

CHAPITRE 3 : STRUCTURES RÉSISTANTES AUX SÉISMES

3.1 Séisme

Un **séisme**, ou **tremblement de terre**, résulte de la libération brusque d'énergie accumulée par les contraintes exercées sur les roches. Le résultat de la rupture des roches en surface s'appelle une faille. La science qui étudie ces phénomènes est la sismologie (étudiée par des sismologues) et l'instrument d'étude principal est le sismographe (qui produit des sismogrammes).

Le point d'origine d'un séisme est appelé *hypocentre* ou foyer sismique. Il peut se trouver entre la surface et jusqu'à sept cents kilomètres de profondeur (limite du manteau supérieur) pour les événements les plus profonds. On parle de *l'épicentre* du séisme pour désigner le point de la surface de la terre qui se trouve directement au-dessus de l'hypocentre.

En pratique on classe les séismes en trois catégories selon les phénomènes qui les ont engendrés :

Séismes tectoniques : se produisent aux limites des plaques, où il existe un glissement entre deux milieux rocheux. Ce glissement, localisé sur une ou plusieurs failles, est bloqué durant les périodes inter-sismiques (entre les séismes), et l'énergie s'accumule par la déformation élastique des roches. Cette énergie et le glissement sont brusquement relâchés lors des séismes.

Séismes d'origine volcanique : résultent de l'accumulation de magma dans la chambre magmatique d'un volcan. La remontée progressive des hypocentres (liée à la remontée du magma) est un indice prouvant que le volcan est en phase de réveil et qu'une éruption est imminente.

Séismes d'origine artificielle : sont dus à certaines activités humaines telles que barrages, pompes profonds, extraction minière, explosions souterraines ou nucléaires.

3.2 Construire parasismique

Plusieurs aspects interviennent dans la réalisation d'un projet de construction parasismique :

- la sismicité de la région et la nature du sol ;
- la qualité des matériaux ;
- la conception générale ;
- l'exécution des travaux ;
- Le respect de la réglementation.

3.2.1 La sismicité de la région et la nature du sol :

L'implantation d'un ouvrage nécessite de prendre en compte la sismicité de la région mais surtout de procéder à une étude de sol sérieuse permettant de dresser avec une bonne précision la coupe géologique et les caractéristiques des différentes couches. La qualité du sol joue un rôle important et c'est pourquoi, entre autres, le roc dur en place est à choisir plutôt qu'un remblai artificiel ou un terrain meuble, trop souvent gorgé d'eau, et dès lors susceptible de se liquéfier sous l'effet des vibrations, et de devenir en quelques instants incapables de soutenir un bâti quelconque (dans ce cas, il aurait fallu construire sur pieux ou puits par exemple) voir Fig.3.1.

Par ailleurs, il faut garder présent à l'esprit le risque des effets induits dus aux tremblements de terre : éboulements, glissements de terrain, etc., qui peuvent mettre gravement en péril plusieurs bâtiments, voire tout un quartier. La construction parasismique dépend donc beaucoup de la nature du sol, et les solutions techniques qui seront proposées pour un bâtiment ne seront pas toujours transposables à d'autres bâtiments (des études sont nécessaires).

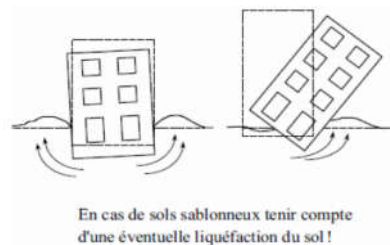


Figure 3.1

3.2.2 La qualité des matériaux

La nature des matériaux utilisés et leur qualité sont de première importance. Ils doivent répondre le mieux possible aux sollicitations mécaniques anormales que les tremblements de terre imposent. Il convient donc d'apporter un soin particulier au choix des matériaux. Dans ce « bon choix », il ne faut pas hésiter à utiliser les ressources locales.

3.2.3 La conception parasismique

Il faut garder en mémoire que la construction doit pouvoir se déformer sans ruptures significatives et absorber l'énergie transmise au bâtiment par la secousse sismique. On introduit ainsi la notion de ductilité, qui est la propriété d'une construction de se déformer notablement avant la rupture. À la ductilité s'oppose la fragilité, qui correspond à une rupture brutale avec peu de déformation (comme celle du verre).

