

Structures en maçonnerie portante

Quelques remarques introductives

- Matériau et techniques de construction traditionnels
 - Nouvelles tendances en maçonnerie portante: immeubles à appartements, maison en blocs légers...
 - Généralement pas (ou peu) d'intervention de l'ingénieur
 - Grande variété de matériaux et de systèmes constructifs à couvrir
 - Partie importante du parc immobilier
 - Etude technico-scientifiques assez récente, particulièrement sur le comportement sismique
- Prescriptions normatives (trop ?) simples et (trop ?) conservatives

Structures en maçonnerie portante

Quelques remarques introductives

- Pourtant, bâtiments à problèmes potentiels, même en zone de sismicité modérée



Structures en maçonnerie portante

Quelques remarques introductives



Structures en maçonnerie portante

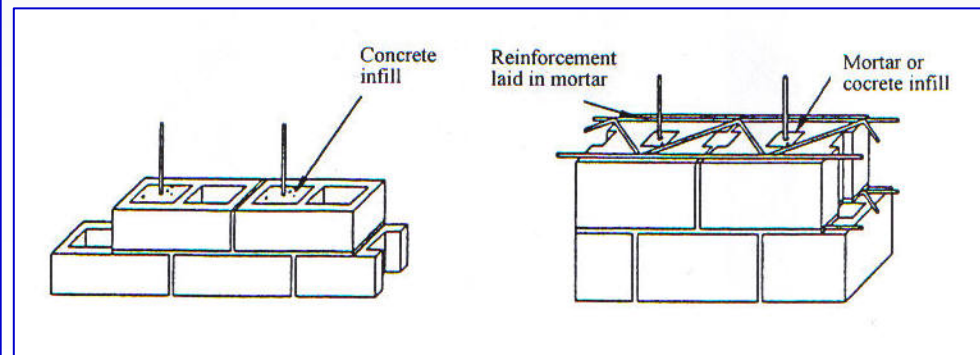
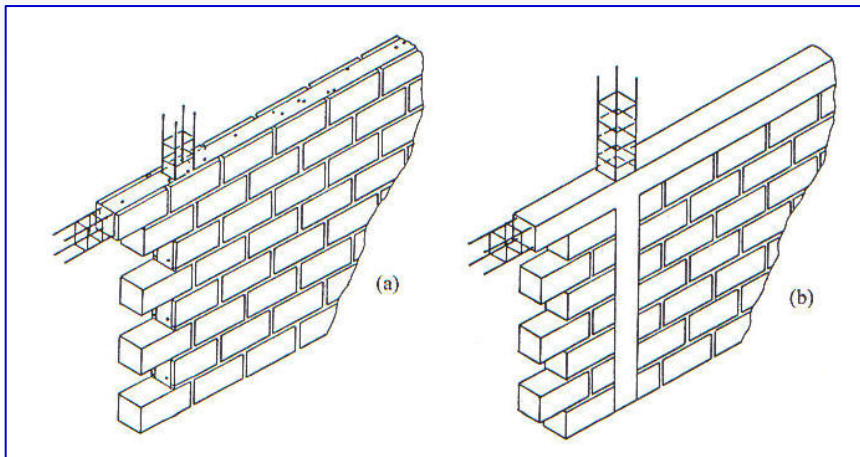
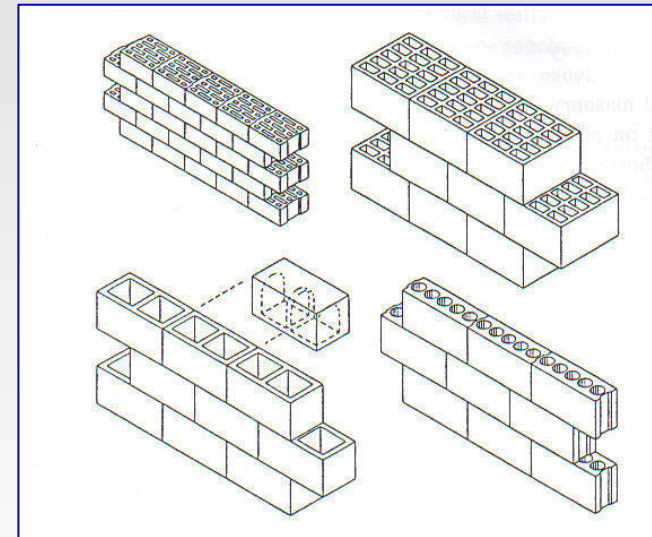
L'approche Eurocode 8

