

## COURS

### GENERALITES

Selon leur nature et leur forme, les éléments constructifs " travaillent " en flexion, compression, torsion, etc. Lors des actions dynamiques, le comportement des éléments fléchis (et dans une certaine mesure celui des structures tendues ou comprimées), sujets à une rupture ductile, est bien meilleur que celui des éléments soumis à de fortes sollicitations de cisaillement ou de torsion, dont la rupture est en général de type fragile. Or une rupture fragile peut conduire à un effondrement rapide, alors qu'un comportement ductile le retarde ou le prévient.

Le choix du parti architectural et du parti constructif, opéré conjointement par l'ingénieur et l'architecte, fixe généralement le " fonctionnement " mécanique du bâtiment et détermine donc la nature des sollicitations des divers éléments structuraux, ainsi que son comportement sous séisme.

**Rupture fragile** : rupture soudaine et quasi instantanée.

**Ductilité** : capacité d'un matériau, et par extension celle d'un élément ou d'une structure, à subir avant rupture des déformations plastiques (irréversibles), sans perte significative de résistance. Une ductilité importante permet :

- de prévenir une rupture brutale (fragile) de la structure et sa dislocation,
- de plafonner les charges sismiques,
- d'améliorer la résistance des éléments constructifs aux charges par redistribution des contraintes sur les sections non endommagées.

Les sollicitations, éléments de réduction des forces extérieures et des couples appliqués aux éléments de structure, sont déterminées après combinaisons des actions.

#### Principe

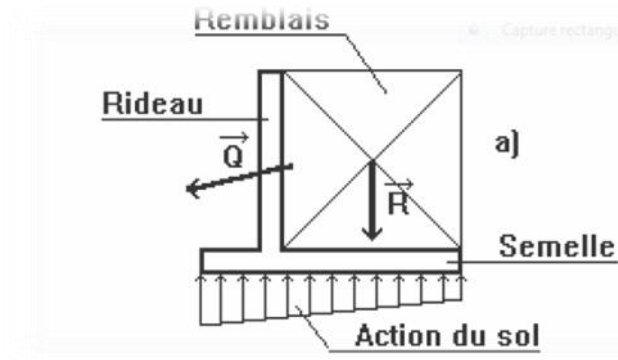
En fonction des situations qu'une construction va connaître, nous allons être obligés de superposer les effets de plusieurs actions. Pour cela :

- nous affecterons à chaque type d'actions, un coefficient de sécurité partiel,
- nous combinerons les actions obtenues (principe de superposition des effets),
- nous déterminerons la ou les combinaisons qui engendrent les sollicitations les plus défavorables dans les éléments de la construction.

Nous utiliserons les combinaisons avec les notations suivantes :

- $G_{max}$  : ensemble des actions permanentes défavorables
- $G_{min}$  : ensemble des actions permanentes favorables (voir ci-dessous)
- $Q$  : ensemble des actions variables

Exemple : Cas d'un mur de soutènement :



La poussée  $Q$  pousse vers un renversement du mur et agit donc dans un sens défavorable : elle intervient en  $G_{max}$ .

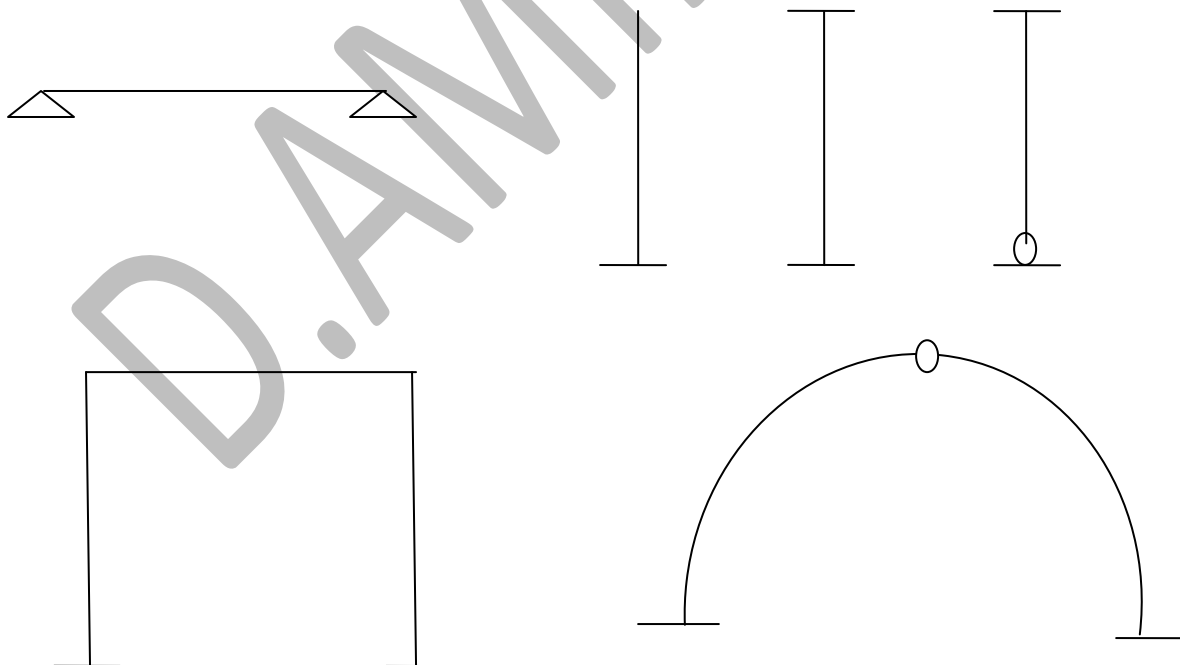
L'action des terres derrière le rideau  $R$  agit dans un sens de stabilité donc favorable : elle intervient donc en  $G_{min}$ .

