

Prise en compte dans la conception parasismique des bâtiments de la capacité des constructions à absorber l'énergie

M. Zacek¹

RESUME

L'objectif de cette communication est de mettre en évidence les inconvénients d'une stratégie de conception parasismique des bâtiments basée uniquement sur le concept de résistance mécanique et de proposer une approche qui repose sur l'équilibre dynamique en termes d'énergie.

ABSTRACT

The objective of this paper is to point out drawbacks of earthquake resistant building design strategies based only on the concept of strength and to discuss an energy balance approach to this question as an alternative.

1. INTRODUCTION

La pratique courante de conception des projets en zone sismique consiste en général en la mise en place d'une esquisse respectant de préférence une symétrie des masses et des rigidités et de dimensionner ensuite le bâtiment projeté selon le code parasismique en vigueur. Le dimensionnement est basé sur le concept de force (ou d'accélération, ce qui revient au même). Toutefois, une bonne corrélation entre les dommages sismiques et l'accélération maximale n'est observée que dans un nombre limité de cas. Très souvent, les dommages sont dus à l'incapacité des éléments constructifs ou d'assemblages à absorber l'énergie cinétique qui leur est communiquée lors d'un séisme plutôt qu'à un manque de résistance mécanique. Par conséquent, les concepteurs de projets de bâtiment en zone sismique devraient considérer, à tout stade du projet, les conséquences des choix qu'ils opèrent sur la capacité de la construction à absorber l'énergie, réalisée par stockage ou par dissipation. La présente communication apporte des arguments à l'appui de cette stratégie et propose une synthèse des démarches possibles.

2. CORRELATION ENTRE LES DOMMAGES SISMIQUES ET LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

Le calcul des actions sismiques d'ensemble, codifié par les règles parasismiques, est en général basé sur les spectres de réponse en accélération. Toutefois, une bonne corrélation

¹ Professeur titulaire, Ecole d'Architecture de Marseille, Laboratoire ABC, 13288 Marseille Cedex 09, France

entre les dommages sismiques et l'accélération maximale du sol n'est vérifiée que pour les ouvrages très rigides, c'est-à-dire les constructions basses et monolithiques. On observe que la plupart des bâtiments subit, pour une même durée de secousses, des dommages proportionnels à la vitesse maximale imposée. Cette vitesse conditionne la quantité d'énergie cinétique communiquée aux constructions. Or l'énergie que ces dernières ne parviennent pas à absorber produit un travail de rupture des éléments constructifs les plus sollicités, ce qui peut entraîner un effondrement en chaîne de l'ouvrage. Il apparaît donc souhaitable de tenir compte lors de l'élaboration des projets de construction, au moins qualitativement, de la capacité des constructions à absorber l'énergie.

En effet, la démarche reposant sur le seul concept de force, inhérent à l'utilisation des accélérations dans le calcul des charges sismiques, comporte des inconvénients importants :

- la rupture d'éléments constructifs se produit en général par manque de déformabilité (p. ex. dans le cas d'une demande de ductilité insatisfaite) et non pas par manque de résistance mécanique ; or l'absorption d'énergie par la construction est possible grâce à ses déformations ;
- la durée des secousses n'est pas prise en compte (hormis le calcul chronologique rarement utilisé dans la pratique courante) ;
- il n'y a pas de corrélation entre l'accélération maximale du sol (à laquelle sont calés les spectres de réponse) et la quantité d'énergie communiquée à la construction (Petrangeli, Bernardo, 1991) .

Par ailleurs, le calcul des structures relevant de l'application des codes parasismiques (dont sont exclus les ouvrages à risque spécial comme les centrales nucléaires) comporte d'autres incertitudes en raison desquelles il ne garantit pas leur non-effondrement en cas de séisme violent :

- le mouvement sismique de calcul est inférieur au séisme maximum plausible ;
- les incursions de la structure dans le domaine des déformations postélastiques sont prises en compte d'une manière approximative, en général forfaitairement, ce qui réduit notablement la fiabilité du dimensionnement ; la ductilité réelle d'éléments constructifs ou de leurs assemblages est souvent inférieure aux hypothèses de calcul ;
- les effets de site dus à la topographie, qui peuvent doubler ou tripler les charges sismiques réelles, ne sont pas pris en compte.

Par conséquent, une "réserve de résistance" par rapport à la résistance de calcul devrait être créée en conférant à la construction projetée une capacité à absorber l'énergie supérieure à la quantité d'énergie qui pourrait lui être imposée.

