

Chapitre II : Principales pathologies des constructions.

II.1: Introduction:

Les séismes sont inévitables. Ils se sont produits dans le passé, il s'en produira à l'avenir de tout aussi violents. Faute de pouvoir les éviter, on doit s'efforcer de prévenir ou du moins de limiter les dommages qu'ils occasionnent autrement dit de réduire le risque sismique.

Le risque sismique, qui peut être évalué pour une construction, pour une ville ou pour une région spécifique, est défini par la probabilité de pertes en biens, en activités productives et en vies humaines dans un laps de temps donné. Il augmente constamment avec la densité de la population et avec le potentiel économique du pays. Paradoxalement, le développement des sociétés entraîne donc un accroissement de leur propre vulnérabilité face aux tremblements de terre. En contrepartie, les sociétés avancées disposent généralement de connaissances scientifiques poussées des processus géophysiques, ainsi que de moyens techniques de protection des constructions contre les effets des séismes. Il est donc souhaitable que ces connaissances et ces moyens soient effectivement utilisés pour ramener le risque sismique à un niveau acceptable pour la collectivité.

II.2: Types de dégâts

Les dégâts qui se retrouvent inmanquablement lors de chaque catastrophe sismique peuvent être classés l'une des catégories suivantes :[7]

-  Effet de niveau souple
-  Effet de poteau court
-  Torsion d'ensemble
-  Oscillations différentielles
-  Résonance du bâtiment avec le sol
-  Couplage des bâtiments
-  Liquéfaction
-  Fissuration en croix
-  Martèlement
-  Déformations différentielles

II.2.1-Effet de niveau souple

De nombreux bâtiments comportent un ou plusieurs niveaux dont la rigidité horizontale est sensiblement inférieure à celle des autres étages. C'est le cas des bâtiments sur " pilotis ", de même que de ceux qui présentent de grandes portes, vitrines ou fenêtres concentrées sur certains niveaux (commerces, garages, hôtels, bâtiments administratifs, etc.). La hauteur de ces niveaux est souvent nettement plus grande que celle des autres niveaux et l'élancement des éléments porteurs verticaux plus important. Lors de séismes destructeurs, ces niveaux sont fréquemment écrasés suite à la rupture de poteaux à leurs extrémités (**Figure III.2**)

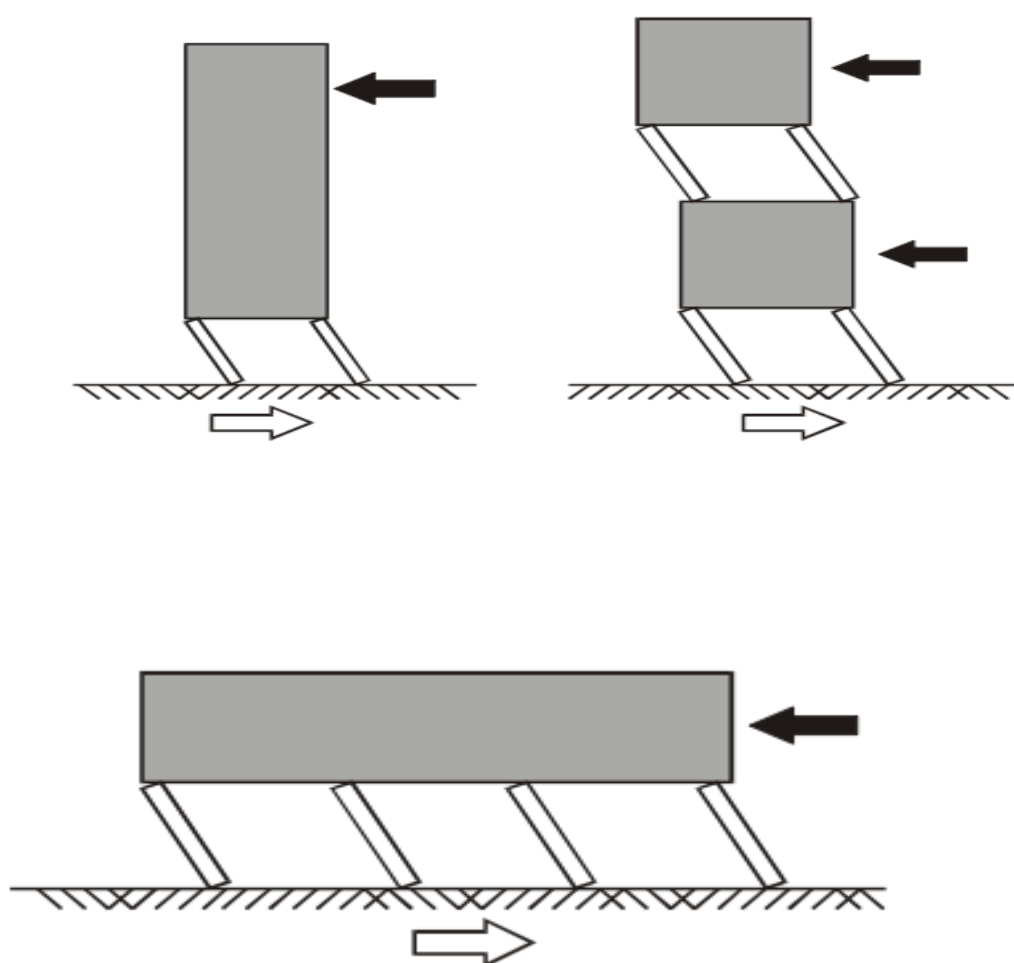


Figure II.1: Mode de ruine de niveau souple



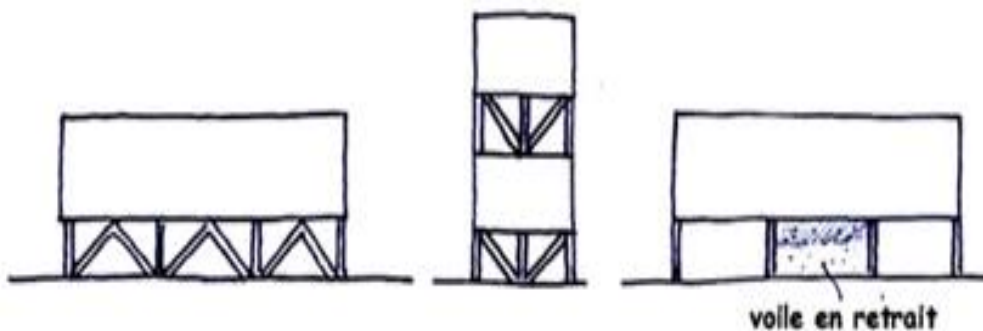
a) Séisme de Tokachi-Oki, Japon 1968

b) Séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003

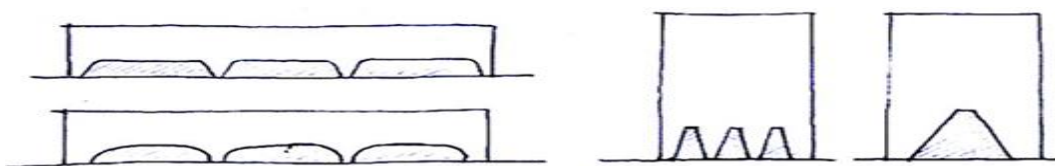
Figure II.2: Effet de niveau souple**Solutions visant à éviter l'effet de niveau souple**

