

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Centre Universitaire de Mila
Institut des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et Techniques
Filière: Génie civil
Spécialité: Structures
Niveau: Master 1



Cours de Bâtiment

Dr. Abdelkader BRAHIMI

2021-2022



Chapitre 5

Les Contreventements

Contenu du chapitre



- 5.1 Introduction
- 5.2 Systèmes de contreventement
- 5.3 Type de contreventement
 - 5.3.1 Contreventement horizontal
 - 5.3.2 Contreventement vertical
 - 5.3.3 Les éléments d'un contreventement vertical
 - 5.3.3.1 Ossatures par portiques
 - 5.3.3.2 Ossatures par refends linéaires
 - 5.3.3.3 Ossatures mixte refends-portiques
 - 5.3.3.4 Ossature avec noyau de contreventement
 - 5.3.3.5 Ossature avec noyau central et façades porteuses
- 5.4 Classification des systèmes de contreventement selon RPA 99/20003
 - 5.4.1 Structures en béton armé
 - 5.4.1.1 Ossature contreventée par portique
 - 5.4.1.2 Système de contreventement constitué par des voiles porteurs en béton armé
 - 5.4.1.3 Structure à ossature en béton armé contreventée entièrement par noyau en béton armé
 - 5.4.1.4 Système de contreventement mixte assuré par des voiles et des portiques avec justification d'interaction portiques - voiles
 - 5.4.1.5 Système de contreventement de structures en portiques par des voiles en béton armé

- 5.4.2 Structures en acier
 - 5.4.2.1 Ossature contreventée par portiques auto stables ductiles
 - 5.4.2.2 Ossature contreventée par portiques auto stables ordinaires
 - 5.4.2.3 Ossature contreventée par palées triangulées concentriques
 - 5.4.2.4 Ossature avec contreventements mixtes
- 5.5 Emplacement et torsion des voiles dans les structures
 - 5.5.1 Nombre d'éléments de contreventement vertical
 - 5.5.2 Disposition des éléments verticaux de contreventement
 - 5.5.3 Torsion des voiles dans les structures
- 5.6 Principes de conception parasismique des bâtiments
 - 5.6.1 Principe de régularité en plan et en élévation selon (RPA99/2003)
 - 5.6.2 Niveaux transparents
 - 5.6.3 Hauteur d'étage
 - 5.6.4 Partie du bâtiment : l'escalier
- 5.7 Méthodes de calcul des contreventements
 - 5.7.1 Contreventement par portiques
 - 5.7.2 Contreventement par voiles

5.1 Introduction

Pendant un séisme, une construction reçoit des charges horizontales qui, comme les charges verticales, doivent être transmises jusqu'au sol d'assise de la construction par les éléments résistants (**Structures auto stables et Structures contreventées**).

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.

5.2 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....

Il y a deux approches sont possibles :

- a) **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...)
- b) **Structures contreventées** : les descentes de charges horizontales passent par des dispositifs spécifiques (contreventements triangulés par exemple...).

5.3 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 :

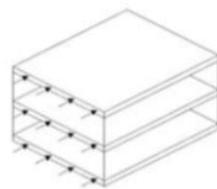
- ▶ Contreventement horizontal (**diaphragme**) ;
- ▶ Contreventement vertical (**portiques, murs, etc...**).

5.3.1 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 .

- ▶ 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.

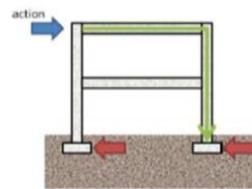
La répartition des efforts entre les éléments verticaux dépend directement de la nature du plancher. On peut définir deux types de planchers correspondant à deux comportements vis-à-vis des efforts horizontaux : les diaphragmes **souples** et les diaphragmes **rigides**.



Les forces sont collectées par la structure horizontale



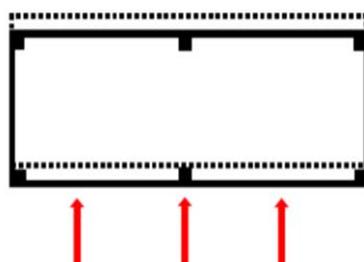
Diaphragme horizontal



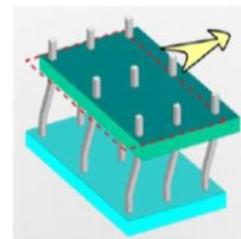
Distribuées au système vertical et transmises finalement aux fondations.

