites rocheux ou de sol dur d'une part et le terrain alluvial ou sol mou d'autre part.

Les conclusions faites alors se résument ainsi :

- a)- Pour un terrain rocheux, les déplacements sont relativement faibles par rapport à ceux d'un terrain alluvial tandis que les accélérations sont plus élevées pour les basses périodes du mouvement sismique.
- b)- Les déplacements sont plus élevés là où les couches alluviales sont plus épaisses.
- c)- Les couches d'alluvions présentent des pics spectraux plus étalés dans le domaine des fréquences et ceux-ci se produisent à des périodes plus élevées que ceux des sites rocheux.

D'après les sources Japonaises, les sites à alluvions profonds connaissent une amplification des accélérations plus élevées de l'ordre de 1,3 à 2 fois plus grandes que les sites rocheux Ceci est observé pour les distances à la source supérieures à 50 Km. Pour des distances inférieures la tendance se montre inversée, Okamoto[24]. Il faut noter que cette dernière conclusion est établie sans une distinction entre les résultats des faibles et des fortes secousses.

Par contre, d'après une étude statistique faite par Seed et al [19] les accélérations maximales décroissent en général avec les diminutions de la dureté des sols fig.(2-9). Sur cette figure, les accélérations du site rocheux ont été prises comme référence. On peut constater qu'ici, les sites ont été classés en quatre catégories: rocher, sol dur, sol pulvérulent profond et sol mou; et que l'influence du type de sol est plus prononcée pour les niveaux de sollicitation plus élevés.

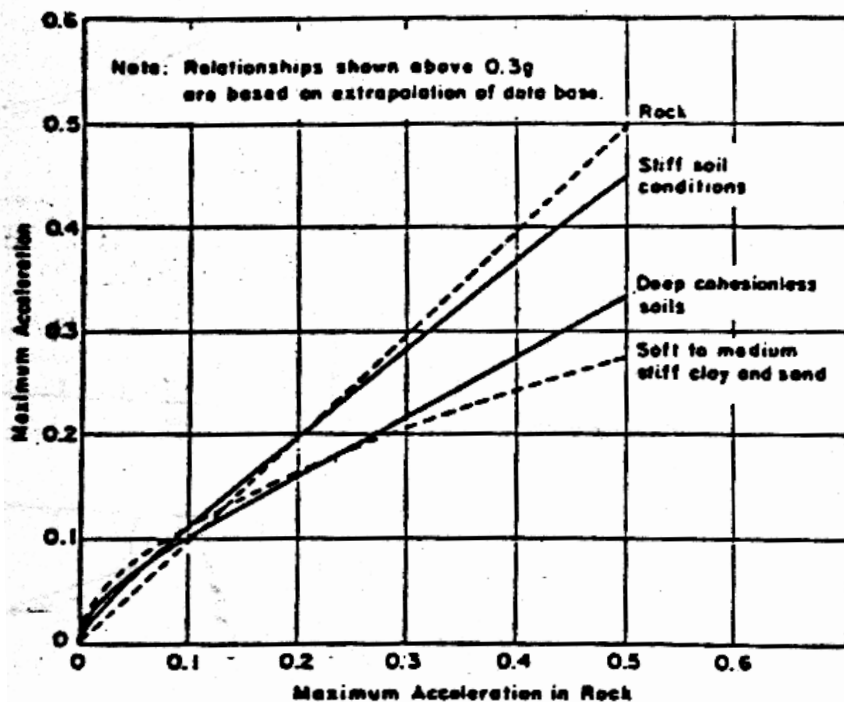


Fig. (2-9) Comparaison approximative entre les accélérations maximales sur le rocher et les autres types de sols (d'après Seed et al, 1975).

Ces dernières années, des recherches plus systématiques ont été effectuées pour introduire l'influence du type de site dans les études des prévisions des risques sismiques. A cette fin, des classifications un peu plus élaborées malgré que certaines simplifications, ont été adoptées.

Nous énumérons plus loin ces différentes classifications.

Au départ, le site rocheux qui est le cas le plus simple de conditions locales a été étudié. Des relations empiriques ont été établies alors entre les différents paramètres du mouvement sismique du site rocheux.

