

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Blida1

Institut d'Architecture et d'Urbanisme



**Polycopié pédagogique**

**Structure**

**Etudiants de Master 1 Architecture**

**Préparé par**

**Dr. MEDJITNA Lamia**

**Année universitaire 2020-2021**

## Avant-Propos

Le cours de structure destiné aux étudiants en Master Architecture est en complémentarité avec les connaissances acquises dans le cadre des matières de prérequis enseignées en Licence.

Le cours permet aux étudiants d'acquérir les notions de base nécessaires au processus de conception dans le but de produire un schéma structurel stable dans le respect de la réglementation. Il permet de prendre la mesure de la diversité des approches constructives, de se familiariser avec les différents types de structures et de réfléchir à une conception par la structure.

### Objectifs spécifiques

Acquisition des connaissances fondamentales sur les différents systèmes constructifs qui permettent à l'étudiant d'opérer des choix parmi l'éventail des solutions technologiques existantes pour la réalisation d'un projet déterminé.

### Public visé

Etudiants en master 1 Architecture

### Prérequis

Technologie des matériaux de construction 1 et 2, Construction 1 et 2, Structure 1 et 2.

### Contenu du cours de structure du semestre 1

1. Géotechnique et fondations spéciales
2. Stabilité des structures vis-à-vis des efforts séismiques et la torsion (Recommandations parasismiques)
3. Systèmes porteurs des bâtiments métalliques
4. Les structures des immeubles de grande hauteur (IGH)
5. Structures mixtes (Acier/Béton)

### Contenu du cours de structure du semestre 2

6. Les structures de grandes portées
7. Les structures des ouvrages d'Art
8. Structures et Architecture
9. Introduction aux architectures High Tech

Mode d'évaluation

Nature du contrôle	Pondération en %
Examen	60
Travaux dirigés	40
Totale	100

## Sommaire

1. Géotechnique et Fondations spéciales .....	6
1.1 La mécanique des sols .....	6
1.1.1 Les domaines d'application .....	6
1.1.2 Propriétés physiques et mécaniques des sols .....	7
1.1.3 Le rapport géotechnique.....	7
1.2 Problèmes courants dans un sol d'assise .....	9
1.2.1 Des argiles gonflantes, sensibles aux variations climatiques (sécheresse et fortes pluies).....	9
1.2.2 Cavités souterraines : prévenir les risques d'effondrement .....	9
1.2.3 Les failles .....	10
1.2.4 L'inondation par remontée de nappe phréatique .....	11
1.2.5 Le glissement de terrain .....	11
1.3 Amélioration de sol .....	12
1.3.1 Compactage dynamique et plots ballastés .....	13
1.3.2 Drains verticaux .....	13
1.3.3 Inclusions .....	13
1.4 Les fondations profondes.....	14
1.4.1 Les pieux.....	14
6.5. Fondations spéciales .....	15
1.5.1 Les puits .....	15
2. Stabilité des structures vis-à-vis des efforts sismiques et à la torsion .....	16
2.1 Cadre réglementaire RPA et EUROCODE .....	16
2.1.1 Classification des sites .....	16
2.1.2 Classification des zones .....	17
2.1.3 Principes et conditions de base de la conception .....	17
2.1.4 Classification des ouvrages selon leurs importance.....	18
2.2 Les systèmes de contreventement horizontaux et verticaux.....	18
2.2.1 Les contreventements.....	18
2.2.1.1 Les différents types de contreventements.....	20
2.3 Conception parasismiques des bâtiments, Aléas et solutions.....	24
2.3.1 Concepts généraux .....	24

2.3.2	Principes de conception parasismique des bâtiments .....	25
3.	Systèmes porteurs des bâtiments métalliques .....	35
3.1	Avantage et inconvénients des constructions métalliques.....	35
3.1.1	Avantages .....	35
3.1.2	Quelques inconvénients des constructions métalliques .....	36
3.2	Classification des produits sidérurgiques .....	36
3.3	La halle industrielle .....	39
3.3.1	Stabilité d'une halle industrielle .....	43
3.3.2	Contreventement d'une halle industrielle .....	43
3.4	Les systèmes porteurs usuels .....	49
3.4.1	Système porteur à noyau central .....	49
3.4.2	La structure en tube.....	54
3.4.3	Systèmes porteurs particuliers .....	58
4.	Les immeubles de grande hauteur.....	61
4.1	Définitions .....	61
4.2	Structure d'un immeuble de grande hauteur.....	62
4.2.1.	La technique du noyau central .....	62
4.2.2.	La technique des prismes en faisceaux .....	63
4.2.3.	Les ossatures extérieures.....	64
4.2.4.	L'exosquelette et les structures hyperboloïdes .....	66
4.2.5.	L'exemple de la plus grande tour du monde : le Burj Khalifa.....	67
4.3.	Les fondations des IGH (contraintes du sol) .....	69
4.3.1	Techniques pour sols rocheux peu profonds .....	69
4.3.2	Technique pour sols rocheux profonds .....	70
4.4.1	Les solutions employées .....	72
4.5	Résistance aux séismes des IGH.....	74
5	Les structures mixtes (aciers béton).....	77
5.1	Avantages et inconvénients des structures mixtes.....	79
5.1.1	Les avantage.....	79
5.1.2	Les inconvénients.....	79
5.2	Principe de fonctionnement.....	79
5.3	Eléments de la construction mixte.....	81

5.3.1	Planchers mixtes .....	81
5.3.2	Poteaux mixtes .....	84
5.3.3	Assemblages mixtes.....	85
6.	Les structures de grandes portées.....	88
6.1	Classification des structures de grandes portées.....	89
6.1.1	Classification des structures de grandes portées selon leurs systèmes structurels... 89	
6.1.2	Classification des structures de grandes portées selon le système de forces .....	90
6.2	Structures tridimensionnelles ou spatiales métalliques .....	91
6.3	Structures tendues.....	98
6.3.1	Les structures tendues à câbles .....	98
6.3.2	Les structures à membranes .....	99
6.4	Les voiles minces en béton armé.....	100
6.4.1	Les coques en voiles minces de béton .....	100
6.4.2	Les plaques plissées en béton armé.....	101
6.5	Le béton précontraint.....	101
6.5.1	Avantages du béton précontraint.....	102
6.5.2	Technologie de la précontrainte .....	102
6.6	Le bois lamellé collé.....	103
6.6.1	Avantages du lamellé-collé.....	103
6.6.2	Processus de fabrication du bois lamellé-collé .....	104
6.6.3	Systèmes structuraux en bois lamellé-collé .....	104
7.	Les ouvrages d'Art.....	106
7.1	Les ouvrages de soutènement .....	106
7.1.1	Mur en béton armé encastré sur semelle.....	107
7.1.2	Murs poids en béton.....	108
7.1.3	Stabilité des murs en béton armé .....	108
7.2	Les ponts.....	109
7.2.1	Terminologies des ponts .....	109
7.2.2	Classification des ponts.....	110
7.3	Les châteaux d'Eau.....	112
7.3.1	Structure d'un château d'eau en béton armé.....	112
7.3.2	Réservoirs enterré ou semi enterré .....	113

8. Structure et Architecture .....	114
8.1 Le rôle de la structure dans l'architecture .....	114
8.2 Critères de base de conception d'une structure .....	116
8.2.1 L'équilibre.....	117
8.2.2 La stabilité.....	117
8.2.3 La résistance.....	118
8.2.4 La rigidité .....	119
8.3 Genèse du schéma structurel .....	119
8.3.1 Relation entre structure et Architecture .....	120
8.3.2 Sélection du type générique de la structure .....	121
8.3.3 La sélection du matériau structurel .....	124
8.3.4 La détermination de la forme et de la disposition détaillées de la structure .....	126
9. Introduction aux architectures High Tech.....	127
9.1 Caractéristiques des structures High-tech.....	127
9.2 Exemples de structures High-Tech.....	128
9.2.1 Centre George Pompidou Paris.....	128
9.2.2 Le siège de la banque HSBC à Hong Kong.....	129
9.2.3 Le centre de distribution de Renault Swindon Royaume Uni.....	130
Questions de cours .....	131
Réponses aux questions de cours .....	132
Références bibliographiques .....	134

# 1. Géotechnique et Fondations spéciales

## Introduction

La Géotechnique est l'ensemble des activités liées aux applications de la Mécanique des Sols, de la mécanique des Roches et de la Géologie de l'ingénieur. La mécanique des Sols étudie plus particulièrement le comportement des sols sous leurs aspects résistance et déformabilité.

A partir d'essais en laboratoire et in situ de plus en plus perfectionnés, la Mécanique des sols fournit aux constructeurs les données nécessaires pour étudier les ouvrages de génie civil et de bâtiment et assurer leurs stabilité en fonction des sols sur lesquels ils doivent être fondés, ou avec lesquels ils seront construits (barrages en remblais) ceci tant durant la progression des travaux (grands terrassements) qu'après la mise en service des ouvrages.

### 1.1 La mécanique des sols

La mécanique des sols est l'application des lois mécaniques et hydrauliques au matériau sol. Comparé aux nombreux autres matériaux étudiés en mécanique, les bétons, les aciers, les plastiques, le bois..., le sol présente une originalité, c'est un milieu discontinu qu'il faudra étudié à la fois dans sa globalité et dans sa composition élémentaire.

#### 1.1.1 Les domaines d'application

La Mécanique des Sols joue un rôle essentiel dans l'acte de construire et pour tous les travaux de bâtiment et de génie civil en relation avec les sols ou les mettant en œuvre.

Les sols peuvent :

- Supporter les ouvrages : fondations superficielles, fondations profondes...
- Etre supportés murs de soutènement, rideaux de palplanches..
- Constituer l'ouvrage lui-même : remblais, digues, barrages..

On peut citer par exemple :

- Les fondations des bâtiments des ouvrages d'art, des ensembles industriels..
- Les ouvrages de soutènement (murs, rideaux de palplanches..),
- Les tunnels et travaux souterrains dans les sols,
- Les barrages et digues en terre,
- La stabilité des pentes naturelles est des talus et les travaux de stabilisation,
- Les ouvrages portuaires et maritimes (fondations de quais, comportement des brise-lames...)
- Les terrassements routes, autoroutes voies, ferrées,

- L'amélioration et le renforcement des sols,
- La protection de l'environnement.

### 1.1.2 Propriétés physiques et mécaniques des sols

**Caractéristiques physico-chimiques des sols** : L'étude des caractéristiques physiques et chimiques des sols a montré sa grande utilité pour la prédiction ou l'interprétation du comportement du sol. Parmi ces propriétés on peut citer le poids volumique, la teneur en eau, l'indice des vides, la granulométrie etc... la majorité sont déterminées par des essais au laboratoire ou sur site.

**Caractéristiques mécaniques** : L'analyse du comportement mécanique des sols repose sur les propriétés physiques et chimiques ainsi que sur des essais de laboratoire ou sur site. Cette discipline permet de déterminer la résistance du sol et sa capacité portante, et par conséquent le choix du mode de fondation et les dimensions des éléments enterrés.

Enfin, elle permet de prévoir de façon quantitative la déformation ou tassement du sol sous la charge de l'ouvrage. Les caractéristiques mécaniques des sols peuvent être classées en deux catégories : on parle des caractéristiques mécaniques de compressibilité des sols d'une part, et des caractéristiques mécaniques de cisaillement des sols d'autre part.

Les caractéristiques mécaniques de compressibilité vont servir dans le calcul des ouvrages à déterminer les déformations du sol, c'est-à-dire généralement les tassements, qu'ils se produisent à long terme ou à court terme.

Les caractéristiques mécaniques de cisaillement vont servir pour leur part à déterminer la résistance (au sens large du terme) du sol aux sollicitations qui lui sont appliquées.

### 1.1.3 Le rapport géotechnique

Lors d'un projet d'aménagement, tout constructeur doit (de manière à assurer la pérennité des futurs ouvrages) prendre en compte la nature des formations constituant le sous-sol du site où il est prévu de réaliser cet aménagement. Cette prise en compte permet d'adapter le projet au site envisagé, de définir le système de fondation de l'ouvrage avec le meilleur rapport sécurité/coût et de se garantir contre les effets de la réalisation des travaux sur les constructions voisines.

Pour des raisons de compétence, la responsabilité des problèmes liés aux formations composantes le sous-sol est transféré à un spécialiste, *le géotechnicien*, dont l'intervention se divise généralement en deux phases :

- Une phase d'investigations réalisée sur le site étudié et permettant d'obtenir des informations relatives aux formations constituant le sous-sol.
- Une phase d'ingénierie permettant d'analyser les résultats des investigations, de les synthétiser pour ne garder que les paramètres représentatifs et importants.

Le géotechnicien résume souvent sa mission (investigations + ingénierie) au sein d'un rapport d'étude géotechnique qui correspond à une mission bien définie (un « contrat » entre le client et le géotechnicien).

### **Exemple du contenu d'un rapport géotechnique**

## **INTRODUCTION : LE SITE – LE PROJET- PRINCIPE DE L'ÉTUDE**

### 1.1. LE SITE

### 1.2. LE PROJET

### 1.3. PRINCIPE DE L'ÉTUDE

## **2. GÉOLOGIE DU SITE**

### 2.1. CADRE GÉNÉRAL

### 2.2. ANALYSE DES SONDAGES

### 2.3. CONCLUSION SUR LA GÉOLOGIE

## **3. HYDROGÉOLOGIE DU SITE**

## **4. GÉOTECHNIQUE**

### 4.1. STABILITÉ NATURELLE DU SITE – FAISABILITÉ GÉOTECHNIQUE

### 4.2. ÉLÉMENTS D'AMÉNAGEMENT

#### 4.2.1. Considérations générales

#### 4.2.2. Sol de fondation

#### 4.2.3. Profondeur de fondation

#### 4.2.4. Mode de fondation

#### 4.2.5. Contrainte admissible

#### 4.2.6. Tassements

#### 4.2.7. Assise du rez-de-chaussée

#### 4.2.8. Poussées sur les murs enterrés

4.2.9. Terrassements

4.2.10. Drainage

4.2.11. Aspect sismique

## 5. REMARQUES

## 6. ANNEXES

### 1.2 Problèmes courants dans un sol d'assise

Les sous-sols peuvent présenter de multiples problèmes et impliquer des frais supplémentaires.

#### 1.2.1 Des argiles gonflantes, sensibles aux variations climatiques (sécheresse et fortes pluies).

Le retrait-gonflement des argiles est lié aux variations de teneur en eau des terrains argileux : ils gonflent avec l'humidité et se rétractent avec la sécheresse. Ces variations de volume se manifestent par des tassements différentiels provoquant des dommages dans les constructions si les fondations et la structure ne sont pas assez rigides.



Figure 1.1 Tassement

Les dispositions constructives actuelles fonctionnent très bien : on descend les fondations là où les argiles ne bougent plus car elles se trouvent à une profondeur où elles sont insensibles au climat.

#### 1.2.2 Cavités souterraines : prévenir les risques d'effondrement

Le sous-sol est traversé par un nombre considérable de cavités souterraines, naturelles ou liées aux activités humaines. Une fois oubliées, ces cavités représentent un risque d'effondrement potentiellement très destructeur, notamment en milieu urbain où se concentrent les enjeux. L'eau est un facteur déclencheur ou aggravant pour l'effondrement de cavités.

### 1.2.3 Les failles

Des failles peuvent résulter de tremblement de terre, ou modifier les mouvements de la roche en cas de séismes. Inversement, les séismes tectoniques sont le résultat de mouvements sur une faille préexistante, dont les contraintes de blocage se sont suffisamment accumulées pour excéder la résistance des roches.



Figure 1.2 Effondrement d'une cavité souterraine en zone urbaine au niveau d'une habitation.

Sur les lieux de tremblements de terre, les bâtiments écroulés ont été bâtis sur des failles géologiques importantes, alors que les autres bâtiments sont en place. Tremblement de terre: intensité, magnitude, énergie et moments sismiques.



Figure 1.3 Les failles

### 1.2.4 L'inondation par remontée de nappe phréatique

Les nappes phréatiques sont dites « *libres* » lorsqu'aucune couche imperméable ne les sépare du sol. Elles sont alimentées par la pluie, dont une partie s'infiltré dans le sol et rejoint la nappe. Si des éléments pluvieux exceptionnels surviennent et engendrent une recharge exceptionnelle, le niveau de la nappe peut atteindre la surface du sol. La zone non saturée est alors totalement envahie par l'eau lors de la montée du niveau de la nappe : c'est l'inondation par remontée de nappe

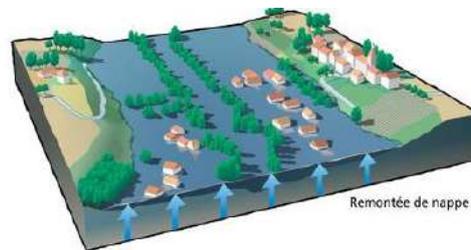


Figure 1.4 L'inondation par remontée de nappe (smbv-durdent.fr)

### 1.2.5 Le glissement de terrain

Le glissement de terrain est une autre manifestation due à la pesanteur : une loupe de terrain va glisser sur une surface de rupture préexistante en profondeur. Ce phénomène peut concerner d'importants volumes de matériaux, et parfois, dans certains grands glissements, on peut même trouver des habitations qui vont se déplacer au cœur du glissement quasiment sans subir de dégâts.

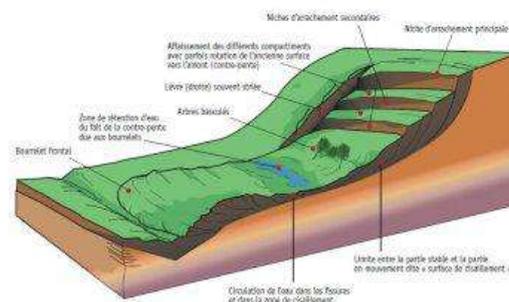


Figure 1.5 Schéma en coupe d'un glissement de terrain (reseau-canope.fr)

### Connaître les sols pour prévenir et informer

Ainsi, les facteurs prédisposant à l'instabilité des sols sont connus : nature des roches, présence d'eau qui dissout la roche ou peut la faire éclater, déclivité du versant, sismicité ou existence

de zones de fragilisation (failles, fractures, fissures...) induisent une aggravation des risques. Aussi, les causes liées à l'homme ne doivent pas être négligées. L'occupation des sols, leur imperméabilisation, le déboisement sont autant de circonstances aggravantes aisément repérables et requièrent l'attention pour mener une politique de prévention et d'information.

Deux méthodes de protection, « actives » ou « passives » sont envisageables selon le phénomène considéré.

Méthodes « actives » et « passives »

Les méthodes « actives » consistent à éviter le déclenchement du phénomène.

Les méthodes « passives » s'attachent à contrôler les conséquences du mouvement.

### 1.3 Amélioration de sol

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20ème siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et, sont jugées efficaces. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation. Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.

Les techniques d'amélioration des sols consistent à modifier les caractéristiques d'un sol par une action physique (vibrations par exemple) ou par l'inclusion dans le sol ou le mélange au sol d'un matériau plus résistant, dans le but de :

- augmenter la capacité portante et/ou la résistance au cisaillement,
- diminuer les tassements, tant absolus que différentiels, et le cas échéant les accélérer,
- diminuer ou éliminer le risque de liquéfaction en cas de tremblement de terre ou de vibrations importantes.

Les champs d'application des différentes techniques dépendent essentiellement de la nature et de la granulométrie des terrains que l'on désire améliorer.

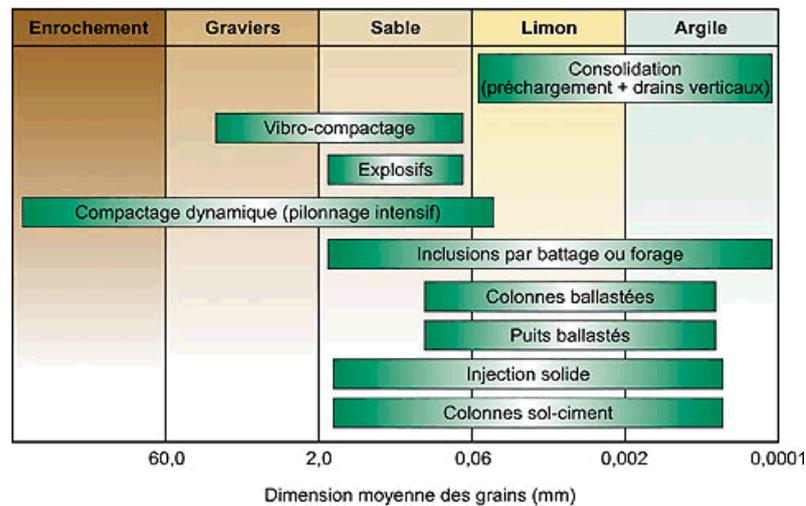


Figure 1.6 Amélioration des sols selon leurs natures (Document Solétanche Bachy)

### 1.3.1 Compactage dynamique et plots ballastés

Cette méthode permet de traiter le sol en profondeur, par des actions de surface. La consolidation dynamique provoque un compactage des sols granulaires. Le principe consiste à laisser tomber, en chute libre et de façon répétée une masse de plusieurs dizaines de tonnes depuis une hauteur de quelques dizaines de mètres. Dans les terrains cohérents, on procède à une incorporation de ballast sous la masse, réalisant ainsi des plots ballastés.

### 1.3.2 Drains verticaux

Les drains verticaux sont utilisés pour l'amélioration des sols fins saturés en eau. La technique consiste à foncer verticalement dans le terrain, suivant un maillage régulier, un drain préfabriqué. Lors de la mise en charge du terrain, les drains facilitent l'évacuation de l'eau interstitielle jusqu'à la surface, permettant ainsi une consolidation accélérée des sols traités. La surcharge est apportée soit par un remblai de pré-chargement, soit par d'autres méthodes.

### 1.3.3 Inclusions

Utilisable pour fonder tous types d'ouvrage sur sols compressibles de toute nature, ce procédé permet de réduire fortement les tassements.

Les inclusions sont généralement verticales et disposées suivant un maillage régulier. Elles doivent présenter des caractéristiques intrinsèques de déformation et de raideur, compatibles avec les terrains encaissants et les structures à porter.

Différents modes de mise en œuvre (forage avec ou sans refoulement, battage, vibration) et différents types de matériaux (ballast, gravier, mélange sol-ciment et tous types de mortier ou béton) sont utilisables pour permettre de réaliser à moindre coût un système de fondations superficielles en lieu et place d'un système de fondations profondes.

## 1.4 Les fondations profondes

### 1.4.1 Les pieux

Un pieu est un élément structural mince et profilé mis en place par fonçage ou battage et utilisé pour transmettre des charges en profondeur lorsque l'utilisation de fondations superficielles n'est pas économique ou impossible c.-à-d. sur des terrains souples ou des sols trop meubles pour en supporter le poids.

Couramment les éléments utilisés peuvent varier d'un diamètre de 300 mm à 900 mm, il existe aussi ce qu'on appelle les caissons forés ou pieux forés qui sont des éléments structuraux mis en place par forage. Le diamètre d'un caisson foré peut varier de 300 mm à 3500 mm



a)



b)

Figure 1.7 a) pieux, b) caissons

### Les types de pieux

Il existe essentiellement deux types de pieux :

- a) **Les pieux battus** sont des pieux qui ont été façonnés à l'avance (hors site ou sur site). Jadis en bois, ils sont de nos jours plutôt en béton armé et/ou précontraints, voire en acier ou mixtes (acier et béton).

Leur appellation de pieux « battus » tient à leur mise en place dans le sol qui se fait par battage (charge appelée « mouton » qui est abattue sur la tête du pieu comme un marteau sur un clou).



a)

b)

Figure 1.8 a) Pieux battus en béton préfabriqués

b) Pieu métallique

**b) Les pieux forés** sont réalisés sur site après forage dans le sol. On distingue :

- Les pieux forés simples qui ne se placent que dans les sols situés au-dessus des nappes phréatiques (profondeur généralement inférieure à 20 m) pour lesquels aucune protection des parois du forage n'est confectionnée ;
- Les pieux forés tubés pour lesquels le forage est fait au centre d'un tube déjà enfoncé dans le sol.

## 6.5. Fondations spéciales

### 1.5.1 Les puits

Le puits est un massif de béton reposant sur le sol, à la profondeur voulue, et recevant la semelle sous poteau ou sous mur.

On envisage des fondations sur puits lorsque le sol d'assise de fondation est relativement profond (plus de deux mètres généralement), et pour éviter un blindage de tranchées quand le sol risque de s'écrouler.



Figure 1.9 Pieux forés

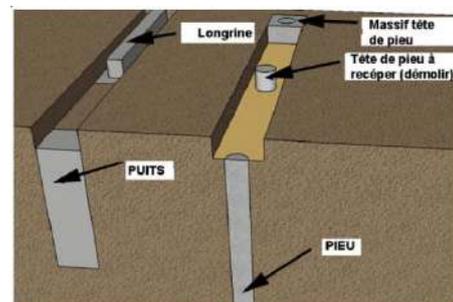


Figure 1.10 Schémas de fondations sur puits

## 2. Stabilité des structures vis-à-vis des efforts sismiques et à la torsion

### Introduction

La réalisation d'un bâtiment parasismique n'est pas uniquement une affaire d'études d'ingénieries et de calcul, la conception architecturale est d'une importance primordiale dans la réponse des structures aux efforts sismique. Le but de ce chapitre est de permettre à l'étudiant d'acquérir les connaissances de base lui permettant de faire les choix correctes en termes de conception parasismique.

Ce chapitre est divisé en deux parties, la première donne un aperçu général sur la réglementation en vigueur relative à la conception parasismique des structures en béton armé, suivit des différents systèmes de contreventement permettant d'assurer la stabilité global d'un bâtiment. La deuxième partie est consacrée aux principes de base permettant d'élaborer une conception parasismiques correcte.

### 2.1 Cadre réglementaire RPA et EUROCODE

Dans la conception parasismique des structures en béton armé, les règles utilisées sont basés sur les connaissances plus récentes dans le domaine de la recherche scientifique. Ces règles constituent un ensemble de normes de conception très avancé. Parmi les objectifs visés de ces normes sont d'assurer la protection des vies humaines et de limiter les dommages que peut avoir la structure durant une secousse sismique.

En Algérie, le premier code parasismique est apparu après le séisme d'El Asnam 1980. Ce code a connu plusieurs versions. La version actuelle utilisé est nommé le règlement parasismique algérienne RPA 99/v2003, et qui a été approuvé par la commission technique permanente lors de sa réunion du 4 Décembre 1999.

En Europe, l'Euro code 8 (EC8) est le code officiel de conception et de calcul des structures pour leur résistance aux séismes. Ce code comporte des parties qui donnent les normes qui permettent le dimensionnement parasismique des Bâtiments, Ponts, la réhabilitation des Bâtiments endommagées etc...

Dans ce qui suit sont présentées certaines normes parasismiques relatives aux sites et à la conception selon l'EUROCODE et le RPA 2003

#### 2.1.1 Classification des sites

RPA99/v2003 classent les sols en quatre catégories, rocheux, ferme, meuble et très meuble.

l'Eurocode 8 donne beaucoup plus de détail dans la classification du sol et les classe en Sept (07) catégories.

Tableau 2.1. Comparaison de la classification des sites selon l'EC8 et RPA99/v2003

Eurocode		RPA99/v2003	
Categorie	Site	Categorie	Site
A	Site rocheux	S1	Site rocheux
B	Site ferme	S2	Site ferme
C	Site profond de sable moyennement dense et gravier ou d'argile moyennement raide.		
D	Site de sol sans cohésion de densité faible à moyenne	S3	Site meuble
E	Site de sol avec une couche superficielle d'alluvion repose sur un matériau plus raide		
S1	Site composé ou contenant une couche argileuse de plus de 10 m d'épaisseur		Site très meuble
S2	Site de sol liquéfiable d'argiles sensibles ou autre sol non compris précédemment.		

### 2.1.2 Classification des zones

Les zones sismiques Selon l'euro code 8 et RPA99/v2003 sont classés en quatre zones comme le montre le tableau qui suit. Ces zones sont divisées selon l'aléa sismique local de chaque territoire national. Cet aléa peut être supposé constant. Il est pris en compte par un seul paramètre qui est l'accélération maximale de référence au niveau d'un sol de classe A.

Tableau 2.2 Classification des zones sismiques Eurocode 8 et RPA99/V2003

Eurocode 8		RPA 99/V2003	
Zone 1	Sismicite tres faible	Zone 0	Sismicité négligeable
Zone 2	Sismicite faible	Zone I	Sismicité faible
Zone 3	Sismicite moderee	Zone IIa,IIb	Sismicité moyenne
Zone 4	Sismicite moyenne	Zone III	Sismicité élevée
Zone 5	Sismicite forte		

### 2.1.3 Principes et conditions de base de la conception

Les deux codes (EC8) et (RPA99/v2003) adopte les mêmes principes de conception des bâtiments dans les zones sismiques. Ces principes sont les suivants :

- la simplicité de la structure ;
- l'uniformité, la symétrie et l'hyperstaticité ;
- la résistance et la rigidité dans les deux directions ;
- la résistance et la rigidité vis-à-vis de la torsion ;
- l'action des diaphragmes au niveau des planchers ;
- des fondations appropriées.

#### **2.1.4 Classification des ouvrages selon leurs importance**

Le niveau minimal de protection sismique accordé à un ouvrage dépend de sa destination et de son importance vis à vis des objectifs de protection fixés par la collectivité.

##### **Groupe 1A : Ouvrages d'importance vitale**

- Casernes de pompiers, de police ou militaires, parcs d'engins et de véhicules d'intervention d'urgence et de secours.
- Hôpitaux et centres dotés de services des urgences, de chirurgie et d'obstétrique.
- Etablissements publics de communications etc...

##### **Groupe 1B : Ouvrages de grande importance**

- Ouvrages abritant fréquemment de grands rassemblements de personnes grande mosquée, bâtiments industriels et commerciaux, scolaires, universitaires.

##### **Groupe 2 : Ouvrages courants ou d'importance moyenne**

- Bâtiments d'habitation collective ou à usage de bureaux dont la hauteur ne dépasse pas 48 m, bâtiments pouvant accueillir au plus 300 personnes simultanément tels que, bâtiments à usage de bureaux, bâtiments industriels,...

##### **Groupe 3 : Ouvrages de faible importance**

- Bâtiments industriels ou agricoles abritant des biens de faibles valeurs.
- Bâtiments à risque limité pour les personnes
- Constructions provisoires

## **2.2 Les systèmes de contreventement horizontaux et verticaux**

### **2.2.1 Les contreventements**

En génie civil, un **contreventement** est un système statique destiné à assurer la stabilité globale d'un ouvrage vis-à-vis des effets horizontaux issus des éventuelles actions sur celui-ci (par exemple : vent, séisme, choc, freinage, etc.). Il sert également à stabiliser localement certaines

parties de l'ouvrage (poutres, poteaux) relativement aux phénomènes d'instabilité (flambage ou déversement).

Afin d'assurer la stabilité globale d'un bâtiment, il est nécessaire que celui-ci soit contreventé selon au moins 3 plans verticaux non colinéaires et un plan horizontal ; on distingue donc les contreventements verticaux (destinés à transmettre les efforts horizontaux dans les fondations) des contreventements horizontaux (destinés à s'opposer aux effets de torsion dus à ces efforts). Un contreventement peut être réalisé par des voiles (contreventements verticaux) ou des plaques (contreventements horizontaux) en béton armé, en maçonnerie, en bois ou en tôle ondulée ; ou par des treillis en bois ou en acier.

- Le rôle du contreventement horizontal est de transmettre les actions latérales aux éléments verticaux appelés palées de stabilité.

Pour assurer le contreventement horizontal, les planchers et toitures faisant office de diaphragme rigide ne devraient pas être affaiblis par des percements trop grands ou mal placés pouvant nuire à leur résistance et leur rigidité. Les diaphragmes flexibles devraient être évités pour combattre le déversement des murs notamment en maçonnerie.

- Le contreventement vertical par palées devrait répondre à des critères spécifiques 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 solutions susceptibles d'être choisies pour assurer le contreventement général des bâtiments sont évidemment liées aux contraintes qui peuvent être imposées par le parti architectural ; elles sont également dépendantes, dans une certaine mesure, du matériel dont dispose l'entreprise.

Le premier souci que doit avoir l'ingénieur d'études est de prévoir des dispositions assurant la *stabilité générale* et spécialement le *contreventement d'ensemble* des bâtiments. Ces dispositions doivent avoir pour objet non seulement d'assurer la résistance aux forces

horizontales prises en compte dans les calculs, mais aussi de permettre éventuellement aux bâtiments de subir sans dommages excessifs les effets des sollicitations exceptionnelles.

### 2.2.1.1 Les différents types de contreventements

#### a) Contreventement assuré par portiques

Dans une construction classique où les charges verticales sont reprises par un système de poteaux, il est logique de dire que les charges horizontales sont elles aussi reprises par ces éléments.

Cependant, bien qu'un système soit stable pour reprendre les charges verticales il ne pourra pas l'être vis-à-vis des charges horizontales.

À titre d'exemple considérons la construction constituée par deux poteaux simplement posés sur le sol de fondation, le plancher reposant sur ces poteaux par simple appui.

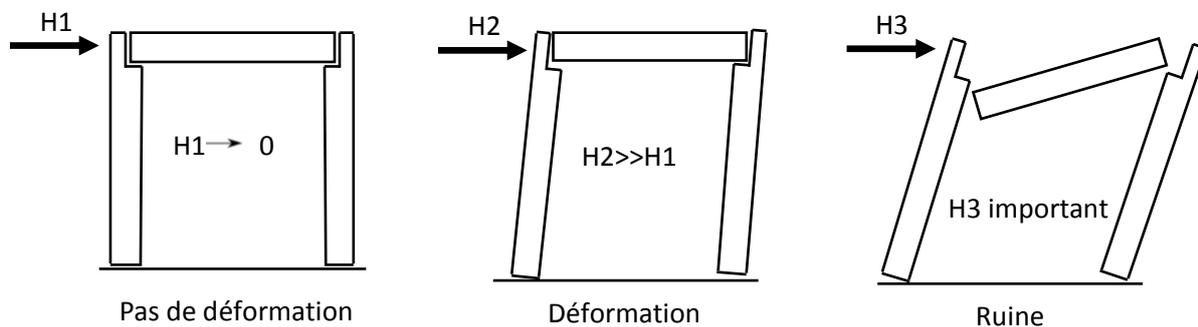


Figure 2.1 Comportement d'une construction sous sollicitation horizontale

Lorsque l'effort horizontal devient important (cas du vent ou du séisme) la déformation de la structure devient importante et la ruine devient inéluctable.

Bien que les éléments constituant la construction soient rigides, la stabilité sous actions horizontales est remise en question.

Il est alors clair que pour assurer un comportement satisfaisant de la construction sous sollicitations horizontales il faut porter une attention particulière à la manière avec laquelle devront être 'joint' ou liaisonnés les différents éléments de la structure. Deux approches s'offrent à nous pour éviter la ruine.

1. Assurer une liaison rigide à la base des poteaux ainsi qu'au niveau de la liaison poteau-poutre. On parle alors de **contreventement en cadre ou auto-stable**.

2. Disposer des éléments en diagonales en liaisonnant la base d'un poteau au nœud poutre poteau lui faisant face. (Palée de stabilités – construction métallique).

