



Direction Départementale de
l'Équipement de la
Guadeloupe



Direction Régionale de l'Environnement
GUADELOUPE

Document d'information à l'usage du constructeur - **VOLUME 3**
Conçu par Mme Patricia BALANDIER

LE SEISME ET LES BATIMENTS

**Pourquoi il ne suffit pas qu'un bâtiment soit « costaud »
pour résister aux séismes**



C'est bien une erreur de conception architecturale qui est à l'origine de l'effondrement de cet immeuble de parking, conforme aux règles de construction parasismiques américaines. La qualité des bétons et les dimensions ne sont pas en cause... c'est la conception de la rampe d'accès qui est à l'origine de l'effondrement ! (Séisme de Northridge, 1994 – Document EQUIIS)

POURQUOI ETUDIER LA FACON DONT LES BATIMENTS SE DEFORMENT?

Les scientifiques nous expliquent comment un bâtiment se déforme, se dégrade, puis se casse sous l'effet des secousses. Les architectes et ingénieurs se forment pour en tenir compte dans leurs projets en zone sismique. Sur le chantier, nous avons l'ultime responsabilité, celle de réaliser correctement les travaux.

Mais d'abord, essayons de comprendre que les phénomènes internes au bâtiment qui peuvent amener sa ruine sont multiples. Mais également que tous les dommages qui surviennent pendant un séisme ne sont pas signe de danger... au contraire !

POURQUOI ETUDIER LA FACON DONT LES BATIMENTS SE DEFORMENT?

Dans l'état actuel des choses, il est question de prévoir les modes de déformation des constructions sous l'effet des secousses, et de maîtriser l'importance de ces déformations et contraintes sur l'ensemble de la structure porteuse et sur chacun des éléments qui la composent. Puis, la résistance des matériaux utilisés, leur mise en œuvre et leurs caractéristiques diverses définies par l'ingénieur doivent permettre à la construction de répondre aux sollicitations d'origine sismique.

Mais c'est bien la conception architecturale qui va conditionner la façon dont les bâtiments se déforment. Plus celle-ci est régulière, plus le bâtiment a de chances de bien se comporter lors d'un séisme majeur.

Un « comportement régulier » n'implique pas une architecture pauvre, mais la prise en considération de la réponse « dynamique » de la structure aux secousses.

PREVOIR EN S'APPUYANT SUR LES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES

C'est possible aujourd'hui. Ca ne l'était pas il y a cinquante ans :

- Estimer « à l'avance » les niveaux et modes possibles de déformation de la structure sur un sol donné.
- Estimer « à l'avance » son aptitude à transformer le mouvement d'origine sismique en chaleur, éventuellement au prix de dommages.
- Connaître « à l'avance » les zones de la structure les plus exposées à la rupture en cas de fortes secousses.
- Etablir des règles de construction efficaces à partir de ces connaissances.

Ce Fascicule nous donne, sous la forme de 13 « questions – réponses », des explications sur les phénomènes et nous permettra de comprendre que la réglementation s'appuie sur des connaissances objectives.

LES REGLES SONT LA POUR NOUS PROTEGER.

ELLES EVOLUENT AVEC L'AVANCEMENT DES CONNAISSANCES.

COMPRENONS-LES. RESPECTONS-LES.

1. Les bâtiments réagissent-ils d'une seule manière aux séismes ?

Non ! Et c'est ce qu'il faut comprendre pour concevoir un bâtiment parasismique

Les photos suivantes nous montrent des destructions d'immeubles dont la structure est en béton armé. Elles illustrent bien le fait qu'il existe une grande variété de modes de ruine pour un même type apparent de construction. Nous pourrions illustrer une même variété d'effets sur les petits bâtiments comme les maisons individuelles ou pour d'autres matériaux de structure comme le bois, l'acier ou la maçonnerie porteuse. Le fait qu'une construction soit détruite d'une façon ou d'une autre... ou ne soit pas détruite n'est pas l'effet du hasard. Si nous regardons de plus près comment la construction a été conçue, nous pouvons expliquer les phénomènes en cause.



Désolidarisation des façades, destruction des étages supérieurs, intermédiaires ou inférieurs



*Destruction de
tous les étages*

*Renversement
de l'immeuble*



Peut-on éviter l'effondrement des constructions ?

Les architectes et les ingénieurs doivent étudier comment ne pas « faire de mauvais choix » en fonction de chaque projet sur son site et éviter les différents problèmes possibles. Il s'agit surtout de bien:

- ⇒ Localiser les « masses » de la construction (essentiellement les planchers)
- ⇒ Contrôler les possibilités de déformation des différents murs et poteaux, c'est-à-dire leurs raideurs
- ⇒ Savoir utiliser l'endommagement de quelques éléments qui ne compromettent pas la sécurité, pour « freiner » les secousses dans le bâtiment.

2. Quel comportement pour un bâtiment résistant aux secousses d'un séisme futur ?

Les secousses qui agissent sur un bâtiment provoquent des contraintes et déformations qu'il faut contrôler en comprenant bien le comportement des éléments de la construction en fonction des matériaux utilisés.

Le roseau ?

Pour des raisons de « bon fonctionnement » et de stabilité générale de la construction on ne peut pas laisser un bâtiment se déformer « comme un roseau ». C'est-à-dire beaucoup sans casser, même si cela peut sembler la solution idéale. On ne tolère pas plus de 2-3 cm par étage (moins sur les grands immeubles).

Le chêne ?