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

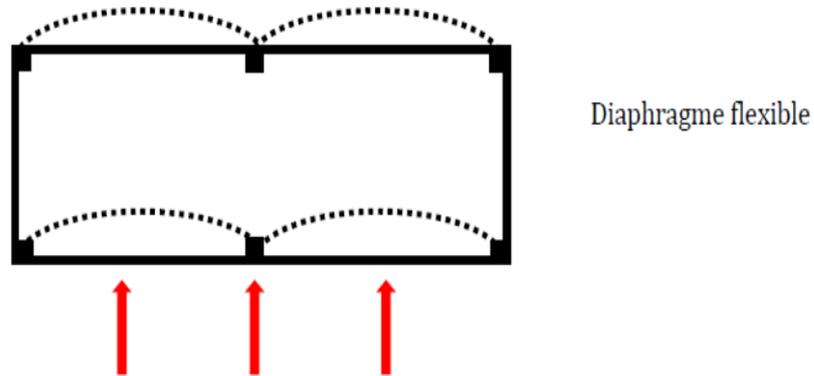
- Un diaphragme rigide impose le **même déplacement** en tête de chaque élément vertical, ce qui permet de solliciter **équitablement** toutes les palées de stabilité.
- En cas de rupture d'une palée, la répartition des charges se fait automatiquement sur les autres.



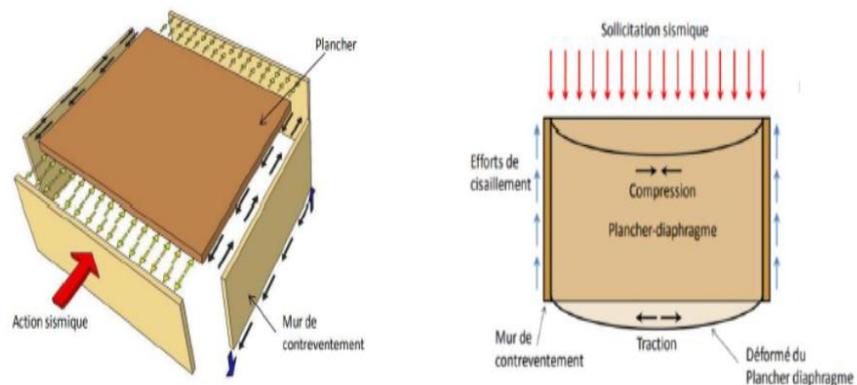
Diaphragme rigide



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



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

5.3.2 Contreventement vertical (portiques, murs, etc...) :

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



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.

5.3.3 Les éléments d'un contreventement vertical: peuvent être classées en cinq catégories : • les ossatures par portiques. • les ossatures par refends linéaires: Transversaux, longitudinaux, ou encore dans les deux directions. • les ossatures mixtes: refends plus portiques. • les ossatures à noyau central. • les ossatures à noyau central et façades porteuses.



5.3.3.1 Ossatures par portiques

Structure composée de poteaux et de poutres rigidement liés (figure 5.1).

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 ne convient pas pour des bâtiments élancés étant donné leur flexibilité.

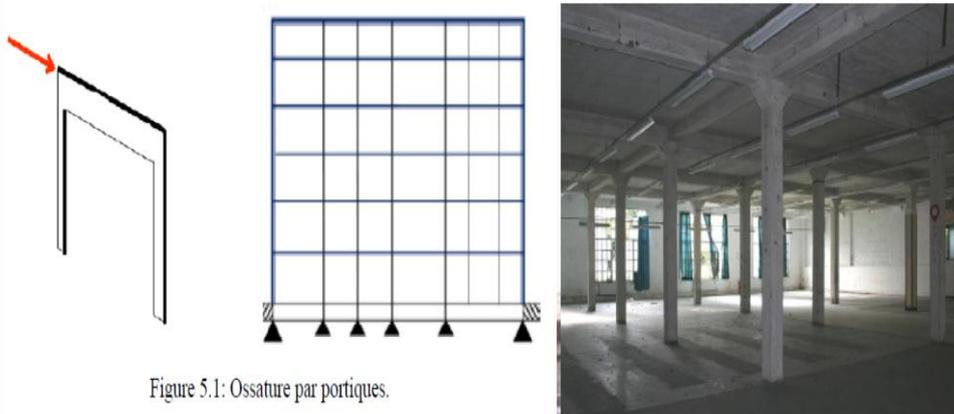


Figure 5.1: Ossature par portiques.

