

# La gestion des incertitudes dans le Génie Parasismique ou dans le dimensionnement des ouvrages sous chargements sismiques

Pierre Sollogoub  
CEA/DEN/Saclay

*Article paru dans « La Jaune et la Rouge » (Revue mensuelle de la société amicale des anciens élèves de l'Ecole polytechnique), février 2008.*

Les séismes sont souvent associés dans le subconscient de nos sociétés à des désastres et des destructions de cités entières ; nos cours d'histoire et nos guides touristiques sont remplis de récits de destruction de temples, cités ou même de civilisations sous l'effet de séismes destructeurs. Les séismes provoquent malheureusement de nos jours des destructions importantes accompagnées de nombreuses victimes, lorsque des séismes violents frappent des zones urbaines où les dispositions de protection parasismique sont peu développées.

Un examen plus détaillé des séismes récents montre cependant un tableau plus nuancé. Des séismes forts peuvent frapper des régions dans des pays développés en provoquant peu de dégâts spectaculaires, par contre le coût global de l'évènement peut être élevé ; le séisme de Northridge de magnitude locale 6.7 qui a frappé la région de Los Angeles en 1994 en est une bonne illustration : il a tué 22 personnes et provoqué plus de 100 milliards de dollars de pertes économiques. Par ailleurs, des séismes de magnitude modérée, entre 5.5 et 6.5, peuvent produire des dégâts notables dans certaines régions et passer quasiment inaperçus au Japon, par exemple. La plus grande fragilité de nos sociétés peut également amplifier l'effet de séismes de niveau modeste ; on peut citer pour illustrer ce propos le séisme de magnitude locale 6.7 qui a frappé le sud de Taiwan en décembre 2006. Les dégâts sur l'île ont été mineurs, par contre, en mer, des glissements de terrains ont sectionné quelques uns des câbles de télécommunication, provoquant un arrêt d'internet pendant plusieurs dizaines d'heures dans le sud-est Asiatique ! En Juillet 2007, un séisme de magnitude 6.6, modeste pour la région, a frappé la plus grande centrale nucléaire du monde, Kashiwazaki-Kariwa, sans provoquer d'incidents, autres que mineurs, si ce n'est une panique habituelle quand il s'agit de nucléaire.

Ces quelques exemples simples et partiels illustrent quelques défis posés aujourd'hui au Génie parasismique : faire cesser les désastres dans les mégapoles de plus en plus nombreuses avec de plus en plus d'habitants, et protéger les investissements dans nos sociétés. Les objets concernés seront en premier lieu les bâtiments et ouvrages courants.

Quelques informations viendront compléter ce tableau succinct. On s'intéresse non seulement aux bâtiments de toutes natures : maisons individuelles, immeubles, bâtiments publics - mais aussi aux ouvrages ou composants, concernant par exemple les transports, les télécommunications, les centres de secours, le stockage et la distribution d'eau potable, production et distribution d'énergie ainsi que les ouvrages dits à risque spécial (industries à risque, nucléaire...) car il est de plus en plus demandé de pouvoir assurer une vie « normale » à la cité après le séisme. On peut donner comme exemple ici, que plus de 10 ans après le séisme de Kobé, le port n'a pas retrouvé le trafic qu'il avait avant 1995.

Ce domaine est l'objet d'un grand nombre de réflexions et de travaux dans le monde depuis une vingtaine d'années. Ils ont été initiés par les séismes importants évoqués plus haut, par l'accumulation d'enregistrements de séismes et par l'augmentation des capacités de simulation du comportement par calculs ou à l'aide d'essais dans des laboratoires spécifiques (sur des tables vibrantes par exemple), le tout dans un environnement de plus en plus sensible au risque. Les incertitudes jouent un rôle important car, d'une part, à cause de la faible durée d'observations des séismes, en particulier de forts niveaux, les plus destructeurs, même dans les zones « très » sismiques et d'autre part à cause de l'extrême complexité des événements sismiques (qui doivent être décrits à l'aide de plusieurs paramètres susceptibles de varier dans de fortes proportions et présentant d'importantes dispersions), le tout s'appliquant sur des bâtiments et ouvrages dont le comportement jusqu'à la ruine présente également des dispersions significatives.

