

# Chapitre 1 : Conception et calcul des systèmes de contreventements d'ossatures métalliques

## 1. Introduction :

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).

## 2. Principe :

Pendant un séisme, une construction reçoit des charges horizontales qui, comme les charges verticales doivent être transmises jusqu'au sol d'assise de la construction.

Pour ce faire deux approches sont possibles:

- **Structures autostables:** les descentes de charges horizontales passent par les mêmes éléments de structure que les charges verticales (murs, coques, treillis tridimensionnels, portiques croisés...)
- **Structures contreventées:** les descentes de charges horizontales passent par des dispositifs spécifiques (systèmes articulés + contreventements...)

Les structures **contreventées** sont, pour un grand nombre de partis architecturaux, **moins coûteuses que les structures autostables**. Le contreventement d'une structure doit être **horizontal et vertical**. La qualité des liaisons entre la structure et les éléments de contreventement, et en général la qualité de leur mise en œuvre, conditionne leur efficacité

L'absence de contreventement et une concentration de contraintes trop élevée en tête de poteaux sont parmi les principaux facteurs de ruine en cas de séisme.



Figure 1: Effondrement total des constructions non ou mal contreventées

### 3. Choix de contreventement :

Le contreventement permet d'assurer une stabilité horizontale et verticale de la structure lors des secousses qui, rappelons-le, ont des composantes dans les trois directions. 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.

#### 4. Contreventement général des bâtiments :

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, telles celles résultant de l'action du vent, mais aussi de permettre éventuellement aux bâtiments de subir sans dommages excessifs les effets de certaines sollicitations exceptionnelles, telles que des explosions localisées. Ces problèmes se posent avec une acuité particulière dans les immeubles à grand nombre d'étages

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. Ces solutions peuvent être classées en trois grandes catégories

##### 4.1. Contreventement assuré par portique :

Les portiques doivent être conçus pour résister non seulement aux forces de pesanteur, mais également aux forces horizontales ; cette résistance 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.

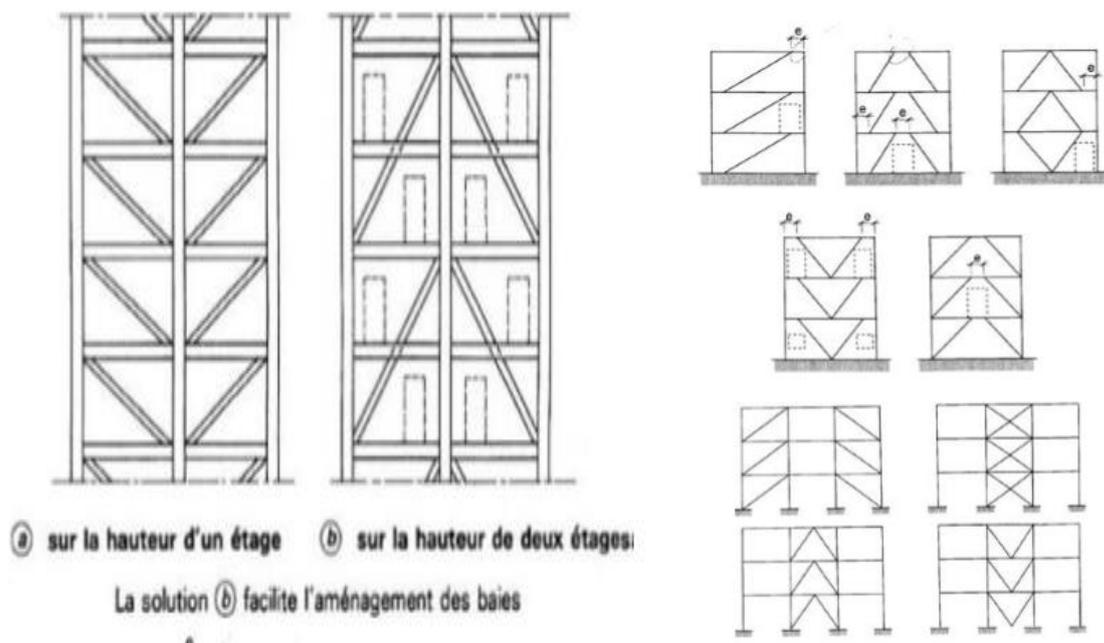


Figure 2 : Ossature en portique (à des travées)

#### 4.2. Contreventement assuré par pans rigides :

La rigidité des pans de contreventement peut être assurée :

- Soit par des triangulations;
- 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.



#### 4.3. Noyau de stabilité des immeubles-tour :

La stabilité des immeubles-tours à usage d'habitation et surtout de bureaux est très souvent assurée par un ouvrage situé en partie centrale, constitué par des parois verticales, en voiles de béton armé, disposées suivant des plans orthogonaux, et par les planchers. Cet ensemble trouve le plus souvent sa place dans la zone où sont rassemblées les circulations verticales (ascenseurs et escaliers de secours) et des locaux annexes ne recevant pas la lumière naturelle (salles de bains, toilettes, vestiaires, archives, etc.)

Les parois de ce noyau assurent la transmission d'une partie des charges verticales et, à elles seules, la résistance aux forces horizontales, notamment aux actions du vent. Les

éléments verticaux de la structure, tout autour du noyau, n'ont en principe à supporter que des charges verticales.

Dans certains cas, le noyau de stabilité a été réalisé en béton armé, alors que les parties périphériques comportaient une ossature –poutres et poteaux –en métal.

Il faut cependant noter que, dans certains immeubles-tours, ce sont les ossatures des façades qui ont été conçues pour assurer la stabilité sous l'action du vent.

## 5. Classification des ossatures :

Les structures métalliques sont classées sur base des caractéristiques « **contreventées** ou **non-contreventées** » et « **rigides** ou **souples** » (ou encore d'un point de vue des déplacements horizontaux, à « **nœuds fixes** ou à **nœuds mobiles** »).

Cette classification conduit donc à la définition de quatre types d'ossatures.

### 5.1. Classification sur base de contreventement :

Un système de contreventement est normalement destiné à transmettre les charges horizontales aux fondations et à empêcher, ou au moins à restreindre, les déplacements latéraux dans les ossatures à un ou plusieurs étages. Il peut également avoir pour rôle de fournir des appuis nécessaires à la stabilisation d'éléments porteurs. Les treillis verticaux les murs de cisaillement (en maçonnerie ou en béton) et les noyaux centraux en béton, combinés avec des dalles ou des treillis horizontaux, constituent des systèmes de contreventement courants.

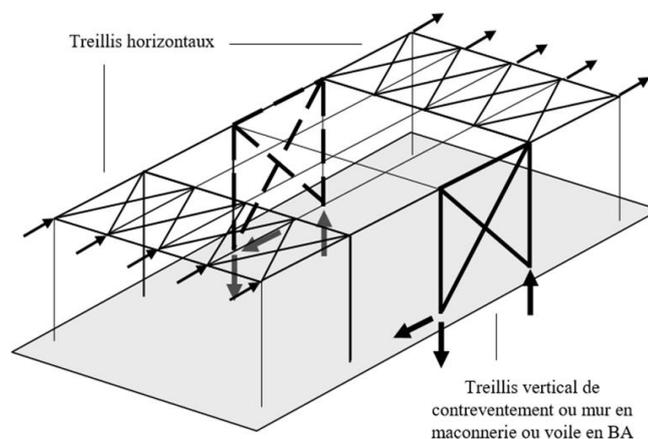


Figure 3 : Stabilisation longitudinale d'un bâtiment industriel par contreventement