5.3.3.2 Ossatures par refends linéaires

Ce type d'ossature est constituée par une série de murs porteurs liés entre eux par des planchers généralement du type dalle. On rencontre trois types d'ossatures par refends (figure 5.2):

- Structures à refends longitudinaux, (a).
- Structures à refends transversaux, (b).
- Structures à refends longitudinaux et transversaux, (c).

Ce système porteur permet l'utilisation de la technique des coffrages glissants. La présence de refends transversaux rend possible l'utilisation de panneaux de façades légères préfabriquées. Du point de vue économique, ce type de structure demeure valable pour des immeubles ne dépassant pas 20 à 25 niveaux.

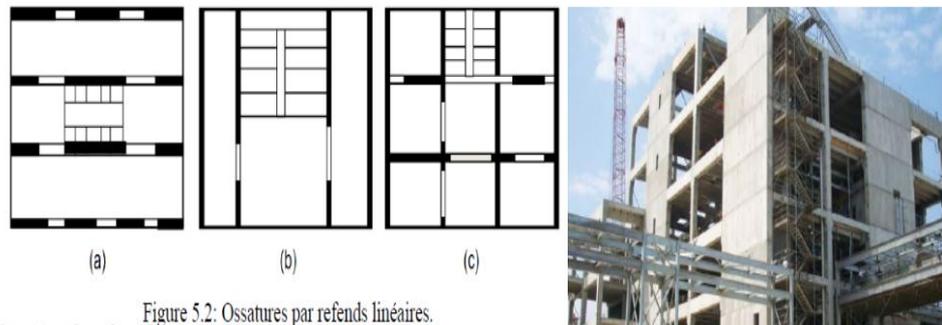


Figure 5.2: Ossatures par refends linéaires.



• 5.3.3.3 Ossatures mixte refends-portiques

Ce type d'ossature est utilisé lorsque les refends sont en nombre insuffisant pour assurer le contreventement (figure 5.3). Le calcul ainsi que l'exécution d'une telle structure est relativement complexe.

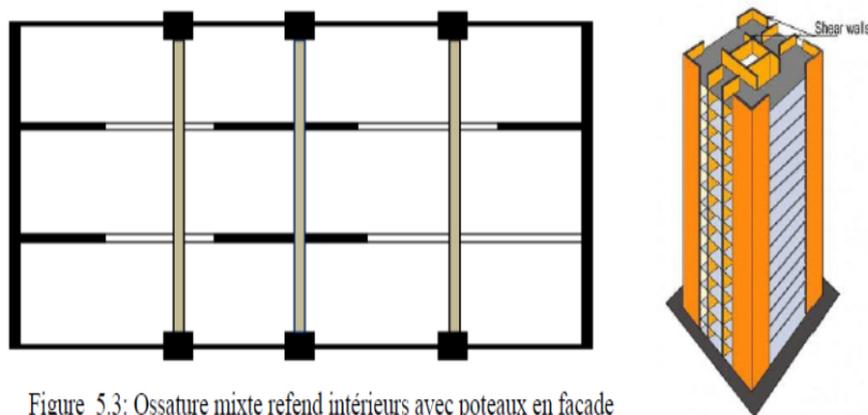


Figure 5.3: Ossature mixte refend intérieurs avec poteaux en façade



5.3.3.4 Ossature avec noyau de contreventement

Ce type de structure est constitué par un noyau, généralement centré, en béton armé et une série de poteaux périphériques. Le noyau central reprend une forte partie des charges verticales et assure la stabilité d'ensemble de la construction, les poteaux ne transmettent au sol que les charges verticales (figure 5.4).

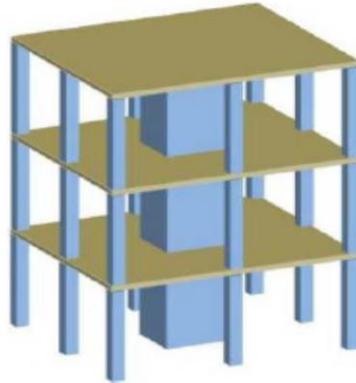


Figure 5.4: Ossature avec noyau central.



5.3.3.5 Ossature avec noyau central et façades porteuses

A la différence du cas précédent les façades participent aux efforts de contreventement.

Elles sont généralement préfabriquées en béton armé ou en acier (figure 5.5). La capacité portante d'une telle structure est ainsi largement augmentée et du point de vue économique, elle peut être utilisée jusqu'à 100 à 120 niveaux.