3. EQUILIBRE DYNAMIQUE EN TERMES D'ENERGIE

L'équation du mouvement d'un oscillateur simple avec un déplacement accéléré imposé à sa base, utilisée pour le calcul des structures aux séismes, est une expression de l'équilibre dynamique en termes de forces sous forme action + réaction = 0 :

$$m\ddot{u}_t + c\dot{u} + ku = 0 \quad (1)$$

où : m = la masse de l'oscillateur, u = déplacement relatif de la masse, u_t = déplacement total de la masse ($u_t = u$ + déplacement du sol u_s), k = constante de rigidité, c = coefficient d'amortissement. En effet, le premier terme de l'équation (1) exprime les forces d'inertie, le second les forces dissipées par amortissement visqueux et le troisième les forces de rappel. Rappelons que pour obtenir l'équilibre dynamique en termes d'énergie, l'équation (1) doit être intégrée par rapport au déplacement u :

$$\int m\ddot{u}_t du + \int c\dot{u}du + \int kudu = 0 \quad (2)$$

L'accélération \ddot{u}_t dans le premier terme de l'équation correspondant au déplacement total, la séparation de l'énergie cinétique de l'oscillateur et de l'énergie fournie peut être obtenue en posant $u = u_t - u_s$:

$$\int m\ddot{u}_t (du_t - du_s) + \int c\dot{u}du + \int kudu = 0 \quad (3)$$

d'où
$$\int m\ddot{u}_t du_t - \int m\ddot{u}_t du_s + \int c\dot{u}du + \int kudu = 0 \quad (4)$$

et
$$\int m\ddot{u}_t du_s = 1/2 m\dot{u}_t^2 + \int c\dot{u}du + \int kudu \quad (5)$$

L'équation (5) peut être écrite plus simplement :

$$E_i = E_c + E_\xi + E_a \quad (6)$$

où : E_i = l'énergie introduite dans le système, E_c = l'énergie cinétique de la masse, E_ξ = l'énergie dissipée par amortissement visqueux, E_a = l'énergie absorbée par l'oscillateur.

Lors des incursions dans le domaine des déformations plastiques, E_a comprend l'énergie dissipée par hystérésis (E_h), en plus de celle qui est stockée sous forme de déformations élastiques (E_s) : $E_a = E_s + E_h$. Si le comportement du système est parfaitement élastique, nous avons $E_a = E_s$. En posant $E_d = E_\xi + E_h$, on obtient :

$$E_i = E_c + E_s + E_d \quad (7)$$

où E_d représente la totalité de l'énergie dissipée (par amortissement et par hystérésis). L'équation (7) est une expression de l'équilibre dynamique en termes d'énergie sous forme "action = réaction".

Au moment critique de chaque cycle d'oscillation, nous avons $u = \max.$ et $\dot{u} = 0$, d'où :

$$E_i = E_s + E_d \quad (8)$$

Cela signifie qu'à ce moment toute l'énergie non dissipée est stockée grâce aux déformations élastiques. Lorsque la quantité d'énergie fournie est supérieure à la capacité

du système à l'absorber par stockage et dissipation, elle produit un travail de rupture car l'équilibre dynamique n'est plus vérifié. Dans le cas d'une structure réelle exposée à un séisme, cela se traduit par la ruine des éléments les plus sollicités. Leur défaillance entraîne un report d'efforts sur les autres éléments qui peuvent céder à leur tour. On peut également dire qu'il y a rupture d'un élément constructif lorsqu'il n'accepte pas les déformations nécessaires à l'absorption de l'énergie cinétique qui lui est communiquée.

Il découle de l'équation (8) que pour favoriser le bon comportement des constructions exposées à un séisme, on peut d'une part minimiser l'action sismique (l'énergie fournie) et, d'autre part, maximiser la capacité de réaction de la construction au séisme, c'est-à-dire sa capacité à stocker, ainsi qu'à dissiper l'énergie.

4. MOYENS DE MINIMISER L'ENERGIE COMMUNIQUEE A LA CONSTRUCTION

L'énergie mécanique étant le produit de la force par le déplacement, il convient de chercher à minimiser trois grandeurs : la masse et l'accélération (donc la force) ainsi que les déplacements.

L'avantage d'éviter les structures et les éléments non structuraux lourds est évident. Cette démarche implique un rapport élevé résistance/masse volumique pour les matériaux utilisés.

