

EFFETS DE SITE

Il n'est pas facile de savoir qui des rochers ou des sédiments constituent 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 les intégrer à la définition de l'aléa sismique.

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

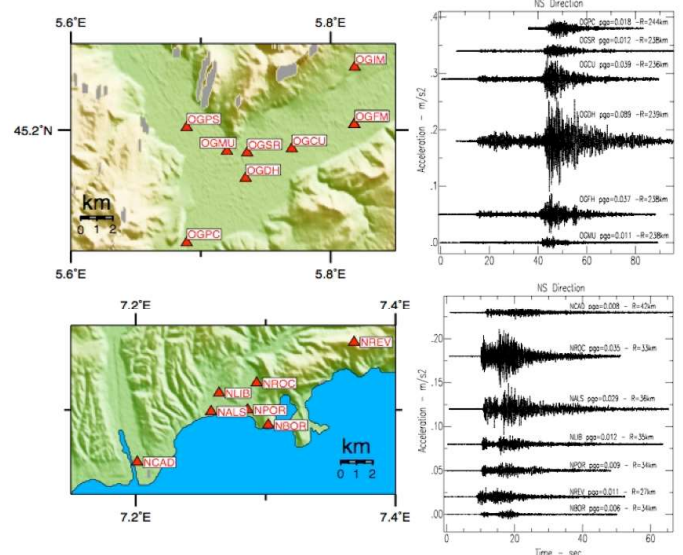
Quelques observations réalisées en France et à l'étranger ont montré que le mouvement sismique du sol était perturbé par la présence d'une topographie marquée. C'est l'hypothèse avancée pour expliquer les dommages importants observés lors du séisme de **Lambesc** (1906) sur le village de Rognes, situé sur un relief marqué. Quelques exemples montrent ailleurs des destructions plus prononcées au sommet des reliefs : par exemple lors du séisme de **San Fernando** de 1971 (Californie), en 1987 lors du séisme de **Whittier Narrows** (Californie) ou en 1994 au cours du séisme de **Northridge** (Californie). Pour ce dernier cas, Spudich, un sismologue de l'US Geological Survey, observa de fortes amplifications du mouvement sismique produit par une série de répliques sismiques entre le haut et le bas d'un relief situé dans Los-Angeles.



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

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.



Exemple d'effets dû 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.

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. Par ailleurs, ces villes sont quasi systématiquement fondées sur des **zones de remplissages alluvionnaires** qui **contribuent à l'amplification des mouvements du sol**.

Coburn et Spence affirment que, entre des sols raides ou rocheux et des sédiments mous, les intensités macrosismiques peuvent varier d'un niveau. Pour les constructions les plus fragiles (par exemple en maçonnerie), cela peut correspondre à une augmentation des dommages de l'ordre de 30%, soit une augmentation considérable des pertes humaines.

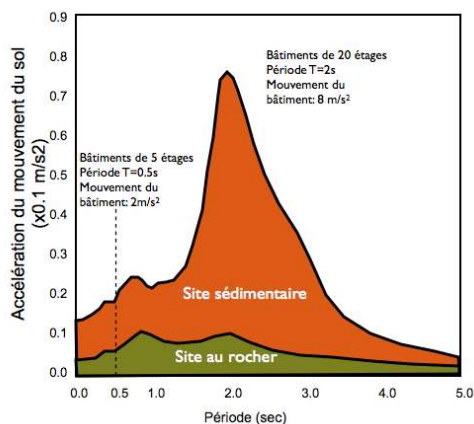
En France, certaines villes présentent des effets de site majeurs. Ce sont par exemple les cas de **Grenoble**, d'**Annecy**, de **Nice** ou de **Lourdes** qui depuis quelques années font l'objet d'une surveillance initiée par le **Réseau Accélérométrique Permanent**.

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.

CONSEQUENCES DES EFFETS DE SITE SUR LES STRUCTURES

Dans les régions caractérisées par un effet de site majeur, les sols sont souvent constitués de formations sédimentaires, situées au-dessus d'une formation plus dure composée de roche, que l'on appelle le **substratum rocheux**. Dans les sédiments, les ondes de cisaillement émises par un séisme **se propagent à une vitesse plus lente que dans la roche**. Selon la classification des sols donnée par les codes de dimensionnement parasismique (EC8), ces vitesses 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, dans les sols raides, les vitesses sont supérieures à 800 m/s (type de sol A). Ils sont souvent associés à des formations sédimentaires dures à très dures, ou à des formations de roche fracturée ou compacte (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 se retrouve piégée entre le sol et le substratum rocheux.



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.

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.

Ce phénomène de résonance dans la couche entraîne la vibration de cette dernière pour une fréquence dite fondamentale, qui dépend de la vitesse des ondes et de l'épaisseur des sédiments qu'elle traverse.

Plus la couche constituée de sédiments mous sera épaisse, plus l'onde sismique sera amplifiée dans les basses fréquences. C'est-à-dire qu'elle aura principalement un impact sur les structures les plus hautes.

Inversement, plus la couche sera fine, plus l'onde sera amplifiée dans les hautes fréquences, avec des conséquences sur les bâtiments les moins hauts.

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.



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

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 dissipateurs 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.

LES BATIMENTS CONSTRUITS SUR DU ROCHER NE SONT PAS PLUS SURS 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.