3.2.4 La bonne exécution des travaux

Une bonne mise en œuvre et une exécution sur chantier soignée et menée par des personnes responsables est indispensable. La mauvaise exécution est trop souvent la cause de désordres importants et de pertes humaines pourtant évitables.

3.2.5 Le respect de la réglementation

Le génie parasismique est une véritable science en évolution et les indications données seront sans doute complétées à l'aide des enseignements tirés de l'observation in situ des séismes à venir. Les règles exposées sont simples, mais les derniers séismes ont montré que ces règles n'étaient pas toujours respectées.

3.3 Conception générale d'un bâtiment résistant aux séismes

3.3.1 Le comportement d'un bâtiment lors d'un séisme

Lors d'un séisme, le mouvement du sol est caractérisé par le déplacement et l'accélération du sol. Les constructions sont liées au sol au moins par leurs fondations, éventuellement par leurs parties enterrées (sous-sol). Les éléments de construction solidaires du sol suivent ces déplacements ; par inertie les parties en élévation ne suivent pas instantanément le mouvement et il s'ensuit une déformation de la structure. Si les constructions ont été conçues et réalisées suivant les règles de l'art en zone sismique, elles passeront par leur position initiale et se mettront à osciller. Au cours du mouvement, le bâtiment parasismique doit réagir dans un temps très court (quelques dizaines de secondes) sans dommage majeur. La rupture survient si le bâtiment n'a pas été conçu pour résister à ces mouvements.

Les forces d'inertie : Comme le passager soumis aux secousses d'un véhicule en mouvement (accélération, 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 **accélération**s 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. Fig.3.2.

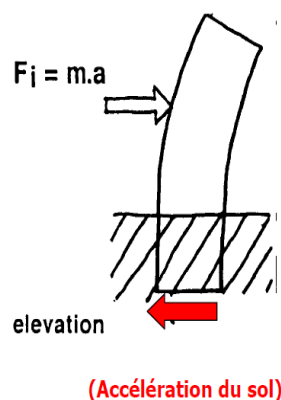


Figure 3.2

3.3.2 Les formes des bâtiments résistant aux séismes

La forme des bâtiments est choisie principalement en fonction des contraintes d'implantation au site, des directives des plans d'occupation des sols, de la forme du terrain, du programme à respecter et des références personnelles de l'architecte ou du constructeur. En effet dans les zones sismiques, on devrait rechercher des formes de bâtiments aussi simple et symétrique que possible. De nombreuses réalisations réussies sur le plan esthétique prouvent toute fois qu'une architecture de qualité est possible. La résistance aux séismes n'est qu'une donnée supplémentaire à intégrer dès la conception.

Voyons plus en détail l'influence des différentes options architecturales sur la résistance des constructions aux tremblements de terre :

a) Symétrie du plan :

La symétrie du plan selon les deux axes ou plus tend à réduire notablement la torsion d'axe verticale des constructions. Un plan circulaire ou carrée apparait donc de ce point de vue comme le plus avantageux. La résistance à la torsion des bâtiments en forme de L, T, U, V ou Z est par contre très inférieure à celle des bâtiments symétrique et compacts.

Si l'on désire conserver une configuration de volumes dissymétrique, il est possible de fractionner les bâtiments par des joints (dits parasismique ou de séparation) qui désolidarisent mécaniquement les divers blocs de constitution ou de géométrie différentes et permettent qu'ils oscillent librement sans collision mutuelles. La forme en plan des blocs ainsi obtenues doit être carrée, rectangulaire compacte ou proche d'un tel rectangle. Fig.3.3.



Figure 3.3

b) Simplicité en plan :

Les angles rentrant peuvent causer des problèmes, ils se trouvent même dans les constructions symétriques. On doit donc éviter de telles dispositions et rechercher des plans symétriques simples. Un découpage des plans symétrique complexe par des joints parasismiques est possible. Fig.3.4.