En ce qui concerne l'accélération (et les déplacements) du sol, des tentatives ont été faites pour mettre au point un moyen de les réduire sur un site donné : creusement autour du site de tranchées profondes remplies de matériaux absorbant l'énergie, la précontrainte ou encore la substitution du sol. La première démarche n'aurait pas les résultats escomptés (May et Bolt 1982) ; les deux autres, encore au stade d'étude, semblent prometteuses pour certaines applications. Actuellement, la seule possibilité de minimiser l'intensité des mouvements sismiques du sol d'assise d'une construction est d'éviter de l'implanter sur un terrain sujet à des effets de site importants (crêtes et sommets, brisures de pente, bords de vallées encaissées, sols meubles de forte épaisseur, proximité de la limite entre formations géologiques différentes, ...).

Quant à la réponse en accélération d'une construction, elle dépend entièrement de sa conception. Il est clair qu'elle est fonction de trois paramètres : la période propre du sol T_s , celle de la construction T et l'amortissement de cette dernière. E_i n'est donc pas indépendante de l'énergie E_d dissipée par la construction. Elle est très importante lorsque T_s et T sont proches ou identiques (résonance avec le sol). Dans ces cas, il est donc souhaitable de modifier la conception de l'ouvrage de manière à éloigner les deux périodes. Sur sol meuble, il est en général préférable de réduire T . Plusieurs possibilités d'action s'offrent :

- rigidifier la structure : opter pour une ossature contreventée ou pour un système en murs porteurs et augmenter éventuellement la largeur des palées de stabilité ;
- limiter l'élancement du bâtiment ;
- élargir sa base ;
- réduire sa masse ;

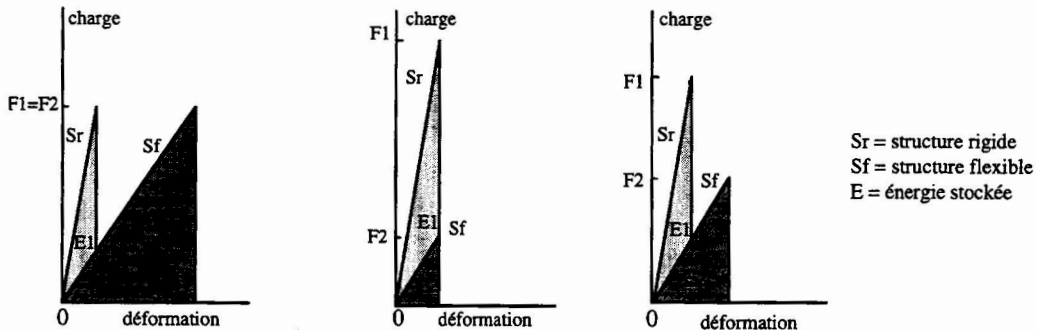
- baisser son centre de gravité (par des étages enterrés par exemple), etc.
- Sur sol rigide, il peut être avantageux d'augmenter T , donc par exemple :
- opter pour un système porteur en portiques ductiles ;
 - augmenter l'élanement de la construction ;
 - utiliser l'isolation parasismique, etc.

Rappelons également que les accélérations (et les déplacements) de la superstructure peuvent être diminuées en plaçant à son sommet une masse (passive) partiellement découplée du plancher dont l'inertie agit à l'encontre de celle du bâtiment (procédé utilisé pour un immeuble parasismique à Chiba, Japon) ou, au moins en principe, par une protection active : masse active sur toit ou liaisons actives entre éléments constructifs, dont la rigidité est variable au cours des séismes en fonction de la période propre recherchée (Kobori 1988).

Par ailleurs, afin de prévenir la transmission d'énergie de choc entre bâtiments voisins, la largeur minimale des joints de séparation, supérieure aux déplacements maximaux des deux bâtiments en translation et en rotation, doit être rigoureusement respectée.

5. CAPACITE DES CONSTRUCTIONS A STOCKER L'ENERGIE

Les constructions stockent l'énergie grâce à leurs déformations élastiques ; les structures flexibles possèdent donc une capacité de stockage d'énergie plus élevée que les structures rigides (fig. 1a). A déformations égales, ainsi qu'à énergie stockée égale, ces dernières sont beaucoup plus sollicitées (fig. 1b, c). Même pour une déformation imposée faible, elles peuvent être soumises à des contraintes élevées.



a) charges égales : $E_2 \gg E_1$ b) déformations égales : $F_1 \gg F_2$ c) énergie égale : $F_1 \gg F_2$
 Fig. 1. Energie de déformation élastique stockée

L'un des moyens d'accroître E_s consiste donc à opter pour une structure flexible (en portiques ductiles par exemple) lorsqu'elle convient compte tenu des considérations évoquées au paragraphe 4. On devrait dans ce cas éviter les travées courtes (moins de 4 m) pour les poutres et "l'effet de poteau court" pour les éléments verticaux (allèges rigides ou mezzanines réduisant la hauteur libre de poteaux, poteaux non confinés en vide sanitaire

ou supportant de part et d'autre des planchers à des hauteurs différentes, paliers d'escalier entre étages portés par des poteaux, etc.).

