

## **Chapitre 2 : Système de Contreventements :**

- 2.1 Généralité
- 2.2 Définition
- 2.3 Types de contreventement :
- 2.4 EMPLACEMENT ET TORSION DES VOILES DANS LES STRUCTURES
- 2.5 PRINCIPES DE CONCEPTION PARASISMIQUE DES BATIMENTS
- 2.6 CHOIX ET CONTREVENTEMENT VERTICAL DES BATIMENTS : Selon le RPA 99-V2003
- 2.7 Méthodes de calcul des contreventements
  - 2.7.1 Contreventement par portiques
  - 2.7.2 Contreventement par voiles

## Chapitre 2 : Système de Contreventements

### 2.1 Généralité :

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.

Les ouvrages doivent en général comporter des contreventements dans au moins les **deux** directions horizontales. Ces contreventements doivent être **disposés** de façon à :

- Reprendre une charge verticale suffisante pour assurer leur **stabilité**
- **Assurer** une transmission directe des forces aux fondations
- Minimiser les effets de **torsion**

### 2.2 Définition

**Système de contreventement** : Ensemble d'éléments de construction assurant la **rigidité** et la **stabilité** vis à vis des forces **horizontales** engendrées par le vent, séisme, inondation, et choc, etc....



Burj Khalifa 2010  
829.8 m



Burj Malaysia 1998  
452 m

Il y a deux approches sont possibles :

- Structures auto stables** : 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 (contreventements triangulés par exemple...).

## 2.3 Types de contreventement :

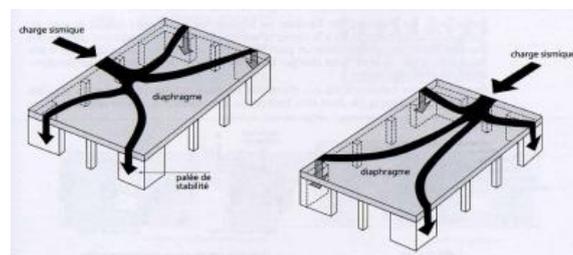
Dans le cas d'une construction parasismique, le contreventement comporte obligatoirement deux familles d'éléments pour permettent d'assurer une stabilité horizontale et verticale de la structure :

- Contreventement **horizontal** (**diaphragme**) ;
- Contreventement **vertical** (**portiques, murs, etc...**).

### 2.3.1 CONTREVENTEMENT HORIZONTAL (**Diaphragme**) :

Le contreventement horizontal est réalisé généralement par des dispositions constructives au niveau des planchers et de la toiture. Il est assuré soit par la création d'un **diaphragme**, soit par la réalisation de poutres au vent généralement obtenues par triangulation.

**Diaphragme** : on parle d'effet diaphragme lorsque les planchers sont suffisamment rigides pour qu'on puisse considérer qu'ils ne se déforment pas sous l'effet des forces horizontales (agissant dans le plan du plancher), ce qui permet de faire l'hypothèse simplificatrice que ces efforts se distribuent ensuite dans les éléments de contreventement au prorata de leurs raideurs.

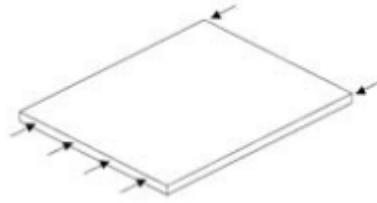
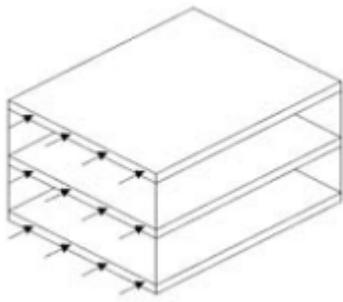


Rôle des planchers

Les diaphragmes ont pour fonctions de :

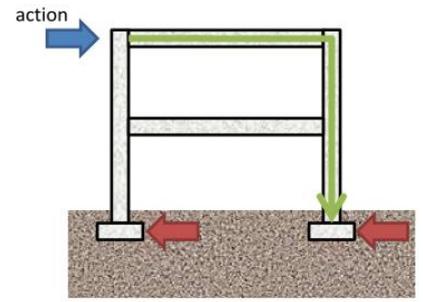
- **Transmettre** les efforts horizontaux aux éléments de contreventement verticaux par **cisaillement** ;
- **Raidir** le bâtiment dans son ensemble et ainsi **prévenir** le déversement des éléments porteurs verticaux.

La répartition des efforts entre les éléments verticaux dépend directement de la nature du plancher. On peut définir deux types de planchers correspondant à deux comportements vis-à-vis des efforts horizontaux : les diaphragmes **souples** et les diaphragmes **rigides**.



Les forces sont collectées par la structure horizontale

Diaphragme horizontal

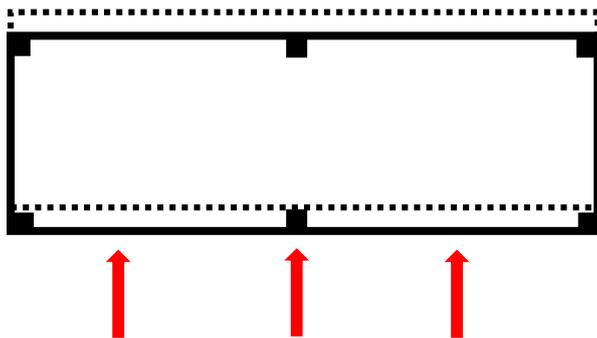


Distribuées au système vertical et transmises finalement aux fondations.

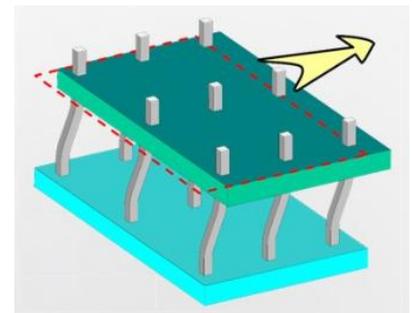
**a) Diaphragme rigide :** est caractérisé par son aptitude à rester en phase élastique, à se comporter comme une poutre horizontale

Un diaphragme rigide impose le **même déplacement** en tête de chaque élément vertical, ce qui permet de solliciter **équitablement** toutes les palées de stabilité.

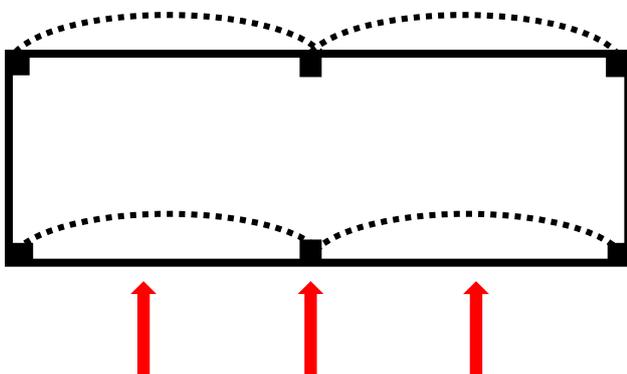
En cas de rupture d'une palée, la répartition des charges se **fait automatiquement** sur les autres.



Diaphragme rigide

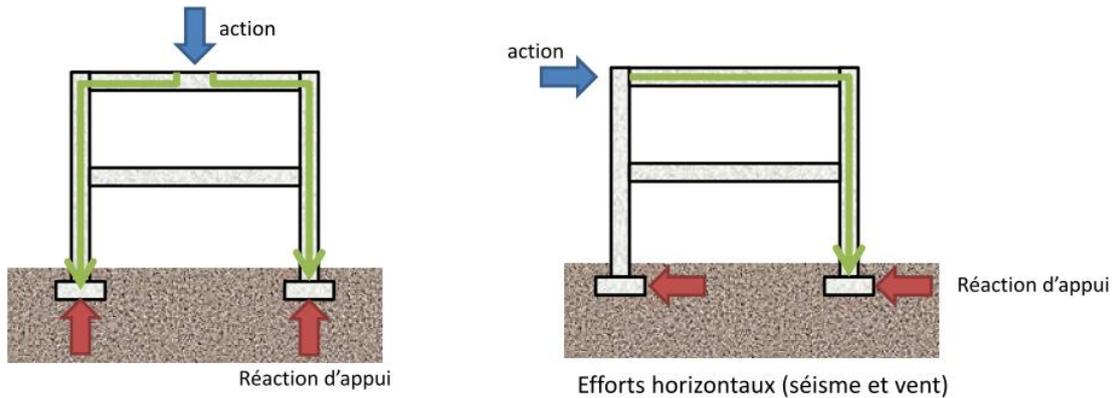


**b) Diaphragme flexible :** n'a pas un comportement dynamique continu de part et d'autre des éléments verticaux (palées, mais également poteaux), et chaque élément reçoit une charge proportionnelle à la surface de plancher le concernant comme pour les charges verticales.

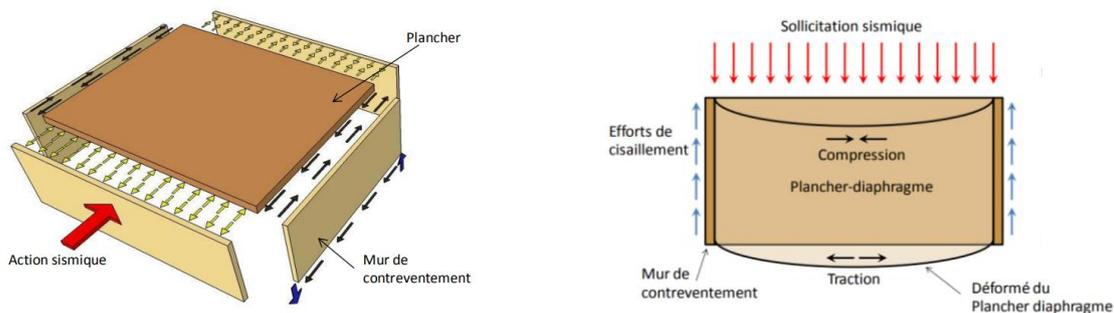


Diaphragme flexible

La structure résiste aux efforts appliqués et les transmet aux appuis (fondations) quel que soit charges verticales statiques (poids de la structure et charges sur les planchers) « descente de charges » ou / et efforts horizontaux (séisme et vent) « contreventement »



La transmission des efforts jusqu'au sol est assurée par **cisaillement entre les voiles et les planchers** puis par **cisaillement et traction/compression** entre les éléments verticaux et les fondations.