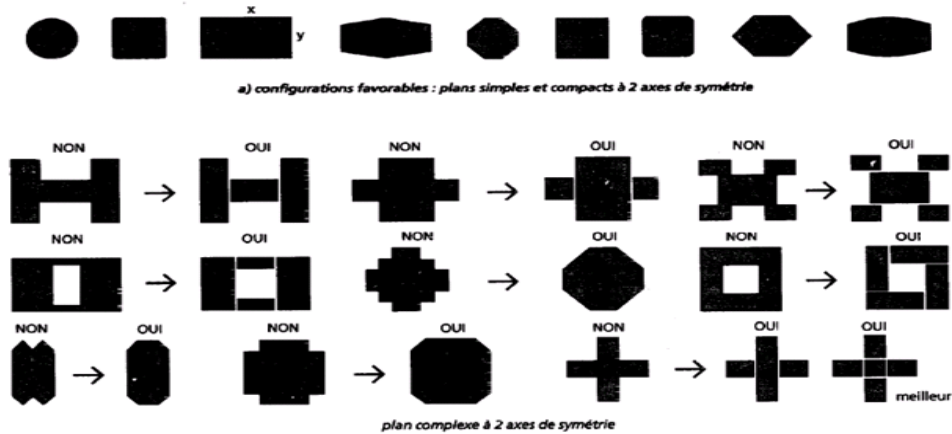


Figure 3.4

c) Dimensions horizontales des bâtiments :

Les effets des mouvements différentiels du sol sont particulièrement sensibles dans le cas des bâtiments de grandes dimensions horizontales. Les diverses parties de ces bâtiments ne subissent pas les mêmes déplacements de sol et n'oscillent pas nécessairement en phase. Nous avons vu qu'il en résulte des déplacements horizontaux et verticaux (tassements) différentiels ainsi les sollicitations en torsion. Il est donc préférable que le rapport de la longueur des bâtiments à leur largeur ne dépasse pas 3. Si des bâtiments de grandes dimensions doivent être édifiés dans une zone sismique, il est souhaitable de les fractionner par des joints parasismiques. Fig.3.5.

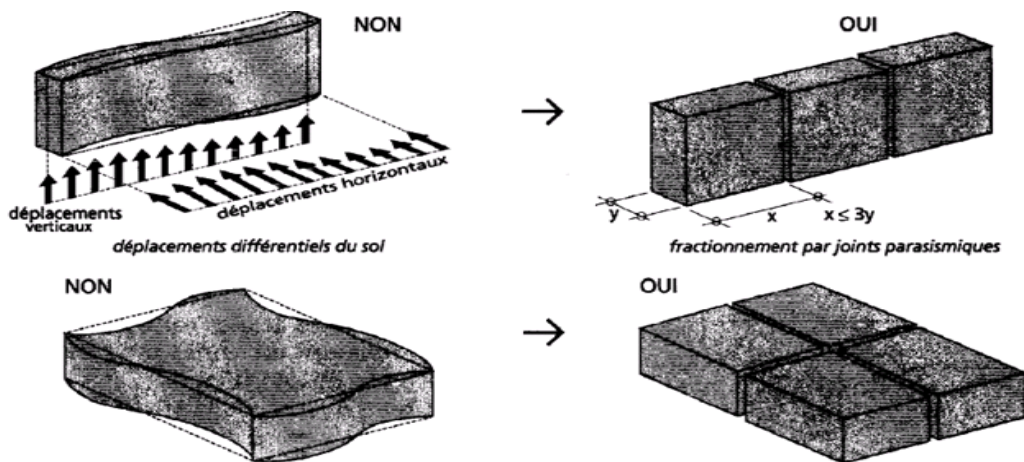


Figure 3.5

d) Symétrie et simplicité en élévation :

Les parties des bâtiments de hauteur et de volumes différents n'ont pas la même fréquence propre d'oscillation. À certains moments, elles peuvent subir des déplacements opposés. Si elles sont solidaires de fortes concentrations de contraintes se produisent dans les éléments qui les relient. Là aussi, une séparation par des joints parasismiques permet de conserver une configuration d'apparence complexe. Fig.3.6.