### Combinaisons d'actions

Il existe plusieurs combinaisons d'action :

- pour les ELU :  $1.35 G + 1.5 Q$  ou  $1.35 G + 1.5 Q + 1.2 S_n$
- pour les ELS :  $G + Q$
- combinaison d'actions accidentelles :  $G_{max} + G_{min} + F_A + Q$

Les sollicitations sont calculées en utilisant pour la structure des modèles élastiquement linéaires.



**Les séismes, les tempêtes, les inondations, les mouvements de terrain ..... ;** sont des phénomènes naturels qu'on ne peut pas arrêter leur cours, ni même le modifier durablement, on peut l'étudier en observant les effets de leurs événements.

Il n'arrive jamais n'importe quoi, n'importe où, n'importe quand, n'importe comment ; la plupart des événements naturels sont plus ou moins localisés et, en dehors des séismes, aucun n'est quasi instantané.

Ces phénomènes sont naturels, les risques sont humains. L'expression « risque naturel ou catastrophe naturelle » est d'un non sens. Le risque est le croisement entre **l'aléa** d'une part, et les **enjeux** et leur **vulnérabilité** d'autre part.

- ✓ **L'aléa** peut être défini comme la probabilité pour un lieu géographique donné d'occurrence d'un événement naturel de caractéristiques données.

L'aléa sismique, par exemple, peut être défini comme la possibilité pour une région ou un site d'être exposés à une secousse sismique de caractéristiques données (intensité ou magnitude, profondeur focale en particulier).

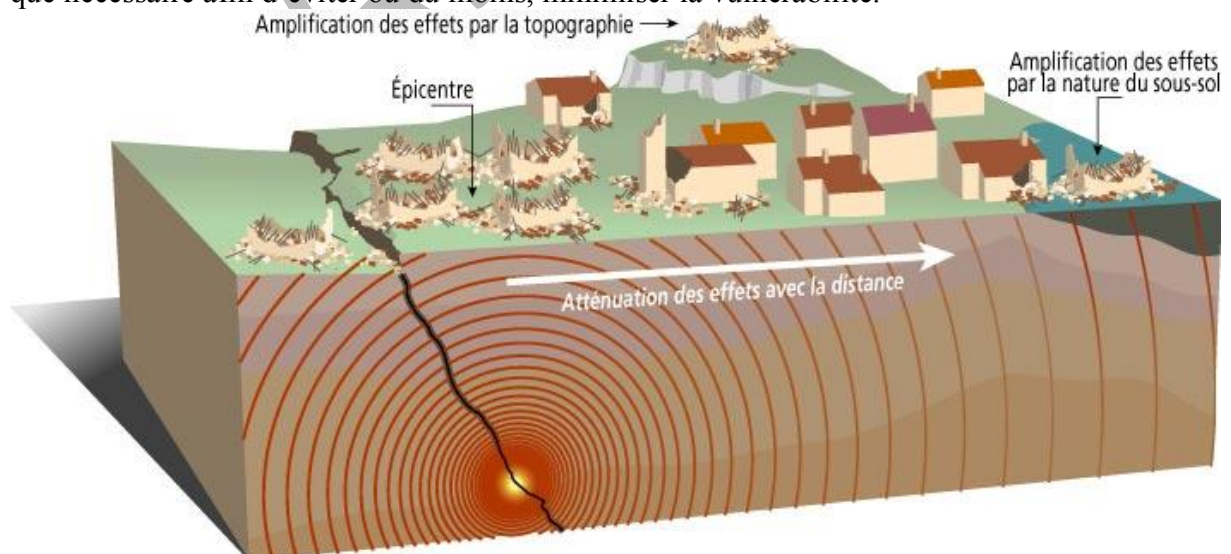
Les aléas plus ou moins violents, sont généralement dommageables, souvent destructeurs ; les pires peuvent être de véritables désastres écologiques.

- ✓ **Les enjeux** représentent la valeur attribuée aux éléments exposés à un aléa donné : personnes, biens, activités, aménagements, ouvrages ..... Pas d'enjeu ; pas de risque.

- ✓ **La vulnérabilité** représente le degré d'endommagement d'un élément exposé à un phénomène naturel.

La vulnérabilité des ouvrages et des personnes résulte d'implantations défectueuses, d'inadaptations aux caractères naturels des sites, de vices de conception et / ou de construction ; et se concrétise en dommages, ruines et dérives économiques.

Après un événement destructeur dans un même bassin de risque, on constate toujours que des ouvrages analogues voisins sont plus ou moins endommagés parce que plus ou moins bien implantés et / ou construits, et d'autres, en partie ou en totalité, ruinés parce que mal implantés et mal construits ; et c'est dans les plus affectés, que se trouvent le plus de victimes. Donc, une conception (parasismique dans le cas des séismes) adéquate d'avant projet est plus que nécessaire afin d'éviter ou du moins, minimiser la vulnérabilité.



### Neige

L'accumulation de la neige sur les toits est rarement uniforme. Elle dépend de la forme de la toiture, de ses propriétés thermiques, de la quantité de chaleur engendrée sous la toiture, de la proximité des bâtiments voisins et bien sûr des conditions météo locales.

Pour déterminer la charge de la neige, on considère essentiellement la couche de neige uniforme accumulée lors d'une chute par temps calme, la forme de la toiture et la répartition de la neige provoquée par le vent. L'action de la neige s'exerce verticalement. Elle est rapportée à la projection horizontale de la surface de la toiture.

### Vent

Pour le calcul des constructions, on suppose que la direction d'ensemble moyenne du vent est horizontale.