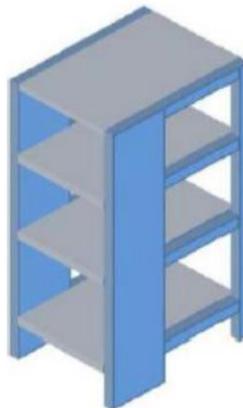


Figure 5.5: Ossature contreventée par façades porteuses.



5.4 Classification des systèmes de contreventement selon RPA 99/2003

L'objet de la classification des systèmes structuraux se traduit, dans les règles et méthodes de calcul, par l'attribution pour chacune des catégories de cette classification, d'une valeur numérique du coefficient de comportement **R** (voir tableau 4.3. RPA 99) 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 le coefficient de comportement 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 dans le domaine post-élastique. Les systèmes de contreventement retenus dans les présentes règles sont classés selon les catégories suivantes:

5.4.1 Structures en béton armé

5.4.1.1 Ossature contreventée par portique

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 auto stables 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 auto stables en béton armé avec remplissage en maçonnerie rigide

C'est une ossature constituée uniquement de portiques capables de reprendre la totalité des sollicitations dues aux charges verticales et horizontales. Pour cette catégorie, les éléments de remplissage de la structure sont constitués par des murs en maçonnerie de petits éléments insérés dans le cadre poteaux-poutres dont l'épaisseur (hors crépissage) ne dépasse pas 10 cm 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 .
- ✓ 02 niveaux ou 8 m en zone III.

5.4.1.2 Système de contreventement constitué par des 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.



5.4.1.3 Structure à ossature en béton armé contreventée entièrement par 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.

5.4.1.4 Système de contreventement mixte assuré par des voiles et des portiques avec justification d'interaction 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 proportionnellement à leurs rigidités relatives ainsi que les sollicitations résultant de leurs interactions à tous les niveaux.

Les portiques doivent reprendre, outre les sollicitations dues aux charges verticales, **au moins 25%** de l'effort tranchant d'étage.

5.4.1.5 Système de contreventement de structures en portiques par des voiles en béton armé (Système de contreventement mixte assuré par des voiles et des portiques sans justification d'interaction portiques - voiles)

Dans ce cas les voiles reprennent **au plus 20%** des sollicitations dues aux charges verticales et la totalité des sollicitations dues aux charges horizontales. On considère que les portiques ne reprennent que les charges verticales. Toutefois, en zone sismique III, il y a lieu de vérifier les portiques sous un effort horizontal représentant **25%** de l'effort horizontal global. Avec ce système de contreventement les bâtiments sont limités en hauteur à **10** niveaux ou **33 m** au maximum.

5.4.2 Structures en acier

5.4.2.1 Ossature contreventée par portiques auto stables ductiles

L'ossature complète (cadres inclus) reprend la totalité des charges verticales. Les portiques auto stables ductiles reprennent à eux seuls la totalité des charges horizontales.

5.4.2.2 Ossature contreventée par portiques auto stables ordinaires

L'ossature complète reprend la totalité des charges verticales.

5.4.2.3 Ossature contreventée par palées triangulées concentriques

L'ossature complète reprend la totalité des charges verticales et les palées reprennent la totalité des charges horizontales. Dans cette classe de contreventement, on distingue deux (02) sous classes, soit des palées en **X** et en **V** (les palées en **K** n'étant pas autorisées).

5.4.2.4 Ossature avec contreventements mixtes

Dans le cas de figure développé ici, les palées de contreventement doivent reprendre **au plus 20%** des sollicitations dues aux charges verticales.

➤ 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 couples avec, soit des palées triangulées en X, soit des palées triangulées en V, ou se rapprochant du V (système en double **béquille**). L'ossature complète reprend la totalité des charges verticales. Les contreventements mixtes (cadres + palées) reprennent la totalité des charges horizontales globales. Les cadres et les palées doivent être calculés pour résister à l'effort horizontal qui sera partagé au cotisation de leur raideurs et en tenant compte de leur interaction mutuelle à tous les niveaux.

➤ Les cadres auto stables ductiles doivent pouvoir reprendre à eux seuls, au moins **25%** des charges horizontales globales.