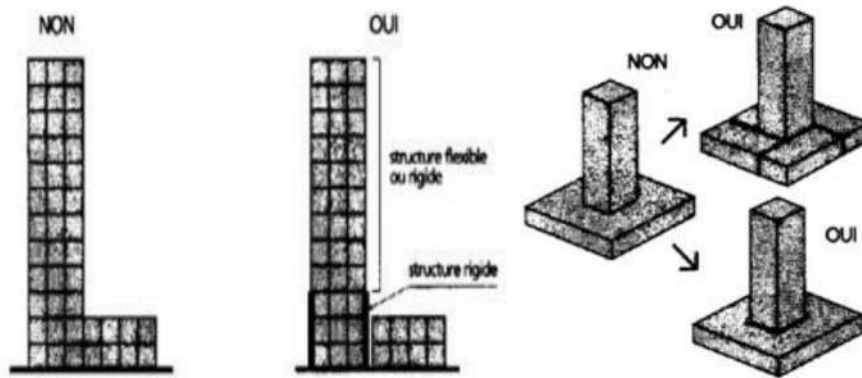


Figure 3.6

La présence d'étages en retrait est défavorable. Les angles rentrants formés par le retrait de la structure sont un lieu de concentration de contraintes (Fig.3.7.). Ces contraintes sont d'autant plus importantes que le retrait est profond. L'inconvénient représenté par les angles rentrants peut être supprimé en réalisant un retrait progressif de la structure porteuse.

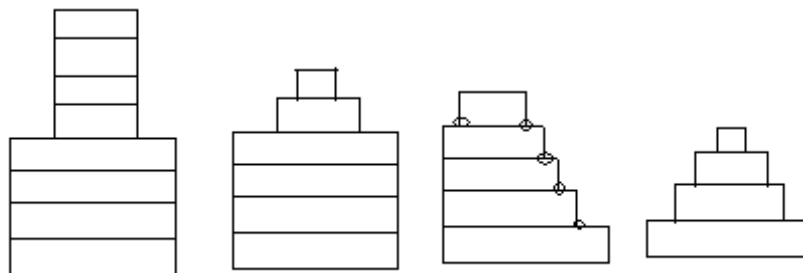


Figure 3.7

Les déplacements relatifs des étages en retrait sont nettement plus grands que ceux des étages d'un bâtiment de même caractéristiques mais de dimensions horizontales constantes sur toute la hauteur. Ils engendrent des efforts de cisaillement élevés ainsi qu'une grande ductilité à la base du retrait, difficile à satisfaire.

Les balcons en porte à faux de dimensions courantes sont tolérés. Les règles admettent une portée maximale de 1,5m et une masse en bout de la porte à faux ne dépassant pas 200 kg/m.

e) Hauteur de la construction et position du centre de gravité :

Les charges sismiques horizontales tendent à renverser les constructions et provoquent les effets indésirables. Étant proportionnelles à la masse de la construction, elles engendrent, pour une même accélération, des moments de renversement d'autant plus grands que les éléments lourds se situent à une hauteur plus élevée.

Donc pour un bâtiment d'une hauteur donnée, on devrait rechercher la position la plus basse possible du centre de gravité. Les formes pyramidales ou conique apparaissent de ce point de vue comme avantageuses, à condition de toutefois d'éviter l'interruption de la continuité des éléments verticaux. Fig.3.8.

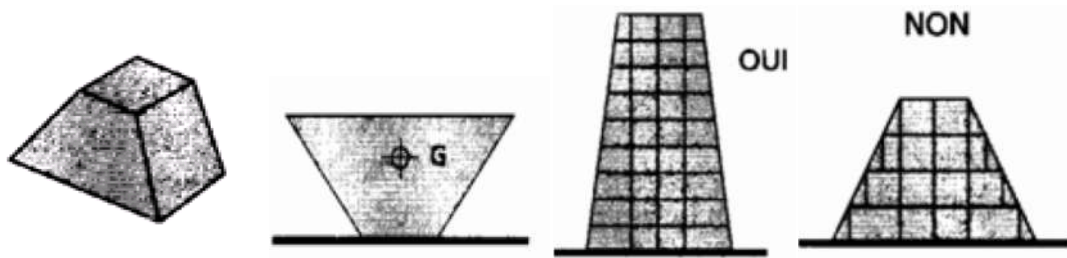


Figure 3.8

En ce qui concerne les constructions de grande hauteur, l'inconvénient du centre de gravité haut placé devrait être compensé en limitant leur élancement (rapport de la hauteur à la largeur).

Les codes parasismiques ne limitent généralement pas la hauteur des constructions pour les bâtiments élevés, ils exigent toutefois le recours à des matériaux performant (acier, béton armé coulé en place, etc.).

f) Présence de niveaux ouverts :

Le rez de chaussée ou les étages ouverts (transparence) sont fortement déconseillés. D'une part ils impliquent une position élevée du centre de gravité et d'autre part, ils peuvent constituer des « niveaux flexibles » qui donnent lieu à de sévères concentrations de contraintes aux extrémités des poteaux. Fig.3.9.

