



Cerema

Calcul de structure bâtiment : des charges aux fondations

Prise en compte du risque sismique II

DUCHEZ Anne

Cerema Méditerranée – Aix-en-Provence

Application pratique

Modale spectrale n DDL



Dimension des poteaux : 20 cmx 20cm

Hauteur par étage : 3m

Epaisseur de la dalle : 0,2m

Zone 4 – Sol C

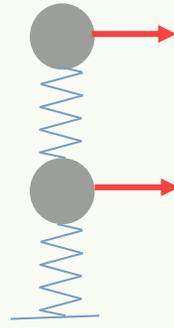
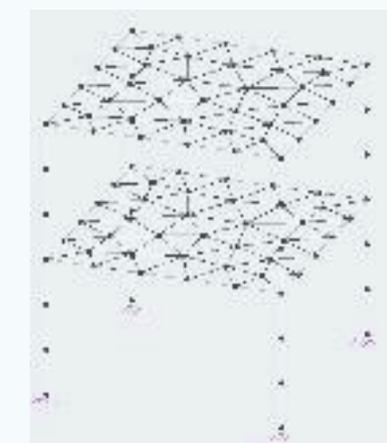
Structure appartenant à un établissement scolaire

A – Calcul par analyse modale

1. Représenter le bâtiment sous la forme d'un modèle brochette équivalent
2. Donner les matrices de masse et de raideur
3. Trouver les périodes propres
4. Trouver les vecteurs propres
5. Donner les efforts sismiques à chaque niveau

Fin du TD – Rappel des méthodes possibles



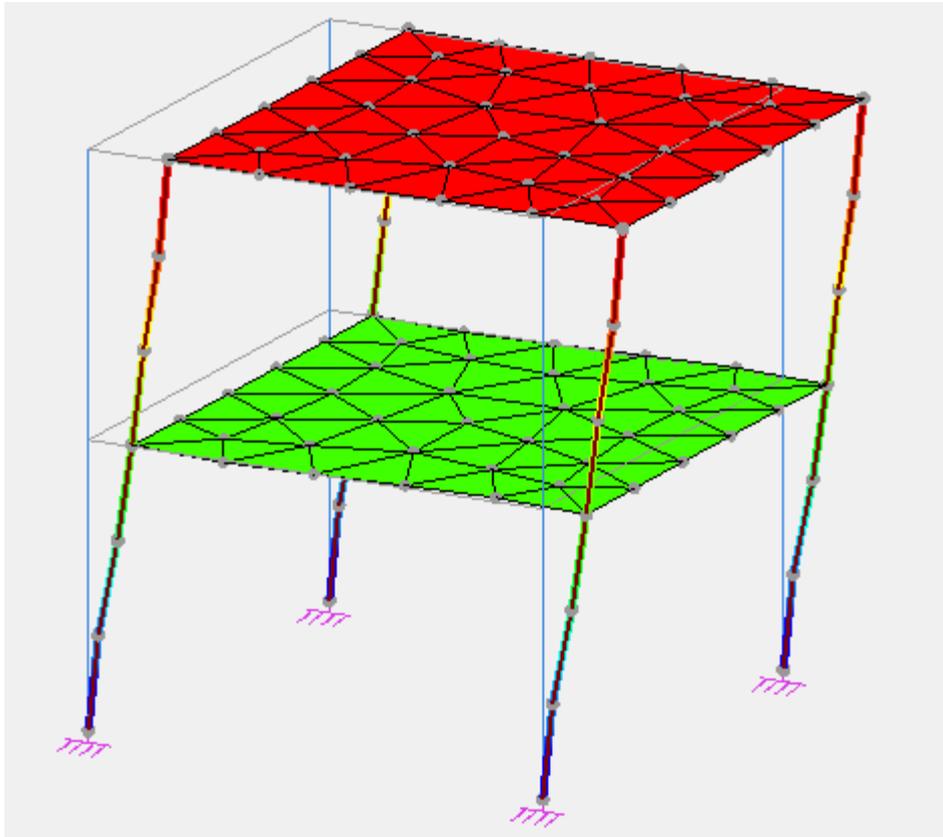
Analyse modale	
Modèle brochette	Logiciel calcul de structure
	

Fin du TD – Rappel des résultats

Périodes propres de la structure

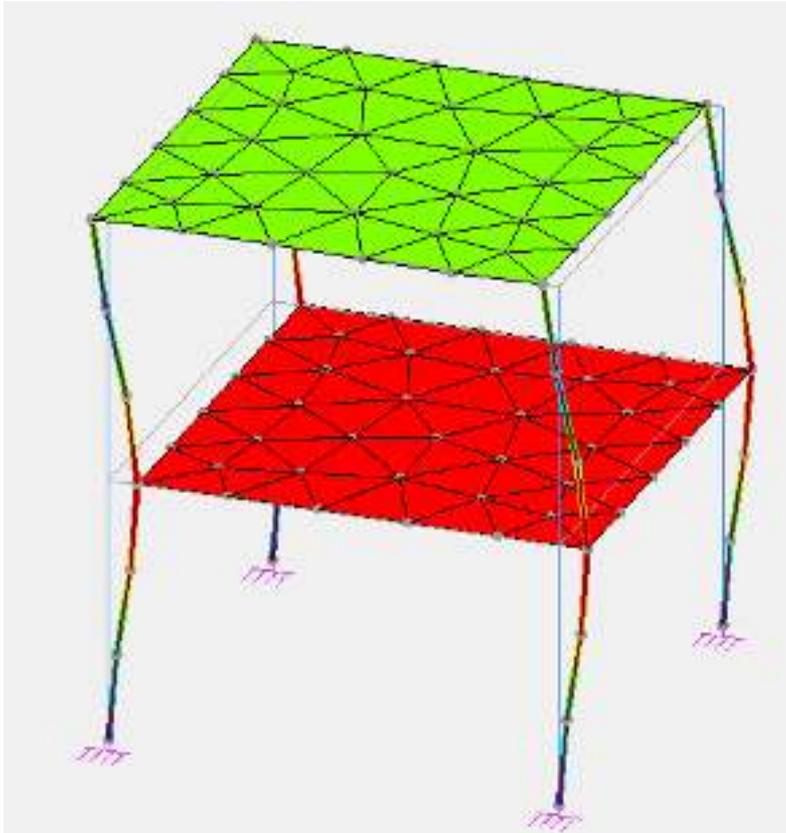
Analyse modale	
Modèle brochette	Logiciel calcul de structure
T1=0,41s T2=0,16s	T1=0,49s T2=0,17s T3=0,31s T4=0,10s