## 1. Les grandes étapes conduisant au dimensionnement sismique

Le dimensionnement sismique d'un bâtiment ou d'une installation met en jeu plusieurs disciplines scientifiques ou techniques qui peuvent se classer en deux grands volets :

Le premier consiste à définir sur un site ou une région *l'aléa sismique*, qui est la description et la quantification des différents séismes qui peuvent s'y produire et les exprimer sous une forme de paramètres utilisable pour le dimensionnement des structures. Ils sont définis par deux familles de paramètres, l'une décrivant leur « force » et l'autre, leur taux de répétition dans le temps (période de retour).

Par exemple, en France métropolitaine, on observe un séisme de magnitude 5 tous les 10 ans et 6 tous les 100 ans ; c'est une évaluation globale de l'aléa, mais qui n'est pas suffisante pour le dimensionnement. Dans ce cas, on sera intéressé par exemple à connaître les accélérations maximales sur un site avec leurs périodes de retour ou mieux, par une caractérisation des signaux pouvant se produire, soit sous forme temporelle directe, soit sous forme spectrale.

La détermination s'appuie sur des données :

- *Géologiques et géophysiques*, comme la structure de la croûte, la nature des terrains, l'épaisseur des couches sédimentaires, la nature des contraintes, les différents épisodes tectoniques, les indices de déformation néotectoniques, les failles... et plus récemment, les mesures globales de déformation par GPS.
- *Sismiques* qui sont un indice des déformations actuelles. Les données instrumentées datent en France des années 60 où le Laboratoire de Détection et Géophysique (LDG) du CEA a mis en place un réseau de capteurs sur le territoire. Dans d'autres pays plus sismiques, la mise en place de capteurs est un peu plus ancienne et peut-être plus dense.

On ne connaît qu'une toute petite partie de l'histoire sismique. La sismicité historique ne couvre qu'au maximum 2000 ans en Chine et au Moyen-Orient, 1000 ans en France métropolitaine, 300 ans en Californie. De plus, pour les périodes les plus anciennes, la « connaissance » peut-être floue. Les paramètres que l'on tire de la sismicité sont typiquement la localisation des épicentres, l'intensité épicentrale, la magnitude, la profondeur, les mécanismes au foyer... A partir de toutes ces données, on peut définir des zones dans lesquelles la sismicité peut être considérée comme homogène ainsi que ses caracté-

ristiques essentielles (magnitude maximale, période de retour...). Il est également important d'estimer les effets à distance que sont susceptibles d'engendrer les sources dans chacune des zones. Ces effets sont établis à partir de relations d'atténuation reliant les paramètres d'intérêt pour le génie parasismique (accélération, vitesse ou déplacement maximaux, valeurs spectrales pour des fréquences données...) en fonction de la magnitude et de la distance à la source. Ces relations sont établies à partir d'enregistrements de séismes réels ; des réseaux de plus en plus denses de capteurs sont placés dans beaucoup de pays, plus ou moins sismiques.

Le Japon, par exemple, a mis en place un remarquable réseau très dense, K-Net, consultable en temps réel par internet. En France, plusieurs réseaux (Rénass –Réseau National de surveillance sismique, RAP - Réseau Accélérométrique Permanent- et CEA-LDG, par exemple) permettent d'avoir les mêmes données, mais pour les magnitudes (très) faibles que l'on observe couramment (et fort heureusement pour nous) dans nos régions ; il faut alors utiliser des relations obtenues ailleurs pour extrapoler les données mesurées.