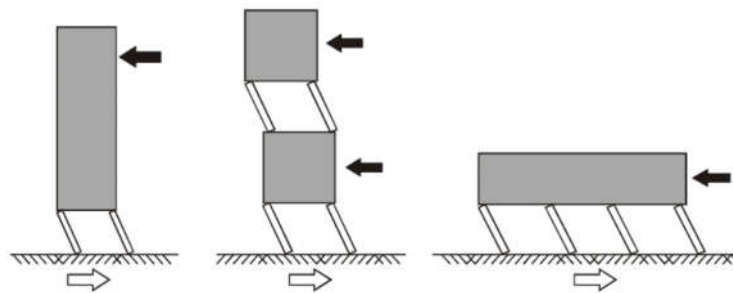


Figure 3.9

Lorsque la présence d'un rez de chaussée libre est souhaitée pour des raisons esthétiques ou fonctionnelles, afin de prévenir l'effet de niveau flexible, il est nécessaire de lui conférer une rigidité comparable à celle des étages supérieurs. La solution est de conférer à ces niveaux ouverts une rigidité comparable à celle des autres niveaux, par exemple par un contreventement en façade (Fig.3.10.a). Ou par une variation progressive de la rigidité horizontale (Fig.3.10.b).

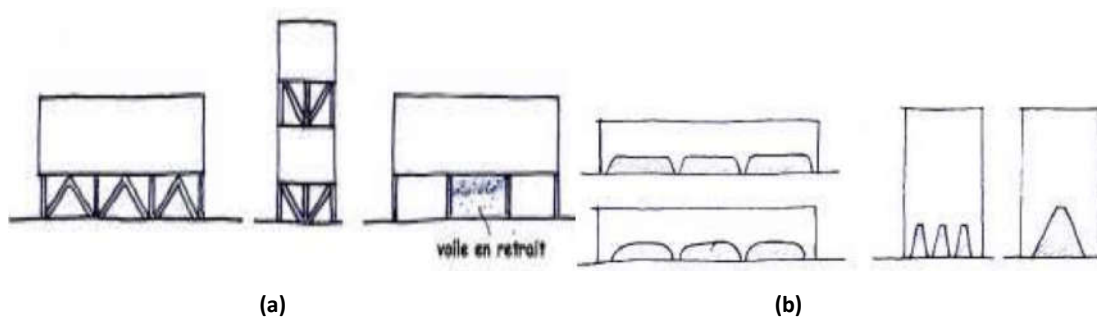


Figure 3.10

g) Présence de niveaux décalés :

Les bâtiments comportant des niveaux « décalés » portés par des poteaux ont souvent subi des dégâts importants lors de séismes majeurs. En effet, la hauteur libre des poteaux chargés de part et d'autre par des planchers situés à des niveaux différents est réduite, ce qui peut donner lieu à l'effet de poteau court et une ruine par cisaillement. Si on ne peut pas éviter ce type de construction, il est préférable d'intégrer les poteaux dans un refend en béton armé.

Fig.3.11.

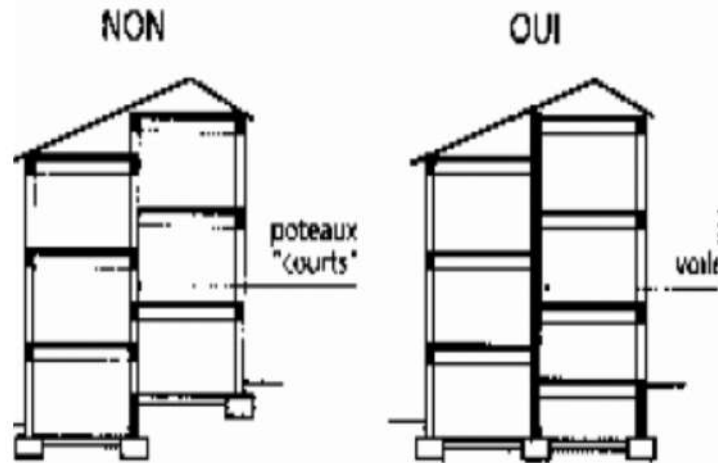


Figure 3.11

h) Hauteur d'étage :

L'effet de niveau flexible peut être provoqué également par une inégalité significative des hauteurs d'étage. Si celle-ci ne peut pas être évitée, il est nécessaire d'égaliser la rigidité des niveaux, par exemple en réalisant des palées de contreventement supplémentaires dans les niveaux moins rigides. Il est souhaitable de limiter la différence entre les hauteurs d'étages à 20% de la hauteur la plus grande. Par ailleurs la hauteur d'étage ne devrait pas être excessive car, lorsqu'elle augmente, les dommages sismiques croissent rapidement.