La conception des systèmes rigides requiert une approche différente. Une réduction de leur rigidité ne saurait les transformer en structure flexible, alors même que leur résistance serait réduite. L'amélioration de leur capacité à stocker l'énergie passe obligatoirement par un dimensionnement large. En effet, en augmentant la résistance d'un élément, on accroît l'aire sous la courbe contrainte-déformation qui est proportionnelle à l'énergie stockée (fig. 1b).

Dans tous les systèmes constructifs, le stockage d'énergie est favorisé par une ductilité et une hyperstaticité élevées. Dans ce dernier cas, le rôle joué par la redondance des liaisons et des éléments constructifs est évident, plus particulièrement lorsqu'ils constituent des palées de stabilité. Quant à la ductilité de la structure, elle permet, après la formation de rotules plastiques, une distribution des efforts sur les sections dont les déformations sont encore élastiques et qui continuent donc à stocker l'énergie, là où une rupture de type fragile mettrait l'élément concerné hors service.

Par ailleurs, il est important que les choix opérés lors de la conception d'ensemble ou de détail d'un bâtiment parasismique ne puissent pas compromettre localement la possibilité de la structure d'utiliser pleinement sa capacité. Par conséquent, on devrait :

- assurer une distribution correcte des charges sismiques au sein du système porteur : symétrie en plan des masses et des rigidités, absence de "niveaux flexibles", rigidité des diaphragmes supérieure à celle des palées de stabilité, absence de "zones faibles" ou de "zones dures", etc. ;
- assurer une continuité mécanique entre les éléments de structure et aux changements de direction (continuité des armatures aux angles des chaînages par exemple) ;
- limiter les concentrations de contraintes en évitant les configurations qui présentent des angles rentrants importants (bâtiments à ailes ou comportant des retraits et porte-à-faux de grandes dimensions), les variations brutales des sections, les éléments constructifs ou leurs assemblages en forme de baïonnette, les poteaux supportés par des poutres, les percements importants dans les diaphragmes et dans les palées de stabilité, surtout à leur périphérie, les composants fissurés, etc. ;
- prévenir l'instabilité latérale des éléments constructifs par cloquage, déversement, flambement, etc. ; les pièces à parois minces sont particulièrement vulnérables à ce phénomène qui entraîne leur ruine précoce.

6. CAPACITE DES CONSTRUCTIONS A DISSIPER L'ENERGIE

Au cours d'un séisme, l'énergie cinétique d'une construction peut être dissipée par divers mécanismes : frottement externe, amortissement visqueux, amortissement hystérétique, fissuration et rupture d'éléments constructifs, interaction sol-structure.

Le frottement externe dépend bien entendu du système constructif utilisé ; p. ex., il est plus important dans le cas des constructions en bois que dans celui des ossatures en acier soudé. L'énergie dissipée par ce mécanisme peut parfois être augmentée d'une manière

significative par des amortisseurs à frottement (Filiatrault 1990, Filiatrault et Cherry 1987).

L'amortissement visqueux, qui croît avec la fréquence d'oscillation de la construction, est fonction, entre autres, des caractéristiques rhéologiques des matériaux de construction. Une interposition de feuilles viscoélastiques dans des assemblages ou l'emploi d'amortisseurs visqueux permettent de l'améliorer. Plusieurs variantes de ce type d'amortisseurs ont été proposées (Robinson et Greenbank 1976, etc.).

L'amortissement hystérétique, indépendant de la fréquence d'oscillation, est en grande partie tributaire de la conception de la construction. Il augmente avec l'importance et la durée des incursions dans le domaine des déformations postélastiques et constitue la cause la plus importante de dissipation d'énergie durant un séisme majeur. Il est donc particulièrement indiqué de le favoriser. Cela implique que la ductilité des éléments constructifs et de leurs assemblages soit assurée. Par conséquent, les démarches suivantes devraient être envisagées : choix des matériaux ductiles, respect du principe "poteau fort-poutre faible" (de manière que les rotules plastiques se forment dans les poutres et non pas dans les poteaux), monolithisme et hyperstaticité, prévention des situations où la capacité de la structure à absorber l'énergie est localement compromise, signalées au paragraphe 5 (discontinuité mécanique, concentrations de contraintes, instabilité latérale, etc.) Par ailleurs, il est préférable de faire "travailler" les éléments porteurs en flexion plutôt qu'en cisaillement, car ce dernier n'autorise qu'une ductilité faible.