Schémas de distribution des efforts d'origine sismique d'un bâtiment composé diaphragme et des murs de contreventement

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.

La problématique du **confinement** des panneaux constituant le contreventement de la construction, et de **l'efficacité des liaisons** entre les éléments constructifs est la même dans le plan horizontal des planchers.



### 2.3.2 CONTREVENTEMENT VERTICAL :

L'absence de contreventement vertical parmi les **principaux facteurs** de ruine en cas de séisme.



Séisme de Kalamata Grèce 1987.

Certaines structures comme les ossatures en poteaux et poutres, n'ont fréquemment pas la rigidité nécessaire pour résister aux charges horizontales. L'adjonction des éléments résistant à ces charges permet alors d'assurer leur stabilité.

Le contreventement vertical **devrait** répondre à des critères spécifiques (plus de détail voire Emplacement des voiles dans les structures) tels que :

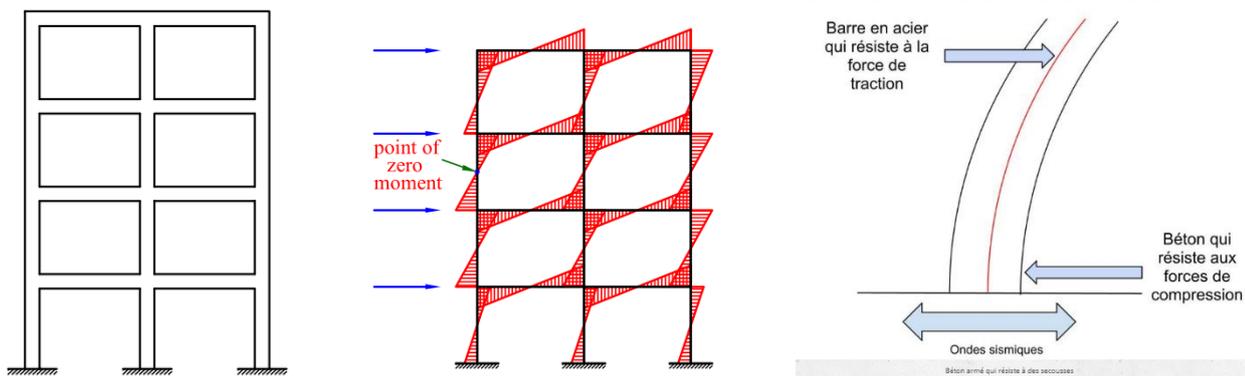
- **Leur nombre** : au **moins** trois palées **non** parallèles et **non** concourantes par étage.
- **Leur disposition** : elles seront situées le plus **symétriquement** possible par rapport au **centre de gravité des planchers** et de préférence aux angles avec une largeur suffisante.
- **Leur distribution verticale** : **être régulière** ; les palées seront de préférence superposées afin de conférer aux **différents niveaux**, une rigidité **comparable** aussi bien en **translation** qu'en torsion.

**Les éléments d'un contreventement vertical** : peuvent être classés en trois catégories : portiques, palées triangulées et panneaux rigides.

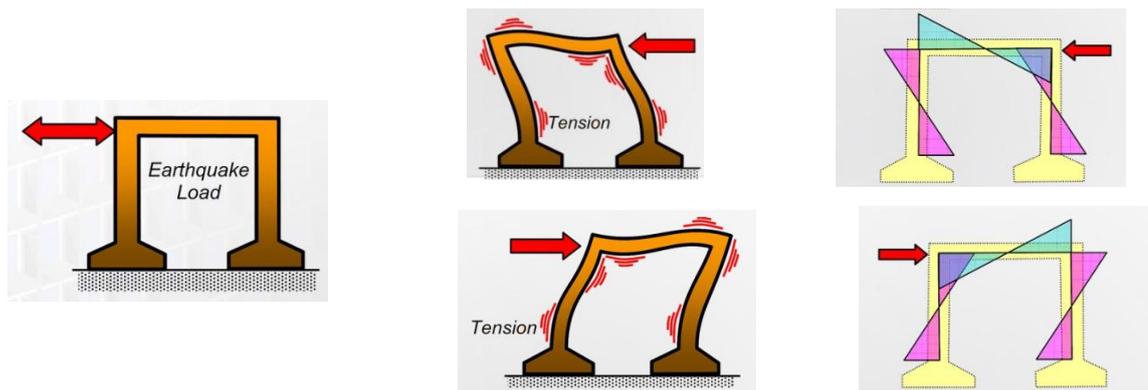
#### a) Portiques

- **Portiques (cadres rigides)** : Structure composée de poteaux et de poutres rigidement liés.

Les structures en béton armé contreventés par portiques autos-tables sont relativement répandues dans les constructions courantes de bâtiment, vu la simplicité de leurs exécutions ainsi que l'économie sur les matériaux utilisés. Cependant, ce type de structure les matériaux utilisés. Cependant, ce type de structure ne convient pas pour des bâtiments élancés étant donnée leur flexibilité.

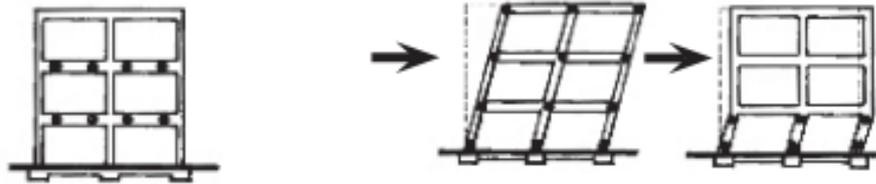


Le **choix** de la forme et le dimensionnement des portiques devraient être faits de sorte que les zones plastifiées (**rotules plastique**) ne puissent se former qu'entre les appuis **des poutres**, c'est à dire que la résistance des poteaux et des nœuds soit **supérieure** à celle des poutres ; le cas **contraire** pourrait avoir pour conséquence **l'instabilité** de la structure (l'effondrement prématuré de la structure).



**Rotule plastique** : Zone d'un élément de structure (poutres, poteaux, voiles,) subissant des déformations irréversible et capables de dissiper de l'énergie sous sollicitations alternées. Au-delà d'un seuil, de sollicitation, elle se comporte comme une articulation autorisant la rotation des autres parties de l'élément. Ces rotule plastique **de préférence dans les éléments horizontaux** (poutres...) plutôt que verticaux (poteaux, voile.) de façon à ne remettre en cause ni le cheminement des forces verticales, ni la stabilité de la structure et/ou de ses éléments porteurs. Quant aux éléments porteurs qui ne participent

pas au contreventement ils doivent pouvoir conserver leur capacité portante sous l'effet des déformations imposées.



a) Localisation correcte

b) Localisation dangereuse

Formation de zones plastifiées (rotules plastiques)

Il est à noter que les ossatures en portique doivent être conçues pour que les rotules plastiques se **forment** dans les poutres et non dans les poteaux, **sauf aux** pieds des poteaux à la base de l'ossature, en partie **supérieure** des poteaux sous **plancher supérieur (toiture)** des bâtiments multi étagés et dans les bâtiments à un seul étage.

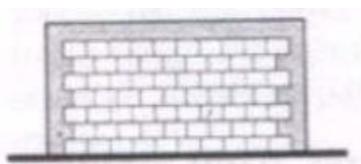


Rotule plastique en pied de poteau en BA

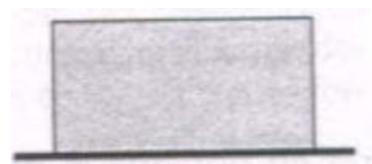
Des dommages comme ceux que l'on peut constater au pied de poteau ne sont pas du tout interdits par les règles de construction parasismique, puisqu'ils ne provoquent pas la perte de stabilité d'ensemble de la construction.

### b) Les panneaux

- **Les panneaux** de contreventement vertical, ou « palées de stabilité », résistent aux efforts horizontaux dans leur plan et assurent la descente des charges dynamiques vers les fondations.
- **Panneaux rigides** Il s'agit de murs en maçonnerie, voiles en béton ou en béton armé, etc. les éléments de contreventement ainsi obtenus sont plus rigides que ceux des autres catégories. Leur efficacité ne doit être réduite par des percements.



Mur en maçonnerie  
chainée ou armé

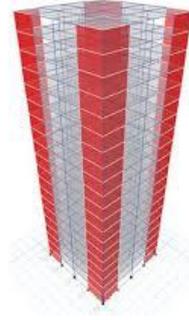


Mur en béton ou  
béton armé

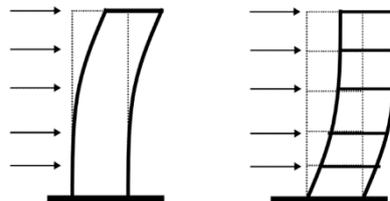
• **Voile en béton armé**

Les voiles sont des éléments de structure généralement verticaux, porteur rigide en béton- armé destiné à transmettre les charges latérales dans les fondations avec une section transversale allongée, avec un rapport longueur/épaisseur :  $l_w / b_w$  **supérieur à 4**.

- Fixés à la base de sorte que la rotation relative de la base que par rapport au reste du système structural soit empêchée,

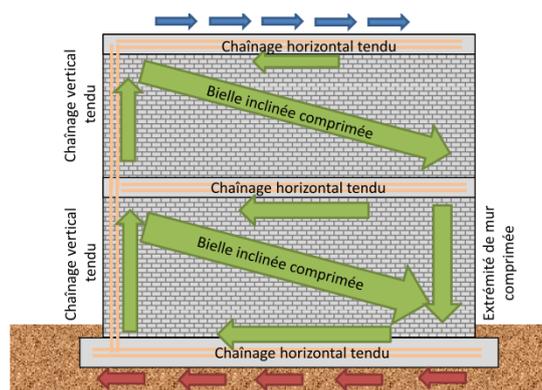


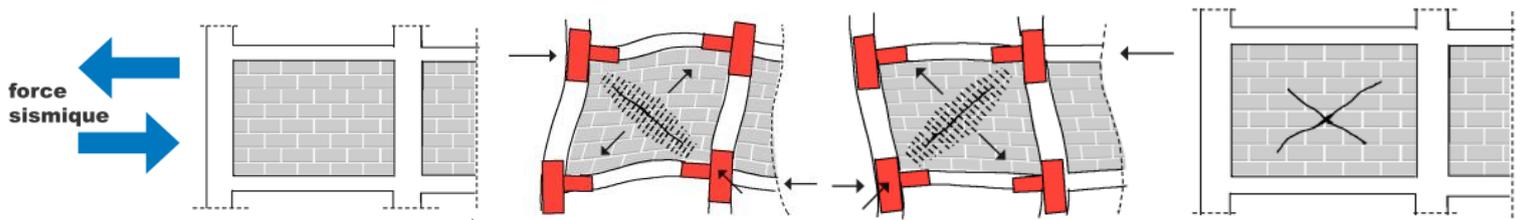
- Les bâtiments avec voiles en béton armé ont montré un excellent comportement sous l'action sismique même lors des séismes majeurs.
- L'expérience montre que les dégâts subis par les voiles L'expérience que dégâts par sont en général peu importants et facilement réparables.
- La grande rigidité des voiles réduit par ailleurs les déplacements relatifs des planchers et par conséquent, la réduction des dommages causés aux éléments non structuraux, ainsi que les effets psychologiques sur les personnes.