- Section très courte (9 pages)
- Proportion très significative de paramètres à fixer au niveau des annexes nationales
- Les règles sont modulées en fonction du niveau de sismicité
 - $\gamma_I a_g S \leq 0,06 g$: Niveau très faible – sismicité négligeable
 - $\gamma_I a_g S \leq 0,1 g$: Niveau faible – prescriptions limitées
 - $\gamma_I a_g S \leq 0,2 g$: Niveau modéré – prescriptions complètes
 - $\gamma_I a_g S > 0,2 g$: Niveau fort – obligation de maçonnerie confinée ou armée

Structures en maçonnerie portante

L'approche Eurocode 8

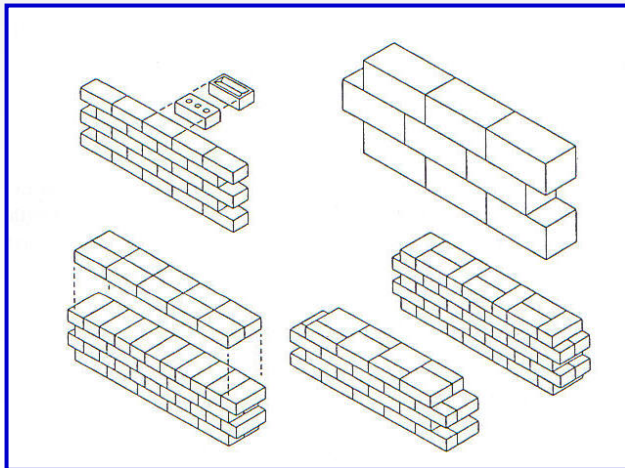
- 3 types de construction sont considérés
 - Maçonnerie non armée
 - Maçonnerie chaînée (ou confinée)
 - Maçonnerie armée



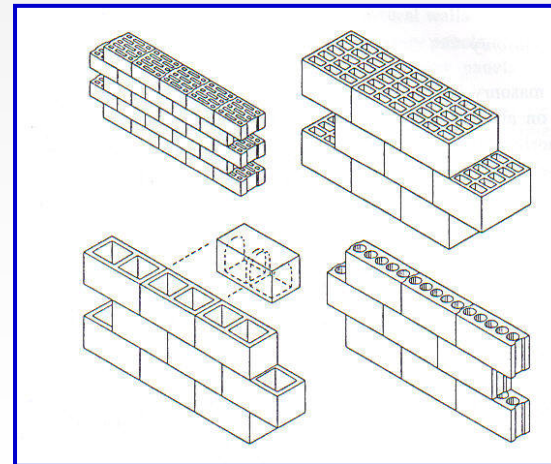
Structures en maçonnerie portante

Matériaux

- 6 matériaux sont considérés (terre cuite, béton, béton léger, silico-calcaire, pierre naturelle, pierre artificielle)
- Limitations sur les groupes de blocs autorisés (décision nationale) pour des raisons de robustesse (risques de rupture fragile des cloisons intérieures)



Groupe 1



Groupe 2

Structures en maçonnerie portante

Matériaux

- Qualité minimale du mortier (M5 pour la maçonnerie non armée, M10 pour la maçonnerie chaînée ou armée)
- Limitations sur les types de joints autorisés (remplis, partiellement remplis, emboîtement mécanique): décision nationale
- Résistance minimale des blocs:
 - Uniquement pour zone de sismicité modérée
 - $f_{b,min} = 5 \text{ MPa}$ (Problème pour le béton léger)
 - $f_{bh,min} = 2 \text{ MPa}$

Structures en maçonnerie portante

Types de construction – coefficients de comportement

- Maçonnerie non armée "Eurocode 6" – uniquement en zone de sismicité faible et pour des épaisseurs significatives (annexe nationale, valeur recommandée: min. 170 mm)
- Maçonnerie non armée "Eurocode 8" – jusque sismicité modérée

Type de construction	Coefficient de comportement q
Maçonnerie non armée conforme uniquement à l'EN 1996 (recommandée uniquement dans les cas de faible sismicité)	1,5
Maçonnerie non armée conforme à l'EN 1998-1	1,5 – 2,5
Maçonnerie chaînée	2,0 – 3,0
Maçonnerie armée	2,5 – 3,0