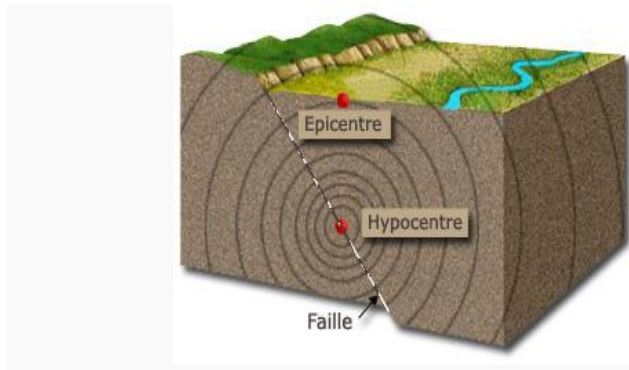
L'action exercée sur les parois d'une construction fermée s'applique normalement sur le côté extérieur, et en raison de la porosité de ces parois, elle agit directement sur les parois intérieures. Dans le cas d'une construction ouverte, le parement interne des parois est aussi sollicité. Du fait de ces pressions, des efforts sont exercés perpendiculairement aux parois de la structure ou aux éléments de façade individuels. De plus, lorsque les parois de grande surface sont balayées par le vent, des forces de frottement non négligeables peuvent se développer tangentiellement à la surface.

L'action du vent dépend de sa vitesse, de la catégorie de la construction et de ses propriétés d'ensemble, de l'emplacement de l'élément étudié dans la construction et de son orientation par rapport au vent, des dimensions de l'élément considéré et de la forme de la paroi à laquelle il appartient.

### Séismes

Un **séisme** ou **tremblement de terre** est le résultat 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. Le lieu de la rupture des roches en profondeurs se nomme le foyer. Plus rares sont les séismes dus à l'activité volcanique ou d'origine artificielle (explosions par exemple). Il se produit de très nombreux séismes tous les jours, mais la plupart ne sont pas ressentis par les humains. Environ cent mille séismes sont enregistrés chaque année sur la planète. Les plus puissants d'entre eux comptent parmi les catastrophes naturelles les plus destructrices. 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.



Épicentre, hypocentre (foyer) et faille

Le Règlement Parasismique Algérien, version 2003, est le document technique réglementaire qui fixe les règles de conception et de calcul des constructions en zones sismiques. Les présentes règles visent à assurer une protection acceptable des vies humaines et des constructions vis à vis des effets des actions sismiques par une conception et un dimensionnement appropriés.

Pour des ouvrages courants, les objectifs ainsi visés consistent à doter la structure :

- d'une rigidité et d'une résistance suffisante pour limiter les dommages non structuraux et éviter les dommages structuraux par un comportement essentiellement élastique de la structure face à un séisme modéré, relativement fréquent.
- d'une ductilité et d'une capacité de dissipation d'énergie adéquates pour permettre à la structure de subir des déplacements inélastiques avec des dommages limités et sans effondrement, ni perte de stabilité, face à un séisme majeur, plus rare.

Pour certains ouvrages importants, la protection visée est encore plus sévère puisqu'il faudra que l'ouvrage puisse demeurer opérationnel immédiatement après un séisme majeur.

### **Classification des zones sismiques**

Le territoire national est divisé en quatre (04) zones de sismicité croissante, définies sur la carte des zones de sismicité et le tableau associé qui précise cette répartition par wilaya et par commune, soit :

Zone O : sismicité négligeable

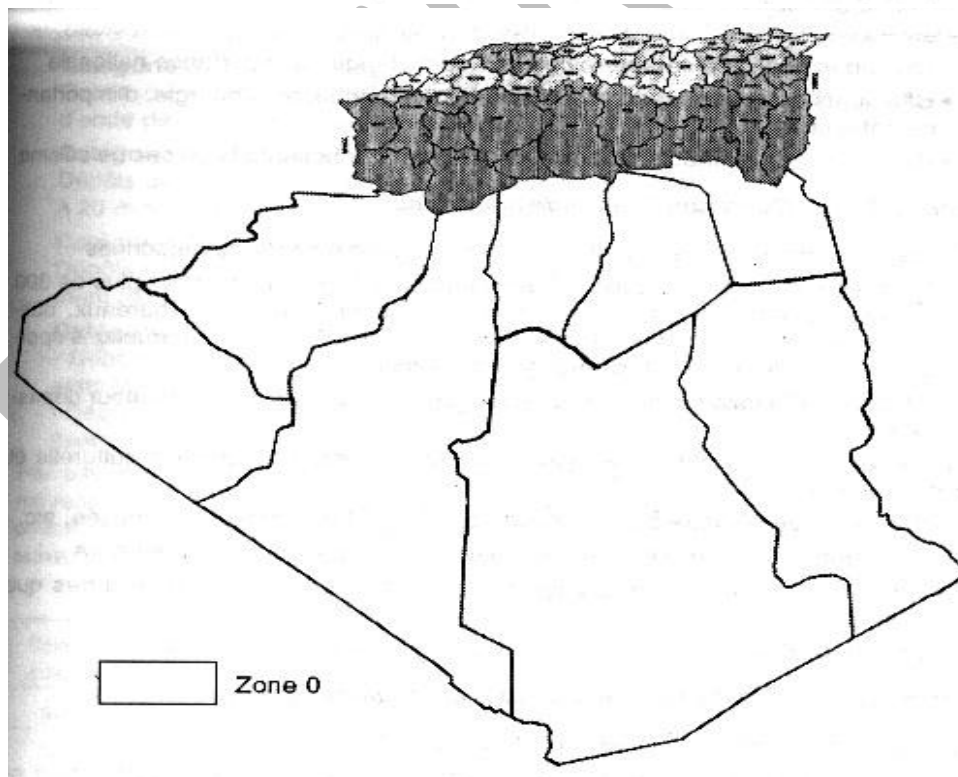
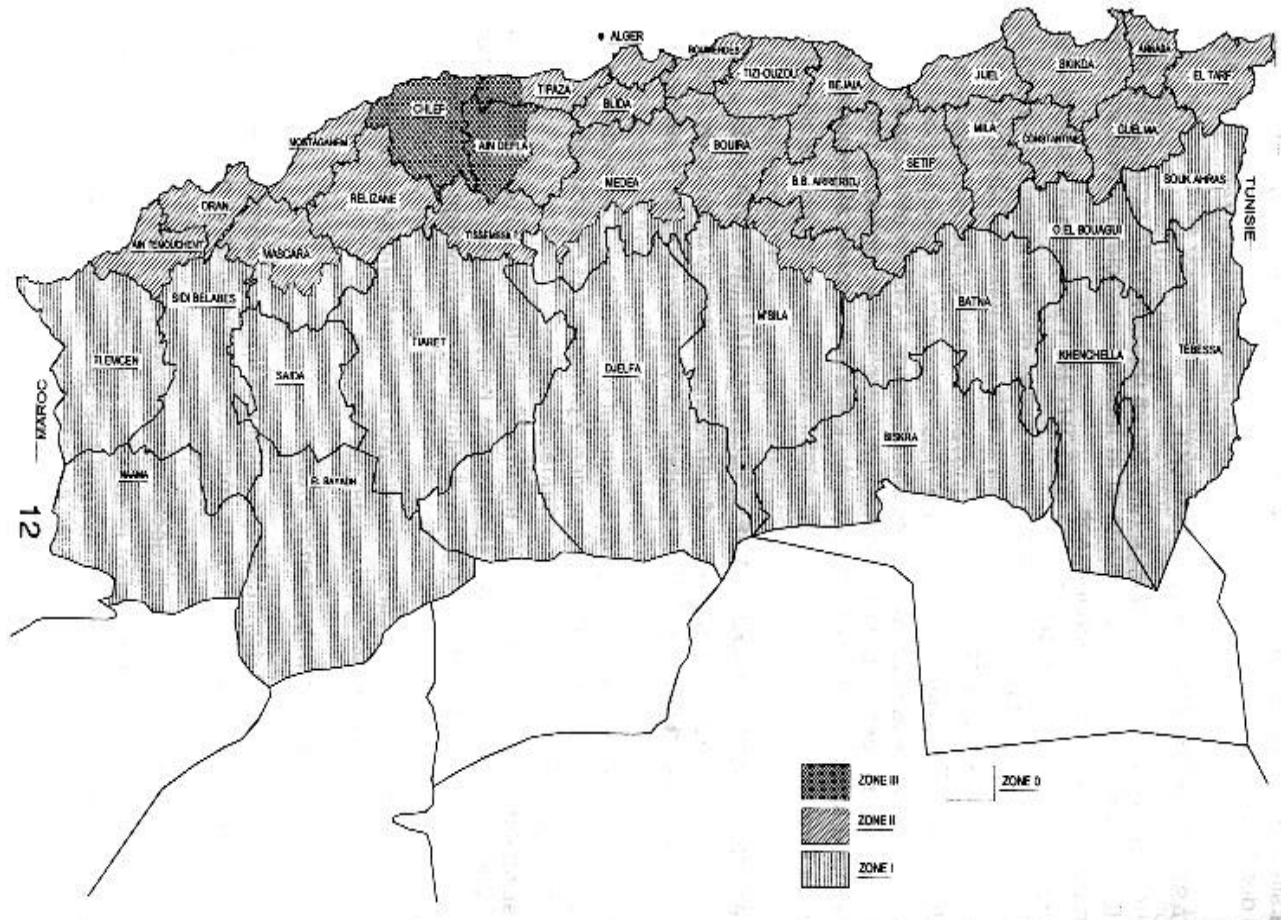
Zone I : sismicité faible