La solution consiste à conférer à ces niveaux ouverts une rigidité comparable à celle des autres niveaux (fig.II.3):

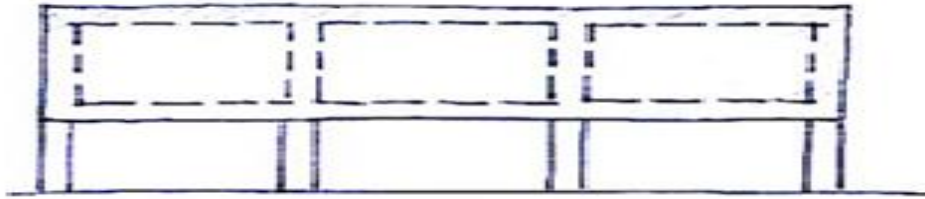
- au moyen d'un contreventement en façade;
- par des murs ou palées de stabilité métalliques en retrait de la façade, formant éventuellement un ou plusieurs noyaux rigides.
- par une variation progressive de la rigidité du niveau transparent.
- en réduisant la rigidité des autres niveaux (p. ex. en généralisant un système en portiques avec des façades et cloisons non rigides).



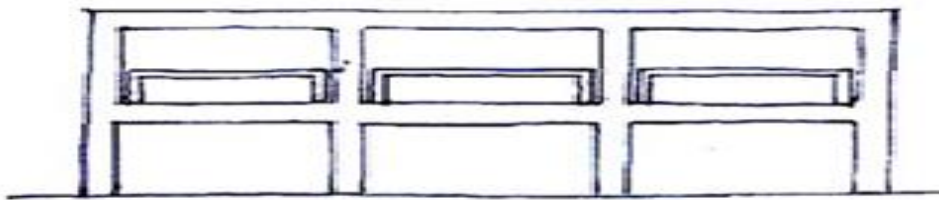
a) Contreventement en façade ou en retrait- Contreventement en façade ou à l'intérieur du bâtiment .



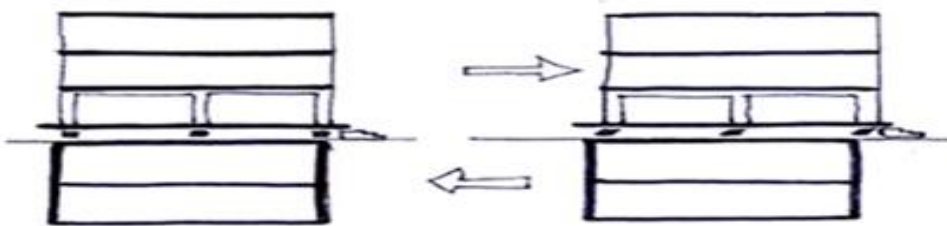
b) Variation progressive de la rigidité de niveau transparent.



c) Généralisation de la souplesse: Utilisation d'une façade légère découplée et de cloisons non rigides. Le rez-de-chaussée sée n'est pas plus souple que les autres niveaux



d) Découplage des allèges permettant d'égaliser la hauteur libre des poteaux de la structure principale.



e) Isolation parasismique.

Figure II.3: Solutions pour les bâtiments comportant des niveaux transparents.



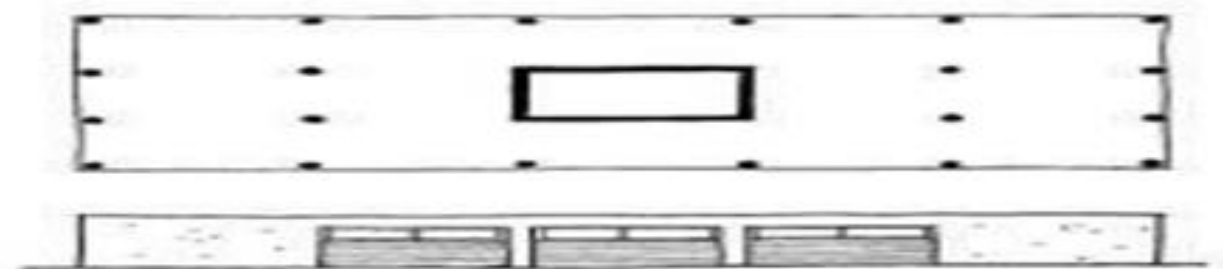
Figure II.4:quelque exemple sur la solution a posé

II.2.2-Effet de poteau court

Dans un bâtiment dont les planchers sont en béton armé, les efforts horizontaux dus aux séismes se distribuent sur les éléments de structure verticaux en proportion de leur rigidité latérale. Si, dans une structure en portiques, certains poteaux sont plus courts (comme ceux du vide sanitaire) ou si leur capacité de déformation est limitée par la présence d'allèges en maçonnerie, de paliers d'escalier intermédiaires, de mezzanines, de rampes ou d'autres éléments, ils sont beaucoup plus rigides que les autres poteaux. Ils sont donc nettement plus sollicités et peuvent être détruits par cisaillement. On parle de l'effet de « poteau court » (fig 6 à 41). Pour l'éviter, on peut opter pour un système contreventé, en plaçant des voiles en béton armé en façade ou à l'intérieur du bâtiment ou, dans le cas des allèges, utiliser des éléments industrialisés légers, possédant une faible rigidité (fig6).

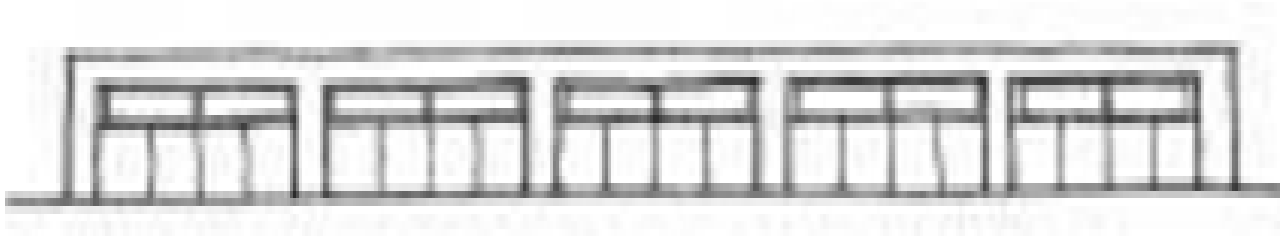


Figure III.5: L'effet de poteau court dû à la présence d'allèges en maçonnerie dans la structure principale en portiques, Séisme de Chi-Chi, Taïwan 1999



a) Contreventement par des voiles en béton à l'intérieur du bâtiment (figure du haut) ou en façade (figure du bas) : la part des charges sollicitant les poteaux " courts " (parce que par des

allèges en maçonnerie) est négligeable , car les voiles, beaucoup plus rigides canalisent la plus grande partie des charges.



b) Allèges non rigides en panneaux légers. Ces panneaux ne peuvent brider les poteaux

Figure III.6: Solutions supprimant l'effet de poteau court dû à la présence d'allèges rigides voiles en façade ou allèges non rigides (bardage).