La première approche implique la rigidité des nœuds. Cette solution conduit en général à des sections de béton et d'armatures plus importantes, et à des dispositions de ferrailage plus complexes que celles usuellement adoptées dans les structures les plus courantes de bâtiments. À moins que l'on ne puisse prévoir, dans chaque plan de contreventement, des portiques comportant un nombre relativement important de travées, cette solution de contreventement est onéreuse, et on ne la retient guère que lorsqu'il n'est pas possible d'en choisir une autre.

Il faut cependant lui reconnaître l'avantage de ne pas créer d'obstacles à la présence d'ouvertures de grandes dimensions dans le plan des portiques.



Figure 2.2 Système cadres auto-stables

### b) Contreventement assuré par pans rigides

La rigidité des pans de contreventement peut être assurée :

- soit par des triangulations en béton armé (fig 2.3 a);
- soit par des voiles en béton armé ;
- soit éventuellement par des remplissages en maçonnerie de résistance suffisante entre éléments (poteaux et poutres) de l'ossature en béton armé (fig 2.3 b)

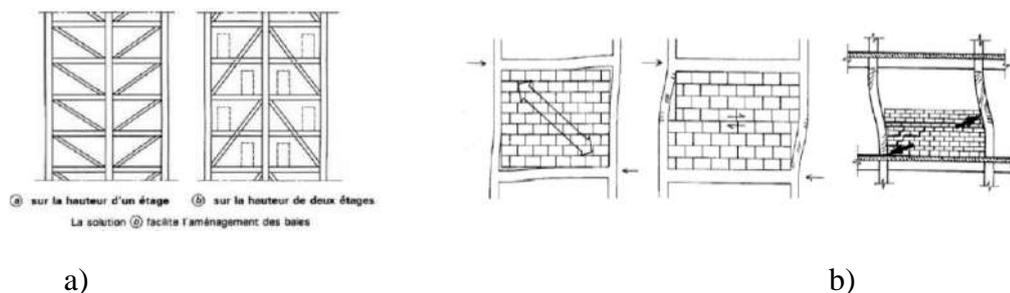


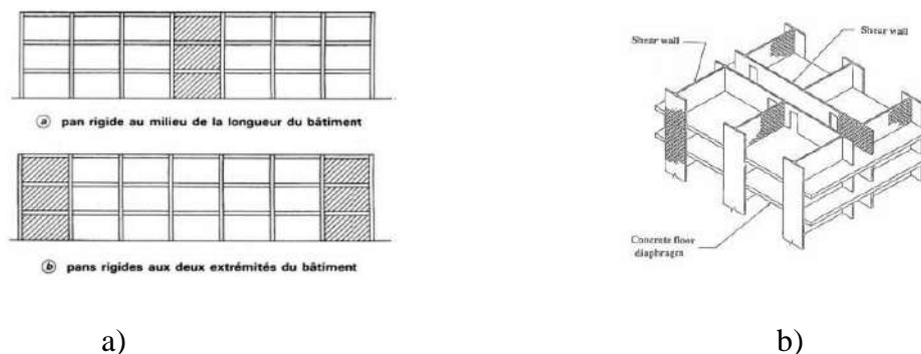
Figure 2.3 Contreventement par pans rigide

### c. Contreventement assuré par voiles en béton

Souvent, dans les zones sismiques, les cadres auto-stables ne suffisent plus à eux seuls à assurer un bon comportement de la construction sous sollicitations sismiques (déplacements latéraux importants, impossibilité de reprendre certains effets du séisme par seulement des colonnes isolées). Il devient alors important de disposer dans l'espace des éléments de grande rigidité face aux sollicitations.

Il existe plusieurs types de voiles de contreventement en béton armé :

1. Les voiles pleins sans ouvertures –Très rigides donc très prisés par les Ingénieurs évoluant dans des zones sismiques. Mais très contraignant pour l'architecte dans l'arrangement de l'espace. Et des façades, un compromis avec l'Ingénieur structure est presque toujours possible.
2. Les voiles à files d'ouverture –moins rigides que les précédents mais suffisamment bons dans les zones sismiques. Ils sont appréciés par les architectes car offrant plus de souplesse (emplacement des ouvertures et passages) dans l'aménagement de l'espace architectural.



Figures 2.4 Contreventement par voiles en béton

a) voiles sans ouvertures b) voiles avec ouvertures

### c) Contreventement assuré par noyau central

Les noyaux de contreventement sont en réalité une variante particulière des voiles de contreventement, en ce sens qu'un noyau est constitué par un assemblage de voiles. Ce type de contreventement est très prisé en zone sismique surtout pour les bâtiments tours à usage de bureaux ou une conception architecturale en open-space. Les bureaux ne sont plus séparés par des cloisons.

Dans ce genre de conception on retrouve le(s) noyau(x) de contreventement au centre de la tour, on y loge en général les cages d'escaliers, les ascenseurs les sanitaires etc. Tandis que tout l'espace autour est attribué aux bureaux 'en open space' Il est évident que les planchers ne peuvent trouver appui que sur le noyau, c'est pour cela qu'une structure en poteaux-poutres est prévue pour garantir la descente des charges verticales, les charges horizontales (Vent et séisme) pourront très largement être reprises par le(s) noyau(x).

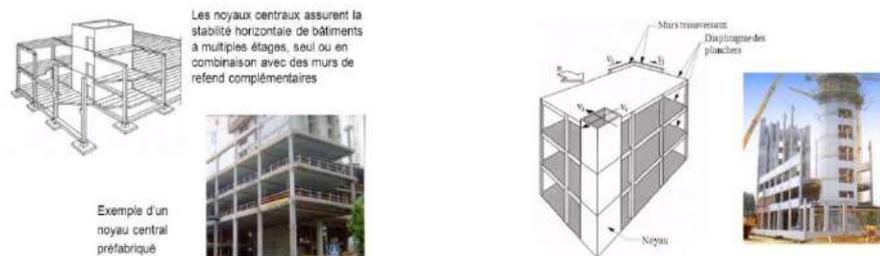


Figure 2.5 contreventement par noyau central

#### d) Contreventements Mixtes voiles-cadres ou voiles Portiques

Quand il n'y a pas d'exigences architecturales strictes et bien précises, et dans le cas où la réglementation parasismique ne permet pas d'opter pour un système de cadres rigides, ou bien que le système cadres ne peut plus assurer à lui seul un comportement satisfaisant au séisme: on peut adjoindre aux cadres un ou plusieurs voiles c'est le système Mixte voiles cadres .

Ce système très économique est très simple à réaliser. Même on pourra loger les voiles (pleins ou à ouvertures) aux endroits des cloisons de distribution afin de ne pas perturber la conception architecturale. Mais ce n'est pas toujours le cas; d'ailleurs ce point précisément est source de conflit entre Architecte et Ingénieur.

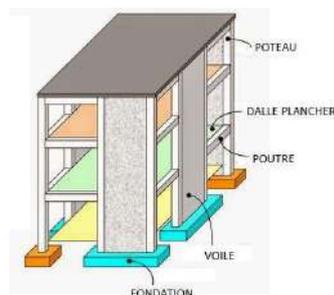


Figure 2.6 Contreventement mixte

### 2.3 Conception parasismiques des bâtiments, Aléas et solutions

Les codes de dimension présentent les règles de l'art afin de rendre les constructions saines et sûres. Les respecter c'est s'assurer que tout a été mis en œuvre afin d'atteindre cet objectif. De mauvais matériaux, des erreurs de conception, des réalisations hasardeuses rendent tous les efforts inutiles, et cela quel que soit le matériau utilisé. Les constructions en béton armé ne seront pas plus sûres si elles ne respectent pas les principes élémentaires qui doivent assurer une limitation des efforts dans les éléments porteurs, et par conséquent les dommages sismiques. Les ingénieurs et les architectes ont la connaissance et la responsabilité du dimensionnement, et ils sont en ce sens incontournables dans tous les cas.

Les observations post-sismiques montrent systématiquement les mêmes dommages ou presque : des étages écrasés, des bâtiments basculés, des bâtiments accolés plus endommagés ou encore des remplissages détruits. Respecter la conception replace aussi le bâtiment dans son environnement et apporte des éléments de réponse pour le rendre parasismique.

La conception et le choix des détails constructifs de la structure porteuse (murs, poteaux, dalles) et des éléments non-porteurs (cloisons intérieures, éléments de façade) jouent un rôle déterminant dans la tenue des bâtiments (comportement avant la rupture) et leur vulnérabilité face aux séismes (Sensibilité à l'endommagement).

#### 2.3.1 Concepts généraux

Tous les bâtiments constituent des «boîtes », dont le fonctionnement général est schématisé à la Figure 1 et dont la stabilité implique le respect des 3 conditions suivantes :

##### **Une résistance adéquate des plans constituant la boîte :**

- contreventements verticaux : murs, triangulations, portiques
- contreventements ou diaphragmes horizontaux ou subhorizontaux : planchers, toitures, poutres «au vent », etc...

**Un choix convenable de ces plans**, tel que la géométrie globale de la boîte reste inchangée lors des mouvements sismiques : limitation des mouvements hors plan, gauchissement,... ; ceci nécessite :

- un nombre convenable de plans de contreventement verticaux et horizontaux
- une bonne disposition relative de ces plans.

##### **Des liaisons adéquates entre ces plans.**

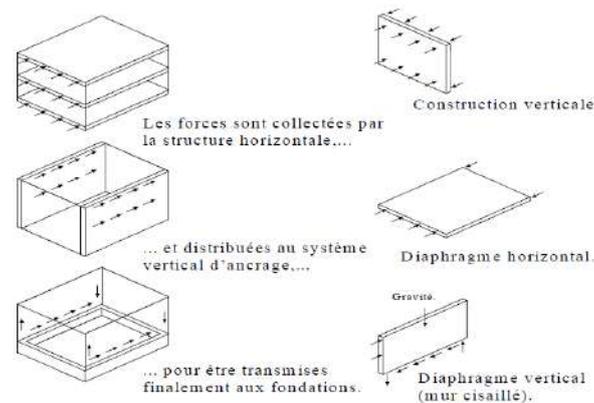


Figure 2.7 Schéma général de fonctionnement en « boîte » pour la reprise des actions horizontales de séisme ou de vent (d'après ZACEK, 1996).

### 2.3.2 Principes de conception parasismique des bâtiments

#### Principe 1 - Simplicité

Le comportement d'une structure simple est plus facile à comprendre et à calculer ; le risque d'omettre un phénomène particulier, comme une interaction entre parties de raideur différentes ou un cumul d'effets différents entre ces parties est faible. La simplicité d'ensemble concourt à la simplicité des détails.

#### Principe 2 - Continuité

Toute discontinuité dans le dessin d'une structure conduit à une concentration de contraintes et de déformations. Une structure discontinue est toujours mauvaise, car le mécanisme de ruine qu'elle fait intervenir est local. Le principe de continuité a un impact sur le dessin d'ensemble des structures, qui est explicité dans les principes 3 et 4.

Le principe de continuité se traduit aussi dans les détails de structure et dans la surveillance de chantier.

#### *Dans les détails de la structure, il faut*

- éviter les affaiblissements de section (âmes évidées)
- réaliser des poutres et poteaux d'axes concourants ;
- éviter les changements brutaux de directions des éléments porteurs
- éviter les changements brutaux de largeurs des éléments porteurs ; d'où il découle que les largeurs des poutres et poteaux concourantes doivent être peu différentes.
- soigner la conception des assemblages des éléments préfabriqués

- positionner les joints de montage (acier, système industrialisés en béton) ou les reprises (béton armé) en dehors des zones fortement contraintes.

### **Surveillance du chantier.**

Il s'agit d'un aspect particulièrement important pour garantir la qualité réelle du travail effectué, en particulier :

- le positionnement des éléments préfabriqués en béton
- le bétonnage de leurs joints d'assemblage
- la mise en place correcte des armatures, l'exécution soignée des reprises, en béton armé
- la qualité des matériaux mis en œuvre.

### **Principe 3 - Régularité en plan**

Le mouvement sismique horizontal est un phénomène bidirectionnel. La structure du bâtiment doit être capable de résister à des actions horizontales suivant toutes les directions et les éléments structuraux doivent avoir des caractéristiques de résistance et de rigidité similaires dans les deux directions principales, ce qui se traduit par le choix de formes symétriques.

### **Critères de régularité en plan d'après l'Euro code 8 : méthode des forces de remplacement**

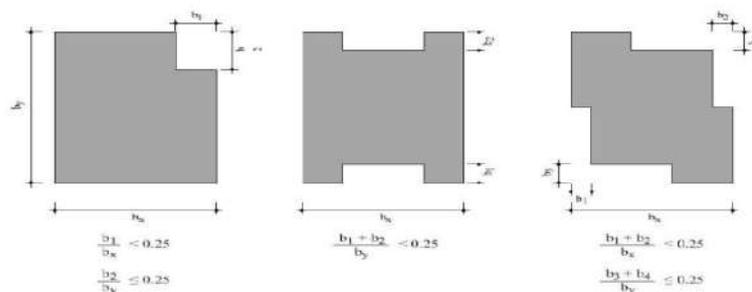


Figure 2.8 La forme idéale n'est pas seulement symétrique suivant deux axes, mais se rapproche de l'axisymétrie, car des dégâts importants ont souvent été observés à la jonction des pans dans des structures composées de plusieurs pans perpendiculaires.

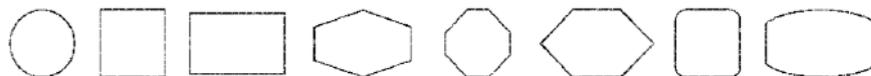


Figure 2.9 Formes favorables : plans simples à 2 axes de symétrie (AFPS, 2002)

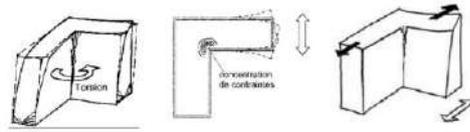


Figure 2.10 Oscillations différentielles dommages dans les angles rentrants

Ce qui est vrai pour la flexion d'ensemble l'est aussi pour la torsion : les éléments reprenant la torsion doivent être distribués assez symétriquement.

Le non-respect de ce principe peut conduire à une déformation permanente gauchie de la structure.

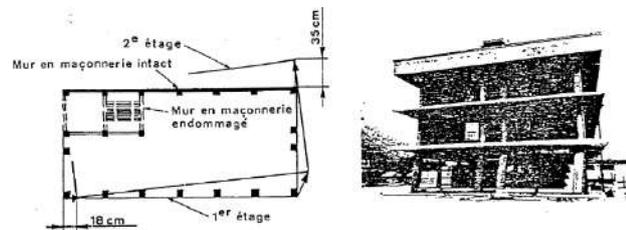


Figure 2.10 Influence de la forme du bâtiment sur les effets dus à la torsion : concentration de contraintes dans les angles rentrants (en haut) ; rotation permanente (en bas).

#### Principe 4 - Régularité en élévation

Dans la vue en élévation, les principes de simplicité et de continuité se traduisent par un aspect régulier de la structure primaire, sans variation brutale de raideur. De telles variations entraînent des sollicitations locales élevées.

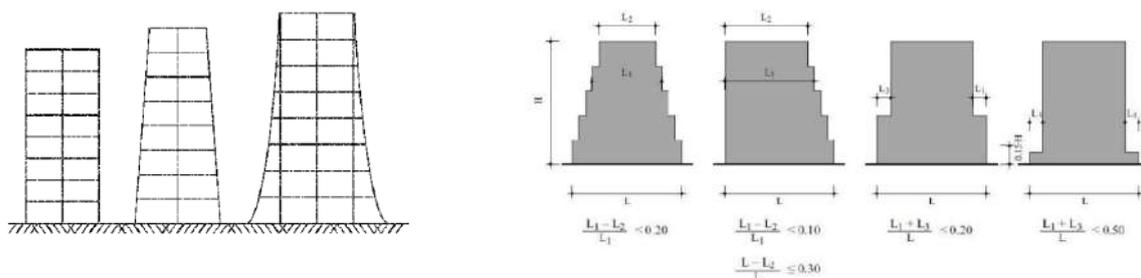


Figure 2.11 Critères de régularité en élévation d'après l'Euro code 8

Les problèmes rencontrés dans les irrégularités en élévations sont les distributions de la masse, la rigidité et la résistance ainsi que les oscillations différentielles. La structure devrait avoir une distribution uniforme et continue de la masse, de rigidité, de la résistance et de ductilité.

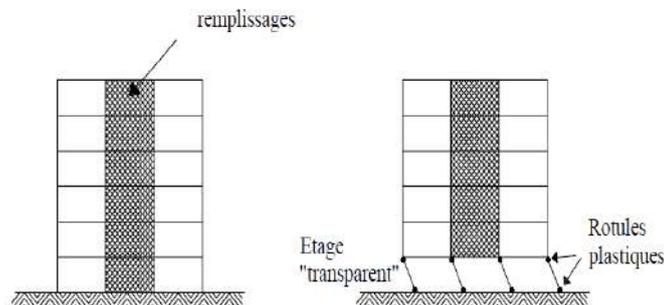


Figure 2.12 Niveau rez flexible ou “mou”.

Les niveaux transparents sont très courants dans les bâtiments parce qu'on laisse le rez de chaussée ouvert en raison de l'usage : commerces, bureaux, réception dans les hôtels, parkings. Les niveaux transparents sont fortement déconseillés dans les zones sismiques car ils peuvent constituer des niveaux flexibles, dans lesquels se concentrent toutes les déformations de la structure.

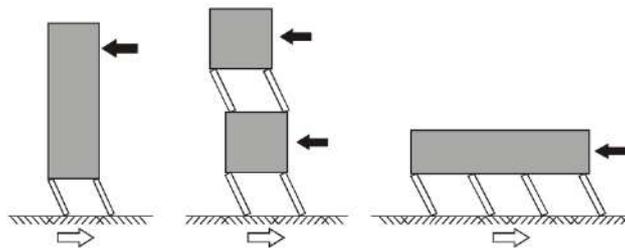


Figure 2.13 Bâtiments avec niveaux transparents.

Lorsque les niveaux transparents sont plus flexibles que les autres niveaux, les poteaux de ces niveaux subissent de grandes déformations qui peuvent provoquer la ruine du bâtiment (soft storey), (AFPS, 2002).

Le résultat de cette disposition est souvent l'effondrement de l'«étage mou», qui entraîne l'effondrement total du bâtiment.

Les structures en portique dans lesquelles sont disposés des murs de remplissage sont particulièrement sujettes aux ruines d'«étage mou», car leur analyse au moment du projet est souvent effectuée en considérant que la structure est une ossature en portiques et que les parois de remplissage sont non structurales et n'interviennent que par leur masse.

### Principe 5 - Raideur et résistance à la torsion

La distribution des contraintes dans un solide soumis à la torsion est telle qu'il faut que les éléments susceptibles de donner la raideur/résistance torsionnelle à la structure soient portés le plus possible vers la périphérie du bâtiment pour atteindre leur effet maximal. Une résistance et une rigidité appropriées à la torsion sont nécessaires pour limiter les mouvements du bâtiment et les sollicitations des éléments structuraux dus à la torsion. La disposition constructive, classique en zone non sismique, où un seul noyau central (cage d'escalier et ascenseur) constitue le seul contreventement, offre peu de raideur torsionnelle et peut conduire à des sollicitations élevées des portiques périphériques.

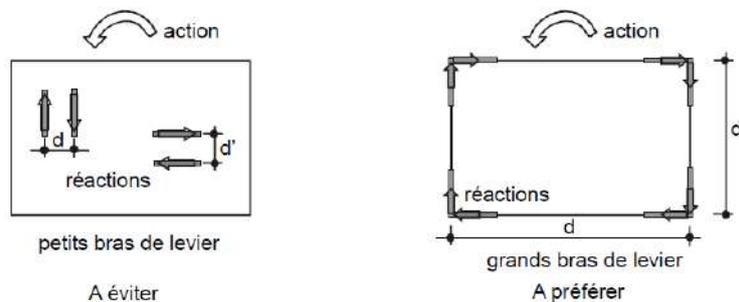


Figure 2.14 Une grande distance entre les éléments parallèles favorise la résistance de la structure à la torsion grâce à un bras de levier important dans le plan horizontal.

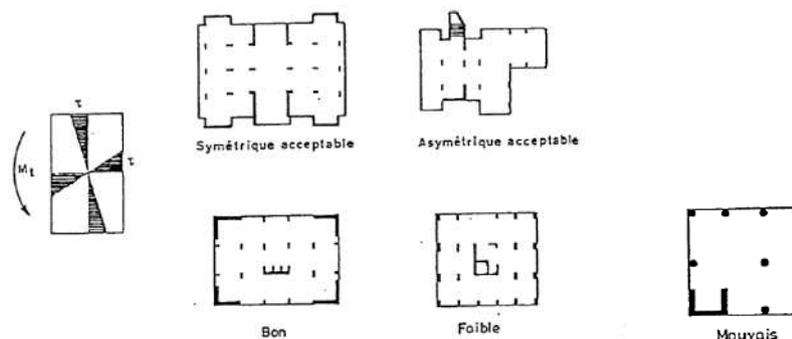


Figure 2.15 Dispositions des contreventements pour la reprise de la torsion.

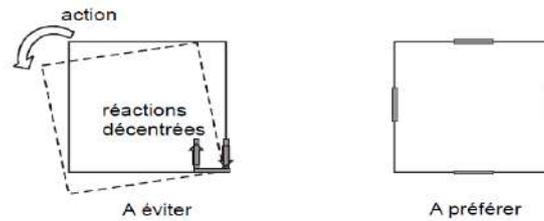


Figure 2.16 Une position décentrée des éléments de contreventement est à l'origine d'une sollicitation du bâtiment en torsion (en plus d'un bras de levier très faible) (AFPS, 2002).

### Principe 6. Diaphragmes efficaces

Les diaphragmes d'un bâtiment sont les structures horizontales qui reportent l'action horizontale, résultant de la mise en mouvement des masses des planchers et de leurs charges, vers les structures verticales de contreventement.

Les diaphragmes doivent être peu déformables dans leur plan, de manière à assurer une distribution efficace de l'action horizontale entre les différentes structures verticales. Idéalement, ils assurent à chaque niveau où ils sont présents une absence de déplacement horizontal relatif entre les structures verticales.

La rigidité des diaphragmes dépend :

- de leur forme : les diaphragmes longs et étroits sont flexibles.
- des rigidités respectives du diaphragme et du contreventement vertical. Si la rigidité du contreventement vertical est importante (murs en maçonnerie ou voiles de béton), les portées modérées du diaphragme sont préférables afin de limiter leur flexibilité.
- de leur matériau : les planchers en contreplaqué sur solives en bois se comportent comme des diaphragmes relativement rigides dans une structure en bois, mais sont flexibles dans une structure en maçonnerie.
- de l'efficacité de la solidarisation de leurs éléments constituants (exemple : diaphragme en treillis de bois)
- de l'importance des ouvertures (trémies) qui devrait être minimisée. Les ouvertures doivent être les plus petites possibles et leur contour renforcé.
- Les liaisons d'un diaphragme aux structures de contreventement verticales sont calculées pour permettre le transfert de l'action horizontale du niveau considéré. Des connecteurs adéquats, goujons, armature de cisaillement, sont utilisés à cette fin.

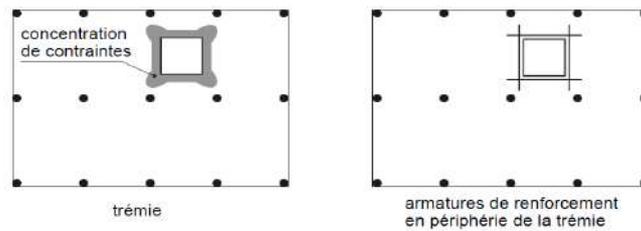


Figure 2.17 Diaphragme avec trémie.

### Principe 7. Des éléments structuraux verticaux surdimensionnés

La ruine des éléments structuraux verticaux d'un bâtiment a un impact nécessairement catastrophique, car elle entraîne la chute d'un étage, qui entraîne à son tour souvent l'effondrement total de la structure.

Il est donc fondamental pour la sécurité d'éviter à tout prix la ruine des éléments structuraux verticaux. Ceux-ci sont hélas potentiellement le siège de plusieurs modes de ruine sans guère de ductilité

- flambement
- écrasement (peu ductile en béton armé)
- cisaillement alterné (fragile en béton armé, ductile en acier)

Dans les poteaux également, la zone de nœud est soumise à fort cisaillement du fait des moments de flexion de signes opposés qui se développent dans les poutres. La ruine par cisaillement de la zone de nœud n'est en aucun cas ductile dans les constructions en béton armé. Par contre, le cisaillement plastique de la zone de nœud d'un poteau en acier est extrêmement ductile et acceptée dans des proportions limitées.

### Principe 8. Créer les conditions d'un mécanisme plastique global.

Exemple 1 : le principe « poteaux forts – poutres faibles » pour la formation des rotules plastiques dans les poutres plutôt que dans les colonnes des ossatures en portique.

- des planchers et des poutres même fortement endommagés ne s'effondrent pas individuellement, ils restent suspendus par les armatures ou les parties restantes des assemblages, alors que les dégâts aux poteaux entraînent facilement un effondrement d'ensemble.

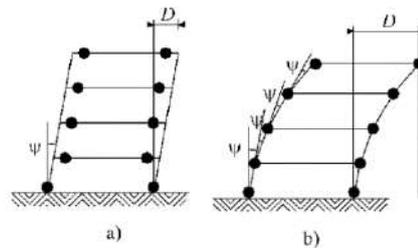


Figure 2.18 Le principe « poteaux forts – poutres faibles »

- a) L'objectif de projet "poutres faibles – poteaux forts" b) Les rotules plastiques dans les poteaux entraînent des effets du second ordre plus importants.

### Principe 9 - Choix rationnels relatifs aux masses.

Le choix de planchers légers plus performants peut ainsi entraîner une réduction des quantités et coûts d'ossature et de fondation, car les planchers représentent environ 80% de la masse d'un bâtiment. Cette réduction de prix de l'ossature peut compenser le surcoût des planchers plus performants.

Concernant les masses correspondant aux actions de service, il faut, lorsqu'on a le choix, éviter de les placer dans des zones de la structure où elles engendrent des sollicitations importantes de flexion ou de torsion. Ainsi, des zones massives telles que bibliothèques, archives, salle de radiographie, etc... devraient être placées au sous-sol ou au rez de chaussée plutôt qu'aux étages, afin de réduire le cisaillement et la flexion. Afin de réduire la torsion, ces mêmes locaux, s'ils sont placés en hauteur, devraient être situés au plus près du centre de torsion du bâtiment.

### Principe 10. Largeur des contreventements

Les forces horizontales équivalentes au séisme sont équilibrées en base de la structure par une résultante de cisaillement et un moment de flexion. Ce dernier entraîne :

- des tractions dans les poteaux ou voiles
- des compressions dans les poteaux ou voiles

On peut réduire les contraintes correspondantes à ces sollicitations dans la structure en élargissant le contreventement (voile en béton armé, ossature triangulée) : le bras de levier des efforts dans le plan vertical est augmenté, ce qui a action constante réduit les sollicitations.

**Principe 11. Largeur des fondations.**

Les forces horizontales équivalentes au séisme sont équilibrées en base de la structure par une résultante de cisaillement et un moment de flexion. Ce dernier entraîne :

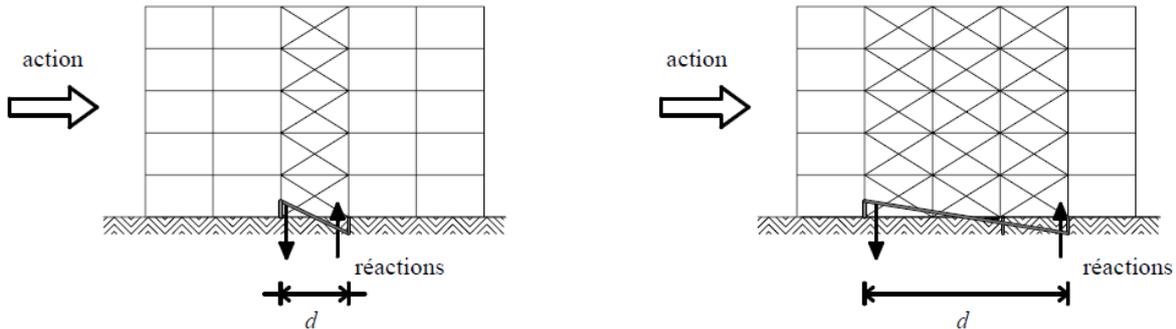


Figure 2.19 largeur des contreventements

- a) Petit bras de levier des réactions d'appui. A éviter
- b) Grand bras de levier. A préférer

- des tractions à la fondation
- des compressions à la fondation
- un risque de soulèvement en base du côté traction

Comme pour les éléments de la structure de contreventement, on peut réduire les sollicitations à la fondation en réalisant un radier général raidi par des murs de sous-sol base plutôt que de multiples fondations sur semelles. Ce radier répartit les réactions sur la plus grande surface possible, ce qui réduit les contraintes appliquées au sol, en cas de fondation directe, ou les efforts dans les pieux.

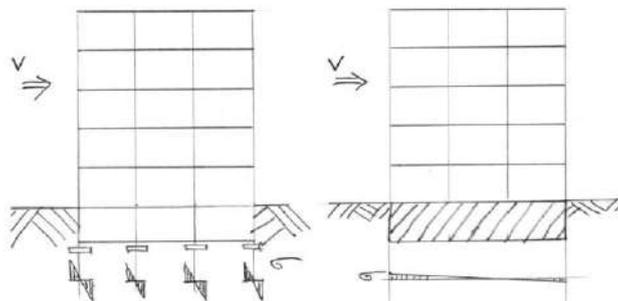
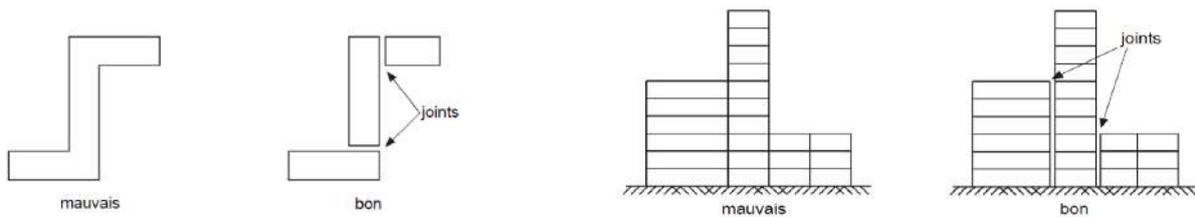


Figure 2.20 Un radier général raidi par les murs de sous-sol base réduit les contraintes à la fondation.

**Principe 12. Partition en sous structures**

Lorsque pour une raison quelconque (usage, esthétique), les principes de régularité en plan et de symétrie ne peuvent être respectés, on peut penser à effectuer une partition du bâtiment en plusieurs «blocs» ou sous structures ; celles-ci sont séparées pour leur comportement structural, mais jointives pour leur utilisation.

La difficulté de cette solution consiste en la réalisation de joints corrects entre les sous structures. Ces joints doivent être suffisamment larges pour éviter le martèlement entre sous structures lors d'un tremblement de terre.



a) Vues en plan

b) Vues en élévation

Figure 2.21 Fractionnement des bâtiments par des joints sismiques  
ou partition en sous structures.

### 3. Systèmes porteurs des bâtiments métalliques

#### Introduction

Les constructions industrielles ou les volumes de grandes dimensions sont très courants dans les bâtiments de parcs industriels, de loisirs et de sports. Leurs fonctionnalités ainsi que leur qualité architecturale sont influencées par de nombreux facteurs, par exemple le plan d'implantation, la polyvalence et la qualité souhaitée pour le bâtiment. L'acier offre de nombreuses possibilités pour un usage fonctionnel à la fois agréable et flexible.

Pour les bâtiments offrant un grand volume, l'aspect économique de la structure joue un rôle important. Pour les grandes portées, le dimensionnement est optimisé afin de réduire l'utilisation de matériaux, les coûts et le travail de montage. De plus en plus, les bâtiments sont conçus afin de réduire les dépenses énergétiques et être très respectueux de l'environnement.

Les bâtiments industriels sont composés d'une ossature en portiques et des revêtements métalliques de tous types. La technique permet de créer de grands volumes ouverts, efficaces, faciles à entretenir et adaptables en fonction des évolutions de la demande. L'acier est choisi pour des raisons économiques, mais également pour d'autres raisons telles que la résistance au feu, la qualité architecturale et le respect de l'environnement.

Dans la plupart des cas, un bâtiment industriel n'est pas constitué d'une structure unique, mais il est complété par des espaces de bureaux et d'administration ou par d'autres ouvrages tels des auvents. Ces éléments additionnels peuvent être conçus de sorte à s'intégrer à la conception globale du bâtiment. Dans ce qui suit est donnée une description des formes courantes de bâtiments et grandes enceintes à usage industriel, ainsi que de leur domaine d'application. Les mêmes technologies peuvent être étendues à un large éventail de types de bâtiments, y compris les installations sportives et de loisirs, les halles, les supermarchés et autres enceintes.

#### 3.1 Avantage et inconvénients des constructions métalliques

##### 3.1.1 Avantages

**La légèreté :** Les constructions en acier sont, en général, plus légères que celles en béton armé ou précontraint, en bois, en pierre ... La légèreté peut être caractérisée par le rapport entre le poids volumique et la résistance (appelé rendement).

**La solidité :** Grâce à l'homogénéité des matériaux utilisés en construction métallique.

**La résistance mécanique :**

- Grande résistance à la traction → franchissement de grandes portées.
- Bonne tenue aux séismes (ductilité + mêmes résistances à la traction et à la compression).

**L'industrialisation :** La préparation et la mise en forme des éléments de structures en acier se font en atelier. Ces éléments arrivent sur le chantier prêt à être montés et assemblés. Cela nécessite des techniques et des équipements modernes.

**L'imperméabilité :** L'acier se caractérise par son imperméabilité (fluides : liquide + gaz). Attention lors de la réalisation des assemblages.

**Les possibilités architecturales :** Beaucoup plus étendues qu'en béton.

**Les modifications :** Aisément réalisables.

**3.1.2 Quelques inconvénients des constructions métalliques**

**La corrosion :** L'acier tend à s'oxyder et à se corroder lorsqu'il est soumis à des atmosphères humides, à des agressions chimiques, à la condensation, qu'il est en contact avec l'eau ou les sols. La protection contre la corrosion peut se faire par :

- L'ajout d'additifs à l'acier.
- Le revêtement périodique de la surface d'acier (galvanisation, métallisation au pistolet, électrozingage ...) avec peinture ou vernis.
- La sélection de formes de structures sans brèches et fentes afin de se prémunir des risques de l'humidité et des poussières.

**Mauvaise tenue au feu nécessitant des mesures de protection onéreuse :**

Le module d'élasticité de l'acier commence à diminuer à partir de la température  $T = 200^{\circ}\text{C}$ . L'acier perd sa capacité portante et passe à l'état plastique à partir de la température  $T = 600^{\circ}\text{C}$ .

**Susceptibilité aux phénomènes d'instabilité élastique :**

En raison de la minceur des profils.

**3.2 Classification des produits sidérurgiques**

Les produits en acier peuvent être classés en plusieurs catégories :

**Les produits longs** qui sont obtenus par laminage à chaud, étirage ou tréfilage (poutrelles, palplanches, câbles, fils, ronds à béton...).