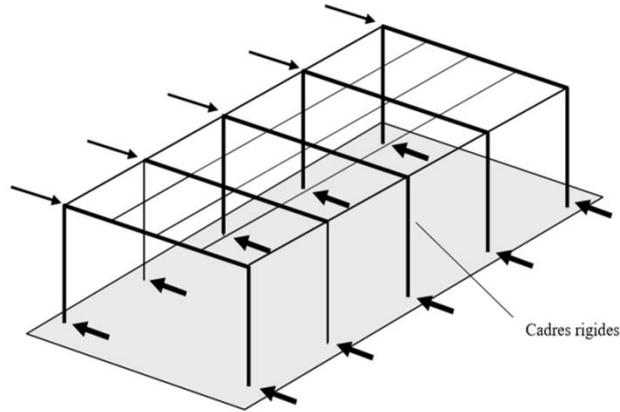


Figure 4 : Stabilisation latérale d'un bâtiment industriel assurée par cadres rigides (absence de contreventement)

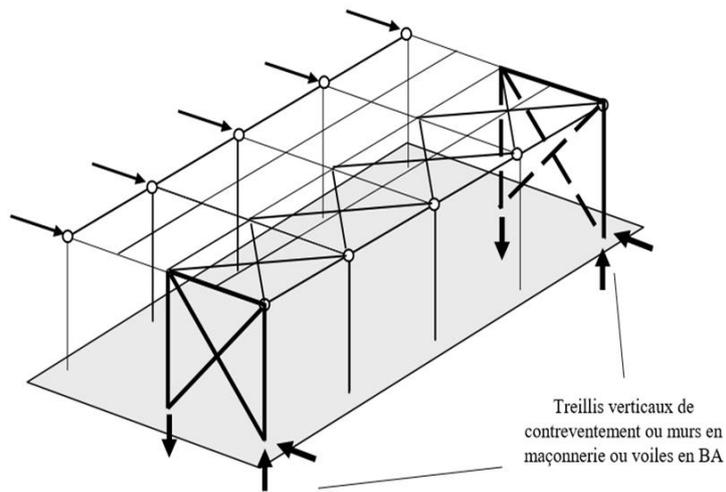


Figure 5 : Stabilisation latérale d'un bâtiment industriel à ossature articulée, par contreventement

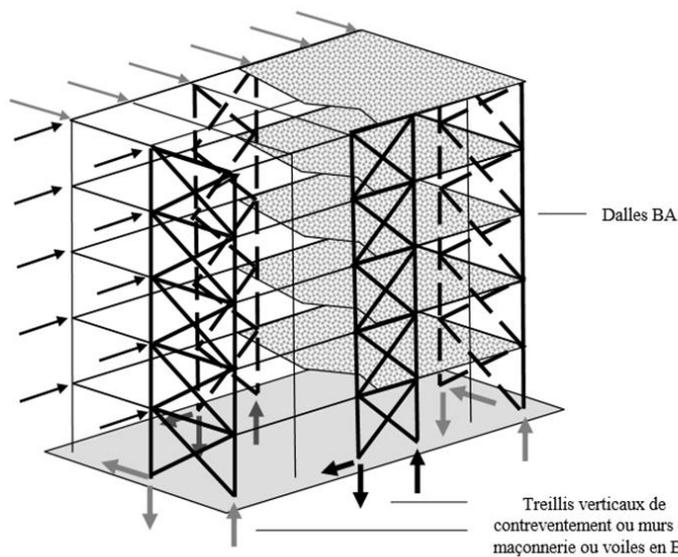


Figure 6 : Stabilisation longitudinale et latérale d'un bâtiment à étages assurée par divers contreventements

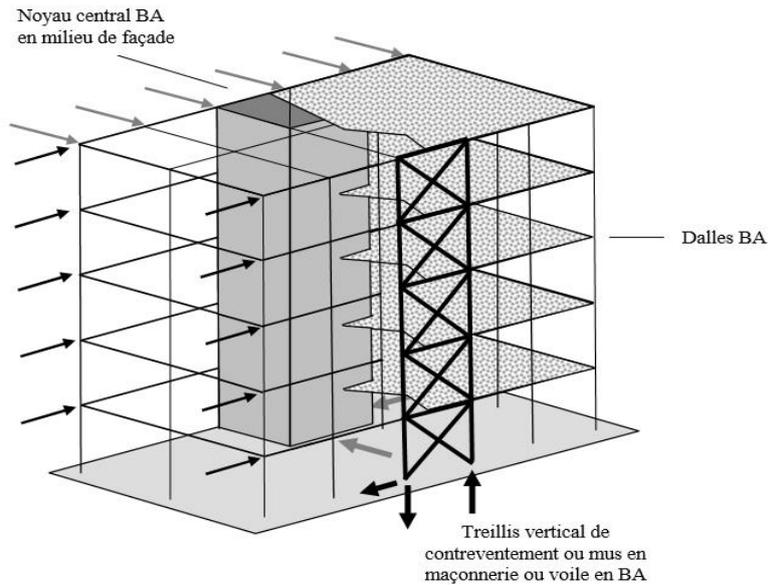


Figure 7 : Stabilisation d'un bâtiment à étages par un Noyau central en béton armé

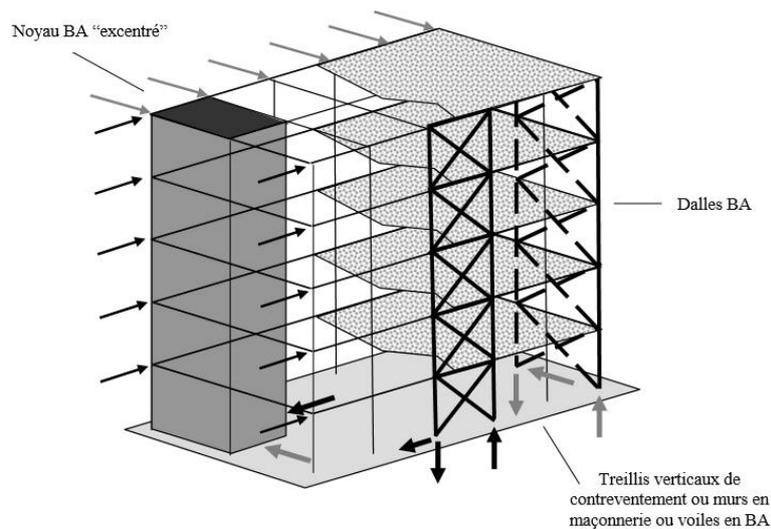


Figure 8 : Stabilisation d'un bâtiment à étages avec un noyau en béton armé excentré

## 5.2. Palées triangulées :

Les travées triangulées sont des systèmes de contreventement assez rigides. Elles peuvent être constituées de:

- **Tirants en diagonale** (ne travaillent pas en compression, fatiguent sous les efforts alternés et dissipent très peu d'énergie)
- **Barres en diagonale, en X, en V ou autres** (attention à la création de tronçons courts)



Figure 9 : Contreventement par des barres en X



Figure 10 : Contreventement par tirants en triangulation



Figure 11 : Contreventement par des barres en V

### 5.3. Ossature à cadre ou en portique :

Dans ce type de structure, la résistance aux forces horizontales est assurée principalement par la flexion des poteaux et des poutres. Il convient donc que les zones dissipatives soient principalement situées dans des rotules plastiques formées dans les poutres ou dans les assemblages, de sorte que l'énergie soit dissipée par flexion cyclique. Les zones dissipatives peuvent aussi être situées à la base de l'ossature et au sommet des poteaux dans le dernier niveau des bâtiments à plusieurs étages.