Zone II : sismicité moyenne

Zone III : sismicité élevée

La figure suivante représente la carte des zones sismiques de l'Algérie et le zonage global des différentes wilayas.





Le risque sismique est lié à l'aléa sismique et à la vulnérabilité de la construction, raison pour laquelle une démarche globale de conception parasismique dans la construction doit être mise en place. Elle doit s'appuyer sur trois points :

1. respect de la réglementation parasismique.
2. conception architecturale parasismique.
3. mise en œuvre soignée de la construction.

La conception architecturale parasismique n'est pas obligatoire mais son rôle est fondamental dans la résistance des constructions aux séismes.

Elle comprend trois volets :

1. architectural.
2. constructif.
3. de contreventement.

En conclusion, le choix d'un bon site sur un bon sol avec des fondations adaptées, tout en respectant les mesures de prévention imposées et celles recommandées, permettra de limiter les dommages en cas de secousse. Un effort devrait être fait aussi bien au niveau de la prise de conscience de ce risque par chaque citoyen qu'au niveau de l'aménagement du territoire par les pouvoirs publics.

## CONCEPTION PARASISMIQUE NIVEAU AVANT-PROJET

### II. INCIDENCE DE LA CONCEPTION SUR LE COMPORTEMENT DES CONSTRUCTIONS SOUS SEISMES

Cette incidence est essentiellement de trois types :

#### 1- Influence sur l'importance des actions sismiques

Rappelons que les actions sont les forces et les couples engendrés par les charges permanentes, variables ou accidentelles, agissant sur les constructions. Les actions sismiques sont considérées comme accidentelles.

Une construction est un amplificateur des secousses qui lui sont communiquées au niveau des fondations. Les amplitudes des déplacements des niveaux supérieurs sont en général plus importantes (parfois 3 à 4 fois) que celles du sol d'assise. Or, les actions sismiques sont proportionnelles à ces déplacements car les amplifications se produisent par effet de ressort (le bâtiment en est un, encastré à sa base, fig. I.1. ; la force dans un ressort, donc aussi la charge sismique agissant sur la masse, est égale au produit de la rigidité du ressort par le déplacement de la masse ( $F = k.x$ ), fig. I.1.