Fin du TD – Périodes et modes propres



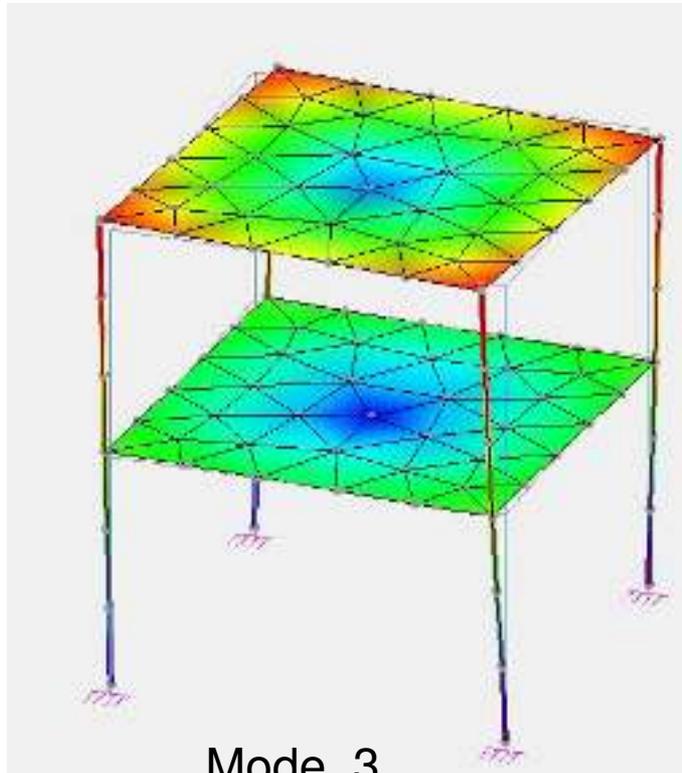
Mode 1
 $T1=0,49s$

Fin du TD – Périodes et modes propres

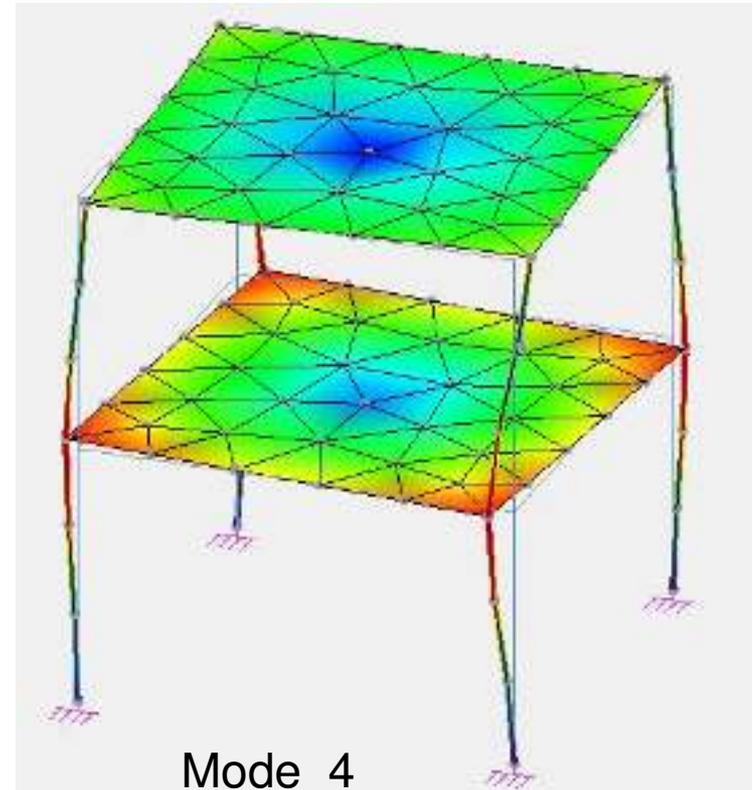


Mode 2
 $T_2=0,17s$

Fin du TD – Périodes et modes propres



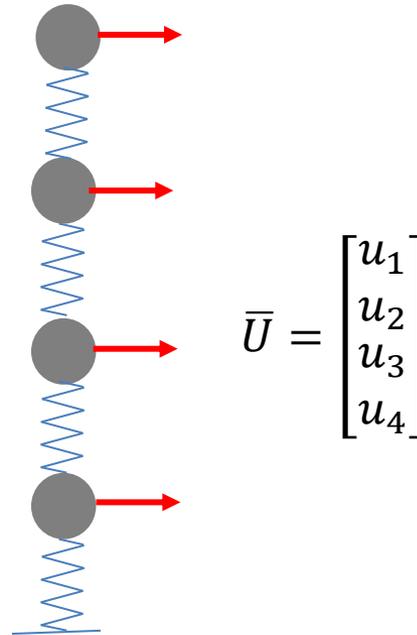
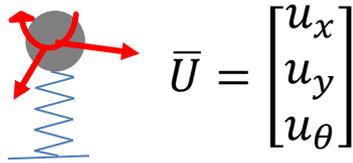
Mode 3
 $T_3=0,31s$