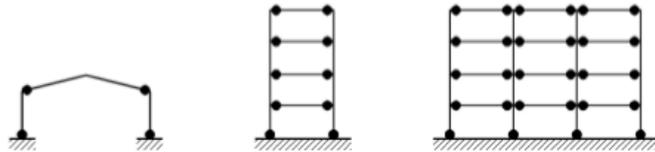


Figure 12 : Ossature à cadre ou en portique

Bien que ces structures soient très dissipatives, leur comportement flexible peut favoriser leur mise en résonance avec le sol surtout dans le cas d'un signal sismique potentiellement riche en basses fréquences (longues périodes). Dans ce cas, il est préférable de prévoir des contreventements afin de réduire leur période propre d'oscillation et d'exclure une éventuelle mise en résonance avec le sol d'assise.

### 5.4. Ossatures avec triangulation à barres centrées :

Ce sont des structures pour lesquelles l'intersection des barres du système de contreventement coïncide avec le milieu des éléments porteurs et ou avec la jonction poteaux poutres. La dissipation de l'énergie sismique se fait essentiellement par plastification en traction de ces barres à condition que le phénomène de flambement de ces dernières soit vérifié dans le cas de la compression. Il convient donc que les zones dissipatives soient principalement situées dans les barres tendues.

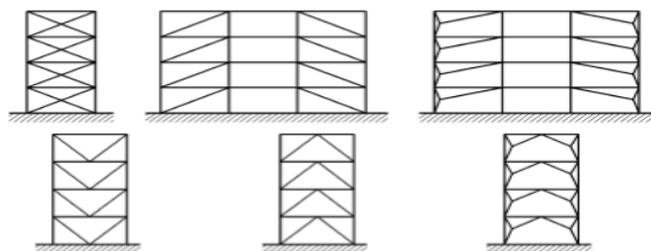


Figure 13 : Ossatures avec triangulation à barres centrées

### 5.5. Ossatures avec triangulation à barres excentrées :

Dans ce type de structure, l'intersection des barres de contreventement peut se localiser à n'importe quel point de la poutre selon la configuration adoptée. La dissipation de l'énergie sismique se fait principalement par plastification des barres tendues mais peut se faire par formation, dans des tronçons sismiques, d'une rotule plastique travaillant soit en flexion cyclique, soit en cisaillement cyclique. Il convient donc d'utiliser des configurations permettant de garantir que tous les tronçons d'excentrement seront actifs.

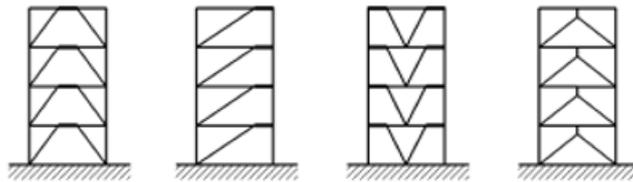


Figure 14 : Ossatures avec triangulation à barres excentrées

### 6. Quelques types de contreventement à barres centrées :

Il existe plusieurs configurations pour les systèmes de contreventement à barres centrées parmi lesquelles on peut citer :

#### 6.1. Contreventement en X (croix de Saint André) :

Dans ce type de palée, on admet que la résistance aux forces horizontales est assurée uniquement par les diagonales tendues, les diagonales comprimées étant négligées. Ce système de contreventement est caractérisé par des sections réduites des diagonales qui peuvent ne pas se situer sur une même travée.

Ce système de contreventement n'intervient efficacement dans la dissipation d'énergie qu'en cas de sollicitation en traction des diagonales.

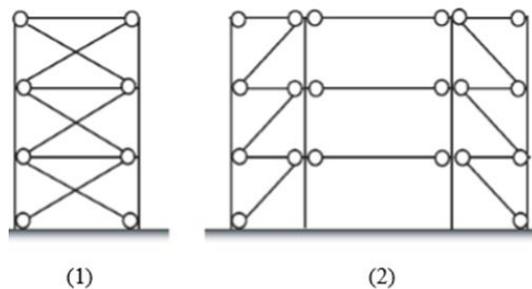


Figure 15 : Contreventement en X (1) Diagonale sur la même travée (2) Diagonales sur deux travées différentes

### 6.2. Contreventement en V:

Dans ce cas, la résistance aux forces horizontales est assurée simultanément par les diagonales tendue et comprimée ce qui leur confère des sections plus importantes que celles du contreventement en croix de Saint André. Le point d'intersection de ces diagonales est situé sur une barre horizontale qui doit être continue. La configuration imposée par ce système de triangulation favorise l'apparition rapide de rotules plastiques à des endroits peu souhaités

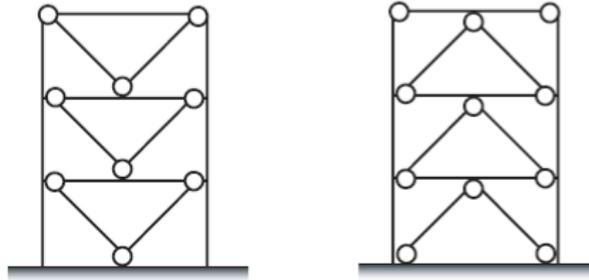


Figure 16 : Contreventement en V

### 6.3. Contreventement en K :

Dans ce système de contreventement, le point d'intersection des diagonales est situé sur l'axe des poteaux. Un tel système ne peut être considéré comme dissipatif parce qu'il exigerait la contribution d'éléments nécessaires à la stabilité d'ensemble au mécanisme plastique.

Les contreventements en K sont à éviter surtout dans les zones sismiques vu que l'intersection des barres de contreventement se situe au niveau des poteaux et non des poutres provoquant ainsi la création de rotules plastiques dans ce dernier, ce qui constitue un risque d'effondrement de la structure.

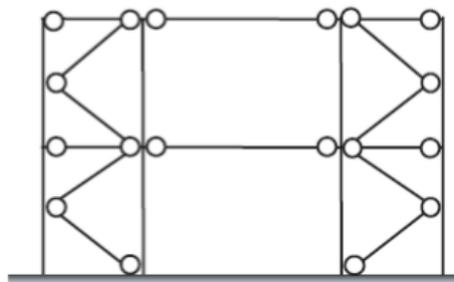


Figure 17 : Contreventement en K

#### 6.4. Coefficient de comportement R :

Le coefficient de comportement R permet de prendre en compte la capacité de dissipation d'énergie de la structure. Les valeurs de référence de ce coefficient sont données dans le tableau conformément aux exigences du règlement parasismique Algérien RPA2003 :

##### Structures en béton armé

| Catégorie | Type de contreventement                                     | R   |
|-----------|---|-----|
| 1a        | Portiques autostables sans remplissage en maçonnerie rigide | 5   |
| 1b        | Portiques autostables avec remplissage en maçonnerie rigide | 3.5 |
| 2         | Voiles porteurs   | 3.5 |
| 3         | Noyau   | 3.5 |
| 4a        | Mixte portiques/voiles avec interaction                     | 5   |
| 4b        | Portiques contreventés par voiles                           | 4   |
| 5         | Console verticale à masses réparties                        | 2   |
| 6         | Pendule inverse   | 2   |

##### Structures en acier

| Catégorie | Type de contreventement                           | R |
|-----------|---|---|
| 7         | Portiques autostables ductiles                    | 6 |
| 8         | Portiques autostables ordinaires                  | 4 |
| 9a        | Ossature contreventée par palées triangulées en X | 4 |
| 9b        | Ossature contreventée par palées triangulées en V | 3 |
| 10a       | Mixte portiques/palées triangulées en X           | 5 |
| 10b       | Mixte portiques/palées triangulées en V           | 4 |
| 11        | portiques en console verticale                    | 2 |

##### Structures en maçonnerie et autres

| Catégorie | Type de contreventement  | R   |
|-----------|--|-----|
| 12        | Maçonnerie porteuse chaînée  | 2.5 |
| 13        | Ossature métallique contreventée par diaphragme                              | 2   |
| 14        | Ossature métallique contreventée par noyau en béton armé                     | 3   |
| 15        | Ossature métallique contreventée par voiles en béton armé                    | 3.5 |
| 16        | ossature métal avec CV mixte noyau BA et palées ou portiques métal en façade | 4   |

## 7. Calcul des contreventements :

Les contreventements sont des dispositifs conçus pour reprendre les efforts du vent dans la structure et les descendre au sol. Ils sont disposés en toiture, dans le plans des versants « poutres au vent », et en façade « palées de stabilité », et doivent reprendre les efforts du vent appliqués tant sur les pignons que sur les longpans.