**Les laminés marchands :** on distingue :

- a) les ronds pleins,
- b) les carrés pleins,
- c) les hexagones pleins,
- d) les plats,
- e) les cornières (L) à ailes égales,
- f) les cornières (L) à ailes inégales,
- g) Les fers en T,
- h) les petits U ...

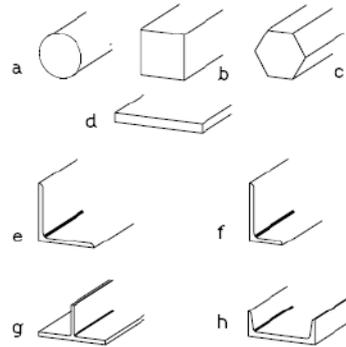


Figure 3.1 Les laminés marchands

**Les poutrelles laminées :** elles peuvent avoir différentes sections, en I, en U, ou en H.

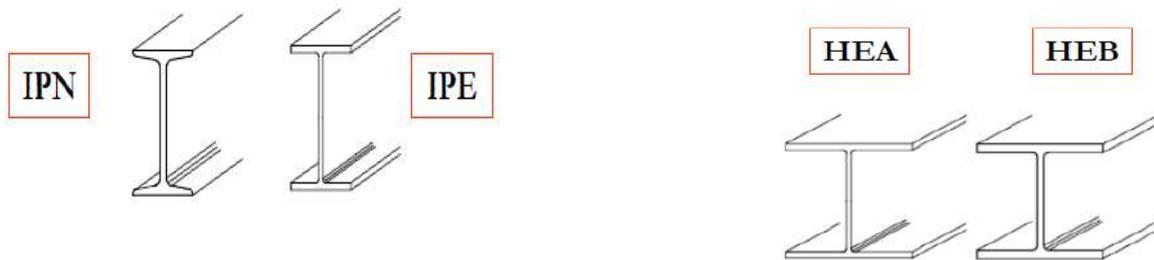


Figure 3.2 Les poutrelles laminées

**Les demi poutrelles :** Le découpage des poutrelles I et H suivant l'axe longitudinal a de multiples utilisations : sections T, membrures de poutres...

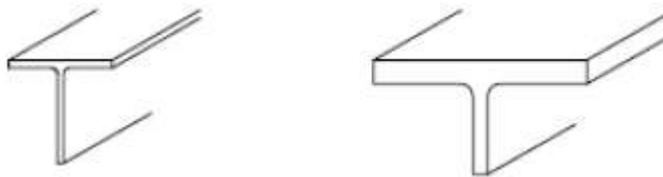


Figure 3.3 Les demi poutrelles

**Les produits plats** qui subissent en général un laminage à froid supplémentaire, à l'exception des tôles de forte épaisseur (tôles, bardages, profils minces, profils creux...).

**Les tôles et les larges plats :**

- Les tôles sont fabriquées sous forme de bobines.
- Elles sont livrées en largeurs standards ou à la demande, mais les largeurs sont en général limitées à 1800 mm.
- L'épaisseur ne dépasse pas 16 à 20 mm pour les tôles laminées à chaud et 3 mm pour les tôles laminées à froid.
- Celles-ci peuvent être mises en forme par profilage, pliage ou emboutissage.

**Les tôles nervurées :**

- Ce sont des tôles minces que l'on nervure par profilage à froid
- Les applications concernent les produits d'enveloppe (bardage), de couverture (bac, support d'étanchéité) et de plancher (bac pour plancher collaborant ou à coffrage perdu), ainsi que les panneaux sandwich incorporant des matériaux isolants.

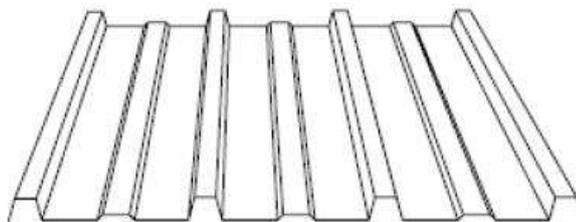


Figure 3.4 Les tôles nervurées

**Les profils creux :** Les tubes de construction sont appelés « profils creux ». Ils sont fabriqués en continu à partir de tôles minces ou moyennes repliées dans le sens de leur longueur.

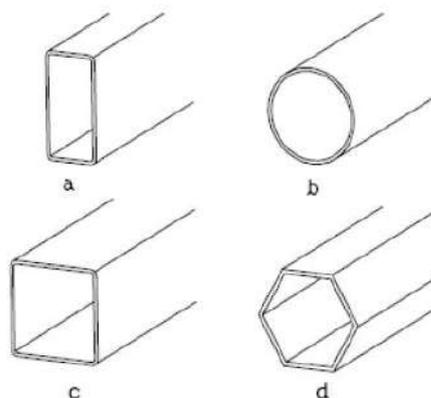


Figure 3.5 Les profils creux

**Les plaques :** On parle de plaques lorsque l'épaisseur dépasse 20 mm. On peut obtenir des plaques jusqu'à 400 mm d'épaisseur et 5200 mm de largeur. Les plaques sont principalement utilisées pour les ouvrages d'art. Leur assemblage par soudure peut être complexe. Il existe aussi des plaques à épaisseur variable pour les ouvrages d'art.

**Les profils minces :** Les tôles minces galvanisées (d'épaisseur inférieure à 5 mm) peuvent être profilées à froid pour réaliser des profils minces. De sections très diverses, les profils minces sont utilisés en serrurerie, en menuiserie métallique et en ossatures légères : pannes de charpente, ossatures de murs ou de cloisons, de faux plafond...



Figure 3.6 Les profils minces

### 3.3 La halle industrielle

Les halles ou bâtiments industriels à simple rez-de-chaussée en charpente métallique sont principalement constitués d'une ossature porteuse et d'une enveloppe. L'ossature porteuse du bâtiment est généralement composée de portiques (constitués par l'assemblage de traverses et de poteaux) reliés entre eux par des pannes et des lisses de bardage.

Au sol, les poteaux sont généralement soudés à une platine elle-même boulonnée sur une fondation.

La stabilité globale de la structure est assurée par la mise en œuvre d'éléments de contreventement en toiture et en façade. Sur les éléments de l'ossature porteuse, sont attachés les éléments qui constituent l'enveloppe, tels que le bardage de façade et la couverture de toiture.

Une halle de forme simple est considérée comme une boîte (fig. 3.7a) formée de six surfaces porteuses planes. L'ossature et l'enveloppe de la halle constituent le couvercle et les quatre parois de la boîte, le fond étant représenté par le sol de fondation ou l'infrastructure. La structure porteuse de la boîte (l'ossature) est décomposée selon les trois directions de l'espace

en sous-structures planes qui sont (fig.3.7 b) : les cadres transversaux et les pignons (parallèles au plan AB), la toiture (parallèle au plan AC) et les façades long pan (parallèles au plan BC). Pour assurer la stabilité de cette boîte, il est nécessaire que chacune des trois directions soit rigide dans son plan (par effet cadre ou par contreventement).

La figure (b) présente un exemple de système porteur de boîte constituée de trois cadres plans (composée de deux montants et d'une traverse) et de deux pignons sur lesquels sont fixées des filières de façade et des pannes de toiture. Sur ces éléments linéaires sont attachés les éléments d'enveloppe tel que le bardage de façade et la couverture de toiture, qui sont des éléments plans. La stabilité est assurée dans cet exemple par des contreventements constitués de barres métalliques dont les diagonales forment des Croix de St-André.

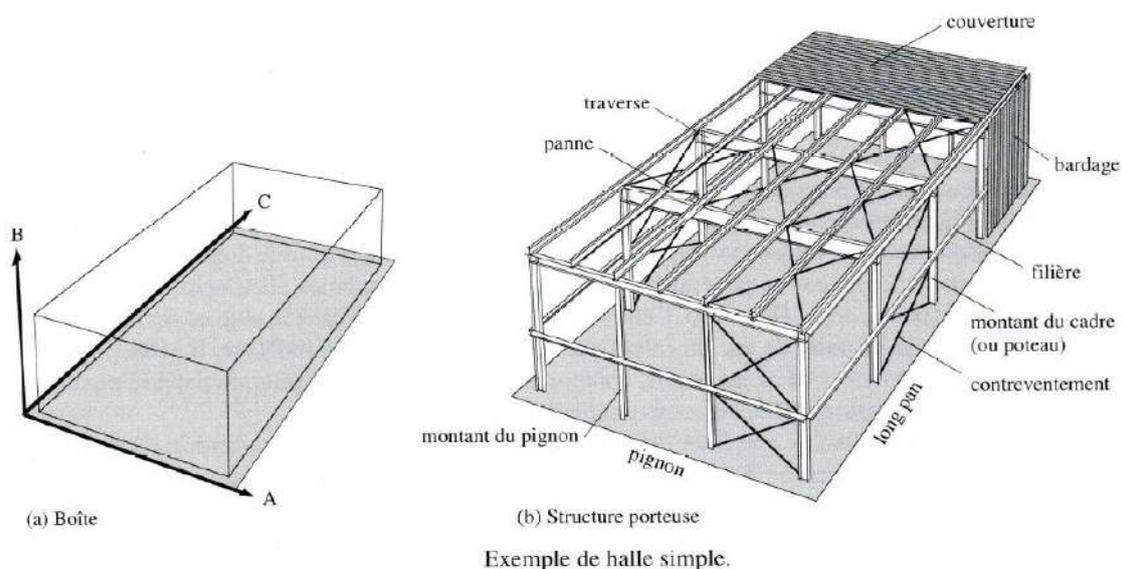


Figure 3.7 système porteur d'un bâtiment industriel

Examinons schématiquement les différents types de système porteur qu'il est possible de concevoir pour une halle en forme de parallélépipède rectangle, à partir de la halle élémentaire de la figure (b). Dans cette première solution, les traverses de cadre étaient constituées de profilés laminés. Lorsque la portée augmente, ces profilés sont remplacés par des poutres composées à âme pleine ou par des poutres à treillis de grande hauteur (fig. 3.8(a)). En disposant les pannes de façon inclinée, une extrémité reposant sur la membrure inférieure d'un treillis et l'autre sur la membrure supérieure du treillis suivant, on crée alors le shed (fig. 3.8(b)). Une

autre variante de shed consiste à incliner les poutres à treillis elles-mêmes et à les grouper par paires pour constituer des poutres triangulaires reposant sur les longs pans (fig. 3.8(c)). Si les barres des treillis sont remplacées par des tôles profilées reliant les membrures-charnières, on constitue alors un système porteur appelé structure plissée (fig. 3.8(d)). Enfin, en disposant des treillis aussi bien dans le sens transversal que dans le sens longitudinal de la toiture, on crée une structure bidirectionnelle dite spatiale permettant de réduire considérablement le nombre de points d'appui (fig. 3.8(e)).

Le même genre de réflexions peut être fait à propos du vent agissant longitudinalement et exerçant une pression sur la façade pignon. Ce sont alors les plans parallèles aux longs pans qui sont sollicités.

Le cheminement des charges verticales et horizontales s'effectue donc au travers d'éléments situés dans des plans selon les trois dimensions principales de la halle :

- sur la longueur (pannes, filières),
- sur la largeur (traverses du cadre),
- sur la hauteur (montants ou poteaux).

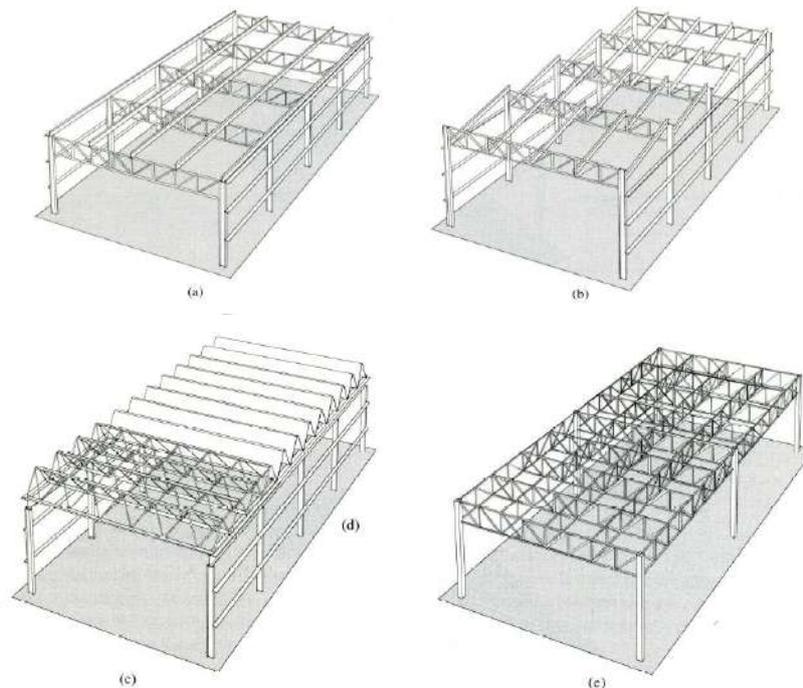


Figure 3.8 Différents types de systèmes porteurs de bâtiments industriels

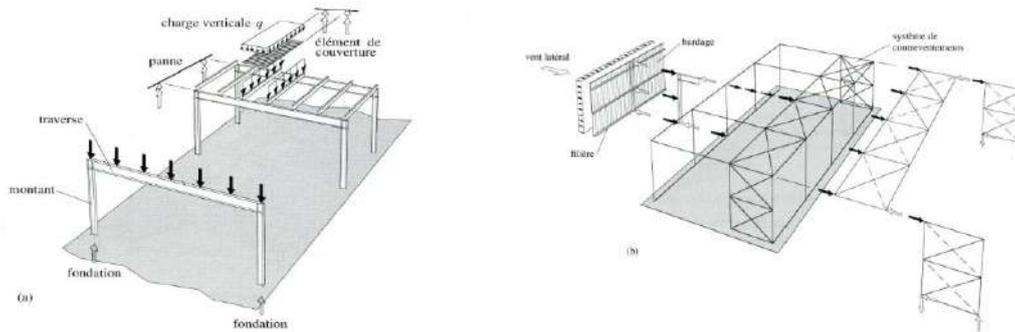


Fig. 3.9 Cheminement des charges verticales et horizontales

Les **façades** sont réalisées à partir de :

- **Bardages en simple peau** ;
- **Bardages en double peau**, constitués de plateaux fixés sur la structure porteuse à l'aide de fixations selon les règles de l'art, verticalement ou horizontalement, d'écarteurs éventuels, d'isolants et d'un parement extérieur constitué de plaques nervurées ou ondulées.

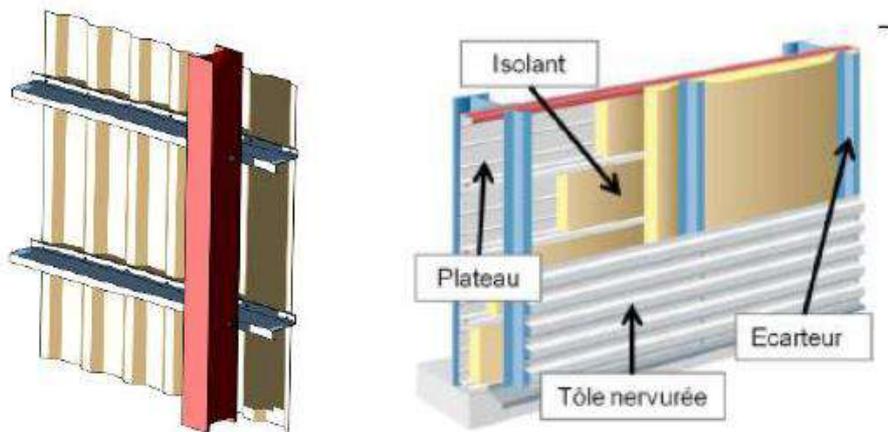


Fig 3.10 Exemples de bardages simples et doubles peaux

La **toiture** est :

- une couverture sèche ;
- une **couverture en acier avec isolation et étanchéité**, constituée de tôles d'acier nervurées, éventuellement d'un pare-vapeur; de panneaux isolants non porteurs, d'un revêtement d'étanchéité et éventuellement d'une protection lourde.

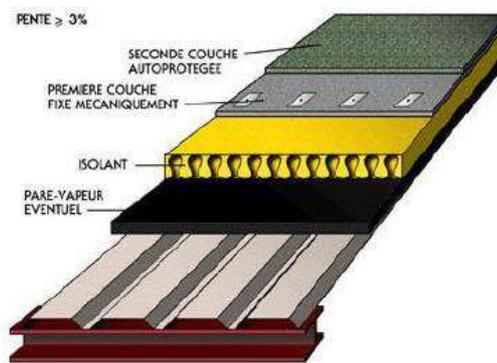


Fig. 3.11 Exemple de couverture en acier avec isolation et étanchéité.

\_ Son inclinaison est inférieure à 10°.

Pour les façades et la toiture, les éléments sont fixés aux lisses ou aux pannes à l'aide de fixations définies selon les règles de l'art (vis, rivets, etc.).

### 3.3.1 Stabilité d'une halle industrielle

Une halle de forme simple est stable si chaque direction de l'espace est stabilisée, c'est-à-dire si un certain nombre des surfaces porteuses (ou parties de surface appelées panneaux) sont disposées de façon à constituer un système tridimensionnel. Horizontalement, la surface indéformable est en général constituée par le plan de la toiture. Longitudinalement, la stabilité est assurée par un ou deux longs pans. Transversalement enfin, la stabilité statique peut être assurée par les cadres eux-mêmes à condition qu'ils soient stables (isostatiques ou hyperstatiques). Si les cadres sont complètement articulés (instables), la stabilité de l'ensemble de l'ossature de la halle doit être assurée par un système de contreventements.

### 3.3.2 Contreventement d'une halle industrielle

Pour décrire de façon simple la stabilisation des halles par un système de contreventements, nous reprenons la forme de halle présentée à la figure 3.7, considérée comme une boîte formée de surfaces porteuses. La figure 3.12 montre schématiquement un système fondamental de contreventements, constitué des panneaux A à D. On remarquera que ces panneaux sont disposés en forme de grands cadres (A-B-A et C-D-C), panneaux qui résistent aux forces horizontales grâce à leur grande hauteur statique. Afin de faciliter l'identification des différents contreventements, nous les définissons selon leur situation dans l'enveloppe (façade long pan, façade pignon ou toiture) et selon leur position par rapport à la halle (longitudinal ou

transversal). Pour la halle considérée, on peut distinguer les quatre types de contreventement suivants (fig. 3.12) :

- contreventement de façade (long pan), (A),
- contreventement de toiture (transversal), (B),
- contreventement de façade (pignon), (C),
- contreventement de toiture (longitudinal), (D).

La rigidité nécessaire en cisaillement est conférée à un panneau :

- par triangulation à l'aide de barres diagonales, afin de créer un contreventement en treillis (1),
- par remplissage afin de créer un voile en béton armé (2) ou un diaphragme en tôle d'acier (3),
- par rigidification des nœuds de l'ossature afin de créer un cadre-portique (4).

Dans le cas du contreventement en treillis, les forces sont transmises par des efforts normaux dans les barres. Dans le cas des voiles ou diaphragmes, les efforts dans le plan sont transmis essentiellement par cisaillement du béton ou de la tôle. Enfin dans le cas des cadres-portiques, les forces sont transmises surtout par flexion des traverses et montants.

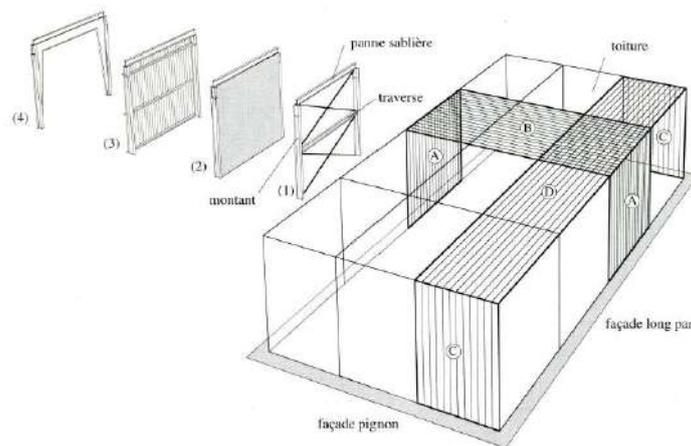


Figure 3.12 Représentation schématique des panneaux de contreventement et définitions

### Types d'éléments de stabilisation

L'indéformabilité d'un panneau peut être réalisée par triangulation (treillis), par remplissage (voile, diaphragme) ou par rigidification des nœuds (cadre-portique). Examinons plus en détail la conception de ces trois types d'élément de stabilisation.

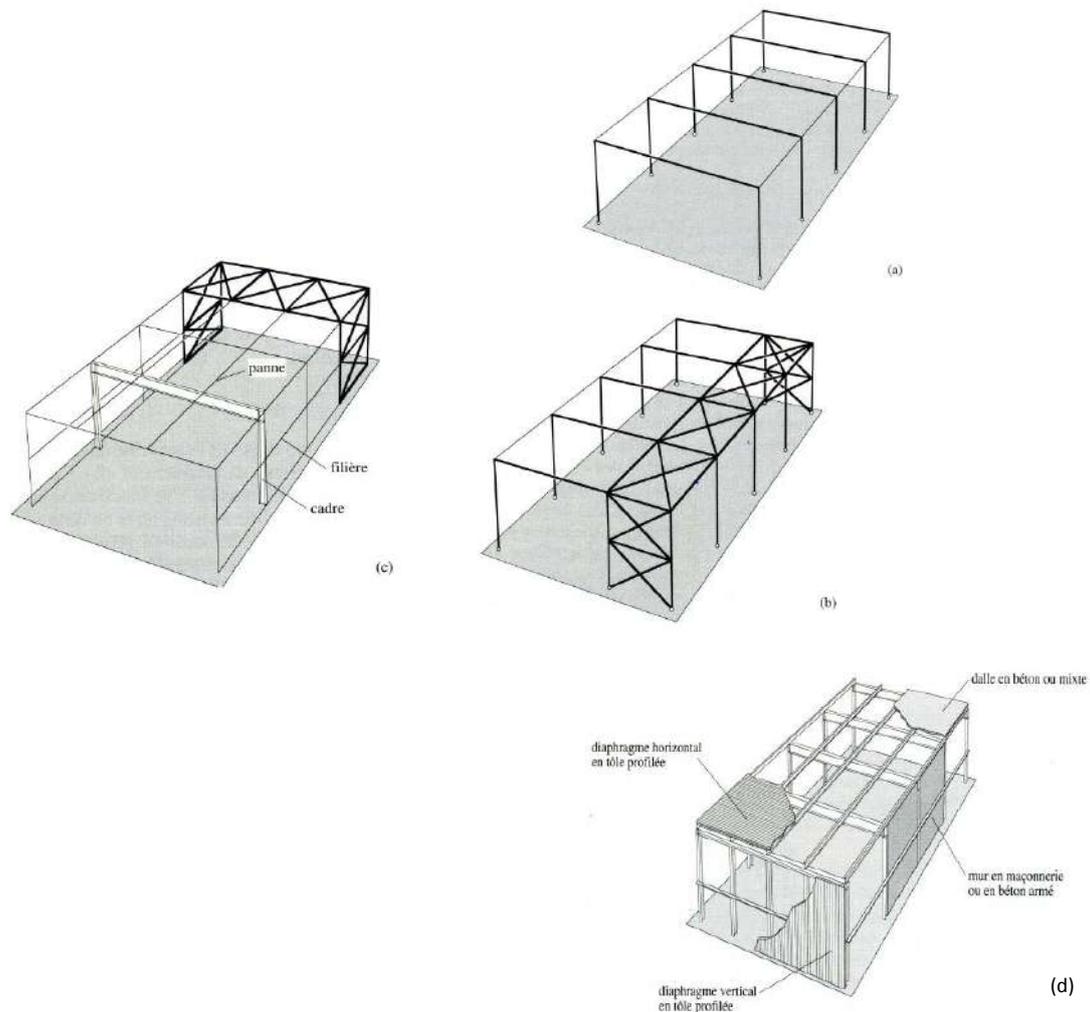


Figure 3.13 Types d'éléments de stabilisation

- a) Rigidification des nœuds (cadre-portique)
- b) Contreventement longitudinal par triangulation (treillis)
- c) Contreventement transversal par triangulation (treillis)
- d) Contreventement par diaphragmes

Il existe différentes façons de disposer les contreventements ; la figure 3.13 en montre quelques-unes. Pour équilibrer une force pouvant agir dans n'importe quelle direction d'un plan, il faut respecter trois conditions

1. il faut disposer d'au moins trois lignes d'action de forces,

2. les lignes d'action de forces ne doivent pas être concourantes en un point,
3. les lignes d'action de forces ne doivent pas être toutes parallèles entre elles.

La solution (a) de la figure 3.13 est la plus conventionnelle. Chaque contreventement de toiture transmet les efforts horizontaux provenant d'une direction qui lui est perpendiculaire au moyen de deux contreventements verticaux de façade. Les trois conditions d'équilibre dans le plan énoncées ci-dessus sont respectées. La solution (b) est la même, à part le fait que les contreventements de toiture sont doublés. Dans la solution (c), le vent longitudinal est équilibré par un seul contreventement de long pan. Les conditions d'équilibre sont respectées, car le couple créé par l'excentricité de la force due au vent par rapport à ce contreventement est équilibré par les réactions, perpendiculaires, des deux contreventements de pignon. Enfin la solution (d), bien que comportant un contreventement de toiture jouant simultanément le rôle de contreventement longitudinal et de contreventement transversal, est une solution instable car la condition 2 n'est pas remplie (les lignes d'action des forces sont concourantes en un seul point).

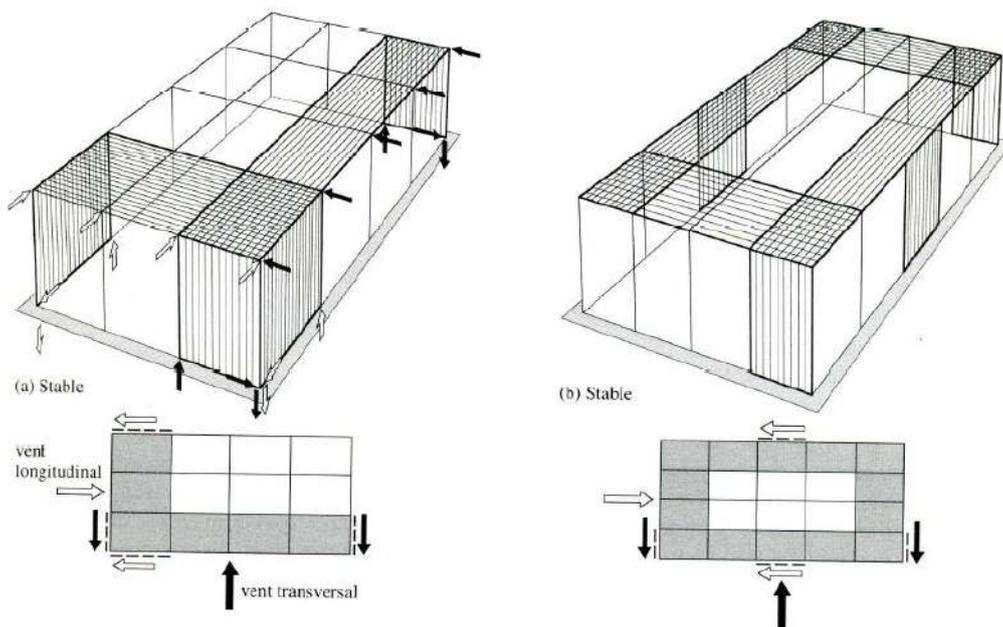


Figure 3.14 Exemple de disposition des contreventements

Les contreventements ont donc la fonction générale de stabilisation de l'ossature d'une halle. On peut distinguer sous ce terme général trois fonctions principales liées entre elles :

- transmettre les efforts horizontaux,
- limiter les déformations,
- contribuer à augmenter la stabilité de la structure et de ses éléments.

### Transmission des efforts horizontaux

Il s'agit ici d'assurer l'équilibre des charges horizontales agissant sur la structure, c'est-à-dire de garantir leur cheminement jusqu'aux fondations (on parle aussi d'assurer la stabilité statique).

Les charges horizontales qui sollicitent la structure porteuse d'une halle sont les suivantes :

- les actions dues au vent,
- les effets dus aux ponts roulants ou autres engins de manutention,
- les effets sismiques,
- les chocs.

Contrairement aux charges gravifiques qui agissent toujours dans le même sens, la majorité des charges horizontales peuvent agir dans toutes les directions du plan. Le système de contreventements doit être conçu en conséquence. Quel que soit le système réalisé, il est important de garantir le cheminement des charges horizontales jusqu'aux fondations et de s'assurer qu'en tout point l'équilibre des forces est possible. A titre d'exemple, examinons le cheminement des efforts dus au vent longitudinal agissant sur un des pignons d'une halle (fig. 3.15) :

### Limitation des déformations

Limiter la déformabilité d'une structure peut être rendu nécessaire pour des raisons telles que le bon comportement d'éléments de second œuvre ou le bon fonctionnement de ponts roulants. La déformabilité d'une structure peut aussi avoir un effet défavorable sur sa stabilité.

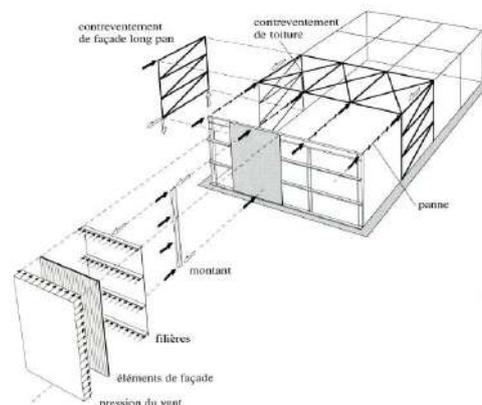


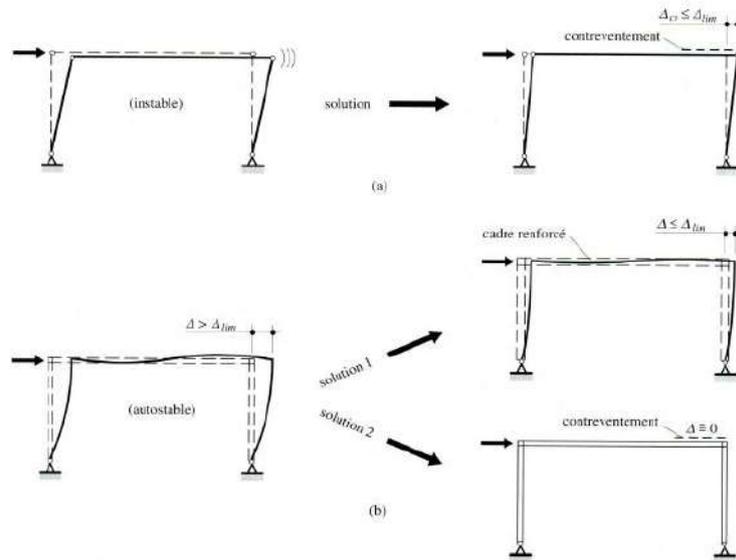
Figure 3.15 Exemple de transmission des efforts horizontaux

### Effets des charges horizontales

Dans le cas où les cadres comportent quatre articulations, ils sont *instables* sous l'effet des charges horizontales (fig. 3.16 (a)). Un système de contreventements est nécessaire pour assurer la stabilité statique. Les déplacements latéraux des cadres sont alors limités par la déformation des contreventements. Dans le cas où les cadres sont hyperstatiques, et par conséquent autostable (fig. 3.16 (b)), il se peut que même si ces cadres sont dimensionnés selon des critères de sécurité structurale, les déplacements horizontaux soient trop grands sous l'effet des charges transversales. On a alors deux solutions pour satisfaire les exigences de l'aptitude au service :

- renforcer le cadre en choisissant des sections plus rigides,
- introduire un système de contreventements.

Dans la première solution, on ne modifie pas le système statique, qui reste celui d'un cadre auto stable. Dans la deuxième solution, les cadres, toujours considérés comme rigides, travaillent conjointement avec le système de contreventements, qui constitue alors un appui à ressort. Les parts de l'effort horizontal reprises par les cadres et par les contreventements dépendent des rigidités relatives de ces éléments. Cette solution n'est pas très économique, car elle cumule à la fois des nœuds rigides, compliqués à réaliser, et des barres de contreventement.



Figures 3.16 Effet du contreventement sur le déplacement latéral des cadres

a) Cadres avec quatre articulations

b) Cadres hyperstatiques

### 3.4 Les systèmes porteurs usuels

#### 3.4.1 Système porteur à noyau central

##### Définition :

Par définition, un noyau est une gaine verticale en béton armé destinée à assurer la stabilité des immeubles de grandes hauteurs, vis-à-vis des charges horizontales. En règle générale et pour des raisons fonctionnelles, l'architecte concentre tous les dispositifs de communication verticale : les ascenseurs, les escaliers, les gaines et les réseaux divers, ainsi que, parfois, certains services (sanitaires, salles de réunions, espaces de rangement etc...) dans le noyau. Ce système permet ainsi de libérer les espaces intérieurs de tout contreventement, ce qui présente un double intérêt ; au point de vue architectural (esthétique) et fonctionnel (liberté des aménagements intérieurs). Le noyau est souvent en béton armé mais il peut tout aussi être formé par des poutres à treillis métalliques.

Les efforts exercés par le vent sont retransmis au noyau par l'intermédiaire d'éléments horizontaux positionnés aux différents étages. Les gratte-ciel constitués d'un noyau central peuvent atteindre facilement une hauteur équivalente à une cinquantaine d'étages tout en réduisant l'emprise au sol. Le doublement parfois même le triplement de la structure centrale a ensuite permis d'atteindre des hauteurs d'environ 70 étages.



Figure 3.17 Exemple d'un bâtiment a noyau central

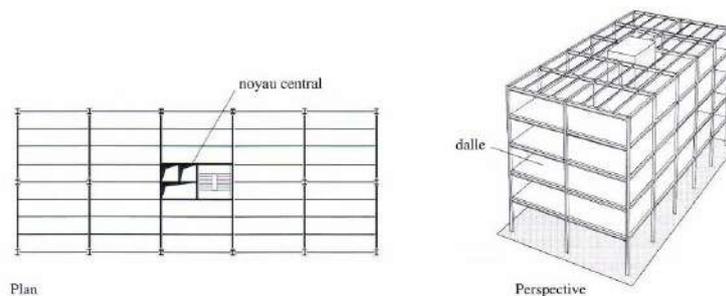


Figure 3.18 Schématisation du noyau central

Le noyau central constitue une structure verticale très rigide en béton armé, conçue comme une console encastrée dans les fondations ou l'infrastructure et destinée à reprendre les charges horizontales, la structure métallique ne devant reprendre que les charges verticales, étant constituée d'articulations.