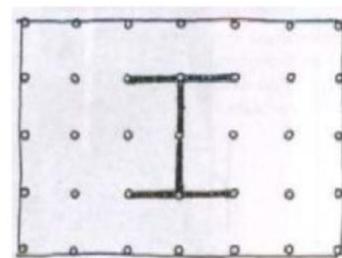
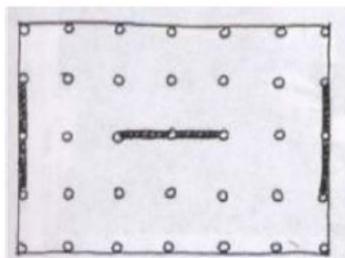
Autres structures

- Structures à ossature métallique avec contreventement par diaphragme.
- Structure à ossature métallique avec contreventement par noyau en béton armé.
- Structure à ossature métallique avec contreventement par voiles en béton armé.
- Structure à ossature métallique avec contreventement mixte composé d'un noyau en béton armé et de palées et/ou portiques métalliques en périphérie.
- Système comportant des transparences (étages souples).

5.5 Emplacement et torsion des voiles dans les structures

5.5.1 Nombre d'éléments de contreventement vertical

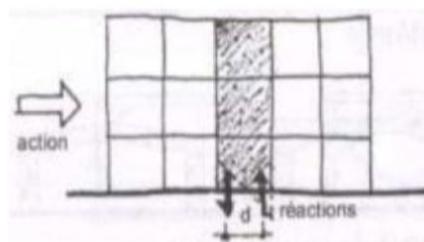
• Lorsque les planchers et les toitures peuvent être considérés comme parfaitement rigides dans leur plan, théoriquement, il suffit de trois éléments de contreventement par niveau, à condition qu'ils soient non concourants et non parallèles. Il est cependant nettement préférable d'en utiliser un nombre 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.

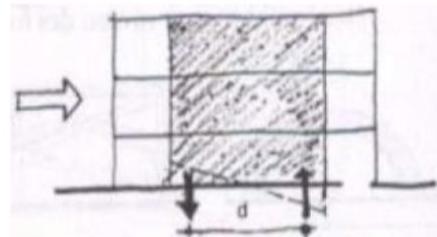
5.5.2 Disposition des éléments verticaux de contreventement

- 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

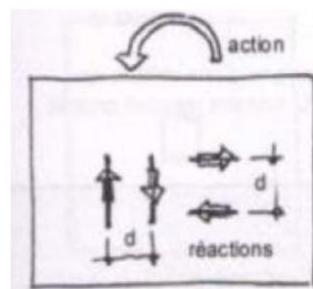
A préférer

Largeur des éléments verticaux de contreventement



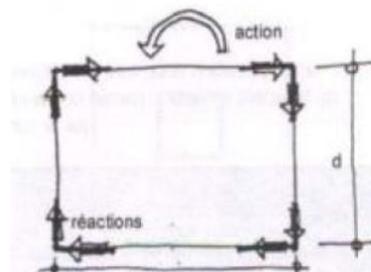
5.5.3 Torsion des voiles dans les structures

- 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

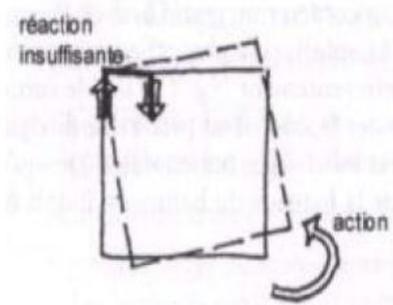


Grand bras de levier

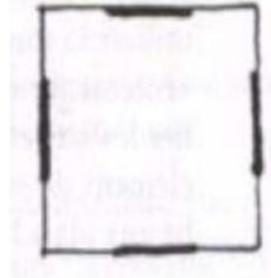
A préférer

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

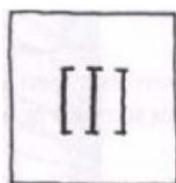


A préférer

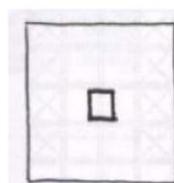
- Une position décentrée des éléments de contreventement est à l'origine d'une sollicitation du bâtiment en torsion (dessin gauche). En outre, le bras de levier du moment résistant produit par le contreventement est très faible.



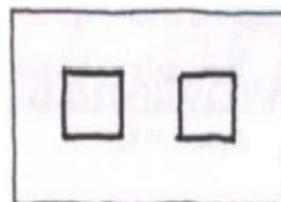
- Constitués éventuellement par un grand noyau central fermé (et non pas en forme de U, X et Z), afin de minimiser de même que les deux mesures précédentes, les sollicitations dues à la torsion (Figures suivantes). En effet, la résistance à la torsion d'axe vertical des noyaux ouverts est faible.



