



**HAL**  
open science

## Contreventement des bâtiments

Stéphane Multon

► **To cite this version:**

Stéphane Multon. Contreventement des bâtiments. Master. Contreventement des bâtiments, Université Paul Sabatier, Toulouse, France. 2022, pp.40. hal-04361480

**HAL Id: hal-04361480**

**<https://hal.insa-toulouse.fr/hal-04361480>**

Submitted on 22 Dec 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Paul Sabatier - Toulouse

# Contreventement des bâtiments



Stéphane Multon

multon@insa-toulouse.fr

## Références

### Livres

V. Davidovici, Formulaire du béton armé, Volume 2 : Constructions, Memento Technique, Le Moniteur.  
H. Thonier, Conception et calcul des structures de bâtiment, Volume 4, Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées.

### Rapport

E. Goyon, Contreventement, Rapport ENG 222, CNAM Toulouse.

### Cours

J. Coudroy, ENS Cachan  
A. Bernard, INSA de Toulouse  
G. Salières, Université Paul Sabatier, Toulouse

### Web

<http://notech.franceserv.com/index.html#technoCM>

## Plan

1. Généralités
2. Transmission des efforts
3. Distribution des efforts horizontaux
4. Contreventement par voiles
5. Stabilité des fondations

## Problématique

### Etude mécanique d'un bâtiment :

- Descente de charge verticale → porteurs verticaux
- Reprise des efforts horizontaux ? → **contreventement**

### Rôle du contreventement :

- Assurer l'**équilibre de l'ouvrage** sous charges horizontales
  - **Limitier les déplacements** sous ces mêmes charges
- Supporter et transmettre l'ensemble des actions horizontales jusqu'aux fondations de l'ouvrage

# 1. Généralités

## 1.1 Définitions

### Contreventement :

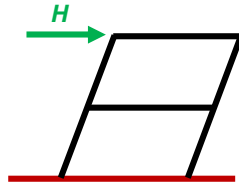
- Système statique destiné à assurer la stabilité globale d'un ouvrage soumis à des efforts horizontaux :
  - vent,
  - Séisme
  - poussées des terres
  - actions dues à des équipements mobiles...
  
- Système assurant l'équilibre de parties d'ouvrages (poutre, poteau) vis-à-vis des phénomènes d'instabilité locaux (flambement, déversement).

### Directions de contreventement :

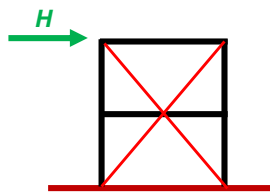
- Le contreventement doit être assuré **horizontalement** et **verticalement**

## 1.2 Exemple

Déformation d'une structure non contreventée



Déformation d'une structure contreventée



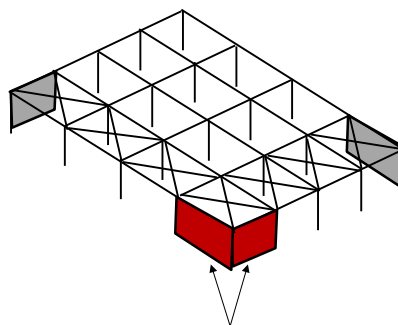
Contreventement – S. Multon

7

## 1.3 Principe de contreventement d'un volume

Maintien de l'orthogonalité verticale :

- Contreventer au moins une travée dans deux plans verticaux orthogonaux



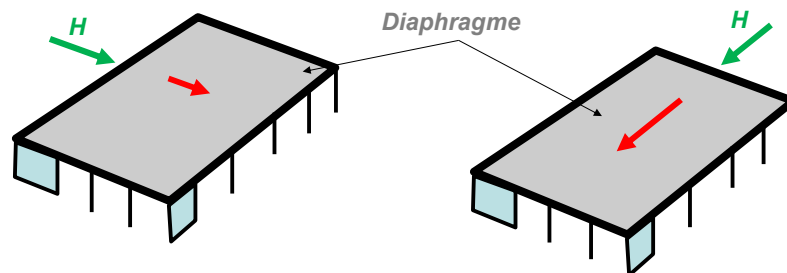
**Palées de stabilité**

Contreventement – S. Multon

8

### Maintien de l'orthogonalité horizontale :

- Contreventer le plan horizontal de tous les niveaux supportant des charges horizontales



Contreventement – S. Multon

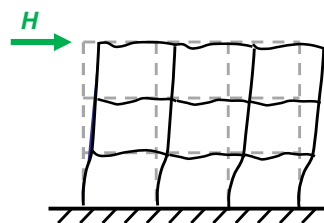
9

## 1.4 Types de contreventement

### 1.4.1 Pour contreventement vertical

#### Structures assurant la reprise des efforts horizontaux :

- Systèmes à structure souple à nœuds déplaçables : portiques, poteaux encastrés en pied,

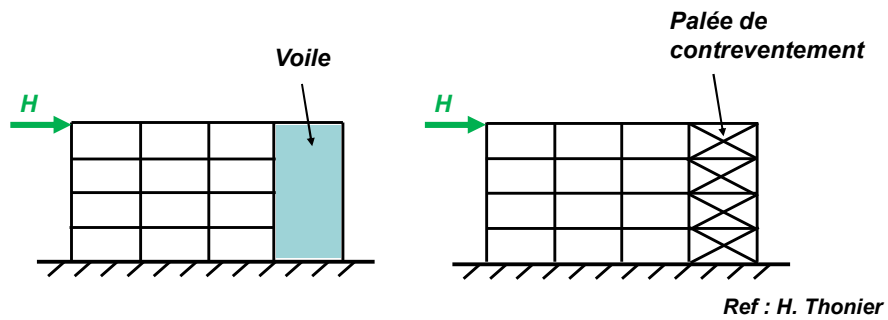


Ref : H. Thonier

Contreventement – S. Multon

10

- Systèmes à structure rigide à nœuds fixes : refends, noyaux, palées

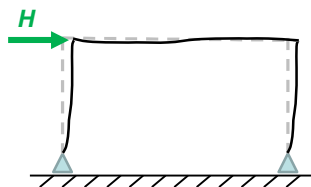


Contreventement – S. Multon

11

### 1.4.1.1 Les portiques rigides

Un portique est une structure composée d'au moins deux poteaux et d'une poutre



Solution utilisée pour les constructions en CM ou en BA

#### Avantages :

L'espace n'est pas compartimenté,  
La circulation n'est pas gênée

#### Inconvénients :

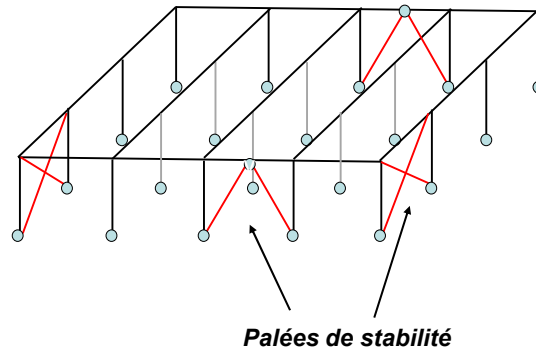
Très flexibles sous chargement latéral,  
Déconseillée en zone sismique.

Contreventement – S. Multon

12

### 1.4.1.2 Les portiques contreventés

Un portique contreventé est un portique rendu rigide par un système complémentaire.



#### Exemples :

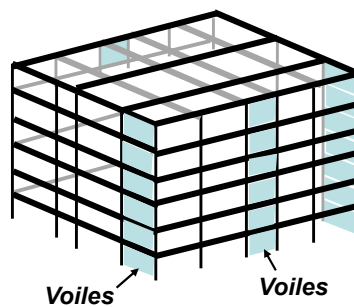
- Croix de stabilité
- Panneau plein

Contreventement – S. Multon

13

### 1.4.1.3 Les voiles, refends et murs

Elément de structure vertical assurant à la fois la reprise des charges verticales et horizontales



#### Exemples :

- Voiles réalisés en béton banché
- Refends (perpendiculaires à la façade principale)

#### Avantage :

Rigide sous chargement latéral,

#### Inconvénient :

Compartimente l'espace

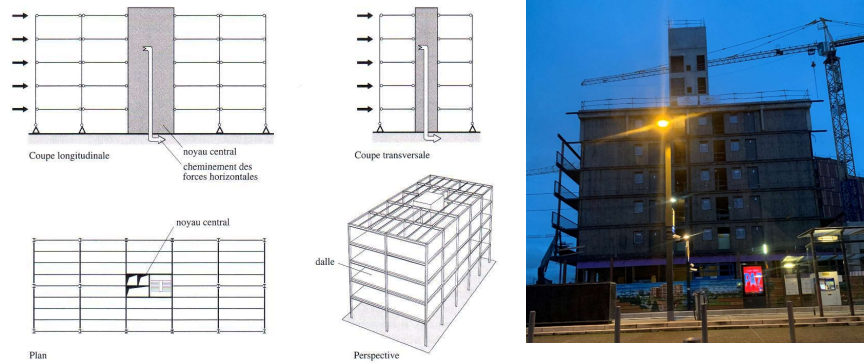
Contreventement – S. Multon

14



### 1.4.1.4 Les noyaux

Un noyau est formé d'un caisson vertical encastré à sa base :



#### Avantages :

- Très rigide latéralement,
- Assure le contreventement vertical dans les deux directions,
- Peut permettre la circulation verticale des personnes et / ou des réseaux

Image : #technoCM

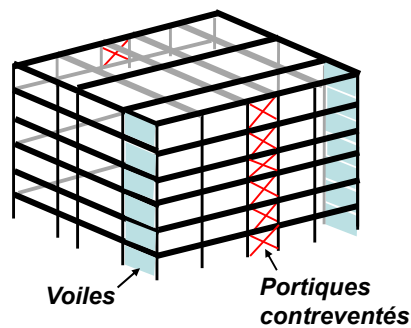
#### Inconvénient :

- Raideur à la torsion moindre que dans le cas de raidisseurs périphériques

15

### 1.4.1.5 Les structures mixtes

Le contreventement peut être assuré par l'association de deux types de contreventement présenté précédemment : voile et portique par exemple.