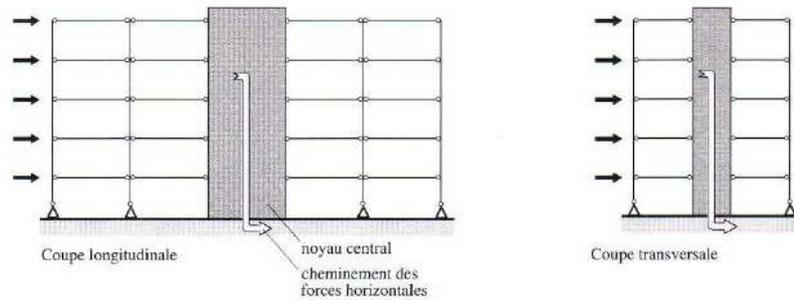


Figure 3.19 cheminement des forces horizontales

On peut aussi concevoir des noyaux en acier, poutre treillis ou cadres rigides à étages multiples. Ils sont moins rigides que les précédents, mais suppriment les inconvénients créés par le vieillissement différentiel de l'acier et du béton. La conception de noyaux mixtes se rencontre parfois.

On peut réduire le déplacement horizontal des immeubles de grandes hauteur en reliant les poteaux extérieurs à une structure rigide en tête du noyau appelée chapeau.

#### Aspect technique du noyau central (rôle) et contreventement :

Le noyau central est la base de toute structure ; En effet, la stabilité horizontale d'un bâtiment et la reprise des charges horizontales provenant du vent ou des séismes est assurée par une série de dalles qui sont quasiment indéformables dans leur propre plan. Ces dalles travaillent dans le sens horizontal et transmettent ainsi ces charges horizontales aux noyaux centraux et aux murs de refends.

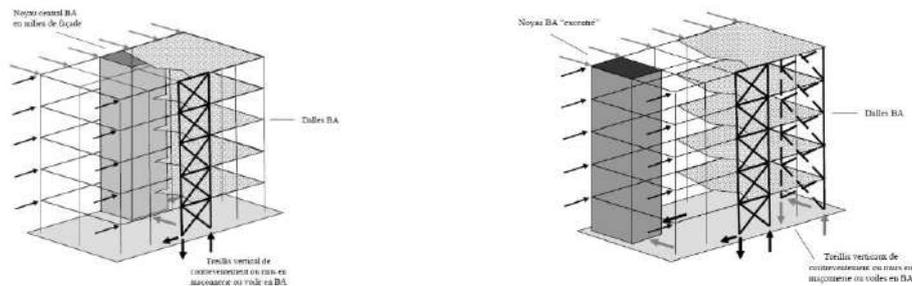
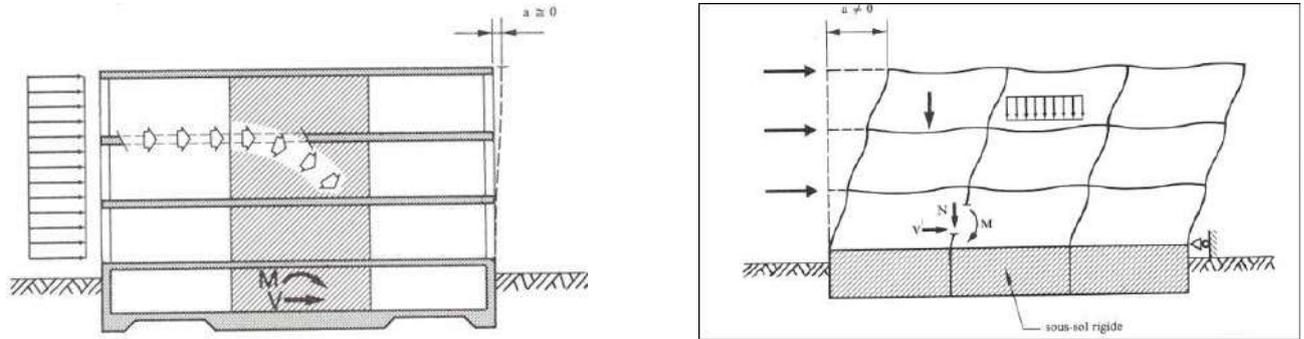


Figure 3.20 Aspect technique du noyau central

### Reprise des efforts horizontaux par le noyau central :

Les efforts horizontaux sont transmis aux dalles du bâtiment (on considère que les charges horizontales agissent au niveau des dalles), et ces dalles transmettent ces efforts au noyau central.



Transmission des charges horizontales au noyau central

Déplacement latéral d'une structure ne comportant pas de noyau central

Figure 3.21 Reprise des charges horizontales par le noyau central

La figure 3.21 montre que c'est en effet bien le noyau central qui reprend la majeure partie des efforts dû aux charges horizontales. De cette manière, le noyau central fait office de contreventement. Grâce à ce noyau, le déplacement de l'ensemble du bâtiment ( $=a$  sur le dessin) est alors moindre, voire nul.

Au contraire, si le bâtiment n'était pas constitué d'un (ou de plusieurs) noyau(x) ; le déplacement de celui-ci serait très important ce qui poserait des problèmes de stabilité de l'ouvrage.

### Détermination de l'emplacement du noyau central :

La position du noyau central est souvent déterminée par des raisons fonctionnelles et d'exploitations du bâtiment. Cependant, le placement de ce noyau en vue de la sécurité est primordial en raison des conditions d'évacuations en cas d'incendie,... Outre cet aspect sécurité, le(s) noyau(x) tout comme les murs de refends doivent être positionnés en plan le plus symétriquement possible de manière telle à limiter les déformations torsionnelles sous l'action du vent ainsi que sous l'action des séismes. En plus de ces facteurs principaux, d'autres facteurs

rentrent également en ligne compte pour la conception, tels que le fluage du béton, les variations de température...

### Déplacement du bâtiment relatif au placement du noyau central :

a) le comportement de l'immeuble sous l'action des forces extérieures est favorable du fait qu'on a un faible déplacement.

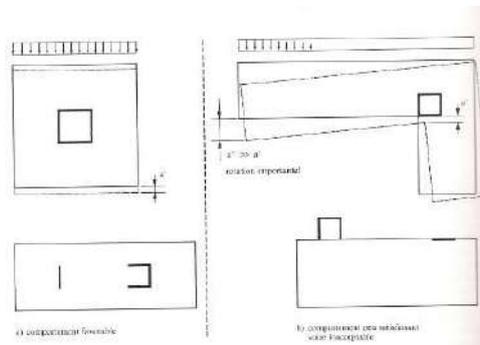


Figure 3.22 Répercussions du positionnement du noyau central sur le comportement de la structure soumise aux forces extérieures

b) on remarque une rotation importante de l'immeuble autour de son noyau central sous l'effet des forces extérieures. Ce type de positionnement n'est donc pas satisfaisant.

Le positionnement du noyau et des murs de refends est donc crucial pour la stabilité de l'immeuble.

### Déformation du noyau central sous l'action de forces extérieures :

La représentation ci-dessous nous montre ce qu'il faut éviter ; c'est-à-dire un noyau central soumis à la flexion, à la torsion et au gauchissement, sous l'effet du vent, des séismes...

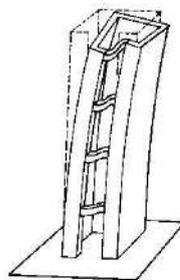


Figure 3.23 Déformation du noyau central

Ce type de déformation a ainsi lieu si le noyau ainsi que les murs de refends ne sont pas placés le plus symétriquement possible.

### Les structures à noyau central suspendu

Parmi les systèmes d'ossature à noyau, on peut citer les structures suspendues. Ce type d'ossature est apparu à la fin des années cinquante. L'idée qui a présidé à cette conception est de ramener au noyau central en béton armé la totalité des efforts de compression et d'avoir en façade des suspentes légères travaillant en traction qui, contrairement aux poteaux classiques, obstruaient très peu la visibilité. Pour situer le gain de poids apporté par cette solution, dans le cas d'une ossature de vingt étages, la section des suspentes est de l'ordre du sixième de la section totale des poteaux nécessaires pour supporter les charges verticales dans une structure classique de même importance. L'inconvénient de ces structures, aux façades très légères, est la grande sensibilité des suspentes aux variations de température et les dispositions particulières qu'il y a lieu de prévoir concernant la protection des suspentes vis-à-vis de l'incendie. Ajoutons les précautions qu'il convient de prendre au cours du montage afin de régler l'horizontalité des planchers au fur et à mesure de leur réalisation, les suspentes s'allongeant sous l'action des charges permanentes.

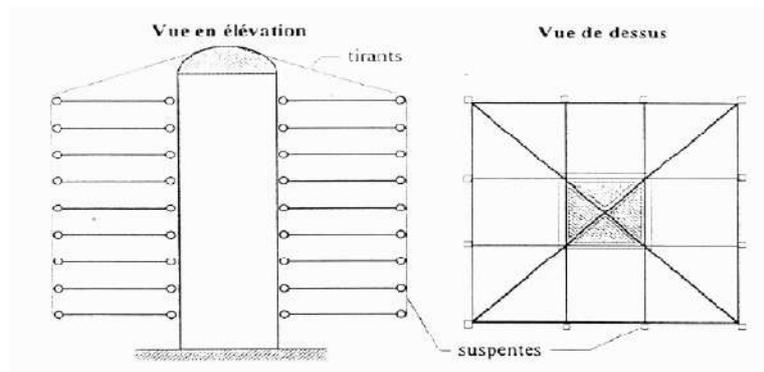


Figure 3.24 Schéma d'une structure suspendue

Les efforts horizontaux du vent agissant sur les façades et, le cas échéant, les séismes, sont transmis au noyau par les diaphragmes horizontaux que constituent les planchers. Dans le noyau, s'ajoutent aux efforts normaux dus aux charges permanentes et d'exploitation les efforts normaux résultant de la flexion du noyau. Cette dernière condition limite la hauteur

économiquement réalisable d'une telle structure. Il semble que le record de hauteur de ce concept d'immeuble appartienne à la Standard Bank Centre (1970) à Johannesburg, avec un total de 35 étages. On peut citer des exemples d'immeubles conçus par des systèmes à noyau comme la tour GAN, la tour MONPARNAS et la tour NOBEL toutes se trouvant en France, ou ce système est très répandu.



Figure 3.25 La tour GAN, Paris, France, 1974.

### 3.4.2 La structure en tube

#### Les systèmes « tubes » :

Comme nous l'avons déjà mentionné, les forces horizontales dues à l'action du vent ou des séismes qui agissent sur les bâtiments élevés sont importantes. Lorsque le plan de l'immeuble est compact (proche du carré ou du cercle), on adopte comme système statique celui d'une poutre encastree dans le sol. Il est donc logique de placer la structure résistante le plus loin possible du centre de gravité du plan du bâtiment. On utilise ainsi l'enveloppe extérieure, formée de poutres et de poteaux, pour la reprise des efforts dus aux forces horizontales. Le système structural consiste alors en un double tube rigide encastree dans le sol, d'où le nom de structure en tubes donné à ces systèmes. Cette disposition des poteaux, dans le noyau central et dans les façades, offre une liberté totale pour l'aménagement des surfaces de plancher (fig.26 a)). Des immeubles pouvant atteindre 100 étages et 400 m de hauteur ont été réalisés selon cette conception, l'exemple le plus connu étant celui des tours jumelles du World Trade Center à New York.

La rigidité de la structure est celle du tube extérieur, composée d'une rigidité flexionnelle due aux parois perpendiculaires au vent (les ailes du tube fléchi) et d'une rigidité en cisaillement due aux parois parallèles au vent (les âmes du tube fléchi). Ces parois constituent des panneaux

rigides du fait que tous les poteaux sont liés entre eux par des contreventements de façade en croix de St-André (fig. 3. 26 (b)) ou que les poteaux et les sommiers de façade constituent des cadres rigides (fig. 3.26 (c)). Cette rigidité au cisaillement des parois est nécessaire pour que la structure fonctionne comme un tube résistant aux forces horizontales.

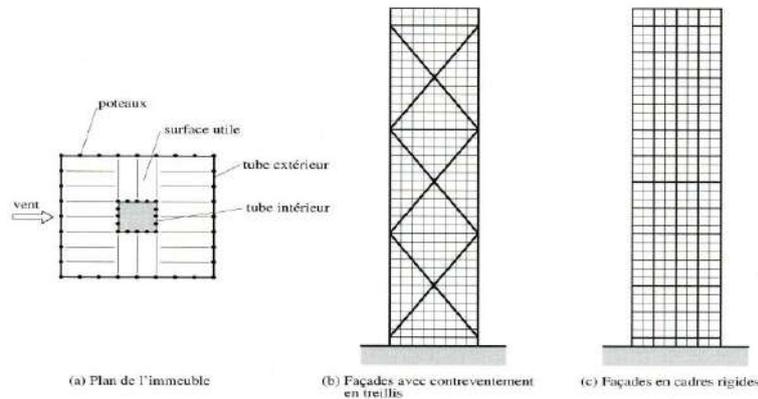


Figure 3.26 Structure en tube

Afin de créer un bâtiment de grandes dimensions, la juxtaposition de plusieurs tubes revêt un intérêt particulier dans la conception d'immeubles de grande hauteur, car avec cet ensemble de tubes appelé structure en tubes modulaires, on constate une amélioration de la répartition des forces axiales agissant dans les poteaux par rapport aux structures en tubes concentriques. Ce système a été utilisé en 1974 pour la construction de l'un des immeubles les plus hauts du monde (442 m), la tour Sears à Chicago (fig. 3.27). La base est formée de neuf mégamodules de 23 m de côté. Les modules, de hauteurs différentes, donnent un aspect particulier à l'immeuble.

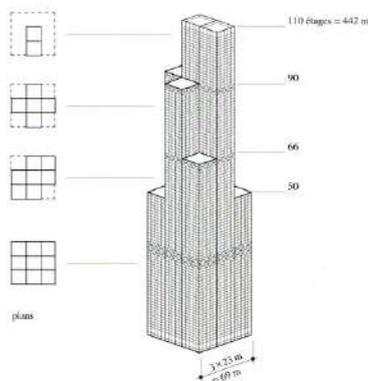


Figure 3.27 Structure en tube modulaires tour Sears à Chicago

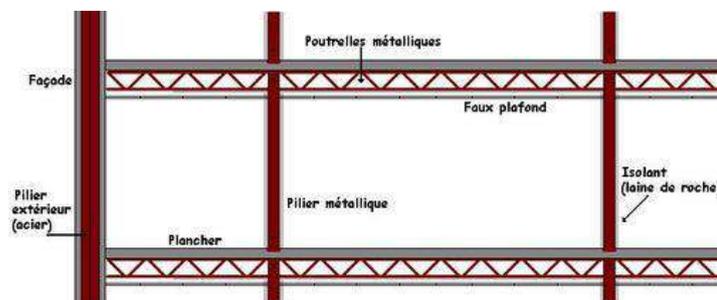


Figure 3.28 Structure en tube du World Trade center

Les écartements courants entre poteaux varient de 3 à 5 m. Ils peuvent être plus grands au niveau du sol, afin d'autoriser des ouvertures plus larges nécessaires pour les accès à l'immeuble. Il faut prévoir, à cet effet, des dispositions de raccordement entre points de concours des poteaux par une ceinture rigide (généralement en treillis). Ces systèmes tubes ont été très couramment utilisés en Amérique du Nord (Canada et Etats-Unis) et couvrent des immeubles de 30 à 110 étages.

Dans la structure en tube le rôle structural dévolu au noyau est en partie reporté sur l'ossature extérieure de l'édifice : celle-ci n'a plus seulement un rôle d'isolant du milieu intérieur mais aussi celui de rigidifier. En effet, au lieu d'être simplement en aluminium, la façade est ici une sorte de colossal mur porteur d'acier dans lequel passent de nombreux piliers qui prennent pieds des centaines de mètres plus bas directement dans le sol. C'est donc pour cela que ce type de structure est appelé « tube » car le bâtiment se comporte comme un gigantesque tube creux. Rigidifiée, la façade peut donc supporter l'ensemble des forces horizontales, c'est à dire la pression du vent, puis, elle transmet ces charges aux fondations.

Libéré des forces horizontales, il n'y a plus qu'à supporter les forces verticales : le poids de l'immeuble. Pour cela, ce sont simplement des piliers métalliques qui soutiennent chacun une partie du poids de l'étage du dessus ; ce qui permet d'avoir une organisation beaucoup plus libre qu'avec un noyau central car la localisation des piliers s'adaptera au plan que l'on veut donner. Néanmoins pour des raisons pratiques, il existe toujours un noyau central qui sert à loger les ascenseurs, cages d'escaliers mais sans rôle physique. Puis, il n'y a plus qu'à relier les piliers par des poutrelles métalliques et y disposer le plancher : une étroite dalle de béton.



Coupe d'un étage en structure "Tube"

Figure 3.29 Coupe d'un étage en structure tube

La structure en tube a en fait très vite évolué à cause de son principe même. En effet, en construisant en 1970 le World Trade Center, premier très haut gratte-ciel en tube, on s'est très vite aperçu que pour supporter les forces verticales qui s'exercent sur la façade, il a fallu faire traverser celles-ci par une trame formée d'une multitude de colonnes. La poussée prévue du vent était de 200 kilogrammes par m<sup>2</sup> de paroi et ce afin de minimiser les risques sur toute la hauteur de l'immeuble, il a fallu poser pas moins de 59 piliers par coté. Cela s'est alors fait au détriment du parement de vitres de la façade et de son esthétique.



Figure 3.30 Sur cette photo du sommet d'une des tours du World Trade Center la façade traversée de colonnes est bien visible. On comprend alors en quoi elles surplombent la paroi.

C'est pourquoi les ingénieurs ont rapidement fait évoluer ce type de structure, notamment grâce à des raidisseurs triangulaires qui permettent de faire disparaître de nombreuses colonnes. C'est le cas du John Hancock Center, contemporain des Twins :

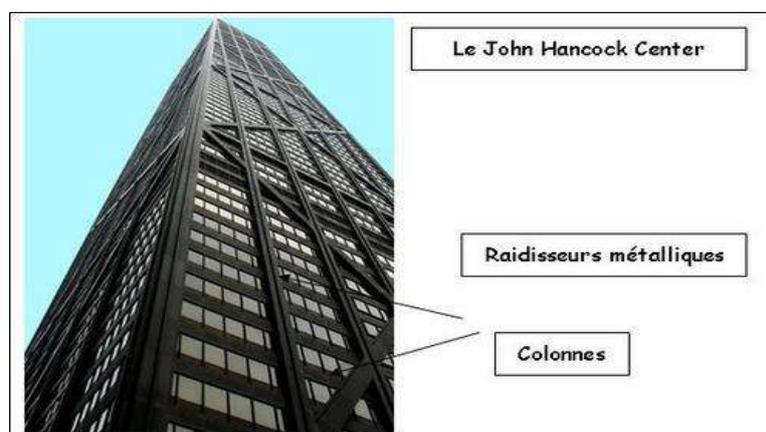


Figure 3.31 Raidisseurs triangulaires du John Hancock Center

**Avantages des structures en tube :**

- La construction à ossature métallique est très économique par rapport au béton, et de plus permet un considérable gain d'espace disponible pour l'occuper.
- Avoir une ossature en métal permet d'énormément réduire la masse de l'immeuble. Le gratte-ciel sera alors bien plus léger et pourra par conséquent s'élever plus haut encore.
- Toujours grâce à sa légèreté (par rapport au système à noyau central) cette structure permet de bien mieux résister aux séismes.

**Inconvénients des structures en tube :**

- Le métal est extrêmement sensible à la chaleur.
- L'autre inconvénient de taille est la superficie prise par les fondations. Ici les fondations ne sont pas formées d'un pilier central mais de centaines de petits piliers ; la conséquence est donc la nécessité de creuser un trou non seulement profond mais aussi extrêmement étendu.

**3.4.3 Systèmes porteurs particuliers****3.4.3.1 Structure à treillis alternés**

Dans certains bâtiments où une grande distance entre poteaux est nécessaire, la hauteur statique des sommiers devient un inconvénient, car elle augmente considérablement la hauteur totale du bâtiment. On peut résoudre ce problème en appliquant le système dit à treillis alternés. Ce système (fig. 3.32) ne comprend que des poteaux extérieurs. Les sommiers superposés sont reliés deux à deux par un treillis de façon à former une poutre de la hauteur d'un étage. Il en résulte des planchers de faible épaisseur mais de grande rigidité flexionnelle.

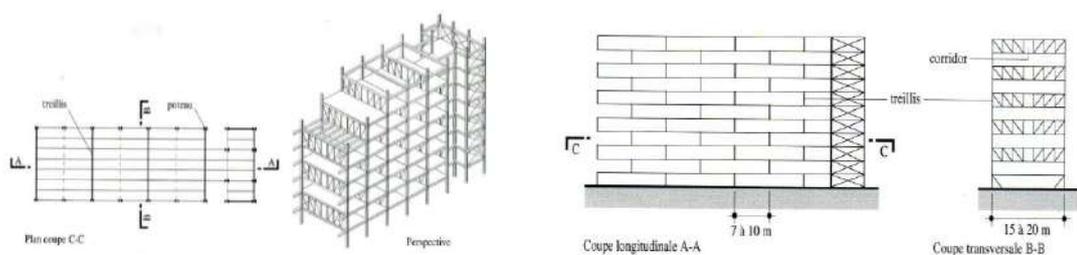


Figure 3.32 Systèmes porteurs à treillis alternés

De plus, par la disposition en quinconce (ou alternée) des poutres à treillis, on obtient un espacement des cloisons intérieures égal à deux fois l'écartement des sommiers du plancher. Le passage à travers ces cloisons est réalisé en réservant dans les poutres à treillis des panneaux rectangulaires rigides (Vierendeel) au droit des couloirs ou des portes.

Ces poutres à treillis constituent des cadres rigides avec les poteaux extérieurs pour la stabilité transversale du bâtiment en transmettant les forces dues au vent aux fondations par l'intermédiaire du plancher rigide horizontalement puis des treillis adjacents du niveau inférieur. Dans le sens longitudinal, la stabilité est assurée par des cadres à étages multiples ou par des contreventements.

Ce type de structure, dérivé des systèmes porteurs à cadres rigides, s'applique principalement à des bâtiments longs avec des dispositions répétées, tels qu'hôtels, hôpitaux, parkings couverts ou écoles.

### 3.4.3.2 Bâtiments-ponts

On appelle bâtiment-pont une structure reposant sur des points d'appui très espacés de façon à enjambrer une grande distance, ce qui permet une utilisation optimale des surfaces ou le passage par-dessus un immeuble existant. Le bâtiment est conçu comme un pont de grande portée dont toute la hauteur est utilisée pour constituer la structure porteuse. L'exemple le plus connu est le bâtiment de la Federal Reserve Bank à Minneapolis, un bâtiment-pont de 84 m de portée. Les charges des 12 étages de la partie inférieure sont reprises par deux arcs paraboliques concaves tendus fixés aux extrémités de deux poutres à treillis de 8.50 m de hauteur qui reprennent les réactions horizontales des arcs. Le bâtiment est supporté par quatre poteaux situés aux extrémités des poutres à treillis. Pour la partie supérieure qui pourrait être réalisée en deuxième phase, les charges seront reprises par un arc rigide convexe comprimé disposé en sens inverse de l'arc inférieur et dont les réactions horizontales soulageront la sollicitation initiale des poutres à treillis.

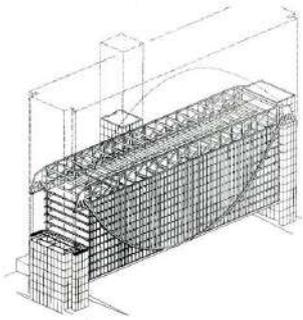


Figure 3.33 structure d'un Bâtiment-pont



Figure 3.34 La Federal Reterce Bank à Mineapolis

## 4. Les immeubles de grande hauteur

### Introduction

Un bâtiment de grande hauteur appelé aussi tour ou gratte-ciel est un bâtiment haut utilisé comme immeuble résidentiel, immeuble de bureaux ou pour d'autres fonctions tel que hôtel, commerce de détail ou à des fins multiples combinées.

Les immeubles de grande hauteur sont devenus possibles avec l'invention de l'ascenseur et des matériaux de construction pas chers et plus abondants. Les matériaux utilisés pour le système structurel des immeubles de grande hauteur sont le béton armé et l'acier.

La conception des bâtiments de grande hauteur est un véritable challenge compte tenu des problèmes relatifs aux systèmes de construction, systèmes de chauffage de ventilation et de climatisation, ainsi que les systèmes d'évacuations de cage d'escalier et d'ascenseur. Des études sont souvent nécessaires pour assurer le confort face au vent.

Les structures de grande hauteur posent aussi des défis de conception importants ingénieurs, en particulier si elles sont situées dans une région sismiquement active ou si les sols sous-jacents présentent des facteurs de risque.

### 4.1 Définitions

Selon le Code de la Construction et de l'Habitation, un **immeuble de grande hauteur**, abrégé en « IGH », est un corps de bâtiment dont le plancher bas du dernier étage se situe à plus de 28 mètres du sol utilisable par les engins de secours pour les immeubles publics et professionnels, et à plus de 50 m pour les immeubles résidentiels.

Ces **immeubles de grande hauteur** sont classés en fonction de leur usage :

- GHA pour les habitations ;
- GHO pour les hôtels ;
- GHR pour les établissements scolaires ;
- GHS pour les immeubles destinés aux dépôts d'archives ;
- GHU pour les établissements liés aux métiers de la santé ;
- GHW1 pour les bureaux dont la hauteur se situe entre 28 et 50 m ;
- GHW2 pour les bureaux dont la hauteur est supérieure à 50 m ;

- GHX pour les bâtiments mixtes ;
- GHTC pour les tours de contrôle.

Quel que soit l'usage auquel il est destiné, l'implantation du bâtiment doit permettre un accès rapide aux engins des services publics de secours et de lutte contre l'incendie. La construction doit également disposer de suffisamment de dispositifs permettant de lutter contre les risques d'incendie (extincteurs, détecteurs de fumée, alarmes, issues de secours...). La réglementation IGH impose par ailleurs des dispositions particulières selon la classe de l'immeuble.

#### **4.2 Structure d'un immeuble de grande hauteur**

La structure a une place très importante dans la construction d'un gratte-ciel, car celle-ci, ainsi que la répartition des masses et les fondations, déterminera la hauteur que l'ouvrage pourra atteindre. Contrairement aux bâtiments n'ayant que peu d'étages qui reposent sur des murs porteurs, les tours de plus de 40 étages doivent résister aux vents puissants de hautes altitudes, et adoptent donc une armature qui supporte le poids de la construction, sur laquelle les murs sont fixés. On distingue donc plusieurs structures qui permettent d'atteindre différentes hauteurs et qui répondent à différentes contraintes :

- 1 le noyau central
- 2 La technique des prismes en faisceaux
- 3 Les ossatures extérieures
- 4 L'exosquelette et les structures hyperboloïdes
- 5 L'exemple de la plus grande tour du monde : le burj khalifa

##### **4.2.1. La technique du noyau central**

La technique du noyau central pour construire un gratte-ciel est la plus utilisée à ce jour. Celui-ci parcourt le bâtiment sur toute sa hauteur, et est l'élément assurant la rigidité de la tour. A l'intérieur de celui-ci se trouvent les réseaux d'eau, d'électricité et les ascenseurs et escaliers. La structure porteuse concentrée dans le noyau est construite en béton armé. De ce noyau partent des poutres qui vont jusqu'à la façade de la tour et qui ont pour but de soutenir le plancher, et de rediriger les forces exercées par le vent vers le noyau. Les gratte-ciels à noyau central classiques peuvent atteindre environ 50 étages, 70 en doublant ou triplant la structure de la base.

Seulement cette structure a des limites ; en effet, pour gagner des étages et construire de plus en plus haut, il faut progressivement augmenter la taille du noyau, et donc la superficie de la base du gratte-ciel. Le problème est que lorsque la base est très large, les appartements situés juste autour du noyau sont invendables car ils sont trop éloignés du bord et ne reçoivent donc pas de lumière extérieure. Le premier avantage d’habiter dans un gratte-ciel étant la vue souvent impressionnante.



Figure 4.1 La tour Montparnasse

La tour Montparnasse, malgré son impopularité, est le premier gratte-ciel moderne parisien. Sur la photo, on peut voir son noyau central, autour duquel sont construit l’armature et le revêtement extérieur qui n’a donc aucune fonction portante puisqu’il sert juste de façade et est relié au noyau via le plancher. Ce modèle de tour “carré” est aujourd’hui le plus répandu et traditionnel, sa technique de construction étant connue et maîtrisée depuis le siècle dernier.

#### **4.2.2. La technique des prismes en faisceaux**

Une structure différente est l’assemblage de plusieurs fines tours qui constituent un gratte-ciel entier. Cette structure utilise le principe des tubes en faisceaux : si une brindille seule est fragile, un fagot de brindilles est solide. De la même façon, utiliser plusieurs tours ayant chacune une structure respective permet à l’assemblage d’avoir une tour très solide surtout au niveau de sa base, et de construire plus de 100 étages.

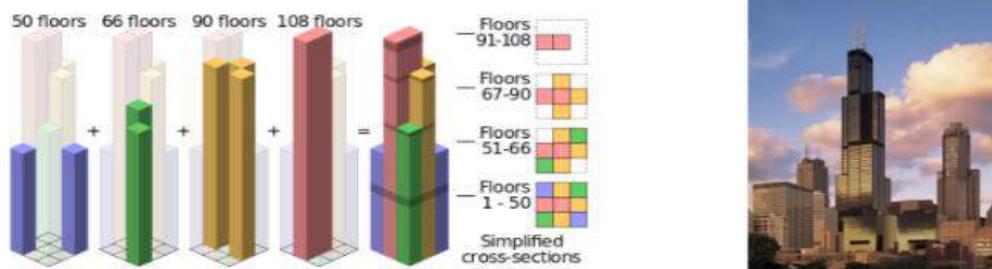


Figure 4.2 Structure de la tour Willis

La Willis tower ou Sears Tower de Chicago illustre bien la structure des tubes en faisceaux, puisqu'elle est constituée de 9 tours s'élevant chacune à des hauteurs différentes et qui reposent sur des caissons de béton armé, eux-mêmes arrimés solidement aux roches naturelles se situant sous le gratte-ciel, à l'aide de 144 pieux. Ces 9 tours permettent d'avoir une grande stabilité à l'aide d'un réseau de colonnes et de poutres dans chaque mur extérieur, qui agissent comme des tubes creux (Chaque petite tour devient donc un tube, et tous ces tubes sont assemblés pour constituer la Sears tower). Au fur et à mesure que la hauteur du gratte-ciel augmente, ainsi que la force du vent, s'arrêtent les fines tours une par une, réduisant ainsi la prise au vent de l'immeuble. Cette structure est considérée comme révolutionnaire puisqu'elle est une des plus efficaces pour résister au vent, même si il n'existe pas beaucoup de tours l'utilisant. Elle est idéale pour la ville de Chicago, qui porte le surnom de "ville des vents" avec des vents d'une vitesse moyenne de 26 kilomètres par heure dans la ville. Le défaut de cette structure, est cependant qu'elle est très lourde : 200 000 tonnes pour la Sears Tower.

#### 4.2.3. Les ossatures extérieures

Une autre façon de construire un gratte-ciel est d'utiliser une ossature extérieure, généralement en complément d'un noyau central. L'ossature permet de renforcer le noyau, notamment contre la force du vent sur la tour ; on peut donc atteindre des hauteurs plus hautes qu'avec un noyau classique. Elle est préfabriquée puis solidarifiée en général grâce à des boulons à haute résistance, et des amortisseurs absorbant la force du vent. Ce système permet d'atteindre une centaine d'étages. Il y en a de différents types b : une simple ossature métallique, des renforts triangulaires, des piliers d'angle qui permettent d'atteindre environ 120 étages.

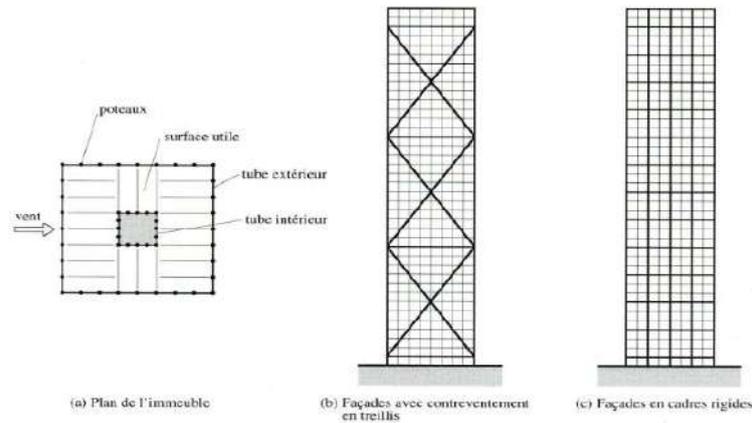


Figure 4.3 Système à ossature extérieure

Grâce à sa structure extérieure associée à un noyau central, les 2 tours de l'ancien World Trade Center pouvaient résister à des vents exerçant une pression de  $200\text{kg/m}^2$  en oscillant seulement de 28cm à leur sommet. Sur chaque côté extérieur, 60 poteaux creux étaient également espacés le long des 63.5m de l'immeuble pour un total de 240 poteaux, et étaient associés au noyau central au niveau du plancher de chaque étage par des traverses horizontales et des amortisseurs viscoélastiques situés dans le plancher, qui absorbent une partie des effets du vent.

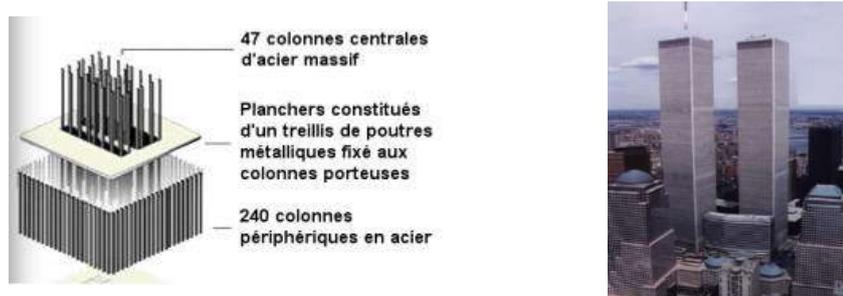


Figure 4.4 les tours du World Trade center

Ces traverses horizontales permettent de transmettre le surplus de force qui n'a pas pu être absorbé par les amortisseurs directement aux fondations, grâce aux 44 poteaux situés dans le noyau qui sont entièrement dédiés aux charges verticales. Cette double structure permettait donc aux deux tours de résister aux forts vents de haute altitude qui exerçaient leurs forces sur les façades.

Le John Hancock center, à Chicago, utilise des renforts triangulaires qui lui permettent d'atteindre la hauteur de 457 mètres, et de résister à des vents de plus de 200 kilomètres heure sur ses façades.



Figure 4.5 La tour du John Hancock center

#### 4.2.4. L'exosquelette et les structures hyperboloïdes

La technique de l'exosquelette pourrait s'insérer dans les structures extérieures, mais elle se distingue de celles-ci de par son originalité. En effet, la construction de tours à l'aide d'un exosquelette est très novatrice et est encore en cours de développement à ce jour. Ce principe structurel permet à l'ouvrage de résister à des efforts mécaniques particulièrement importants, même à des catastrophes naturelles (typhons, tremblements de terre), mais aussi de se protéger face aux agressions extérieures comme des attentats à l'aide d'avions. De plus, Cette structure revoit complètement l'usage de l'espace intérieur de la tour puisque tout celui-ci peut être utilisé, grâce à l'absence de structure interne. L'espace disponible peut donc être entièrement mis à disposition des utilisateurs. Cette technologie n'est pas encore entièrement maîtrisée par nos ingénieurs, mais elle est très prometteuse et a un avenir certain dans la construction de tours solides et de grandes hauteurs.