Il faut également rappeler que la quantification des données historiques s'opère à travers l'*intensité*, qui est une mesure, sur une échelle comportant un certain nombre de « barreaux » (12 dans les échelles utilisées en Europe) de la force destructrice d'un tremblement de terre en un lieu donné et qui peut s'évaluer par des observations, témoignages et descriptions, mais qui n'est pas une grandeur physique directement utilisable pour le dimensionnement. Des corrélations entre ces dernières et l'intensité existent ; elles présentent une très grande dispersion : par exemple pour une intensité VIII, correspondant au début des destructions de bâtiments, l'accélération moyenne est de 0.32 g et la moyenne plus une fois l'écart type est de 0.7 g, soit plus de 2 fois plus. Cette dispersion est typique pour l'aléa sismique. Une autre variabilité est introduite par des effets à l'échelle locale : amplification des accélérations par des couches de sol « mou » ou altération significative du signal par des caractéristiques topographiques (effets de sites particuliers dus à des géométries de vallées particulières dont la forme peut induire des amplifications de certains mouvements incidents).

On comprend que ces opérations (de la définition des zones jusqu'aux relations d'atténuation, en passant par la détermination des caractéristiques des séismes qui se sont produits dans chaque zone – magnitude, profondeur... -) conduisent à des incertitudes très importantes sur la définition des mouvements pour le dimensionnement.

Les approches déterministes visent à définir un ou plusieurs scénarios « extrêmes », définis en magnitude et distance au site ; les relations d'atténuation, qui relient à ces paramètres les valeurs d'accélération, permettent de définir les conditions de dimensionnement sur les sites d'intérêt. Depuis une vingtaine d'années, on favorise les approches probabilistes qui considèrent tous les séismes possibles (et pas seulement les « extrêmes ») en introduisant leur fréquence d'apparition, déduite des observations et qui semblent suivre des « lois » assez simples (relation de Gutenberg-Richter, selon laquelle le logarithme du nombre de séismes qui dépassent une magnitude M pendant une durée donnée dépend linéairement de la magnitude).

Les incertitudes peuvent ainsi être introduites et leur effet quantifié, si on a assez de données pour cela. Une idée quantifiée des variabilités qui en résultent peut être donnée par le résultat récent d'une étude probabiliste d'aléa sismique complète menée en Suisse pour des sites de réacteurs nucléaires. Pour une période de retour de séisme égale à 1000 ans, le rapport entre les fractiles 85 % et 15 % de l'accélération évaluée en quantifiant les incertitudes, varie entre 2.5 et 3, selon les sites.

Le second volet concerne le dimensionnement des ouvrages, structures et composants, et consiste à déterminer les dimensions et les formes des éléments de structures participant à la résistance aux effets du séisme, en général à partir de calculs de « simulation » du comportement des structures, ainsi que les dispositions constructives qualitatives et quantitatives à appliquer. Ici également, il y a une variabilité significative dans le comportement, due à des facteurs tels que les différences (aléatoires) dans les caractéristiques des matériaux, les détails de réalisation, la différence des charges permanentes présentes lors du séisme, l'influence des éléments non structuraux, comme par exemple les remplissages en maçonnerie servant de cloisons, les propriétés et la réponse fine du sol au voisinage de l'ouvrage... Des quantifications de ces variabilités sont actuellement réalisées de façon assez systématique aux Usa et au Japon.

Dans cette phase, on s'est beaucoup appuyé sur le retour d'expérience, consistant à analyser l'état des constructions dans les zones frappées par un séisme important. Ceci a permis, d'une part, d'identifier les configurations et dispositions les plus et les moins vulnérables et, d'autre part, de quantifier certaines dispositions des codes parasismiques. Cet apport reste fondamental, ce qui explique l'envoi de missions post-sismiques après les séismes notables, mais est insuffisant, comme cela sera expliqué plus tard.

## **2. Les stratégies de dimensionnement parasismique**

L'action sismique présente un certain nombre de particularités, abordées en partie plus haut, que l'on peut résumer de la façon suivante :

- C'est une action qui peut induire des dégâts extrêmement importants lorsque son intensité est forte, mais ces cas sont rares ou très rares, dans les pays peu sismiques évidemment, mais mêmes dans des pays sismiques, comme le Japon ou la Californie, pour ne citer qu'eux, et où des séismes peu violents ont lieu (très) souvent. Elle présente donc une grande dispersion.
- La description de la sollicitation sismique est, de plus, elle-même extrêmement complexe et nécessite un grand nombre de paramètres présentant eux-mêmes une grande dispersion, pour une description fine.