Ainsi, les éléments de la construction sont étudiés pour « peu » se déformer. Comme les forces dues aux secousses peuvent être très élevées, ces éléments peuvent subir de fortes contraintes auxquelles ils résistent jusqu'à un certain niveau, puis cassent brutalement, comme le chêne de la fable si on ne prend pas des dispositions constructives propres aux zones sismiques. Si la violence des secousses a mal été estimée, c'est la ruine assurée.



A gauche, le « chêne » : rupture fragile d'une structure de béton armé, au delà de la limite de résistance, c'est l'effondrement.



A droite, la « ductilité » : rupture « ductile » d'un poteau de béton armé. Au delà de la limite de résistance, le béton est resté « confiné » dans les armatures. A chaque secousse il est broyé à l'intérieur des armatures, ces frottements contribuent à freiner la construction. L'effondrement ne se produit pas.

« Mieux » que le chêne ou le roseau ?

En concertation avec l'architecte, l'ingénieur va définir des qualités de matériaux, des dispositions constructives et des dimensions pour chaque élément de la construction qui permettent de limiter les déformations de celle-ci. Et, qui permettent, si les secousses sont vraiment trop fortes, de contrôler leur endommagement en empêchant la rupture brutale et l'effondrement. Un peu à l'image d'un morceau de carton, d'une tige d'acier doux ou d'une barre de caramel mou qui, si on les déforme trop fort, vont rester déformés définitivement... mais sans casser. **On appelle ce comportement « la ductilité ».**

Les règles de construction parasismiques expliquent comment on peut obtenir ce résultat de façon plus ou moins remarquable selon le type de matériau.

Par exemple, pour le béton armé, on choisira le type de béton, la nature et le positionnement des aciers, selon des critères différents de ceux du projet en zone non sismique.

3. Pourquoi ne pas faire uniquement des bâtiments garantis sans dommages ?

Il faudrait être absolument sûr de la force de l'action du séisme sur la construction

Les sismologues et les géotechniciens ont donné à l'architecte et l'ingénieur une pré-estimation des accélérations du sol dues aux secousses possibles sur chaque site. La réglementation nous donne des valeurs minimum légales pour chaque type de site et de construction. (Voir fascicule n°1)

L'ingénieur sait évaluer si la construction **amplifie** ces secousses du sol ou non (en se mettant « en résonance ») grâce à l'outil « spectre de réponse du site », et évaluer les niveaux d'accélération possibles dans le bâtiment. (Voir fascicule n°1). Il peut alors calculer les forces qui agiront sur le bâtiment en cas de fortes secousses. Connaissant la résistance et le comportement des matériaux à utiliser il peut définir les caractéristiques (nature, dosages, dimensions...) qui permettront à la construction de résister à ces forces.

Mais... que ce soit pour les accélérations du sol ou celles du bâtiment qui les subit, il existe toujours une marge d'erreur. « Organiser » l'endommagement sans effondrement permet de gérer cette marge.

Et puis, ça coûte cher...

On pourrait prendre des marges de sécurité pour évaluer les accélérations dues aux secousses, qui excluent toute possibilité d'erreur. C'est ce qu'on va faire par exemple pour les centrales nucléaires. Mais ça coûte extrêmement cher. On ne peut pas imposer à chaque citoyen de se protéger comme un ouvrage à risque spécial.

La réglementation va même plus loin, elle autorise l'ingénieur, en concertation avec son client, à concevoir un bâtiment pouvant avoir des dommages pour des accélérations moins violentes que la référence réglementaire pour la zone, à la condition impérative que les caractéristiques de la construction garantissent le non-effondrement. On autorise alors le calcul de la construction avec un coefficient minorant appelé le « coefficient q ». Ce coefficient doit être justifié par l'ingénieur dans le respect des règles de construction parasismique.

Des dommages comme ceux que l'on peut constater au pied de ce poteau ne sont pas du tout interdits par les règles de construction parasismique, puisqu'ils ne provoquent pas la perte de stabilité d'ensemble de la construction. Pour cette structure précise, sur ce sol précis, résister totalement à ces dommages aurait coûté beaucoup plus cher à la construction.



4. Pourquoi le bâtiment se déforme-t-il lorsqu'il est soumis à des secousses ?

La déformabilité des éléments de la construction

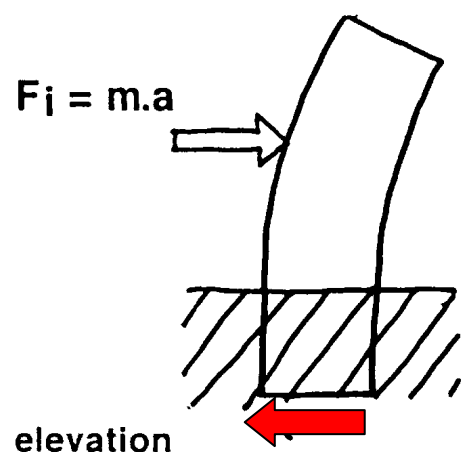
Soumis à une force identique (à la « poussée » des secousses à un moment donné) les différents éléments d'une construction se déforment plus ou moins selon leur forme (un poteau se déforme plus qu'un mur), leurs matériaux (le bois se déforme plus que le béton armé), leurs masses (dont dépendent les forces d'inertie) et la nature des liaisons entre les éléments. Les secousses d'un séisme génèrent des forces alternées dans toutes les directions, forces qui déforment le bâtiment de façon aléatoire, mais selon ses caractéristiques architecturales et constructives.

Les forces d'inertie

Comme le passager soumis aux secousses d'un véhicule en mouvement (accélérations, coups de frein, coups de volant à droite et à gauche, trous et bosses dans la chaussée), les masses d'un bâtiment soumis aux accélérations désordonnées du sol (dans toutes les directions) pendant un tremblement de terre « tendent » à rester là où elles se trouvent au début de chaque mouvement du sol.