Structures en maçonnerie portante

Critères de dimensionnement – règles constructives

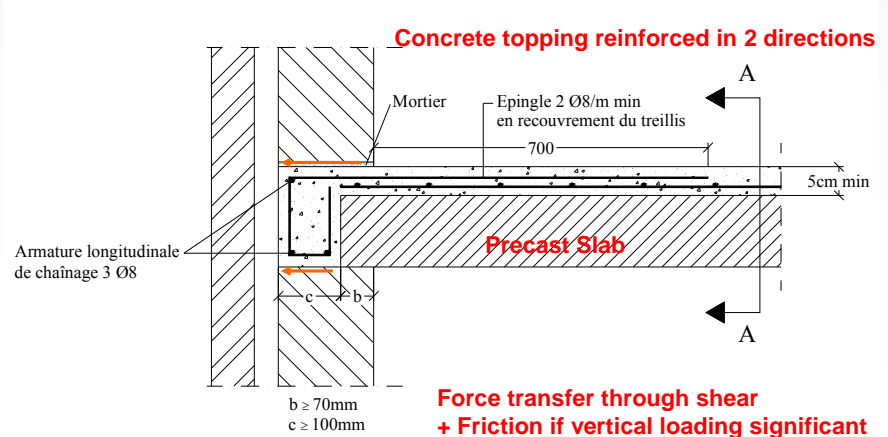
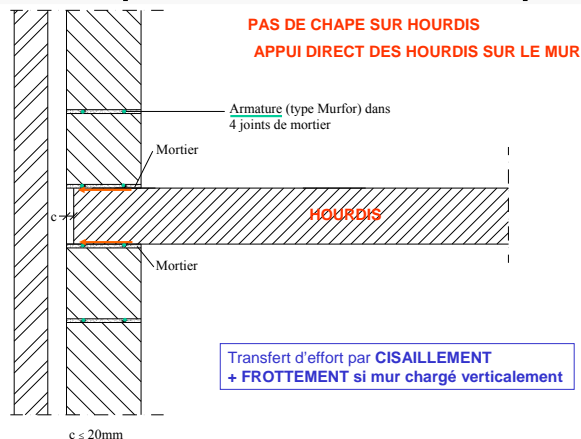
Objectifs:

- Eviter les ruptures fragiles
- Assurer une bonne connexion entre les éléments constitutifs
- Assurer que la structure puisse développer les capacités de déformation associées aux facteurs de comportement proposés

Structures en maçonnerie portante

Critères de dimensionnement – règles constructives

- Murs et planchers liaisons dans toutes les directions (pas d'information sur la manière de lier ni sur les forces à transmettre) → Guide parasismique belge (pour accélérations jusqu'à 0,1g)
- Les liaisons murs-planchers doivent inclure un chaînage périphérique adéquat
- Le comportement en diaphragme des planchers doit être assuré



Structures en maçonnerie portante

Critères de dimensionnement – règles constructives

Critères sur les murs de contreventement

- Présents dans 2 directions orthogonales;
- Exigences géométriques (annexe nationale)

Type de maçonnerie	$t_{ef,min}$ (mm)	$(h_{ef}/t_{ef})_{max}$	$(l/h)_{min}$
non armée, avec blocs en pierres naturelles	350	9	0,5
non armée, avec tout autre type de bloc	240	12	0,4
non armée, avec tout autre type de bloc, en cas de faible sismicité	170	15	0,35
maçonnerie chaînée	240	15	0,3
maçonnerie armée	240	15	pas de restriction

Les notations utilisées ont les significations suivantes :

t_{ef} épaisseur du mur (voir l'EN 1996-1-1:2004)
 h_{ef} hauteur effective du mur (voir l'EN 1996-1-1:2004)
 h hauteur libre maximale des ouvertures adjacentes au mur
 l longueur du mur

Structures en maçonnerie portante

Critères de dimensionnement – règles constructives

Exigences additionnelles sur les chaînages ou armaturages minimum (et maximum pour la maçonnerie armée)

y compris pour la maçonnerie non armée: exigence de la présence d'un chaînage périphérique au niveau des connexions mur-plancher.

Structures en maçonnerie portante

Analyse de la structure

Recommandations sur la manière de procéder

- Le modèle doit être représentatif de la **rigidité du système** dans son **ensemble**
- La rigidité des éléments doit être évaluée en prenant en compte la **déformabilité en flexion et au cisaillement**, ainsi que la **fissuration** (réduction forfaitaire à la moitié de la raideur élastique)

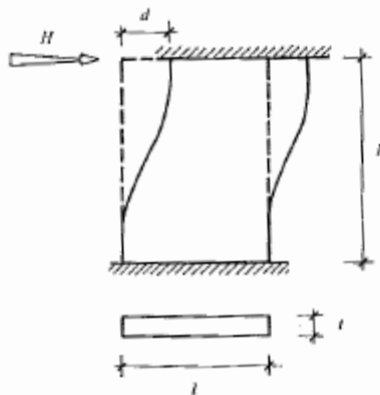


Figure 7.9. Deformation of a fixed-ended wall subjected to lateral loading.

$$d = \frac{H h^3}{12 E I_w} + \frac{\kappa H h}{G A_w}$$

$$K_e = \frac{G A_w}{1.2 h \left[1 + \alpha \frac{G}{E} \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right]}$$