Mode 4
 $T_4=0,10s$

Dynamique des structures

Analyse modale n DDL



$$\bar{M}\ddot{\bar{U}} + \bar{C}\dot{\bar{U}} + \bar{K}\bar{U} = \bar{P}(t)$$

Dynamique des structures

Analyse modale n DDL

Vibrations forcées

$$\bar{M}\ddot{\bar{U}} + \bar{C}\dot{\bar{U}} + \bar{K}\bar{U} = \bar{P}(t)$$

En injectant la solution des vibrations libres non amorties:

$$\bar{U} = \sum_{i=1}^N y_i(t) \bar{D}_i$$

$$\bar{M} \sum_{i=1}^N \ddot{y}_i(t) \bar{D}_i + \bar{C} \sum_{i=1}^N \dot{y}_i(t) \bar{D}_i + \bar{K} \sum_{i=1}^N y_i(t) \bar{D}_i = \bar{P}(t)$$

Dynamique des structures

Analyse modale n DDL

Vibrations forcées

$$\bar{M}\ddot{\bar{U}} + \bar{C}\dot{\bar{U}} + \bar{K}\bar{U} = \bar{P}(t)$$

En injectant la solution des vibrations libres non amorties: $\bar{U} = \sum_{i=1}^N y_i(t) \bar{D}_i$

$$\bar{M} \sum_{i=1}^N \ddot{y}_i(t) \bar{D}_i + \bar{C} \sum_{i=1}^N \dot{y}_i(t) \bar{D}_i + \bar{K} \sum_{i=1}^N y_i(t) \bar{D}_i = \bar{P}(t)$$

Multiplication par ${}^t\bar{D}_j$ de l'équation pour j entre 1 et N

$${}^t\bar{D}_j \bar{M} \sum_{i=1}^N \ddot{y}_i(t) \bar{D}_i + {}^t\bar{D}_j \bar{C} \sum_{i=1}^N \dot{y}_i(t) \bar{D}_i + {}^t\bar{D}_j \bar{K} \sum_{i=1}^N y_i(t) \bar{D}_i = {}^t\bar{D}_j \bar{P}(t)$$

Dynamique des structures

Analyse modale n DDL

Vibrations forcées

$$\bar{M}\ddot{\bar{U}} + \bar{C}\dot{\bar{U}} + \bar{K}\bar{U} = \bar{P}(t)$$

En injectant la solution des vibrations libres non amorties: $\bar{U} = \sum_{i=1}^N y_i(t) \bar{D}_i$

$$\bar{M} \sum_{i=1}^N \ddot{y}_i(t) \bar{D}_i + \bar{C} \sum_{i=1}^N \dot{y}_i(t) \bar{D}_i + \bar{K} \sum_{i=1}^N y_i(t) \bar{D}_i = \bar{P}(t)$$

Multiplication par ${}^t\bar{D}_j$ de l'équation pour j entre 1 et N

$${}^t\bar{D}_j \bar{M} \sum_{i=1}^N \ddot{y}_i(t) \bar{D}_i + {}^t\bar{D}_j \bar{C} \sum_{i=1}^N \dot{y}_i(t) \bar{D}_i + {}^t\bar{D}_j \bar{K} \sum_{i=1}^N y_i(t) \bar{D}_i = {}^t\bar{D}_j \bar{P}(t)$$

Par orthogonalité des vecteurs propres par rapport aux matrices \bar{M} , \bar{K} et \bar{C} , on obtient N équations :

$${}^t\bar{D}_j \bar{M} \bar{D}_j \ddot{y}_i(t) + {}^t\bar{D}_j \bar{C} \bar{D}_j \dot{y}_i(t) + {}^t\bar{D}_j \bar{K} \bar{D}_j y_i(t) = {}^t\bar{D}_j \bar{P}(t)$$

Dynamique des structures

Analyse modale n DDL

Vibrations forcées

Par orthogonalité des vecteurs propres par rapport aux matrices $\bar{\bar{M}}$, $\bar{\bar{K}}$ et $\bar{\bar{C}}$, on obtient N équations :

$${}^t\bar{D}_j \bar{\bar{M}} \bar{D}_j \ddot{y}_i(t) + {}^t\bar{D}_j \bar{\bar{C}} \bar{D}_j \dot{y}_i(t) + {}^t\bar{D}_j \bar{\bar{K}} \bar{D}_j y_i(t) = {}^t\bar{D}_j \bar{P}(t)$$

$$m_j \ddot{y}_i(t) + c_j \dot{y}_i(t) + k_j y_i(t) = p_j$$

On est donc ramené à N équations à 1DDL

Dynamique des structures

Modale spectrale n DDL $\ddot{y}_j(t) + \frac{c_j}{m_j} \dot{y}_j(t) + \frac{k_j}{m_j} y_j(t) = -\ddot{y}_s$