Les forces qui le « retiennent à sa position d'origine » s'appellent les forces d'inertie : elles sont d'autant plus importantes que les **masses** sont élevées et que les **accélérations** sont violentes.

Les fondations, ancrées dans le sol se déplacent avec celui-ci, et le haut du bâtiment « suit » avec un retard d'autant plus important que les forces d'inertie sont importantes et que le matériau peut se déformer.



(Accélération du sol)

Peut-on prévoir la valeur des déformations ?

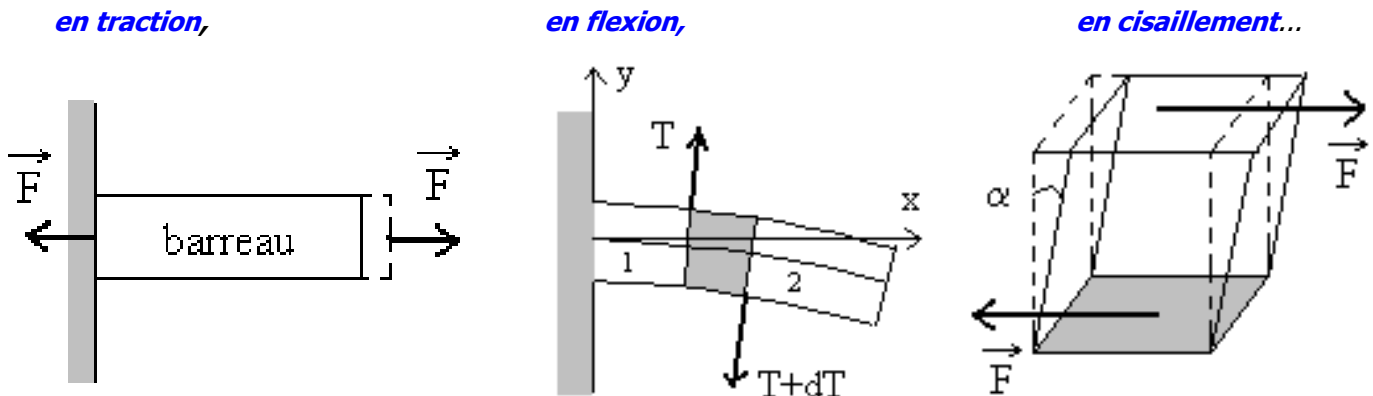
Oui, en pré-estimant la valeur des accélérations possibles sur le site, et en connaissant les caractéristiques des matériaux utilisés: densité et déformabilité. Les ingénieurs peuvent calculer la valeur des déformations, et identifier les modes de déformation possibles. Un des enjeux sera de favoriser des déformations régulières et limitées sur l'ensemble du bâtiment, dans le plan et en élévation.

5. Comment se déforme un bâtiment ?

Les « modes de déformation »

Les caractéristiques de chaque élément de la construction et celles de l'ensemble formé par ces éléments et leurs types de liaisons vont conditionner les modes de déformation en fonction des caractéristiques vibratoires du sol d'implantation.

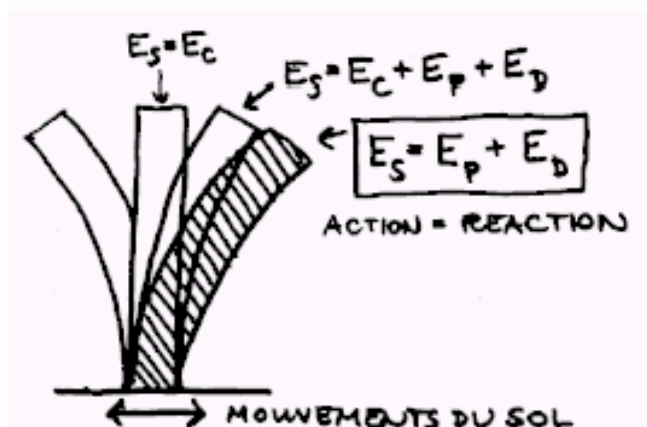
Les schémas ci-dessus illustrent des modes de déformation pour différents éléments :



On peut savoir à l'avance quel sera le mode de déformation de chaque élément constructif sous l'action d'un séisme et déterminer où il faut le renforcer pour éviter sa rupture fragile. Il faut en outre prévoir les modes de déformation globale de la construction.

L'équilibre énergétique

Chêne ? Roseau ? Caramel mou ? Ou pour adopter un vocabulaire plus approprié : rigidité, flexibilité et ductilité. Ces paramètres du comportement de la construction vont conditionner le bilan de l'énergie d'origine sismique présente à chaque instant dans la construction. On considère que si le bilan énergétique est équilibré le bâtiment résiste aux secousses. Il « absorbe » toute l'énergie sismique. Les partis architecturaux et constructifs vont conditionner les paramètres de cet équilibre recherché entre résistance des matériaux, déformabilité temporaire et dommages permanents.



Ce schéma illustre le fait que, pour qu'il n'y ait pas « destruction », la construction doit « absorber » (ou « équilibrer ») l'énergie du séisme : en se déformant et en transformant du mouvement en chaleur, ce qui ralentit le mouvement (comme les plaquettes de frein d'un véhicule). (Document Milan Zacek)

6. Comment éviter ou maîtriser la mise en résonance du bâtiment par les oscillations du sol ?

Le problème : la mise en résonance de la structure

Nous avons illustré ce problème dans le 1^o volume de ces documents d'information (question n°5). Lorsque la période, d'oscillation d'un sol donné correspond à la période propre d'oscillation d'un bâtiment donné, celui-ci s'emballe et amplifie le mouvement : il y a mise en résonance. C'est un facteur de ruine à prévoir et estimer pour l'éviter.