### 7.1. Efforts du vent sur les longpans :

Les efforts du vent sur le bardage en longpan sont transmis aux poteaux des portiques par l'intermédiaire des lisses. Les poteaux reprennent en tête 50% des efforts, les 50% restants étant absorbés par le dallage.

L'effort résultant en tête de poteau est transmis dans le portique, rigide et dimensionné à cet effet, et aucun dispositif particulier n'est à prévoir dans ce cas.

Mais lorsque la travée  $t$  est trop grande, les lisses doivent reposer sur un appui intermédiaire. On place à cet effet un potelet intermédiaire, appuyé en tête contre la panne sablière. L'effort  $F$ , en tête du potelet, est :

- ✓ Soit repris par la panne sablière, raidie transversalement à cet effet
- ✓ Soit transmis à la panne suivante par un montant attaché par deux diagonales, qui ramènent les efforts en tête de portique. On a ainsi constitué une « poutre au vent en longpan »

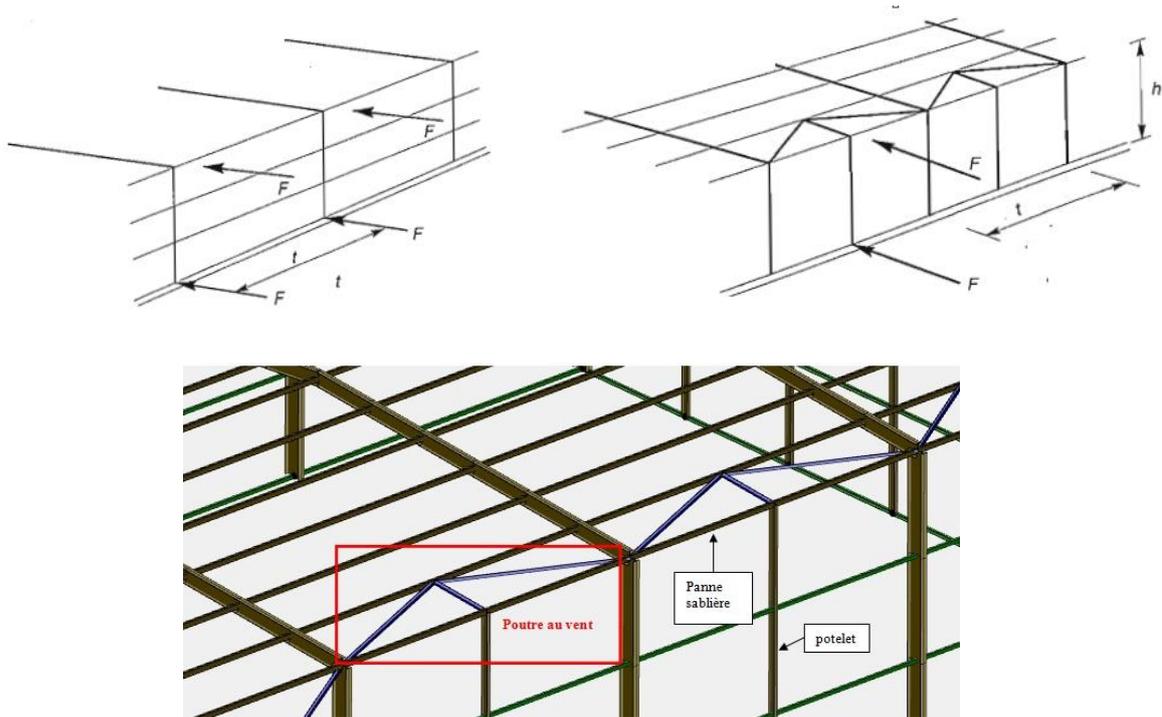
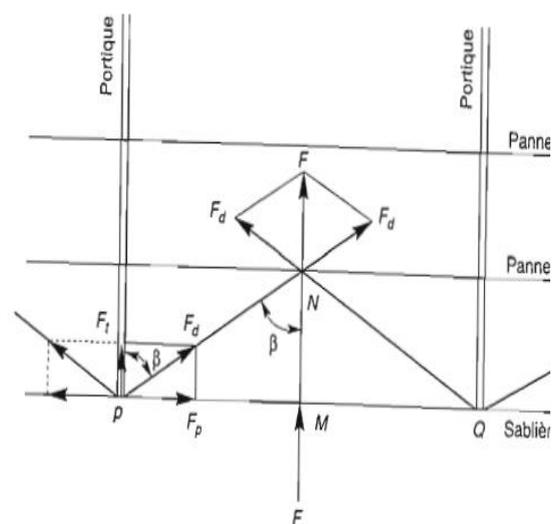


Figure 18 : La poutre au vent en longan

## 7.2. Calcul de la poutre au vent en longpan :

Considérons le dispositif dans une travée de portique. L'effort du vent  $F$  en tête du potelet se décompose en :

- Un effort  $F$  de compression simple dans le montant  $MN$
- Un effort  $F_d$  de traction dans les diagonales  $NP$  et  $NQ$
- Un effort  $F_t$  de compression dans les traverses des portiques
- Un effort  $F_p$  de compression dans les pannes sablières.



**Remarque :** compression dans les pannes sablières

En travée courante, il n'y a pas d'effort de compression  $F_p$ , ce dernier étant équilibré, donc annulé, par le même effort de sens opposé dans la travée adjacente.

En revanche, dans les deux travées de rive, il subsiste un effort  $F_p$  unilatéral dans les sablières, qu'il convient de vérifier au flambement. La vérification sera effectuée plus loin, lors de l'étude de la poutre au vent en pignon.

### 7.3. Effort du vent sur les pignons :

La transmission des efforts sur les pignons est analogue à celle sur le longpan et passe successivement du bardage aux lisses, puis aux potelets, puis à la traverse du portique de rive. Ce dernier n'étant pas rigide transversalement, il est nécessaire de le stabiliser en construisant un dispositif, tant sur le plan de la toiture (poutre au vent) que dans le plan vertical (palée de stabilité)

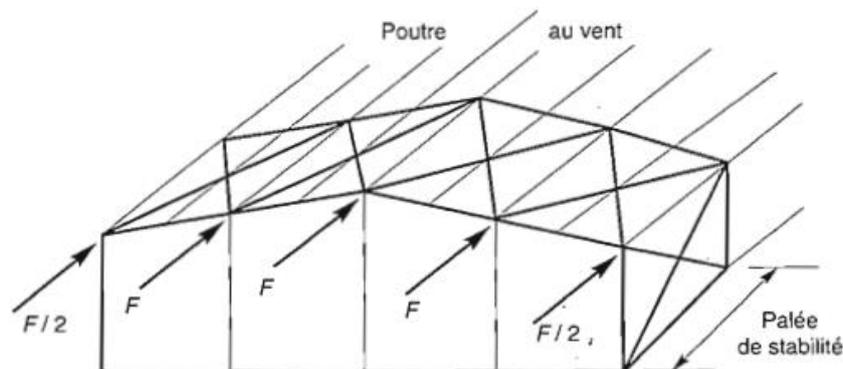


Figure 19 : Poutre au vent en pignon

### 7.4. Palée de stabilité :

#### 7.4.1. Introduction :

Une structure bien conçue doit pouvoir assurer sa stabilité sous l'action de n'importe quelle charge extérieure et notamment sous l'action des charges horizontales (pression du vent sur les façades, secousse sismique, chocs de véhicules...).