La fissuration et la rupture d'éléments constructifs libèrent, par la coupure des liaisons interatomiques des sections concernées, l'énergie de déformation qui y était stockée ; ne pouvant plus être reconvertie en énergie cinétique, elle est définitivement perdue. Il est clair qu'il convient d'éviter dans la mesure du possible la destruction de toute partie de la structure indispensable à sa stabilité (d'où l'intérêt des structures hyperstatiques qui comportent des éléments redondants). En revanche, il est possible de réaliser des éléments "fusibles", prévus pour se rompre au-delà d'un seuil d'accélération. Il est souhaitable que leur rupture soit progressive et non pas brutale.

L'interaction sol-structure étant dissipative plus particulièrement dans le cas des bâtiments rigides fondés sur sols meubles, la présence de plusieurs niveaux enterrés formant caisson est favorable. Elle permet également d'abaisser le centre de gravité de l'ouvrage et de réduire ses déplacements en tête. Il est bien connu que l'énergie renvoyée au sol par la construction est dissipée par deux mécanismes distincts : atténuation par radiation (ou pseudo-amortissement) et amortissement interne (hystérétique) du sol. Le pseudo-amortissement croît avec la fréquence d'oscillation. Il ne peut avoir lieu pour les fréquences inférieures à la fréquence propre du sol, ce qui se produit souvent dans le cas des couches meubles. Dans celles-ci, la dissipation d'énergie est due principalement à leurs déformations et augmente donc avec l'amplitude des oscillations.

CONCLUSION

La réflexion présentée dans cette communication montre que la conception des bâtiments en zone sismique qui se limiterait au respect strict des dispositions imposées par

les règles parasismiques, basées sur le concept de force, donc de résistance mécanique, comporte plusieurs inconvénients. Des paramètres significatifs peuvent ainsi ne pas être pris en compte avec pour conséquence une défaillance de ces bâtiments lors d'un séisme majeur. En revanche, le fait de conférer aux constructions une bonne capacité à absorber l'énergie cinétique imposée par un tremblement de terre permet de créer une "réserve de résistance", indispensable à leur survie lorsque les hypothèses réglementaires sont dépassées. En général, on observe une telle situation dans la zone épiscopale d'un séisme destructeur. Une synthèse des démarches favorisant l'absorption d'énergie par les constructions a été présentée.

REFERENCES

- Amman, W. J., Kluge, D., Wenk, T. 1992. Recueil des techniques de renforcement sismique. Actes de la Journée d'étude "Renforcement du bâti existant", Genève, Suisse, SIA D 096, 23 - 26.
- Filiatrault, A. 1990. Analytical Predictions of the Seismic Response of Friction Damped Timber Shear Walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley and Sons, vol. 19, 259 - 273.
- Filiatrault, A., Cherry, S. 1987. Performance Evaluation of Friction Damped Braced Steel Frames under Simulated Earthquake Loads. *Earthquake Spectra*, EERI, vol. 3, n°1.
- Kobori, T. 1988. Active Seismic Control. *Proceedings 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, VIII 435 - 446.
- May, T. W., Bolt, A. B. 1982. Effectiveness of Trenches in Reducing Seismic Motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley, vol. 10, 195 - 210.
- Petrangeli, M. P., Di Bernardo, S. 1991. Energy Approach to Bridge Seismic Devices Design. *Proceedings International Meeting on Earthquake Protection of Buildings*, Università degli studi di Ancona, Italy, 123 B - 134 B.
- Robinson, W. H., Greenbank, L. R. 1976. An Extrusion Energy Absorber Suitable for the Protection of Structures during an Earthquake. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley and Sons, vol. 4, 251 - 259.
- Uang C. M., Bertero V. V. 1990. Evaluation of Seismic Energy in Structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley and Sons, vol. 19, 77 - 90.
- Zacek M. 1995. *Construire en zone sismique*. Editions Parenthèses, Marseille.
- Zacek M. 1991. L'architecture parasismique au Japon. *Annales de l'ITBTP*, ITBTP, Paris, 100 -115.