Etat de déformation d'une structure à gauche en voile, à droite en portique

Fonctionnement des murs en béton armé ou maçonnerie chaînée

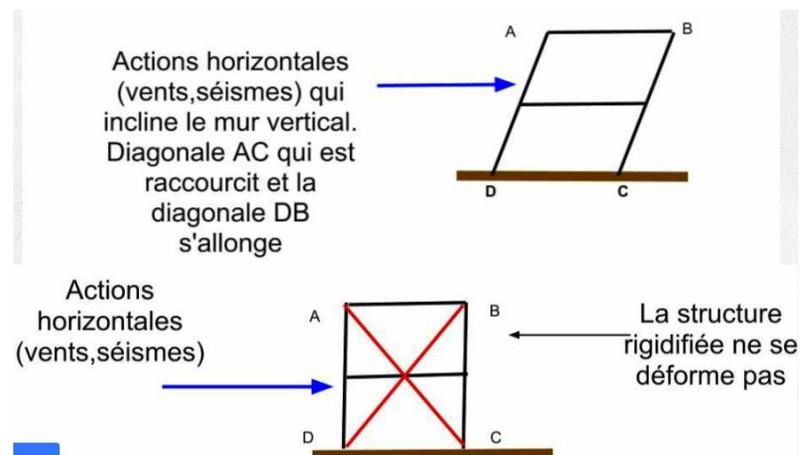




Mode de fonctionnement d'un mur de contreventement

**c) Triangulé**

- **Palée triangulée** : C'est un système de treillis, conçu en tant que contreventement vertical capable de reprendre les actions horizontales et dont les éléments (barres : diagonales...) sont essentiellement soumis à des forces axiales.



La présence des triangulations crée souvent des difficultés pour la réalisation d'ouvertures dans les pans de contreventement : on peut quelquefois trouver une solution plus satisfaisante en disposant les éléments de triangulation non plus sur la hauteur d'un étage, mais sur celle de deux étages.

La mise en œuvre des remplissages en maçonnerie est dans tous les cas rendue moins facile.

Les travées triangulées sont des systèmes de contreventement assez rigides. Elles peuvent être constituées de : Barres en diagonale, en V, en X ou autres.

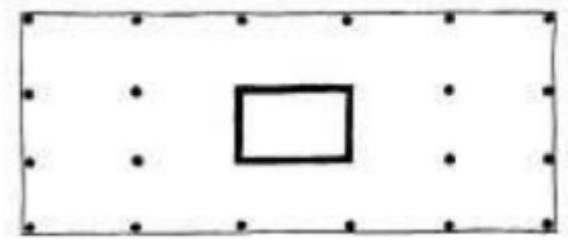
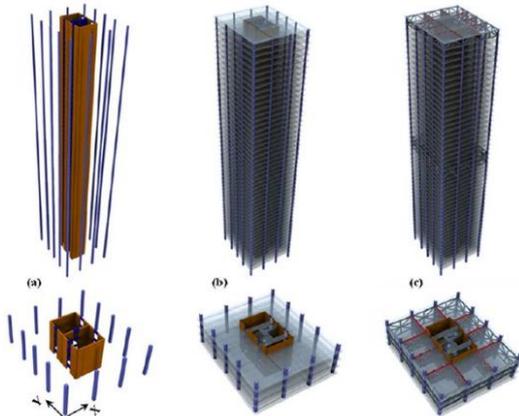


Diagonales en béton armé

**d) Noyau de stabilité**

Cet ensemble trouve le plus souvent sa place dans la zone où sont rassemblées les circulations verticales (ascenseurs et escaliers de secours).

La stabilité des immeubles-tours à usage d'habitation et surtout de bureaux est très souvent assurée par un ouvrage situé en partie centrale, constitué par des parois verticales, en voiles de béton armé, disposées suivant des plans orthogonaux, et par les planchers.



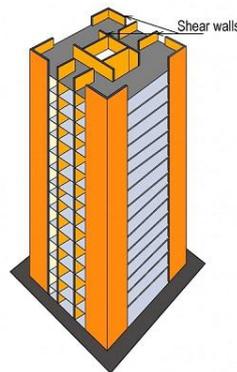
Vue en plan d'un bâtiment à Noyau de stabilité

Les parois de ce noyau assurent la transmission d'une partie des charges verticales et, à elles seules, la résistance aux forces horizontales, notamment aux actions du vent. Les éléments verticaux de la structure, tout autour du noyau, n'ont en principe à supporter que des charges verticales.

Le bâtiment dans ce cas est contreventé entièrement par un noyau rigide en béton armé qui reprend la totalité de l'effort horizontale.

### e) Solution mixtes

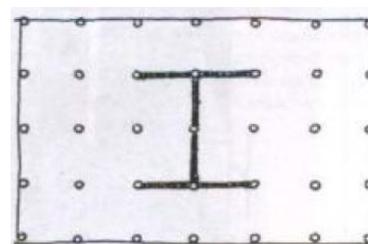
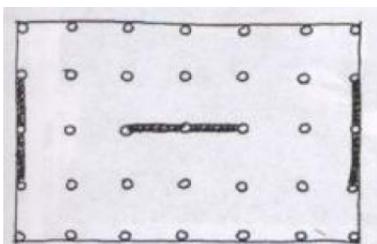
Un contreventement mixte est une combinaison de 2 types de contreventement choisis parmi certains de ceux définis précédemment. Il comprend des portiques ou des cadres auto stables ductiles couplés avec, soit des palées triangulées en X, soit des palées triangulées en V, ou se rapprochant du V. La difficulté essentielle est alors de définir la répartition des forces horizontales entre les divers pans de contreventement, dont les déformabilités peuvent être très différentes en raison de leurs dimensions et de leur constitution. Le RPA 99-V2003 propose deux systèmes de contreventement mixte par des voiles et des portiques avec et sans justification d'interactions portiques-voiles.



## 2.4 EMBLACEMENT ET TORSION DES VOILES DANS LES STRUCTURES

### Nombre d'éléments de contreventement vertical

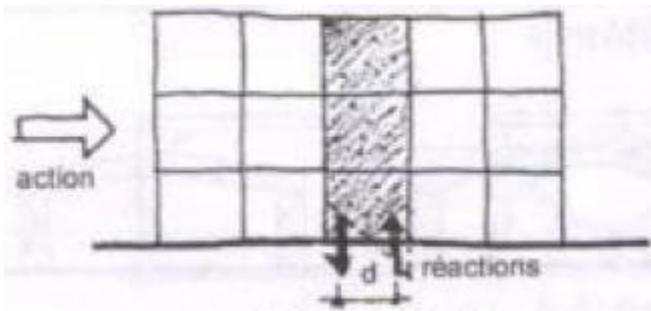
- Lorsque les planchers et les toitures peuvent être considérés comme parfaitement rigides dans leur plan, théoriquement, il suffit de trois éléments de contreventement par niveau, à condition qu'ils soient non concourants et non parallèles. Il est cependant nettement préférable d'en utiliser un nombre plus élevé afin de répartir les charges horizontales sur plusieurs éléments. La redondance devient une nécessité dans le cas des bâtiments de grandes dimensions horizontales, dont les planchers, plus longs, ont une certaine flexibilité dans leur plan et doivent par conséquent être raidis.



Nombre minimal de contreventement vertical.

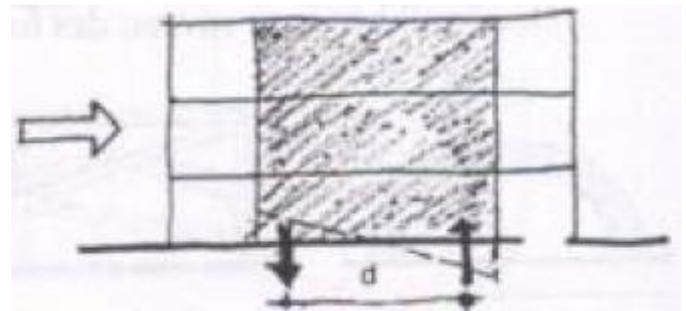
**Disposition des éléments verticaux de contreventement**

- D'une manière générale, ces éléments devraient apporter à la construction sensiblement la même rigidité dans les directions transversale et longitudinale. Afin de constituer un système de contreventement efficace, ils devraient être : les plus larges possible, courant éventuellement sur plusieurs travées figure suivants. Les éléments étroits sont soumis à des efforts élevés, donnant lieu à des déformations importantes ;



Petit bras de levier

A éviter



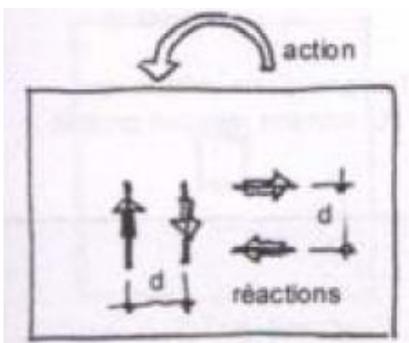
Grand bras de levier

A préférer

Largeur des éléments verticaux de contreventement

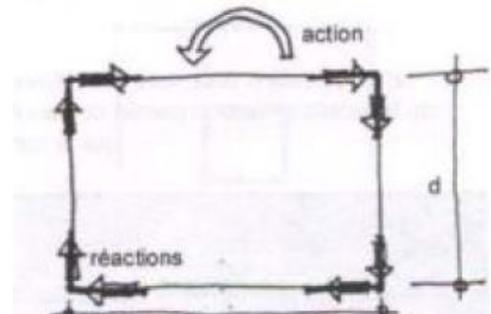
**Torsion des voiles dans les structures**

- Disposés en façade ou près des façades pour conférer un grand bras de levier ou couple résistant à la torsion figures suivantes. La solution la plus efficace consiste à utiliser la totalité des façades pour le contreventement. Si le contreventement ne peut occuper qu'une partie des façades, il est préférable de rigidifier les angles car ils sont très sollicités par les charges horizontales. Lorsqu'un élément de contreventement occupe toute la hauteur du bâtiment, il doit être lié aux planchers de tous les niveaux.