Autrement dit, la conception générale d'une structure, ainsi que de chacun de ses composants, doivent permettre d'assurer la descente des charges horizontales depuis leurs points d'application jusqu'aux fondations.

7.4.2. Définition :

Une palée de stabilité est un élément de structure inscrit dans un plan vertical et capable de s'opposer à une force horizontale parallèle à son plan.

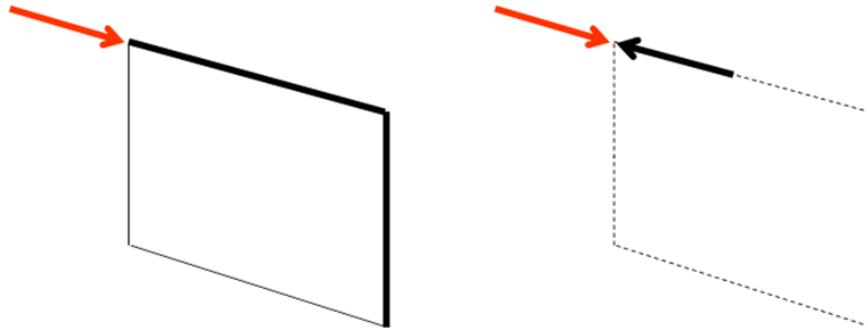


Figure 200 : Principe de la palée de stabilité

7.4.3. Stabilité des portiques 2D

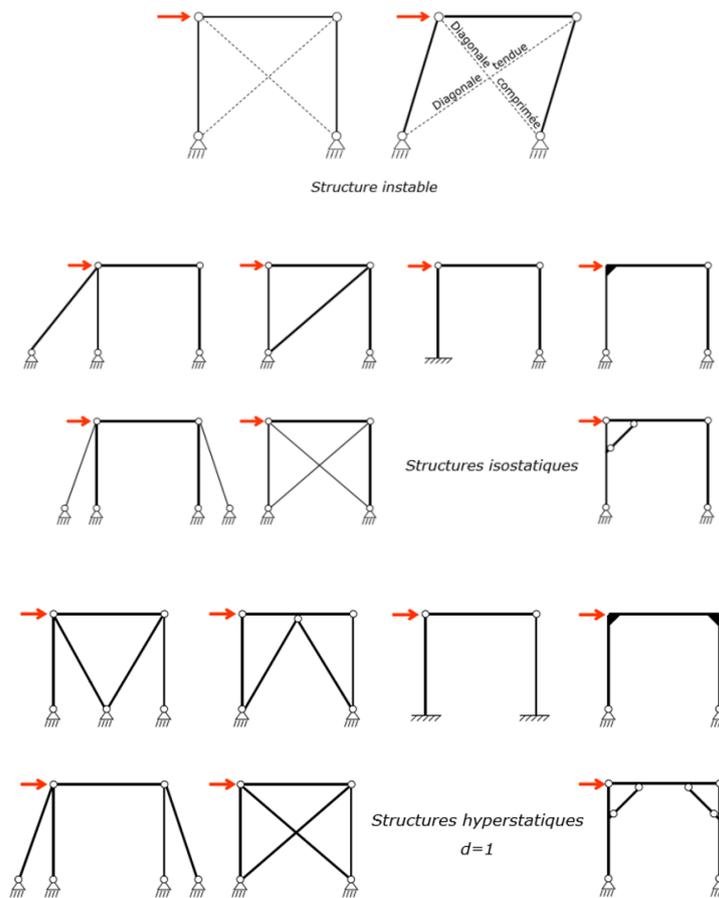
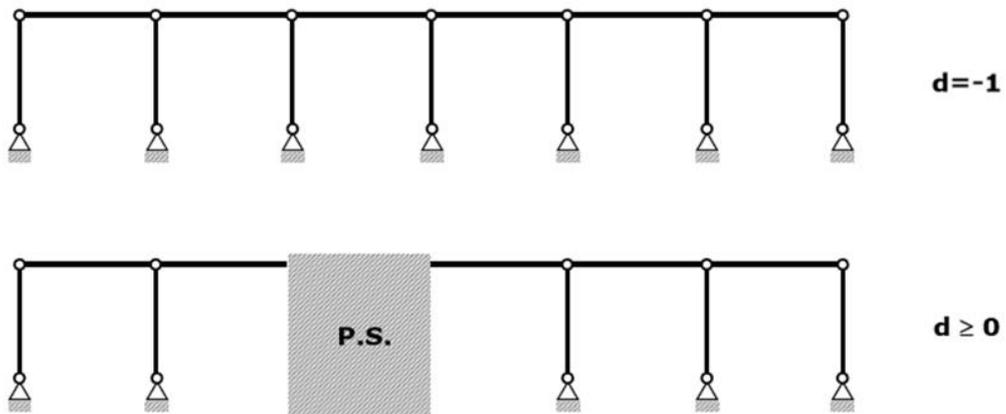
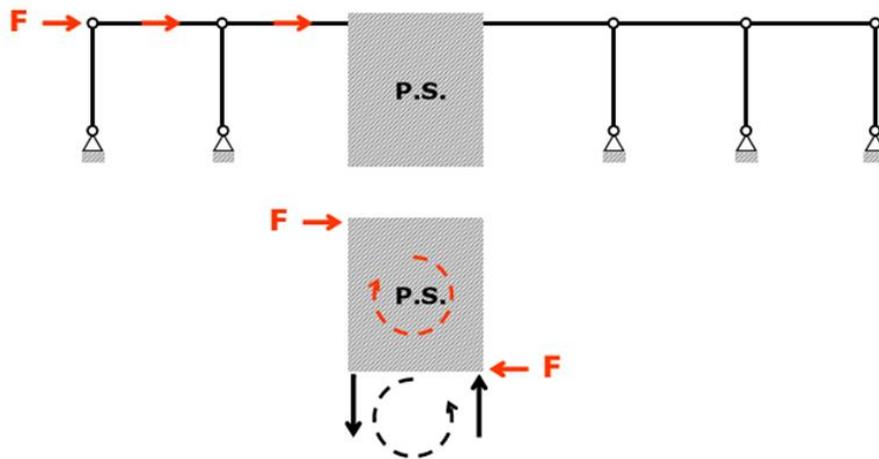


Figure 21 : Stabilité des structures 2D

Stabilisation d'une file par une palée de stabilité :

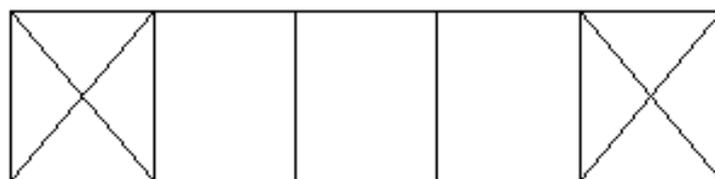


L'équilibre d'une palée de stabilité :

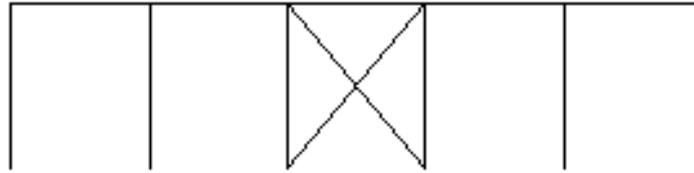


On a toujours intérêt à mettre la palée de stabilité au centre du bâtiment.