Figure III.7: Dommages dus à l'effet de poteau court en vide sanitaire séisme d'El Asnam, Algérie 1980

cette situation a été interdite par le RPA après le séisme de Chelef de 1980. Le règlement exige l'utilisation d'un voile périphérique dans les vides sanitaires afin de protéger l'ensemble. En effet, la disposition peut s'avérer efficace pour un séisme majeur mais elle rend la structure fragile et l'expose aux effets des séismes modérés ou même faibles.

Effet de poteau court dans les cages d'escalier



Figure II.8: L'effet de poteau court dû à la présence d'un palier d'escalier, séisme d'El Asnam, Algérie 1980

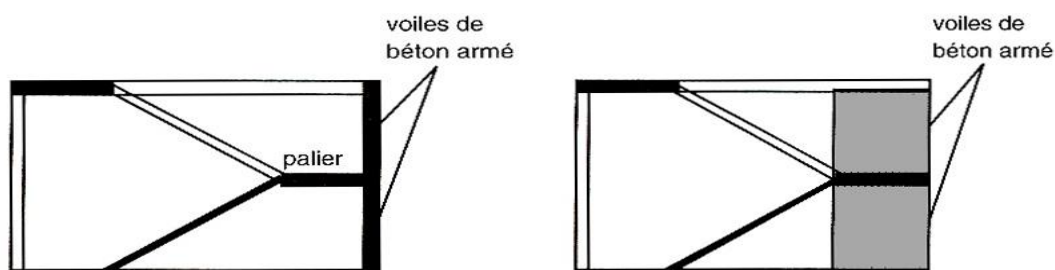


Figure II.9: Solutions supprimant l'effet de poteau court dû aux paliers d'escalier: voiles en fond de la cage d'escalier ou voiles latéraux (meilleure solution).

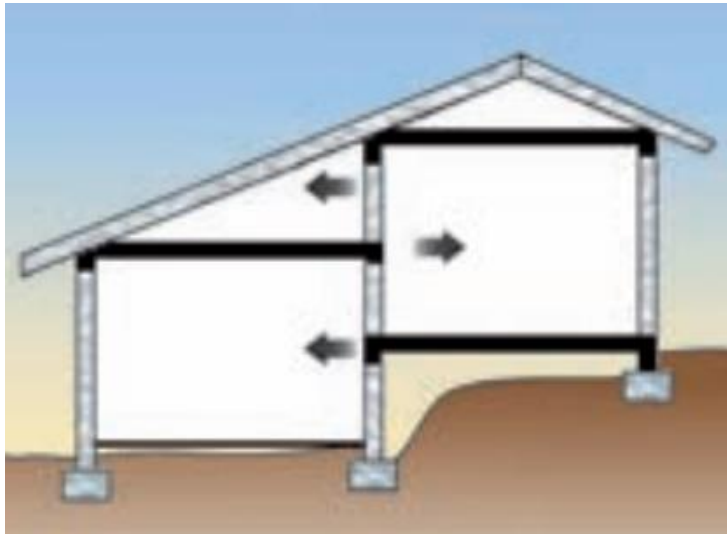


Figure II.10: L'effet de poteau court dû à la présence de niveaux décalés.

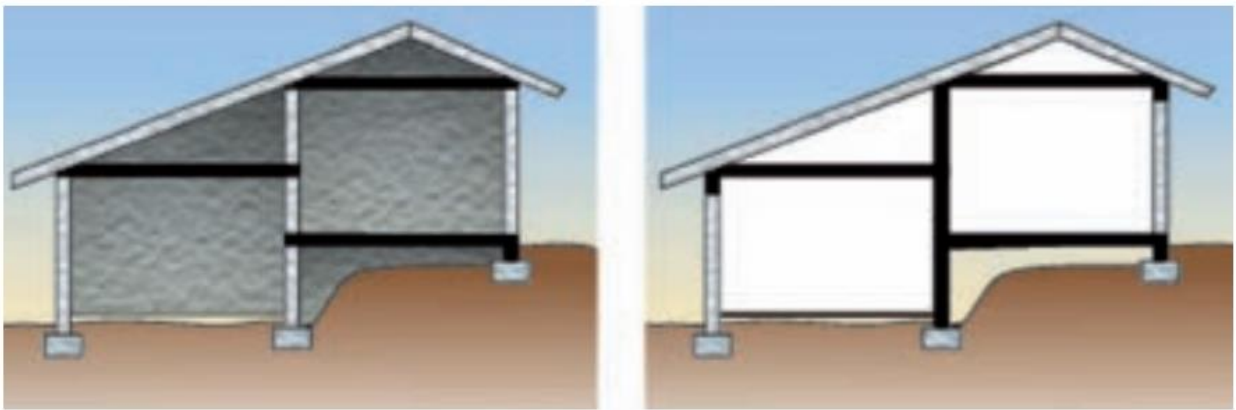


Figure II.11: Solutions supprimant l'effet de poteau court dû à des niveaux décalés:

Voiles en béton armé parallèles ou perpendiculaires à la pente.

II.2.3-Torsion d'ensemble

La torsion d'ensemble est l'un des facteurs de dommages sismiques les plus destructeurs. Elle se produit lorsque le centre de rigidité d'une construction n'est pas confondu avec son centre de gravité. Elle a donc lieu quand les éléments de contreventement sont décentés. Dans ce cas, sous l'action de forces horizontales, l'ouvrage tourne autour d'un axe vertical. Au lieu de comme un bloc, il subit à chaque niveau des déplacements horizontaux. Ce type de sollicitation est mal supporté par la structure.

La construction est soumise à une torsion d'axe vertical d'autant plus importante que la distance entre le centre des masses et le centre de rigidité est grande. C'est autour de ce dernier que la rotation se produit; il joue le rôle de centre de torsion. (figure.II.12).

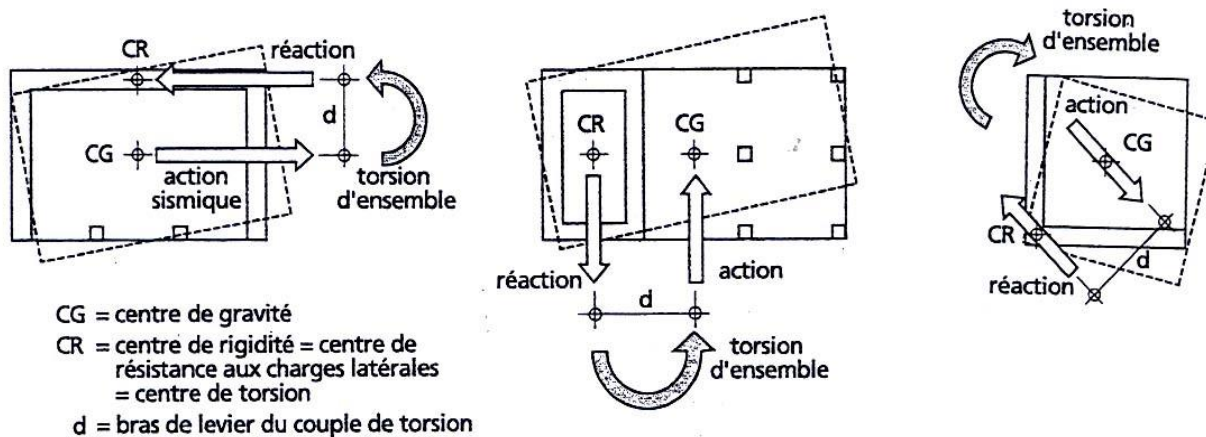


Figure II.12: Une position excentrée des éléments de contreventement.