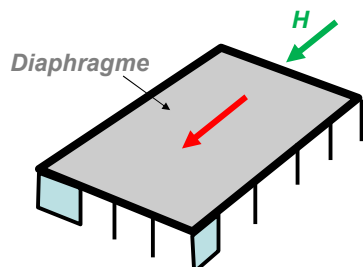


Contreventement – S. Multon

16

### 1.4.2 Pour contreventement horizontal

Le contreventement horizontal est assuré par les planchers ou par le support de couverture : on parle alors de plancher **diaphragme** rigide.



#### Exemples :

- Dalle pleine BA (coulée en place),
- Dalles BA réalisées avec prédalles, poutrelles et / ou dalles de compression,
- Plancher avec bac collaborant,
- Toitures légères avec un système de contreventement.

Ces éléments sont supposés **indéformables horizontalement**.

Les liaisons entre planchers et voiles sont rigides et permettent la transmission des efforts du plancher vers les voiles.

Contreventement – S. Multon

17

## 1.5 Cas des halls industriels

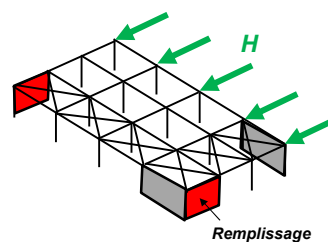
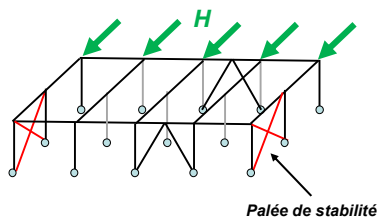
Halls industriels généralement réalisés en construction métallique

Pour le contreventement, assurer les stabilités **transversale**, **longitudinale** et **horizontale**

### 1.5.1 Stabilité transversale

#### Assurer par les pignons :

- pignons ouverts avec portique rigide (liaisons renforcées – jarret, bracon),
- pignons fermés avec palées de stabilité ou remplissage de maçonnerie

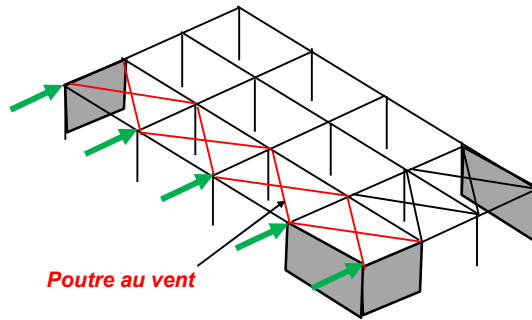


18

### Pour les portiques intermédiaires :

Il faut minimiser le déplacement en tête de portique

- soit en renforçant tous les portiques
- soit en réalisant une **poutre au vent**



Contreventement – S. Multon

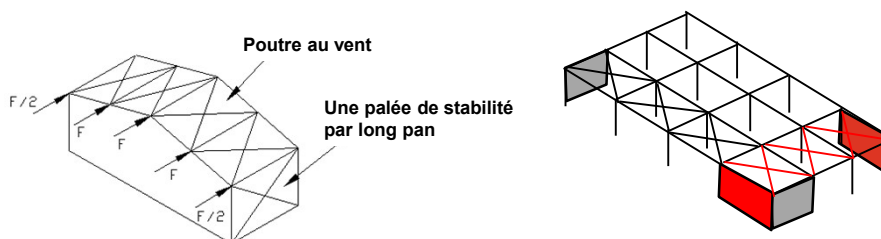
19

### 1.5.2 Stabilité longitudinale

Assurer dans un seul portique (sinon blocage de la libre dilatation) par long pan :

- Par cadre rigide
- Palée de stabilité
- Remplissage maçonnerie

Utilisation de poutres au vent pour répartir les efforts horizontaux



Contreventement – S. Multon

20

### 1.5.3 Stabilité horizontale

Nécessaire pour s'opposer aux effets de torsion éventuels (dissymétrie de torsion, direction d'actions horizontales non parallèle aux directions principales du hall).

Assurer par les portiques, palées de stabilité ou toitures.

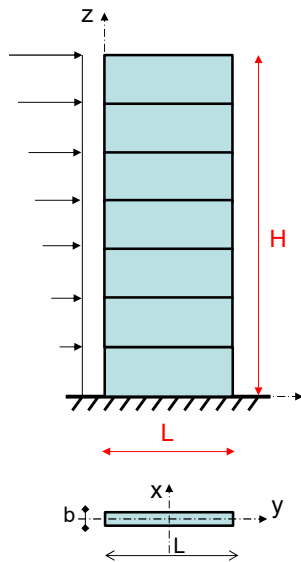
## 2. Transmission des efforts

### 2.1 Dans la structure

**Efforts horizontaux** doivent être transmis des façades jusqu'au plan de fondation :

1. Transmission des efforts **des éléments secondaires de la façade** jusqu'**aux éléments horizontaux de la structure** (planchers, toitures contreventées, coques).
2. Transmission **des efforts des éléments horizontaux** vers les **éléments verticaux du contreventement** (voiles, palées, portiques).
3. Transmission **des efforts des éléments verticaux** jusqu'au **sol**.

## 2.2 Transmission des efforts au sol



Les éléments verticaux transmettant les efforts horizontaux au sol sont considérés comme des **systèmes encastrés à leur base** (en contact avec le sol).

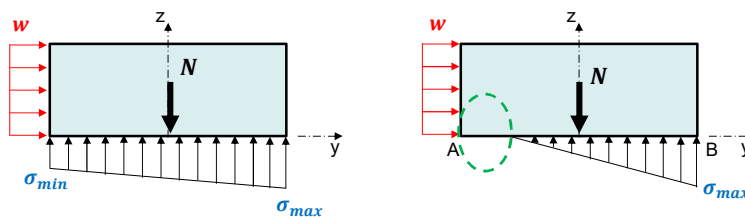
Les éléments verticaux peuvent donc être assimilés à des **consoles verticales** soumises à une sollicitation de **flexion composée** avec compression.

Déformation principale : déformation de flexion due aux moments de renversement.

Contreventement – S. Multon

25

**Contreventement assuré** par l'élément si **l'effort normal de compression** (descente de charge) est suffisant pour que le centre des pressions reste à l'intérieur de la section du mur malgré le **moment de renversement**.



EC8 → vérification des fondations qui doivent permettre d'obtenir la stabilité générale sous l'action des charges verticales et horizontales.

Prendre garde à la liaison entre fondations et superstructure (en particulier dans le cas de **zones à 'suspendre'**).

Contreventement – S. Multon

26

## 3. Distribution des efforts horizontaux

Contreventement – S. Multon

27

### 3.1 Objectif

La stabilité d'une structure doit être assurée par :

- **Un système isostatique** : 2 voiles non coplanaires ou 3 voiles de plans non parallèles
- **Un système hyperstatique** (cas général) : au moins 3 voiles non coplanaires ou de directions quelconques.

**Fonction** : reprendre les efforts horizontaux et s'opposer aux moments de torsion éventuels

→ Nécessité de **déterminer la part d'effort repris** par chaque voile pour les dimensionner

→ Distribuer l'effort horizontal sur chaque voile de contreventement

**Résolution** :

- **Système isostatique** : application du principe fondamental de la statique
- **Système hyperstatique** : résolution par logiciel ou méthode simplifiée basée sur les inerties des éléments de contreventement

Contreventement – S. Multon

28

**Hypothèses de calcul :**

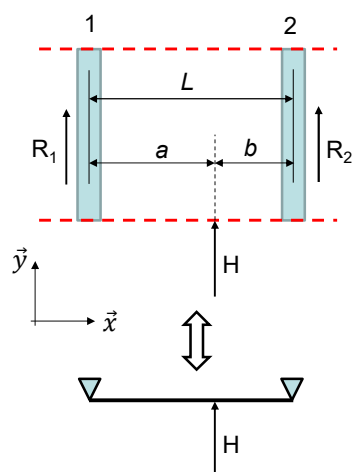
- Le comportement du système est linéaire et élastique
- Les planchers sont indéformables dans leur plan
- Les voiles sont parfaitement encastrés à leur base
- La rigidité des voiles hors de leur plan est négligée
- L'inertie des voiles de contreventement est constante sur toute la hauteur ou la variation est identique pour tous les voiles