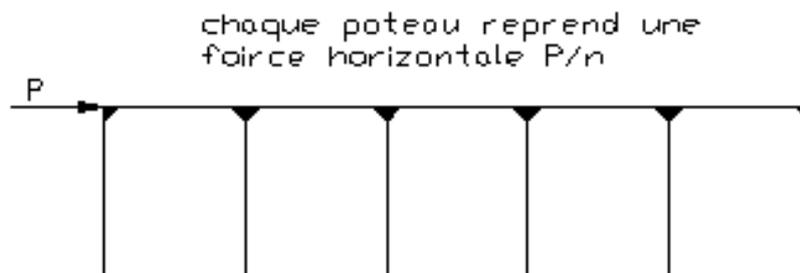
Si on place une stabilité à chaque extrémité d'un bâtiment celui-ci se trouve bloqué et la dilatation n'est pas possible, ce qui crée des efforts supplémentaires dans la structure. On considère dans ce cas que chaque contreventement reprend l'intégralité des efforts appliqués à son pignon.



Si l'on place une seule stabilité vers le milieu du bâtiment, la dilatation peut se faire plus librement, les efforts thermiques étant divisés en deux parts de chaque côté du système.



Si on encastre les sablières sur les poteaux on peut certes éviter les stabilités, mais la poussée en tête se répartit sur les nombres de poteaux (à éviter, en général)



Un seul contreventement placé en début de long pan permet le montage de la halle par avancement, de manière continue à partir de l'extrémité contreventée.

Pour des halles de grandes longueurs il faut prévoir des joints de dilatation. Il est à noter que lorsque pour des raisons esthétiques la structure porteuse est apparente, celle-ci est très exposée aux variations de températures. (Absence d'isolation thermique)