Il reste peu d'ambiguïté en ce qui concerne la dénomination et dans une certaine mesure les effets d'un site rocheux sur les paramètres du mouvement sismique tout au moins dans les régions sismiques concernées par ces études.

Mais il ne semble pas qu'il existe de consensus pour les autres catégories de sites, comme le cas d'un substratum rocheux surmonté par des couches de sol de propriétés variables aussi bien pour leur désignation que pour leur classification. En outre, différents chercheurs qui ont essayé d'établir des relations empiriques en faisant une distinction vis à vis du genre de site n'ont pas traité le problème d'une manière uniforme.

Diverses raisons sont alors à l'origine de cette situation:

- a)- La volonté de grouper la grande variété des conditions locales en une classification simplifiée.
- b)- La procédure du choix des paramètres étudiés et les enregistrements sélectionnés, ainsi que le nombre relativement restreint de ces derniers dans la plupart des cas.
- c)- Le manque des données précises sur la nature exacte des sites choisis.
- d)- La difficulté de séparation des effets des conditions locales de ceux des autres facteurs; ainsi que l'élimination des erreurs de l'appareillage et de l'influence des fondations.

Ce qui a créé un désaccord qui va depuis l'évaluation des effets de chaque catégorie de site sur les paramètres du mouvement sismique jusqu'à la mise en cause de ces effets.

C'est ce qui ressort de l'étude visualisée par la fig. (2-10) montrant les variations des accélérations maximales en surface du sol pour le site rocheux et le sol dur. On voit clairement que surtout pour des distances supérieures à 30 Km de la source, les accélérations maximales pour le sol dur et le rocher ne diffèrent guère

En effet, la dispersion des enregistrements provenant d'une catégorie de site est comparable à la différence qui puisse exister du fait de l'influence des conditions locales du site, ceci pourrait mettre en doute l'influence des conditions locales du site

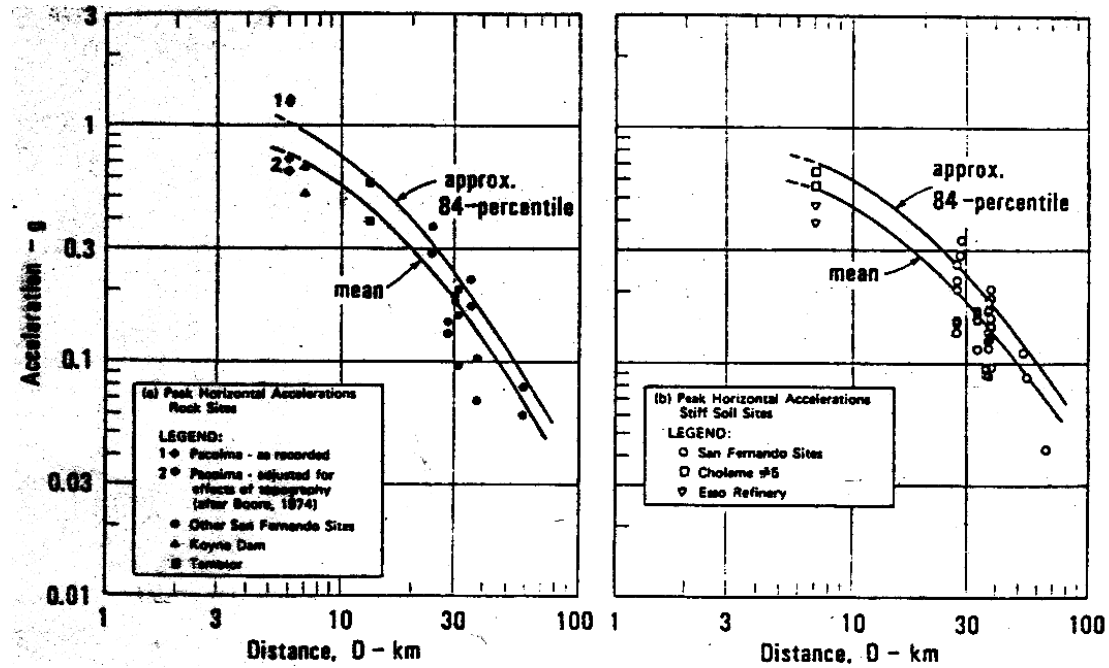


Fig. 2-10 Les accélérations maximales sur le rocher et le sol dur (D'après Seed et Power, 1978).