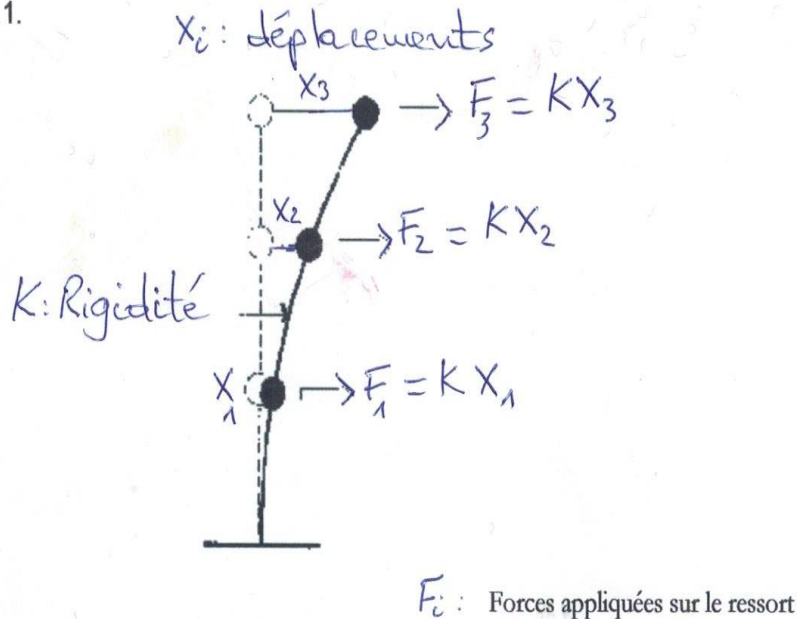
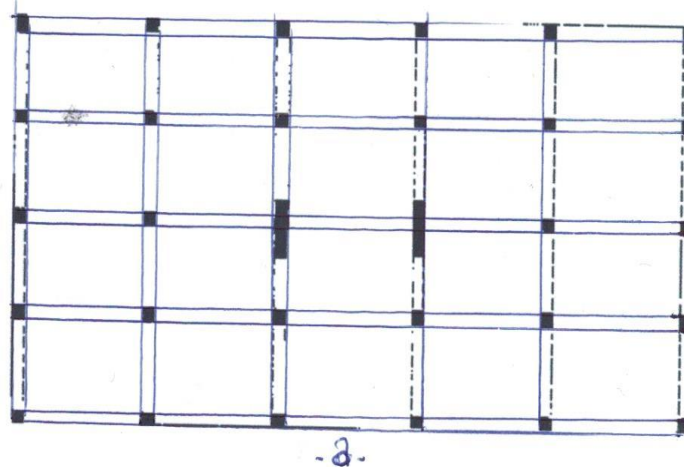
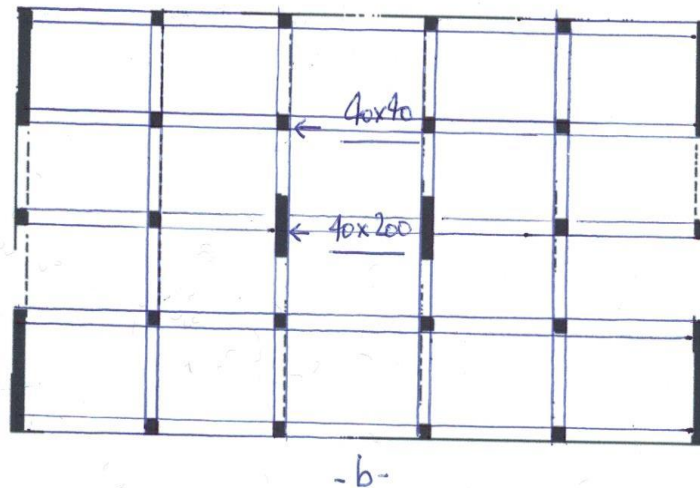


Fig. I.1 - Amplification des oscillations par un ressort.

Une augmentation des actions sismiques indésirable peut être provoquée également à l'échelle d'un élément constructif. Par exemple, les poteaux plus larges que les autres situés sur un même niveau (fig. I.2), constituent des "points durs", ce qui a pour conséquence d'attirer les charges sismiques.

Les charges sismiques sont distribuées sur les éléments porteurs verticaux en proportion de leur rigidité (cas des planchers-diaphragmes rigides). 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 fig. I.2a subissent donc,





a) Structure avec poteaux constituant des " points durs ". Les poteaux larges sont 125 fois plus sollicités que les autres poteaux, alors que leur résistance n'est que 25 fois supérieure. Ils pourraient subir des dommages sismiques importants

b) Solution au problème ci-dessus. Les voiles de béton symétriquement placés assurent le contreventement. La part des charges distribuée sur les poteaux est faible

Fig. I.2. a, b- Poteaux constituant des " points durs ".

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 (fig. I.2b).

## 2 - Implication du type de sollicitation

Selon leur nature et leur forme, les éléments constructifs " travaillent " en flexion, compression, torsion, etc. Lors des actions dynamiques, le comportement des éléments fléchis (et dans une certaine mesure celui des structures tendues ou comprimées), sujets à une rupture ductile, est bien meilleur que celui des éléments soumis à de fortes sollicitations de cisaillement ou de torsion, dont la rupture est en général de type fragile. Or une rupture fragile peut conduire à un effondrement rapide, alors qu'un comportement ductile le retarde ou le prévient.

Le choix du parti architectural et du parti constructif, opéré conjointement par l'ingénieur et l'architecte, fige généralement le " fonctionnement " mécanique du bâtiment et détermine donc la nature des sollicitations des divers éléments structuraux, ainsi que son comportement sous séisme.

!!  
Deux phénomènes sont plus particulièrement source de dommages  
notamment dans le bâtiment asymétrique : la torsion  
d'ensemble et la concentration de contraintes.  
La torsion d'ensemble est l'un des facteurs de dommages  
notamment le plus destructeurs. Elle se produit lorsque  
le  $I_{G.C.}$  centre de masse d'une construction n'est  
pas confondu avec son centre de rigidité (C.R.) ou centre  
de rotation. Elle a donc lieu quand les éléments de  
contreventement sont décentrés (cas de plan asymétrique)  
ou ne possédant qu'une symétrie selon un axe.  
On déduit donc, que les plans asymétriques selon deux axes  
présentent un bon comportement aux charges sismiques,  
notamment le plan carré ou rectangulaire du carré, qui  
présenteraient la même rigidité dans toutes les directions  
horizontales.