Les tours jumelles de Canton, en cours de construction à Shanghai, s'inspirent de la structure de l'ADN. Leur forme très particulière en forme d'escalier en colimaçon permet la suppression des échafaudages pour sa construction, ce qui la rend plus facile puisque la disposition de ceux-ci et leur déplacement pose toujours des problèmes compliqués lors de la réalisation d'un gratte-ciel. Cette structure d'exosquelette très moderne fait qu'elles sont dans le palmarès des 3 tours les plus hautes du monde, du haut de leurs 514 mètres. Elles sont composées de 131 étages chacune.

Un autre type d'exosquelette est la structure dite hyperboloïde. Elle est formée par des tubes rectilignes qui sont étirés en torsade autour du point central de la tour, lui donnant une apparence de sablier. Elle est, elle aussi, très résistante aux contraintes extérieures et, contrairement à pratiquement toutes les autres techniques de construction de gratte-ciel, elle est composée en grande partie de vide, ce qui réduit la résistance au vent de la tour.



Figure 4.6 Tours jumelles de Canton

#### 4.2.5. L'exemple de la plus grande tour du monde : le Burj Khalifa

Le Burj Khalifa, anciennement appelé Burj Dubaï, est à ce jour le plus grand gratte-ciel du monde, du haut de ses 829 mètres. Sa construction s'est achevée en 2009, et a coûté 1,5 milliards de dollars. Il comporte 163 étages habitables répartis jusqu'à 584,5 mètres de hauteur, les étages au-dessus sont réservés aux services. Elle est constituée de bureaux, d'un hôtel de luxe, d'appartements, et peut accueillir jusqu'à 35 000 personnes.



4.7 Burj Khalifa

La tour est inspirée de l'hymenocallis, ou ismène, une fleur cultivée dans la région. Elle a donc une forme tri-lobée, c'est à dire qu'elle est composée de 3 lobes, 3 éléments disposés autour du noyau central. Ce noyau est en forme d'hexagone (en rouge sur le schéma), mais il est trop effilé pour atteindre des hauteurs extrêmes. Il a donc été renforcé. Il est consolidé par les 3 ailes qui partent en Y et qui forment les couloirs, murs et espaces habitables (en noir). Ce système permet de construire plus haut sans agrandir considérablement la surface du gratte-ciel à sa base, et de cette façon il rend possible l'arrivée de lumière extérieure dans tout le bâtiment.

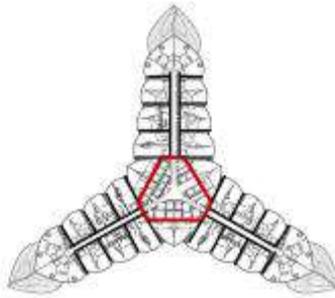


Figure 4.8 forme de la structure de Burj Khalifa

Cette structure en forme de Y fournit une très bonne stabilité au gratte-ciel. Les 3 ailes s'élèvent chacune à un niveau différent et s'amincissent progressivement jusqu'à leur sommet. La tour s'étend sur 27 niveaux hélicoïdaux qui diminuent progressivement la largeur de la tour. A l'instar de la technique des prismes en faisceaux et de la Willis Tower, cette diminution de la surface en supprimant des ailes au fur et à mesure que la hauteur augmente permet de réduire la prise au vent de la tour. Elle est donc plus aérodynamique, et les forces s'exerçant sur ses façades sont moins importantes. Le noyau central se poursuit jusqu'au sommet de la tour et se termine par une flèche pointée vers le ciel. La structure entière repose sur une plateforme de 3.70 mètres d'épaisseur, reposant elle-même sur 192 pieux enterrés à 50 mètres de profondeur dans des roches solides.

La structure du Burj Khalifa est donc l'aboutissement de plusieurs siècles de recherche et d'évolutions dans le domaine de l'architecture, toujours dans le but et l'obsession de vouloir construire plus haut, plus résistant et plus sécurisé, en réglant toutes les contraintes s'y opposant. Cette course à la performance et à la hauteur est toujours en cours, les structures sont de nos jours en constante évolution, avec de nouvelles techniques de construction qui apparaissent.

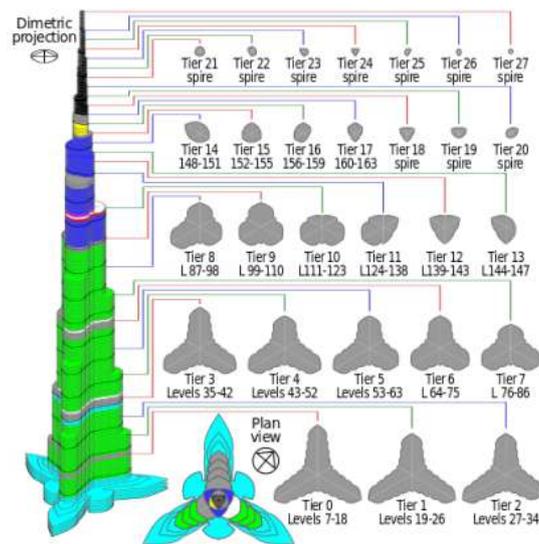


Figure 4.9 Coupes en plan de Burj Khalifa

### 4.3. Les fondations des IGH (contraintes du sol)

Une fondation a pour rôle de maintenir le bâtiment en surface. Pour cela, les fondations doivent reposer sur une matière solide : le sol rocheux. La plupart des gratte-ciel sont donc construits sur des roches magmatiques.

Une fois la couche de roche stable atteinte, il existe différentes techniques pour installer les pieux qui soutiendront l'édifice.

Cependant ce sol idéal peut se trouver à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Il est alors indispensable de creuser vers les profondeurs et de placer de longs piliers en béton armé dont la base est en contact avec le sol rocheux. Ces derniers prolongent le radier et permettent ainsi à la tour de ne pas s'affaisser.

#### 4.3.1 Techniques pour sols rocheux peu profonds

Une technique consiste à créer un mur qui fait la hauteur entre la roche et la surface et à l'enfoncer dans le sol. Cette technique convient pour des roches peu profondes, comme aux Etats-Unis. Une fois la roche atteinte, les fondations sont coulées. Ainsi, le building s'élèvera avec pour base une armature solide et directement en contact avec la roche.

### 4.3.2 Technique pour sols rocheux profonds

Une autre technique consiste à couler des pieux en béton dans le sol. Il en existe deux sortes :

1. Les pieux battus : on enfonce le coffrage dans le sol jusqu'à la roche, on met des treillages en fer, le béton est coulé, puis le coffrage est retiré. cette technique est utilisée pour des terrains alluvionnaires, limons, sables, graviers, ou argiles.

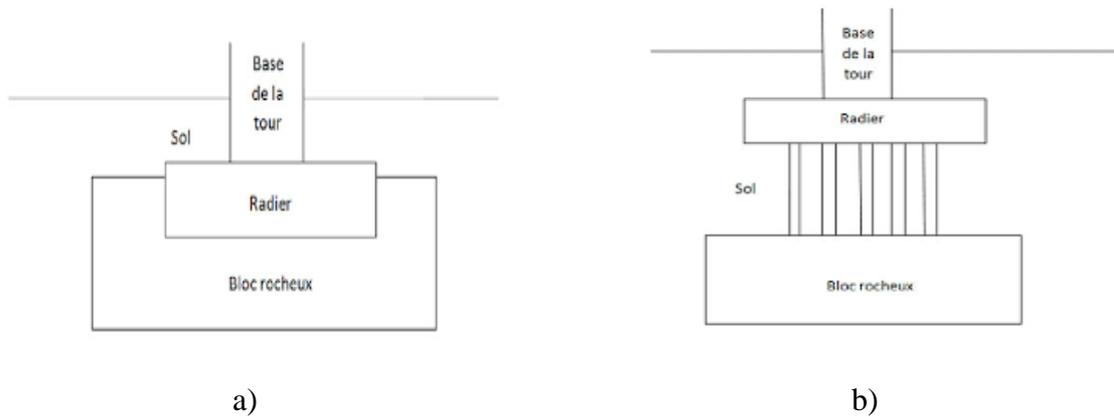


Figure 4.10 Technique de fondation pour les IGH

a) sol rocheux peu profond      b) sol rocheux profond

2. Les pieux forés simples (le sol est creusé jusqu'à la roche, des treillages de fer sont insérés, on coule le béton) cette technique est, elle, utilisée dans le cas d'un ancrage dans les terrains durs, secs et cohérents à grande profondeur. Cette technique est utilisée dans le cas où la couche de roche est très profonde.

### 4.3.3 Radier ou dalle de précontraintes

Le radier est un parallépipède rectangle rempli de béton armé, dont les mesures dépendent du bâtiment qui va être construit au-dessus. Le radier d'une tour doit faire à peu près un dixième de la hauteur de cette dernière.

Une fois les pieux enfoncés, on coule une base de béton : c'est elle qui portera l'ensemble de la charge du gratte-ciel. Ces charges font plusieurs milliers de tonnes.

Le radier de la tour supporte le poids de la structure et, par conséquent, se déforme : il s'affaisse en son centre et prend la forme d'un U, ce qui peut fragiliser le noyau central du gratte-ciel. Pour éviter ou limiter l'affaissement, le radier n'est pas exactement « plat » : la position de son

centre est légèrement inférieure à la position des extrémités du radier. La forme de la dalle ainsi « précontrainte » réduit la déformation et l'affaissement de la structure.

#### 4.4 Les contraintes de l'air

Plus la surface soumise au vent est importante, plus la force exercée sur celle-ci augmente. L'intensité de la force du vent est donc non seulement proportionnelle à la vitesse du vent mais aussi à la surface de contact.

Ce phénomène s'observe de la même manière, et de façon instinctive, pour une voile de bateau, ou pour un cerf-volant. Dans ces deux exemples, plus leur surface est grande, plus la force que le vent exercera sur ceux-ci sera importante. Cependant, les gratte-ciels doivent être pris à part. En effet, là où le cerf-volant ou la voile de bateau sont flexibles, les gratte-ciels doivent conserver une grande rigidité : d'une part pour éviter une oscillation trop importante, et d'autre part pour le confort évident des occupants. Leur conception est faite de manière à assurer un juste milieu entre une certaine flexibilité et une rigidité, les autorisant à pouvoir tenir même face aux vents les plus violents.

De façon générale, on observe aussi que les vents sont bien plus forts en altitude qu'au sol. On peut ainsi dire que la force exercée par le vent varie en proportion géométrique à l'augmentation des hauteurs. C'est donc particulièrement important dans le cas de gratte-ciel, cherchant à grimper toujours plus haut.

Ce genre d'édifices ne peut donc être aujourd'hui considéré stable que si sa hauteur n'est pas plus de 7 fois supérieure à la largeur de sa base. Cependant, ce principe reste néanmoins purement théorique et peu nombreux sont les architectes à le respecter. Pour donner un exemple, si cette contrainte était respectée, un gratte-ciel qui monterait à 500 mètres devrait avoir une base dont la largeur devrait faire, au moins, 72 mètres. Bien évidemment, une telle contrainte se voit rarement être respectée, à cause de la place immense qu'occuperait alors la base de la tour, mais aussi parce que la lumière du jour ne pourrait même pas éclairer un étage entier.

Architectes et ingénieurs doivent donc relever le défi de mettre au point de nouvelles formes ou d'utiliser des matériaux choisis pour leurs performances afin de résoudre les problématiques engendrées par cette contrainte que sont les forces du vent. Mettre une arête du bâtiment face au vent dominant peut être une des solutions les plus simples, cependant, les vents relevant relativement de l'aléatoire, la direction du vent change souvent.

#### 4.4.1 Les solutions employées

Les moyens mis en œuvre par les bâtisseurs des gratte-ciels pour permettre à de si grandes tours de résister à des phénomènes physiques.

##### a. Le Damper

Pour limiter au maximum les oscillations dues aux vents violents, les gratte-ciels possèdent des « damper » (amortisseurs) situés le plus souvent aux derniers étages de ces derniers. Ce sont d'importantes masses situées au sommet des gratte-ciels qui ont pour mission de lutter contre les oscillations provoqués aussi bien par le vent que par les séismes. Leur principe est simple : les masses se déplacent mécaniquement et jouent un rôle de contrepoids afin de stabiliser l'édifice. Ainsi elles se déplacent à la même fréquence que la tour avec un certain temps de retard, contribuant alors à la stabilisation du bâtiment. On peut trouver différents dampers :

- Un damper agissant mécaniquement : il s'agit d'une énorme boule d'une masse importante, le plus souvent attachée au bout d'un câble. Lorsque la tour s'incline, le damper se balance avec un temps de retard par rapport à l'oscillation de la tour et retient ainsi cette dernière, lui permettant de garder une certaine stabilité :
- Un damper agissant par l'intermédiaire de capteurs de mouvements : les mouvements sont captés par un détecteur, transmis à un ordinateur qui transmet les données à un moteur. Ce moteur actionne un vérin qui déplace une importante dalle de béton dans le sens inverse de l'oscillation.

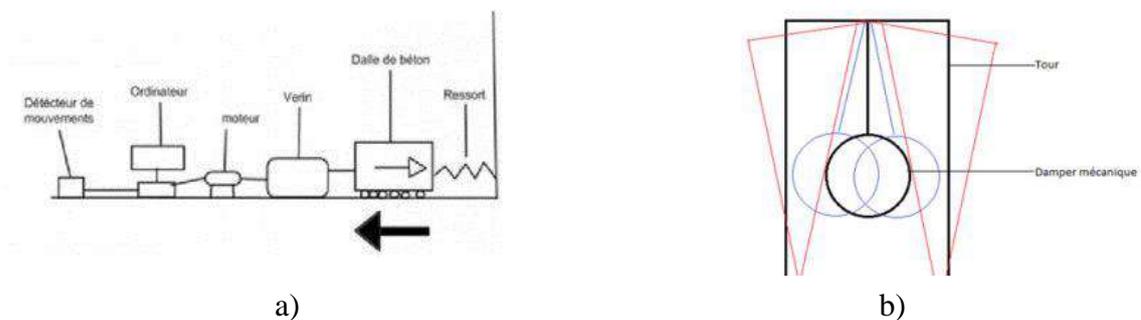


Figure 4.11 Damper a) avec capteurs de mouvement, b) mécanique

Les masses des dalles de béton varient en fonction des besoins de la tour. Le damper le plus impressionnant se situe sur la Taipei 101 à Taiwan, il pèse 660 tonnes. Il est constitué d'une masse ronde contrôlée par un ordinateur relié à des détecteurs de mouvements.

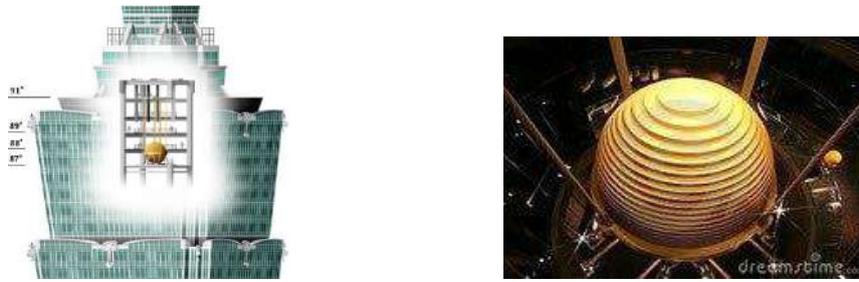


Figure 4.12 Le damper de la tour Taipei 101 à Taiwan

- Un damper hydraulique : les tours qui en sont équipées possèdent alors deux énormes réservoirs d'eau situés de chaque côté. Grâce à un détecteur de mouvements, un transfert d'eau va se faire d'un réservoir à l'autre afin de diminuer les oscillations. Cette technique est récente et très efficace car un déplacement d'eau est très rapide, de plus ces réservoirs d'eau peuvent être utilisés en cas d'incendie.

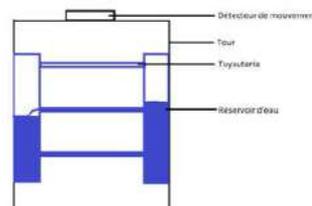


Figure 4.13 Damper hydraulique

Seules certaines tours sont équipées de dampers : celles soumises à des vents violents ou se situant dans des zones sismiques.

#### b. La forme du gratte-ciel :

Elle peut réduire considérablement la contrainte de traînée face aux vents, réduisant ainsi la force de pression du vent sur la tour. C'est l'aérodynamisme de l'édifice qui fait varier ce coefficient. En effet ce coefficient va par exemple être très faible pour une aile d'avion (0,005 à 0,010) et va être nettement plus grand pour une planche posée à la verticale (aux alentours de 1). Ainsi, certains nouveaux gratte-ciel ont une forme « aérodynamique » préférée à une forme classique (parallélépipède rectangle) possédant un fort coefficient de traînée.

**c. La surface de la base :**

D'autre part, la taille de sa base et la différence de surface entre la base et le sommet jouent un rôle sur l'oscillation de la tour. En effet une tour de forme pyramidale ne connaîtra presque aucune oscillation car les forces agissant sur la tour sont concentrées sur la base. Le poids de la structure est réparti sur l'ensemble des fondations et le vent n'a presque aucun effet car le coefficient de traînée de l'immeuble est faible à cause de l'inclinaison (le vent peut passer le long de l'édifice et être éjecté par le dessus facilement). La base étant grande, l'immeuble possédant des fondations solides, la force du vent est alors diminuée par la répartition des forces agissant sur le solide.

L'hôtel Ryugyong, en Corée du nord, possède une base triangulaire et la surface d'un étage de la tour diminue au fur et à mesure que l'on monte.

**d. Augmenter la raideur de la tour :**

Pour augmenter la raideur de la tour, l'idée est d'assembler plusieurs tours entre elles pour éviter que la tour cède face aux vents.

Ainsi, la Sears Tower est construite de sorte qu'elle se compose de plusieurs tours (le tout d'un seul bloc), la partie de la tour la plus haute étant située au milieu des autres tours plus petites, diminuant ainsi l'oscillation. Cette tour peut subir une oscillation allant jusqu'à 60cm.

**4.5 Résistance aux séismes des IGH**

Les séismes produisent deux sortes d'ondes : les ondes de volume dans le sol, et les ondes de surface. Ce sont ces dernières qui causent le plus de dégâts.

Il en existe deux sortes :

Les ondes Love qui créent des mouvements horizontaux de gauche à droite dans le sol.  
Les ondes Rayleigh qui se déplacent horizontalement, mais aussi verticalement ; leurs mouvements ressemblent à ceux d'une vague.

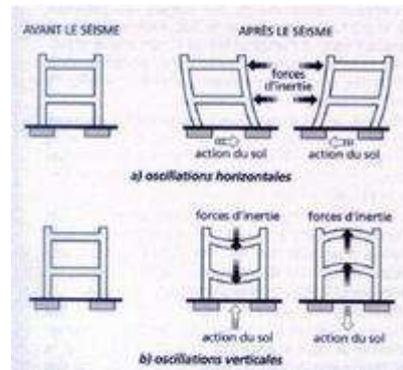


Figure 4.14 Oscillation verticale et horizontale du bâtiment

Les fondations des bâtiments se trouvant dans le sol, lorsqu'il y a un séisme, elles sont entraînées dans le mouvement. Les parties de constructions qui sont en élévation ne suivent pas directement le mouvement à cause de l'inertie : « l'inertie est le fait que les parties présentes en élévation ne suivent pas instantanément le mouvement et il s'ensuit une déformation de la structure » ; il y a donc un décalage. Ce décalage crée des déformations dans la structure du gratte-ciel. Les déformations dépendent aussi des forces de cohésion interne, dont l'élasticité des matériaux constituant la construction.

Le gratte-ciel doit également résister au phénomène de résonance : Lorsque la période, d'oscillation d'un sol donné, correspond à la période propre d'oscillation d'un bâtiment donné, celui-ci amplifie le mouvement : il y a mise en résonance. La résonance dépend principalement de la hauteur du bâtiment. Mais elle est aussi liée à la disposition des masses dans la construction : plus la masse est élevée dans les étages supérieurs plus la période de résonance sera grande. Ainsi, si à la suite d'un séisme le sol vibre à la même fréquence que la fréquence de résonance du bâtiment, ce dernier subira des vibrations avec des amplitudes très importantes. Le bâtiment subira tout d'abord une déformation élastique et dans le pire des cas une rupture si la limite de résistance du matériau en question est dépassée.

#### **Tenir face au séisme :**

Les fondations ne sont pas directement reliées au reste du bâtiment, il existe des isolations qui filtrent les oscillations sismiques : les appuis. Ils se trouvent entre les fondations et les superstructures, et possèdent une rigidité moindre par rapport à celle de la construction. Grâce à ce système, la période propre du bâtiment augmente ; la vitesse d'oscillation, quant à elle, diminue. Ainsi les appuis ne laissent passer que des oscillations de longue période à la

superstructure. Pour minimiser les mouvements des appuis, des amortisseurs sont, en plus, mis en place.

**Les mesures antisismiques :**

Les gratte- ciels les plus hauts ne possèdent pas de noyau central en béton armé ; la raison vient du manque de souplesse de ce type de matériau. Or, il est nécessaire d'avoir un minimum d'élasticité permettant aux buildings de cette dimension d'absorber les vibrations sans casser, ce qui est fourni, entre autres, par les matériaux métalliques. Des tests sismiques sont réalisés lors de la construction pour valider le choix de la structure : un des tests principaux est la création d'une maquette pouvant atteindre 10m de hauteur et subissant toutes sortes de simulations sismiques.

## 5 Les structures mixtes (aciers béton)

### Introduction

La combinaison la plus importante et la plus fréquente de matériaux de construction que l'on rencontre est celle qui concerne l'acier et le béton avec des applications dans les bâtiments commerciaux à étages multiples, les usines et les ponts. Dans les systèmes structuraux, l'acier et le béton peuvent être utilisés de manière composée, par exemple des noyaux de béton entourés par des profils creux en acier, aussi bien que comme structures mixtes, dans lesquelles les éléments en acier et en béton agissent en commun de manière mixte.

Ces deux matériaux, essentiellement différents, sont complètement compatibles et complémentaires vis à vis l'un de l'autre. Ils ont le même coefficient de dilatation thermique et sont une combinaison idéale pour la résistance, le béton résistant de manière efficace à la compression et l'acier à la traction. Le béton assure également une protection contre la corrosion et une isolation thermique de l'acier à température élevée, en plus il peut raidir les sections élancées en acier vis à vis du flambement et du déversement.

Dans les bâtiments à étages multiples figure 5.1, l'ossature en acier est couramment utilisée de manière conjointe avec du béton ; par exemple des poutres en acier avec des dalles de planchers en béton. Cette application est également utilisée pour les ponts routiers où l'on préfère normalement les dalles en béton. Le critère suivant lequel les éléments ou parties de structure de bâtiment devraient être réalisés entièrement en acier ou en béton armé ou mixte dépend des circonstances.



Figure 5.1 bâtiments à étages multiples

Il est un fait néanmoins, que les ingénieurs conçoivent de plus en plus de systèmes de constructions mixtes et constructions combinées en acier et en béton armé de manière à produire

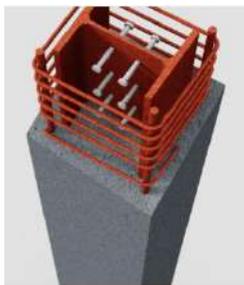
des structures plus efficaces en comparaison des conceptions où l'on utilise les matériaux de manière isolée.

Il convient d'ajouter que la combinaison d'un noyau en béton, d'une ossature en acier et de planchers mixtes est devenue la méthode de construction classique des bâtiments commerciaux à étages multiples dans plusieurs pays à travers le monde. Beaucoup de progrès ont été réalisés, par exemple au Japon où les ossatures combinant le béton armé et l'acier de structure sont les systèmes classiques pour les bâtiments élevés.

La raison principale de ce choix est que les sections et les éléments sont la meilleure combinaison pour résister aux charges répétitives des tremblements de terre qui exigent une grande résistance et une grande ductilité.

Les bâtiments constitués d'éléments en acier et d'éléments mixtes ont connu un regain d'intérêt pendant les années 80, avec en conséquence, une profusion de nouveaux concepts de constructions et de dispositions constructives.

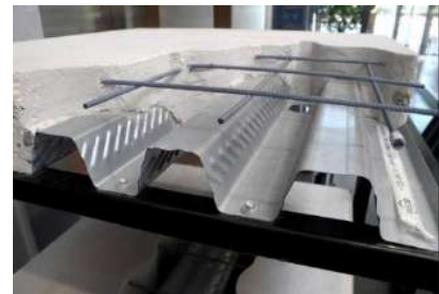
Si l'on considère uniquement des éléments mixtes simples pris de manière isolée, tels que des poutres isolées, des poteaux ou des dalles, figure 5.2, nous comprenons que, quoiqu'ils soient de grande qualité et soient très résistants, ils sont dans beaucoup de cas onéreux. En particulier dans les bâtiments où les poteaux sont faiblement espacés, les poutres de planchers ont des portées bien inférieures à 9 m et les chargements sont faibles.



a) Colonne mixte



b) Poutre mixte



c) planché mixte

Figure 5.2 Eléments mixte

D'un autre côté, les systèmes de constructions avec des planchers mixtes sont largement compétitifs si les portées augmentent jusqu'à 12, 15 et même 20 m. Évidemment, il existe une

demande pour des bâtiments où les poteaux sont plus espacés soit pour créer des volumes plus ouverts ou pour offrir une plus grande flexibilité dans l'aménagement des bureaux.

Un autre argument très important est que l'utilisation de profilés laminés, de tôles profilées en acier et/ou d'éléments mixtes préfabriqués accélère le montage. Pour une efficacité et une économie maximum il est nécessaire que les liaisons soient économiques à fabriquer et par conséquent à ériger sur le chantier.

Beaucoup d'experts pensent que les développements futurs dans les bâtiments en acier dépendent largement de l'utilisation de la construction mixte. Malheureusement ces deux matériaux de construction, l'acier et le béton, sont développés par deux industries différentes. Comme elles sont directement concurrentes, il est quelquefois difficile de promouvoir l'utilisation idéale de ces deux matériaux.

## **5.1 Avantages et inconvénients des structures mixtes**

### **5.1.1 Les avantages**

- La réduction du poids de la structure métallique
- L'augmentation de la rigidité en flexion du plancher
- La réduction de la hauteur des planchers
- L'amélioration appréciable de la résistance à l'incendie des poutres et solives métalliques
- Le monolithisme et la rigidité dans son plan d'une dalle de plancher mixte

### **5.1.2 Les inconvénients**

L'inconvénient principal des constructions mixtes est la nécessité de prévoir des connecteurs à l'interface entre l'acier et le béton.

Un autre petit inconvénient est que les constructions mixtes sont quelque fois plus compliquées à dimensionner et à mettre en œuvre que les autres méthodes de constructions, cela est particulièrement vrai pour les structures où l'ossature est continue et les ponts. Néanmoins cela est largement compensé par les avantages significatifs qui peuvent être obtenus.

## **5.2 Principe de fonctionnement**

D'une manière générale, une structure peut être définie comme mixte si, au niveau de la plupart de ses éléments (poutres, poteaux, assemblages, dalles), elle associe deux matériaux de natures et de propriétés différentes, ici l'acier et le béton.

Il convient en particulier de distinguer les structures mixtes des structures hybrides, parfois appelées improprement mixtes, composées d'éléments homogènes de matériaux différents, par exemple un bâtiment avec un noyau en béton armé sur lequel prend appui une charpente constituée exclusivement de poutres et poteaux en acier.

En fait, ce qui est tout à fait spécifique du fonctionnement d'un élément mixte, c'est l'association mécanique des deux matériaux, acier et béton, par l'intermédiaire d'une connexion située à l'interface des matériaux, qui va accroître à la fois la rigidité et la résistance de l'élément.

On peut illustrer simplement l'effet d'une connexion en considérant l'exemple de la flexion élastique de deux poutres, de même section rectangulaire et d'un même matériau pour simplifier, dont l'une est supportée par l'autre ; dans un cas on suppose qu'il n'y a pas de liaison à l'interface des poutres, dans l'autre que la solidarisation est parfaite.

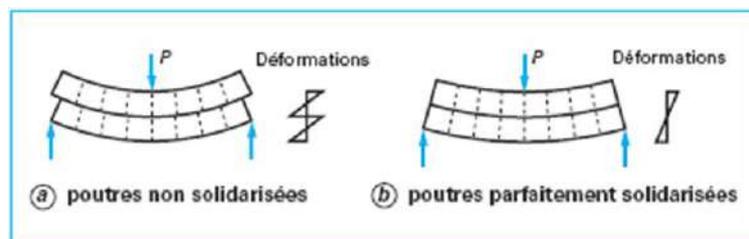


Figure 5.3 Effet de solidarisation entre deux poutres en flexion élastique

Il convient de préciser qu'en général, dans les éléments mixtes, l'adhérence entre le composant en acier et celui en béton n'existe pas naturellement, et que la solidarisation doit être obtenue au moyen d'organes de liaison, appelés « connecteurs ».

Il existe une grande variété de connecteurs en construction mixte mais, à l'heure actuelle, en bâtiment, la connexion est le plus souvent réalisée par des goujons à tête, fixés sur l'élément métallique par soudage électrique à l'aide d'un pistolet adéquat (figure 5.4a).

On peut utiliser des cornières (fabriquées par pliage à froid), mais présentant une résistance moindre que les goujons soudés (figure 5.5b).

On peut envisager également, mais cela est assez rare en bâtiment, l'utilisation de butées soudées, en forme de tasseau ou de tronçons découpés dans des profilés en cornière (figure 5.4c et 5.4d), également dans des fers en T.

Le rôle principal des connecteurs est d'empêcher, ou au moins de limiter, le glissement pouvant se produire entre l'acier et le béton, c'est-à-dire le déplacement relatif entre les deux

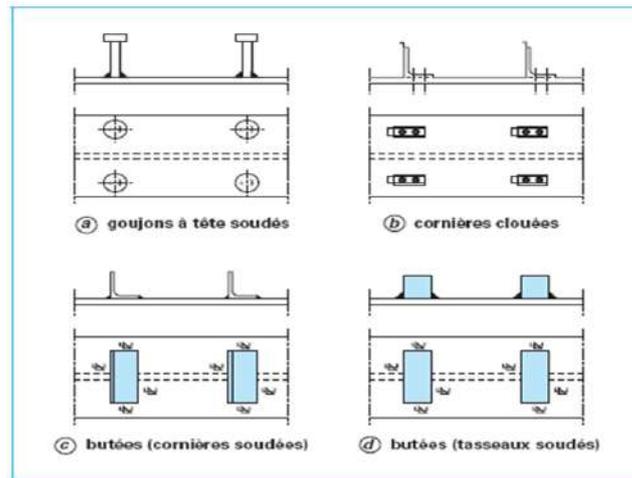


Figure 5.4 Type de connecteurs utilisés en bâtiment

matériaux parallèlement à leur interface. Selon l'importance de l'effort de cisaillement longitudinal à transférer entre les deux matériaux, on sera amené à distinguer par la suite deux modes de connexion, à savoir la « connexion complète » et la « connexion partielle ».

### 5.3 Eléments de la construction mixte

#### 5.3.1 Planchers mixtes

De manière classique, une sous-structure de plancher mixte est constituée par une **poutraison métallique** recouverte par une **dalle en béton**, connectée à la poutraison, le fonctionnement structural de l'ensemble répondant au schéma suivant :

- **La dalle**, soumise directement aux charges (charges permanentes et charges d'exploitation), les transmet aux poutres du plancher par flexion locale ;
- **Les poutres**, soumises aux efforts d'appui de la dalle, reportent ces efforts par flexion générale.

La figure 5.5 montre des sections différentes de poutres mixtes de plancher en présence d'une dalle pleine en béton armé. La forme en T est la plus classique (figure 5.5a), comme le résultat direct de l'association, par des connecteurs, de la dalle et d'un profilé en acier.

La présence d'un renformis (figure 5.5b), on peut trouver des réalisations avec des poutres métalliques en caisson, éventuellement constituées d'un profilé creux laminé (de géométrie rectangulaire) (figure 5.5c) ; cette solution peut offrir l'avantage d'une plus grande stabilité au déversement, y compris en phase de construction.

La solution de poutres mixtes partiellement enrobées, c'est-à-dire consistant à remplir de béton armé les deux chambres du profilé (figure 5.5d).

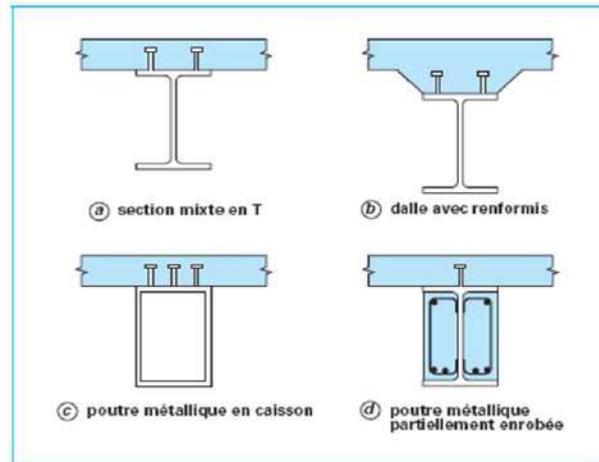


Figure 5.5 Différentes sections de poutres mixtes

Pour réaliser une dalle pleine, il est possible d'utiliser des éléments préfabriqués qui permettent un montage très rapide tout en évitant la mise en place d'échafaudages (figure 5.6) : des prédalles en béton de faible épaisseur.

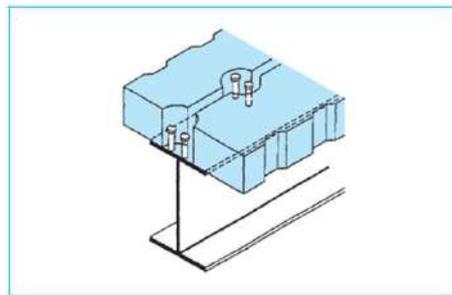


Figure 5.6 Utilisation de dalle préfabriquée

Un autre système de dalle consiste à utiliser un bac en tôle mince profilée à froid (figure 5.7) qui sert de coffrage pour couler la dalle, puis, après durcissement du béton, joue le rôle d'une armature.

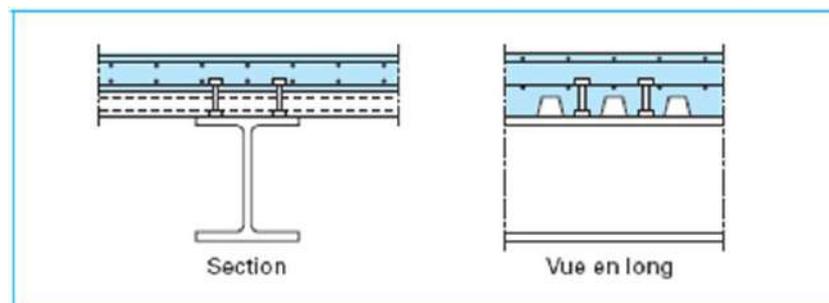


Figure 5.7 Profilé connecté à une dalle mixte

L'adhérence du béton avec le bac est obtenue par liaison mécanique due à la présence de bossages ou d'embossages sur les parois des ondes de la tôle (figure 5.8a).