7.4.4. Stabilité des ossatures en 3D

- Ossature non contreventée

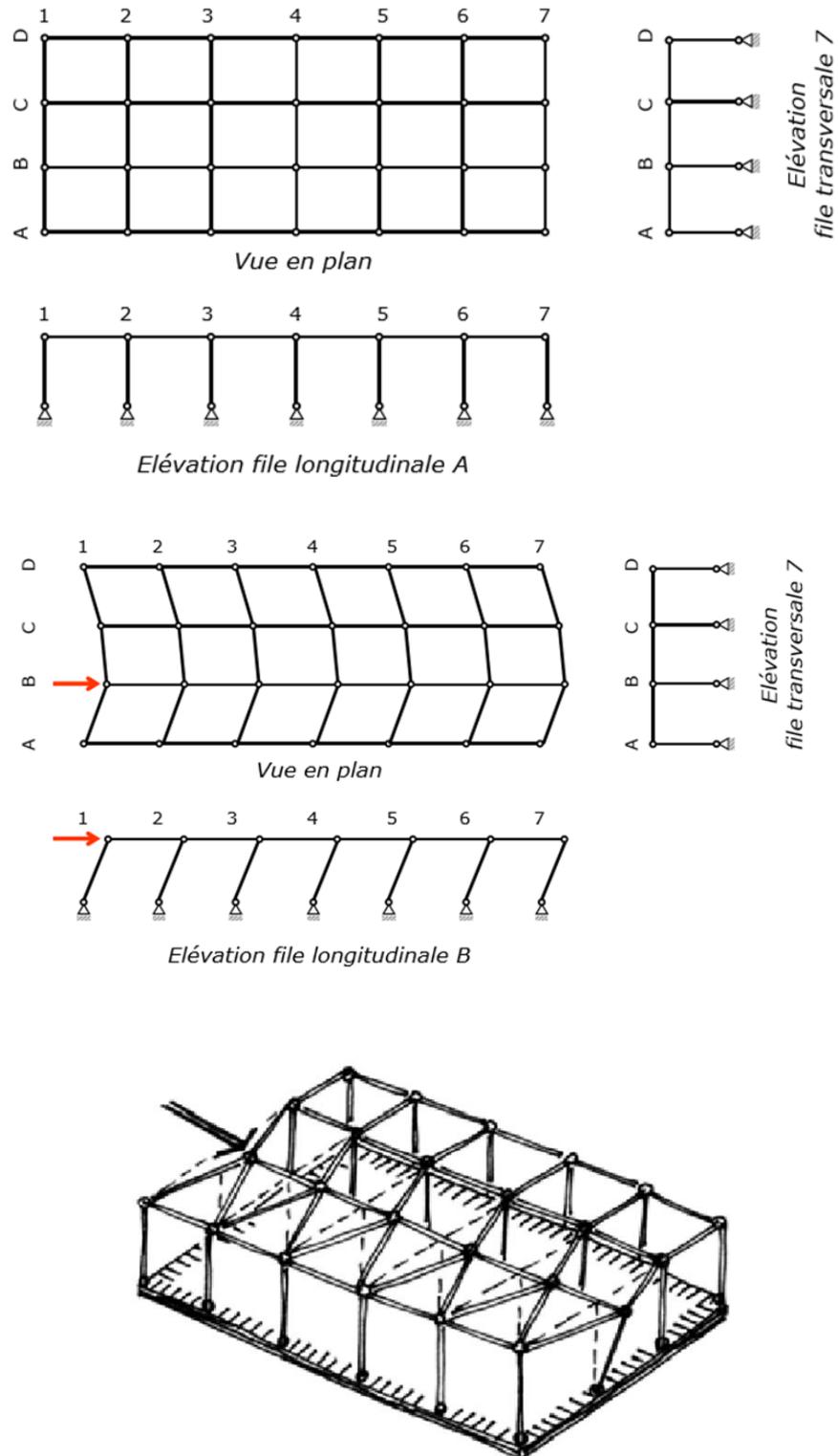


Figure 22 : Ossature en 3 D non contreventée

**- Ossature contreventée :**

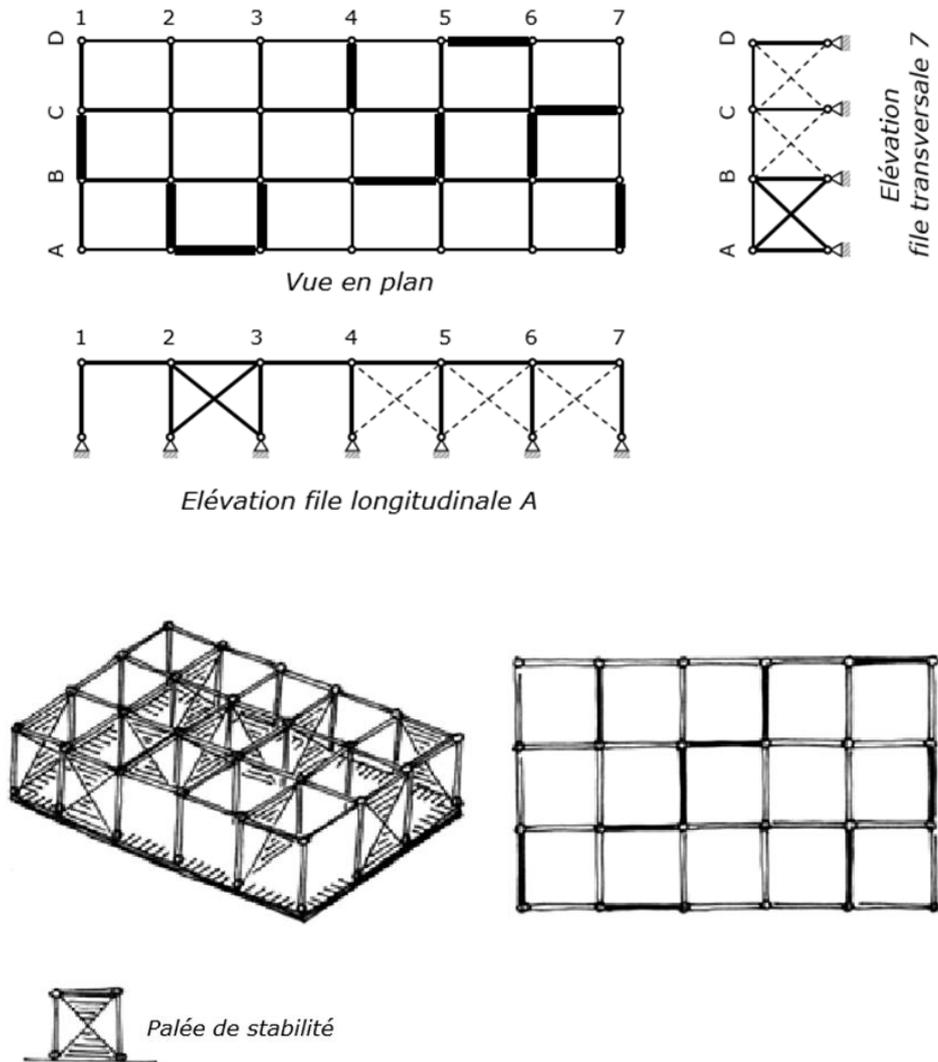


Figure 23 : Ossature 3D contreventée verticalement

**- Le diaphragme rigide :**

On appelle diaphragme rigide tout plancher haut (ou toiture) contreventé de telle sorte qu'il peut se comporter à la manière d'une poutre. Les appuis de cette poutre seront les palées de stabilité.

De la même manière qu'une poutre « classique » est stabilisée par le blocage de 3 degrés de liberté (un encastrement ou une articulation+ un appui glissant ou 3 appuis glissants), il faut bloquer au minimum 3 degrés de libertés du diaphragme rigide pour assurer sa stabilité.

**- Principe du diaphragme rigide :**

Un diaphragme rigide peut être comparé au couvercle d'une boîte en carton, suffisamment rigide dans son plan pour transmettre les efforts horizontaux extérieurs aux 2 parois verticales les mieux orientées.

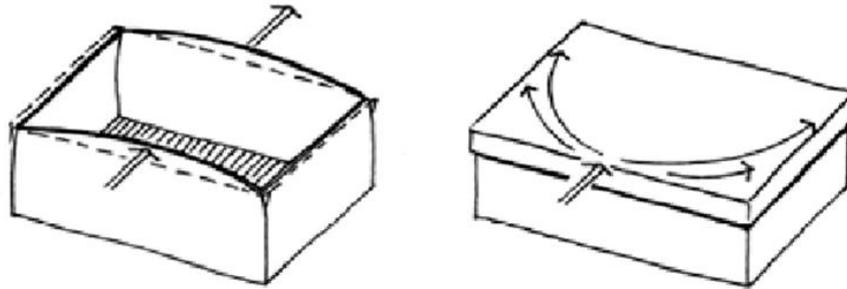
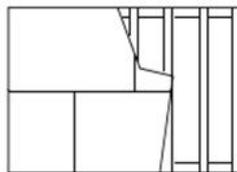


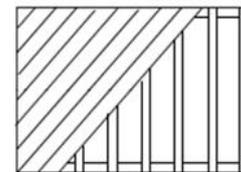
Figure 24: Principe diaphragme rigide



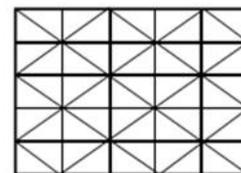
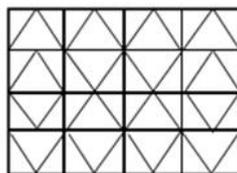
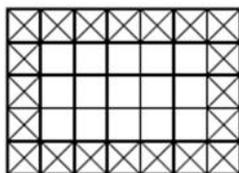
Dalle béton armé



Plancher CP sur solivage



Plancher bois massif sur solivage



Planchers ou toitures triangulées

Figure 25 : Exemples diaphragmes rigides

### Règle de contreventement N°1

En l'absence de contreventement horizontal, chacune des files longitudinales et transversales doit être équipée d'au moins une palée de stabilité.

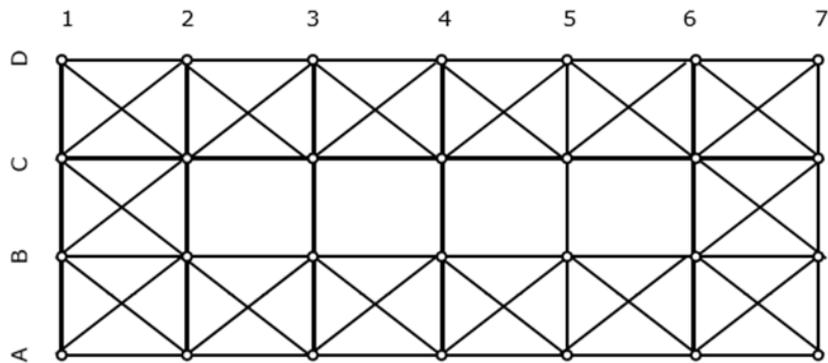


Figure 26 : Structure avec contreventement horizontale (plan d'une toiture contreventée)

### Règle de contreventement N°2

Lorsque le plancher haut (ou la toiture) est capable d'assurer la fonction « diaphragme rigide », on peut éviter le contreventement systématique de chaque file.

Il peut alors de contenter de **3 palées de stabilité non concourantes et non parallèles toutes les trois.**

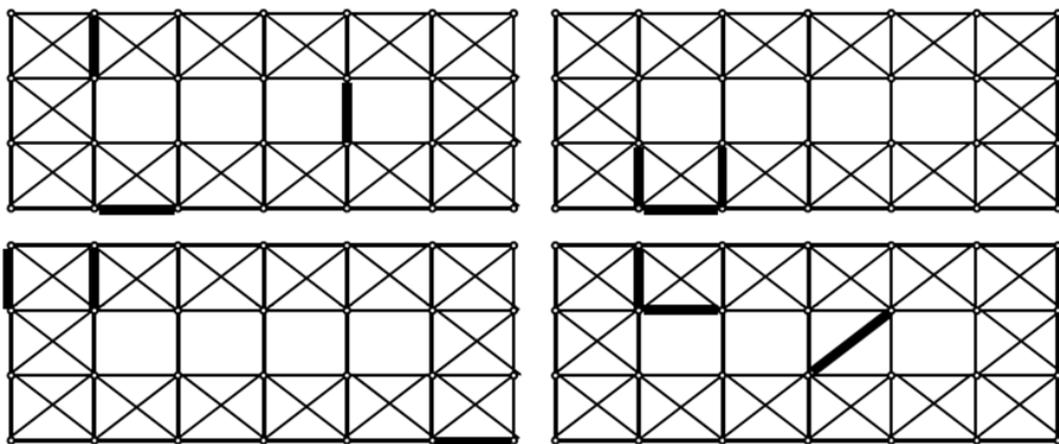


Figure 27 : Dispositions **correctes** des 3 palées de stabilité

- Les palées de stabilités parallèles :