### Disposition des éléments verticaux de contreventement

D'une manière générale, le contreventement devrait conférer à la construction sensiblement la même rigidité dans les directions transversale et longitudinale. Afin de constituer un système efficace, les éléments de contreventement devraient être :

- **disposés symétriquement par rapport au centre de gravité du niveau.** Dans le cas d'une distribution asymétrique des éléments de contreventement, la construction est soumise pendant les séismes, à des efforts supplémentaires dus à la torsion d'axe vertical.

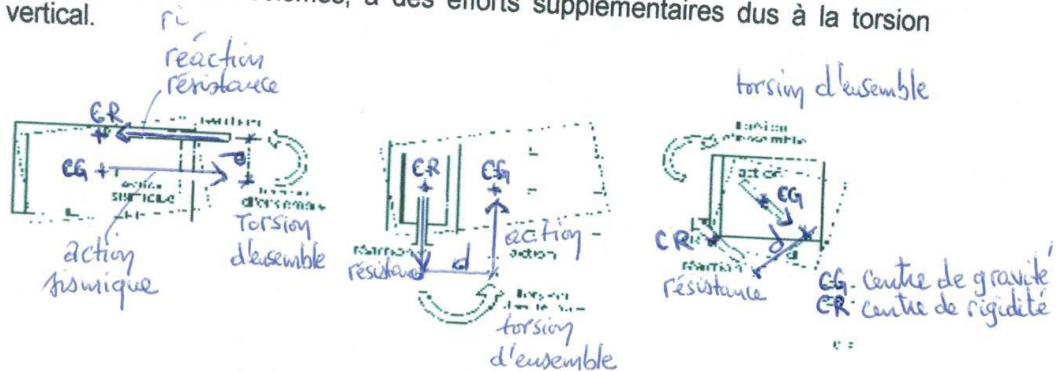


Fig. a. - Une position décentrée des éléments de contreventement est à l'origine d'une sollicitation du bâtiment en torsion.

En effet, les charges sismiques sont communiquées principalement aux éléments de contreventement en raison de leur rigidité. La résultante des forces de résistance aux charges horizontales passe donc nécessairement par le centre de rigidité. Si celui-ci se trouve décalé par rapport au centre des masses (centre de gravité) où passe la résultante des charges sismiques, 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 (fig. a).

La torsion affecte le plus les poteaux d'angle et les liaisons entre les diaphragmes horizontaux et le contreventement vertical. Les dommages aux éléments verticaux augmentent avec leur distance au centre de rigidité. Les poteaux situés aux extrémités du bâtiment opposées au centre de torsion peuvent subir des déplacements différentiels importants entre leur tête et leur pied, déplacement pouvant entraîner leur éclatement.

La répartition symétrique ou quasi symétrique des éléments de contreventement, permettant que les centres de rigidité de la gravité de la construction soient confondus ou rapprochés, et par conséquent une caractéristique essentielle d'une bonne construction parasismique (fig. c). Les configurations de la fig. b. sont à éviter impérativement ;



**Fig. b.** - Disposition incorrecte des éléments rigides par rapport au centre de gravité des niveaux. Les murs formant les panneaux de contreventement du rez-de-chaussée étant décentrés, ces constructions peuvent être soumises par les séismes à une torsion importante.



**Fig. c.** - Localisation correcte des éléments de contreventement vertical.

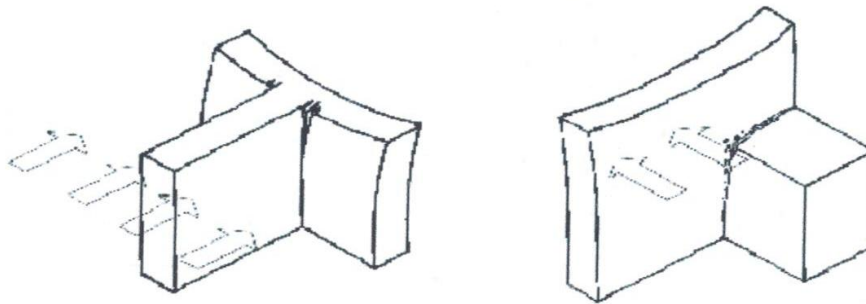


### **3- Incidence sur les concentrations de contraintes**

Les concentrations de contraintes facilitent la fissuration de la structure. Lors de mouvements sismiques, les fissures peuvent rapidement se propager et entraîner un effondrement partiel ou total de l'ouvrage.

Les concentrations de contraintes peuvent être accrues ou, au contraire, limitées par les options de projet liées à la géométrie des bâtiments et de leurs parties. Elles se produisent plus particulièrement dans les angles rentrants formés par des intersections des ailes d'un bâtiment. Ces dernières peuvent être exposées à des sollicitations sévères étant donné que les ailes n'oscillent pas en phase. Lors des mouvements sismiques, elles ont tendance à se séparer (fig. I.3.).

Dommages dus à des concentrations de contraintes



a) Les ailes subissent des déformations de torsion " en vrille ". A l'intersection des ailes, des dommages dus aux concentrations de contraintes sont fréquents, notamment lorsque les ailes n'ont pas la même hauteur

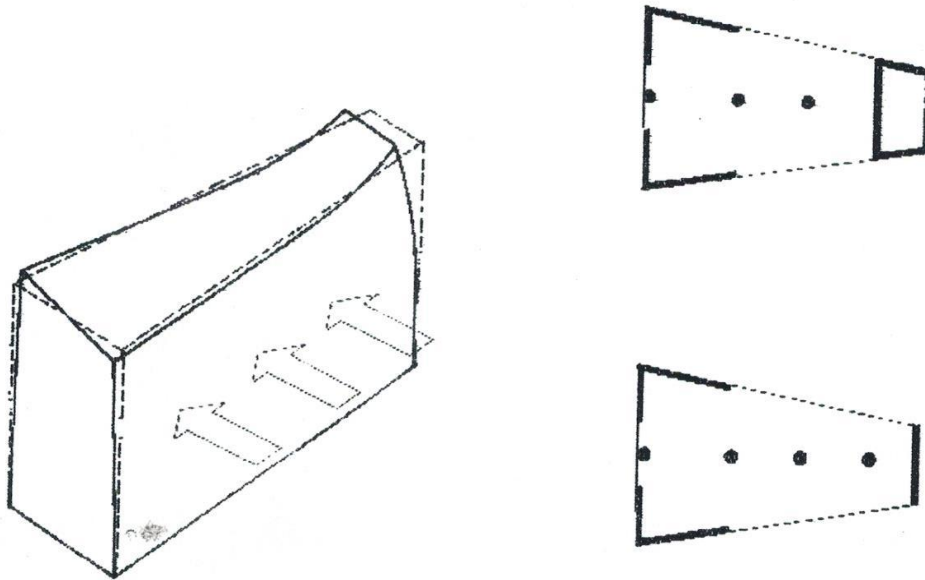


b) Exemple de dommages à l'intersection des ailes d'un bâtiment (séisme de Kôbé, 17.1.1995)