**Principe :**

**Distribuer** l'effort horizontal extérieur global sur les différents éléments du contreventement

## 3.2 Systèmes isostatiques

### 3.2.1 Cas de 2 voiles parallèles



L'effort horizontal extérieur est **distribué** sur les différents voiles par application du PFS :

**P.F.S.**

$$\sum \vec{F} = \vec{H} \text{ sur } \vec{y} \rightarrow R_1 + R_2 = H$$

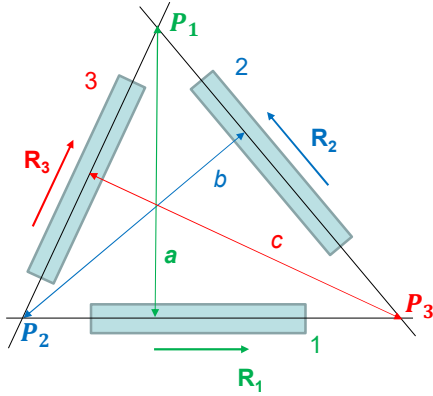
$$\sum \overrightarrow{M_{R_i/1}} = \overrightarrow{M_{H/1}} \text{ sur } \vec{z} \rightarrow L \cdot R_2 = a \cdot H$$

$$\rightarrow R_1 = H \cdot \frac{b}{L} \text{ et } R_2 = H \cdot \frac{a}{L}$$



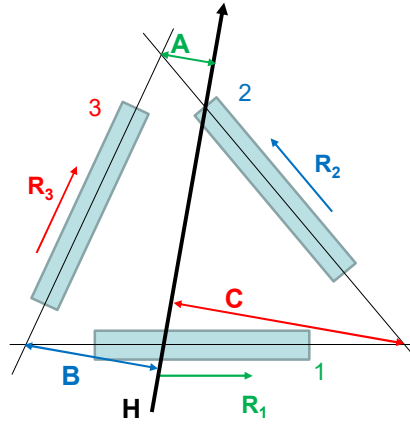
### 3.2.2 Cas de 3 voiles non parallèles non concourants

Définition géométrique :



a, b, c : hauteur du triangle formé par les voiles

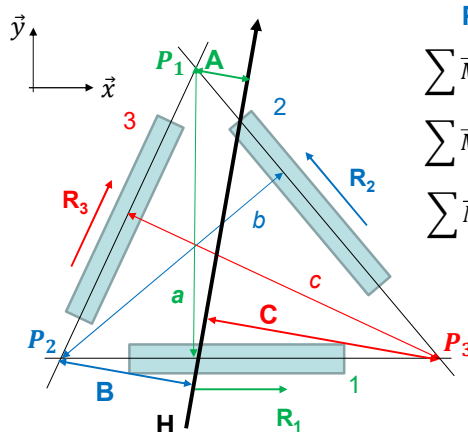
Effort horizontal H :



Contreventement – S. Multon

31

Résolution :



P.F.S.

$$\sum \overrightarrow{M_{R_i/P_1}} = \overrightarrow{M_{H/P_1}} \text{ sur } \vec{z} \rightarrow a \cdot R_1 = A \cdot H$$

$$\sum \overrightarrow{M_{R_i/P_2}} = \overrightarrow{M_{H/P_2}} \text{ sur } \vec{z} \rightarrow b \cdot R_2 = B \cdot H$$

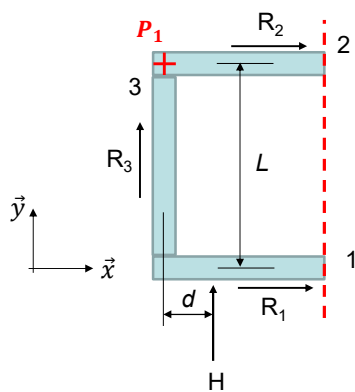
$$\sum \overrightarrow{M_{R_i/P_3}} = \overrightarrow{M_{H/P_3}} \text{ sur } \vec{z} \rightarrow c \cdot R_3 = C \cdot H$$

$$\rightarrow \begin{cases} R_1 = H \cdot \frac{A}{a} \\ R_2 = H \cdot \frac{B}{b} \\ R_3 = H \cdot \frac{C}{c} \end{cases}$$

Contreventement – S. Multon

32

### 3.2.3 Cas de 3 voiles indépendants disposés en U



P.F.S.

$$\sum \vec{F} = \vec{H} \text{ sur } \vec{x} \rightarrow R_1 + R_2 = 0$$

$$\sum \vec{F} = \vec{H} \text{ sur } \vec{y} \rightarrow R_3 = H$$

$$\sum \overrightarrow{M_{R_i/P1}} = \overrightarrow{M_{H/P1}} \text{ sur } \vec{z} \rightarrow L \cdot R_1 = d \cdot H$$

$$\rightarrow \begin{cases} R_1 = H \cdot \frac{d}{L} \\ R_2 = -H \cdot \frac{d}{L} \\ R_3 = H \end{cases}$$

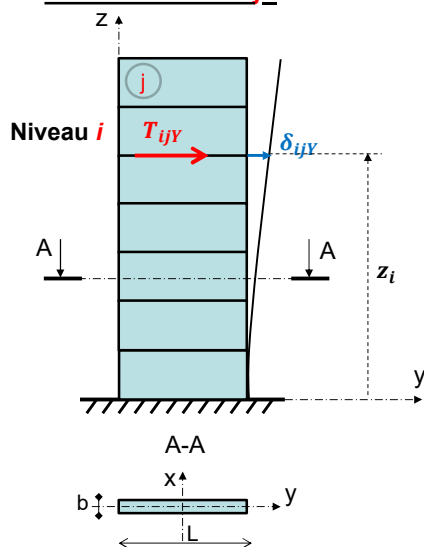
Contreventement – S. Multon

33

## 3.3 Systèmes hyperstatiques

### 3.3.1 Distribution des actions dans une disposition symétrique

Élévation du voile  $j$  :



Effet de la translation uniforme

Pour le voile  $j$ , au niveau  $i$  dans la direction  $y$  :

$$\delta_{iy} = \frac{T_{iy} \cdot z_i^3}{3 \cdot E \cdot I_{jx}}$$

Si disposition symétrique  $\rightarrow$  déplacement uniforme de tous les voiles du niveau  $i$  :

$$\delta_{iy} = \delta_{iy}$$

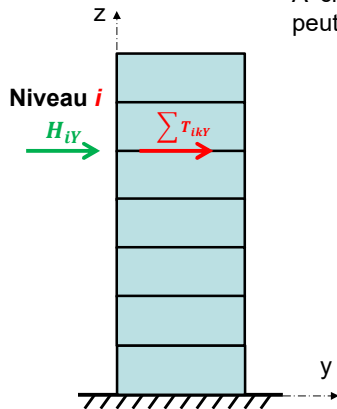
et  $\frac{3 \cdot E}{z_i^3} = K$  constant par niveau

$$\rightarrow T_{iy} = K \cdot \delta_{iy} \cdot I_{jx}$$

34

### Dans une disposition symétrique

#### Elévation du bâtiment :



A chaque niveau, la somme des efforts transversaux peut être représentée par un effort extérieur global  $H_{iY}$

$$H_{iY} = \sum_{k=1}^n T_{ikY}$$

$$H_{iY} = \sum_{k=1}^n T_{ikY} = K \cdot \delta_{iY} \sum_{k=1}^n I_{kx}$$

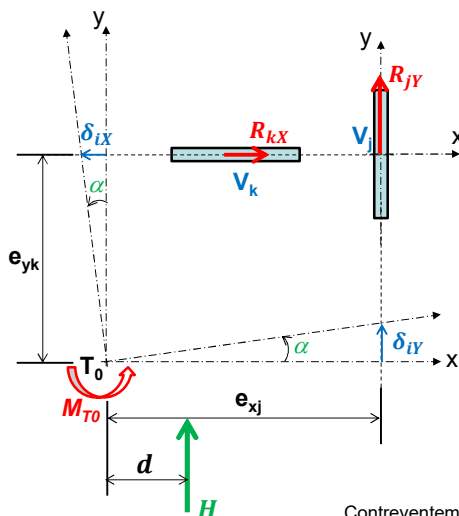
$$\rightarrow K \cdot \delta_{iY} = \frac{H_{iY}}{\sum_{k=1}^n I_{kx}}$$

$$\rightarrow T_{ijY} = \frac{H_{iY} \cdot I_{jx}}{\sum_{k=1}^n I_{kx}}$$

35

### 3.3.2 Distribution des actions dans une disposition quelconque

#### Effet de la rotation uniforme, méthode du Centre de Torsion



Le moment de torsion induit une rotation d'angle  $\alpha$  à partir duquel on peut estimer les déplacements :

$$\delta_{iX} = -\alpha \cdot e_{yk}$$

$$\delta_{iY} = \alpha \cdot e_{xj}$$

$$\text{et } R_{kX} = K \cdot \delta_{iX} \cdot I_{ky} = -K \cdot \alpha \cdot e_{yk} \cdot I_{ky}$$

$$R_{jY} = K \cdot \delta_{iY} \cdot I_{jx} = K \cdot \alpha \cdot e_{xj} \cdot I_{jx}$$

Les moments se distribuent selon :

$$-\sum_{k=1}^n (R_{kX} \cdot e_{yk}) + \sum_{j=1}^n (R_{jY} \cdot e_{xj}) = M_{T0}$$

Contreventement – S. Multon

36

D'où :

$$M_{T_0} = K \cdot \alpha \left[ \sum_{k=1}^n (e_{yk}^2 \cdot I_{ky}) + \sum_{j=1}^n (e_{xj}^2 \cdot I_{jx}) \right]$$

→ On en déduit  $K \cdot \alpha$  et ainsi les efforts dans les voiles en fonction de  $M_{T_0}$  :

$$R_{kX} = - \frac{M_{T_0} \cdot e_{yk} \cdot I_{ky}}{\left[ \sum_{j=1}^n (e_{xj}^2 \cdot I_{jx}) + \sum_{k=1}^n (e_{yk}^2 \cdot I_{ky}) \right]}$$

$$R_{jY} = \frac{M_{T_0} \cdot e_{xj} \cdot I_{jx}}{\left[ \sum_{j=1}^n (e_{xj}^2 \cdot I_{jx}) + \sum_{k=1}^n (e_{yk}^2 \cdot I_{ky}) \right]}$$

avec  $M_{T_0} = H \cdot d$

$e_{xj}$  et  $e_{yk}$  en valeurs algébriques

Contreventement – S. Multon 37

**Dans le cas général, les effets de la translation et de la rotation doivent être additionnés :**

$$F_{jY} = T_{jY} + R_{jY}$$

Trans. Rot.