Il s'agit dans ces circonstances de définir des approches qui permettent une protection efficace à un coût raisonnable. Pour cela il faut tout d'abord définir les exigences que l'on s'impose en cas de séisme et pour quel(s) niveau(x) de séisme ; ces deux éléments dépendront du type de bâtiment ou d'installation auquel on s'adresse. En effet, pour un bâtiment « courant », on recherchera tout d'abord la sauvegarde des vies, ce qui implique que des dommages même significatifs peuvent être tolérés ; a contrario, pour une installation industrielle « à risque » on pourra, pour les structures les plus sensibles, imposer un fonctionnement « quasi-normal » après le séisme, sans interruption des fonctions essentielles.

Sur ce point, la législation française distingue ces deux types d'installations (risque normal, quand les conséquences restent circonscrites à l'ouvrage lui-même, et risque spécial) avec une approche normative dans le premier cas et exigentielle dans le second ; entre ces deux cas, il y a plutôt une continuité des exigences imposées à un ouvrage : de la protection des vies correspondant au non-effondrement d'une structure jusqu'à une absence

de dommages pendant et après le séisme en passant par l'imposition de déformations limitées pour assurer le fonctionnement d'équipements. Dans le premier cas, on pourra admettre que les structures puissent subir des déformations se situant franchement dans le domaine post-élastique ; dans le dernier, les déformations subies doivent être limitées et réversibles, typiquement « rester élastiques » durant la secousse.

En ce qui concerne le niveau de séisme à prendre en compte, l'idée première est de rechercher le séisme « maximum », souvent complété par des adjectifs comme possible, probable, de dimensionnement, ce qui, d'ailleurs, tend à relativiser son caractère extrême ! Les éléments présentés ci-dessus sur la variabilité montrent que la recherche d'un maximum de certains effets est illusoire. Le zonage sismique de la France, datant de 1986, s'est appuyé sur les intensités maximales historiques connues et sur les fréquences historiquement observées de secousses d'une certaine intensité. Les accélérations maximales correspondantes ont été choisies en s'appuyant sur les corrélations intensité-accelérations évoquées et en modulant la valeur en fonction de l'importance de l'ouvrage pour la société.

Dans l'industrie nucléaire en France, selon la Règle Fondamentale de Sécurité 2001-01 émise par l'Autorité de Sécurité Nucléaire, on utilise une approche déterministe dans laquelle les séismes historiques dans une zone seront supposés pouvoir se produire partout dans la zone et en particulier au plus près du site. On définit ainsi les séismes maximums historiques vraisemblables ; on majore la magnitude de ce séisme de 0.5, à titre de marge pour définir le séisme de « sécurité ».

Les approches actuelles pour les ouvrages conventionnels s'appuient sur une approche probabiliste ; les niveaux de séisme à prendre en compte correspondent à des probabilités de dépassement pendant la vie de l'ouvrage, par exemple 10 % pendant 50ans, ce qui correspond, avec des hypothèses Poissoniennes de l'apparition de séismes, à une période de retour de 475 ans.

Le dimensionnement des ouvrages se fonde sur deux volets, d'une part une conception rigoureuse des structures, d'abord au niveau global, en recherchant des formes régulières en plan comme en élévation, en identifiant des plans de contreventement allant du haut jusqu'en bas (on évitera des discontinuités), en soignant particulièrement les fondations qui doivent être monolithiques et la tenue du sol, en évitant les discontinuités brusques. Sous l'action de séismes forts, il peut être économique d'autoriser certains dommages localisés.

On cherche alors à rendre la structure capable de dissiper de l'énergie par déformation plastique ou tout simplement capable de subir des déformations bien au delà du domaine élastique. Pour cela, il est nécessaire de bien soigner les détails constructifs locaux : augmentation des longueurs d'ancrage et de recouvrement, augmentation de la quantité d'aciers transversaux assurant un bon confinement au béton... pour des structures en béton armé. Ces éléments, associés à un soin apporté à toutes les phases de la construction, confèrent aux structures une marge très importante permettant de résister avec des dommages limités à des séismes plus forts que ceux, conventionnels, considérés pour le dimensionnement.