**Fig. I.3. a,b** - Bâtiments avec des ailes mécaniquement solidaires.



Sous l'action de forces horizontales, l'ouvrage vrille autour d'un axe vertical. Au lieu de fléchir comme un bloc, il subit à chaque niveau des déplacements horizontaux différents (fig. I.3a ; II.2). Ce type de sollicitation est mal toléré par la structure.



Déformation en vrille d'un bâtiment  
 ne présentant qu'un axe de symétrie

Fig. II.2. - Bâtiment ne possédant pas une symétrie biaxiale.

La symétrie du plan selon deux axes ou plus favorise donc le bon comportement des bâtiment exposés à un séisme. Toutefois, la possibilité de torsion ne doit pas être introduite dans l'ouvrage par la dissymétrie de la structure, plus particulièrement de ses éléments rigides (éléments de contreventement).

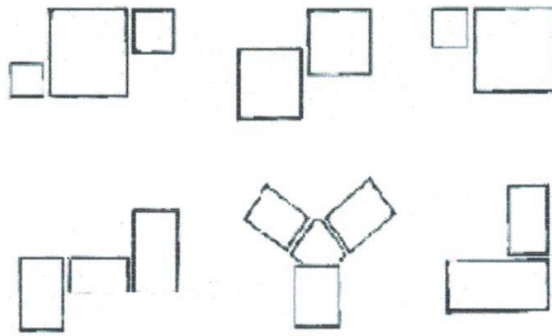
#### Solutions permettant de corriger les conséquences de l'asymétrie de la forme des bâtiments

##### • Joints parasismiques

Les configurations asymétriques peuvent, dans de nombreux cas, être fractionnées en volumes simples par des joints parasismiques (fig. II.3 et II.4).

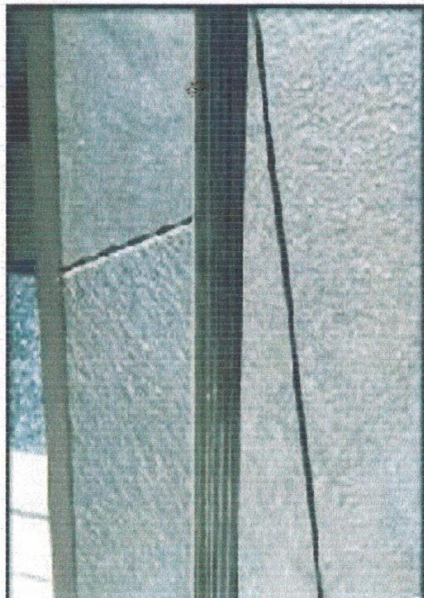
Les joints parasismiques doivent avoir un tracé rectiligne sans baïonnettes, être vides de tout matériau et éviter de couper les fondations lorsque des tassements différentiels ne sont pas à craindre.

Dans tous les cas, les joints entraînent un surcoût non négligeable et ne doivent pas être recherchés a priori. Les joints prévus pour d'autres raisons (dilatation thermique, tassement différentiel) doivent être traités comme des joints parasismiques.

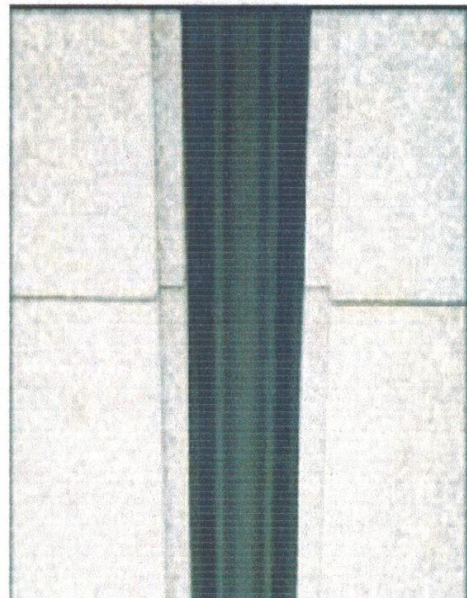


Fractionnement des bâtiments à configuration complexe par des joints parasismiques

Fig. 2.9 - Joints parasismiques.



a) Couvre-joint à soufflet en caoutchouc



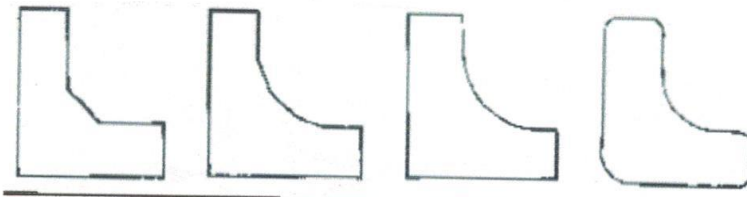
b) Couvre-joint en tôle pliée

Fig. 2.10 a,b, - Couvre-joints.