$$\ddot{y}_j(t) + \frac{c_j}{m_j} \dot{y}_j(t) + \frac{k_j}{m_j} y_j(t) = \frac{p_j}{m_j}$$

$$\frac{p_j}{m_j} = \frac{{}^t\bar{D}_j \bar{P}(t)}{m_j} = \frac{{}^t\bar{D}_j (-\bar{M} \bar{\Delta} \ddot{v}_s)}{m_j} = - \frac{{}^t\bar{D}_j \bar{M} \bar{\Delta}}{m_j} \ddot{y}_s = -a_j \ddot{y}_s \quad a_j = \frac{{}^t\bar{D}_j \bar{M} \bar{\Delta}}{m_j}$$

$$\bar{F}_{max,i} = \bar{K} \bar{U}_{max,i} = \bar{K} \quad a_j S_{d,i} \bar{D}_i = \omega^2 \bar{M} a_j S_{d,i} \bar{D}_i = a_j S_{a,i} \bar{M} \bar{D}_i$$

Dynamique des structures

Analyse modale n DDL

Cumul des valeurs
absolues

$$\sum_{i=1}^n |R_i|$$

Combinaison quadratique
SRSS (Square Root of the
Sums of the Squares)

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n R_i^2}$$

Quadratique complète
CQC (Complete
Quadratic Combination)

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{ij} R_i R_j}$$

ρ_{ij} coefficient de corrélation
entre les modes i et j

Application pratique

Modale spectrale nDDL



Dimension des poteaux : 20 cmx 20cm

Hauteur par étage : 3m

Epaisseur de la dalle : 0,2m

Zone 4 – Sol C

Structure appartenant à un établissement scolaire

A – Calcul par analyse modale

1. Représenter le bâtiment sous la forme d'un modèle brochette équivalent
2. Donner les matrices de masse et de raideur
3. Trouver les périodes propres
4. Trouver les vecteurs propres
5. **Donner les efforts sismiques à chaque niveau**

Fin du TD – Efforts dans la structure

Analyse modale	
Modèle brochette	Logiciel calcul de structure
T1=0,41s T2=0,16s	T1=0,49s T2=0,17s T3=0,31s T4=0,10s

Effort tranchant		
Poteau RDC	27 kN	28,5 kN

Dynamique des structures

Méthode des forces latérales

$$T_1 = C_t \cdot H^{3/4} \quad \dots (4.6)$$

où :

C_t est égal à 0,085 dans le cas des portiques spatiaux en acier, à 0,075 dans le cas des portiques spatiaux en béton et pour les triangulations excentrées en acier et à 0,050 pour toutes les autres structures ;

H est la hauteur du bâtiment, en m, depuis les fondations ou le sommet d'un soubassement rigide.

(4) Par ailleurs, la valeur de C_t dans l'expression (4.6) pour les structures avec des murs de contreventement en béton ou en maçonnerie, peut être prise égale à :

$$C_t = 0,075 / \sqrt{A_c} \quad \dots (4.7)$$

où :

$$A_c = \sum \left[A_i \cdot \left(0,2 + \left(l_{wi} / H \right) \right)^2 \right] \quad \dots (4.8)$$

$$F_b = S_d(T_1) \quad F_i = F_b \cdot \frac{z_i \cdot m_i}{\sum_j z_j \cdot m_j}$$

Fin du TD – Rappel des 3 méthodes possibles



Méthode des forces latérales	Analyse modale	
	Modèle brochette	Logiciel calcul de structure
$T_1 = C_t \cdot H^{3/4}$ $F_i = F_b \cdot \frac{s_i \cdot m_i}{\sum s_j \cdot m_j}$		

Fin du TD – Rappel des résultats

Périodes propres de la structure

Méthode des forces latérales	Analyse modale	
	Modèle brochette	Logiciel calcul de structure
T1=0,28s	T1=0,41s T2=0,16s	T1=0,49s T2=0,17s T3=0,31s T4=0,10s