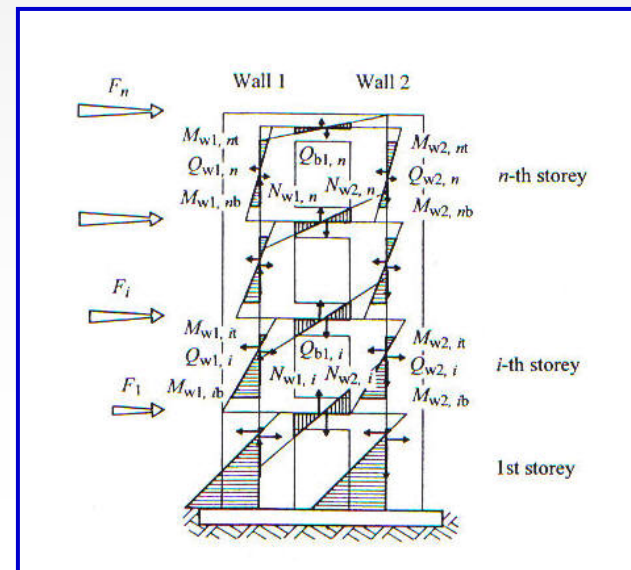
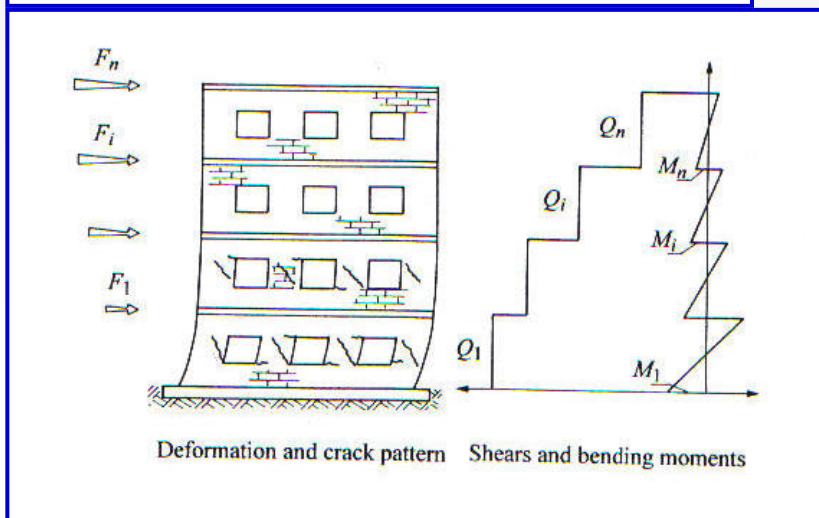
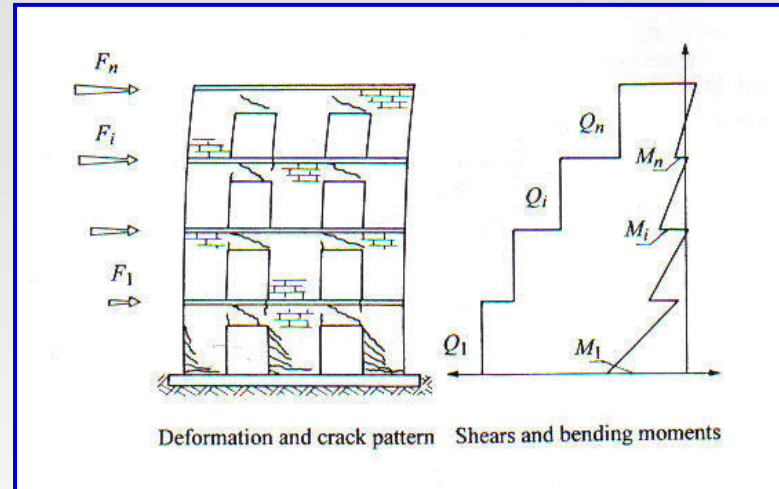
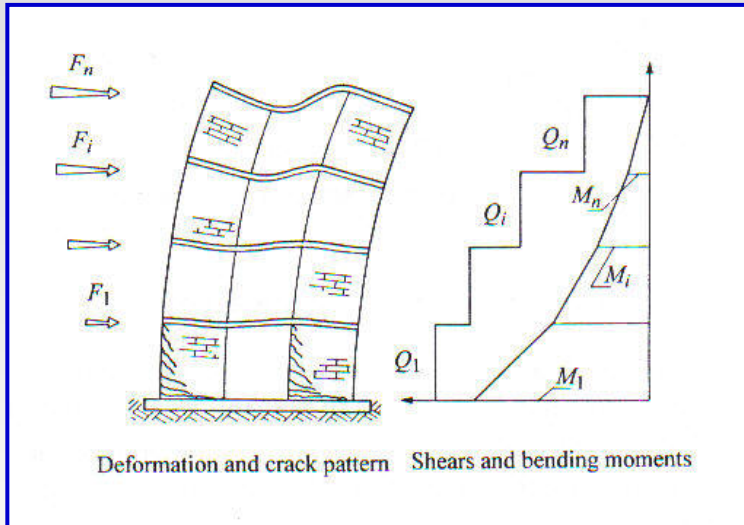
Structures en maçonnerie portante