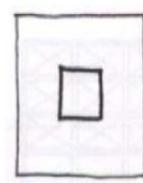
Noyau ouvert



Noyau de faibles dimensions



Noyaux fermés



Noyau fermé de dimensions adéquates

A éviter

A préférer



5.6 Principes de conception parasismique des bâtiments

Les bâtiments possédant une architecture régulière et symétrique (figure 5.6) se comportent mieux et sont plus résistants que les bâtiments aux formes géométriques complexes. En effet, les bâtiments aux formes complexes (L, T, etc.) (figure 5.6) sont moins résistants par rapport aux bâtiments symétriques car la jonction de deux parties formant une pièce complexe est soumise à des contraintes importantes. Chaque forme géométrique possède sa propre réaction,

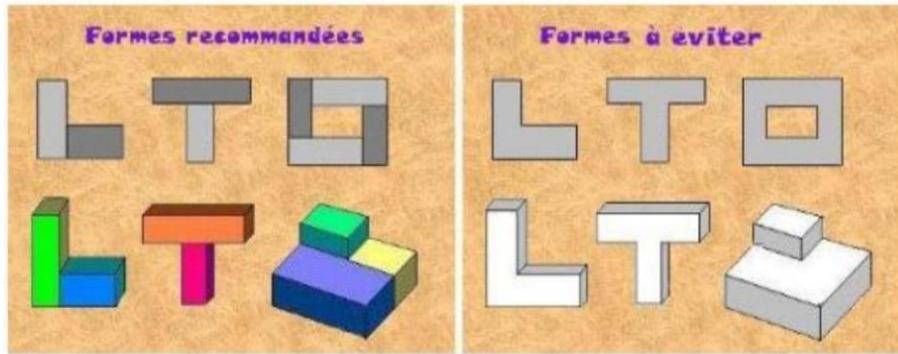


Figure 5.6 : Des formes complexes aux formes simples.

5.6.1 Principe de régularité en plan et en élévation selon (RPA99/2003) :

- Les conditions de régularité en plan et en élévation sont présentées dans les figures 5.7 et 5.8 respectivement (RPA99/V 2003 : Art ; 3.5).

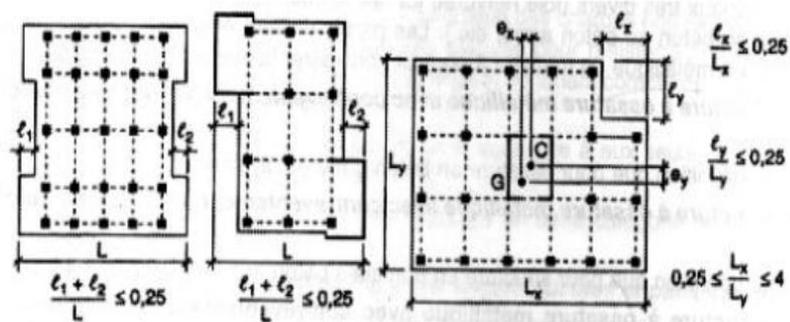


Figure 5.7 : Irrégularité en plan RPA99/V 2003

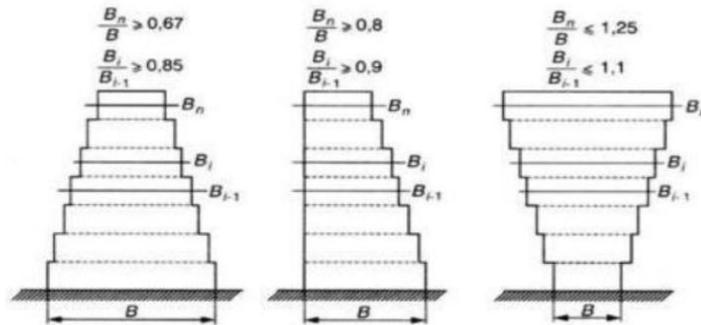


Figure 5.8 : Irrégularité en élévation RPA99/V 2003,

5.6.2 Niveaux transparents

Les déplacements imposés par les tremblements de terre sont concentrés dans le niveau transparent car il est plus flexible (figure 5.9). Les poteaux subissent de grandes déformations latérales qui s'avèrent souvent « fatales », lors des séismes d'une certaine importance. Leur rupture peut entraîner l'écrasement du niveau. Ce problème se présente fréquemment dans les immeubles qui comportent des commerces ou des parkings en rez-de-chaussée et qui nécessitent de larges ouvertures pour leurs besoins d'exploitation ou de fonctionnement.