Petit bras de levier

A éviter

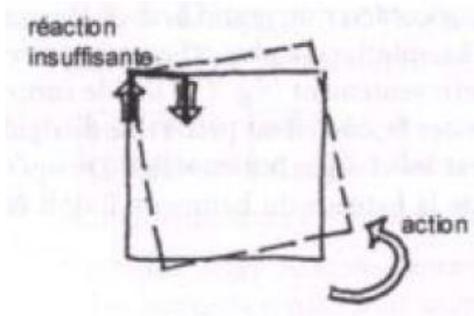


Grand bras de levier

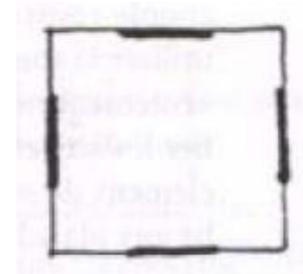
A préférer

Distance entre les éléments verticaux de contreventement

- Disposés symétriquement par rapport au centre de gravité du niveau (voire figures). Dans le cas d'une distribution asymétrique des éléments de contreventement, la construction est soumise par le vent et les séismes à des efforts supplémentaires dus à la torsion d'axe vertical



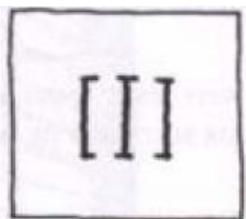
A éviter



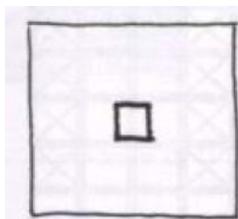
A préférer

Une position décentrée des éléments de contreventement est à l'origine d'une sollicitation du bâtiment en torsion (dessin gauche). En outre, le bras de levier du moment résistant produit par le contreventement est très faible.

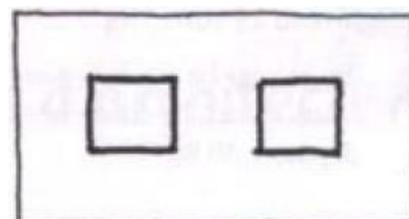
- Constitués éventuellement par un grand noyau central fermé (et non pas en forme de U, X et Z), afin de minimiser de même que les deux mesures précédentes, les sollicitations dues à la torsion (Figures suivantes). En effet, la résistance à la torsion d'axe vertical des noyaux ouverts est faible.



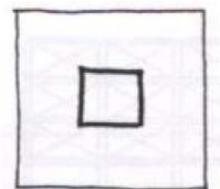
Noyau ouvert



Noyau de faibles dimensions



Noyaux fermés



Noyau fermé de dimensions adéquates

A éviter

A préférer

## 2.5 PRINCIPES DE CONCEPTION PARASISMIQUE DES BATIMENTS

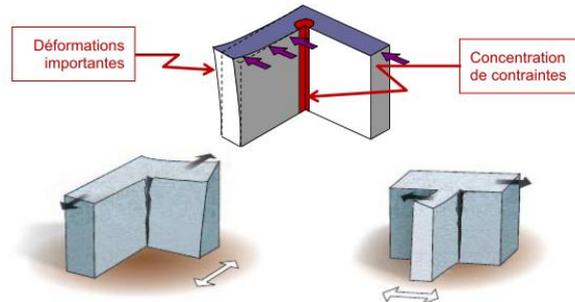
Le comportement d'un bâtiment lors d'un séisme repose en grande partie sur la qualité de sa conception structurale.

L'expérience montre que les calculs n'assurent pas entièrement la protection parasismique des bâtiments. Les choix effectués par le concepteur en amont de l'application des règles parasismiques influent d'une manière déterminante sur le comportement de l'ouvrage lors d'un séisme.

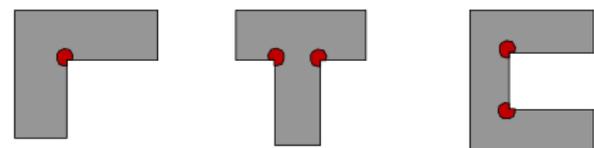
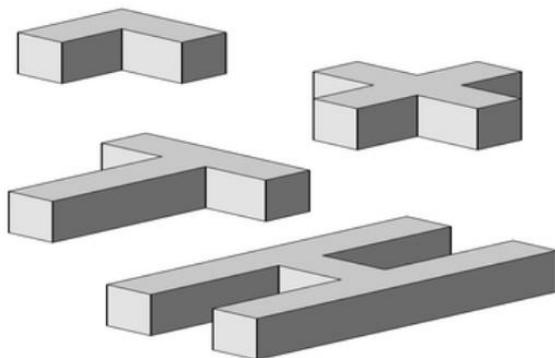
Le retour d'expérience a permis d'identifier les propriétés fondamentales d'un ouvrage qui favorisent un bon comportement parasismique.

### a) Simplicité de forme en plan

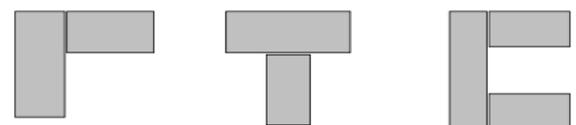
Une forme simple et compacte en plan (rectangulaire) est bénéfique vis-à-vis de l'action sismique. Inversement, les formes complexes (en T, en L, en X ...) se traduisent par des rigidités latérales différentes, donc des comportements oscillatoires différentiels entre les différentes parties. Il en résulte des concentrations de contraintes, généralement au niveau des angles rentrants, très néfastes pour la structure.



Quand des formes complexes sont requises, cet effet de concentration de contraintes peut être évité en fractionnant le bâtiment par des joints parasismiques, de manière à obtenir une juxtaposition de blocs indépendants de forme simple. Une autre solution est de raidir les extrémités des blocs.



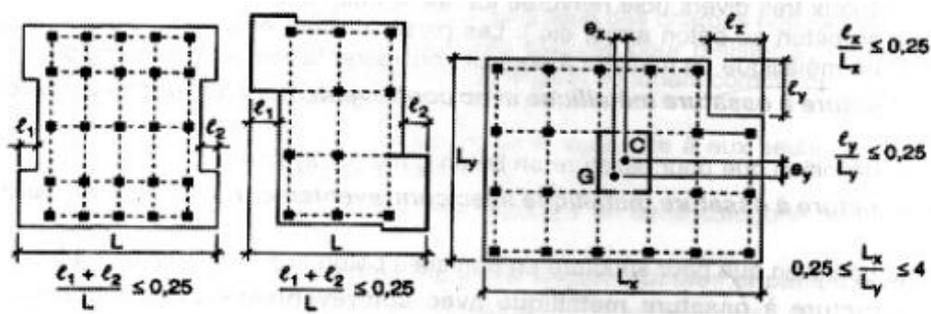
Formes complexes générant des concentrations de contraintes



Formes en plan complexes et décomposition en blocs simples indépendants

### Principe de régularité en plan selon (RPA99/2003) :

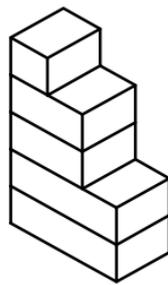
- Le bâtiment doit présenter une configuration sensiblement symétrique vis à vis de deux directions orthogonales aussi bien pour la distribution des rigidités que pour celle des masses.
- A chaque niveau et pour chaque direction de calcul, la distance entre le centre de gravité des masses et le centre des rigidités ne dépasse pas 15% de la dimension du bâtiment mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique considérée.
- Les planchers doivent présenter une rigidité. Les planchers doivent présenter une rigidité suffisante vis à vis de celle des contreventements verticaux pour être considérés comme indéformables dans leur plan (diaphragme). Dans ce cadre la surface totale des ouvertures de plancher doit rester inférieure à 15% de celle de ce dernier.



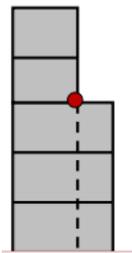
Limites des décrochements en plan

**b) Simplicité de forme en élévation**

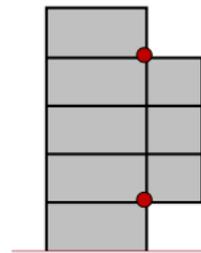
Les bâtiments présentant des variations géométriques importantes en élévation (parties en saillie ou en retrait) se comportent généralement moins bien sous l'action d'un séisme que ceux dont les dimensions ne varient pas ou peu sur leur hauteur. Cela s'explique par les concentrations de contraintes qui apparaissent au raccordement entre les parties de dimensions différentes. Bien entendu, la sensibilité à ce phénomène s'accroît avec la dimension des retraits ou des encorbellements.



Décrochements en élévation



Etages en retrait

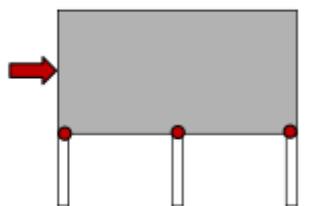


Etages en saillie

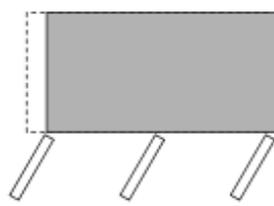
Effet de concentration de contraintes sur les bâtiments comportant des décrochements ; retraits ou saillies

**c) Régularité des raideurs en élévation**

Une variation importante de la rigidité des plans de stabilité sur la hauteur du bâtiment est néfaste pour la tenue parasismique. Ceci entraîne en effet une concentration de contraintes au droit de la liaison entre les différentes parties. C'est typiquement le cas pour les niveaux dans lesquels des transparences ont été réalisées, par exemple les bâtiments sur pilotis pour l'aménagement de commerces en rez-de-chaussée des immeubles d'habitation.