Analyse de la structure

Recommandations sur la manière de procéder

- Les **linteaux** et la **maçonnerie harpée** peuvent être pris en considération dans l'analyse comme **poutre de couplage**, pour autant qu'ils soient **liaisonnés correctement** aux murs adjacents et aux poutres de ceinture
- Dans ce cas, une **analyse en portique** est autorisée
- Possibilité de redistribuer les efforts entre murs (de -25% à +33%)

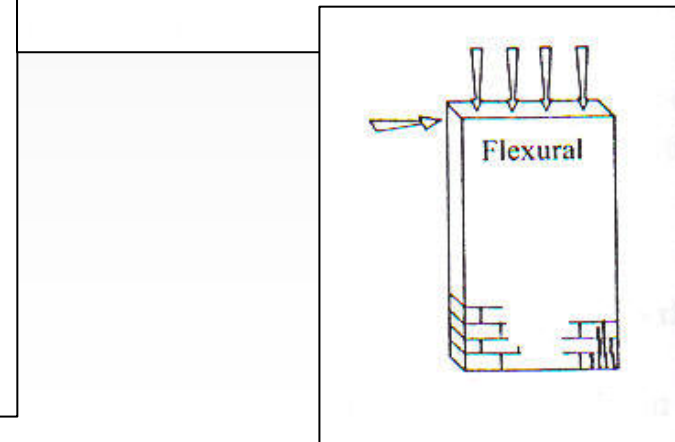
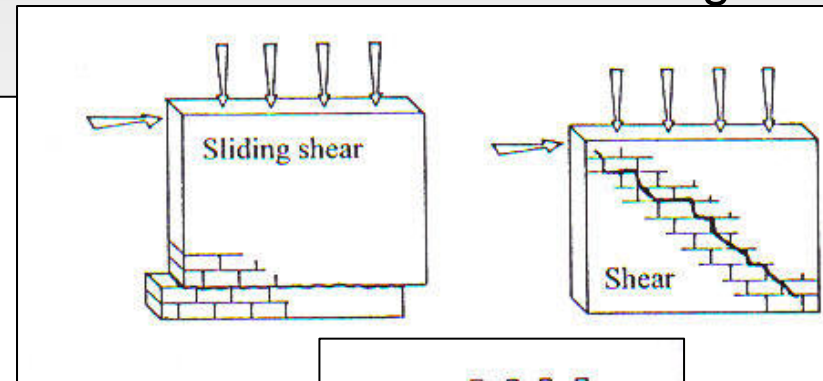
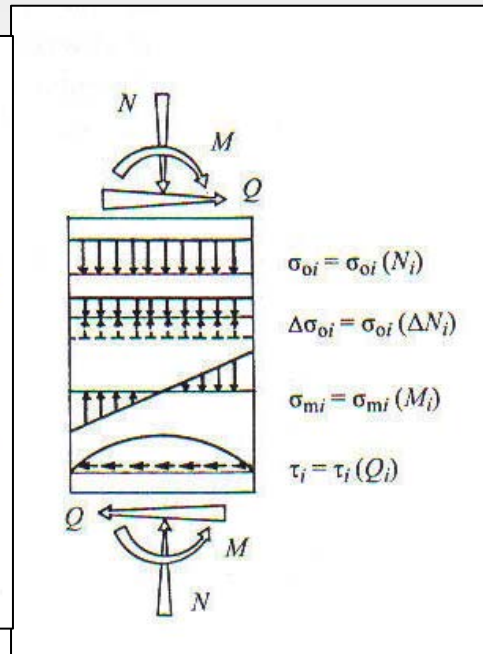
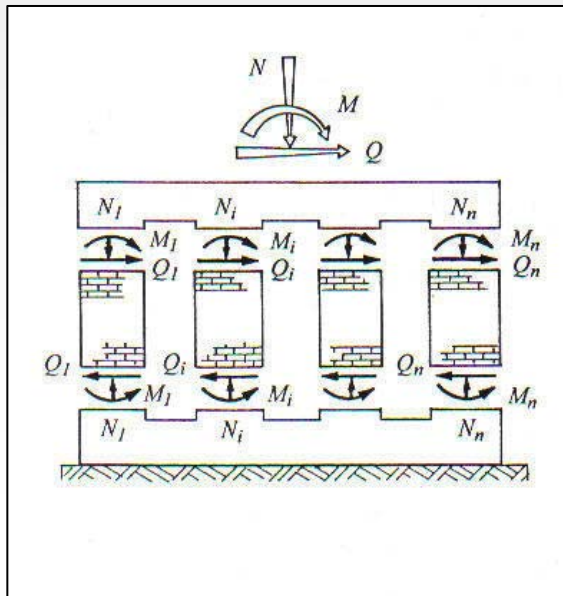
Structures en maçonnerie portante