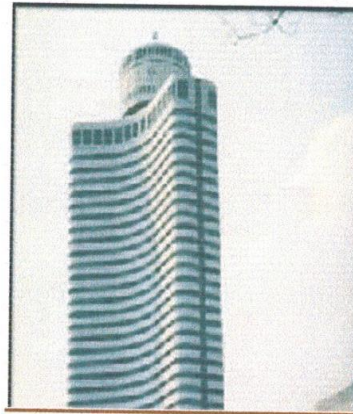
• Variation progressive de la rigidité

Cette démarche relève du parti architectural. Elle consiste à adoucir les angles rentrants par une forme plus fluide du bâtiment (fig. 2.12). Il s'agit d'une correction partielle mais efficace, souvent employée.





a) Traitement d'un angle rentrant



b) Immeuble à Tokyo

2.12  
 Fig. 2.12. a, b - Variation progressive de la rigidité d'un bâtiment à ailes.

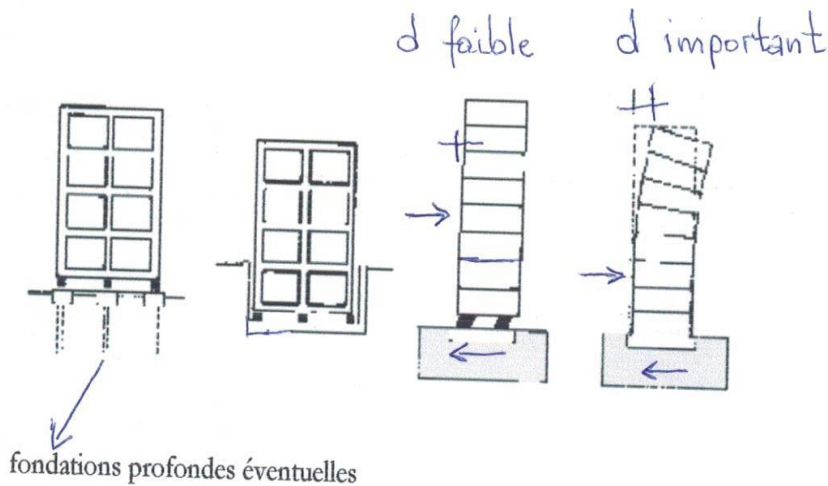
- *Renforcement des angles rentrants*

Cette solution, fréquemment utilisée aux Etats-Unis et au Japon, est délicate à mettre en oeuvre (fig. 2.13). Son efficacité n'a pas encore été validée par les séismes majeurs. Elle implique un dimensionnement généreux des porteurs verticaux situés dans les angles rentrants et présente le danger de constituer des points durs qui "attirent" les sollicitations d'origine sismique.

- *Isolation parasismique*

L'isolation parasismique est une stratégie de protection parasismique non traditionnelle. Elle consiste à interposer entre la superstructure et les fondations (ou un sous-sol) des appareils d'appui, appelés aussi isolateurs car ils isolent partiellement la construction des secousses du sol (fig. 2.14a) 2.14a

Les déplacements imposés à la construction par le séisme se localisent principalement au niveau des appuis conçus pour les supporter sans dommages. Les déformations de la superstructure sont ainsi minimisées, de même que les concentrations de contraintes. La réduction des charges, sismiques au niveau des étages peut atteindre le facteur 5 ou plus. En outre, la réponse (la réaction) de la construction est fonction des caractéristiques des appuis. On peut donc chercher à corriger la possibilité de torsion d'ensemble d'un bâtiment de forme complexe en faisant coïncider le centre de rigidité de l'ensemble des isolateurs avec le centre de gravité du bâtiment.



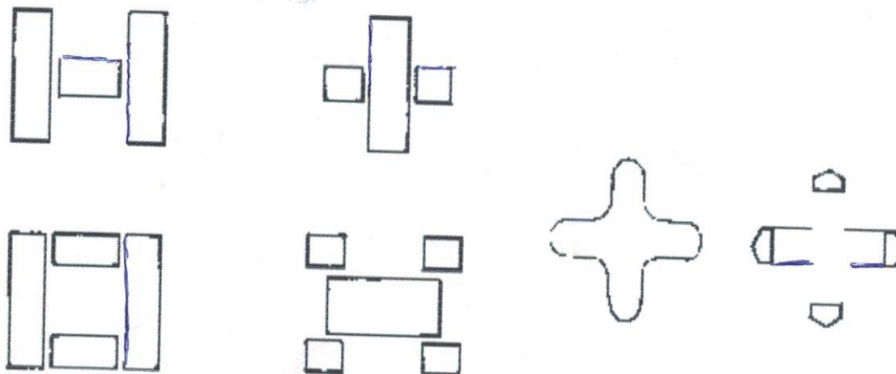
a) Emplacement des appuis parasismiques de la superstructure b) Limitation des déformations de la superstructure

Fig. 2.14 a, b - Emploi d'appuis parasismiques.

### • Simplicité du plan

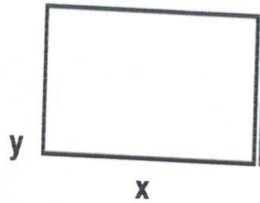
Les bâtiments symétriques selon deux axes peuvent également comporter des ailes, des saillies et des retraits et, par conséquent, des angles rentrants. Leurs inconvénients peuvent être corrigés de la manière décrite plus haut. La fig. 2.15 en montre quelques exemples.

De même, la différence des rigidités transversale et longitudinale d'un plan rectangulaire peut être corrigée par un renforcement du contreventement (fig. 2.16b). Sans correction, on devrait limiter cette différence en évitant les rectangles très allongés. (cf. "Compacité du plan") Il est recommandé que le rapport des côtés ne soit pas supérieur à 3 (fig. 2.16a).



a) Fractionnement en blocs simples b) Ajout de noyaux rigides et variation progressive de rigidité

Fig. 2.15 a, b - Correction des inconvénients des plans complexes à deux axes de symétrie.



$$x \leq 3y$$



- a) Rapport recommandé longueur/largeur d'un bâtiment. b) Compensation du manque de rigidité transversale d'un bâtiment par un contreventement renforcé (bâtiment Mitsui, Tokyo)

2.16.a,b

Fig. 2.16. a,b- Limitation de la différence entre les rigidités transversale et longitudinale.