

EFFETS DE SITE

Il n'est pas facile de savoir qui des rochers ou des sédiments sont les sols les plus critiques vis-à-vis du séisme. Certains reliefs rocheux montrent des amplifications inquiétantes tout comme certains remplissages sédimentaires : c'est la nature des formations géologiques mais aussi la géométrie des reliefs et des bassins qui provoquent les plus fortes amplifications du mouvement sismique, avec des conséquences directes pour la résistance des structures. Il faut donc pouvoir les évaluer afin de s'en prémunir.

ORIGINE DES EFFETS DE SITE.

Lors des grands séismes historiques, l'analyse des intensités a amené les scientifiques à attribuer au sol des effets sur la distribution des dommages. Différents types de sol modulent en effet la sévérité des ondes sismiques et en conséquence la distribution des dommages. C'est ce que l'on appelle les **effets de site**. En général, on distingue les effets liés à la nature des sols de ceux liés à la topographie.

LES EFFETS LIÉS À LA TOPOGRAPHIE

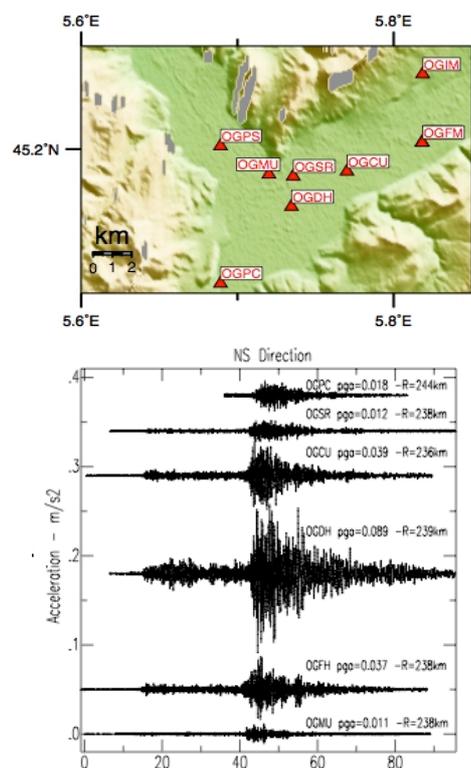
Quelques observations réalisées en France et à l'étranger ont montré que le mouvement sismique du sol était perturbé par la présence de topographie marquée. C'est l'hypothèse avancée pour expliquer les dommages importants observés lors du séisme de **Lambesc** (1906) sur le village de Rognes, situé sur un relief marqué. Quelques exemples montrent ailleurs des destructions plus marquées au sommet des reliefs: par exemple lors du séisme de San Fernando (1971), en 1987 lors du séisme de Whittier Narrows (California, 1987) ou en 1994 au cours du séisme de Northridge (Californie) de 1994. Pour ce dernier cas, Spudich, un sismologue de l'US Geological Survey, observa de fortes amplifications du mouvement sismique généré par une série de répliques entre le haut et le bas d'un mont situé dans Los-Angeles. Ces effets ont également été révélés par des simulations numériques qui montrèrent que l'effet principal de la topographie est une amplification importante du mouvement du sol (**30 à 100%** selon les auteurs), dans des bandes de fréquences étroites (**2-15 Hz**). La présence et la localisation de cette amplification sont étroitement liées à la caractéristique de l'onde sismique incidente (**longueur d'onde**) et à la géométrie de la pente. Ces effets mal connus sont attribués à l'interférence entre le relief et les ondes, ou parfois à l'interférence qui se produit entre les ondes directes venant du séisme, et celles qui se focalisent dans le relief.

LES EFFETS LIÉS À LA GÉOLOGIE.

Les effets de site de nature géologique ont quant à eux bénéficié d'un grand nombre d'observations systématiques. La plupart des villes exposées aux séismes dans le monde ont présenté des **dommages variables en fonction de la nature du sol**, d'autant plus qu'elles sont quasi systématiquement fondées sur des remplissages alluvionnaires. Coburn et Spence affirment que, entre des sols raides ou rocheux et des sédiments mous, les intensités macrosismiques peuvent varier d'un **niveau de dommage**. Pour les constructions les plus faibles (par exemple en maçonnerie), cela peut correspondre à une augmentation des dommages de l'ordre de 30%, qui se traduit en terme de pertes de vies humaines par une augmentation considérable des victimes. En France, certaines villes présentent des effets de site majeurs. Ce sont par exemple les cas de Grenoble, d'Annecy, de Nice ou de Lourdes qui depuis quelques années font l'objet d'une surveillance initiée par le **Réseau Accélérométrique Permanent**. En général, on distingue trois observations caractérisant la présence d'effets de site: **l'amplification** du mouvement du sol dans les couches molles généralement situées en surface, la **résonance fréquentielle** au sein de ces couches, et **l'allongement** du mouvement sismique.



Exemple d'effets due au relief: la ville de Rognes, construite sur un relief marqué, présente des dommages plus importants en son sommet lors du tremblement de terre de Lambesc 1909.



Exemple d'effets due à la géologie: Grenoble, construite sur un bassin sédimentaire important et constitué de formations molles, présente systématiquement des amplifications du mouvement. Sur cet exemple, la station du réseau accélérométrique permanent RAP située sur le rocher OGMU a une amplitude et une durée limitées par rapport aux autres stations situées sur les sédiments.