Une dernière catégorie d'incertitudes est associée à ce que l'on appelle les facteurs humains, à tous les stades des projets, de la conception à la réalisation, également en amont de ceux-ci, dans la définition de politiques de prévention ou en aval dans la maintenance, par exemple. Ces questions semblent plutôt devoir être traitées par l'assurance

qualité, les contrôles, la formation à tous niveaux et la communication et les échanges entre toutes les parties concernées.

Une bonne illustration de ce qui a été présenté est donnée par le comportement de la Centrale de Kashiwazaki-Kariwa (Préfecture de Niigata au Japon) lors du séisme (de magnitude  $M_w=6.6$ ) du 16 juillet 2007, dont l'épicentre était à 17 km de la centrale. On rappelle que cette centrale est la plus « grande du monde » : 8200 MWh).

Ce séisme a causé la mort de 11 personnes et a provoqué des dégâts dans la ville de Kashiwazaki et dans ses environs : ils sont constitués essentiellement de glissements de terrains, de tassements de sols « mous » et de destructions, classiques dans ces régions, de bâtiments traditionnels (maisons individuelles d'un niveau en bois avec une toiture lourde pour résister aux ouragans). Le mouvement induit par le séisme a conduit à des accélérations dans la région épiscopentrale plus importantes que ce qu'on pouvait attendre, dans un facteur de l'ordre de 2 et plus ! Ceci est essentiellement dû à un effet de directivité au voisinage de la faille.

Globalement, les bâtiments « classés » (bâtiments réacteur et bâtiments turbine), fondés sur un sol dur à environ -40m se sont très bien comportés ; malgré une sollicitation plus importante que celle correspondant au dimensionnement, les bâtiments ne semblent avoir été que faiblement sollicités avec des fissures locales limitées. Les équipements dans ces locaux ne semblent pas endommagés : les ponts roulants de toutes tailles ont presque tous fonctionné après le séisme, un petit nombre ne réclamant que des réparations mineures. Des contacts localisés entre le stator et le rotor des turbines ont été relevés. Des contrôles des équipements sont en cours ; ils doivent permettre de confirmer ces premières impressions. Les fonctions de sûreté (contrôle de la réactivité, refroidissement du cœur et rétention des matières radioactives) ont été assurées, malgré deux incidents de fuites mineures liquides et gazeuses.

Les autres bâtiments et composants classés, généralement fondés sur des pieux, se sont également très bien comportés. On peut noter que le réseau électrique a été maintenu après le séisme, 2 lignes sur 4 étant complètement opérationnelles, ce qui pour un séisme de cette intensité est exceptionnel.

Par contre, les structures et composants non classés ont vu des dégâts dus à des déplacements et tassements différentiels. Ces dégâts sont assez limités (ancrages rompus, déformation des contreventements métalliques, déplacement d'équipements lourds, ponts roulants déformés...) mais nombreux et répartis sur le site. Une conception et une réalisation soignées des structures et composants ont permis globalement à l'installation de rester dans un état sûr pendant et après le séisme.

Des travaux importants d'inspection et de réparation ont lieu sur le site ; toutes les routes, déformées après le séisme, sont refaites. Des enseignements très précieux sont en train d'être tirés de cet événement ; ils participeront à la maîtrise des incertitudes.

### **3. Conclusion**

En conclusion, le génie parasismique est un domaine où les incertitudes sont importantes. Les orientations actuelles visent à mieux les quantifier, aussi bien sur l'aspect de l'aléa que sur celui de la réponse des installations et des structures. Les approches probabilistes tendent à se généraliser ; elles doivent s'appuyer sur des données tirées des enregistrements de séismes pour l'aléa et sur des approches associant les calculs et les

essais, sur tables vibrantes par exemple, pour la réponse des structures, qui doivent concourir à mieux prédire le comportement en cas de séisme, prenant en compte les incertitudes par la quantification de leurs effets. La comparaison au retour d'expérience de toutes les étapes doit être recherchée.