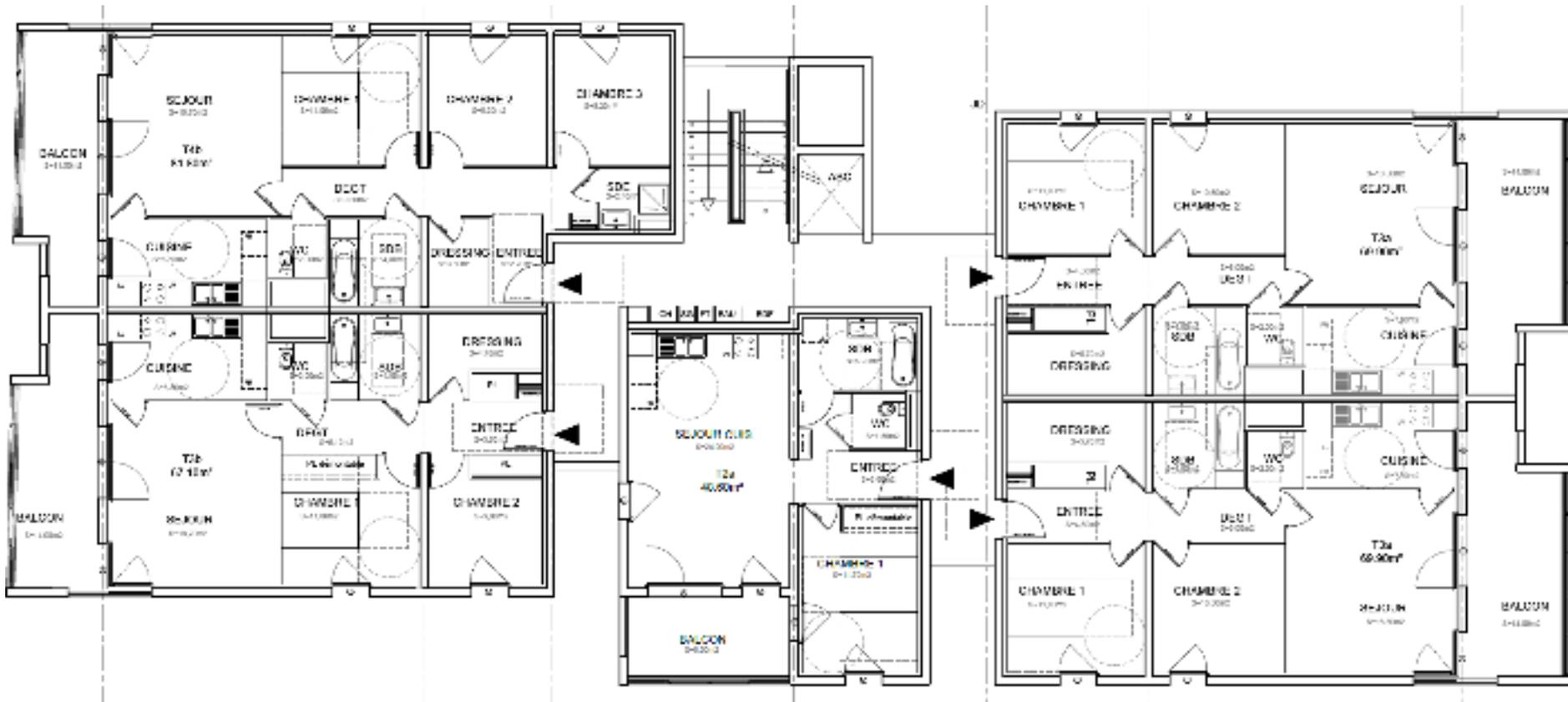
Fin du TD – Efforts dans la structure

Méthode des forces latérales	Analyse modale	
	Modèle brochette	Logiciel calcul de structure
Période T1 : 0,28s Fb = 116 kN F1 = 40 kN F2 = 76 kN	T1=0,41s T2=0,16s	T1=0,49s T2=0,17s T3=0,31s T4=0,10s