Egalement par liaison de frottement en utilisant des ondes de formes rentrantes (figure 5.8b) ; cette adhérence se trouve renforcée par l'ancrage d'extrémité assuré par la présence de goujons soudés ou autres connecteurs (figure 5.8c), ou assuré par une déformation à l'écrasement partiel des ondes lorsque celles-ci sont de formes rentrantes (figure 5.8d).

Durant le bétonnage de la dalle, il conviendra de se prémunir du risque de déversement des poutres supports en acier.

Un étaieement des tôles ou des prédalles est nécessaire lorsqu'elles ne peuvent supporter le poids de béton frais et la surcharge due aux opérations de mise en œuvre sur la distance séparant les poutrelles (portée de dalle), en général au-delà de 2,5 à 3.00 m.

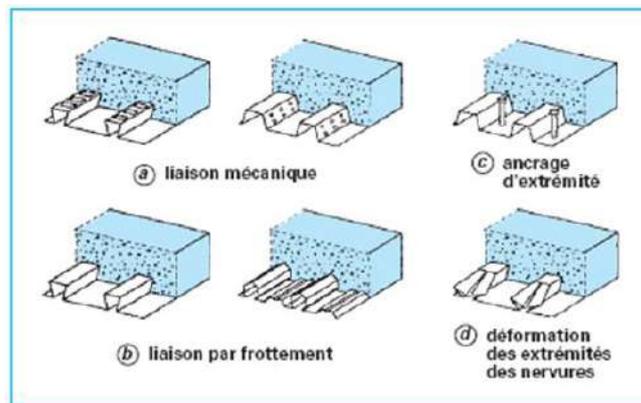


Figure 5.8 Mode d'adhérence des dalles mixtes

Par ailleurs, l'association de dalles mixtes avec des poutres métalliques à âmes ajourées, dites parfois « poutres alvéolaires », avec des hauteurs d'ouverture rectangulaire ou circulaire de 40 à 50 cm (figure 5.9).

Elles permettent le passage des gaines techniques (climatisation, désenfumage, etc.)

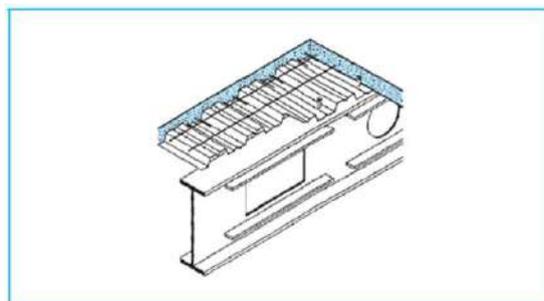


Figure 5.9 Dalle mixte connectée à une poutrelle à âme ajourée

Un dernier type de plancher doit être signalé, qui s'est beaucoup développé dans les pays scandinaves à partir des années 1980 et qui a fait son apparition sur le marché français assez récemment : le système consiste à utiliser des dalles alvéolaires en béton préfabriquées, (figure 5.10).

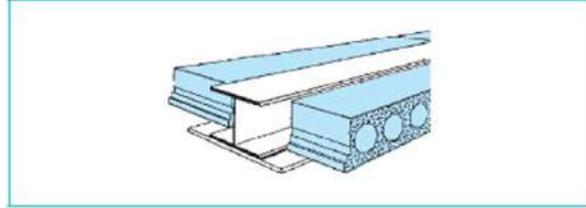


Figure 5.10 Dalle alvéolée précontrainte intégrée à une poutre en acier

### 5.3.2 Poteaux mixtes

Il existe une grande variété de poteaux mixtes.

Les plus courants présentent une section carrée ou rectangulaire, obtenue à partir d'un profilé en acier, de type I ou H, enrobé totalement de béton (figure 5.11a) ou partiellement enrobé dans les deux chambres comprises entre l'âme et les semelles (figure 5.11b).

La section cruciforme (figure 5.11c) fait appel à deux profilés, identiques ou non, dont l'un est découpé en deux T qui sont ensuite ressoudés de part et d'autre de l'âme du second. Vu le caractère quasi isotrope de la résistance au flambement de ce type de poteau, il peut être intéressant de l'utiliser dans des zones de forte sismicité.

Si l'on revient au cas d'un poteau rectangulaire, totalement ou partiellement enrobé de béton, avec un profilé de grande hauteur, il peut être avantageux de renforcer le profilé dans chaque chambre par un ou plusieurs petits profilés en H ou en T à ailes épaisses, soudés sur l'âme (figure 5.11d) ;

La résistance au flambement va s'en trouver améliorée, et en particulier de manière appréciable vis-à-vis de l'incendie.

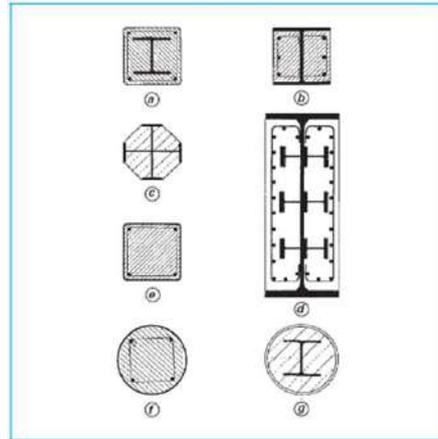


Figure 5.11 Type de poteaux mixtes

On rencontre également des poteaux mixtes constitués de profilés creux remplis de béton, de forme carrée, rectangulaire ou circulaire (figures 5.11 e et f).

La présence de barres longitudinales d'armature (dont le pourcentage ne dépasse guère 5 à 6 %).

Dans certains cas, il arrive qu'un profilé en acier, de section I ou H, soit positionné à l'intérieur d'un profilé creux circulaire (figure 5.11 g).

### 5.3.3 Assemblages mixtes

Vu la variété des éléments en acier ou mixtes de types poutre et poteau, il existe nécessairement une très grande variété d'assemblages avec des composants acier et béton, qui se trouve accrue du fait des différents moyens d'attache envisageables (par boulonnage ou soudage) et des différentes conceptions de fonctionnement que l'on peut adopter dans une structure en fonction de la rigidité et de la résistance des assemblages.

Quelques exemples classiques d'assemblage de type poutre-poteau sont représentés sur la figure 5.12, en présence d'une dalle mixte et d'une armature présentant une ductilité suffisante (un simple treillis soudé, placé dans la dalle pour limiter la fissuration due au retrait).

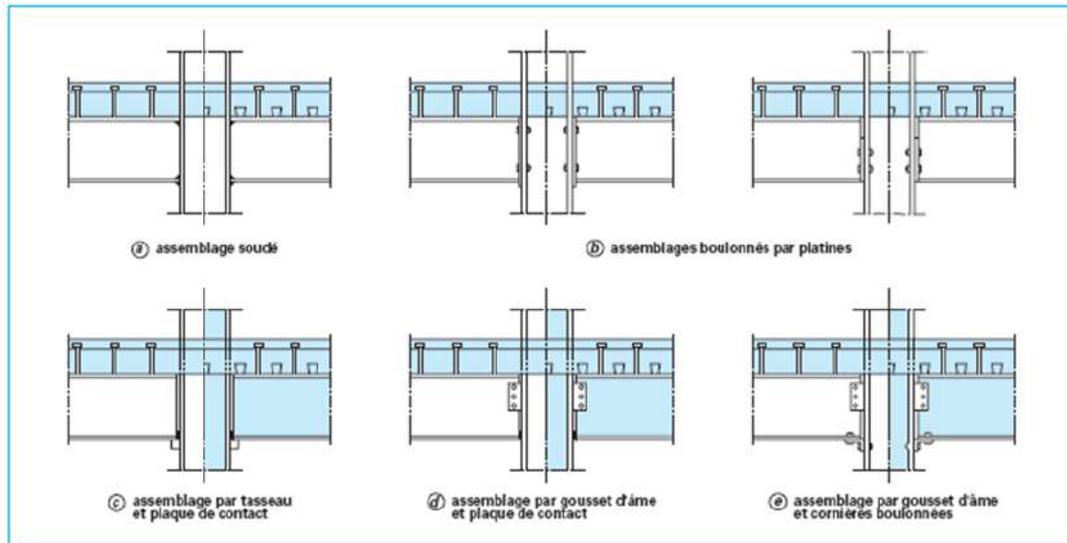
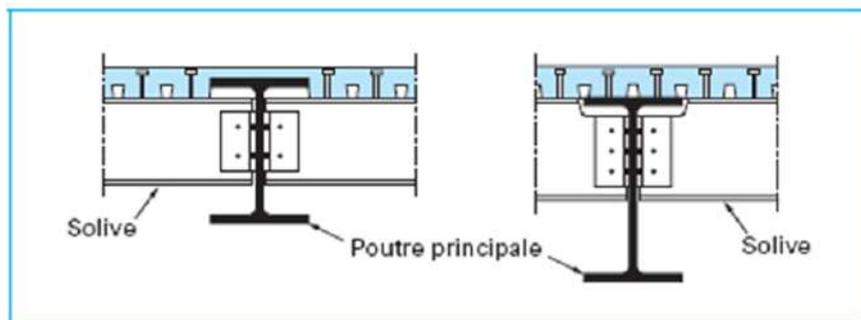


Figure 5.12 Assemblage de types poutre poteau pour des ossatures mixtes semi-continues  
 Pour les assemblages de type poutre-poutre, au niveau d'un plancher, entre solives et poutre principale, de simples cornières d'âme boulonnées peuvent être utilisées, comme le montre la figure 5.13.



5.13 Assemblage de type poutre-poutre de plancher mixte

Des ossatures mixtes continues, fonctionnant en portiques sans la contribution d'un système de contreventement, peuvent être conçues pour certaines constructions industrielles (par exemple, en présence de ponts roulants) ou dans des zones exigeant un dimensionnement de type sismique (pour mémoire, le système d'ossature en portique constitue l'un des plus performants au plan dissipatif pour absorber l'énergie apportée à une structure par une action sismique).

Figure 5.14

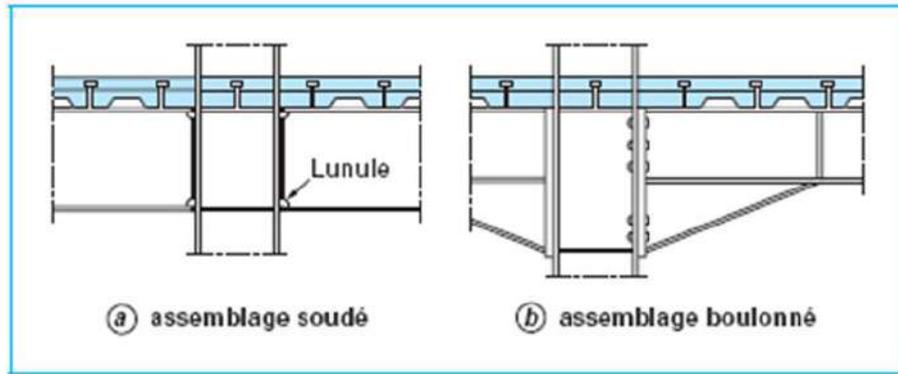


Figure 5.14 Assemblage mixte résistant pour zone sismique

Lorsque les poteaux mixtes sont totalement enrobés de béton, la réalisation de l'assemblage se trouve en général simplifiée (figure 5.15).

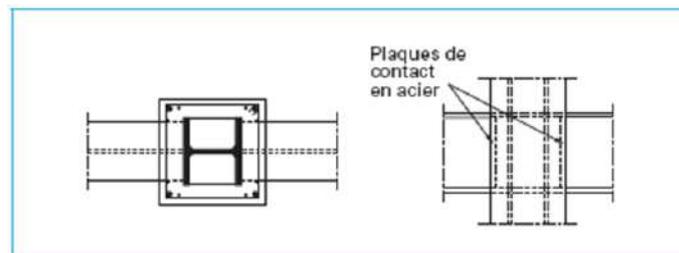


Figure 5.15 Assemblage d'un poteau mixte totalement enrobe de béton et d'une poutre en acier

En zone sismique, il est conseillé de souder des plaques de contact entre les semelles de la poutre, si celle-ci n'est pas partiellement enrobée de béton, afin de mieux confiner le béton du poteau au niveau du nœud et de limiter sa dégradation sous sollicitations cycliques alternées.

## 6. Les structures de grandes portées

### Introduction

Les structures de grande portée sont des structures d'une portée supérieure à 15 ou 20 mètres. En règle générale, les grandes portées permettent d'obtenir des espaces internes flexibles et sans colonne, de réduire les coûts de sous-construction et d'allonger la structure.

Les structures de grandes portées répondent à des exigences formelles et fonctionnelles grâce aux développements en matière des techniques et des matériaux de construction. Elles sont utilisées généralement dans les grands bâtiments qui nécessitent des grands espaces.

La structure à grande portée est apparue avec l'évolution des systèmes constructifs et des matériaux de construction, elle permet d'avoir une portée maximale entre deux appuis, donc avoir des surfaces libres et dégagées pour permettre une facilité dans la division des espaces intérieurs.

La recherche de plus de portée est un des problèmes de structure et de conception des systèmes structuraux des constructions de grandes portées. Dans les éléments d'allure horizontale, c'est le phénomène de flexion qui domine le comportement structural sous l'effet de charges et surcharges verticales. Cette sollicitation de flexion laisse apparaître sur la section de l'élément fléchi des contraintes de traction (étirement) des fibres inférieures et des contraintes de compression (écrasement) des fibres supérieures. On a souvent remarqué le bon comportement de la plupart des matériaux vis-à-vis des efforts de compression, alors que pour la traction les choses sont presque totalement différentes. Il est donc aisé de transmettre les charges et les surcharges de haut en bas (vers le soi par exemple), il est au contraire beaucoup plus difficile si cette transmission est horizontalement de gauche à droite ou vice versa. C'est dans cette constatation que se résume le problème de portée dans les structures des différentes constructions. Différents systèmes structuraux se sont développés pour répondre à cette exigence architecturale et structurale. Des poutres de formes diverses sont utilisées ainsi que des arcs, des formes courbes, ... etc.

Les types de béton utilisés dans les G.P : - Le béton précontraint. - Les bétons spéciaux : B.H.P, B.F.U.P, béton cellulaire

Champs d'applications : Les ouvrages d'art. Les halls d'expositions. Théâtres.

#### 4.4 Classification des structures de grandes portées

Les structures de grandes portées peuvent être classées selon le système structurel ou selon le système de force.

##### 6.1.1 Classification des structures de grandes portées selon leurs systèmes structurels

Selon leurs systèmes structurel, les structures de grandes portées peuvent être soumises à la flexion c'est à dire à la fois aux forces de traction et de compression ou bien soumises uniquement à la traction ou à la compression et qu'on appelle structures funiculaires.

##### b) Les systèmes structurels soumis à la flexion

On retrouve parmi ce type de structures les poutres en tôle (composées de plaques d'acier soudées pour avoir des poutres profondes : profondeur de 1/10 à 1/12 de la portée, portée jusqu'à 100 m et les poutres en treillis unidirectionnel (treillis creux, composés d'éléments élancés assemblés dans une forme triangulaire stable configurations avec  $h / L$  optimal = 1/5... 1/15) (figure 6.1).



a)



b)

Figure 6.1 systèmes structurels soumis à la flexion

a) poutre en tôle, b) poutre en treillis

##### b) Les structures funiculaires

Travaillant soit en **traction pure** soit en **compression** avec éventuellement utilisation de câbles associés à des éléments rigides. Ce type de structures regroupe les arcs paraboliques, les toits à haubans, les membranes tendues déformées etc...

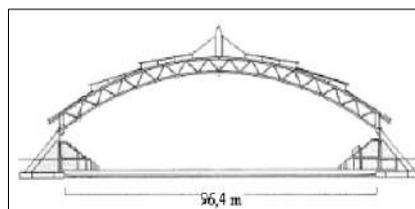


Figure 6.2 Structures funiculaires

### 6.1.2 Classification des structures de grandes portées selon le système de forces

Selon le système de forces, les structures de grandes portées sont classées en :

#### a) Les systèmes à formes actives

Ce sont les systèmes de matière souple et non rigide, dans lesquels la redirection des forces est effectuée par une conception de forme particulière et une stabilisation de forme caractéristique tels que : Structures en câbles, structures en tentes, structures gonflables, structures en arc.



Figure 6.3 systèmes a forme actives

a) Structure en câbles      b) structure gonflables

#### b) Les systèmes à vecteurs actifs

Ce sont des systèmes d'éléments linéaires courts, solides et droits, dans lesquels la redirection des forces est effectuée par une partition vectorielle, c'est-à-dire par une division multidirectionnelle d'une seule force simplement en éléments de tension ou de compression tels que : Poutres en treillis plates ou courbes, structures en treillis tridimensionnelles, structures spatiales.

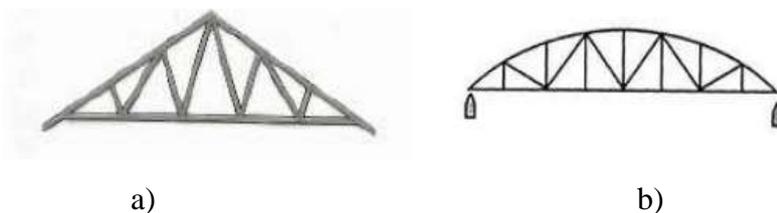


Figure 6.4 Systèmes à vecteurs actifs

a) Poutre en treillis plate      b) poutre en treillis courbes

### c) Systèmes à surfaces actives

Il s'agit de systèmes de plans flexibles ou rigides capables de résister à la traction, à la compression ou au cisaillement, dans lesquels la redirection des efforts s'effectue par mobilisation des efforts de section tels que : Structures en plaques, structures plissées, structures en coque.



a)



b)

Figure 6.5 Systèmes à surfaces actives

a) Structures en coque, b) Structures plissées

## 6.2 Structures tridimensionnelles ou spatiales métalliques

Une structure spatiale (ou tridimensionnelle) est composée de barres, de plaques ou de parois liées entre elles de façon à se suffire d'elle-même pour résister à des forces provenant de toutes les directions de l'espace. La plupart des structures tridimensionnelles en acier sont composées de Seaux (treillis, grilles) formés de barres droites et de nœuds (structures réticulées), les plus courantes sont les grilles de poutres, les treillis spatiaux, les surfaces à simple ou double courbure (nappes cylindriques, sphériques, paraboloides hyperboliques) et les structures plissées.

### 6.2.1 Grilles de poutres

Les grilles de poutres sont formées de profilés laminés, de poutres composées à âme pleine ou de poutres à treillis assemblées entre elles de façon à constituer une plaque résistant à la flexion (fig. 6.6). Les rigidités flexionnelles et torsionnelles des deux réseaux de poutres orthogonales peuvent être les mêmes (fig. 6.6(a)) ou alors très différentes (fig. 6.6(b)). La grille de poutres orthogonales de la figure 6.6(c) comporte des poutres de bord (principales) et des poutres intermédiaires (secondaires) beaucoup moins sollicitées. A la figure 6.6(d), les poutres croisées sont disposées parallèlement à des diagonales, de sorte que les poutres longues s'appuient sur les courtes. Différentes dispositions permettent d'optimiser les sections des barres et

l'emplacement des poteaux sur les bords ou à l'intérieur de la grille, de façon à créer, avec des mailles carrées ou rectangulaires, des champs continus ou des porte-à-faux (fig. 6.6(e)). Le rapport entre la hauteur statique et la portée est généralement de l'ordre de 1/30 pour les grilles rectangulaires et 1/40 pour les grilles en diagonale.

Les grilles de poutres orthogonales ne sont pas rigides dans leur plan. Il faut donc les contreventer par des barres diagonales supplémentaires (fig. 6.6(e)). Dans le cas des grilles à poutres diagonales, les poutres de rive jouent ce rôle de contreventement (fig. 6.6(d)).

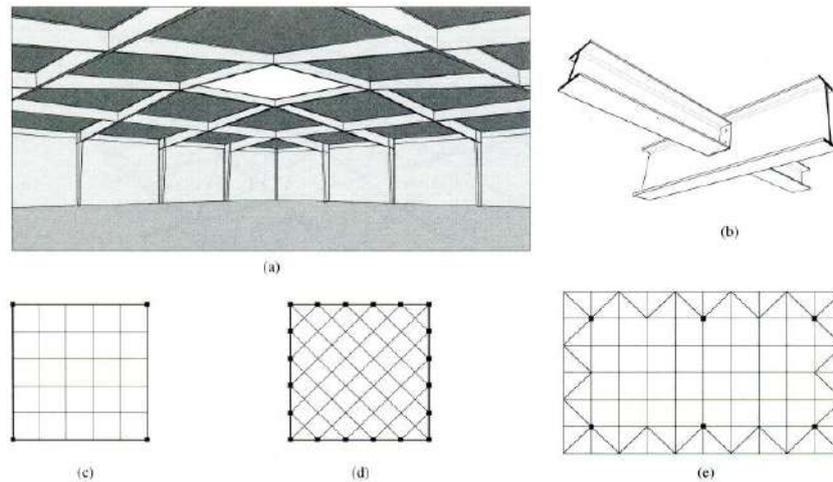


Figure 6.6 : Grille de poutres

### 6.2.2 Treillis spatiaux

Un treillis spatial est formé de deux plans parallèles de barres croisées (les membrures), dont les nœuds sont reliés par des diagonales constituant l'âme du treillis. La différence par rapport à la grille de poutres à treillis est que les nœuds supérieurs ne sont plus à la verticale des nœuds inférieurs. Si les mailles horizontales sont carrées, le système est bidirectionnel. On trouve dans ces systèmes certains types de treillis spatial comportant des poutres à treillis planes, mais qui sont inclinées (fig. 6.7(a)).

On peut aussi considérer ces structures comme composées de volumes élémentaires dont les barres forment les arêtes, ce qui peut faciliter la préfabrication et le montage. Les membrures des deux nappes peuvent être parallèles (fig. 6.7(a)) ou diagonales (fig. 6.7(b)). Dans ce dernier cas, les membrures inférieures sont orientées à 45° par rapport aux membrures supérieures. On ne retrouve plus de poutres planes à treillis, mais le volume élémentaire est encore présent.

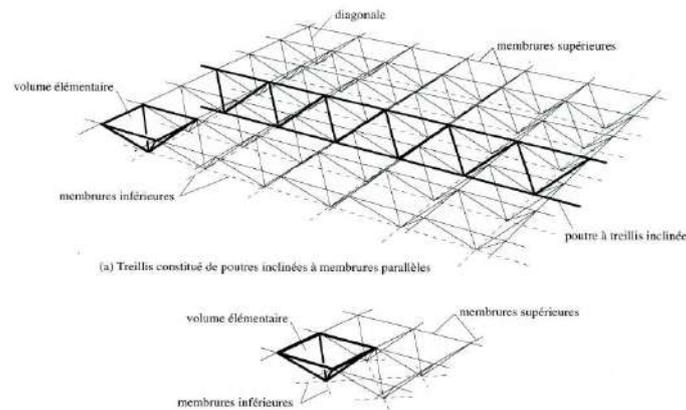


Figure 6.7 Structure spatiale

Ces structures spatiales sont très rigides et peuvent résister à des forces agissant dans n'importe quelle direction. Elles sont capables de franchir des portées jusqu'à 100 m. Au-delà, il faut faire appel à des structures formées de trois nappes de barres croisées. Comme ces structures présentent un haut degré d'hyperstatique, il est possible de supprimer des barres sans nuire à la sécurité ni à la rigidité de la double ou triple nappe. On procède d'ailleurs souvent à ces suppressions pour réduire le nombre de barres arrivant à un même nœud et pour libérer, à l'intérieur du treillis spatial, des espaces utilisables à d'autres fins. La figure 6.8 présente deux types d'allégement de doubles nappes :

- La suppression, dans un système à membrures parallèles, d'une membrure inférieure sur deux et des diagonales d'une maille sur quatre (fig. 6.8(a)) ; cette disposition correspond à une grille de poutres spatiales triangulaires ; on remarque sur la figure le volume libre utilisable.
- La suppression, dans un système à membrures diagonales, d'une membrure inférieure sur deux et des diagonales d'une maille sur deux (fig. 6.8(b)) ; cette disposition correspond à l'assemblage de pyramides à base carrée, pointes en bas, reliées par des barres horizontales ; on remarque sur la figure le volume libre utilisable.
- Si les nappes supérieure et inférieure comportent des mailles triangulaires ou hexagonales, on nomme ces systèmes tridirectionnels (fig. 6.9). On y retrouve des poutres à treillis planes inclinées ainsi que des volumes élémentaires.

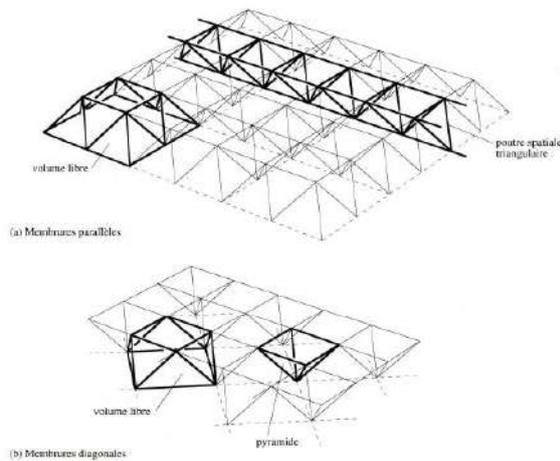


Figure 6.8 Allègement des treillis spatiaux

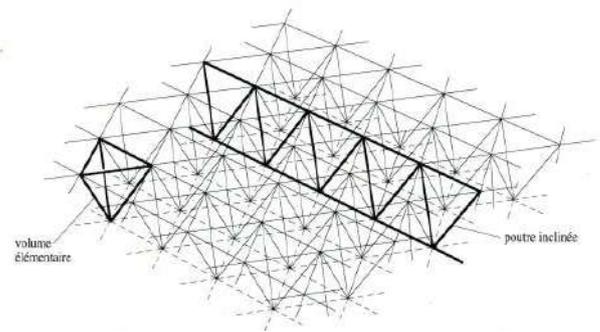
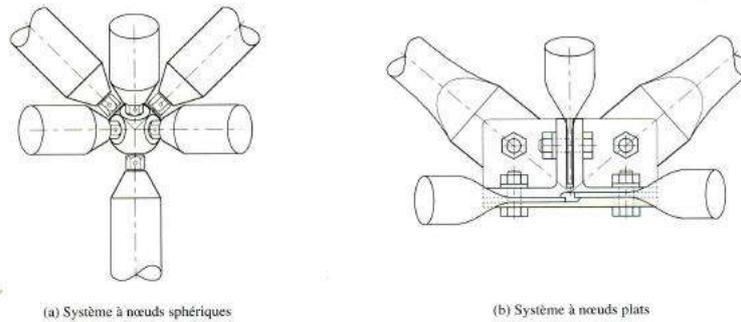


Figure 6.9 Système tri directionnel à maille triangulaires

Il est donc possible de construire une infinité de treillis spatiaux à double nappe à partir de trames coordonnées quelconques. Le choix parmi les multiples géométries possibles doit tenir compte des principes et objectifs suivants :

- Rechercher une systématique en ce qui concerne la fabrication des barres et des nœuds,
- Limiter au maximum le nombre de barres et de nœuds,
- Chercher la transparence pour des raisons de lumière et d'esthétique et pour dégager les volumes libres utilisables pour la technique du bâtiment,
- Etudier les assemblages (nœuds et parties de treillis) afin de faciliter les opérations de montage. Les nombreux systèmes de treillis spatial commercialisés et brevetés montrent bien l'intérêt pour ce type de structure, mais aussi la difficulté de réaliser une structure esthétique, économique et simple, tant dans la conception d'ensemble que, surtout, dans celle des nœuds. La figure 6.10 présente les nœuds de deux systèmes de treillis spatial brevetés très répandus, le système à nœuds sphériques (fig. 6.10(a)) et le système à nœuds plats (fig. 6.10(b)). Le premier est caractérisé par des nœuds en forme de boule percée de trous taraudés permettant de raccorder de manière parfaitement centrée des barres tubulaires munies d'un filetage d'extrémité. Le deuxième système est composé de tubes dont l'extrémité est écrasée et percée d'un trou permettant le boulonnage sur des pièces en fonte moulée soudable comportant trois faces orthogonales.



6.10 Deux systèmes de nœuds de treillis brevetés

### a) Surfaces courbes

Les cadres de halles peuvent prendre la forme d'arc plan, ce qui permet de réduire les effets de flexion par rapport à un cadre rectangulaire. Il est également possible d'utiliser la courbure de l'arc dans l'espace par la création de surfaces à simple ou à double courbure.

#### Surfaces à simple courbure

Les structures porteuses métalliques en forme de surface à simple courbure sont essentiellement des nappes cylindriques. La nappe comporte en général des arcs, des génératrices et des diagonales (fig. 6.11(a)). Le cas général peut être décomposé en systèmes plans et n'est alors plus assimilé à une structure tridimensionnelle. Par contre, si on supprime les génératrices (fig. 6.11(b)) ou les arcs eux-mêmes (fig. 6.11(c)), on réalise vraiment une nappe réticulée de l'espace, appelée aussi treillis réticulé arqué.

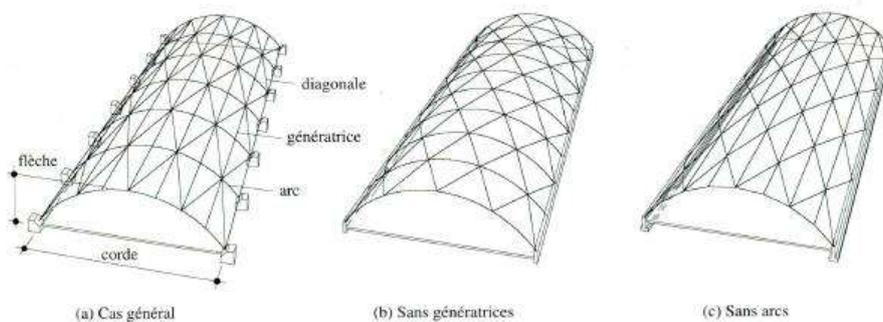


Figure 6.11 Simples nappes réticulées cylindriques

La courbure du système porteur peut engendrer au niveau des appuis une importante réaction horizontale, appelée poussée. Si la structure en voûte repose directement sur le sol, cette

réaction est reprise par le massif de fondation. Dans le cas contraire, elle doit être reprise soit par des tirants, placés généralement au niveau des pieds des arcs, soit par les éléments porteurs sous-jacents (piliers, murs, etc.). Il est également possible de remplacer une partie des génératrices et des diagonales par la tôle profilée de toiture, ce qui nécessite toutefois des formes de profil capables de reprendre les grands efforts de flexion, compression et cisaillement qui se développent (fig. 6.12). La portée économique de ces structures est de l'ordre de 20 m pour des surfaces cylindriques à une nappe et de 60 m pour des surfaces à deux nappes. L'efficacité maximale est atteinte pour des structures rectangulaires en plan dont le rapport des côtés est situé entre 1 et 2. Le rapport optimal entre la flèche et la corde de l'arc est de l'ordre de 0.15 à 0.20.

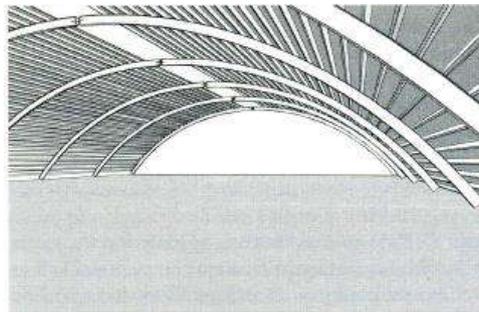


Figure 6.12 Structure en arc raidie par des tôles profilées

### Surfaces à double courbure

La forme la plus simple et la plus pure de surface à double courbure est la calotte sphérique, qui présente l'avantage d'avoir la surface minimale pour le volume englobé. En partant de l'arc parabolique, on crée la coupole parabolique de révolution. Si les courbures sont de signes inverses, la surface peut prendre la forme d'un paraboloid hyperbolique. La difficulté principale consiste à trouver sur ces surfaces la position des nœuds permettant d'optimiser le nombre de types de barre, le nombre de types de nœud et le nombre d'éléments de surface différents. Le cas classique de la calotte sphérique se résout par inscription dans la sphère d'un polyèdre régulier, par exemple l'icosaèdre (20 faces en triangles équilatéraux égaux). Chaque face est subdivisée en éléments qui ne peuvent pas être égaux mathématiquement, par exemple des hexagones et des pentagones ou des triangles (fig. 6.13(a)). Pour le paraboloid hyperbolique, qui est une surface réglée, les génératrices droites sont régulièrement espacées et

la triangulation est complétée par des diagonales qui suivent des courbes paraboliques identiques (fig. 6.13(b)).

Lorsque les courbures sont faibles, ou pour de grandes portées, les phénomènes d'instabilité d'ensemble des surfaces courbes en nappe simple deviennent prépondérants. C'est pourquoi on double souvent ces surfaces d'une deuxième nappe, dont les nœuds sont reliés à la première comme pour les treillis spatiaux plans.

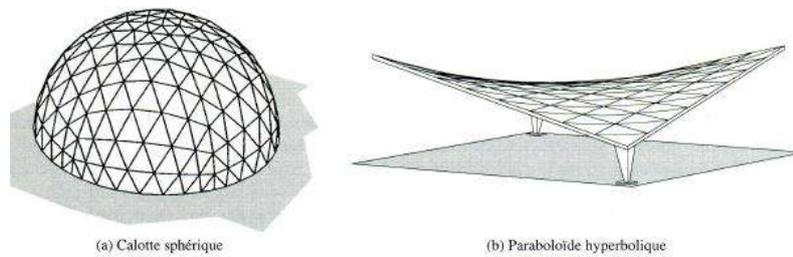


Figure 6.13 Surface à double courbure

Les deux nappes sont généralement parallèles, pour systématiser les barres de liaison. Ces systèmes à double courbure permettent d'atteindre des portées de 40 m (simple nappe) à plus de 100 m (double nappe). Il existe d'autres couvertures pouvant rentrer dans la catégorie des surfaces courbes, qui font appel à des parties tendues ou suspendues à l'aide de câbles.

### 6.2.3 Structures plissées

Une structure plissée (fig. 6.14(a)) est une structure spatiale formée par la juxtaposition de surfaces planes (les pans) de façon à former une surface prismatique ou pyramidale. Les pans peuvent être constitués de voiles en béton, de treillis métalliques ou de tôles profilées. Ils sont reliés les uns aux autres par leur arête commune (le pli) considérée comme une charnière parfaite. Les sections d'appui de la structure plissée doivent être rigides, ce qui est réalisé par des tympans ou des cadres. Une telle structure se comporte alors comme une poutre rigide résistant aux efforts dans le plan des pans (effet de membrane ou de poutre) mais dont la section prismatique peut se déformer transversalement sous les charges normales aux pans (effet de plaque). La figure 6.14(b) montre un exemple de réalisation d'une structure plissée dans laquelle les pans sont des plaques de tôle nervurée et les arêtes des membrures en tôle pliée.