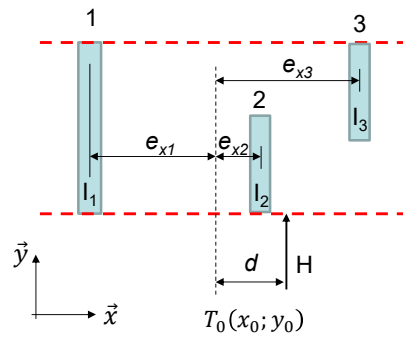
Ces calculs nécessitent le calcul du centre de torsion  $T_0$  par rapport au repère de base  $(O, x, y)$  :

$$T_0 \begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{j=1}^n x_j I_{jx}}{\sum_{j=1}^n I_{jx}} \\ y_0 = \frac{\sum_{j=1}^n y_j I_{jy}}{\sum_{j=1}^n I_{jy}} \end{cases}$$

Contreventement – S. Multon

38

### 3.3.3 Cas particulier de contreventement par voiles parallèles

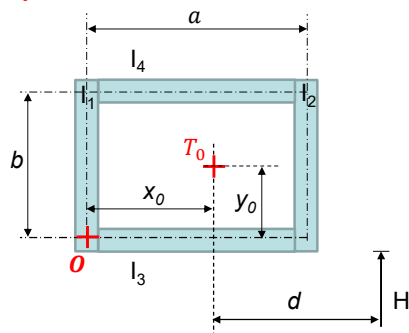


$e_{xj}$  et  $e_{yj}$  en valeurs algébriques

$$F_{jY} = H_{iY} \cdot I_{jX} \cdot \left( \underbrace{\frac{1}{\sum_{k=1}^n I_{kX}}}_{\text{translation}} + \underbrace{\frac{d \cdot e_{xj}}{[\sum_{j=1}^n (e_{xj}^2 \cdot I_{jX})]}}_{\text{rotation}} \right)$$

39

### 3.3.4 Cas particulier du contreventement par cage (cas des voiles indépendants, sinon fonctionnement en tube)



La rigidité des voiles hors de leur plan est négligée.

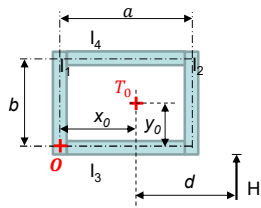
Centre de rotation :

$$T_0 \begin{cases} x_0 = \frac{a \cdot I_2}{I_1 + I_2} \\ y_0 = \frac{b \cdot I_4}{I_3 + I_4} \end{cases}$$

$$F_{1Y} = H \cdot I_1 \cdot \left( \frac{1}{I_1 + I_2} + \frac{d \cdot (-x_0)}{x_0^2 \cdot I_1 + (a - x_0)^2 \cdot I_2 + y_0^2 \cdot I_3 + (b - y_0)^2 \cdot I_4} \right)$$

Contreventement – S. Multon

40



avec :

$$(a - x_0) = a \cdot \left(1 - \frac{I_2}{I_1 + I_2}\right) = \frac{a \cdot I_1}{I_1 + I_2}$$

$$(b - y_0) = b \cdot \left(1 - \frac{I_4}{I_3 + I_4}\right) = \frac{b \cdot I_3}{I_3 + I_4}$$

**Les efforts dans les voiles s'expriment donc en fonction de H, a, b, d et des inerties dans les voiles.**

Si  $I_1 = I_2 = I$  et  $I_3 = I_4 = I'$ , on obtient :  $F_{1Y} = H \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{d}{a + \frac{b^2 \cdot I'}{I}}\right)$

de même :  $F_{2Y} = H \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{d}{a + \frac{b^2 \cdot I'}{I}}\right)$  et :  $F_{3X} = -F_{4X} = \frac{H \cdot d}{b + \frac{a^2 \cdot I'}{I}}$

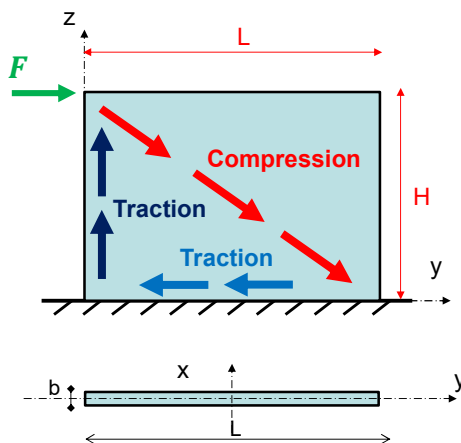
## 4. Contreventement par voiles

Contreventement – S. Multon

43

### 4.1 Sollicitations dans les voiles

#### 4.1.1 Fonctionnement mécanique d'un voile de contreventement

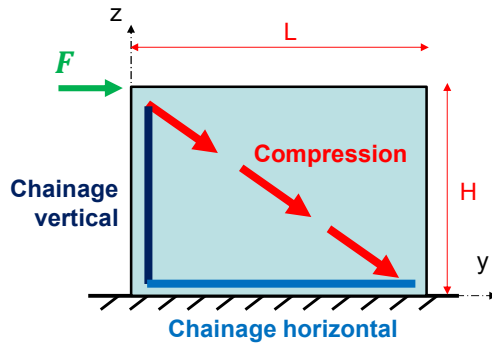


#### Actions horizontales sur le voile :

- mise en **compression** du béton
- mise en **traction** de la partie inférieure du voile dans la direction horizontale
- mise en **traction** du voile du côté adjacent à l'effort horizontal dans la direction verticale
- Besoin d'acier dans les zones en traction → armature de **chainages**

44

#### 4.1.2 Notions de chaînage



- Compression reprise par le béton
- Traction horizontale → chaînages horizontaux
- Traction verticale → chaînages verticaux

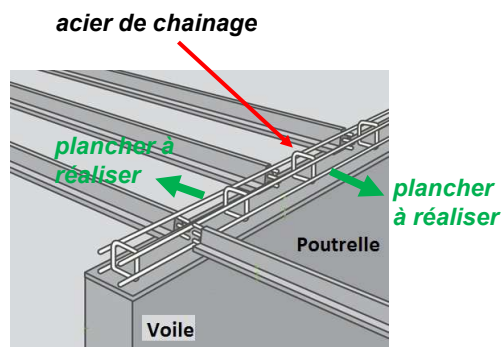
Le chaînage horizontal *ceinture* les murs et assure leur *jonction avec les planchers* (à chaque niveau).

Le chaînage vertical doit être **placé à chaque angle de murs, sur toute la hauteur du bâtiment.**

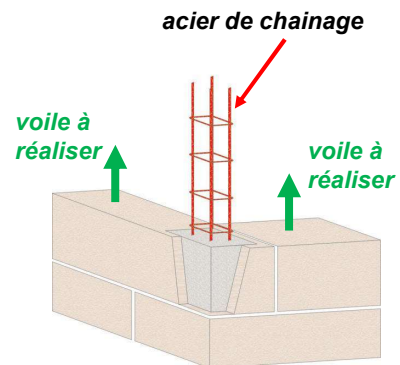
45

#### 4.1.3 Exemples de chaînage et valeurs forfaitaires

##### Chainage horizontal



##### Chainage vertical

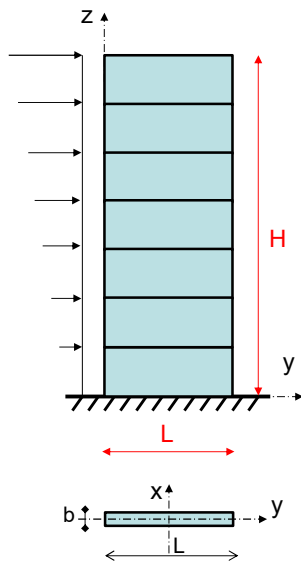


Pour des armatures S 500, la section forfaitaire de chaînage :  $A_{Ch} \geq 1,2 \text{ cm}^2$