3.3.3 Conception des systèmes porteurs

Les options favorables à la résistance aux séismes relatives à la structure sont basées sur le même raisonnement que celles formulées en ce qui concerne la partie architecturale.

a) Régularité

La régularité permet de répartir correctement les charges sismiques sur les éléments porteurs, ainsi que de limiter les concentrations de contraintes. On obtient ainsi une descente de charges simple et maîtrisable. Par ailleurs, la "demande de ductilité", c'est-à-dire la ductilité nécessaire pour éviter la rupture, n'est pas excessive et peut être facilement obtenue. Par contre, cette demande peut être très importante et même impossible à satisfaire dans le cas des structures complexes.

SYSTÈME PORTEUR		COMMENTAIRE
murs porteurs en maçonnerie non chaînée et non armée		<ul style="list-style-type: none"> à proscrire.
murs porteurs en maçonnerie armée ou convenablement chaînée (y compris l'encadrement des ouvertures)		<ul style="list-style-type: none"> la maçonnerie en terre crue est à éviter dans la mesure du possible ; se limiter à un seul niveau. les maçonneries en briques ou blocs de béton sont acceptables pour toutes les zones ; éviter de dépasser 2 niveaux dans les zones de forte sismicité et 3 niveaux dans les autres zones.
portiques en béton armé avec murs de remplissage en maçonnerie		<ul style="list-style-type: none"> présente un comportement médiocre sous action sismique violente. convient pour les zones de sismicité faible ou moyenne.
portiques autostables en béton armé sans remplissages rigides		<ul style="list-style-type: none"> convient sur sol ferme en toute zone ; toutefois, la mise en place correcte des armatures requises pour la ductilité du béton est très difficile à obtenir sur le chantier. limiter la hauteur à 10 niveaux environ pour les portiques coulés en place et à 7 niveaux environ pour les portiques préfabriqués.
ossature en béton armé contreventée par des voiles		<ul style="list-style-type: none"> convient en toute zone. peut être utilisé pour les immeubles de grande hauteur
ossature métallique		<ul style="list-style-type: none"> convient très bien en toute zone. peut être utilisé pour les immeubles de grande hauteur.
ossature en acier enrobée de béton armé		<ul style="list-style-type: none"> convient très bien en toute zone. peut être utilisé pour les immeubles de grande hauteur.
systèmes poteaux-dalle		<ul style="list-style-type: none"> à éviter.
voiles en béton non armé, convenablement chaînés (y compris l'encadrement des ouvertures)		<ul style="list-style-type: none"> même commentaire que pour le système en murs de maçonnerie chaînée ; le comportement des voiles en béton est cependant meilleur.
voiles en béton armé coulé en place		<ul style="list-style-type: none"> convient en toute zone. efficace sur sols meubles.

SYSTÈME PORTEUR		COMMENTAIRE
coques		<ul style="list-style-type: none"> convient en toute zone. dissipe peu d'énergie.
voûtes en maçonnerie à simple courbure		<ul style="list-style-type: none"> à éviter.
coupoles et voûtes à double courbure en maçonnerie		<ul style="list-style-type: none"> acceptable en zone sismique. comportement en général satisfaisant grâce à leur rigidité spatiale et l'absence de bords libres.
membranes gonflées		<ul style="list-style-type: none"> convient parfaitement ; aucun dommage n'est à craindre pour la membrane.
membranes portées		<ul style="list-style-type: none"> convient en toute zone
toitures en câbles		<ul style="list-style-type: none"> convient en toute zone.

Figure 3.12

Il est donc souhaitable d'adopter :

b) Travées régulières

Une alternance de travées larges et de travées étroites crée des zones plus rigides que d'autres. Ces zones sont sollicitées d'une manière préférentielle alors même que leur déformabilité, et donc aussi leur capacité à absorber l'énergie, est réduite. Il est souhaitable de rechercher la régularité dans toutes les directions principales afin d'obtenir une distribution uniforme de la rigidité horizontale.

c) Superposition des éléments porteurs verticaux

Les reports de charge horizontaux entraînent des sollicitations de cisaillement importantes dans les poutres. La ductilité de ces zones est donc faible et une rupture fragile possible. Les configurations de la figure 3.13 sont à éviter.