Premier niveau souple « transparence »



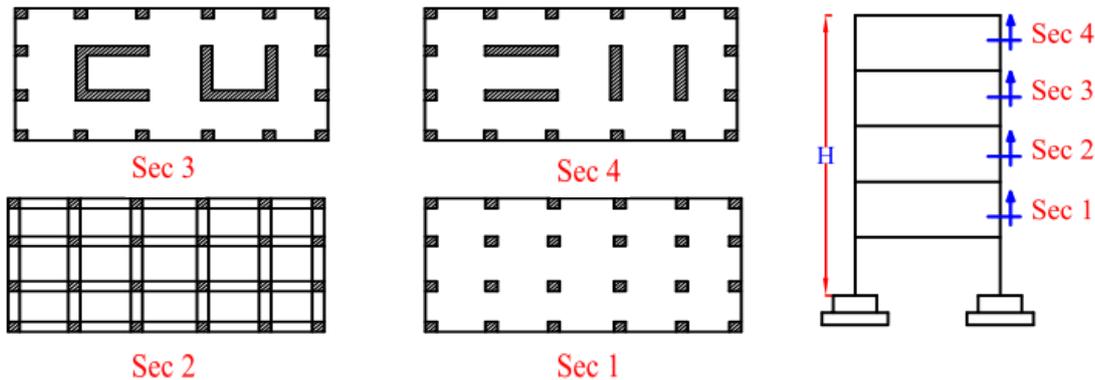
Effondrement partiel lors d'un séisme



Zones critiques des ossatures

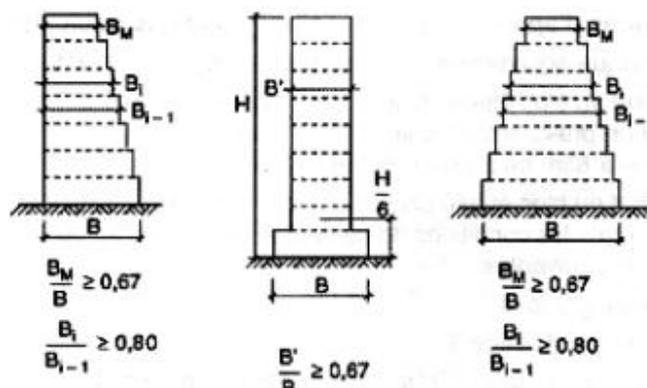
Une répartition homogène des raideurs et des masses sur la hauteur est au contraire le gage d'un bon comportement parasismique : elle favorise une déformation d'ensemble de la structure et réduit le risque de déplacements différentiels importants.

Système uniforme de contreventement « chaque niveau avec un système de contreventement »



### Principe de régularité en élévation (RPA99/2003) :

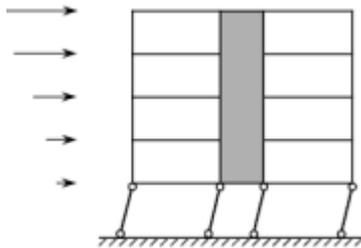
- Le système de contreventement ne doit pas comporter d'élément porteur vertical discontinu, dont la charge ne se transmette pas directement à la fondation.
- Aussi bien la raideur que la masse des différents niveaux restent constants ou diminuent progressivement et sans chargement brusque de la base au sommet du bâtiment
- Dans le cas de décrochements en élévation, la variation des dimensions en plan du bâtiment entre deux niveaux successifs ne dépasse pas 20% dans les deux directions de calcul et ne s'effectue que dans le sens d'une diminution avec la hauteur. La plus grande dimension latérale du bâtiment n'excède pas 1,5 fois sa plus petite dimension.



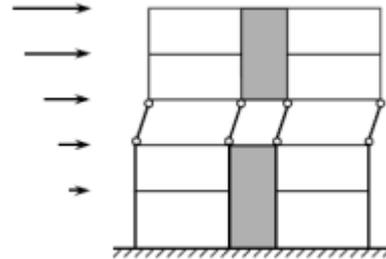
Limites des décrochements en élévation

**d) Etage rez-de-chaussée ou étage supérieurs flexibles**

Soit un rez-de-chaussée flexible horizontalement « soft storey » et conduit au dangereux mécanisme de colonnes (mécanisme d'étage). Cela entraîne un rez-de-chaussée flexible. Ou lorsqu'à un étage supérieur la stabilisation horizontale est affaiblie ou même totalement absente, cela entraîne un étage flexible et par conséquent un mécanisme de colonnes dangereux (mécanisme d'étage).

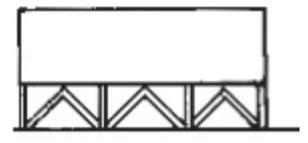
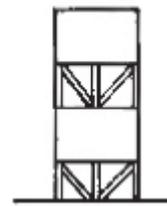
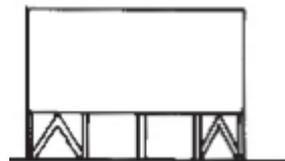


Rez-de-chaussée flexible (A éviter).



Etage supérieurs flexible (A éviter)

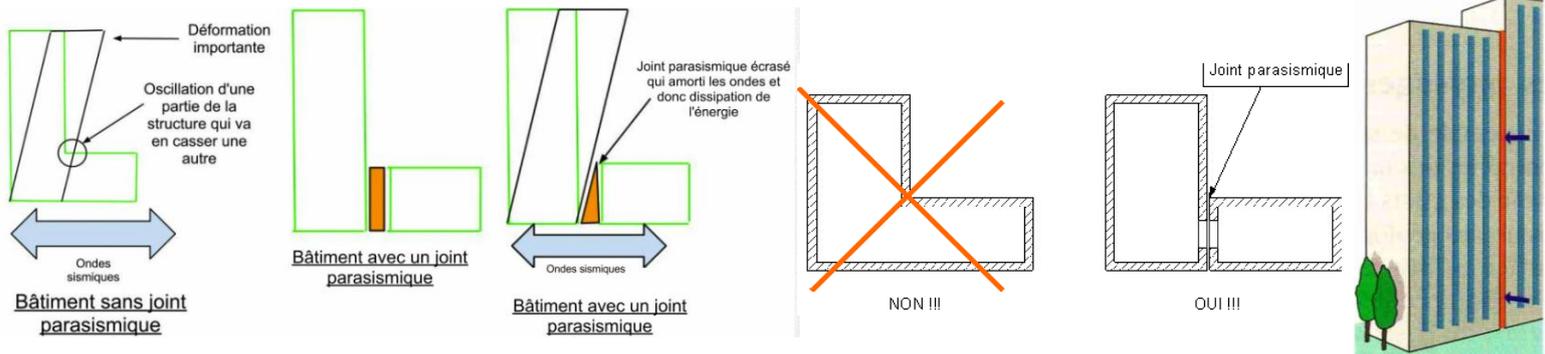
Pour éviter l'effet de niveau souple du bâtiment, une bonne conception parasismique doit se traduire pour chaque niveau flexible par (Contreventement par voiles ou par triangulation) : Cette démarche a une forte incidence architecturale. Il s'agit de placer en façade ou en retrait des façades, dans les deux directions principales, des travées rigides (palées de stabilité ou murs de contreventement) assurant la résistance aux charges horizontales à la place des poteaux.



Éviter l'effet de niveau souple par des triangulations.

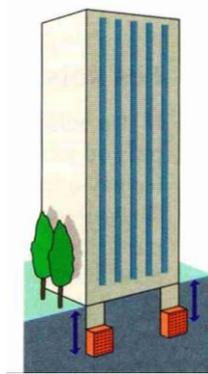
**e) Joints parasismiques**

Solutions permettant de corriger les conséquences de l'asymétrie de la forme des bâtiments. Les configurations asymétriques peuvent, dans de nombreux cas, être fractionnées en volumes simples par des joints parasismiques



### f) Isolation parasismique des fondations

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. 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.



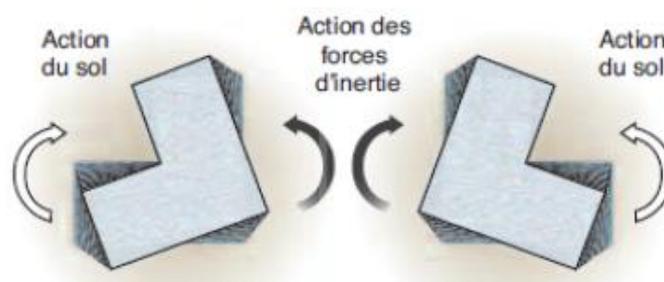
Amortisseurs

### g) Faible sensibilité à la torsion

Lorsque le positionnement des masses diffère beaucoup de la disposition des plans de stabilité, le bâtiment comporte une forte excentricité, ce qui génère au cours d'un séisme une mise en torsion d'ensemble de la structure. De nombreuses destructions ont été constatées à cause de cet effet.

Pour réduire la sensibilité du bâtiment aux effets de la torsion, une bonne conception parasismique doit se traduire pour chaque niveau du bâtiment (plancher et toiture) par :

- Une réduction de l'excentricité, en cherchant à faire coïncider le centre de torsion avec le centre de masse ;
- Un positionnement en périphérie des plans de stabilité, qui permet une meilleure résistance à la torsion par un plus grand bras de levier ;
- Une symétrie approximative par rapport à deux axes horizontaux des masses et des raideurs.



Oscillations de torsion (CERIB 2011-03)

## 2.6 CHOIX ET CONTREVENTEMENT VERTICAL DES BATIMENTS :

Le choix entre les contreventements flexibles (portiques) ou rigide (treillis, murs) est une affaire de circonstances, avantages et inconvénients devant être soigneusement examinés dans chaque cas ainsi le coût de chaque solution.

### 2. 6.1 Selon le RPA 99-V2003

La classification des systèmes structuraux est faite en tenant compte de leur fiabilité et de leur capacité de dissipation de l'énergie vis-à-vis de l'action sismique, et la **valeur numérique du coefficient de comportement R** correspondant est fixé en fonction de la nature des matériaux constitutifs, du type de construction, des possibilités de redistribution d'efforts dans la structure et des capacités de déformation des éléments. Les systèmes de contreventement retenus dans les présentes règles sont classés selon les catégories suivantes :

### 2.6.2 Structures en béton armé selon le RPA 99-V2003

Choix de système de contreventement par Portiques autostables en béton armé sans ou avec remplissage en maçonnerie rigide dans ce cas, le contreventement est assuré uniquement par des portiques qui sont capables de reprendre la totalité des sollicitations dues aux charges verticales et horizontales.