46



## 4.2 Voile à inertie constante



Comportement des voiles de contreventement dépend de leur élancement  $H / L$  :

Si  $H < 2.L$ , le voile est considéré comme un **voile court** pour les calculs de contreventement et doit être calculé comme une **console courte** (avec sollicitation d'effort tranchant prépondérant, par exemple avec la méthode bielles et tirants)

Si  $H \gg L$ , le **voile** est considéré **élané** pour les calculs de contreventement et peut être calculé comme une **poutre encastrée** (avec sollicitation de flexion prépondérante)

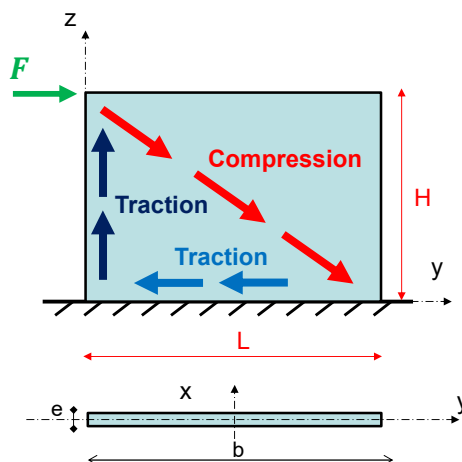
Contreventement – S. Multon

47

### 4.2.1 Voile de faible hauteur

Si  $H < 2.L$ , le **voile** est considéré comme une **console courte**

Évaluation de l'effet de **l'effort tranchant** par méthode des bielles et tirants



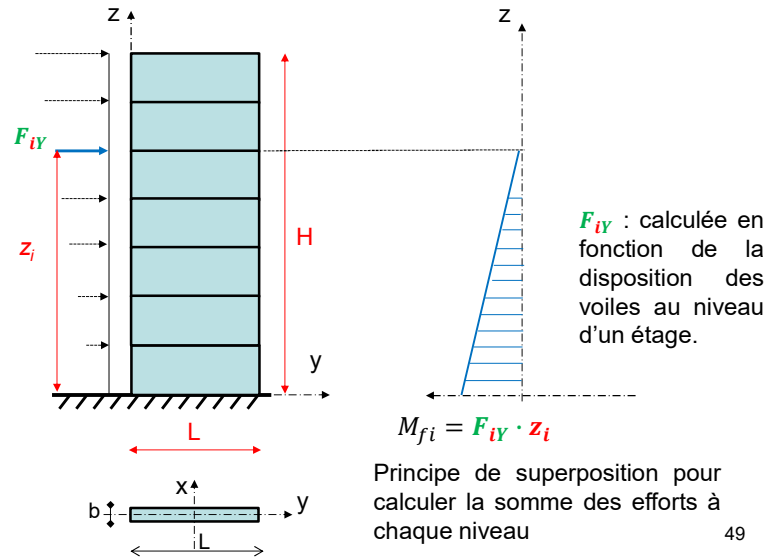
Si béton et chaînages périphériques **forfaitaires** suffisants pour transmettre l'effort tranchant, pas d'armatures spécifiques,

sinon, dimensionnement des voiles en béton armé (Eurocode 2, section 6 et annexe nationale).

48

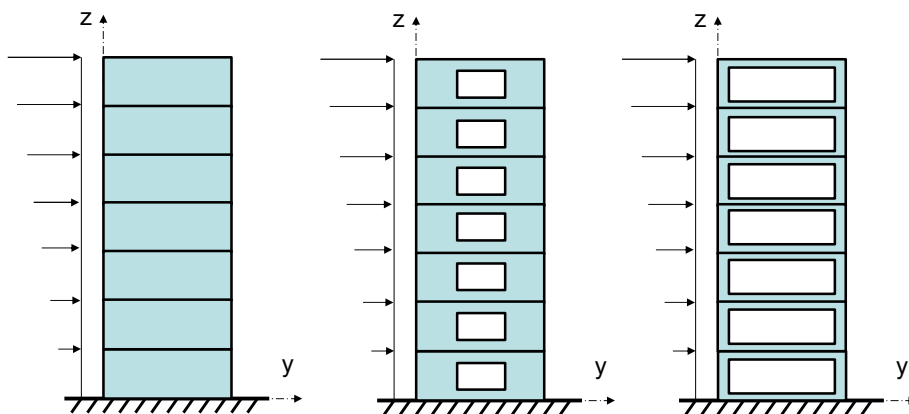
### 4.2.2 Voile élancé

Si  $H \gg L$ , le voile est considéré élancé pour les calculs de contreventement



49

### 4.3 Voile avec ouvertures



voile plein  
→ calcul 'console'

voile avec ouvertures moyennes → prise en compte des linteaux

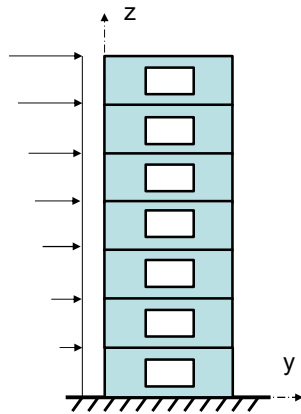
voile avec grandes ouvertures → calcul de type portique

Contreventement – S. Multon

50

### 4.3.1 Voile avec ouvertures moyennes

voile avec ouvertures moyennes → prise en compte des linteaux

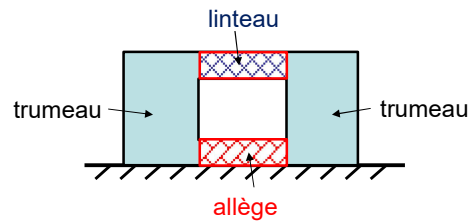


a) Calculs de plaques par Éléments Finis (EF)

b) Méthodes analytiques simplifiées

#### Méthode d'Albigès et Goulet

Prise en compte dans la rigidité des voiles de la participation des linteaux et des trumeaux

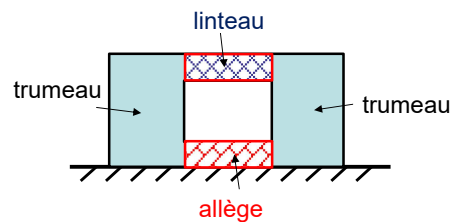


Contreventement – S. Multon

51

#### Méthode d'Albigès et Goulet : hypothèses

- Distribution régulière des ouvertures
- Voile élancé (au moins 7 étages)
- Largeur du voile supérieure à la hauteur d'un étage
- Le voile de contreventement subit le même déplacement horizontal à chaque étage
- Trumeaux encastés à la base
- Propriétés des matériaux uniformes dans le voile



Contreventement – S. Multon

52

**Notations :****Structure :**

h : hauteur d'un étage  
 H : hauteur du bâtiment

**Trumeaux :**

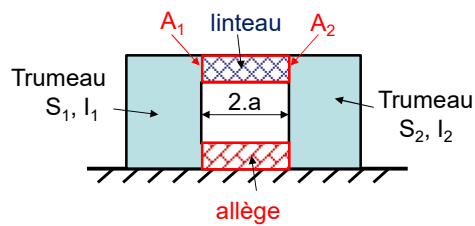
$S_1, S_2$  : aires des trumeaux  
 $I_1, I_2$  : inertie des trumeaux

**Refend :**

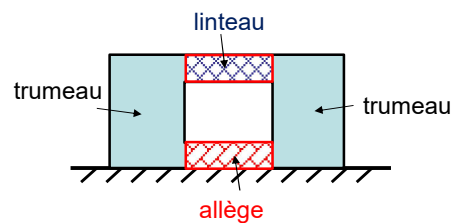
$I_t$  : inertie totale  
 m : moment statique

**Linteau :**

$A_1, A_2$  : sections d'encastrement du linteau  
 $2 \cdot a$  : portée du linteau  
 $I_L$  : inertie du linteau

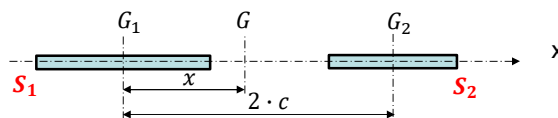


53

**Notations :**

Caractéristiques géométriques du refend :

1) Calcul du centre de gravité du refend (CdG)

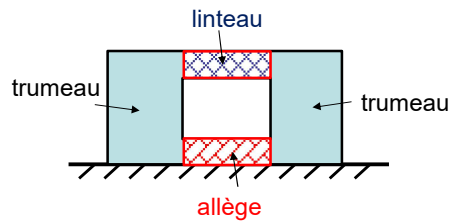


Avec  $2 \cdot c$  : distance entre les centres de gravité des 2 trumeaux

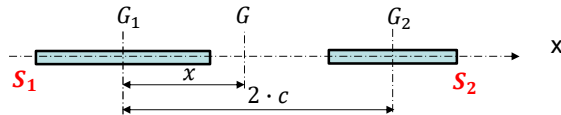
$$x \cdot (S_1 + S_2) = 2 \cdot c \cdot S_2 \rightarrow x = 2 \cdot c \cdot \frac{S_2}{(S_1 + S_2)}$$

Contreventement – S. Multon

54



2) Calcul du moment statique d'un trumeau par rapport au CdG du refend  $m$  :