Période d'oscillation : durée d'un cycle d'oscillation mesurée en secondes (inverse de la fréquence d'oscillation).

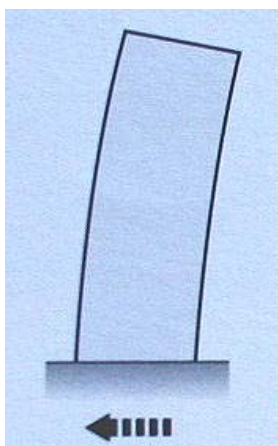
Période propre d'oscillation d'un bâtiment : période selon laquelle le bâtiment oscille librement suite à un déplacement, c'est-à-dire, vis-à-vis du séisme, après l'arrêt des oscillations forcées (et jusqu'à l'amortissement complet du mouvement).

On démontre que :

- **La période propre d'oscillation dépend des masses mises en mouvement** : elle croît avec les masses.
- **La période propre d'oscillation décroît avec la raideur des éléments porteurs.**
La raideur dépend de la nature des matériaux, de la forme des éléments et de la nature des liaisons entre les éléments.

Eviter la mise en résonance des structures

Or le projet architectural va conditionner ces paramètres (masses et raideurs). Si le programme le permet, le concepteur pourra opter pour un mode constructif et des élancements qui lui permettront « d'éloigner » la construction des périodes dominantes du sol (structures rigides sur sols souples, riches en basses fréquences et structures flexibles sur sols rigides, riches en hautes fréquences)

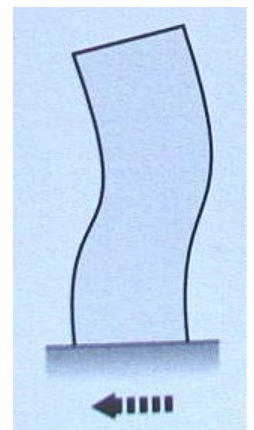


Les schémas ci-dessus illustrent le fait que les bâtiments peuvent se déformer :

de façon globale (à gauche)

ou de façon plus ou moins irrégulière (à droite).

Chaque « mode de déformation » a une période propre d'oscillation. L'ingénieur étudiera la possibilité de mise en résonance pour les différents modes.



Le calcul dynamique des structures est complexe. C'est une affaire de spécialistes. Les prescriptions constructives en découlent. Respectons ces prescriptions.

7. Quel est le rôle de l'architecte dans la construction parasismique ?

De même qu'il est préférable pour la santé d'un être humain d'avoir une bonne hygiène de vie, avant de se soigner si nécessaire, il est préférable pour un bâtiment d'avoir une bonne conception pour optimiser l'application des règles de calcul parasismique en prévision d'un tremblement de terre. Le calcul réglementaire d'un bâtiment mal conçu ne garantit pas son bon comportement, c'est-à-dire son non-effondrement.

La bonne conception architecturale vise :

- la non résonance de la structure avec les oscillations du sol
- l'éviction des phénomènes de torsion (voir plus loin)
- la limitation des concentrations localisées de contraintes (déformations trop irrégulières)

Pour ce faire il convient de faire des choix pertinents quant à :

- la répartition des volumes, c'est-à-dire concrètement des masses et des rigidités,
- la localisation des points faibles

Il faut arbitrer entre les dispositions plus ou moins favorables selon le projet et ses enjeux.

Ainsi, le bâtiment projeté doit être analysé, de l'esquisse au projet, selon les critères de :

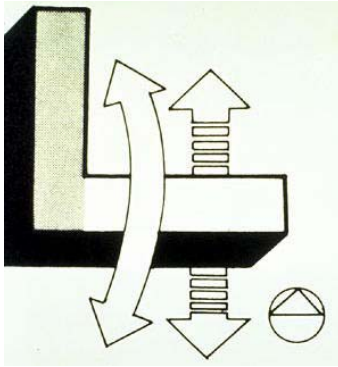
- sa forme globale,
- son système porteur et son mode de contreventement en fonction du choix des matériaux de structure,
- la forme et la constitution de ses différents éléments constructifs.

Nous ne pouvons pas dans ce fascicule étudier les règles de bonne conception parasismique qui nécessitent un enseignement complet pour les spécialistes, mais nous pouvons en illustrer quelques exemples caractéristiques.

On trouvera également dans le **volume 4 des exemples constructifs de bonne conception des bâtiments.**

8. Des exemples de mauvaise conception architecturale en plan.

On observe que les bâtiments qui ont une forme complexe en plan ne se déforment pas de façon régulière. Par exemple (illustration ci-dessous) les deux ailes d'un bâtiment en L n'oscillent pas librement, ce qui génère des dommages à leur extrémité qui n'est pas libre. Il est préférable de séparer les deux corps de bâtiment par un joint parasismique pour les découpler (voir les joints PS plus loin).



Document NISEE - Sur le schéma ci-contre, mécanisme de torsion de l'aile d'un bâtiment en L autour de la zone d'angle rigide dans le sens y considéré (dans ce cas, oscillations dans le sens des flèches pointillées).



Séisme de Kôbé 1995, Destructions diverses par accumulation de contraintes à la jonction de deux ailes de bâtiment n'oscillant pas en phase.



On observe également que les bâtiments qui ont une forme très allongée en plan subissent ce qu'on appelle un coup de fouet aux extrémités. Là encore il est préférable de recouper le bâtiment en plusieurs unités par un ou des joints parasismiques, ou de renforcer les extrémités.