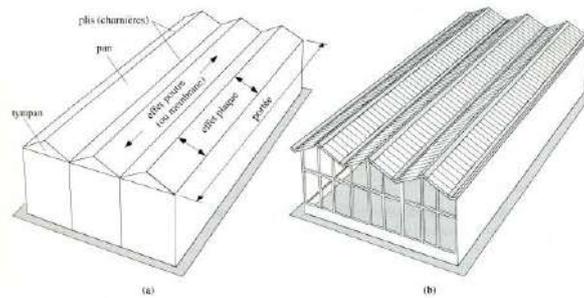


Figure 6.14 Exemple de structures plissées.

### 6.3 Structures tendues

Une structure tendue est une structure qui est stabilisée par la traction plutôt que par la compression à l'opposé des structures conventionnelles qui ont tendance à être stabilisées par l'action de la gravité sur leur masse qui les maintient en compression.

Les structures tendues peuvent être classées en structures à câbles, structures en tentes et en structures gonflables.

#### 6.3.1 Les structures tendues à câbles

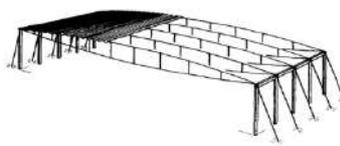
Les structures de grande portée à câbles et à tirants telles que les hangars, les halls d'exposition, les couvertures de stades, de salles de spectacle, les ponts et passerelles, nécessitent une faible quantité de matière. Le système porteur est souvent constitué de câbles ou de barres tendues associés à des poutres. On utilise généralement pour réaliser la suspension des câbles en acier dur, dont les propriétés mécaniques en traction sont très performantes. Les contraintes de rupture sont très élevées (1570 à 1 860 N/mm<sup>2</sup>, c'est à dire 3 à 4 fois plus que les aciers ordinaires de charpente).

Les toitures tendues peuvent être classées selon le mode de suspension en :

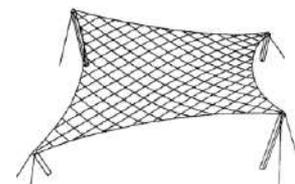
- a) Câbles simplement suspendus
- b) Poutres en câbles précontraints
- c) Réseaux de câbles précontraints



a)



b)



c)

Figure 6.15 Toitures tendues

- **Structures tendues composées de poutres à câbles**

Ce sont des structures composées de poutres planes constituées par des câbles tendus de concavités opposées. Elles ne mettent en jeu que des tractions. La tension initiale de chaque câble est calculée pour que les membrures ne se détendent jamais. Ces poutres sont donc précontraintes, et doivent être ancrées en rive.

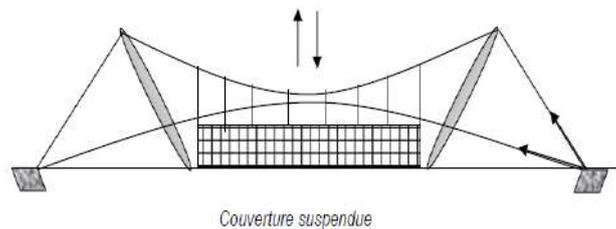


Figure 6.16 couverture en poutre a câble

### 6.3.2 Les structures à membranes

Une structure membrane est une surface mince et flexible qui peut supporter des charges grâce au développement de forces de traction. La stabilité et la force de la structure sont assurées grâce à l'arrangement de ses composantes sous une forme géométrique spécifique (forme de la surface), tout en étant soumise à un modèle spécifique de contraintes internes.

La translucidité de la membrane est un facteur déterminant dans la conception car elle préserve la lumière naturelle.

#### Stabilité des structures membranes

Les structures membranes peuvent être stabilisées par :

- Une structure porteuse rigide intérieure** : dans laquelle la précontrainte résulte des efforts appliqués le long de la bordure de la membrane, fixée en général à des arcs, des fermes ou des portiques métalliques
- Structure à surface prétendue ponctuellement** : Dans la surface prétendue ponctuellement, les efforts de précontraintes sont localisés en surface, en périphérie et à l'intérieure de la membrane. Il faut veiller qu'en tout point de la membrane il existe une courbure inverse.

- c) **Pressurisation interne (structure pneumatique) :** La forme et la stabilité de la structure sont garanties par la différence de pression entre l'espace clos intérieur et l'espace extérieur.



a)



b)



c)

Figure 6.17 Structures a membranes

## 6.4 Les voiles minces en béton armé

La structure en voile mince en béton armé est une structure spatiale tridimensionnelle construite à partir d'une ou de plusieurs dalles courbées ou plaques plissées.

L'épaisseur des dalles courbées et des plaques pliées sont faibles par rapport à leurs autres dimensions.

### 6.4.1 Les coques en voiles minces de béton

Les coques en voiles minces de béton sont des constructions légères composées d'une coque relativement mince en béton armé, généralement sans utilisation de supports internes donnant un intérieur ouvert et dégagé.

Une coque mince est définie comme une coque dont l'épaisseur est faible par rapport à ses autres dimensions (généralement inférieure à 10 centimètres) et dans laquelle les déformations ne sont pas importantes par rapport à l'épaisseur.

Une plaque plate agit de manière similaire à une poutre avec des contraintes de flexion et de cisaillement, les coques sont analogues à un câble qui résiste aux charges par les contraintes de traction.

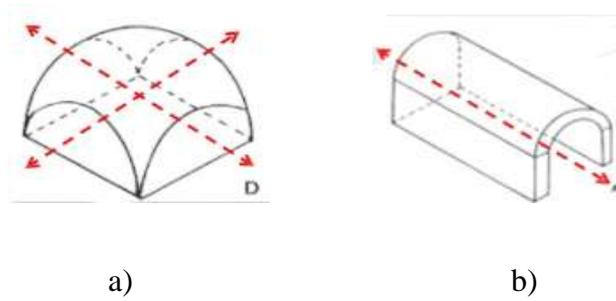


Figure 6.18 Coques en béton armé

a) à double courbure, b) à simple courbure

### 6.4.2 Les plaques plissées en béton armé

Il s'agit d'un type de structure en voiles minces en béton composé de fines plaques plates. Ces dalles sont jointes le long de leurs bordures pour construire une structure tridimensionnelle. La plaque plissée peut couvrir une portée allant jusqu'à 30 m avec seulement 60 mm d'épaisseur néanmoins, une structure de plaque plissée avec de plus grandes portées peut être construite. L'esthétique, les coûts des matériaux et de la construction sont réduits, cependant, les coffrages sont difficiles, ils exigent un travail et une supervision de main-d'œuvre importants, le coût élevé et la difficulté de monter les toits sont les inconvénients de ce type de plaques. Les plaques plissées combinent l'action de la dalle avec l'action de la poutre.

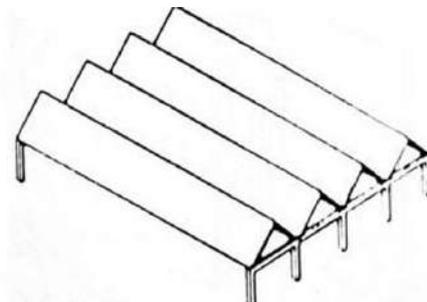


Figure 6.18 Plaque plissée en béton armé

### 6.5 Le béton précontraint

La précontrainte est une technique de construction des ouvrages en béton et qui consiste à créer des efforts internes favorables soigneusement ajustés dans le but de réduire les effets de la faiblesse du béton en traction.

Le terme « précontrainte » est composé : du préfixe « pré » qui signifie avant et de « contrainte » qui signifie effort imposé par unité de surface.

Un élément de construction (poteau, poutre, tirant) est précontraint si avant de supporter des charges et surcharges, des contraintes lui sont imposées.

### 6.5.1 Avantages du béton précontraint

Meilleure utilisation de la matière, le béton tendu est considéré comme fissuré et ne peut être pris en compte dans la résistance.

- Diminution des flèches des poutres grâce à l'action ascendante des câbles de précontrainte due à leur courbure.
- Possibilité de franchir de plus grandes portées qu'avec des ouvrages en béton armé ;
- Les risques de corrosion des aciers sont limités ;
- Les aciers utilisés en béton précontraint sont moins chers, à force égale, que les aciers de béton armé.

### 6.5.2 Technologie de la précontrainte

**La post-tension** est une opération réalisée sur chantier qui consiste à mettre les câbles en tension après coulage du béton par l'intermédiaire d'ancrages. Cette méthode est généralement utilisée pour les grands ouvrages en génie civil.

**La pré-tension** est une opération réalisée en usine qui consiste à mettre les câbles en tension avant coulage du béton. C'est la technique la plus utilisée dans le domaine du béton précontraint. Sa destination essentielle est le bâtiment.

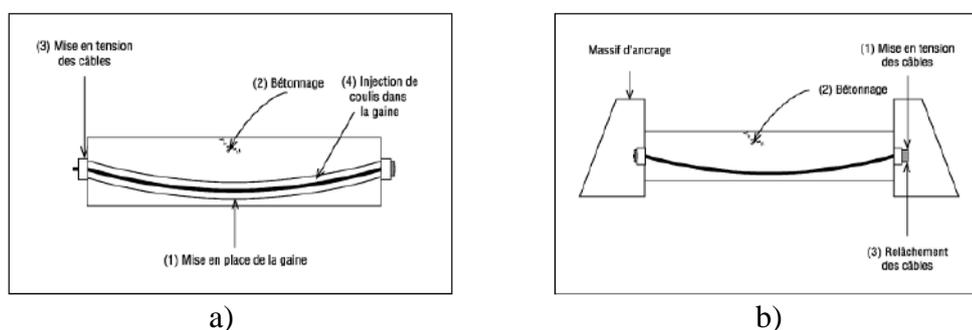


Figure 6.19 Technologie de la précontrainte

a) Précontrainte par post-tension, b) précontrainte par pré-tension

## 6.6 Le bois lamellé collé

Le bois lamellé-collé (BLC) est un matériau de structure, composé à 97 % de bois massif qui s'obtient par collage de plusieurs lamelles en bois dont le fil est essentiellement parallèle. Inventé au tout début du 20ème siècle, c'est une solution constructive exceptionnellement performante, qui cumule responsabilité écologique et prouesses techniques. Le bois lamellé se caractérise par une résistance et une rigidité excellentes comparées au bois de sciage de mêmes dimensions.

Ce matériau se distingue par un rapport résistance/poids exceptionnel : à résistance égale le bois lamellé se révèle nettement plus léger que les autres matériaux de structure, comme l'acier, ce qui lui permet d'importants franchissements, et en conséquence de grandes structures.

- Il est ainsi techniquement possible d'obtenir une portée de 150 mètres, voire davantage.

### 6.6.1 Avantages du lamellé-collé

**Durabilité** : utilisation de bois issus de forêts gérées durablement pour contribuer à la préservation et au renouvellement du patrimoine forestier

**Environnement** : renouvelable, réutilisable, recyclable

**Performance** : optimisation des caractéristiques mécaniques du bois

**Productivité** : utilisation efficace de la matière grâce au processus de fabrication

**Fabrication de précision** : processus industrialisé

**Economie de ressources** : fabrication économe en énergie

**Grandes dimensions** : aboutage de lamelles

**Créativité architecturale** : possibilités techniques infinies et grande liberté de formes

**Stabilité** : le bois lamellé ne se déforme pas au cours du temps

### 6.6.2 Processus de fabrication du bois lamellé-collé

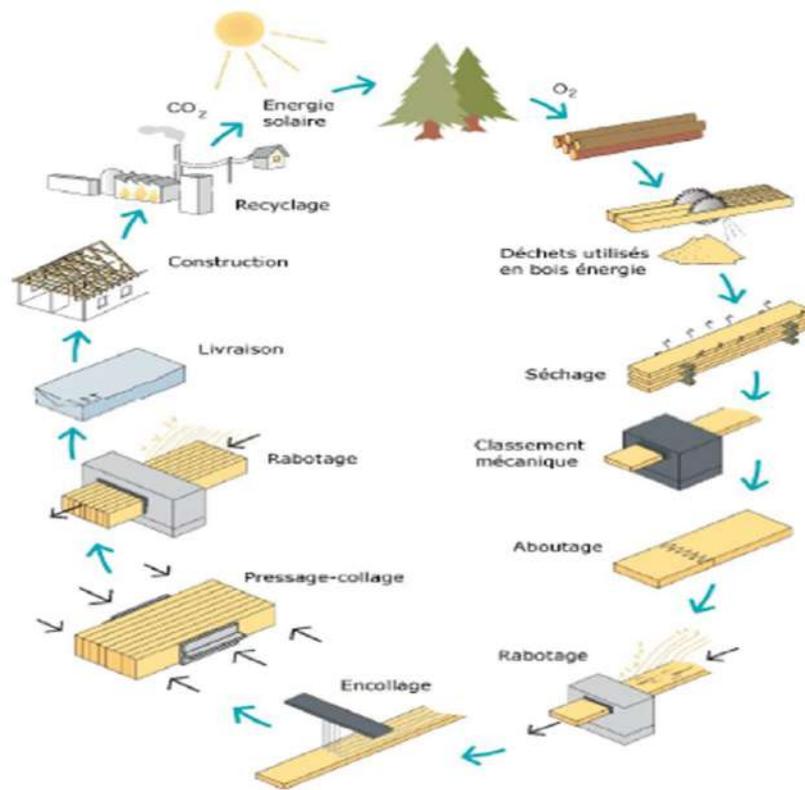


Figure 6.20 Processus de fabrication du bois lamellé collé

### 6.6.3 Systèmes structuraux en bois lamellé-collé

Le bois lamellé-collé permet de concevoir des systèmes structuraux très variés tels que des bâtiments des halls et des ponts en bois, des systèmes simples composés de poteaux et de poutres à des structures constituées de portiques ou en forme de coque.

Le choix du système structural est avant tout déterminé par la fonction du bâtiment, par des considérations d'ordre architectural (hauteur libre, contraintes relatives à la pente du toit, lumière naturelle, etc.) ainsi que par le budget.

- La structure en bois lamellé-collé la plus simple et la plus courante consiste en des poutres dont chaque extrémité est en appui simple sur des poteaux. L'assemblage de la poutre et du poteau doit être conçu de façon à empêcher le flambement latéral de la poutre.

- Les poutres continues qui reposent sur plusieurs appuis ou les poutres en porte-à-faux permettent de mieux optimiser l'utilisation du matériau que les poutres en appui simple, car le moment de flexion ne varie pas énormément le long de la poutre.
- Les arcs en bois lamellé-collé offrent de multiples possibilités de conception et une haute résistance, ils sont particulièrement viables en cas de grandes portées, certains ont une portée libre de plus de 100 m. Un arc soumis à des charges verticales subira une compression pure sur toute sa longueur.

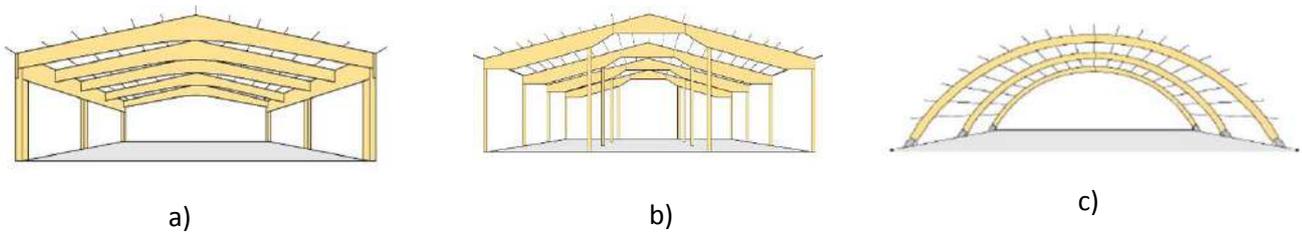


Figure 6.21 Systèmes structuraux en bois lamellé collé

a) Système poteau-poutre, b) Poutres continus, c) Arc en bois lamellé collé

## 7. Les ouvrages d'Art

### Introduction

En Génie Civil, un ouvrage d'Art représente toute construction de grande importance en relation avec l'exploitation des transports terrestres, maritimes ou fluviales tels que les ponts, viaduc, passerelles et tunnels, la protection contre l'action de la terre et de l'eau tels que les murs de soutènement, digues, tranchées ouvertes etc...ou la transition entre plusieurs modes de transport tels que les quais et les ouvrages portuaires par le franchissement d'obstacles naturels ou artificiels.

### 7.1 Les ouvrages de soutènement

#### Définitions

Les ouvrages de soutènements sont les ouvrages qui retiennent des terrains (sols, roches ou remblais) et de l'eau.

Le matériau est retenu par l'ouvrage s'il est maintenu à une pente plus raide que celle qu'il adopterait éventuellement si aucun ouvrage n'était présent. Les ouvrages de soutènement comprennent tous les types de murs et de systèmes d'appui dans lesquels des éléments de structure subissent des forces imposées par le matériau soutenu.

Les ouvrages de soutènement sont des constructions destinées à prévenir l'éboulement ou le glissement d'un talus raide. Ils sont essentiellement employés :

- en site montagneux pour protéger les chaussées routières contre le risque d'éboulement ou d'avalanches ;
- en site urbain pour réduire l'emprise d'un talus naturel, en vue de la construction d'une route, d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art.

Il existe deux grandes classes d'ouvrages de soutènement.

#### Les murs :

Composés d'une paroi résistante et d'une semelle de fondation. C'est le cas des murs en T renversé ou des murs-poids en béton armé ou encore en maçonnerie (briques, pierres,...) ou formés d'éléments spéciaux (murs végétalisés, gabions métalliques, ...).

#### Les écrans :

Composés seulement d'une paroi résistante, tels que :

- Les rideaux de palplanches formé de profilés métalliques emboîtés les uns dans les autres et fichés dans le sol ;
- Les parois moulées en béton armé :
- Les murs en terre armée avec parement composé d'écailles en béton.

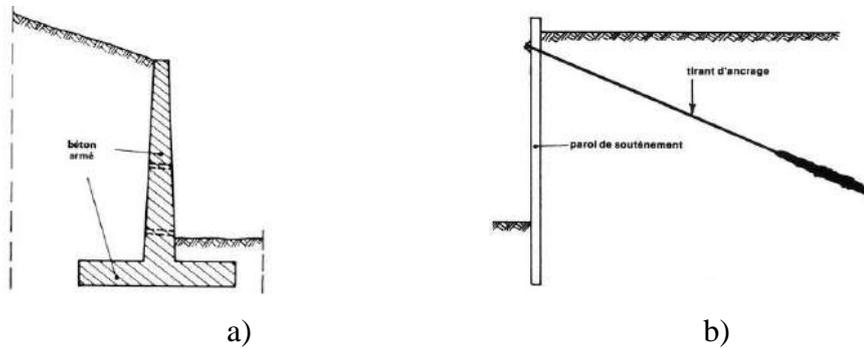


Figure 7.1 Types d'ouvrages de soutènement

a) mur de soutènement, b) paroi moulée

### 7.1.1 Mur en béton armé encastré sur semelle

C'est un voile résistant en béton armé encastré dans une semelle de fondation (préfabriqué ou non).

#### Mode de fonctionnement

Les ouvrages en béton armé constitués d'un voile encastré sur semelle, en coupe ils ont une forme de L ou de T renversé. Certaines variantes de conception existent :

-avec contreforts avant ou arrière

-avec console-sur pieux... Ces murs peuvent être coulés en place, totalement ou partiellement préfabriqués (voile ou parement du voile).

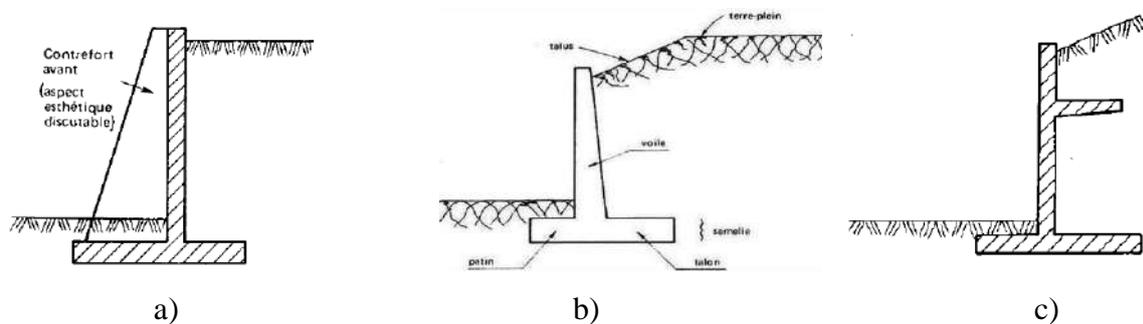


Figure 7.2 Types de murs encastrés sur semelle

a) avec contreforts, b) en forme de T renversé, c) avec console

### 7.1.2 Murs poids en béton

C'est un mur en béton non armé ou en béton cyclopéen (blocs de pierres ou moellons noyés dans le béton) coulé en place, on y trouve parfois des armatures de peau, le drainage par barbacanes s'avère nécessaire car l'eau ne peut pas traverser le béton. Le poids propre du mur joue un rôle important dans le soutènement du matériau retenu

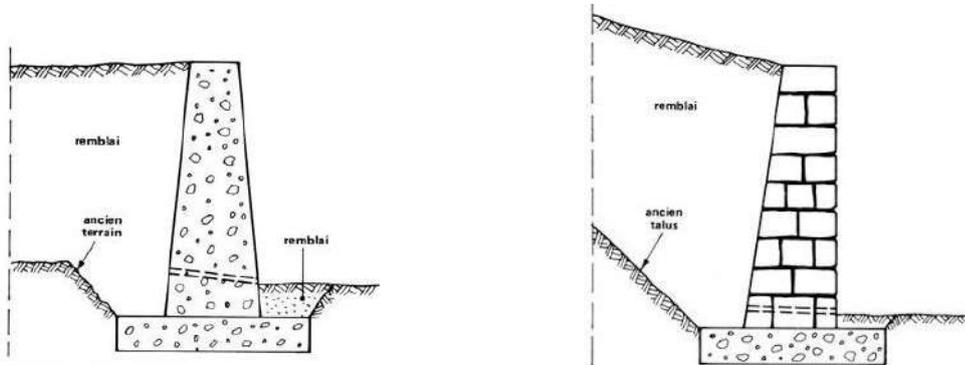


Figure 7.3 Murs poids

a) murs en béton armé, b) murs en béton cyclopéen

### 7.1.3 Stabilité des murs en béton armé

Un mur de soutènement doit satisfaire les conditions de stabilité suivantes :

Stabilité vis à vis du renversement

Stabilité vis-à-vis du glissement

Stabilité vis-à-vis de l'enfoncement

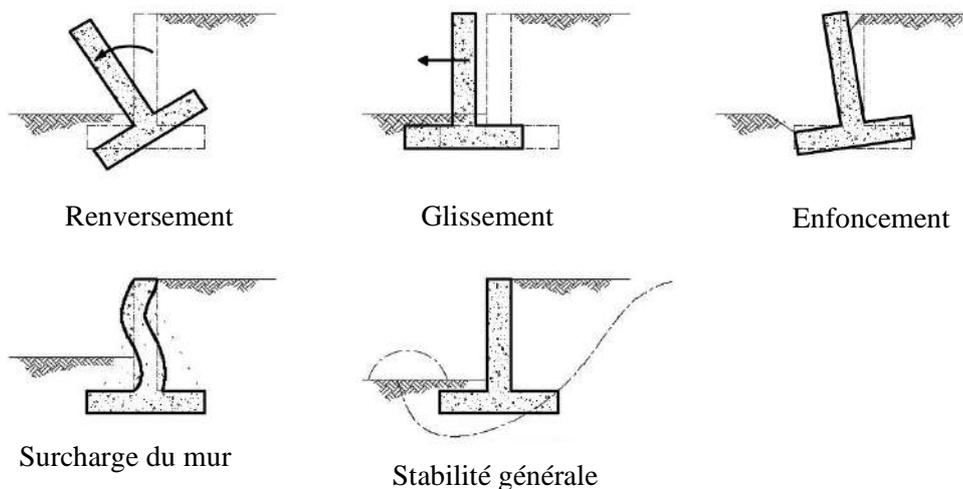


Figure 7.3 Principaux modes de rupture d'un mur de soutènement

## 7.2 Les ponts

### Définitions

Un pont est un ouvrage destiné à franchir un obstacle naturel (ravin, rivière) ou à franchir une autre voie de circulation terrestre, fluviale ou maritime.

Dans le cas du croisement de 2 voies de communications on distingue :

- Les passages supérieurs (PS)
- Les passages inférieurs (PI)

Le niveau de référence est la voie la plus importante ou celle qui a le classement le plus élevé vis-à-vis de l'administration ; dans le cas où l'une des voies est une voie ferrée, le niveau de référence sera la voie ferrée.

- Un ponceau est un pont de petites dimensions (de l'ordre de quelques mètres)
- Les buses ou aqueduc sont des ouvrages de forme cylindrique permettant de faire passer un ruisseau ou une petite voie de circulation à travers un remblai, ou bien un canal.
- Un viaduc est un ouvrage de franchissement à grande hauteur au-dessus d'une brèche ou constitué de nombreuses travée successives.
- Une passerelle est un ouvrage en général réservé aux piétons.

### 7.2.1 Terminologies des ponts

#### Différentes parties d'un pont

**Culée :** une culée de pont désigne la partie d'un pont située sur la rive, destinée à supporter le poids du tablier

**Travée :** une travée de pont désigne la partie d'un pont comprise entre deux piles ou entre une pile et une culée. Cette notion ne concerne que les ponts à poutres, suspendus ou haubanés. Pour les ponts en arc ou ponts voûtés en maçonnerie, on parlera plutôt d'arches.

**Pile :** Une pile de pont est un ouvrage en maçonnerie destiné à supporter les arches ou le tablier du pont

**Tablier :** Le tablier du pont est la partie du pont sur laquelle vont circuler les véhicules

**Parapet :** Le parapet est une rambarde destinée à empêcher la chute des piétons ou des véhicules

**Portée :** La portée d'un pont désigne la longueur d'une partie d'un pont comprise entre deux piles ou entre une pile et une culée.

**Hauban** : Le hauban est, le plus souvent, un assemblage en toron de câbles en acier destiné à soutenir le tablier d'un pont et à répartir les efforts.

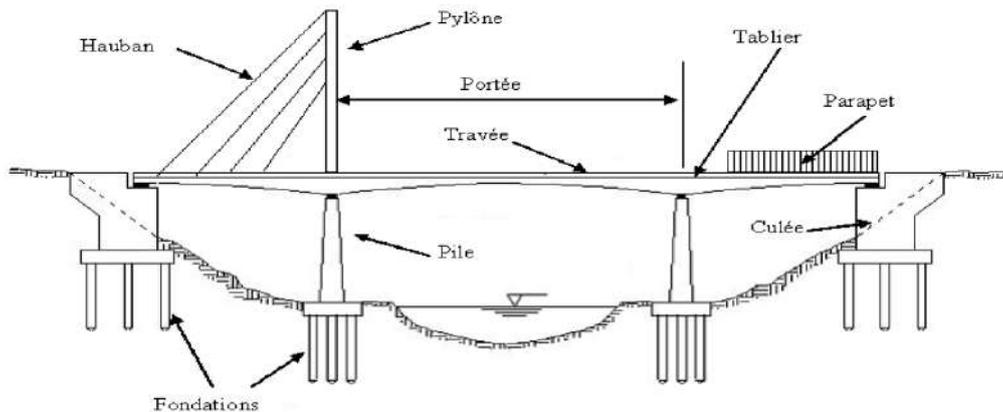


Figure 7.4 terminologie des ponts

### 7.2.2 Classification des ponts

Les ponts peuvent être classés en cinq catégories :

Ponts voûtés et ponts en arc : efforts de compression ;



Figure 7.5 Classification des ponts (source Wikipedia)

Ponts à poutres : efforts de flexion ;

Ponts à haubans et ponts suspendus : efforts de traction.

L'élément porteur est souvent facilement identifiable (poutre, arc ou câble), mais il existe des ouvrages où les efforts peuvent se répartir entre plusieurs éléments porteurs appartenant à des classes différents. Il s'agit alors de structures composées.

### Classification des ponts selon la structure :

Il existe fondamentalement trois types d'éléments structurants : ceux qui transfèrent les forces axialement, par flexion ou par courbure.

Une membrure dans un treillis est un élément transférant axialement les efforts, une poutre est un élément de flexion et les arcs des ponts en arc ou les câbles des ponts suspendus sont des éléments de courbure. Chaque structure est une combinaison de ces trois types d'éléments. Certains éléments peuvent avoir un type comme fonction principale et l'autre comme secondaire, comme le tablier d'un pont à haubans. Il agit avant tout comme un élément de transmission de force axiale puisqu'il transmet des efforts aux haubans, mais les efforts des charges portées induisent également une déformation de cet élément par flexion.

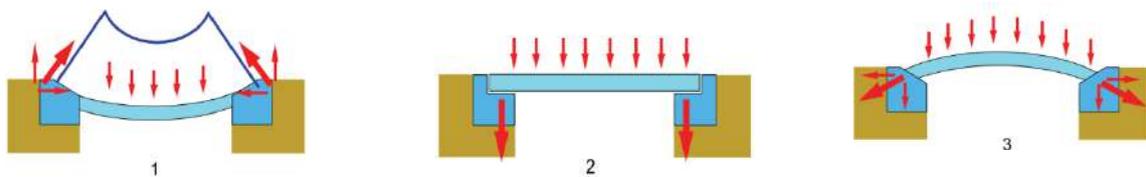


Figure 7.6 classification des ponts selon la structure

Schéma des trois grandes classes de ponts suivant l'action exercée sur les culées :

- 1 : ponts à câbles, suspendus ou à haubans ;
- 2 : ponts à poutres ;
- 3 : ponts en arc

Selon la nature des efforts transmis aux appuis ou aux culées, on peut classer les ponts en trois catégories :

Les ponts à câbles, présentant une composante horizontale de traction ;

Les ponts à poutres, exerçant une action verticale de compression sur leurs appuis ;

Les ponts en arc, présentant une composante oblique de compression tendant à éloigner la culée.

Une autre approche (selon la nature des efforts dans l'élément structurel porteur) conduit à classer les ponts en cinq catégories :

Ponts voûtés et ponts en arc : efforts de compression ;

Ponts à poutres : efforts de flexion ;

Ponts à haubans et ponts suspendus : efforts de traction.

L'élément porteur est souvent facilement identifiable (poutre, arc ou câble), mais il existe des ouvrages où les efforts peuvent se répartir entre plusieurs éléments porteurs appartenant à des classes différents. Il s'agit alors de structures composées.

### **7.3 Les châteaux d'Eau**

#### **Définitions**

Un château d'eau est une construction destinée à entreposer l'eau, et placée en général sur un sommet géographique pour permettre de la distribuer sous pression.

La réserve d'eau joue un rôle de tampon entre le débit demandé par les abonnés et le débit fourni par la station de pompage. Il permet ainsi d'éviter de démarrer trop souvent les pompes et de les protéger. Une telle réserve permet également de faire face aux demandes exceptionnelles en cas d'incendie et de manque d'eau.

L'eau stockée permet de couvrir une consommation moyenne d'une demi-journée. C'est donc idéal pour ne pas couper l'eau courante lors d'une réparation de canalisation...

Pour que l'eau soit envoyée dans les habitations avoisinantes, sans l'utilisation de pompes électriques, il faut que le réseau soit gravitaire. Cela signifie que les habitations doivent être situées en contrebas du château d'eau. Si une habitation est située plus en hauteur que le réservoir, elle ne pourra pas être approvisionnée.

C'est le principe des vases communicants. Un premier tuyau achemine l'eau dans la cuve de stockage qui se trouve au sommet du château tandis qu'un second conduit permet à l'eau de redescendre.

#### **7.3.1 Structure d'un château d'eau en béton armé**

Le béton armé est le matériau de prédilection pour la construction des châteaux d'eau modernes, comme il le fut déjà dès le début du 20<sup>è</sup> siècle.

L'art du coffrage, l'excellente connaissance théorique et pratique du matériau, dans sa composition et dans sa mise en œuvre, sa résistance et sa faible sensibilité à la corrosion, moyennant le respect de quelques règles, permettent de donner une grande variété de formes aux réservoirs.

Ci-dessous, un schéma de principe structurel d'un réservoir sur tour moderne à cuve conique :

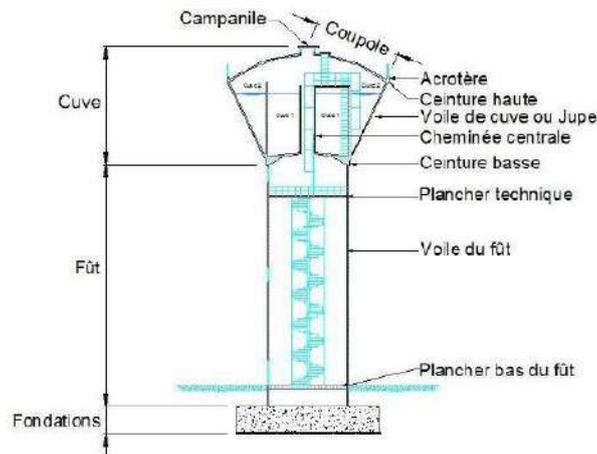


Figure 7.7 Schéma structurel d'un réservoir sur tour

### 7.3.2 Réservoirs enterré ou semi enterré

Ce système repose également sur un principe de mise en pression gravitaire de l'eau stockée. La différence de hauteur est obtenue par l'exploitation d'un dénivelé naturel du terrain. Le réservoir est donc édifié à même le sol.

L'alimentation peut être gravitaire ou se faire à l'aide d'une station de pompage.

#### Avantage :

Stockage moins limité que le château d'eau.

Coût de la construction plus faible que pour un réservoir sur tour,

Intégration plus facile dans le paysage.

Maintien de la température de l'eau constante

Vulnérabilité plus faible au vandalisme

#### Inconvénients :

L'assujettissement d'un tel système à la topographie du site peut conduire à un surcout au niveau de la mise en place et de l'exploitation des réseaux de distribution.

## 8. Structure et Architecture

### Introduction

Il existe de nombreuses façons de définir l'architecture, mais peut-être la définition la plus expressive est celle fournie par Marcus Vitruvius Pollio, Écrivain romain, architecte et ingénieur (premier siècle après JC). Vitruve a écrit « De architectura », un traité latin d'architecture, dans lequel il affirmait qu'une structure (architecture) devait présenter les trois qualités « firmitas, utilitas et venustas », traduit librement par la *stabilité, utilité* qui ont une valeur pratique ou objective ; et la *beauté*, donnant du plaisir et de la joie à ceux qui en font l'expérience.

Déterminer la force et l'utilité est relativement facile. Déterminer la beauté est plus difficile, car chacun de nous est libre de décider ce qui nous procure du plaisir visuel. Une autre façon de définir l'architecture c'est simplement l'appeler *l'art et la science de la construction*.

Dans la pratique moderne, les connaissances et les informations nécessaires pour concevoir et construire un grand bâtiment nécessitent de nombreux domaines d'expertise. L'ensemble du processus de détermination de l'apparence d'un bâtiment, les matériaux et les systèmes à utiliser, ainsi que leurs configurations et tailles, sont largement appelés conception. La conception repose principalement sur les épaules des architectes et des ingénieurs.

Les architectes ont la responsabilité principale de déterminer la taille et la forme, ainsi que les innombrables matériaux architecturaux, finitions et détails. Les ingénieurs ont la responsabilité principale de déterminer les caractéristiques mécaniques, électriques, et les systèmes structurels, ainsi que les nombreux calculs et détails techniques.