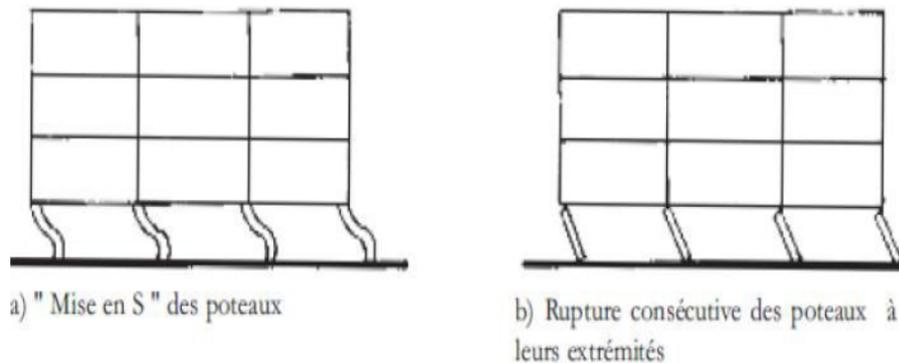


Figure 4.9 : Comportement des niveaux " souples " sous charges sismiques



5.6.3 Hauteur d'étage

Lorsque certains niveaux d'un bâtiment ont une hauteur d'étage plus grande que les niveaux courants (figure 4.10), ils sont exposés au même phénomène que les transparences car leur rigidité est plus faible, les déformations imposées par les tremblements de terre se produisent essentiellement dans ces niveaux, ce qui est source de dommages graves. Il est donc souhaitable de rigidifier les niveaux de hauteur plus importante pour que la construction ait une rigidité régulière sur toute sa hauteur. La rigidité pourra être obtenue par adjonction de murs ou de palées de stabilité dans les niveaux concernés.

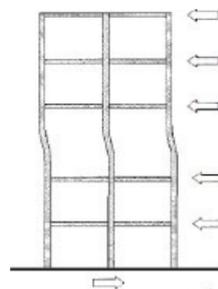


Figure 4.10 : Bâtiment comportant un niveau ayant une hauteur plus grande que les autres niveaux

5.6.4 Partie du bâtiment : l'escalier

La conception des escaliers demande une attention particulière. Lorsque les volées d'escalier ou les paliers intermédiaires sont portés par des poteaux, un effet de " poteau court " est à craindre car leur hauteur libre est réduite. Il est donc préférable d'utiliser des voiles de béton, dont le cisaillement n'entraîne généralement pas d'effondrement (figure 4.11)

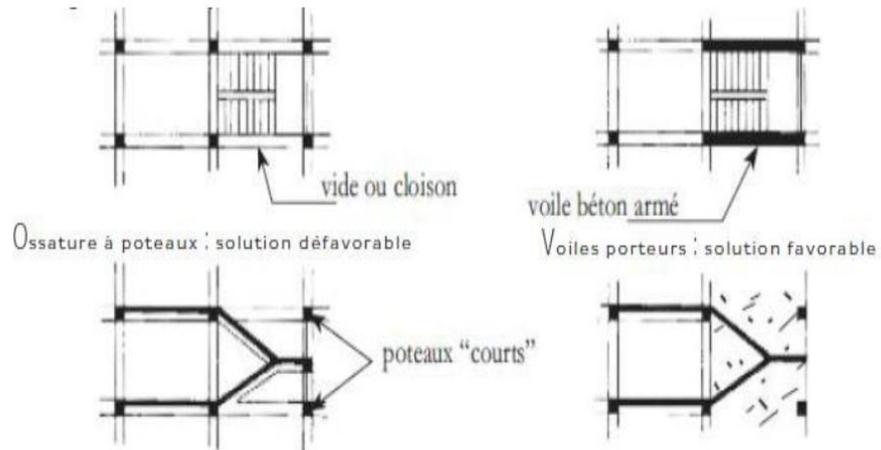


Figure 4.11 : Structure de l'escalier

5.7 Méthodes de calcul des contreventements

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

5.7.1 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 :

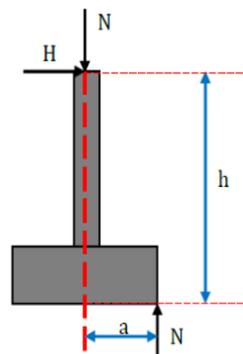
- De l'intensité de la répartition des forces sur la hauteur du bâtiment.
- Des caractéristiques géométriques et mécaniques du portique.