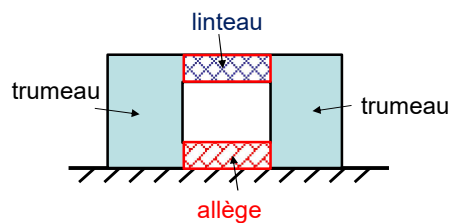
$$\text{Pour le trumeau 1 : } m = S_1 \cdot x = 2 \cdot c \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{(S_1 + S_2)} = \frac{2 \cdot c}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}}$$

Ou pour le trumeau 2 :

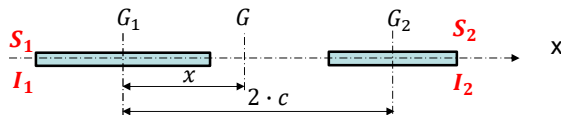
$$m = (2 \cdot c - x) \cdot S_2 = 2 \cdot \left( c - c \cdot \frac{S_2}{(S_1 + S_2)} \right) \cdot S_2 = 2 \cdot c \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{(S_1 + S_2)} = \frac{2 \cdot c}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}}$$

Contreventement – S. Multon

55



3) Calcul du moment d'inertie totale du refend par rapport à G :



$$I_t = I_1 + I_2 + S_1 \cdot x^2 + S_2 \cdot (2 \cdot c - x)^2$$

$$\Rightarrow I_t = I_1 + I_2 + S_1 \cdot \left( 2 \cdot c \cdot \frac{S_2}{(S_1 + S_2)} \right)^2 + S_2 \cdot \left( 2 \cdot c - 2 \cdot c \cdot \frac{S_2}{(S_1 + S_2)} \right)^2$$

Contreventement – S. Multon

56

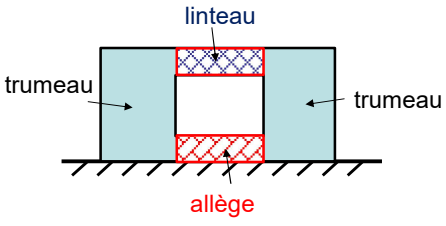


Diagram illustrating the cross-section of a wall with two piers (trumeau) and two lintels (linteau) above and below a central opening (allège).

The diagram shows the following components:

- trumeau (piers)
- linteau (lintels)
- allège (opening)

The following equations are derived for the moment of inertia  $I_t$ :

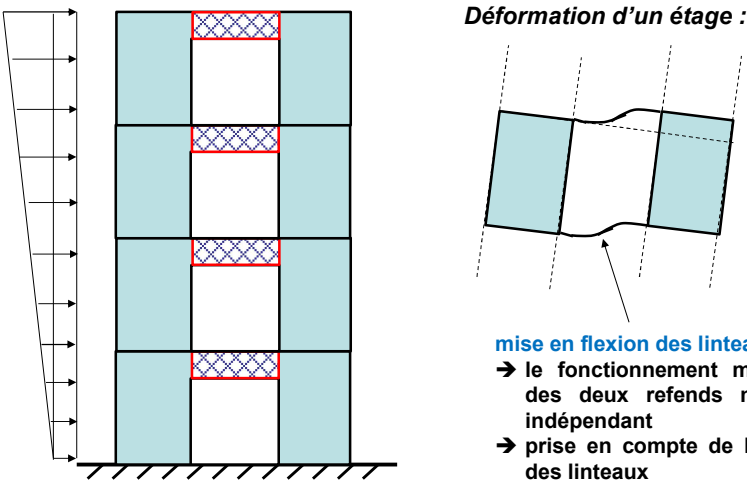
$$\rightarrow I_t = I_1 + I_2 + S_1 \cdot \left( 2 \cdot c \cdot \frac{S_2}{(S_1 + S_2)} \right)^2 + S_2 \cdot \left( 2 \cdot c \cdot \frac{S_1}{(S_1 + S_2)} \right)^2$$

$$\rightarrow I_t = I_1 + I_2 + (S_1 + S_2) \cdot 4 \cdot c^2 \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{(S_1 + S_2)^2}$$

$$\rightarrow I_t = I_1 + I_2 + 4 \cdot c^2 \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{(S_1 + S_2)} = I_1 + I_2 + \frac{4 \cdot c \cdot c}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}} = I_1 + I_2 + 2 \cdot c \cdot m$$

Contreventement – S. Multon 57

**Déformation d'un voile avec ouverture**



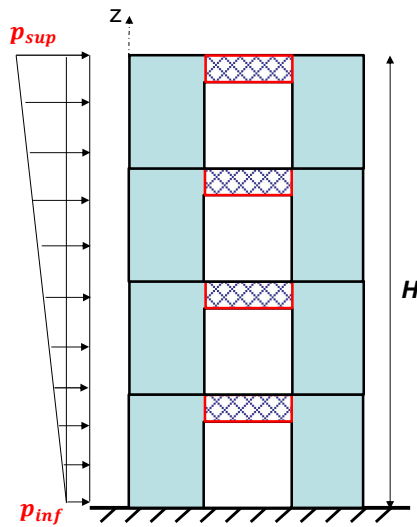
**Déformation d'un étage :**

**mise en flexion des linteaux :**

- le fonctionnement mécanique des deux refends n'est pas indépendant
- prise en compte de la rigidité des linteaux

Contreventement – S. Multon 58

### Déformation d'un voile avec ouverture



#### Immeubles de grandes hauteurs

→ Effort du vent se divise en 2 charges : 1 rectangulaire ( $p_{inf}$ ) et 1 triangulaire (de base  $p_{sup} - p_{inf}$ )

→ Effort total en pied de refends :

Par la charge rectangulaire

$$V_r^t = H \cdot p_{inf}$$

Par la charge triangulaire

$$V_{tr}^t = \frac{H}{2} \cdot (p_{sup} - p_{inf})$$

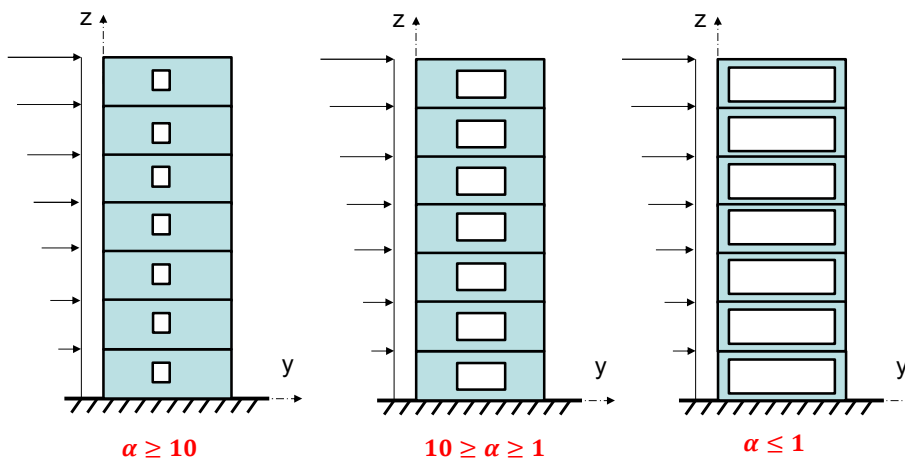
On définit :  $\xi = \frac{z}{H}$

$$\text{et } \alpha = \frac{H}{a} \sqrt{\frac{3 \cdot c \cdot I_L}{m \cdot a \cdot h} \cdot \frac{I_t}{I_1 + I_2}}$$

Contreventement – S. Multon

59

### Domaine d'application de la méthode



$$\alpha \geq 10$$

Petites ouvertures,  
refend monolithique  
→ calcul comme un  
'voile plein'

$$10 \geq \alpha \geq 1$$

Voile avec ouvertures  
moyennes → prise en  
compte des linteaux

$$\alpha \leq 1$$

Voile avec grandes  
ouvertures → calcul  
de type portique

### Linteaux : Sollicitation majeure : L'effort tranchant

Pour la charge rectangulaire, on définit :

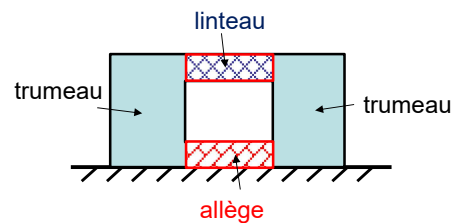
$$\varnothing(\xi) = 1 - \xi - \frac{\alpha \cdot ch(\alpha \cdot (1 - \xi)) - sh(\alpha \cdot \xi)}{\alpha \cdot ch(\alpha)}$$

Pour la charge triangulaire, on définit :

$$\chi(\xi) = \left(1 - \frac{2}{\alpha^2}\right) \left(1 - \frac{ch(\alpha \cdot (1 - \xi))}{ch(\alpha)}\right) + \frac{2 \cdot sh(\alpha \cdot \xi)}{\alpha \cdot ch(\alpha)} - \xi^2$$

L'effort tranchant dans le linteau est estimé à :

$$\pi = \frac{m \cdot h}{I_t} (\varnothing(\xi) \cdot V_r^t + \chi(\xi) \cdot V_{tr}^t)$$



Contreventement – S. Multon

61

### Trumeaux : Sollicitations majeures : Moment fléchissant

Pour la charge rectangulaire, on définit :