Structures en maçonnerie portante

Vérification de sécurité

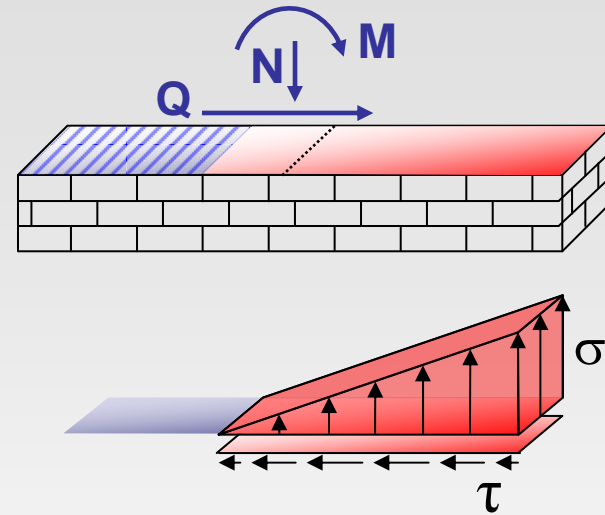
- Selon EN 1996
- Coefficients partiels de sécurité réduit à 2/3 de leur valeur sous charges statiques



Structures en maçonnerie portante

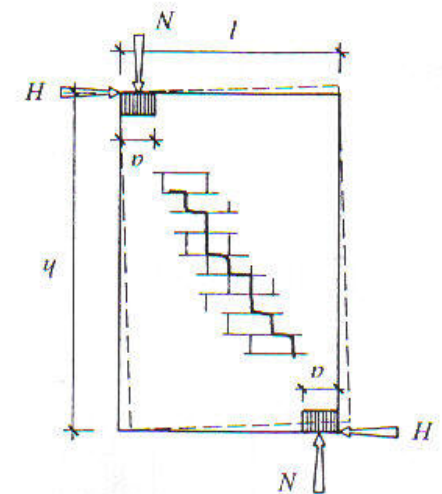
Vérification de sécurité

- Pour la maçonnerie non armée
- A vérifier (contraintes admissibles)
 - $L_c \geq 0$
 - $\sigma_{max} < f_k = K f_b^\alpha f_m^\beta$
 - $\tau < f_{vk} = f_{vk0} + 0.4 \sigma_d$



• Remarques

- Comportement peu réaliste si gouverné par la flexion
- Comportement (très) sécuritaire si la rupture en cisaillement n'est pas dans les joints

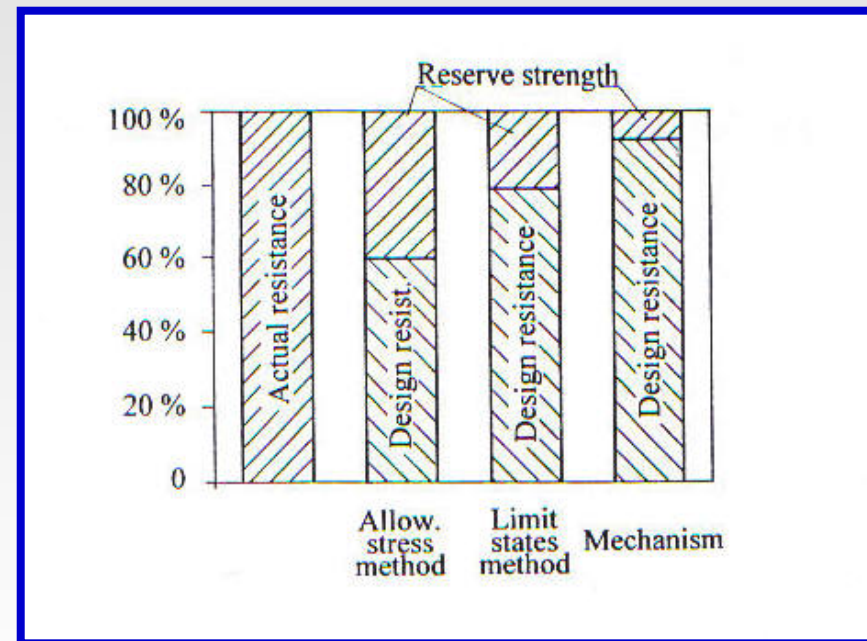
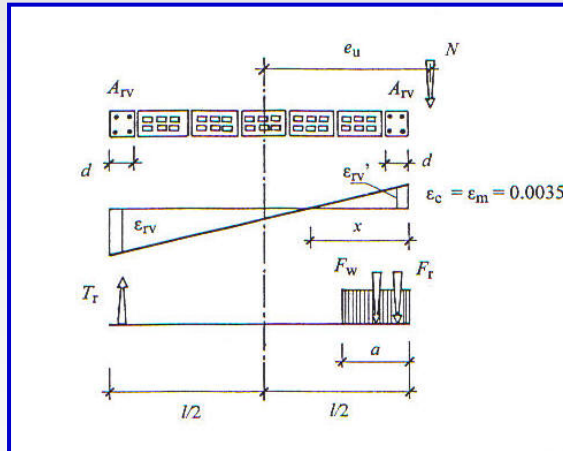