CONSÉQUENCE DES EFFETS DE SITE SUR LES STRUCTURES

La plupart des régions caractérisées par un effet de site majeur sont souvent constituées d'un remplissage de formations molles sur un horizon géologique plus raide. Par molles on entend des formations dans lesquelles la propagation des **ondes de cisaillement β** est relativement faible. Selon la classification des sols donnée par les codes de **dimensionnement parasismique (EC8)**, les vitesses β peuvent atteindre pour les sols les plus mous des valeurs inférieures à 180 m/s (**type de sol D**) avec exceptionnellement des valeurs inférieures à 100 m/s (sol type S1). Inversement, les sols raides ont des vitesses de propagation des ondes S supérieures à 800 m/s (**type de sol A**). Ils sont souvent associés à des sédiments raides à très raides, ou à des rochers fracturés ou compacts (par exemple, $\beta=2000$ m/s pour un granite sain).

Dans le cas d'une formation sédimentaire composée de couches planes superposées les unes sur les autres, l'onde sismique pénètre la couche sédimentaire. Elle est **piégée** au niveau de l'interface inférieure entre le sol et le substratum rocheux. Plus le sédiment sera mou par rapport au rocher, plus l'énergie sismique sera concentrée et piégée dans la couche de surface: c'est le principe du tambour ou de **la caisse de résonance**. Une des conséquences directes est donc de créer un **phénomène de résonance** de la couche, qui se met à vibrer à sa fréquence naturelle. Cette fréquence, dite **fréquence fondamentale**, ne dépend que de la vitesse des ondes et de l'épaisseur des sédiments. La conséquence directe est donc une focalisation des plus hautes énergies sismiques dans une bande de fréquence étroite. Plus un **sédiment sera mou**, plus il amplifiera vers les basses fréquences, c'est-à-dire **pour les structures les plus hautes**. Inversement, plus les sédiments seront fins, plus les amplifications auront lieu haute fréquence, avec des conséquences pour les **bâtiments les moins élevés**.

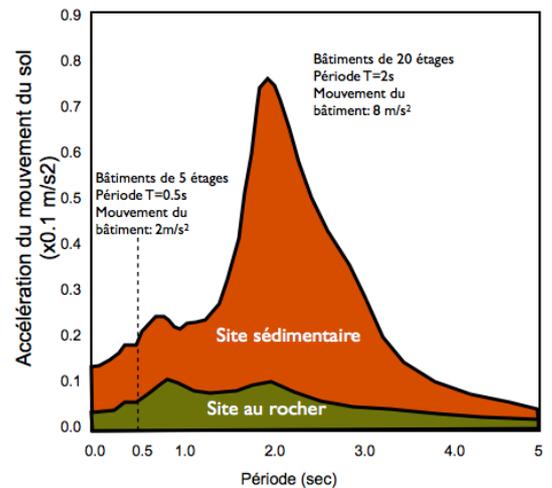
A Mexico, ce phénomène particulièrement marqué a été prépondérant sur la localisation et le type de dommage. Rapidement après la secousse, les scientifiques ont pointé un phénomène de résonance entre le sol et les structures, entraînant une distribution particulière des dommages où seuls les bâtiments de 10 à 20 étages étaient considérablement détruits. **Mexico** est une situation exceptionnelle mais des situations identiques peuvent se reproduire ailleurs. On comprend alors les impacts et les conséquences que peuvent avoir ces effets sur la plupart des milieux urbains.

Phénomène de résonance: La résonance représente le phénomène selon lequel un système mécanique est sensible à certaines fréquences. Un système résonant peut accumuler une énergie, si celle-ci est appliquée sous forme périodique, et proche d'une fréquence dite "fréquence de résonance" ou "fréquence naturelle". Soumis à une telle excitation, le système va osciller de plus en plus, jusqu'à atteindre un régime d'équilibre qui dépend des éléments dissipatifs du système (amortissement), ou bien jusqu'à une rupture d'un composant du système. Si une structure ne dissipe pas suffisamment son énergie de vibration ou si la sollicitation est entretenue à une fréquence égale à celle de la structure, celle-ci s'endommagera.

EN SAVOIR PLUS.

Bard, 2002, Risque Info n°13, IRMA, Grenoble.

Guéguen, 2009, Habilitation à Diriger les Recherches, Université J. Fourier, Grenoble.



Amplification du mouvement du sol lors du tremblement de terre de Mexico (1985). Le mouvement sismique est représenté en fonction du mouvement d'un oscillateur ayant différentes périodes de vibration. La période d'oscillation de la couche sédimentaire montre une forte amplification à 2 secondes, là où toute l'énergie sismique se focalise. Ce sont donc les bâtiments ayant cette période qui vont être les plus secoués.



Illustration du phénomène de résonance: à proximité d'un bâtiment de 10 étages intact, un bâtiment d'une vingtaine d'étages a été complètement détruit lors du séisme de Mexico (1985), dû à un effet de site important.

LES BÂTIMENTS CONSTRUITS SUR DU ROCHER NE SONT PAS PLUS SÛRS QUE LES AUTRES. Une chose est certaine par contre: des conditions de sol particulières entraînent des mouvements du sol particuliers. Dans la phase de conception de la structure, la réglementation sismique conseille ainsi de tenir compte des effets de site qui peuvent moduler le mouvement du sol de référence à prendre en compte pour le dimensionnement du projet.