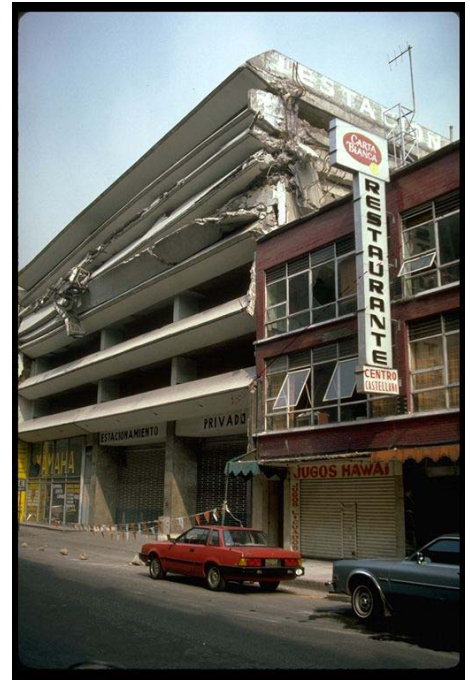


Séismes des Marches-Ombrie, 1997 – Document x - Ce bâtiment dont la longueur est importante au regard de la largeur a subi des destructions à ses deux extrémités par accumulation d'énergie. Effet de « coup de fouet ».

9. Des exemples de mauvaise conception architecturale en élévation.

Il est vraiment important que les déformations sous l'effet des forces d'inertie puissent se faire de façon régulière entre les différents niveaux successifs d'une construction. Si un niveau est moins rigide que les niveaux voisins la déformation ne peut pas être régulière, et c'est un des principaux facteurs de ruine des constructions. Par exemple niveau comprenant des murs et niveau ne comprenant que des poteaux. On peut, par exemple, ci-dessous, observer un « **coup de fouet** » dans les étages supérieurs.

Séisme de Mexico, 1985 – Document EQIIS – Coup de fouet dans les étages supérieurs d'un bâtiment mis en résonance avec le sol. Manque de rigidité longitudinale. Les trois premiers niveaux ont été contreventés et raidis par les constructions voisines mais pas les quatre niveaux supérieurs, beaucoup trop flexibles.



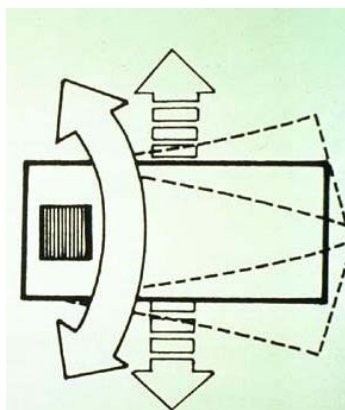
Le **problème particulier des constructions sur pilotis** est illustré par le cliché ci-dessous. Dans ce cas, contrairement à l'exemple ci-dessus, c'est le bas de la construction qui est plus flexible, ce qui sollicite de façon trop importante les têtes de poteaux, sous l'effet forces d'inertie des étages supérieurs peu déformables.

Séisme de Tokachi Oki, 1968 – Ci-contre, deux étages relativement rigides sur un niveau flexible (portiques) ont entraîné la ruine de celui-ci.



Séisme de Northridge, 1994 – Document FEMA – Habitations constituées d'un rez-de-chaussée – parking « transparent » sous deux niveaux de logement rigides. Les RdC plus flexibles n'ont pu absorber sans rupture les déformations dues aux déplacements des deux niveaux supérieurs.

Il faut veiller à ce que la distribution des espaces et le choix de leurs enveloppes ne créent pas de noyaux rigides excentrés. Dans le cas ci-dessous, le niveau flexible du rez-de-chaussée comporte un « noyau rigide excentré (cage d'escalier) ». Sous l'effet des secousses, **le bâtiment a subi une torsion autour de ce noyau rigide peu déformable.**



Document NISEE – et Séisme de Kôbé, 1995, Document x –

A gauche représentation schématique du moment torsion autour d'un noyau rigide et à droite illustration phénomène autour d'une cage d'escalier rigide.

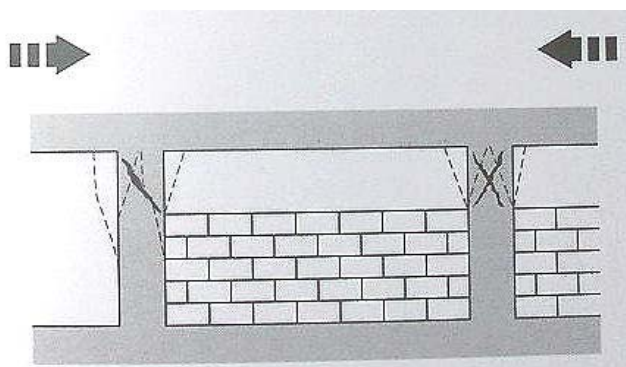


*de
du*

Ce serait une erreur de penser renforcer des poteaux en les raidissant par un remplissage partiel des espaces intermédiaires. Ainsi **les maçonneries partielles sont à l'origine de dommages graves pouvant provoquer l'effondrement.**



Séisme de Tokachi Oki, 1968 – Les allèges rigides ont « bridé » le poteau qui a eu un « appel » de déformation sur une petite hauteur. Il aurait peut-être résisté si la déformation nécessaire avait pu être répartie sur hauteur du poteau. Schéma Milan Zacek.



la

Un autre principe qui doit guider l'architecte est celui du « dimensionnement en capacité », **c'est-à-dire dimensionner plus généreusement les éléments indispensables à la stabilité d'ensemble.** Ainsi, il adoptera le principe « poteau fort – poutre faible » pour les structures (sauf bois : dissipation dans les assemblages) : les dommages ne doivent pas se former dans les éléments porteurs, ni dans les nœuds. En amont du calcul de la structure, il convient d'éviter les mauvaises dispositions géométriques qui seront difficiles à compenser par la technique.