	Effort tranchant		
Poteau RDC	29 kN	27 kN	28,5 kN

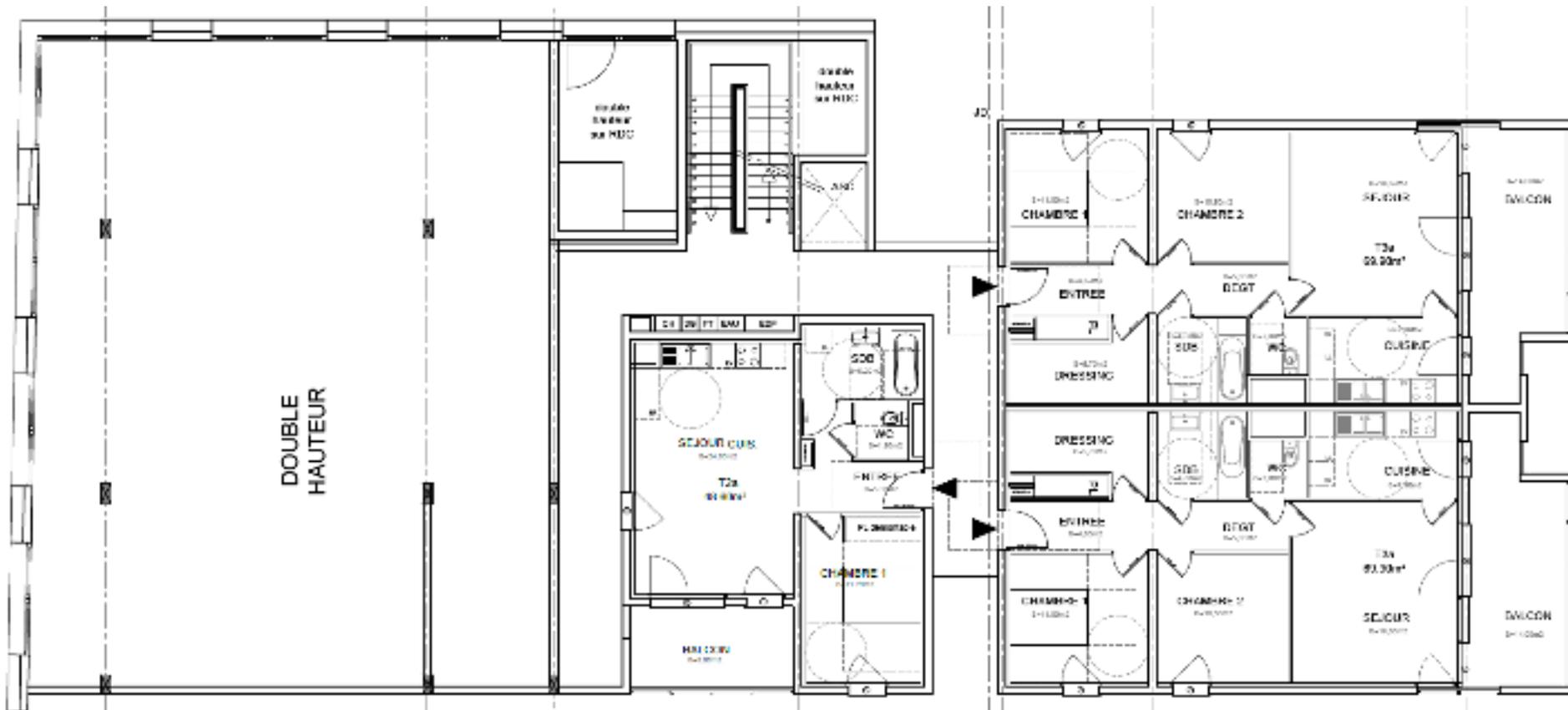
Dynamique des structures

Projet concret



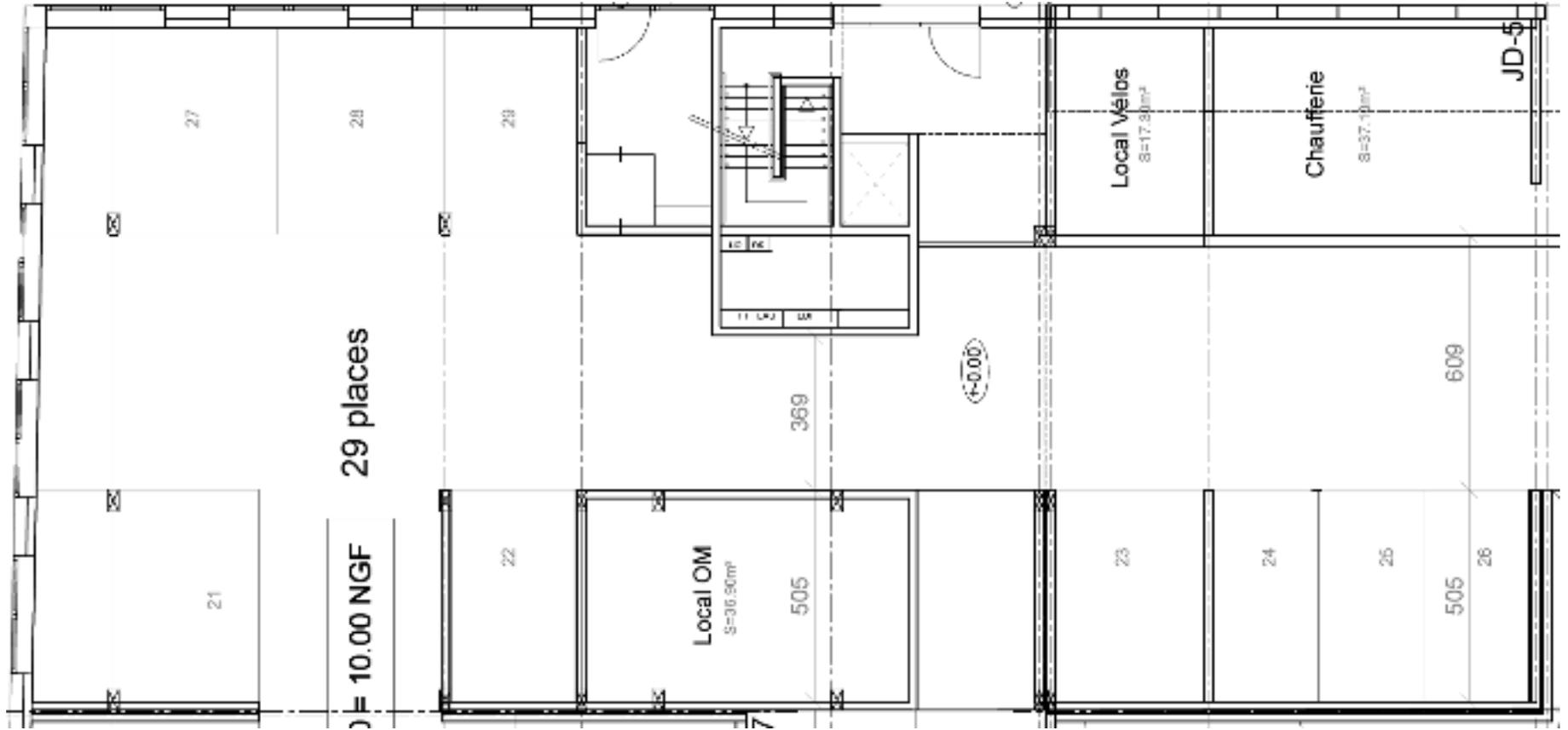
Dynamique des structures

Projet concret



Dynamique des structures

Projet concret



Dynamique des structures

Projet concret

Eurocode EN1998-1 §5 Règles particulières pour les bâtiments en béton

5.4.1.2.5 *Règles particulières pour les poutres supportant des éléments verticaux discontinus*

(1)P Les murs structuraux ne doivent pas être supportés (en totalité ou en partie) par des poutres ou dalles.

Dynamique des structures

Projet concret

Eurocode EN1998-1 §5 Règles particulières pour les bâtiments en béton

5.4.1.2.5 *Règles particulières pour les poutres supportant des éléments verticaux discontinus*

(1)P Les murs structuraux ne doivent pas être supportés (en totalité ou en partie) par des poutres ou dalles.

Deux possibilités :

- **Murs considérés comme secondaire** : mur porteur ne faisant pas partie du système de contreventement. La rigidité de ces éléments et leur résistance doit être négligées vis-à-vis de l'action sismique.