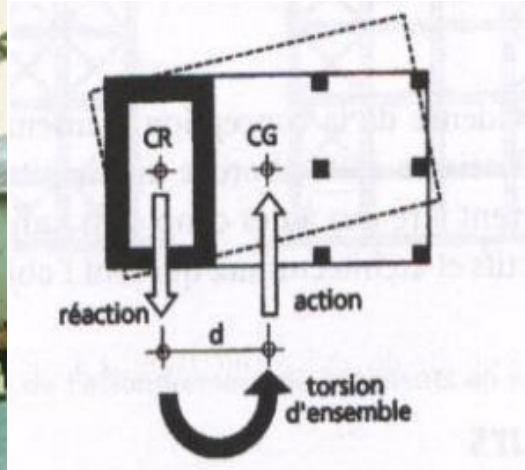
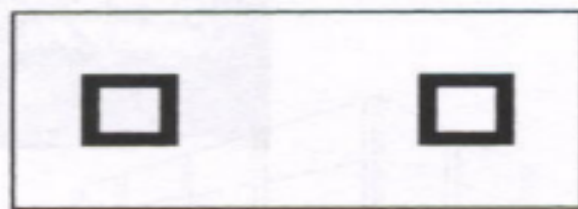


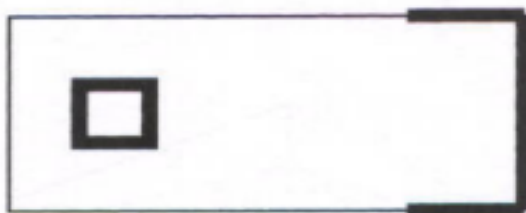
Figure II.13: Torsion d'ensemble Séisme de Tokachi-Oki, Japon

Solutions visant à éviter l'effet de Torsion d'ensemble

La symétrie des -rigidités- peut être obtenue par des cages d'escalier disposées symétriquement (fig.2.14a) ou par un contreventement judicieusement placé (fig 2.14b) .



a) disposition symétrique des cages d'escalier



b) Localisation excentrée de la cage d'escalier composée par des éléments rigides assurant la symétrie des rigidités

Figure II.14: Solutions supprimant l'effet de torsion d'un ensemble .

II.2.4- Oscillations différentielles

Les formes irrégulières en élévation ou en plan donnent lieu à des oscillations différentielles. Les parties de bâtiment de volume et/ou de hauteur distinctes vont osciller différemment et les éléments porteurs peuvent être soumis à des efforts de sens contraire, situation très défavorable pour la solidité de l'ouvrage.



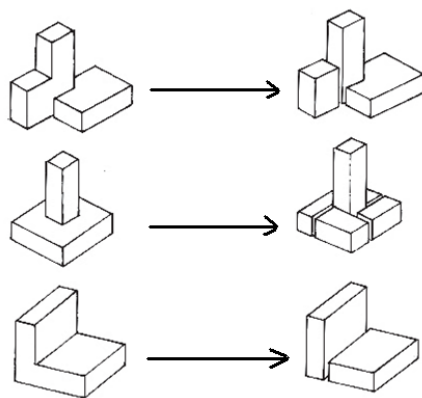
Figure II.15: Angle rentrant dans un plan horizontal et vertical.

- Solutions supprimant ou limitant les oscillations différentielles.

- Joints sismiques .
- Variation progressive de la forme .
- Renforcement de l'angle rentrant .
- Rigidifier les zones flexibles .
- Isolation parasismique .

1. Joints parasismiques :

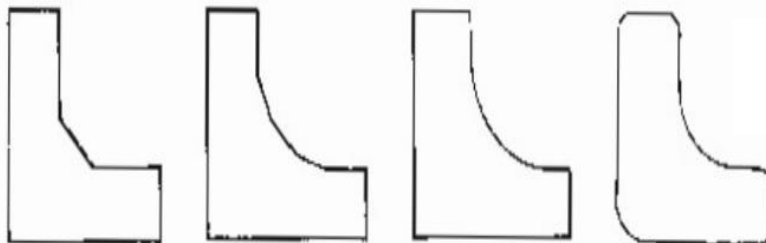
- Solution coûteuse surtout si le bâtiment est élevé , et où le joint doit être réalisé sur toute la hauteur. Ils doivent être vides de tout matériau , et de préférence ne coupent pas les fondations sauf quand ils jouent également le rôle de joint de tassement.



Séparation par des joints parasismiques

2. Variation progressive de la forme

Adoucir les angles par une forme plus fluide du bâtiment : Solution partielle mais efficace, très utilisée



Variation progressive de la rigidité

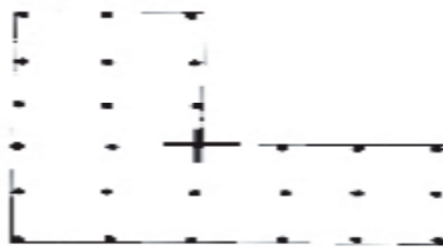


Figure II.16: Variation progressive de la forme du bâtiment en plan Centre et en élévation Croirait progressif des voiles.

3. Renforcement des angles rentrants

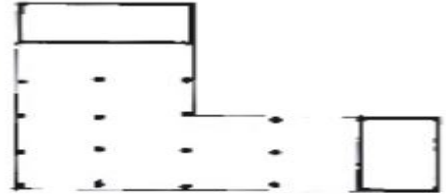
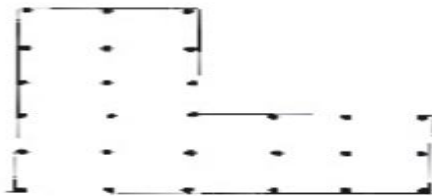
Solution fréquemment utilisée aux Etats-Unis et au Japon, et qui consiste à surdimensionner les éléments verticaux de stabilisation au niveau des angles rentrants.

Solution délicate à mettre en œuvre, et le renforcement des angles risque de former des points durs pouvant « attirer » les sollicitations sismiques.



4. Ajouts de palées de stabilité

Rigidifier les zones flexibles en ajoutant des palées de stabilité (murs de contreventement, palées triangulées, noyaux fermés,...).



5. Isolation parasismique

Interposer entre la superstructure et les fondations (ou sous sol) des appareils d'appui dits « isolateurs » destinés à supporter les déplacements imposés à la construction par le séisme sans dommage.

Avantages des isolateurs :

- Supportent de grandes forces, des dizaines voire des centaines de tonnes par élément, permettant ainsi une réduction considérable des charges sismiques par niveau (divisées par 5 ou plus suivant les caractéristiques des isolateurs).
- Permettent un déplacement horizontal de l'ordre de 10 cm, minimisant par conséquent les déformations et les concentrations de contraintes dans la superstructure.

II.2.5-Résonance du bâtiment avec le sol .

La résonance d'un bâtiment avec le sol se produit lorsque ses oscillations libres ont une période proche de celles du sol la période et le temps d'une oscillation (d'un aller-retour) exprimé en secondes . Les amplitudes d'oscillation s'accroissent alors d'une manière considérable , à l'instar d'une balançoire mise en mouvement par des impulsions d'une fréquence précise. Il s'agit d'un phénomène particulièrement destructeur, qu'il convient d'éviter impérativement. Il a été à l'origine de nombreux dommages graves .