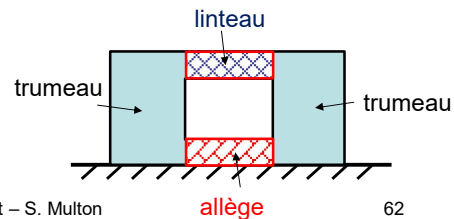
$$\psi(\xi) = \frac{(1 - \xi)^2}{2} - \frac{sh(\alpha \cdot (1 - \xi))}{\alpha \cdot ch(\alpha)} + \frac{1}{\alpha^2} \cdot \left(1 - \frac{ch(\alpha \cdot \xi)}{ch(\alpha)}\right)$$

Et dans le trumeau 1 :

$$M_{1,r} = \frac{I_1}{I_1 + I_2} \cdot V_r^t \cdot H \cdot \left( \frac{(1 - \xi)^2}{2} - 2 \cdot c \cdot \frac{m}{I_t} \cdot \psi(\xi) \right)$$

Et dans le trumeau 2 :

$$M_{2,r} = \frac{I_2}{I_1 + I_2} \cdot V_r^t \cdot H \cdot \left( \frac{(1 - \xi)^2}{2} - 2 \cdot c \cdot \frac{m}{I_t} \cdot \psi(\xi) \right)$$



Contreventement – S. Multon

62



### Trumeaux : Sollicitations majeures : Moment fléchissant

Pour la charge triangulaire, on définit :

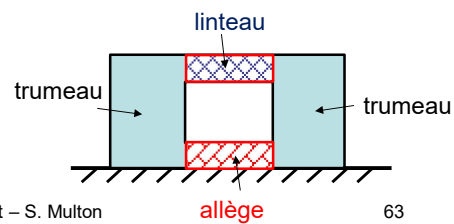
$$\lambda(\xi) = \left(1 - \frac{2}{\alpha^2}\right) \left(1 - \xi - \frac{sh(\alpha \cdot (1 - \xi))}{\alpha \cdot ch(\alpha)}\right) + \frac{2}{\alpha^2} \cdot \left(1 - \frac{ch(\alpha \cdot \xi)}{ch(\alpha)}\right) - \frac{1}{3} \cdot (1 - \xi^3)$$

Et dans le trumeau 1 :

$$M_{1\_tr} = \frac{I_1}{I_1 + I_2} \cdot V_{tr}^t \cdot H \cdot \left(\frac{2 - 3\xi + \xi^3}{3} - 2 \cdot c \cdot \frac{m}{I_t} \cdot \lambda(\xi)\right)$$

Et dans le trumeau 2 :

$$M_{2\_tr} = \frac{I_2}{I_1 + I_2} \cdot V_{tr}^t \cdot H \cdot \left(\frac{2 - 3\xi + \xi^3}{3} - 2 \cdot c \cdot \frac{m}{I_t} \cdot \lambda(\xi)\right)$$



### Trumeaux : Sollicitations majeures : Effort normal

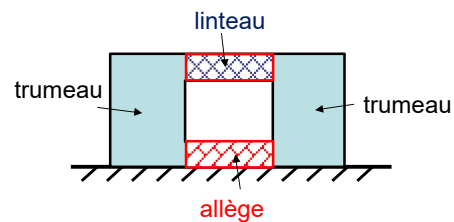
Dans le trumeau 1 :

$$N_1 = \frac{m \cdot H}{I_t} (\psi(\xi) \cdot V_r^t + \lambda(\xi) \cdot V_{tr}^t)$$

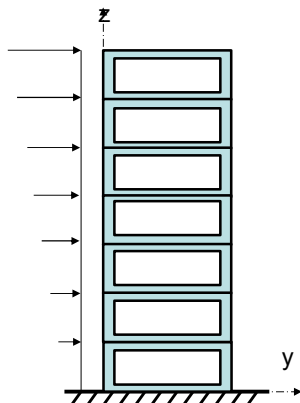
Dans le trumeau 2 :

$$N_2 = -N_1$$

Remarque : En fonction du sens du vent, et pour l'action horizontale seule, un des trumeaux est en traction et l'autre en compression.



### 4.3.2 Voile avec grandes ouvertures



#### Voile avec grandes ouvertures

→ calcul de type portique

Utilisés seuls uniquement pour le contreventement de bâtiments de faible hauteur.

Pour les bâtiments de moyenne et grande hauteurs, ils peuvent être associés à des murs de contreventement sans ouverture.

## 4.4 Contreventement mixte

Dans certaines bâtiments, le contreventement peut être obtenu par l'association de plusieurs éléments (voiles, portiques, palées de stabilité).

La **notion d'inertie équivalente** peut alors être utilisée dans le calcul de distribution des efforts horizontaux (partie 3) afin de répartir les efforts résultants entre les différents éléments.

#### Notion d'inertie équivalente :

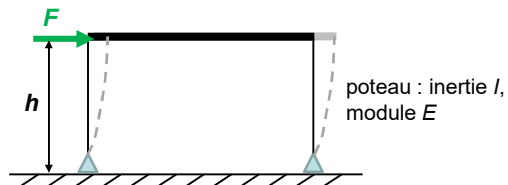
Définition : Inertie équivalente  $I_{eq}$  = inertie d'un refend plein fictif encasté en pied soumis à  $F$  et qui présente un déplacement horizontal en tête égal à celui de l'élément considéré

Pour un refend plein et élancé, le déplacement horizontal en tête est égal à :

$$\delta = \frac{F \cdot h^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

### Portiques

Pour un portique articulé en pied avec traverse infiniment rigide soumis à un effort concentré horizontal en tête de portique :



le déplacement en tête vaut :  $\delta_{p1} = \frac{F \cdot h^3}{6 \cdot E \cdot I}$

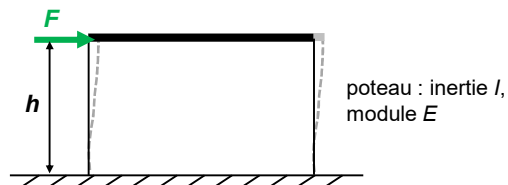
L'inertie équivalente est obtenue par :  $\delta_{p1} = \frac{F \cdot h^3}{6 \cdot E \cdot I} = \frac{F \cdot h^3}{3 \cdot E \cdot I_{eq}}$

$$\rightarrow I_{eq} = 2 \cdot I$$

Contreventement – S. Multon

67

Pour un portique encastré en pied avec traverse infiniment rigide soumis à un effort concentré horizontal en tête de portique :



le déplacement en tête vaut :  $\delta_{p2} = \frac{F \cdot h^3}{24 \cdot E \cdot I}$

L'inertie équivalente est obtenue par :  $\delta_{p2} = \frac{F \cdot h^3}{24 \cdot E \cdot I} = \frac{F \cdot h^3}{3 \cdot E \cdot I_{eq}}$

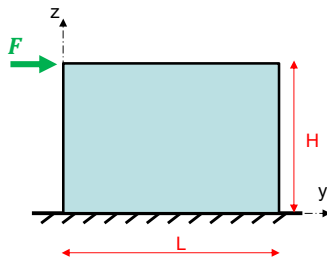
$$\rightarrow I_{eq} = 8 \cdot I$$

Contreventement – S. Multon

68

### Voile de type 'console courte'

Un voile court  $H / L < 2$  est principalement sollicité en cisaillement.



Le déplacement de flexion en tête peut être négligé.

Le déplacement en tête est principalement causé par le cisaillement et vaut :

$$\delta_V = \frac{F \cdot H}{G \cdot S_r}$$

avec  $G$ , module de cisaillement et  $S_r$ , la section réduite.

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad \text{et} \quad S_r = \frac{5}{6} S \quad \text{pour une section rectangulaire}$$

Par extension, écrivons :  $\delta_V = \frac{F \cdot H}{G \cdot S_r} = \frac{F \cdot H^3}{3 \cdot E \cdot I_{eq}} \rightarrow I_{eq} = \frac{S_r \cdot H^2}{6 \cdot (1 + \nu)}$

Contreventement – S. Multon

69

### Voile avec ouverture

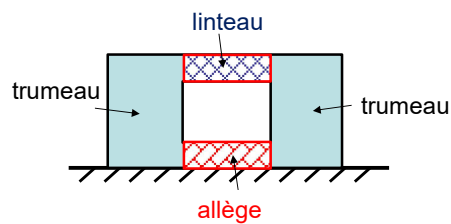
Pour un voile avec ouverture, l'inertie équivalente peut être évaluée à partir de la méthode d'Albigès et Goulet et des coefficients définis précédemment :

sous charge rectangulaire :

$$I_{eq} = \frac{I_t}{1 + \frac{16 \cdot c \cdot m}{I_1 + I_2} \frac{\psi(\theta)}{\alpha^2}}$$

sous charge triangulaire :

$$I_{eq} = \frac{I_t}{1 + \frac{120 \cdot c \cdot m}{11 \cdot (I_1 + I_2)} \frac{\lambda(\theta)}{\alpha^2}}$$