Document NISEE – USA - Ce bâtiment dont les poutres sont dimensionnées plus largement que les poteaux, a eu un comportement à éviter absolument sous séisme : la rupture des têtes de poteaux qui aurait entraîné la ruine totale pour des secousses plus violentes.

10. Quelle est la différence entre un joint de dilatation et un joint parasismique ?

Le joint parasismique a pour but d'éviter tout entrechoquement entre les corps de bâtiment qu'il sépare. Ce n'est pas le cas du joint de dilatation qui est trop faiblement dimensionné et n'est pas vide. De fait, en zone sismique, tout joint de dilatation doit être remplacé par un joint parasismique en raison de ces impératifs de non entrechoquement.

Un joint parasismique est un espace **vide de tout matériau**, présent sur **toute la hauteur de la superstructure des bâtiments** ou parties de bâtiments qu'il sépare.

Ses dimensions sont **calculées en fonction des déformations possibles** des constructions, avec un **minimum réglementaire** pour les ouvrages à risque normal de 4 cm en zone Ib et 6 cm en zones II et III, de façon à permettre le déplacement des blocs voisins sans aucune interaction (chocs).



Figure 1 : (Japon, Document X) - Joint parasismique vertical large entre deux constructions susceptibles de présenter des déformations importantes en partie supérieure



Figure 2 : (Basse-terre, Document P. Balandier) - Joint parasismique vertical étroit entre deux parties d'un même bâtiment. Le joint PS est couvert d'un couvre joint souple



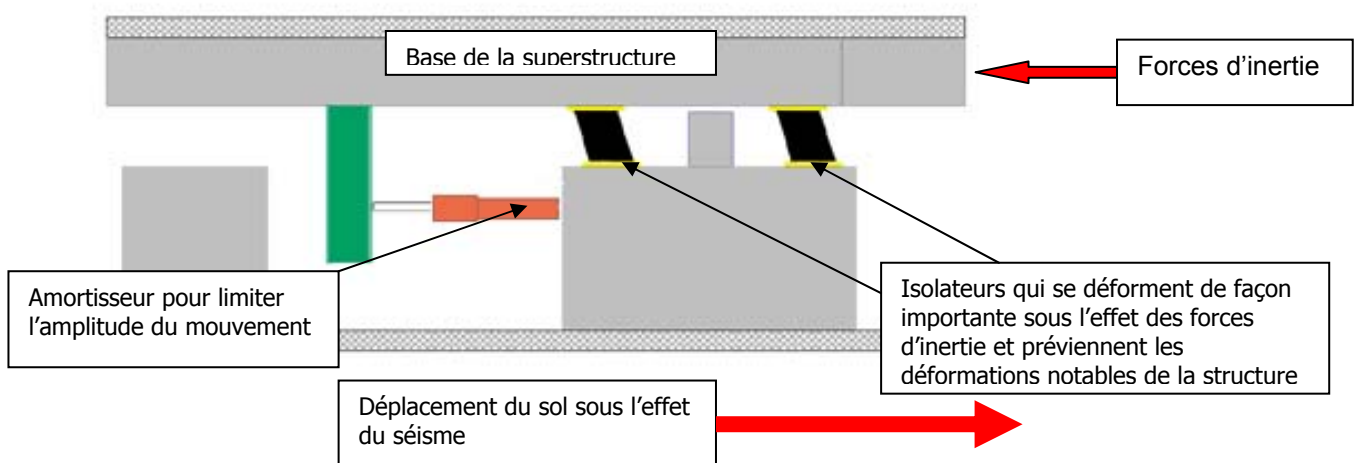
Figure 3 : (Document X) Entrechoquement de bâtiments pour cause de joint PS trop étroit au regard des déplacements réels.

11. Peut-on isoler un bâtiment des secousses en le posant sur des « caoutchoucs » ?

L'isolation parasismique qui est en général disposée entre les massifs de fondation et la superstructure permet de découpler l'infrastructure, qui se déplace avec le sol sans se déformer (déplacements horizontaux), de la superstructure, qui réagit à l'action du sol et se déforme sous l'effet des forces d'inertie. Dans ce cas ce sont les isolateurs, « infiniment » plus flexibles, qui se déforment et pas le bâtiment.

Dans ce cas, la déformation se concentre sur les isolateurs qui sont conçus pour la supporter sans dommages. L'isolation est généralement associée à des dispositifs amortisseurs qui limitent l'amplitude des déplacements de la structure sur ses appuis.

La conception des isolateurs doit impérativement être confiée à un bureau d'études spécialisé qui assiste le BET structure dans sa mission : la détermination de la réponse de la structure, la localisation, le nombre et le dimensionnement des appuis et des amortisseurs n'étant pas du tout une application de règles « traditionnelles ».



Déformation des isolateurs dont l'amplitude est limitée par l'amortisseur fixé entre le massif de soubassement qui se déplace avec le sol et une poutre de fixation à la superstructure (Document P. Sorel)

Avantages de l'isolation parasismique :

Le niveau de protection pouvant être obtenu est très supérieur au niveau exigé par les règles parasismiques pour les ouvrages à risque normal. Les ouvrages restent normalement opérationnels, même après les séismes violents.

Les dégâts aux éléments non structuraux et à l'équipement, qui représentent parfois un investissement considérable (dans le cas des hôpitaux par exemple), sont faibles ou nuls.

Les appuis restent en principe intacts après un séisme et sont opérationnels vis-à-vis des nouvelles secousses (répliques du séisme principal par exemple).