Figure II.17:Séisme du Mexique, Mexico 1985

Prévention de la résonance

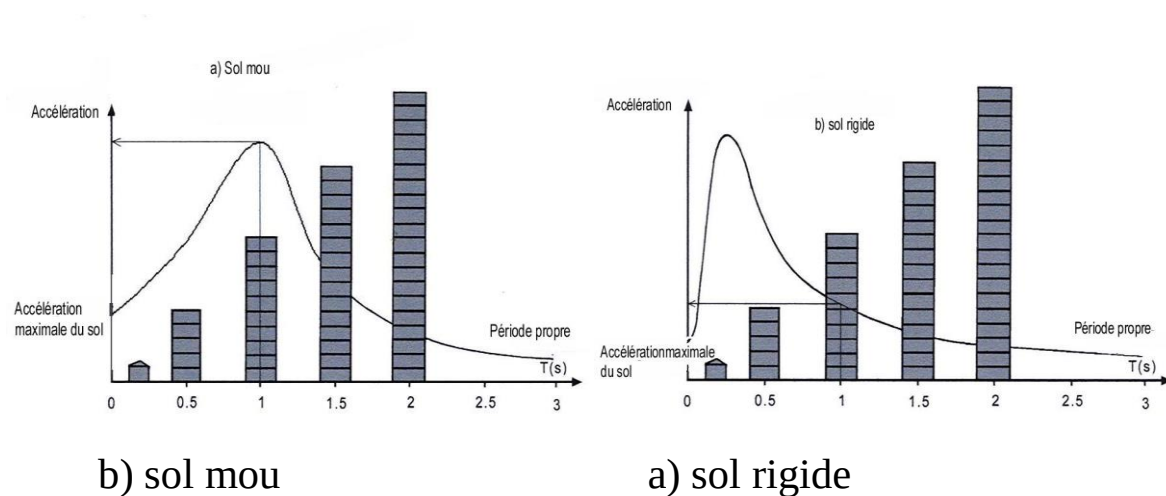


Figure III.18: variation des accélérations subies par les construction de la nature de leur sol d'assise.

Choix du système porteur ou du contreventement

- structure rigide sur sol meuble (impérativement).
- structure « flexible » sur sol ferme.

Modification du projet pour $T_{\text{bâtiment}} \neq T_{\text{sol}}$

Réduire la période propre T

Rigidifier le bâtiment :

- augmenter la largeur ou le nombre des éléments de contreventement.
- opter pour un contreventement en voiles de béton.
- réduire l'élancement géométrique de la construction (rapport hauteur/largeur dans la direction étudiée).
- réduire la hauteur du bâtiment .
- évaser (élargir) la base de la construction.
- Réduire la masse de la construction en optant pour une structure plus légère.

Augmenter la période propre T

- Réduire la rigidité du bâtiment :
 - opter pour un système porteur « flexible » (ossature en portiques sans remplissages ou façades rigides,...).
 - augmenter la hauteur du bâtiment.
 - augmenter l'élancement géométrique du bâtiment.
- Recourir à l'isolation parasismique.[9]

II.2.6-Couplage des batiments.

Afin d'en faciliter l'accès ou l'évacuation , deux bâtiments sont parfois couplés par des passerelles ou escaliers, alors même que lors d'un séisme, il n'oscillent pas toujours en phase. Les ouvrages qui les relient peuvent alors être détruits (fig.II.19). Pour les préserver, il est nécessaire de désolidariser mécaniquement ces ouvrages d'au moins un immeuble . La meilleure solution Consiste cependant à réaliser une structure autostable indépendante séparée des bâtiments adjacents par des joints parasismiques .



a) Destruction de passerelles due d'une part à des oscillations différentielles et, d'autre part aux dommages subis par le bâtiment de droite (séisme de Kôbé, Japon, 17.1.1995)



b) Escalier extérieur de 2 immeubles. Une structure autostable indépendante serait préférable

Figure II.19: a, b- Bâtiments couplés par des passerelles ou escaliers. Afin de prévenir leur effondrement lors de séismes violents, un découplage mécanique est nécessaire .

II.2.7-Liquéfaction

Un phénomène très courant lors d'un passage d'un tremblement de terre est le phénomène de liquéfaction, les sables fins saturés en eau peuvent en être le siège très souvent.

La mise en mouvement du sol entraîne une remontée de la pression interstitielle provoquant la réduction de la résistance au cisaillement de ce sol jusqu'à atteindre une résistance nulle. cette annulation de la résistance au cisaillement provoque que le sol

sur la liquéfiable se Une des conséquences de la liquéfaction est le fait qu'une couche non deuxième. Ce glissement entraîne le plus , souvent la chute ou le renversement du bâtiment. Pour remédier à ce problème des essais sont réalisés en laboratoire par des géotechniciens afin d'examiner si le sol de fondation de la future structure est liquéfiable . En général il s'agit de sable fin à moyen à grains arrondis et saturé en eau, se trouvant entre deux couches d'argile imperméable. Lorsque c'est le cas il est préférable de ne pas fonder la structure sur ce type de sol et essayer d'atteindre d'autres profondeurs où le terrain sera plus avantageux.



Figure III.20: phénomène de liquéfaction

Solutions Pour éviter le problème liquéfaction de sole

Plusieurs procédés de traitement existent, comme:

1-Consolidation statique par injection: Procédé souvent utilisé pour les terrains sableux, limoneux, argileux, humides et saturés dans le but d'augmenter le niveau de contrainte entre les grains (jusqu'à éliminer les paramètres responsables de la liquéfaction)

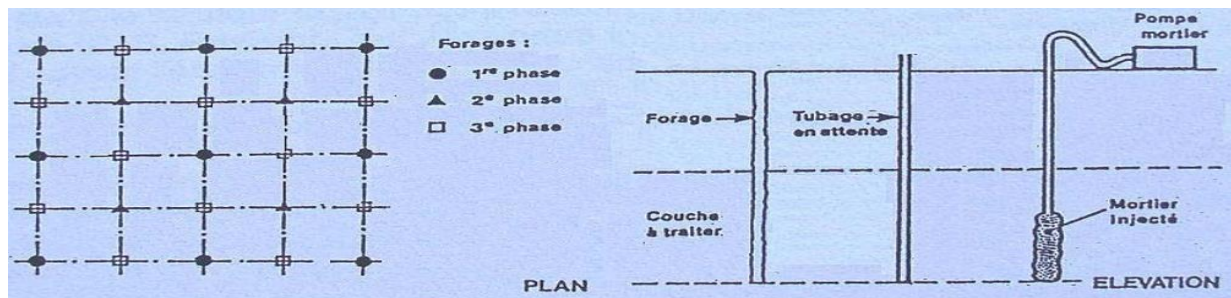


Figure III.21: Consolidation statique par injection

2-Consolidation par vibro flottation: Applicable aux sols granulaires non cohérents (sables et graviers)