Contreventement – S. Multon

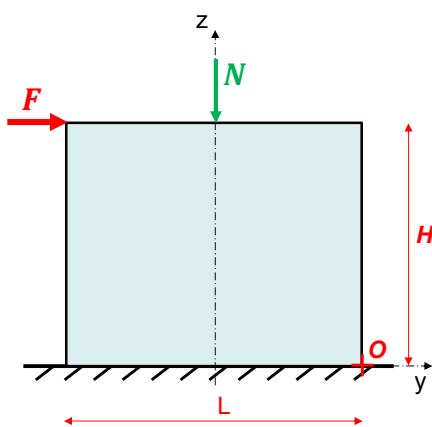
70

## 5. Etudes des fondations

Contreventement – S. Multon

71

### Risque de glissement



**Effort sollicitant horizontal :  $F$**

**Efforts résistants au glissement :**

$R_{fr}$  : résistance par frottement

$R_b$  : résistance par butée frontale

**Il n'y a pas glissement si :**

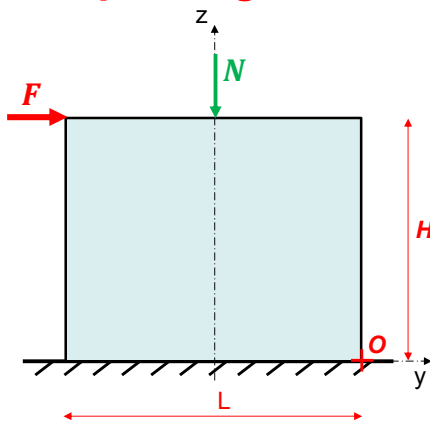
$$F \leq R_{fr} (+R_b)$$

↓  
souvent négligée car  
difficile à évaluer

Contreventement – S. Multon

72

## Risque de glissement



Efforts résistants au glissement (EC7) :

$R_{fr}$  : résistance par frottement

en condition drainée :

$$R_{fr} = \frac{N \cdot \tan(\varphi')}{\gamma_{R,h} \cdot \gamma_{R,d,h}}$$

en condition non-drainée :

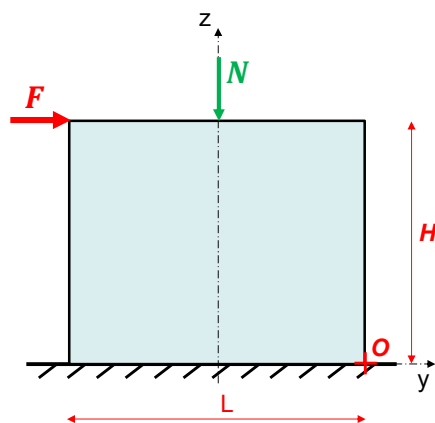
$$R_{fr} = \min\left(\frac{S \cdot c_u}{\gamma_{R,h} \cdot \gamma_{R,d,h}}; 0,4 \cdot N\right)$$

$\varphi'$  : angle de frottement interne du sol  
 $c_u$  : cohésion non drainée du sol  
 $S$  : surface de la fondation  
 $\gamma_{R,h}$  : coef de sécurité de glissement (1,1)  
 $\gamma_{R,d,h}$  : coef de sécurité de modèle (1,1)

Contreventement – S. Multon

73

## Risque de renversement



Moment sollicitant :

$$M_{s/o} = -H \cdot F$$

Moment résistant :

$$M_{r/o} = \frac{L}{2} \cdot N$$

Il y a non-renversement si :

$$|M_{s/o}| \leq |M_{r/o}|$$

Contreventement – S. Multon

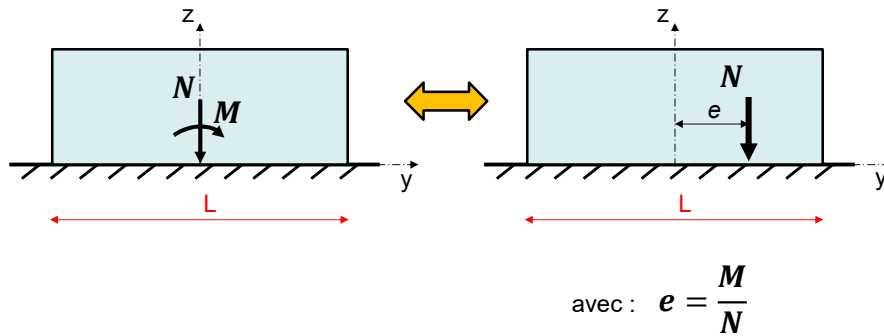
74

## Contraintes dans le sol

Pour des refends pleins

Cas pour lequel la stabilité de la fondation est assurée de manière indépendante

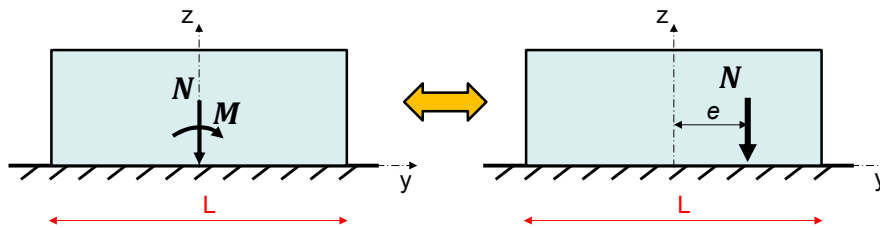
La fondation est supposée isolée.



Contreventement – S. Multon

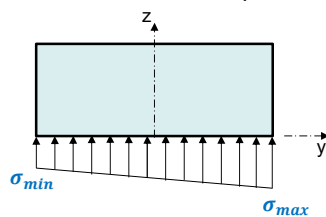
75

### Flexion composée dans le sol

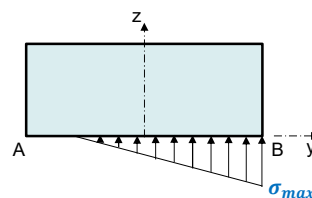


Etat de contraintes résultant dans le sol :

sol entièrement comprimé



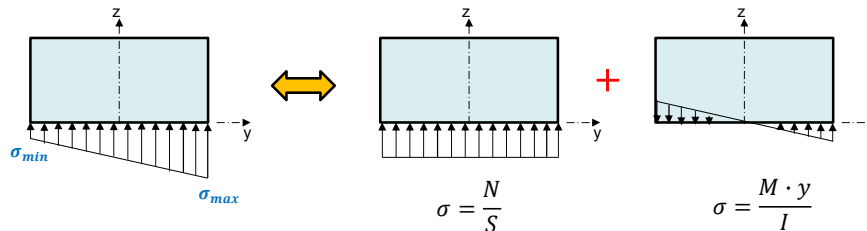
sol partiellement comprimé



Contreventement – S. Multon

76

### Etude d'un sol entièrement comprimé



Soit  $S$ , la surface, rectangulaire, de la fondation, et  $b$  son épaisseur :

$$\begin{cases} \sigma_{max} = \frac{N}{S} + \frac{M \cdot L}{2 \cdot I} = \frac{N}{S} + \frac{M \cdot L}{2 \cdot \left(\frac{bL^3}{12}\right)} = \frac{N}{S} + \frac{6 \cdot M}{S \cdot L} = \frac{N}{S} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot e}{L}\right) \\ \sigma_{min} = \frac{N}{S} - \frac{M \cdot L}{2 \cdot I} = \frac{N}{S} - \frac{6 \cdot M}{S \cdot L} = \frac{N}{S} \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot e}{L}\right) \end{cases}$$

Le sol est entièrement comprimé si :  $\sigma_{min} \geq 0 \rightarrow e \leq \frac{L}{6}$   
(résultante dans le tiers central)

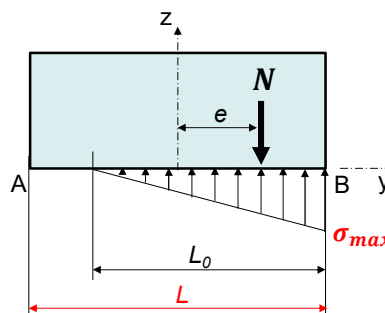
Contreventement – S. Multon

77

Si  $\frac{L}{6} < e < \frac{L}{2}$  alors la base de la fondation n'est pas totalement comprimée (résultante en dehors du tiers central).

Répartition triangulaire des contraintes dans le sol :

$S$ , la surface, rectangulaire, de la fondation, et  $b$  son épaisseur.



**P.F.S.**

$$\sum \vec{F} = \vec{0} \text{ sur } \vec{z} \rightarrow \frac{\sigma_{max}}{2} \cdot L_0 \cdot b - N = 0 \quad (1)$$

$$\sum \vec{M}_{/B} = \vec{0} \text{ sur } \vec{x} \rightarrow N \cdot \left(\frac{L}{2} - e\right) - \left(\frac{\sigma_{max}}{2} \cdot L_0 \cdot b\right) \cdot \frac{L_0}{3} = 0 \quad (2)$$

Contreventement – S. Multon

78



$$(1) \rightarrow \sigma_{max} = \frac{2 \cdot N}{L_0 \cdot b}$$

donc

$$(2) \rightarrow N \cdot \left(\frac{L}{2} - e\right) - (N) \cdot \frac{L_0}{3} = 0$$

$$\rightarrow L_0 = 3 \cdot \left(\frac{L}{2} - e\right)$$

$$\text{Et donc } \sigma_{max} = \frac{2 \cdot N}{3 \cdot \left(\frac{L}{2} - e\right) \cdot b}$$

Si  $e > \frac{L}{2}$  alors la fondation est en déséquilibre.