Inconvénients de l'isolation parasismique :

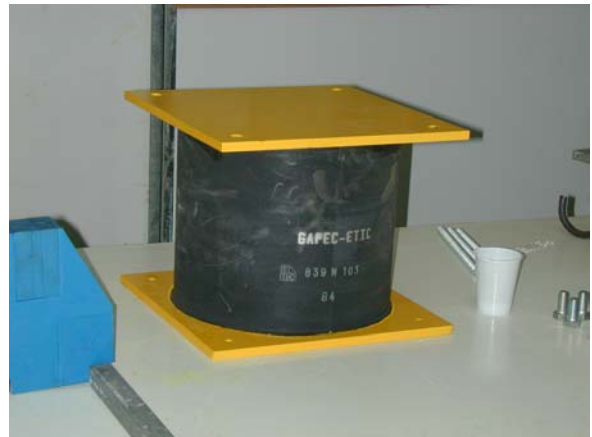
Tous les **ouvrages traversant le plan des appuis** (escaliers, tuyauterie,...) ou reliant le bâtiment avec ses abords immédiats (réseaux, marches extérieures,...) doivent être conçus de manière à tolérer sans dommages les déplacements relatifs de la superstructure et des fondations. Ces mesures sont impératives dans le cas des réseaux de gaz, de protection contre l'incendie et des réseaux contenant des fluides polluants.

Les **joints de séparation** entre deux bâtiments ou parties de bâtiment sur isolateurs nécessitent des largeurs importantes en raison des déplacements de chaque bloc, pouvant atteindre des valeurs décimétriques.

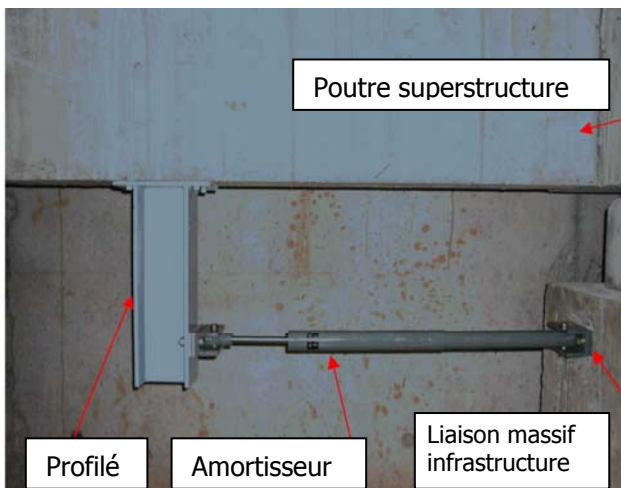
Les **transformations ultérieures** de la structure, des cloisons, des façades et d'autres éléments lourds ou rigides ne doivent pas modifier d'une manière significative le comportement dynamique initial du bâtiment pris en compte pour le dimensionnement des isolateurs, sous peine d'entraîner des coûts d'adaptation élevés.

Incidence sur le coût :

L'isolation parasismique augmente sensiblement le coût des bâtiments mais elle offre une protection supérieure à la protection réglementaire. Toutefois, on peut sensiblement réduire ce surcoût en optimisant ses différents paramètres du projet. On doit rapprocher ce surcoût au coût de l'endommagement évité, rapporté à la probabilité de récurrence des séismes pouvant provoquer ces niveaux de pertes.



A gauche, isolateurs sur les massifs de fondation au lycée de Ducos (Martinique). Cliché pris avant la mise en œuvre de la superstructure. A droite, gros plan sur un isolateur de la société Gapec. A l'intérieur de l'enveloppe de caoutchouc se trouvent de fines plaques d'acier entre des couches de caoutchouc. L'ensemble, testé selon des méthodes très éprouvantes est très résistant aux déformations latérales. (Documents P. Balandier et J. Sainsilly)



Exemple d'amortisseur visqueux fabriqué par la société Jarret pour les bâtiments en zone sismique. (Documents P. Sorel et J. Sainsilly)



12. Il est préférable d'avoir une structure homogène et hyperstatique.

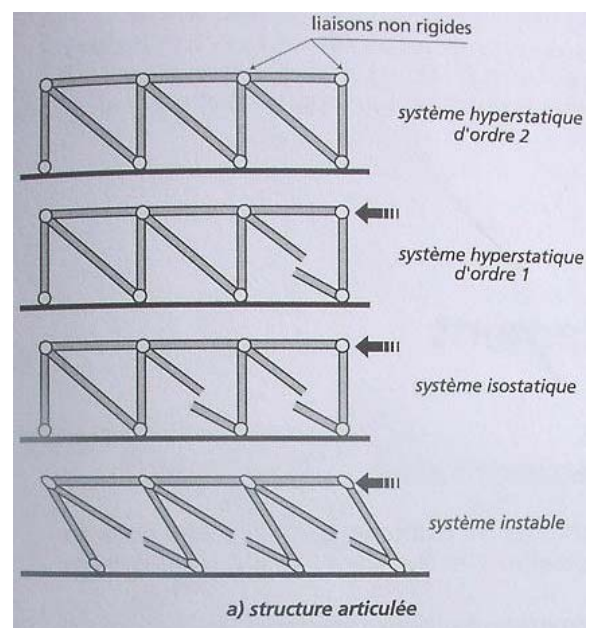
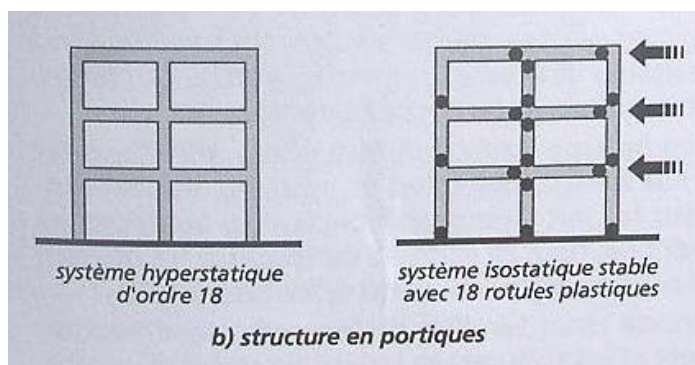
Nous avons vu l'importance d'une conception régulière de l'architecture. Cette règle de comportement régulier est également applicable à la structure constructive elle-même. **Il faut éviter de juxtaposer les matériaux et les modes constructifs différents, si on ne découple pas par un joint parasismique les parties d'ouvrage ayant un comportement différent. En élévation, il faut éviter les variations brutales de raideur.**