Structures en maçonnerie portante

Vérification de sécurité

- Maçonnerie confinée / armée

- Flexion



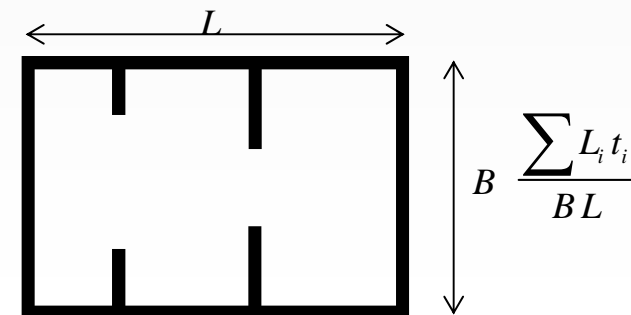
- Cisaillement

- Armée: prise en compte explicite possible
- Confinée: uniquement via l'augmentation du facteur de comportement

Structures en maçonnerie portante

Bâtiments simples en maçonnerie

- Classe de bâtiment dispensés d'une vérification explicite au séisme (uniquement pour catégorie d'importance 1 ou 2)
- Vérification remplacée par le respect de critères géométrique simples
 - Régularité horizontale et verticale
 - Critères sur les murs de contreventements (longueur minimale, nombre, position, élancement...)
 - Critère sur la section minimale de mur de contreventements rapportée à l'emprise en plan du bâtiment



Structures en maçonnerie portante

Bâtiments simples en maçonnerie

Accélération sur site $a_g.S$		$\leq 0,07k\ g$	$\leq 0,10k\ g$	$\leq 0,15k\ g$	$\leq 0,20k\ g$
Type de construction	Nombre d'étages (n)**	Somme minimale de sections transversales de murs de contreventement horizontaux dans chaque direction, en pourcentage de la surface totale par étage ($p_{A,min}$)			
Maçonnerie non armée	1	2,0 %	2,0 %	3,5 %	n/a
	2	2,0 %	2,5 %	5,0 %	n/a
	3	3,0 %	5,0 %	n/a	n/a
	4	5,0 %	n/a*	n/a	n/a
Maçonnerie chaînée	2	2,0 %	2,5 %	3,0 %	3,5 %
	3	2,0 %	3,0 %	4,0 %	n/a
	4	4,0 %	5,0 %	n/a	n/a
	5	6,0 %	n/a	n/a	n/a
Maçonnerie armée	2	2,0 %	2,0 %	2,0 %	3,5 %
	3	2,0 %	2,0 %	3,0 %	5,0 %
	4	3,0 %	4,0 %	5,0 %	n/a
	5	4,0 %	5,0 %	n/a	n/a

Pour $f_b > 12\ \text{MPa}$ (non armée) ou $f_b > 5$ (autres)

Structures en maçonnerie portante

Bâtiments simples en maçonnerie – exemple belge

- Dimensions: 10 x 12 m - 2 niveaux de 2,60m
- Zone 2 – sol B $\rightarrow \gamma_I a_g S = 0.8 \text{ m/s}^2$ (\rightarrow sismicité faible)
- Maçonnerie classique non armée
- **Critères géométriques généraux** sur les murs de contreventements
 - $t_{\text{ef,min}} = 170 \text{ mm} \rightarrow$ blocs de 19 cm
 - $h/t = 240/19 = 12,6 < 15$
 - $l/h > 0,35 \rightarrow l_{\text{min}} = 84 \text{ cm}$
- Les critères constructifs (connexions mur/mur et plancher/mur) sont supposés vérifiés