La figure (2-11) montre les variations des vitesses maximales pour les mêmes enregistrements. Ici on trouve des valeurs plus élevées pour les sites du sol dur que les sites rocheux.

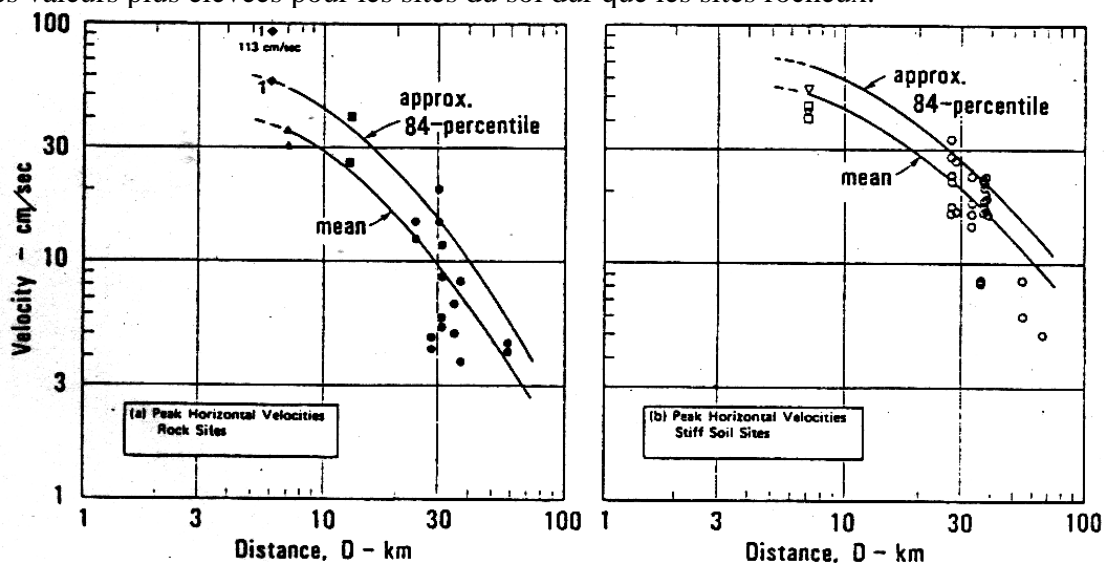


Fig. 2-11. Les vitesses maximales et le sol dur (d'après Idriss et Power, 1978)

En ce qui concerne la classification des sites, il existe même pour le cas des sites rocheux, des confusions sur la nature réelle du sous-sol et celle considérée par chaque auteur. Le manque de données précises sur la nature des sites utilisés qui seraient fournies par des forages et les mesures in situ des vitesses des ondes sismiques, en est la cause.

Aux Etats Unis, Duke et Al (1972 et 1976) furent parmi les premiers à essayer d'entreprendre une classification des sites.

Dans leurs études, ils distinguent deux types de sites rocheux et deux types de sites du sol meuble.

Trifunac et Brady [7] ont classifié les sites en trois groupes: roche, sol dur, sol granulaire profond et sol mou.

Mohraz[30] a classifié aussi les sites en quatre catégories: rocher, moins de 10 m d'alluvions sur le rocher, de 10 m à 60 m d'alluvions sur le rocher et site alluvial.

Idriss et Power (1978) et Sadigh et Al (1978) ont utilisé trois classifications: rocher, sol dur et sol profond qui est analogue à la proposition de Grant et Al (1978).

Mc Guire [13], Boore et Al [20] ne distinguent que deux catégories de sites: roche et sol.

Cette brève énumération montre la diversité des classifications pourtant simplifiées que divers auteurs ont adoptées dans leurs études pour la prévision des risques sismiques. D'autre part, mis à part quelques exceptions, c'est seulement pour les sites rocheux que les dénominations concordent. Pour les autres catégories de sites, il n'existe aucune correspondance entre les classifications des différents auteurs. Un même site a été généralement classé différemment par chaque auteur, à l'exception de quelques sites pour lesquels il y'avait une campagne de reconnaissance détaillée, Idriss [4].