#### a) Portiques autostables en béton armé sans remplissage en maçonnerie rigide :

Les éléments de remplissage ne doivent pas gêner les déformations des portiques (ne gênent pas le déplacement des portiques). Les conditions de ce système sont :

- 05 niveaux ou 17 m en zone I ;
- 04 niveaux ou 14 m en zone IIa ;
- 03 niveaux ou 11 m en zones IIb et III.

#### b) Portiques autostables en béton armé avec remplissage en maçonnerie rigide :

Les conditions de ce système sont :

- 05 niveaux ou 17 m en zone I ;
- 04 niveaux ou 14 m en zone IIa ;
- 03 niveaux ou 11 m en zone IIb.
- 02 niveaux ou 8 m en zone III.

### c) Voiles porteurs en béton armé

Le système est constitué de voiles uniquement ou de voiles et de portiques. Dans ce dernier cas les voiles reprennent plus de **20%** des sollicitations dues aux charges verticales. On considère que la sollicitation horizontale est reprise uniquement par les voiles.

### d) Noyau en béton armé

Le bâtiment est dans ce cas-là contreventé entièrement par un noyau rigide en béton armé qui reprend la **totalité** de l'effort horizontal.

### e) Système de contreventement mixte

On peut très bien avoir recours à des solutions mixtes, utilisant simultanément plusieurs des solutions mentionnées précédemment. La **difficulté** essentielle est alors de définir la **répartition** des forces horizontales entre les **divers** pans de contreventement, dont les déformabilités peuvent être très différentes en raison de leurs dimensions et de leur constitution.

Le RPA 99-V2003 propose **deux** systèmes de contreventement mixte par des voiles et des portiques avec et sans justification **d'interactions** portiques-voiles.

- **La première avec justification d'interactions portiques-voiles** : les voiles de contreventement doivent reprendre au **plus 20%** des sollicitations dues aux charges verticales. Les charges horizontales sont reprises conjointement par les voiles et les portiques. Les portiques doivent reprendre, outre les sollicitations dues aux charges verticales, au **moins 25%** de l'effort tranchant d'étage.
- **La deuxième sans justification d'interactions portiques-voiles** : les voiles de contreventement doivent reprendre au **plus 20%** des sollicitations dues aux charges verticales et **la totalité des** sollicitations dues aux charges horizontales. Avec ce système de contreventement les bâtiments sont limités en hauteur à 10 niveaux ou 33 m au maximum. Toutefois, en zone III, il y a lieu de vérifier les portiques sous un effort horizontal représentant **25%** de l'effort horizontal global.

## Chapitre 2 : Système de Contreventements

Le choix du contreventement dépend essentiellement des dimensions de la structure ainsi que l'utilisation locale d'intérêt et de site.

### 2.7 Méthodes de calcul des contreventements

Dans le développement du calcul des éléments de contreventement nous nous intéressant particulièrement ici au calcul des structures en portiques et en voiles.

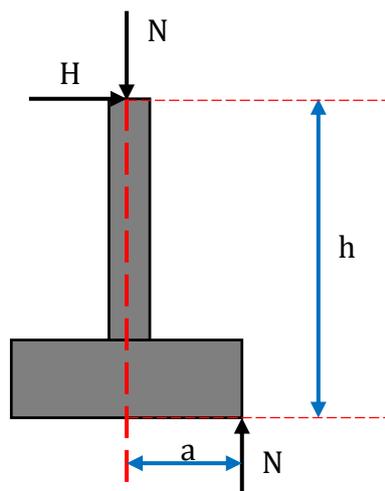
#### 2.7.1 Contreventement par portiques

Le système porteur est constitué par l'ensemble de poteaux-poutres formant des portiques étages. La déformation d'ensemble d'un portique soumis à un système quelconque de forces horizontales dépend :

- De l'intensité de la répartition des forces sur la hauteur du bâtiment
- Des caractéristiques géométriques et mécaniques du portique

Avant de commencer d'étudier les portiques en parler sur les poteaux comment réagir avec les forces horizontales.

- a) **Les poteaux** peuvent résister à des forces horizontales par effet d'encastrement à leur base tel que l'excentricité entre la charge normale appliquée et celle du terrain déterminera le type de fondation choisi.

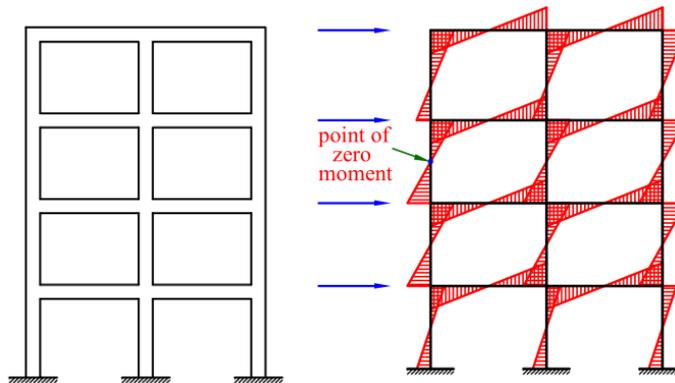


Poteau avec les forces horizontales

### b) Structure en portique :

Le calcul des sollicitations de cette structure s'effectue principalement par deux approches tel que Des méthodes **exactes** qui font appellent à

- La résistance des matériaux (R.D.M)
- Le calcul numérique (M.E.F)



2)- Des méthodes **approchées** : qui sont développés pour les charges horizontales par plusieurs auteurs tel que :

- **MUTO**
- **FUENTES**
- **BOWMAN**

Nous développerons ici l'une des méthodes approchées les plus connue qui sont celle de [**MUTO**].

La méthode MUTO est proposée dans la réglementation Japonaise, c'est la mieux indiquée pour ce type de contreventement. Elle est basée sur la notion de « **rigidité relative de niveau** » d'un portique dont « MUTO » suggère comme valeur la rigidité avec poteaux supposés parfaitement encastrés multipliée par un coefficient « a » correcteur tenant compte de la flexibilité des poutres arrivant aux nœuds.

On définit :

$R^\infty$  : la rigidité relative de niveau d'un portique avec poteaux parfaitement encastrés (ou bien poutres infiniment rigides).

$R$  : rigidité relative de niveau d'un portique au sens de MUTO, est définit comme étant égale à

$$R = a \cdot R^\infty$$

Pour la déterminer, il suffit de suivre les étapes suivantes :

• Calcul des raideurs  $K$  des poteaux et des poutres

$$K \text{ (poteau)} = \frac{I}{he}$$

$$K \text{ (poutre)} = \frac{I}{L}$$

$I$  : inertie de l'élément considéré (poteau ou poutre).

$he$  : hauteur du poteau considéré.

$L$  : portée de la poutre considérée.

• Calcul des coefficients ( $\bar{K}$ ) relatifs aux portiques transversaux et longitudinaux et ( $a$ ) coefficient correcteur

Le tableau suivant résumer les deux coefficients ( $\bar{K}$ ) et ( $a$ )

Poteaux intermédiaire			Poteaux de rive		
Etage courant	1 <sup>er</sup> niveau	1 <sup>er</sup> niveau	Etage courant	1 <sup>er</sup> niveau	1 <sup>er</sup> niveau
$\bar{K} = \frac{K_1 + K_2 + K_3 + K_4}{2K_p}$	$\bar{K} = \frac{K_1 + K_2}{2K_p}$	$\bar{K} = \frac{K_1 + K_2}{K_p}$	$\bar{K} = \frac{K_1 + K_2}{2K_p}$	$\bar{K} = \frac{K_1}{K_p}$	$\bar{K} = \frac{K_1}{K_p}$
$a = \frac{\bar{K}}{2 + \bar{K}}$	$a = \frac{0.5 + \bar{K}}{2 + \bar{K}}$	$a = \frac{0.5 \bar{K}}{1 + 2\bar{K}}$	$a = \frac{\bar{K}}{2 + \bar{K}}$	$a = \frac{0.5 + \bar{K}}{2 + \bar{K}}$	$a = \frac{0.5 \bar{K}}{1 + 2\bar{K}}$

• Calcul des rigidités des poteaux suivant des deux directions

- Pour étage courant :

$$r = a \frac{12 EI}{h_e^3}$$

- Pour premier niveau

a- Poteau encasté à la base :

$$r = a \frac{12 EI}{h_e^3}$$

b- Poteau articulé à la base :

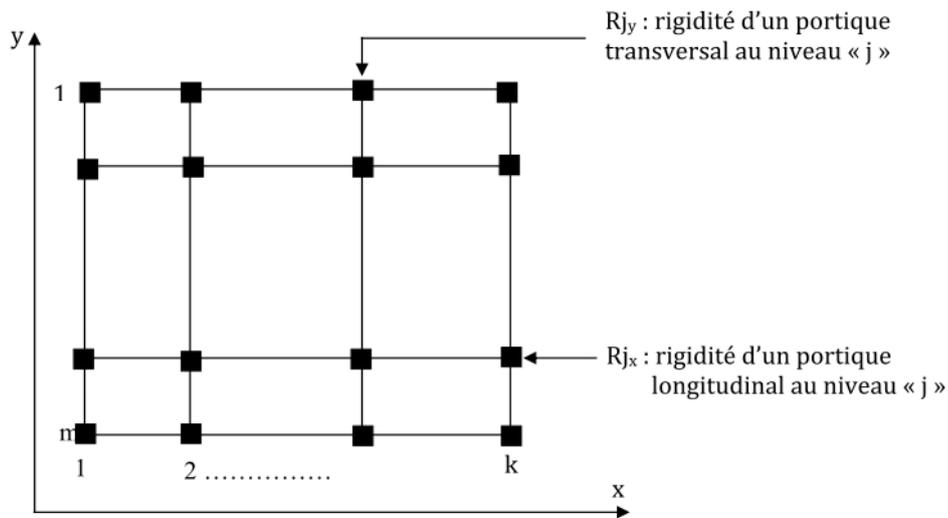
$$r = a \frac{3 EI}{h_e^3}$$

Avec :

- E : module d'élasticité (de Young longitudinal) du béton armé.
- I : inertie de la section du poteau suivant la direction considérée
- he : hauteur du poteau.

$$E_{c28} = 11000 \sqrt[3]{f_{c28}}$$

- **Calcul des rigidités équivalentes du niveau des dans les deux sens « transversale et Longitudinale »**



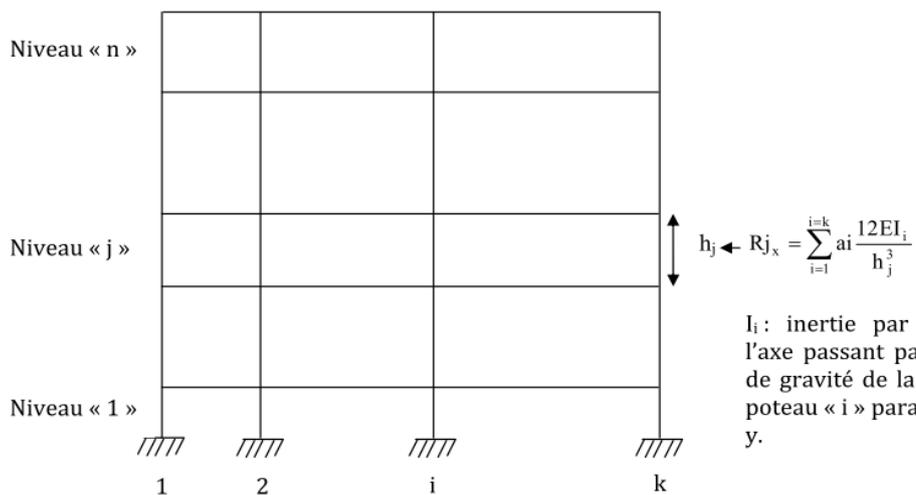
Vue en plan étage « j ».