L'ingénierie des structures est la discipline d'ingénierie la plus étroitement liée avec la forme architecturale. La meilleure architecture montre une forte compréhension de la façon dont les forces se déplacent à travers une structure.

### 8.1 Le rôle de la structure dans l'architecture

La forme finale qui est adoptée pour un travail d'architecture est influencée par de nombreux facteurs allant de l'idéologique au sévèrement pratique.

Le rôle du bâtiment en tant qu'objet physique et, en particulier, avec la question du support structurel qui doit être prévu pour qu'il puisse conserver sa forme et son intégrité dans le monde physique.

Le rôle du bâtiment en tant qu'objet esthétique, souvent empreint de sens symbolique, est cependant ; un volet de cet argument considère que la contribution de la structure à la réalisation d'objectifs architecturaux supérieurs est toujours cruciale. Les problèmes techniques sont en conséquence considérés ici dans un programme plus large qui englobe des considérations autres que celles de la praticité.

La relation entre les structures et les parties non structurelles d'un bâtiment peuvent varier largement. Dans certains bâtiments, l'espace englobant les éléments - les murs, les sols et le toit sont également des éléments structurels, capables de résister et de transmettre les charges (Fig. 8.1). Dans d'autres bâtiments, comme ceux ayant de grandes baies vitrées sur les murs extérieurs, la structure peut être entièrement séparée des éléments entourant l'espace (Fig. 8.2).



Figure 8.1 Bâtiment dont les murs extérieurs sont les éléments porteurs.



Figure 8.2 Bâtiment avec une structure à ossature d'acier. Les parois en verre sont entièrement non structurelles.

Dans tous les cas, la structure constitue la carcasse de base du bâtiment l'armature à laquelle tous les éléments non structuraux sont attachés. Le traitement visuel de la structure peut être soumis à de nombreuses variations. Le système structurel d'un bâtiment peut être mis en évidence et être conçu pour former une partie importante du vocabulaire architectural (Fig. 8.3).

À l'autre extrême, sa présence peut être visuellement minimisée, les éléments structurels contribuant peu à l'apparence du bâtiment (Fig. 8.4).

Entre ces extrêmes se trouve une infinité de possibilités. Dans tous les cas, cependant, la structure, en raison du volume important qu'elle occupe dans un bâtiment, affecte dans une certaine mesure son caractère visuel et elle le fait même si elle n'est pas directement visible.



Figure 8.3 La structure de ce bâtiment s'exprime bien à l'extérieur et à l'intérieur. Elle contribue directement et indirectement à l'apparence du bâtiment.



Figure 8.4 bâtiment avec une structure en béton armé et un revêtement non structurel. Bien que la structure joue un rôle essentiel dans la création de la forme globale complexe, elle n'est pas un élément significatif du vocabulaire visuel.

Quelle que soit la façon dont la structure est traitée visuellement, cependant, la nécessité de satisfaire aux exigences techniques doit toujours être reconnue. Les contraintes structurelles exercent donc une influence significative, manifeste ou cachée, sur la planification finale des bâtiments.

## 8.2 Critères de base de conception d'une structure

La capacité d'atteindre l'équilibre sous toutes conditions de charge possibles, exige que les éléments structurels soient correctement configurés. La stabilité géométrique, qui est assurée par la mise en œuvre d'un système de contreventement. Une résistance et une rigidité adéquate qui sont fournies par la spécification des éléments de structure de taille suffisante en fonction de la résistance du matériau constituant.

### 8.2.1 L'équilibre

Les principales charges auxquelles les bâtiments sont soumis sont les charges gravitationnelles, les charges de pression du vent et les charges inertielles causées par l'activité sismique.

Les charges gravitationnelles, qui sont causées par le poids du bâtiment lui-même et de son contenu, agissent verticalement vers le bas ; le vent et les charges sismiques ont des composantes horizontales importantes mais peuvent également agir verticalement. Pour fonctionner de manière satisfaisante, une structure doit être capable d'atteindre un état stable d'équilibre statique en réponse à toutes ces charges - à résister dans n'importe quelle direction, en d'autres termes. Il s'agit de l'exigence principale ; la forme et l'agencement général d'une structure doivent être tels qu'ils rendent cela possible.

La distinction entre les exigences de stabilité et d'équilibre est importante et les principes de base sont illustrés à la Fig. 1.5. L'équilibre se produit lorsque les réactions aux fondations d'une structure équilibrent et contrecarrent exactement la charge appliquée ; s'il n'était pas en équilibre, la structure changerait de position en réponse à la charge.

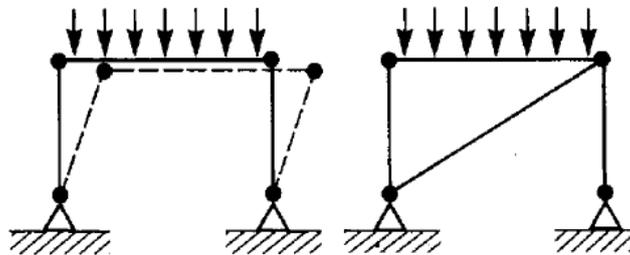


Figure 8.5 Le premier des cadres ici est capable d'atteindre l'équilibre sous la charge représentée mais est instable. L'insertion de l'élément diagonal dans le deuxième cadre le rend capable d'atteindre un équilibre stable.

### 8.2.2 La stabilité

La stabilité concerne la capacité d'un agencement structurel qui est en équilibre à s'adapter à de petites perturbations sans subir de changement majeur de forme. Le premier des cadres poutre / poteau de la figure 5.5 est dans un état d'équilibre statique mais n'est pas stable et s'effondrera s'il est soumis à un petit déplacement latéral.

L'insertion d'un élément de contreventement diagonal dans le deuxième cadre empêche cela et rend le système stable. La plupart des dispositions structurelles nécessitent un contreventement pour assurer la stabilité et la conception de systèmes de contreventement est un aspect important de la conception structurelle.

Comme l'illustre la structure schématique simple de la figure 8.6, les éléments structurels d'un bâtiment assurent le lien entre les charges appliquées et les réactions de la fondation afin que l'équilibre puisse être atteint. Pour être efficaces, les éléments doivent être suffisamment résistants.

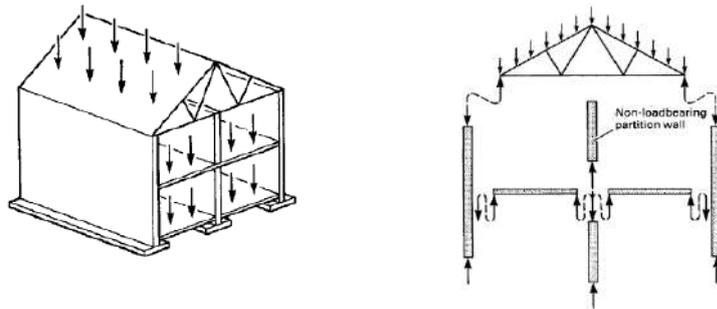


Figure 8.6 Système de force dans la structure d'un bâtiment. Les fermes de toit, les murs et les planchers doivent être suffisamment solides pour supporter les forces internes générées par les charges.

### 8.2.3 La résistance

La résistance d'un élément dépend de la résistance du matériau constitutif et de la surface et de la forme de sa section transversale. Plus le matériau est solide et plus la section est grande, plus l'élément est résistant, il est possible de produire un élément résistant même si le matériau constitutif est faible en spécifiant une très grande section.

Dans le cas d'une structure particulière, une fois les exigences de stabilité et d'équilibre remplies, la fourniture d'éléments ayant une résistance adéquate est d'abord une question de détermination des amplitudes des forces internes qui se produiront dans les éléments lorsque la charge de pointe est appliquée à la structure. Deuxièmement, un matériau structurel de résistance connue doit être sélectionné et troisièmement, les tailles et les formes des sections transversales doivent être choisies de telle sorte que chaque élément puisse supporter en toute sécurité la force interne que la charge va générer.

**Les calculs** sont un aspect essentiel de ce processus et sont nécessaires à la fois pour déterminer les amplitudes des forces dans les éléments individuels « l'analyse structurelle » puis pour calculer les sections efficaces des éléments.

#### 8.2.4 La rigidité

Une quatrième propriété qu'une structure doit posséder, en plus des exigences d'équilibre, de stabilité et de résistance, est une rigidité adéquate.

Tous les matériaux structuraux se déforment en réponse à la charge et il est nécessaire que la déflexion globale d'une structure ne soit pas excessive. Comme pour la résistance, la rigidité de la structure dépend des propriétés du matériau et des dimensions des sections transversales qui doivent être suffisamment grandes pour éviter toute déformation excessive. Comme la résistance, la rigidité est vérifiée et contrôlée par le biais de calculs.

### 8.3 Genèse du schéma structurel

Le processus de conception structurelle peut être divisé en deux parties :

- L'étape de conception préliminaire, lorsque la forme et l'agencement général de la structure sont conçus.
- L'étape au cours de laquelle les calculs structurels sont effectués et les dimensions des différents éléments structurels sont déterminées.

Dans le cas d'une structure architecturale, de nombreuses décisions associées à l'étape préliminaire de la conception d'une structure sont prises, consciemment ou inconsciemment, lorsque la forme du bâtiment est déterminée. L'agencement général choisi pour un bâtiment déterminera normalement le type de structure qui devra être adopté pour le soutenir et dictera probablement aussi le choix du matériau de construction.

Dans le cas du bâtiment ci-dessous (Fig. 8.7) où il était nécessaire d'avoir un grand espace intérieur sans mur et des murs extérieurs en verre, il n'y avait pas d'alternative à l'adoption d'une structure de type portique. Les exigences relatives à une forme en plan curviligne avec des poteaux en retrait par rapport au périmètre imposaient l'utilisation de béton armé plutôt que d'acier comme matériau structurel.

Le résultat dans ce cas a été un bâtiment dans lequel les exigences architecturales et structurelles ont été satisfaites dans une égale mesure et le bâtiment résiste bien aux critiques architecturales et techniques.



Figure 8. 7 Bâtiment composé d'une grille de piliers en béton, espacés de 14 m, supportant des planchers en dalles de béton en porte-à-faux. L'extérieur est revêtu d'un mur-rideau en verre fumé foncé.

Le concept initial d'un bâtiment, qui détermine sa forme globale et la disposition du solide et du vide, exerce une influence dominante sur sa constitution structurelle ultérieure.

Certains aspects de la conception des structures, tels que la géométrie précise d'une grille de poutre et de poteau ou les dimensions des éléments, peuvent rester indécis jusqu'à un stade ultérieur de la conception, de nombreux choix structurels importants seront fait une fois que la forme finale du bâtiment est déterminée.

La conception de la structure qui soutiendra un bâtiment est une partie identifiable et discrète du processus global de conception dans laquelle quatre grandes catégories de prise de décision peuvent être identifiées.

- La décision sur le type de relation qui existera entre la conception architecturale et la conception structurelle ;
- La sélection du type générique de structure du bâtiment ;
- La sélection du matériau structurel ;
- La détermination de la forme et de la disposition détaillées de la structure.

### 8.3.1 Relation entre structure et Architecture

La conception détaillée d'une structure est normalement réalisée par un ingénieur en structure (plus probablement une équipe d'ingénieurs) mais, comme cela a été noté ci-dessus, la forme globale d'une structure architecturale est déterminée par celle du bâtiment qu'elle supporte et donc principalement par l'architecte (ou l'équipe d'architectes). Cela soulève la question de savoir dans quelle mesure l'architecte devrait se préoccuper des considérations structurelles lorsqu'il détermine la forme et l'agencement général d'un bâtiment.

Il est donc possible que la structure et l'architecture soient liées de plusieurs manières différentes et l'une des premières décisions qui doit être prise par une équipe de conception qui a une pleine

conscience de l'activité dans laquelle elle est engagée, concerne la nature de Cette relation. Souvent, la question n'est pas claire et certains architectes nient même qu'il puisse y avoir plus d'une relation appropriée entre la structure et l'architecture.

Il a cependant été suggéré que «la relation peut prendre un certain nombre de formes différentes et que la totalité des relations possibles entre la structure et l'architecture peuvent être résumées dans les quatre catégories :

Structure ignorée,

Structure acceptée,

Structure symbolisée

Structure haute technologie.

- Si l'on a accordé une haute priorité de conception aux considérations techniques le bâtiment est du type «structure acceptée» ou «haute technologie structurelle».
- Si l'on a accordé une plus grande importance aux considérations esthétiques, le bâtiment sera un exemple de «structure symbolisée» ou de «structure ignorée».
- Si les problèmes techniques ont, en réalité, reçu la plus haute priorité, le bâtiment tombera dans la catégorie des «véritables hautes technologies structurelles».
- Si le problème structurel est spectaculaire, comme une très grande portée, la structure résultante, et donc le bâtiment, sera également visuellement frappant.
- Si le problème structurel est modeste - un bâtiment de petite ou moyenne envergure - la meilleure solution structurelle sera presque certainement aussi modeste et du type poteaux et poutres.

Une meilleure architecture aurait probablement résulté si la véritable nature de la relation entre la structure et l'architecture avait été plus pleinement appréciée et reconnue. Cette dernière affirmation est généralement vraie : le résultat final d'un processus de conception architecturale est plus susceptible d'être satisfaisant si l'architecte est pleinement conscient de la nature de la relation entre les problèmes techniques et esthétiques.

### **8.3.2 Sélection du type générique de la structure**

Les structures des bâtiments peuvent être classées sur la base de la relation entre forme et efficacité dans les trois grandes catégories : «forme active», «forme semi-active et «forme non-active »."

Le but est d'aider à la compréhension du rôle des éléments structurels pour déterminer les performances de structures complètes. Il fournit donc une base pour l'étude d'un bâtiment comme objet structurel.

- Les éléments a forme active sont ceux dont la forme est conforme aux modèle de charge qui leurs est appliqué et ils contiennent uniquement des forces internes axiales.
- Les éléments a forme non active sont ceux dont l'axe longitudinal n'est pas conforme aux modèle de charge qui leurs est appliqué et sont telles qu'aucune composante de la force interne axiale ne se produit. Ceux-ci contiennent uniquement des forces internes de type flexion.
- Les éléments semi-actifs sont des éléments dont les formes sont telles qu'elles contiennent une combinaison de forces internes axiales et de flexion.

Il est important de noter que les éléments structuraux ne peuvent être à forme actives que dans le contexte d'un modèle de charge particulier. Il n'y a aucune forme qui soit active en soi. La forme de poutre coudée sur la figure 8.8, par exemple, est un élément pleinement actif lorsqu'il est soumis à deux charges concentrées, mais devient un élément semi-actif lorsqu'il est soumis à la charge uniformément répartie.

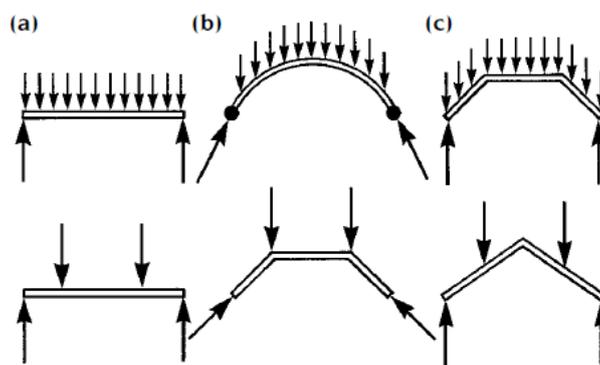


Figure 8.8 Exemples de relation entre la forme de l'élément, le modèle de charge et le type d'élément, ce dernier est déterminé par la relation entre la forme de l'élément et le modèle de charge qu'il porte. (a) forme non active (contrainte de flexion uniquement). (b) Forme active (contrainte axiale uniquement). (c) Forme semi-active (flexion et contrainte axiale combinées).

Les structures poteau-poutre sont des assemblages d'éléments horizontaux et verticaux, ces derniers sont des formes non-actives;

Les structures entièrement forme actives sont des structures dont les géométries sont conformes à la forme active pour la charge principale appliquée ;

Les arrangements qui n'entrent dans aucune de ces catégories sont des formes semi-actives.

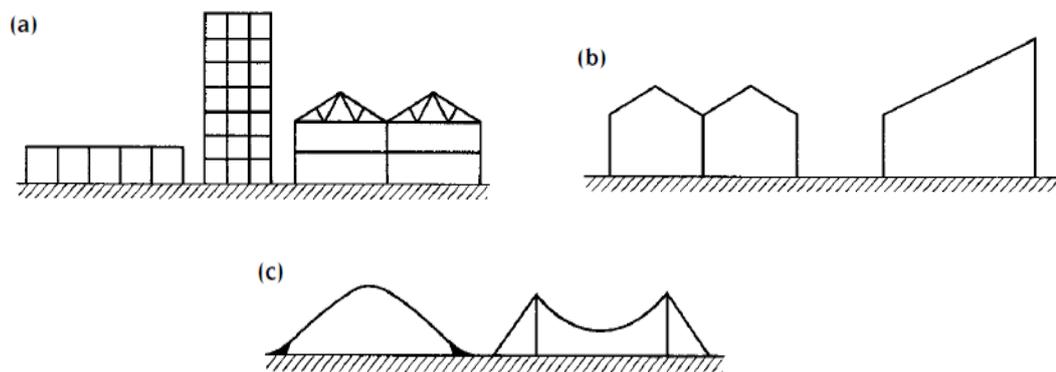


Figure 8.9 Les trois catégories de géométrie de base

a) Poteau-poutre. b) Forme semi-active. c) Forme-active.

Les modèles de formes actives sont potentiellement les types d'éléments structurels les plus efficaces et les formes non actives sont les moins efficaces. L'efficacité des éléments semi-actifs dépend de la mesure dans laquelle ils diffèrent de la forme active.

Un facteur important dans la sélection d'un type de structure pour un bâtiment est la nature de la relation qui a été adoptée entre la structure et l'architecture.

S'il s'agit de la catégorie "structure ignorée" par exemple, alors la forme globale du bâtiment, et donc de la structure, aura été déterminée sans tenir compte des exigences structurelles et la structure devra très probablement être du type forme semi-active.

Si la relation entre la structure et l'architecture est autre que "structure ignorée", il sera nécessaire de sélectionner un type de structure compatible avec les aspects esthétiques et programmatiques du bâtiment et qui est également sensible d'un point de vue structurel.

Le choix du type de structure devrait cependant être plus large car il devrait y avoir une volonté d'ajuster le programme esthétique pour répondre aux exigences structurelles et ainsi produire un bâtiment avec une structure qui est satisfaisante sur le plan technique.

La plupart des structures sont des assemblages de grande taille nombre d'éléments et les performances de la structure complète dépend principalement du types d'éléments qu'il contient

et sur les façons dont ceux-ci sont connectés ensemble, la principale influence sur le type d'élément est la forme de l'élément par rapport au motif de la charge appliquée.

### 8.3.3 La sélection du matériau structurel

Le choix du matériau structurel est une autre décision fondamentale dans la planification d'une structure. C'est une décision à la fois esthétique et technique. Chacun des quatre principaux matériaux de construction (acier, béton armé, maçonnerie et bois) produit un bâtiment avec une qualité visuelle distinctive. Le type de structure générique préféré affectera également le choix du matériau de structure et, en effet, ces deux problèmes sont souvent résolus ensemble.

Si, par exemple, une structure de mur porteur est adoptée, cela favorisera l'utilisation de la maçonnerie ou du bois. Le béton armé et l'acier seraient les choix normaux pour les structures à ossature en portique. Si une structure de mur porteur est utilisée pour un bâtiment à l'échelle domestique, il peut y avoir peu de choix entre la maçonnerie ou le bois du point de vue de l'action structurelle. Un mur de maçonnerie aura normalement une plus grande résistance par rapport à la charge de compression, " ce qui signifie que l'utilisation de la maçonnerie est essentielle si le bâtiment a plus de trois étages ".

On favorise également l'utilisation de la maçonnerie dans les situations où les espaces internes sont grands (plus de 8 m de portée) et dans d'autres situations, telles que l'adoption d'un modèle irrégulier de murs porteurs, dans lesquels les charges appliquées aux murs individuels sont susceptibles d'être élevées.

Autres considérations, telles que la disponibilité locale des matériaux, la vitesse de montage ou toute exigence de préfabrication de la structure est cependant plus susceptible d'influencer le choix du matériau de construction que la résistance requise.

Les structures à ossature poteau-poutres peuvent être construites en acier, en béton armé ou en bois.

- L'utilisation du bois est rare pour les bâtiments à plusieurs étages, et la charpente en bois est le plus souvent associée à des enceintes à un étage dans lesquelles la structure en bois est exposée à la vue. Souvent, les éléments structurels sont d'apparence spectaculaire (grandes fermes triangulées) et la structure contribue donc de manière significative à l'apparence du bâtiment.

L'apparence est souvent aussi la principale raison de la sélection du bois pour une charpente en ossature poteau-poutre, bien que la légèreté des éléments puisse également être un facteur. Le

bois peut également être sélectionné en raison de sa durabilité, par exemple lorsque des environnements internes hostiles, tels que ceux qui se produisent dans des structures de piscine, provoqueraient la corrosion d'une structure en acier.

La relation entre la structure et l'architecture doit normalement être du type «structure acceptée» ou «véritable structure de haute technologie» plutôt que du type «structure symbolisée», lorsque le bois est utilisé pour les ossatures. En effet, la réserve de résistance est normalement insuffisante pour permettre aux performances structurelles d'être compromises pour un effet purement visuel.

- Le béton armé est rarement utilisé pour les bâtiments à étage simple car le poids propre élevé des éléments structuraux les rendent inadaptés aux situations dans lesquelles les charges imposées sont faibles. Pour la même raison, le béton armé est rarement utilisé pour les structures de toit dans les bâtiments à plusieurs étages, sauf pour les toits plats, sous forme de terrasses, auxquels l'accès est autorisé et qui sont donc tenus de supporter des charges de toit supérieures à la normale.

Le béton armé peut être sélectionné pour un certain nombre de raisons. Souvent, il fournira la structure de plus faible coût en raison à la fois du faible coût inhérent du matériau et de l'élimination du besoin de matériaux de finition supplémentaires ou d'ignifugation. La bonne durabilité du béton est l'un de ses avantages considérables. Le béton peut également être sélectionné en raison des opportunités qu'il offre par rapport à la forme.

La moulabilité du matériau et la facilité avec laquelle il permet d'assurer la continuité structurelle favorisent son utilisation dans des situations où des géométries structurelles complexes doivent être produites, en particulier si elles impliquent des formes curvilignes.

- L'acier convient aux bâtiments à un seul et à plusieurs étages. Les choix normaux dont dispose le concepteur d'une structure à ossature poteau-poutre sont donc entre l'acier et le bois pour les cadres à un étage et entre l'acier et le béton armé pour les cadres à plusieurs étages. Les raisons du choix de l'acier sont sa haute résistance, son apparence (en particulier dans le contexte de l'approche «structure symbolisée») ou la vitesse de construction qu'il permet. La résistance est évidemment importante si de longues portées sont impliquées ou s'il est nécessaire de produire une structure de faible volume et avec des éléments élancés.

Tous les matériaux imposent des contraintes et offrent des opportunités. Ainsi, à moins que la méthode «structure ignorée» soit pratiquée, les limites du matériau doivent normalement

être reconnues une fois qu'il a été choisi. La nature de ces contraintes est quelque chose qui est pris en compte lors de la sélection du matériau pour garantir qu'il est compatible avec les intentions des architectes.

#### **8.3.4 La détermination de la forme et de la disposition détaillées de la structure**

Les divers aspects du processus décisionnel par lesquels la forme de la structure d'un bâtiment est déterminée peuvent être résumés comme suit.

Premièrement, plusieurs facteurs universels importants influencent le choix du type de structure. Le groupe le plus important est peut-être les objectifs architecturaux fixés par le ou les architectes.

La forme de la construction qui résulte de l'approche déconstruisme est susceptible d'être très différente de celles dont l'approche est plus proche du courant dominant moderniste. Une autre forme est susceptible de résulter de modernistes de haute technologie.

La relation qui existe entre la conception structurale et la conception architecturale, est encore un autre facteur universel qui est susceptible d'influencer la forme finale de la structure.

Les facteurs particuliers au bâtiment en cours de conception exerceront évidemment une forte influence sur sa constitution structurelle. Celles-ci incluent les conditions sur le site, l'échelle du bâtiment et le caractère de son aménagement intérieur tel que déterminé par les types d'hébergement.

## 9. Introduction aux architectures High Tech

### Introduction

L'architecture de haute technologie, également connue sous le nom de modernisme tardif ou d'expressionnisme structurel, est un style architectural qui a émergé dans les années 1970, incorporant des éléments de l'industrie high-tech dans la conception des bâtiments. L'architecture de haute technologie est apparue comme un modernisme remanié, une extension de ces idées précédentes, aidée par encore plus d'avancées technologiques. Cette catégorie sert de pont entre le modernisme et le postmodernisme, mais il reste des zones d'ombre quant à la fin d'une catégorie et à celle où commence l'autre. Dans les années 80, l'architecture high-tech est devenue plus difficile à distinguer de l'architecture post-moderne. Beaucoup de ses thèmes et idées ont été absorbés dans le langage des écoles d'architecture post-modernes.

Comme le brutalisme, les bâtiments expressionnistes structurels révèlent leur structure à l'extérieur comme à l'intérieur, mais en mettant l'accent visuel sur la structure squelettique intérieure en acier et / ou en béton par opposition aux murs en béton extérieurs.

Les bâtiments de haute technologie sont souvent appelés des machines. L'acier, l'aluminium et le verre se combinent avec des poutres aux couleurs vives. Beaucoup de pièces de construction sont préfabriquées dans une usine et assemblées plus tard. Les poutres de support, les conduits et autres éléments fonctionnels sont placés à l'extérieur du bâtiment, où ils deviennent le centre d'attention. Les espaces intérieurs sont ouverts et adaptables à de nombreuses utilisations.

### 9.1 Caractéristiques des structures High-tech

1. L'accent mis sur les éléments techniques colorés exposés.
2. La mise en évidence des éléments techniques et fonctionnels du bâtiment sur la façade extérieure.
3. L'utilisation d'éléments préfabriqués, de parois en verre et de cadres en acier.
4. La technologie étant la principale caractéristique du bâtiment.
5. La conception de l'architecture est très axée sur les fonctions.
6. Le grand espace ouvert intérieur et l'accès facile à tous les étages
7. Netteté dans la conception architecturale.
8. Les bâtiments de haute technologie utilisent constamment des murs-rideaux en verre et une structure en acier.

## 9.2 Exemples de structures High-Tech

### 9.2.1 Centre George Pompidou Paris



Figure 9.1 Centre Pompidou (Paris)

Un exemple des plus typiques est le centre Pompidou à Paris où le système de ventilation est montré de façon spectaculaire sur l'une des façades.

Cette esthétique apparaissait radicale parce qu'identique à celle donnée par la construction des usines et aucunement avec celle d'un musée.

Pour un édifice de cette fonction, dans « l'ancienne » conception, les conduits de ventilation auraient été cachés à l'intérieur du bâtiment.

Le système d'accès aux étages est aussi placé à l'extérieur, avec de gros tuyaux de circulation serpentant sur la façade.



Figure 9.2 Système de ventilation du bâtiment

Les tuyaux extérieurs colorés sont eux aussi une signature forte du Centre :

L'air (climatisation et chauffage), est représenté par la couleur bleue,

L'eau (nécessaire au fonctionnement de la climatisation, mais aussi aux sanitaires et aux bornes incendie), est représentée par la couleur verte,

L'électricité (pour l'éclairage et le fonctionnement des ascenseurs, monte-charges et escaliers mécaniques), est représentée par la couleur jaune,

Les circulations (ascenseurs, escaliers mécaniques, monte-charges), sont représentées par la couleur rouge.

### 9.2.2 Le siège de la banque HSBC à Hong Kong

Le HSBC Main Building est l'immeuble qui abrite le siège de la banque HSBC pour Hong Kong. Conçu par l'architecte Norman Foster et achevé en 1985, il est le quatrième siège de HSBC à Hong Kong.

Il était, lors de sa création, le building le plus cher au monde. Il couta en effet plus d'un milliard de dollars américains au groupe HSBC. Sa façade en "cintre de vêtements" le distingue des autres buildings du central.

Conçu avec le bureau d'études Ove Arup & Partners, le gratte-ciel de 183 mètres de haut près du port de Hong Kong comprend trois tours individuelles placées côte à côte.

La structure est à l'extérieur, tout ce qui était dans le noyau central traditionnel a été retiré et est exprimé sur les côtés.

Plutôt qu'un noyau structurel central, le bâtiment est soutenu par des fermes suspendues à huit groupes de quatre colonnes placées sur deux rangées au bord du gratte-ciel.



Figure 9.3 Le siège de la banque HSBC ( Hong Kong)

### 9.2.3 Le centre de distribution de Renault Swindon Royaume Uni

Le centre de distribution Renault de Norman Foster à Swindon, l'un des exemples les plus expressifs et distinctifs du style.



Figure 9.4 Le centre de distribution de Renault Swindon (Royaume Uni)

Achévé en 1982 par Foster Associates, devenu Foster + Partners, le centre de distribution Renault était le principal centre de distribution britannique du constructeur automobile français Renault.

Avec sa structure exprimée, c'est l'une des démonstrations les plus claires de l'architecture High-Tech.

Contrairement à d'autres immenses hangars de distribution, souvent anonymes, le bâtiment de 25 000 mètres carrés a un profil extrêmement distinct créé par 59 mâts jaune vif et des poutres en acier cintrées qui soutiennent le toit.

Le toit distinctif du bâtiment a été créé car Renault avait besoin d'un espace flexible avec de grands espaces ouverts pour le rayonnage et le stockage de l'entrepôt industriel, qui devraient être reconfigurés régulièrement tout au long de la vie du bâtiment.

Au total, la structure est composée de 42 modules carrés de 24 mètres sur 24 mètres chacun. Chaque module a un toit en membrane PVC tendu sur une grille de poutres en acier cintrées qui sont maintenues par des attaches reliées à des mâts à leurs coins.

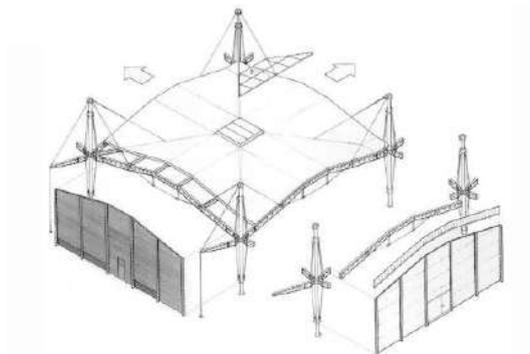


Figure 9.5 Schéma du toit du bâtiment.

## Questions de cours

### Question 1

Quelles sont les conditions nécessaires pour assurer le contreventement général d'une construction ?

### Question 2

Quelles sont les solutions mises en œuvre par les constructeurs pour assurer la résistance aux vents des IGH, donner un exemple pour chacune ?

### Question 3

Le comportement d'un sol repose essentiellement sur la connaissance de ses caractéristiques mécaniques, citer les deux principales catégories ainsi que le but de chacune ?

### Question 4

Par quoi est assuré le contreventement par pans rigides ?

### Question 5

Quel est le but de l'amélioration des sols ?

### Question 6

Qu'est-ce qu'une structure funiculaire ?

### Question 7

Quels sont les principaux modes de rupture d'un mur de soutènement ?

### Question 8

Quels types d'efforts sont rencontrés dans un pont en arc ?

### Question 9

Quelle est la différence entre l'équilibre et la stabilité d'une structure ?

### Question 10

Quel type de relation entre la structure et l'architecture existe pour un bâtiment dans lequel une grande importance est accordée aux considérations esthétiques ?

## Réponses aux questions de cours

### Réponse 1

- Au moins trois plans de contreventement selon les trois plans du repère orthogonal.
- Au moins trois plans verticaux non concourants.

### Réponse 2

La résistance des IGH aux forces horizontales peut être assurées par :

1. Les Dampers ou amortisseurs, exemple « la tour Taipei 101 à Taiwan ».
2. La structure elle-même qui doit être rigide, exemple « la Sears Tower ».
3. La différence de surface entre la base et le sommet de la tour, une tour de forme pyramidale exemple « L'hôtel Ryugyong, en Corée du nord ».
4. Suppression des façades à certains étages de la tour pour permettre au vent de circuler, exemple « la tour 432 Park avenue New York ».
5. La forme du bâtiment, tours aérodynamiques, exemple « La Shanghai Tower, la tour Suisse RE »

### Réponse 3

- Les caractéristiques mécaniques de compressibilité dont le but est de déterminer les déformations du sol, c'est-à-dire les tassements à long terme ou à court terme.
- Les caractéristiques mécaniques de cisaillement dont le but est de déterminer la résistance du sol aux sollicitations qui lui sont appliquées et sa capacité portante, et par conséquent le choix du mode de fondation et les dimensions des éléments enterrés.

### Réponse 4

Le contreventement par pan rigides peut être assuré par :

- des triangulations en béton armé
- des voiles en béton armé
- remplissages en maçonnerie chaînée.

### Réponse 5

Les techniques d'amélioration des sols ont pour but de :

- augmenter la capacité portante et/ou la résistance au cisaillement,
- diminuer les tassements, tant absolus que différentiels, et le cas échéant les accélérer,

- diminuer ou éliminer le risque de liquéfaction en cas de tremblement de terre

**Réponse 6**

Une structure funiculaire est une structure qui est soumise uniquement aux forces de traction et/ou de compression.

**Réponse 7**

Un mur de soutènement peut se rompre par : glissement, renversement, enfoncement ou à cause d'une surcharge importante.

**Réponse 8**

Les efforts rencontrés dans des ponts en arc sont des efforts de compression

**Réponse 9**

Une structure est en équilibre lorsque les réactions aux fondations équilibrent et contrecarrent exactement la charge appliquée, la stabilité est la capacité d'un agencement structurel qui est en équilibre à s'adapter à de petites perturbations sans subir de changement majeur de forme.

**Réponse 10**

Ce type de bâtiment est un exemple de la relation « structure symbolisée » ou « structure ignorée ».

## Références bibliographiques

- Charleson A. (2005) Structure as Architecture
- Degoutte G. Royet P. (2009) Aide-mémoire de mécanique des sols.
- Eurocode 8 Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes.
- Hirt M. Crisinel M. (2001) Charpente métallique Volume 11.
- Landowski M. Lemoine B. (2005) Concevoir et construire en acier collection.
- Lérau J. (2005-2006) Géotechnique1 cours de l'INSA Toulouse.
- Macdonald Angus J. (2001) Structure and Architecture
- Plumelle C. (2004-2005) Cour géotechnique C.N.A.M- Géotechnique B1/B6.
- Rambaud A. Marnac S. (2012) Construire en zone sismique
- Règles parasismiques algérienne RPA 99 / version 2003
- Schierle CG. (2006) Architectural Structures
- Tidjani-Serpos M. Rafiou (2016) procédés généraux de construction des châteaux d'eau.
- Zacek M. (2003) Conception parasismique

### Sites internet :

- <https://www.georisques.gouv.fr/>
- <https://tpeconstructiontour.wordpress.com/author/charliagtv/>
- <http://gratte-ciels.e-monsite.com/>
- <http://biblioconstruction.blogspot.com/2019/11/les-murs-de-soutenement.html>