Structures en maçonnerie portante

Bâtiments simples en maçonnerie – exemple belge

- Critères spécifiques aux bâtiments simples
 - Forme en plan régulière (rectangle): $B/L = 0.83 > 0.25$
 - Murs de contreventements dans les 2 directions + disposition symétrique
 - Dans chaque direction:
 - Murs dans 2 plans parallèles, $L_{\min, \text{cum}} = 0.3 \times L$ (3,0m ou 3,6m), avec au moins un mur de longueur $= 2 \times L_{\min}$ (1,68 m)
 - Entredistance minimale des murs
 - Soit 7,50m sur la largeur de 10m
 - Soit 9 m sur la longueur de 12m

Structures en maçonnerie portante

Bâtiments simples en maçonnerie – exemple belge

- Pourcentage minimal (pour autant que $f_b \geq 12$ MPa)

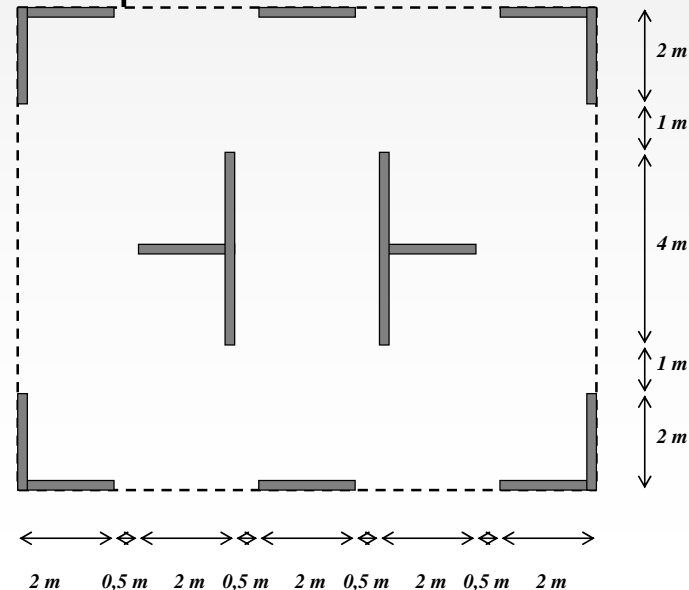
$$A_g S = 0.8 \text{ m/s}^2 + 2 \text{ niveaux} \rightarrow p_{\min} = 2,5\%$$

$$\rightarrow A_{\min} = 3 \text{ m}^2$$

$$\rightarrow L_{\text{cumulée}} = 3/0.19 = 15,8 \text{ m dans chaque direction}$$

- Une solution possible:
- Si 3 niveaux ou zone 4

$$p_{\min} = 5 \% !!!$$



Structures en maçonnerie portante

Vérification en contraintes admissibles

Global geometry of the building	
Dimension in the earthquake direction	12 m
Dimension perpendicular to the earthquake	10 m
Storey height	2.8 m
number of storeys	2
Attic (0/1)	1

Loading	
Seismic zone	2
Soil type	B
Importance class	2
Behaviour factor (q)	1.5
Estimated mass (dead load)	1 t/m ²
Estimated mass (live load)	0.2 t/m ²
Moment reduction factor	0.8

Material properties	
fb	12 N/mm ²
fm	10 N/mm ²
K	0.45
α	0.65
β	0.25
fvk0	0.2 N/mm ²

Additional data	
Total area of bearing walls not relevant for the considered earthquake direction	1.5 m ²

Primary structural shear walls		
Length [m]	Thickness [mm]	Number
3.2	138	3
2	138	4

Check data

Check seismic stability

Reset

Structures en maçonnerie portante

Vérification en contraintes admissibles

General data		
Total height	htot	5.60 m
Estimated period	T	0.18 s
Design acceleration	Gamma1 x ag x S	0.081 g
Mass (dead loads)	M-DL	300.0 t
Seismic mass (including live load)	M-seismic	318.0 t
Design base shear	Fb	364.9 kN
Total overturning moment	Mtot	1362.3 kNm
Characteristic resistance	fk	4.02 N/mm ²
Design resistance	fd	2.68 N/mm ²
Percentage of shear walls		2.02 %
Total shear resistance	Rd	718.1 kN
	Fb / Rd	0.51

Results by wall categories					
Length [m]	N [kN]	M [kNm]	Compressive length [m]	Compressive stress [N/mm ²]	sigma / fd
3.20	337.2	321.0	1.94	2.51	0.94
2.00	210.8	99.8	1.58	1.93	0.72