Lors du séisme de Kôbé en 1995, plusieurs bâtiments de conception architecturale régulière et conformes aux règles de calcul ont péri en raison d'une importante variation de raideur entre les étages du bas et ceux du haut, due au changement de conception de l'ossature considérant que les charges étaient moins élevées dans le haut du bâtiment.

Les structures hyperstatiques supportent la rupture de quelques éléments de structure sans que leur stabilité soit compromise (redondance). C'est bien ce que constate en principe un « coefficient q » élevé.

Document Milan Zacek – Le degré d'hyperstaticité d'un ouvrage est donné par le nombre de ruptures que cet ouvrage peut supporter sans perte de stabilité d'ensemble



13. Qu'appelle-t-on le contreventement ?

Pendant un séisme, une construction reçoit des charges horizontales qui, comme les charges verticales, doivent être transmises jusqu'au sol d'assise de la construction par les éléments résistants (travaillant en flexion ou en cisaillement).

Deux approches sont possibles:

- **Structures autostables** : les descentes de charges dynamiques horizontales passent par les mêmes éléments de structure que les charges statiques verticales (**murs, coques, treillis tridimensionnels, portiques croisés...**)
- **Structures contreventées** : les descentes de charges horizontales passent par des dispositifs spécifiques (**systèmes articulés + contreventements triangulés par exemple...**).

Dans tous les cas, ces efforts doivent être repris par des fondations appropriées.

Les structures contreventées sont, pour un grand nombre de partis architecturaux, moins coûteuses que les structures auto-stables.

Le contreventement d'une structure doit être horizontal (**diaphragmes**) et vertical (**palées de stabilité**) et dimensionné en fonction des accélérations attendues.

La qualité des liaisons entre la structure et les éléments de contreventement, et en général la qualité de leur mise en œuvre, conditionne leur efficacité.



Séisme de Kalamata – Document x - Ce type de ruine par empilement des dalles est typique d'une absence de contreventement vertical.

Le **contreventement des plans horizontaux** permet de transmettre et répartir les actions latérales subies par la construction (et ses charges de fonctionnement) sur les éléments de contreventement vertical. Chaque niveau, y compris les pans de toiture, doit être contreventé, c'est-à-dire « résistant aux déformations ».

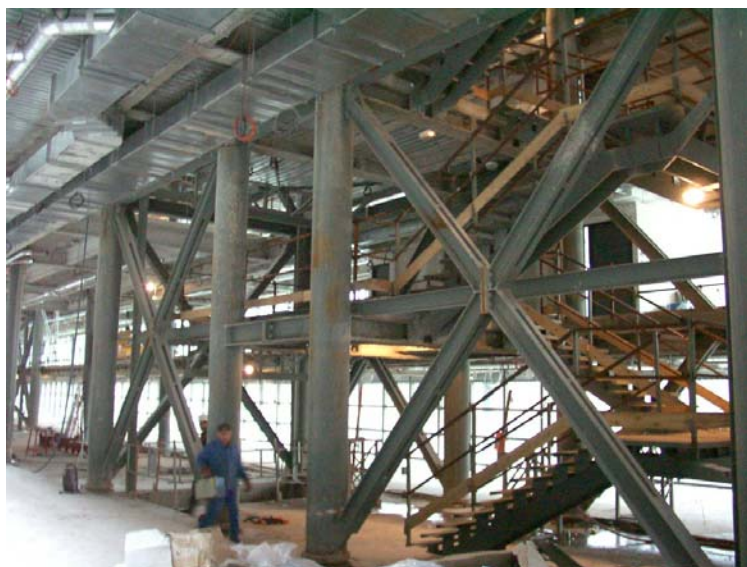
Les éléments du **contreventement vertical**, ou « palées de stabilité », doivent résister aux efforts horizontaux dans leur plan à chaque niveau de la construction et assurer la descente des charges dynamiques vers les fondations.



Les déformations acquises après séisme (Kobé, 1995, document NISEE) de cette structure en bois qui n'est pas allée jusqu'à l'effondrement illustrent bien les sollicitations auxquelles elle a dû résister.



Exemple de contreventement en façade par croix de St André sur chacune des travées. Il s'agit d'un type de contreventement triangulé plutôt flexible qui autorise des déformations non négligeables. Les tirants les plus sollicités se sont déformés, certains on rompu, mais la redondance des palées de stabilité a permis des reports de charges qui ont sauvé ce bâtiment hyperstatique. Les tirants défectueux peuvent être remplacés à l'issue du séisme.



Chantier du palais de justice de Grenoble. (Document P. Balandier) - Le parti constructif de cette ossature d'acier a été de contreventer par des barres le noyau des cages d'escalier et d'ascenseurs (situé de façon symétrique en plan) et les extrémités du bâtiment.

This image shows a blank sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

[illegible]