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.

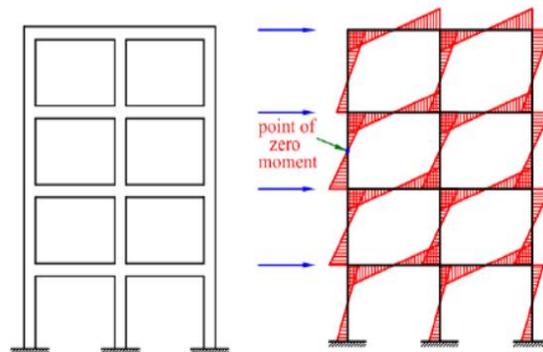
Poteau avec les forces horizontales



b. Structure en portique :

b.1. Le calcul des sollicitations de cette structure s'effectue principalement par deux approches tel que des méthodes exactes qui font appelent à :

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



b.2. Des méthodes approchées : qui sont développés pour les charges horizontales par plusieurs auteurs tel que :

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



5.7.2 Contreventement par voiles

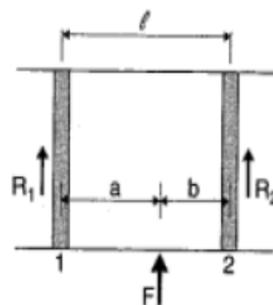
Il existe deux types de refends

- Système isostatique
- Système Hyperstatique

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

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 :

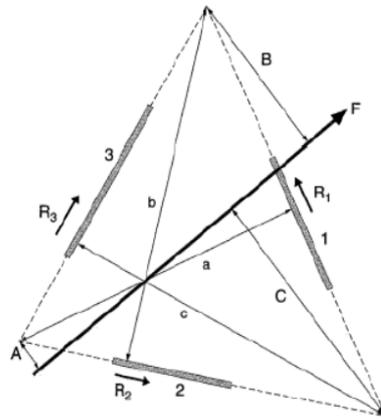


$$\left. \begin{aligned} R_1 &= F \frac{b}{l} \\ R_2 &= F \frac{a}{l} \end{aligned} \right\}$$

Contreventement isostatique, refends parallèles

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:

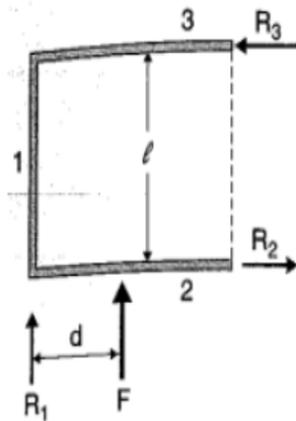


$$\left. \begin{aligned} R_1 &= F \frac{A}{a} \\ R_2 &= F \frac{B}{b} \\ R_3 &= F \frac{C}{c} \end{aligned} \right\}$$

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

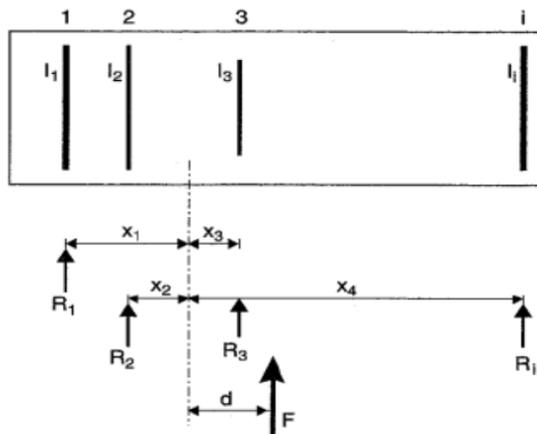
d. Cas de refends parallèles (système hyperstatique)

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 Ri 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 :

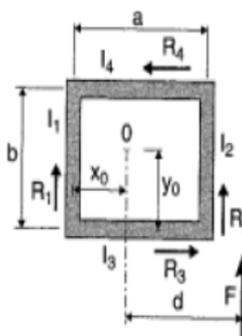
$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 = I \\ I_3 &= I_4 = I' \end{aligned}$$

- 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