La contribution des éléments secondaires à la raideur de la structure doit être au plus de 15%

- **Murs non structuraux** : Murs non porteurs

Dynamique des structures

Projet concret

Notions de murs primaires et murs secondaires

Éléments primaires
Éléments verticaux porteurs faisant partie du système de contreventement. Les murs de contreventement sont destinés à reprendre les actions sismiques.

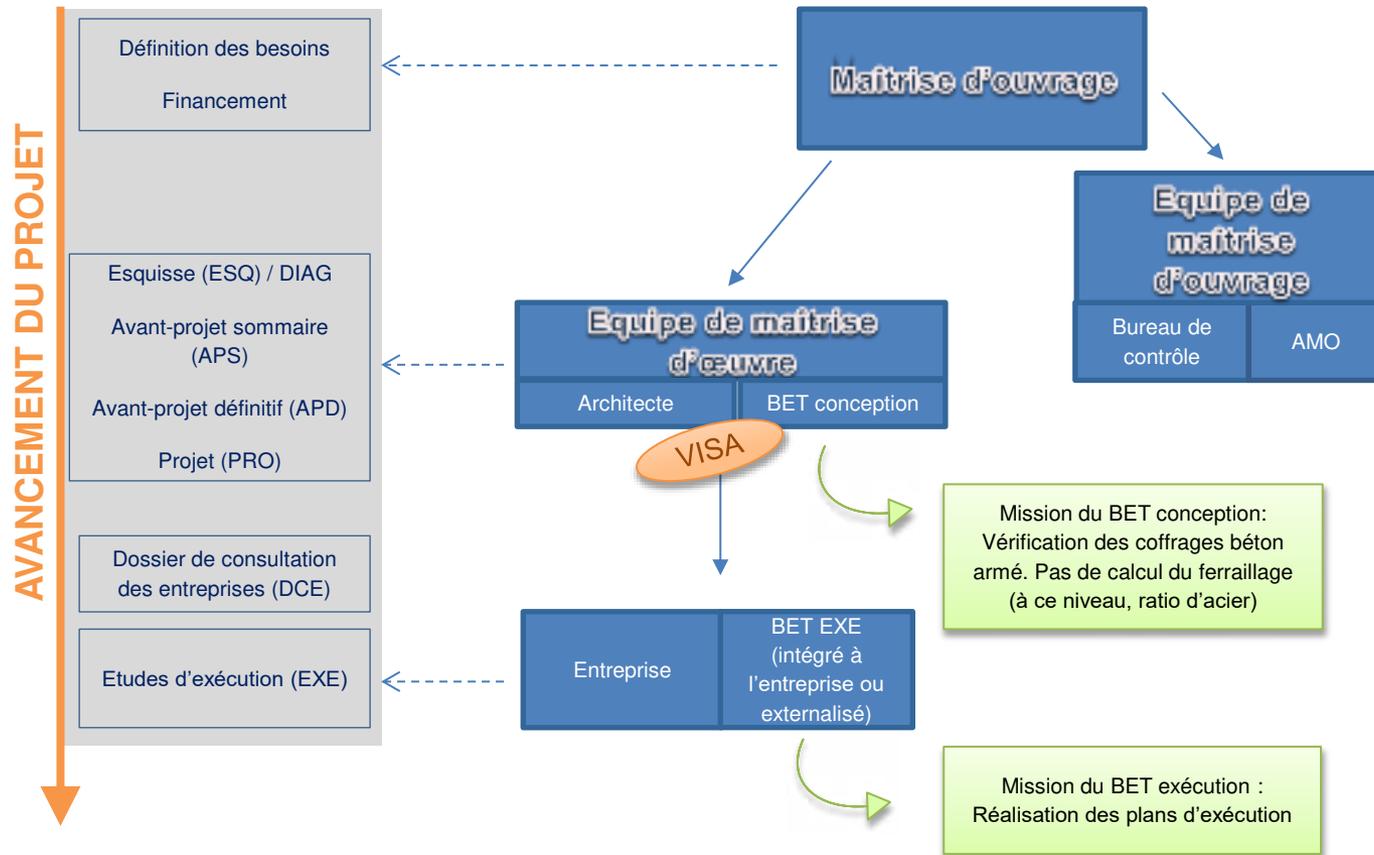
Éléments secondaires
Éléments porteurs ne faisant pas partie du système de contreventement. Les murs secondaires sont destinés à reprendre la descente de charge et tous les efforts liés aux actions autre que sismique.

Éléments non structuraux
Murs non porteurs ne participant pas à la stabilité de la construction



Conception parasismique

Principe n°0 : un architecte et un ingénieur qui coopèrent!



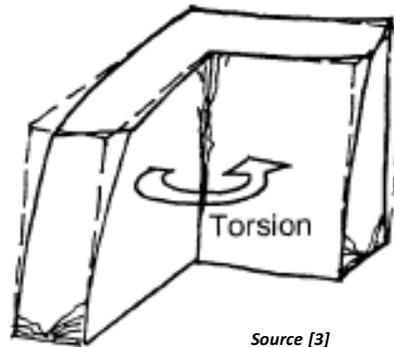
Conception parasismique

Principe n°1 : régularité en plan

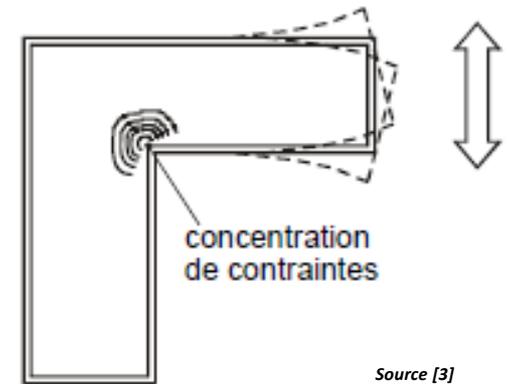
Choisir de formes régulières en plan pour limiter les zones de concentration de contraintes