Donc, en l'état actuel nous ne disposons d'aucune classification faisant l'unanimité et suffisamment détaillée pour représenter les différents effets des conditions locales du sol dans un but d'utilisation directe pour prévoir les paramètres du mouvement sismique exception faite du site rocheux

2.3.5. Modification des spectres de calcul en rapport des conditions locales

L'idée de l'élaboration des spectres de calcul dépendant des conditions du site provient de la volonté de faire intervenir l'effet des conditions locales du site dans la détermination des paramètres spectraux de référence dans des conditions telles que les enregistrements manquent et que les calculs sont jugés trop coûteux .

On peut agir alors par analogie en choisissant des spectres normalisés qui sont modifiés suivant la nature du sous-sol d'après la moyenne ou l'enveloppe des spectres enregistrés sur d'autres sites comparables dans d'autres régions .

D'après le catalogue des accélérogrammes Japonais existants, Oshaki (1969) a classé d'un côté ceux qui furent enregistrés sur des sites de sol dur et de l'autre côté ceux qui furent enregistrés sur les sites de sol mou multicouches.

Les ordonnées spectrales calculées ont été normalisées par rapport à l'accélération maximale enregistrée sur chaque site fig.(2-12).

On remarque que les spectres des sites rocheux ou de sol dur présentent des pics uniques de valeurs plus élevées par rapport au site multicouche et cela pour des périodes plus petites de l'ordre de 0,2 à 0,3 secondes. Par ailleurs les spectres du sol multicouche montrent divers pics étalés dans le domaine des périodes et très variables selon les sites.

Mohraz [30] et Seed et al [19] ont aussi proposé des spectres de calcul dépendant des conditions locales du site Seed et Al [19], dans leur étude déjà mentionnée, en se basant sur un certain nombre d'enregistrements

Japonais et Américains ont conseillé quatre séries de spectres allant du site rocheux au dépôt profond de sol mou, fig.(2-13).

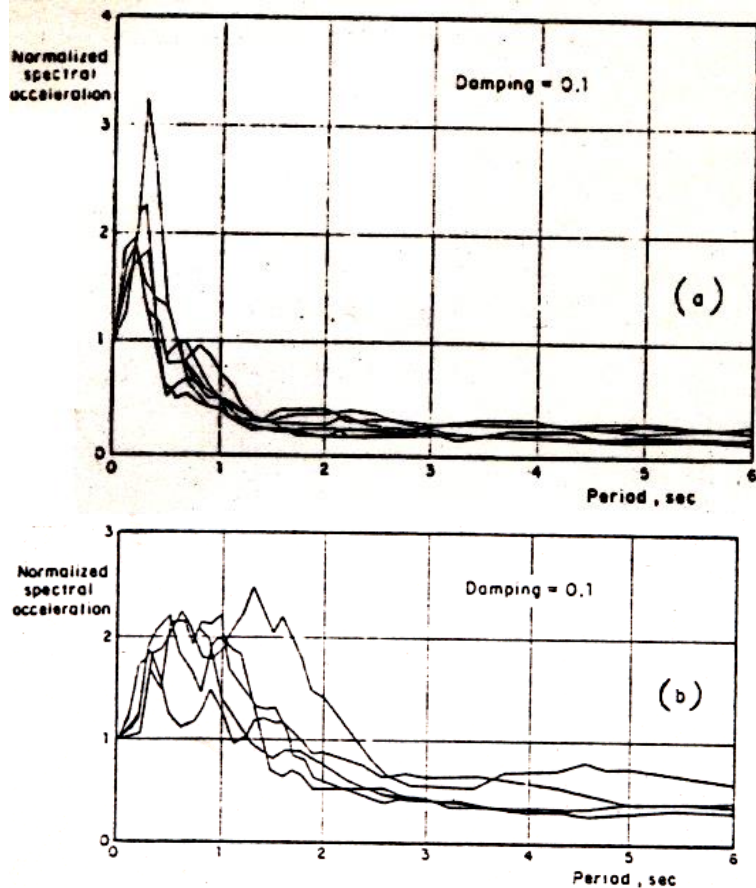


Fig.2-12. Spectres de réponse des accélérations pour le site rocheux et sol dur (a), le sol mou et multicouche (b) (d'après Ohsaki).