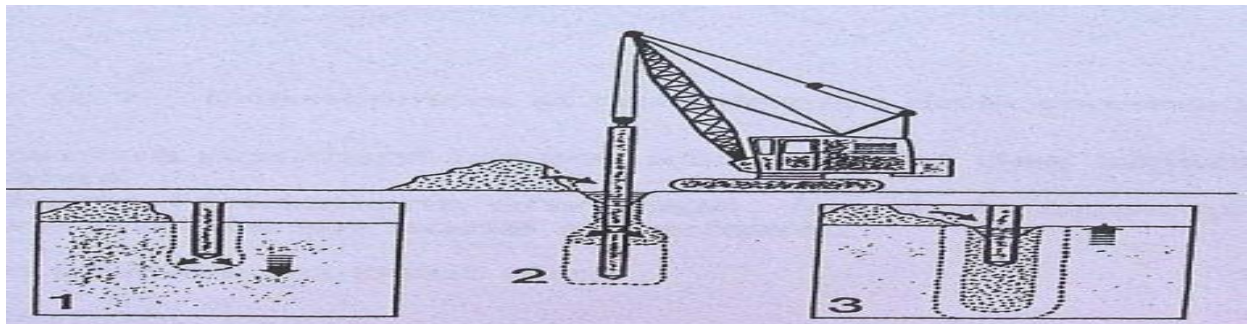


Figure III.22: Consolidation par vibro flottation

3-Consolidation par vibro substitution ou colonnes ballastées: Applicable aux sols cohérents (limons et argiles) lorsque la profondeur du sol à traiter est supérieure 4 mètres

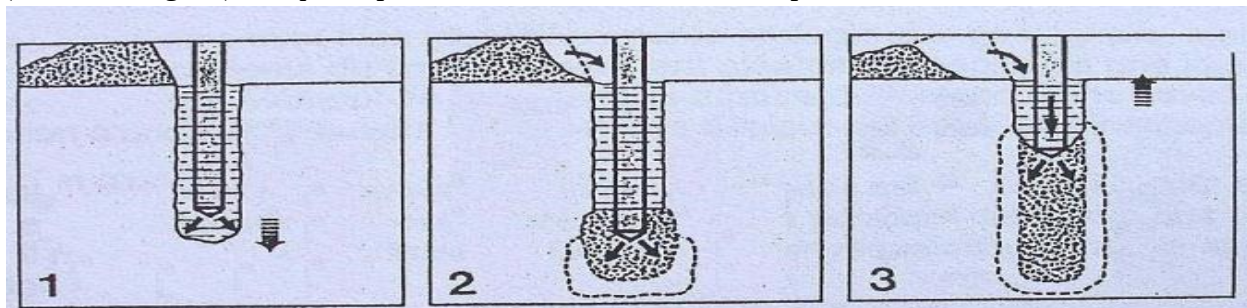


Figure III.23: Consolidation par vibro substitution ou colonnes ballastées

II.2.8-Fissuration en croix

Les fissures en croix dans les murs sont la signature typique des sollicitations sismiques. en effet , elles mettent en évidence le caractère cyclique ainsi que la direction principalement horizontale de l'action sismique .

Les efforts horizontaux provoquent une rupture oblique a 45° dans les murs verticaux fragiles (il s'agit de la traction diagonale perpendiculaire a la compression principale issue du cisaillement) . le meme phénomène intervient en cassant une craie par torsion , la surface de rupture est alors inclinée a 45° .

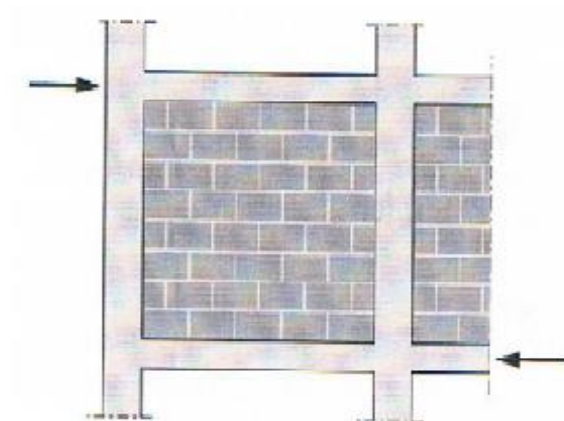
La forme en croix découle du fait que l'action sismique ne s'exerce pas uniquement dans une seule direction mais qu'elle s'inverse plusieurs fois durant l'événement .

Comme l'illustre la figure 2.3 , les fissures en croix apparaissent principalement dans les murs en maçonnerie car ceux-ci présentent une faible résistance a la traction . une fois les fissures en croix formées,l'endommagement va se poursuivre avec l'ouverture des fissures jusqu'à la rupture de l'élément et l'enfoncement éventuel de la structure . de surcroit , les murs en maçonnerie sont spécialement sensibles aux sollicitations transversales (hors de leur plan) et les fissures en croix les fragilisent encore plus car elles découpent des panneaux qui s'enfoncent fréquemment transversalement.

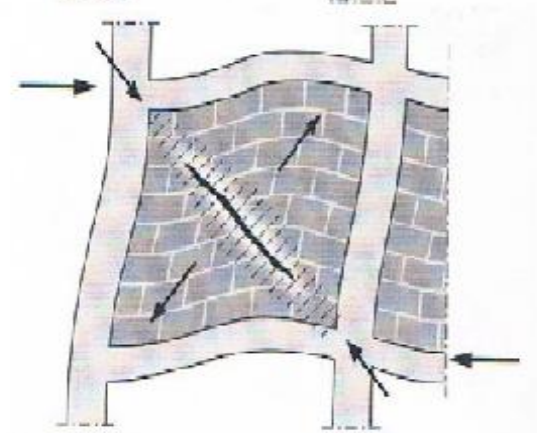


Figure II.24:les fissures en croix dans les éléments en maçonnerie

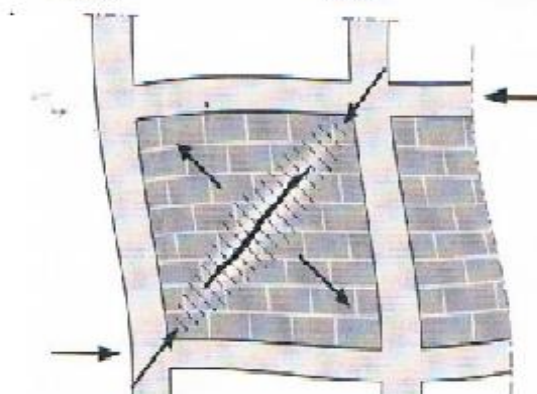
**Figure II.24: Portique (poteaux - poutres)
avant l'action sismique**



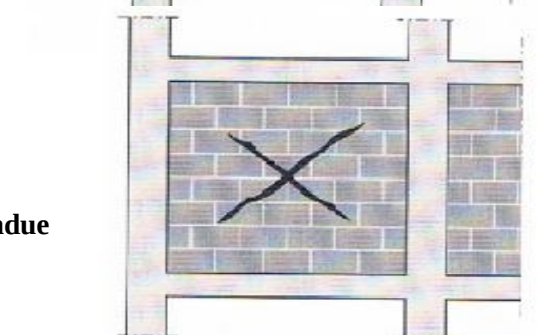
**Figure II.25: Sous l'action sismique
formation d'une Diagonale comprimée et
d'une diagonale tendue**



**Figure II.26: Changement de direction du
séisme Inversion des sollicitations des
diagonales**



**Figure II.27: Sous l'action sismique formation
d'une Diagonale comprimée et d'une diagonale tendue**



- Solutions pour éviter les fissuration en croix

dans notre travail en distingue deux procédures afin de éviter les fissuration en croix.