Le sens transversal :

$$R_{jt} = \sum_{i=1}^{i=m} a_i \frac{12 EI_i}{h_j^3}$$

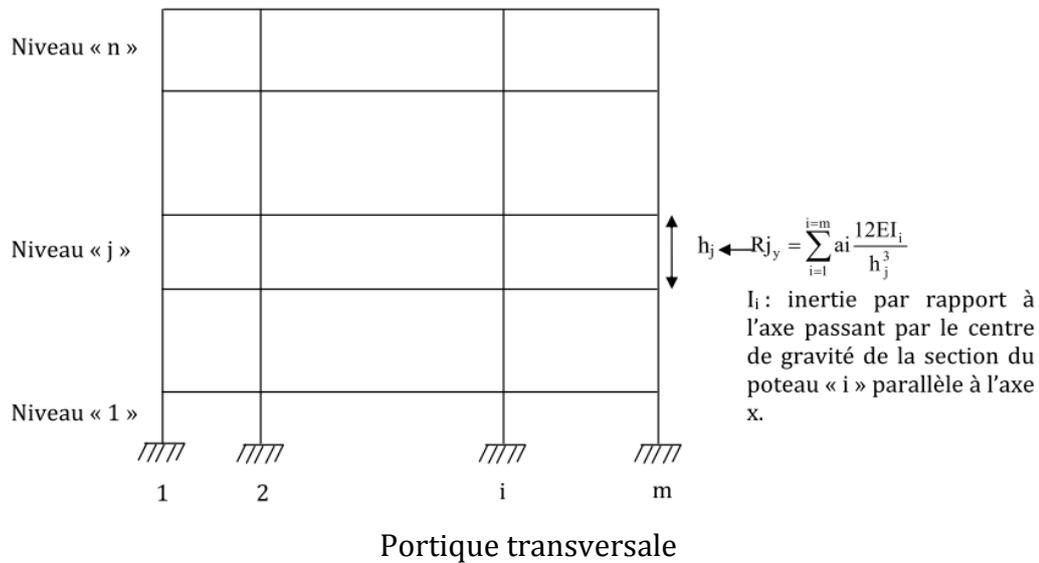
Le sens longitudinal :

$$R_{jl} = \sum_{i=1}^{i=k} a_i \frac{12 EI_i}{h_j^3}$$



$I_i$  : inertie par rapport à l'axe passant par le centre de gravité de la section du poteau « i » parallèle à l'axe y.

Portique longitudinal.



- **Calcul du Centre de masse  $G_j$  (centre de gravité) :**

Les masses sont considérées comme concentrées au niveau des planchers. Il est donc nécessaire de connaître les centres de masses qui représentent les points d'application des forces sismiques latérales. Le centre de masses sera déterminé pour chaque niveau, en considérant tous les éléments qui ont une influence sur la stabilité du bâtiment ; planchers, poteaux, poutres, murs. ...etc. Ce centre sera déterminé en utilisant la relation suivante :

$$X_G = \frac{\sum W_i \cdot x_i}{\sum W_i}$$

$$Y_G = \frac{\sum W_i \cdot y_i}{\sum W_i}$$

$W_i$  : Poids propre de l'élément (i) du niveau considéré.

$x_i$  et  $y_i$  : coordonnées du centre de masse de l'élément (i) du niveau considéré par rapport au repère choisi.

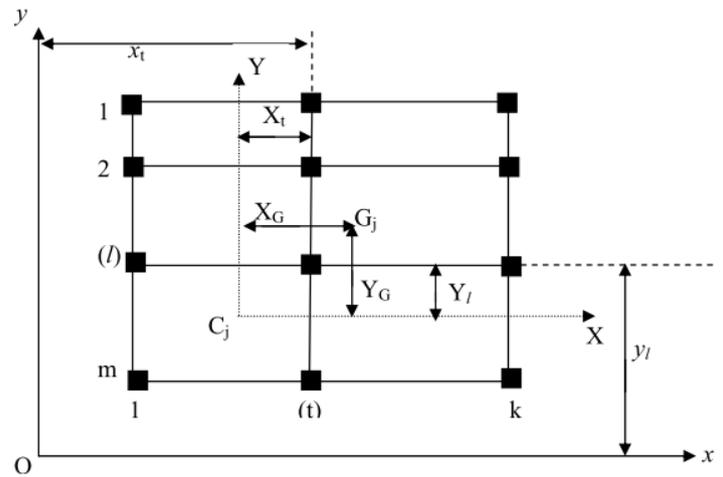
$X_G$  et  $Y_G$  : coordonnées du centre de masses du niveau considéré.

- **Centre de torsion  $C_j$  (centre de rigidité) :**

Le centre de torsion (centre de rigidités) est le point pour lequel la force tourne autour de ce point. Par ce point ( $G_j$ ), coïncide ( $C_j$ ) n'engendra qu'une translation du plancher et un moment dans l'axe de la rotation passant par ce point n'engendre qu'une rotation du plancher. Le centre de torsion à un niveau (j) est calculé par les formules suivantes :

$$x_c = \frac{\sum_{t=1}^k R_{jt} x_t}{\sum_{t=1}^k R_{jt}}$$

$$y_c = \frac{\sum_{\ell=1}^k R_{j\ell} y_\ell}{\sum_{\ell=1}^k R_{j\ell}}$$



Centre de torsion.

On définit :

Cj : centre de torsion à l'étage « j ».

Cj  $\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix}$  coordonnées de Cj par rapport à (o x y).

Gj : centre du gravité du plancher « j ».

Gj  $\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix}$  coordonnées de Gj par rapport au nouveau repère (Cj, X, Y).

O : point quelconque.

O x ; O y : les axes parallèles aux directions principales du bâtiment.

Xt : distance d'un portique transversal à l'axe oy.

Yl : distance d'un portique longitudinal à l'axe ox.

• **Calcul de l'excentricité :**

- **Excentricité théorique :** C'est la distance entre le centre de masse et le centre de torsion, elle est donnée par les formules suivantes :

$$e_{x\text{théorique}} = X_G - X_C$$

$$e_{y\text{théorique}} = Y_G - Y_C$$

- **Excentricité accidentelle :** Cette excentricité accidentelle sera déterminée selon l'article **4.2.7 du RPA 99** ; l'excentricité accidentelle égale à **5% L** (cette excentricité doit être prise en considération de part et d'autre du centre de torsion).

$$e_x \text{ accidentelle} = 5\% L_x$$

$$e_y \text{ accidentelle} = 5\% L_y$$

$L_x, L_y$  : dimension en plan du bâtiment

- **Excentricité adopté :**

$$e_x \text{ adopté} = \max(e_x \text{ théorique}, e_x \text{ accidentelle})$$

$$e_y \text{ adopté} = \max(e_y \text{ théorique}, e_y \text{ accidentelle})$$

• **Détermination de la rigidité à la torsion à l'étage (j)**

La rigidité à la torsion de l'étage « j » notée  $R_{j\theta}$  est donnée par :

$$R_{j\theta} = \sum_{t=1}^K R_{jt} (X_t)^2 + \sum_{l=1}^m R_{jl} (Y_l)^2$$

Où :

$X_t$  est la distance d'un portique transversal à l'axe CY.

$Y_l$  est la distance d'un portique longitudinal à l'axe CX.

• **Détermination des efforts tranchants de niveau par étage**

Soient  $f_1, f_2, \dots, f_n$  les forces sismiques calculés d'après le RPA 99 (version 2003) ou bien les forces dues au vent selon le règlement (N. V 99).

$w$  est égal à la somme des poids  $w_i$ , calculés à chaque niveau (i) :

$$w = \sum_{i=1}^n w_i$$

$$w_i = w_{Gi} + \beta w_{Qi}$$

Selon le RPA 99/ V 2003, la valeur de  $w$  (poids total) est égale à la somme des poids  $w_i$ , calculée à chaque niveau

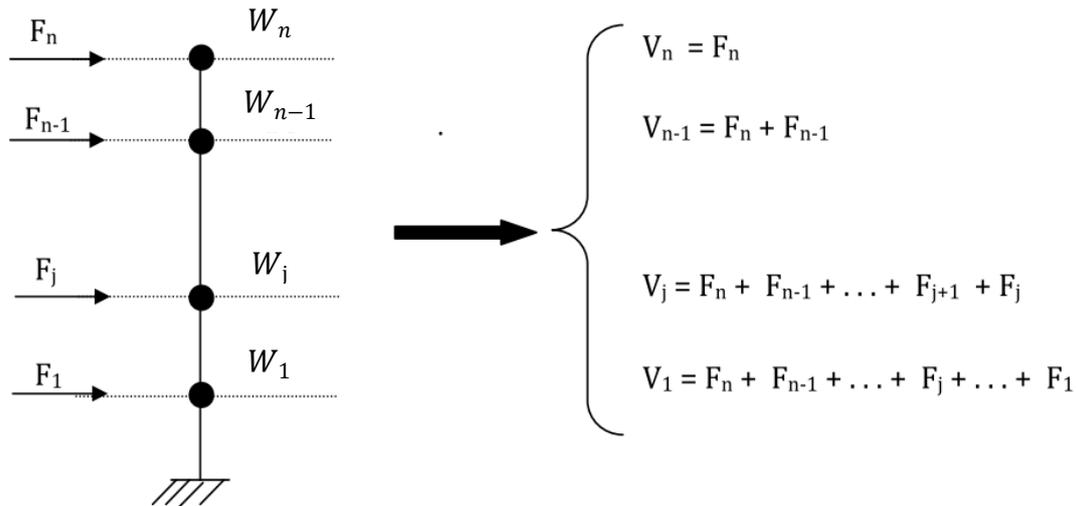
$w_{Gi}$ : Poids du aux charges permanents et à celles des équipements fixes Éventuels, solidaires de la structure

$w_{Qi}$ : Charges exploitation

$\beta$ : Coefficient de pondération, fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation et donné par RPA 99/ V 2003 (tableau 4.5).

valeurs du coefficient de pondération  $\beta$ .