L'étude de ces spectres nous montre que des pics des spectres de réponse se produisent pour des périodes plus basses avec l'accroissement de la dureté des sols de l'ordre de 0,15 secondes pour le rocher; 0,25 sec pour le sol dur et 0,35 pour le sol granulaire. Pour le cas du sol mou la période d'apparition du pic peut varier entre 0,3 sec et 1 seconde. Dans la gamme des périodes moyennes on assiste à des valeurs spectrales plus élevées avec décroissance de la dureté des sites et une tendance inversée pour les périodes basses.

Il est nécessaire de rappeler que la période utilisée rend ces propositions trop conservatrices surtout pour le cas des sols meubles Faccioli et Rezendez (1976).

D'autre part, les influences des autres facteurs comme la magnitude ou la distance du foyer ont été négligées (Voir chapitre I). Enfin, il semble que ces résultats sont en tâchés d'erreurs provenant de la procédure du choix des enregistrements attribués à chaque catégorie de site et de l'influence déviatoire des appareils de mesure et des fondations, Crouse [8].

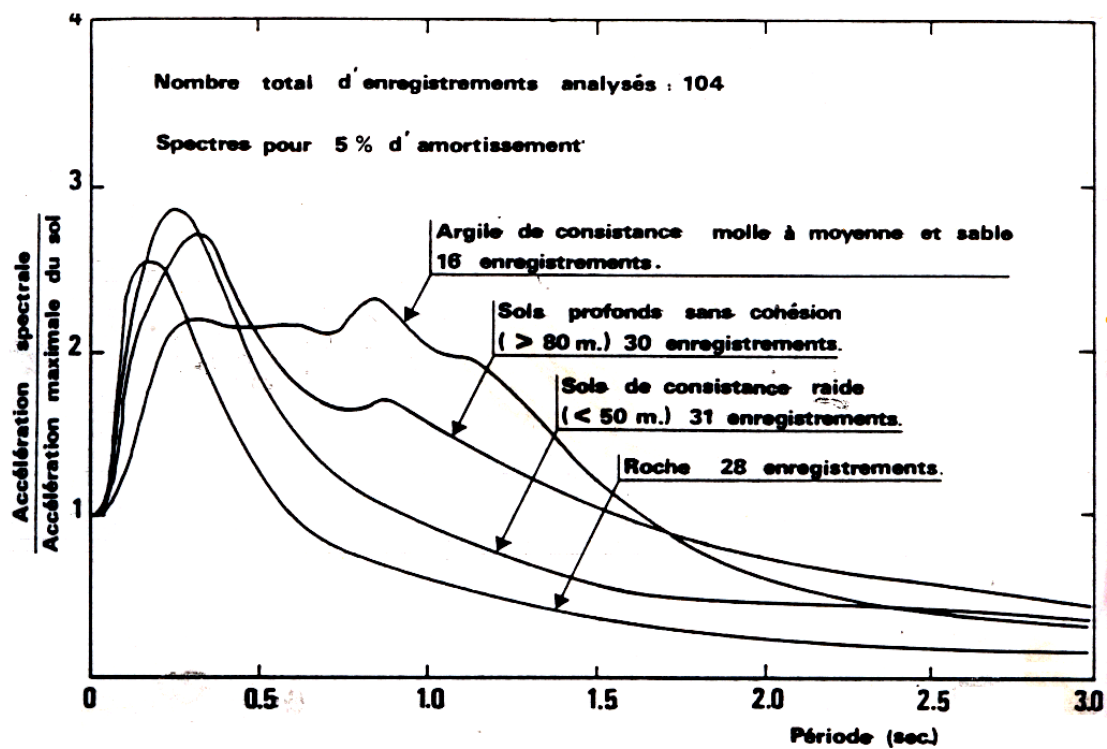


Fig. (2-13). Spectres de réponses des accélérations pour différents types de sols (d'après Seed et al, 1976).