1-Dans les constructions à ossature, séparer les parois non-porteuses par des joints

Dans les constructions à ossature relativement peu rigides, il peut s'avérer judicieux de prévoir des joints pour séparer la structure porteuse et les parois intermédiaires non-porteuses,

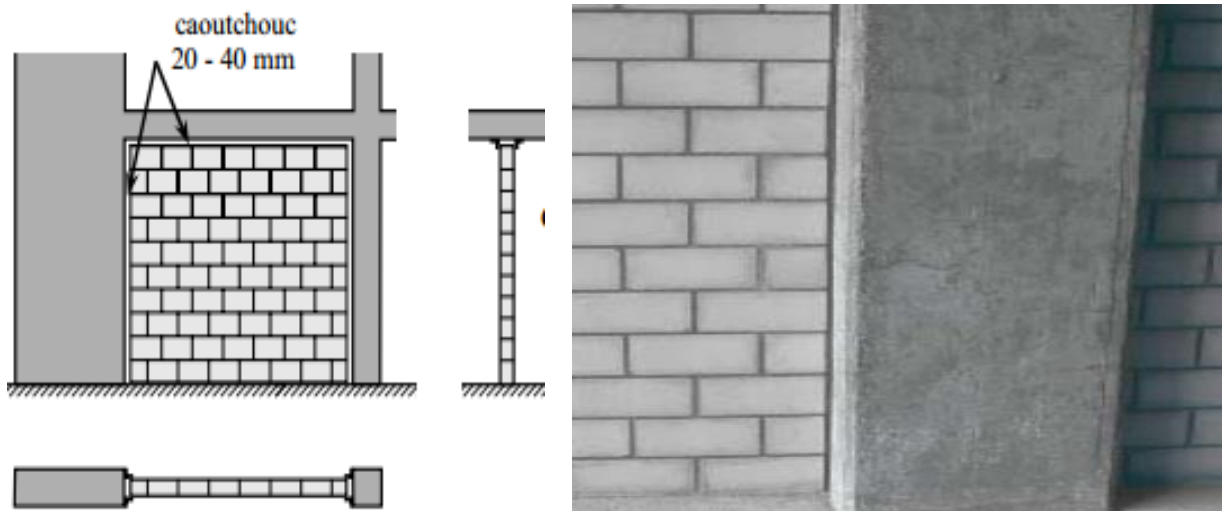


Figure II.28: séparer les parois non-porteuses par des joints

2-renforcement diagonale des parois

- a) Par fibre de fibre de carbone ou en acier: On peut améliorer la solidité et la ductilité des parois en maçonnerie des bâtiments existants en y appliquant des lamelles en fibres de carbone ou en acier
- b) Par treillis en acier



10-40 mm

Dans l Figure II.29 : renforcement diagonale des parois es

constructions

II. 2.9-Martèlement :

Etant donné que les bâtiments sont sujets à des déformations horizontales importantes durant un séisme, deux bâtiments voisins peuvent entrer en collision si l'espace qui les sépare est insuffisant. Le martèlement (entrechoquement) des bâtiments constitue un dégât sismique typique que en zone urbaine.

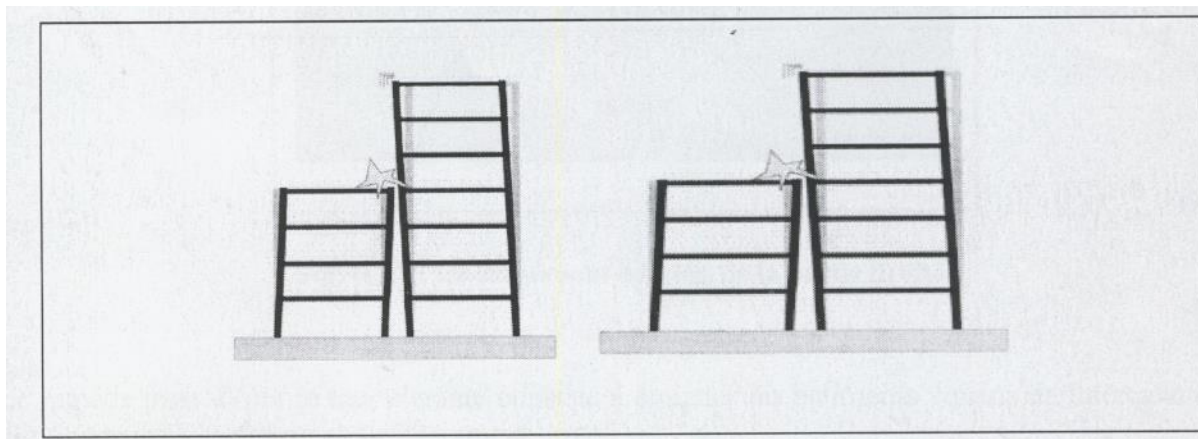


Figure II.30 le Martèlement de bâtiment voisins insuffisamment séparés par un joint est un dégât typique en zone urbaine .

Comme illustre la figure ci-dessus, le danger est particulièrement important si les bâtiments sont de hauteurs différentes car ils n'oscillent pas de concert, en raison de leurs caractéristiques dynamiques différentes (fréquences fondamentales), augmentant les possibilités de collision.

De surcroît, à l'instar de la partie gauche de la figure 2.30, le danger est particulièrement important si les bâtiments sont de hauteurs différentes car ils n'oscillent pas de concert, en raison de leurs caractéristiques dynamiques différentes (fréquences fondamentales), augmentant les possibilités de collision qui intervient lorsque les directions de leurs mouvements vont s'opposer (déphasage). Si les étages coïncident, les dalles se percutent et les dégâts se limitent généralement autour de la zone de contact. Les dégâts sont plus importants si les étages sont décalés. À l'image de la partie droite de la figure 2.31, des hauteurs d'étages qui ne correspondent pas constituent en effet la situation la plus défavorable car les dalles percutent alors de plein fouet les colonnes du bâtiment voisin, pouvant les trancher net. Les dégâts engendrés par la collision entraînent souvent dans ce cas l'effondrement d'un, voire des deux bâtiments.



Figure II.31 les étages sont décales, de la partie gauche

Le remède pour éviter le martèlement consiste à éloigner les bâtiments voisins en intercalant un joint parasismique (espace) suffisamment large.

Pour éviter le problème entrechoquement des bâtiments on a utilisé des joints parasismiques suffisants.