Figure 3.13

d) Même longueur libre pour tous les poteaux :

Lorsque les poteaux d'un même niveau n'ont pas la même hauteur, un " effet de poteau court " peut se produire. Les dommages de ce type sont fréquents.

e) Poteaux de sections comparables :

Les charges sismiques sont distribuées sur les éléments porteurs verticaux en proportion de leur rigidité. Or leur rigidité à la flexion croît proportionnellement au cube de la dimension de la section dans la direction concernée, alors que leur résistance (à la flexion) augmente seulement avec le carré de cette dimension. Les poteaux larges de la figure 14 subissent donc, lors des séismes, une charge sismique 125 fois plus grande que les autres poteaux, alors que leur résistance n'est que 25 fois supérieure. S'ils participent au contreventement de manière significative. Leur destruction lors d'un séisme de forte magnitude est probable.

Les éléments porteurs verticaux isolés de grande rigidité constituent donc des " points durs " préjudiciables au bon comportement de la structure. Si de tels éléments sont nécessaires, on peut remédier à l'inconvénient évoqué par des voiles de béton assurant le contreventement, placés symétriquement par rapport au centre de gravité du niveau.

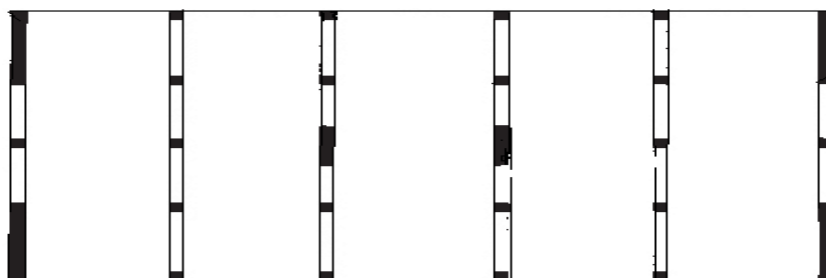


Figure 3.14

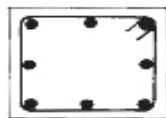
f) Niveaux ayant une rigidité comparable :

La présence d'un niveau nettement moins rigide que les autres est une cause fréquente d'effondrement " Niveaux souples ". D'une manière générale, il est préférable que les différents niveaux d'un bâtiment possèdent une rigidité constante ou variant faiblement. Une diminution progressive de rigidité vers le haut est acceptable (différence de 20 % au plus entre deux niveaux). Elle a pour conséquence une réduction des amplitudes d'oscillation des étages supérieurs.

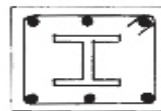
g) Homogénéité :

L'homogénéité est souhaitable aussi bien à l'échelle de la structure qu'à celle des éléments structuraux. Chaque système porteur a son comportement dynamique propre en fonction de masse, sa rigidité, son amortissement et sa géométrie. Si deux systèmes ayant un comportement différent sont liés, des dommages sismiques importants sont à craindre. Il est donc nécessaire les séparer par un joint vide de tout matériau afin de supprimer toute interaction structurale. Toutefois, les systèmes mixtes en portiques et voiles en béton armé montrent en général un excellent comportement sous séisme.

À l'échelle des éléments de structure, l'homogénéité devrait être la règle car ils ne peuvent pas être fractionnés par un joint parasismique. Lors de séismes de forte magnitude, l'hétérogénéité d'éléments structuraux est presque toujours une cause de dommages. Ces dommages peuvent être graves s'il s'agit de poteaux. La figure 15 en montre un exemple édifiant. Il s'agit d'un bâtiment qui a " perdu " un niveau suite à la rupture des poteaux réalisés en acier enrobé de béton armé aux étages inférieurs et en béton armé seulement aux niveaux supérieurs. La rupture s'est produite au droit du changement du type de poteau en raison d'une grande différence de rigidités transversales. Plusieurs bâtiments de ce type se sont effondrés lors du même séisme.



étages inférieurs



étages supérieurs

a) Types de poteaux utilisés pour la structure du bâtiment ci-dessous**b) Bâtiment de la mairie de Kobé après le séisme du 17.1.1995. La rupture des poteaux s'est produite au droit du changement de leur constitution**

Figure 3.14