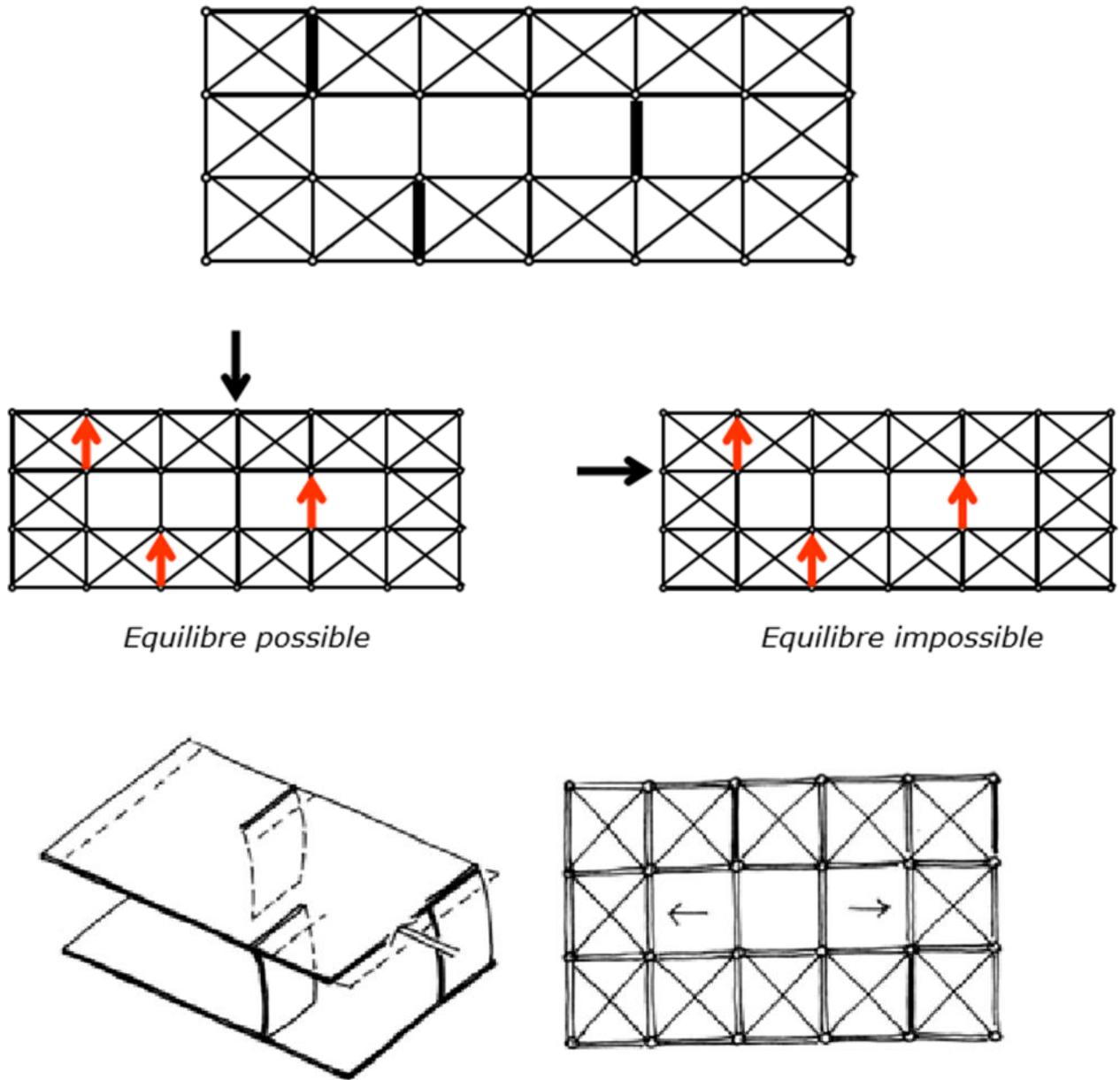


Figure 28 : Disposition **incorrecte** : Palée parallèles

- Les palées de stabilités concourantes:

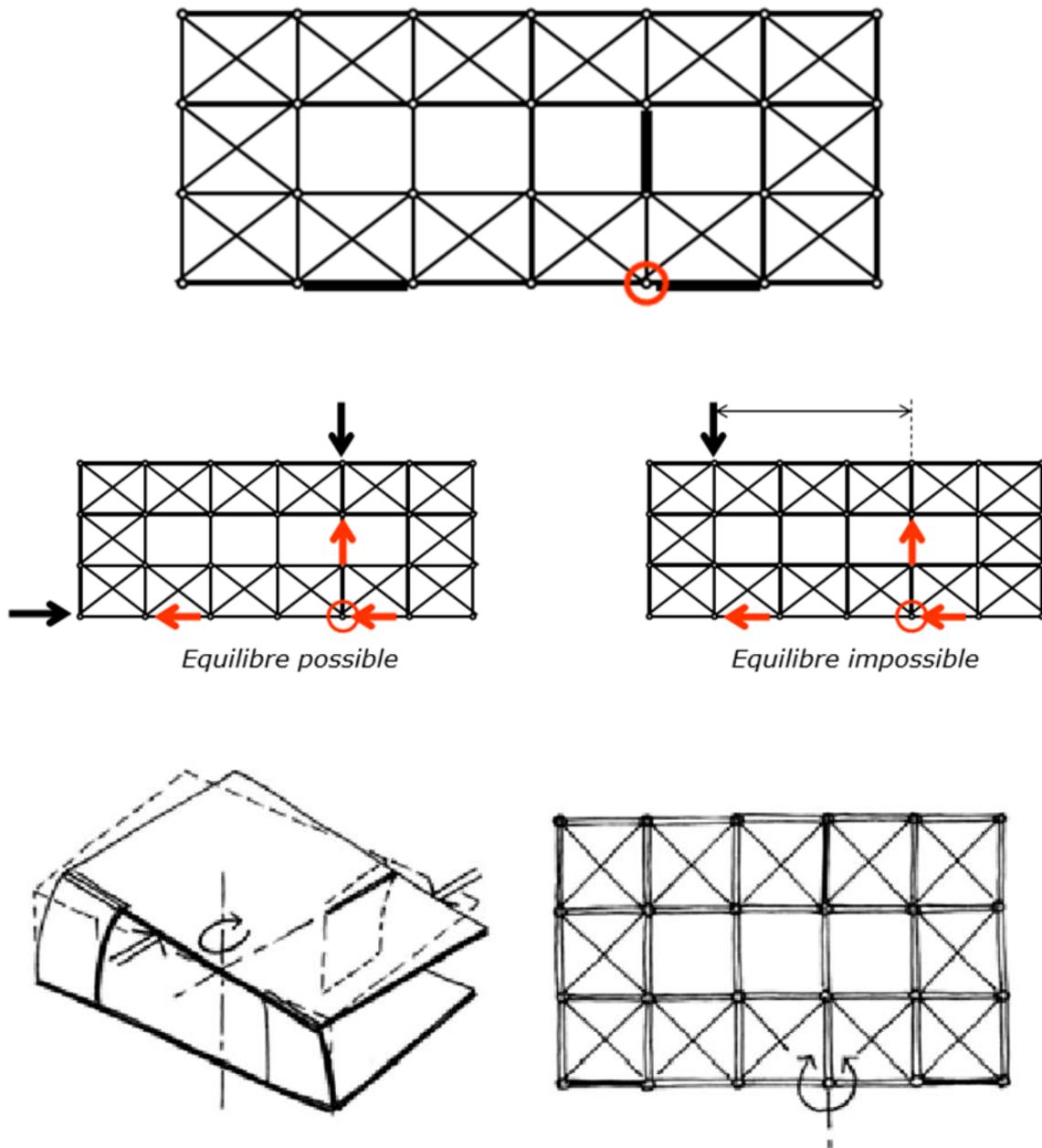


Figure 29: Disposition **incorrect** : Palées concourantes