- Solution coûteuse surtout si le bâtiment est élevé, et où le joint doit être réalisé sur toute la hauteur. Ils doivent être vides de tout matériau, et de préférence ne coupent pas les fondations sauf quand ils jouent également le rôle de joint de tassement.
- Largeur du joint fonction de la déformation maximale des bâtiments adjacents avec les minima suivants:

4,0 cm en zones I et IIa

6,0 cm en zones IIb et III

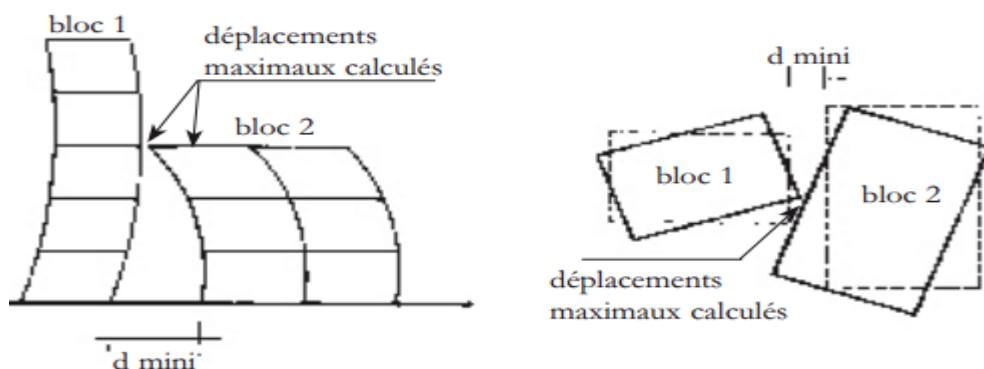


Figure II.32 :Largeur minimale des joints parasismiques

II. 2.10-Déformations différentielles

Les mouvements sismiques horizontaux et verticaux du sol ne sont pas identiques d'un endroit à l'autre. Les différences augmentent avec la distance. Leur effet sur les bâtiments de grandes dimensions horizontales peut être sensible (fig II.33).

En outre, on observe souvent des dommages sismiques importants aux extrémités des bâtiments longs. Ces dommages sont dus à un phénomène de type " coup de fouet ". En effet, arrivée à la limite du milieu solide, l'énergie qui se propage dans un bâtiment se réfléchit à son extrémité vers l'intérieur et s'y concentre. Le phénomène fait penser à un coup de fouet, dont le claquement témoigne de l'énergie concentrée à sa pointe. La (fig. II.34) montre les dommages sismiques importants aux extrémités d'un bâtiment long.

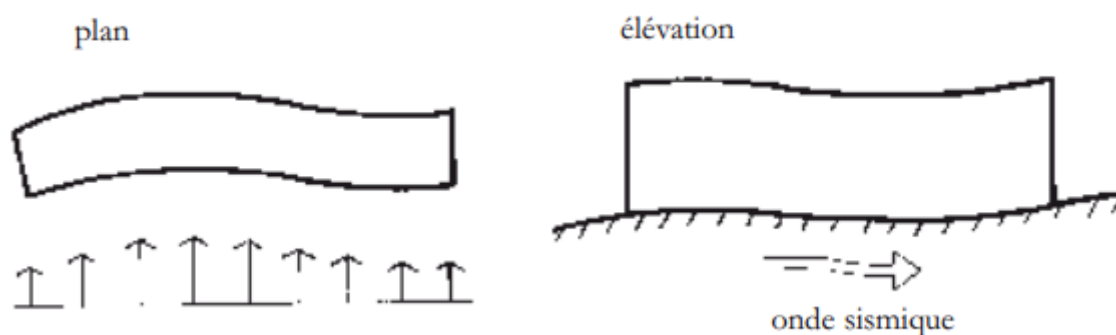


Figure II.33 : Déformations différentielles horizontales et verticales



Figure II.34 : Bâtiment long ayant subi des dommages importants à ses extrémités (séisme de Colfiorito, Italie, 26.09.1997).

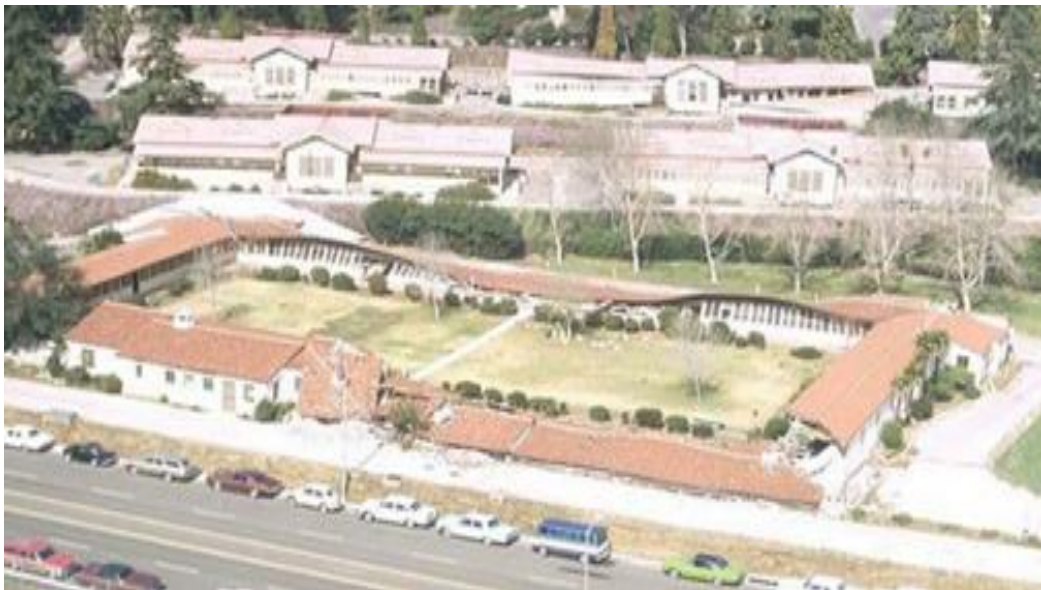


Figure II.35 : Dommage dus aux déplacements différentielle (san fernando , californie 1971)
Solutions supprimant ou limitant les Déformations différentielles

Afin de limiter l'importance des déformations différentielles, il est souhaitable de fractionner ces bâtiments en blocs compacts.

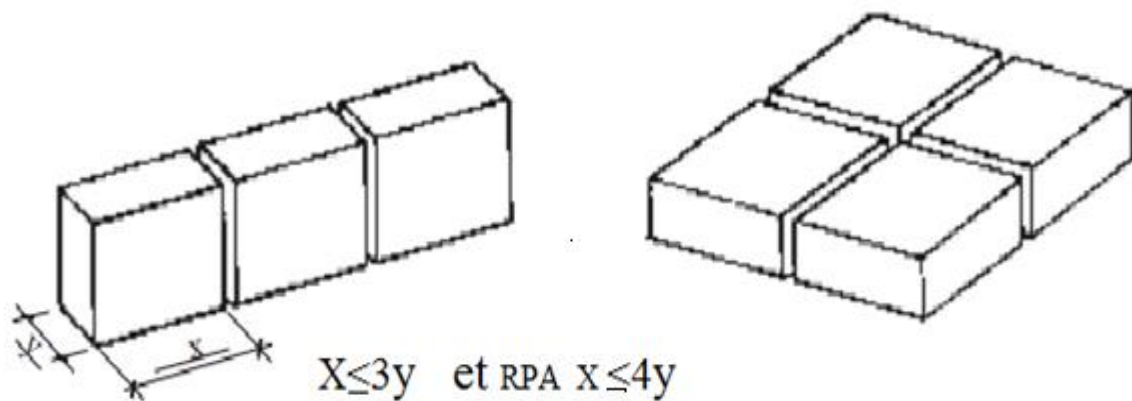


Figure II.36 : Fractionnement en blocs compacts

II.3 Classification des dégâts :