Cas	Type d'ouvrage	$\beta$
1	Bâtiments d'habitation, bureaux ou assimilés	0,20
2	Bâtiments recevant du public temporairement : - Salles d'exposition, de sport, lieux de culte, salles de réunions avec places debout. - salles de classes, restaurants, dortoirs, salles de réunions avec places assises	0,30 0,40
3	Entrepôts, hangars	0,50
4	Archives, bibliothèques, réservoirs et ouvrages assimilés	1,00
5	Autres locaux non visés ci-dessus	0,60



Les efforts tranchants à chaque niveau du bâtiment.

• Répartition des efforts tranchant par étage aux différents portiques

Soient  $V_{jx}$  : effort tranchant engendré par le séisme ou le vent dans le sens x à l'étage « j »

$V_{jy}$  : effort tranchant engendré par le séisme ou le vent dans le sens y à l'étage « j ».

Le plus souvent les rigidités relatives de niveau des portiques  $R_x$  ou  $R_y$  ne varient pas ou varient progressivement de la même manière suivant la hauteur du bâtiment, on peut dans ce cas considérer que le centre de torsion  $C$  et le centre de masse  $G$  varient peu d'un étage à l'autre.

Les centres de torsions  $C_j$  et les centres de gravité  $G_j$  sont sensiblement sur la même verticale généralement.

Portiques longitudinaux : l'effort tranchant de niveau « j ».

$$V_{jx}^l \text{ sera : } V_{jx}^l = V_{jx} \frac{R_{jl}}{\sum_{l=1}^m R_{jl}} + V_{jx} \cdot Y_G \frac{R_{jl} y_l}{R_{j\theta}}$$

Portiques transversaux : l'effort tranchant de niveau « j ».

$$V_{jy}^t \text{ sera : } V_{jy}^t = V_{jy} \frac{R_{jt}}{\sum_{t=1}^k R_{jt}} + V_{jy} \cdot X_G \frac{R_{jt} x_t}{R_{j\theta}}$$

## 2.7.2 Contreventement par voiles

Ce genre de structure est constitué par des éléments en béton ou en maçonnerie qui fonctionnent comme des consoles encastrées à leur base sur des fondations.

### Répartition des forces horizontales entre les refends

Quelle que soit l'origine des forces horizontales, la stabilité doit être assurée, au minimum, par deux refends « voiles » non coplanaires par direction, ou encore trois refends disposés dans les plans de contreventement non parallèles constituant des systèmes isostatiques, il est à remarquer que dans un système purement isostatique, la distribution de la résultante des actions horizontales est indépendante des inerties respectives des éléments de contreventement. Le plancher est considéré comme étant rigide et indéformable dans son plan.

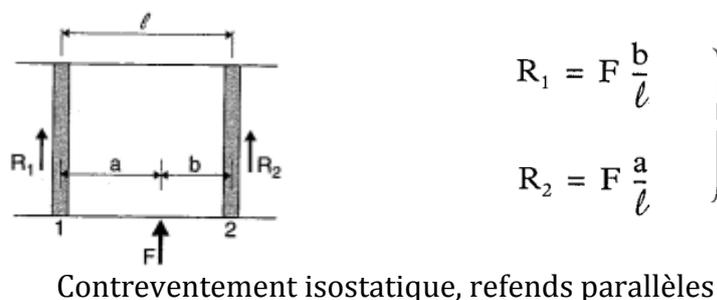
Dans le cas général, quand il y a plusieurs éléments de contreventements (système hyperstatique) de formes et conditions d'appuis différents, la répartition ne peut se faire que par l'emploi de l'ordinateur. Un calcul manuel est toujours possible, mais il faut prendre en compte les hypothèses simplificatrices suivantes : Les planchers sont indéformables dans leurs plans, Les éléments de contreventements sont parfaitement encastrés à leur base, et d'autres hypothèses en relations avec l'élançements et les déformations des éléments de contreventements.

### Il existe deux types de refends

- Système isostatique
- Système Hyperstatique

#### a) Cas de deux refends (système isostatique)

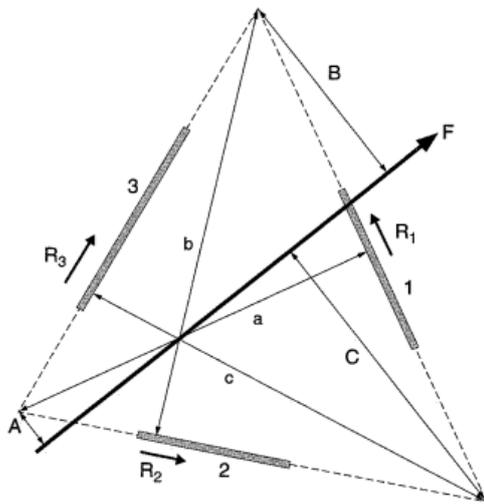
Si l'on ne dispose que de deux éléments par direction, il faut qu'ils soient suffisamment espacés afin de mobiliser des couples de force devant équilibrer les moments de torsion. La répartition isostatique par direction donne :



$$\left. \begin{aligned} R_1 &= F \frac{b}{l} \\ R_2 &= F \frac{a}{l} \end{aligned} \right\}$$

**b) Cas de trois refends non concourants et non parallèles (système isostatique)**

Si l'on ne veut pas faire intervenir le fonctionnement en section profilées, les composantes suivant les trois directions sont

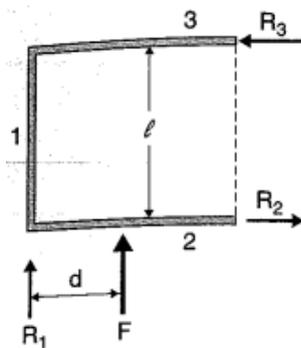


$$\left. \begin{aligned} R_1 &= F \frac{A}{a} \\ R_2 &= F \frac{B}{b} \\ R_3 &= F \frac{C}{c} \end{aligned} \right\}$$

Contreventement par trois refends disposés en triangle

**c) Cas de trois refends disposés en U (système isostatique)**

En supposant les trois refends sont liés, on a la répartition suivante :



$$\begin{aligned} R_1 &= F \\ R_2 &= -R_3 = F \frac{d}{l} \end{aligned}$$

Contreventement isostatique par trois refends disposés en U

**d) Cas de refends parallèles (système hyperstatique)**

Lorsque plusieurs refends sont disposés selon une trame orthogonale, ce qui est le cas le plus fréquent, le modèle de calcul peut être simplifié en prenant en compte, par exemple, uniquement les refends dans la direction correspondant à celle des forces considérées ; ces refends sont considérés comme étant des refends indépendants.

Pour la répartition des forces horizontales, on simplifie en posant les hypothèses suivantes :

- Les planchers sont indéformables horizontalement
- Les refends sont parfaitement encastrés à leur base,

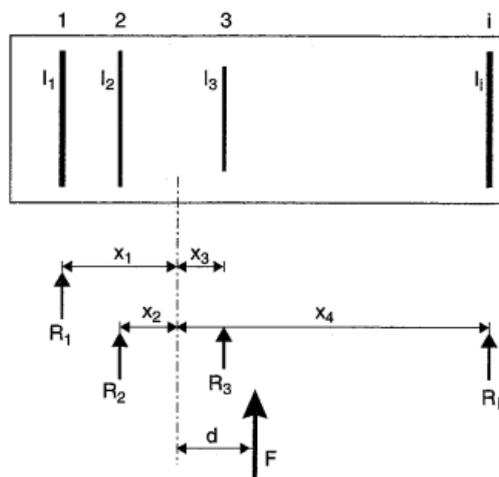
- L'inertie des refends est constante sur toute la hauteur ou alors, la variation d'inertie suit la même loi pour tous les refends.

La force propre à chaque refend est proportionnelle à son inertie :

$$R_i = FI_i \left( \frac{1}{\sum I_i} + \frac{dx_i}{\sum I_i x_i^2} \right)$$

Si la résultante F coïncide avec la position de centre de gravité des inerties de refends, la rotation est nulle, et l'effort  $R_i$  est uniquement proportionnel à l'inertie du refend considéré :

$$R_i = \frac{FI_i}{\sum I_i}$$



Contreventement par refends parallèles

**e) Cas de du contreventement par cage (système hyperstatique)**

Soit O le centre de gravité des inerties de refends considérés deux à deux. La position de O est déterminée par :

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= a \frac{I_2}{I_1 + I_2} \\ Y_0 &= b \frac{I_4}{I_3 + I_4} \end{aligned} \right\}$$

La déformation du bâtiment peut être décomposée en une translation sous l'action de la force F appliquée en O, et une rotation autour du centre O sous l'action d'un couple égal à  $Fd$ .

Si l'on pose :

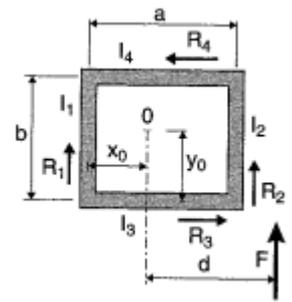
$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 = I \\ I_3 &= I_4 = I' \end{aligned}$$

On obtient les forces par refend :

$$R_1 = F \left( \frac{1}{2} - \frac{d}{a + \frac{b^2}{a} \frac{I'}{I}} \right)$$

$$R_2 = F \left( \frac{1}{2} + \frac{d}{a + \frac{b^2}{a} \frac{I'}{I}} \right)$$

$$R_3 = -R_4 = \frac{Fd}{b + \frac{a^2}{b} \frac{I'}{I}}$$



Répartition de la force horizontale dans cas d'un noyau