Formes à éviter



Source [3]



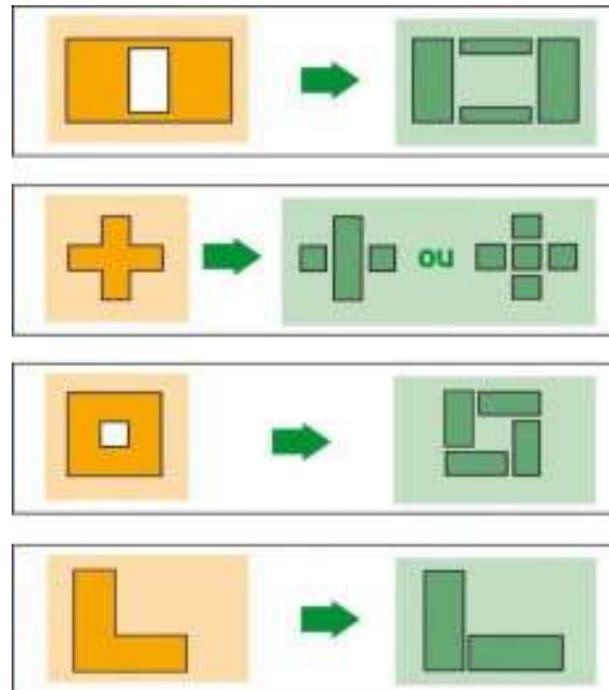
Source [3]

Exemple de concentration de contraintes

Conception parasismique

Principe n°1 : régularité en plan

Création de plusieurs blocs de bâtiment séparés par un joint sismique



Conception parasismique

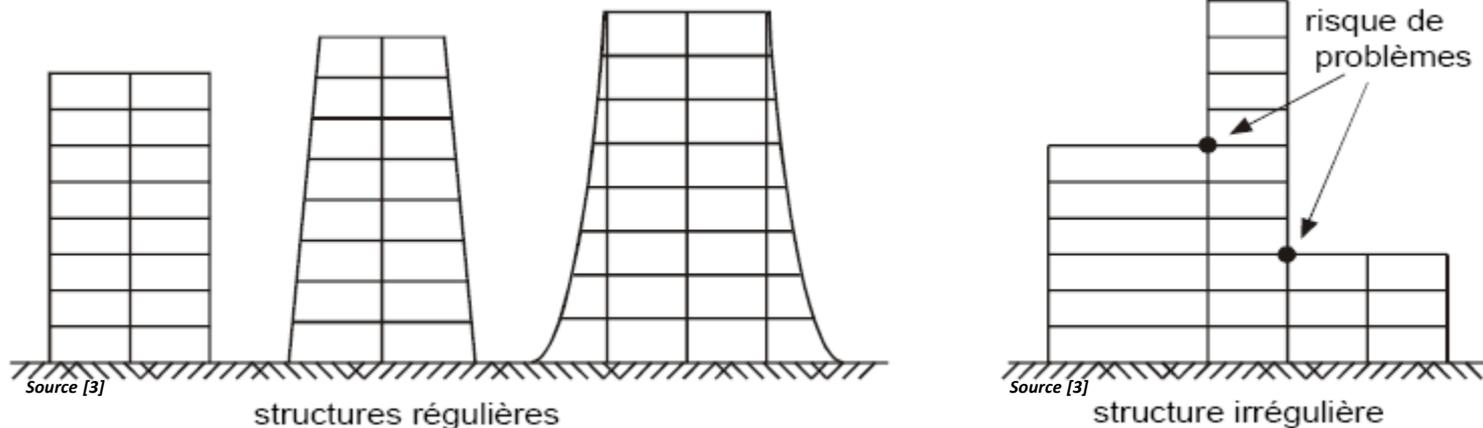
Principe n°1 : régularité en plan



Conception parasismique

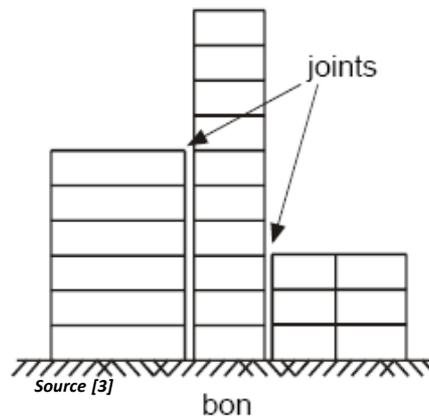
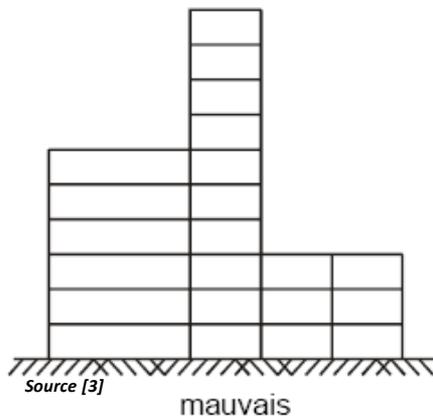
Principe n°2 : régularité en élévation

Eviter les différences de niveau pour un même bâtiment



Conception parasismique

Principe n°2 : régularité en élévation

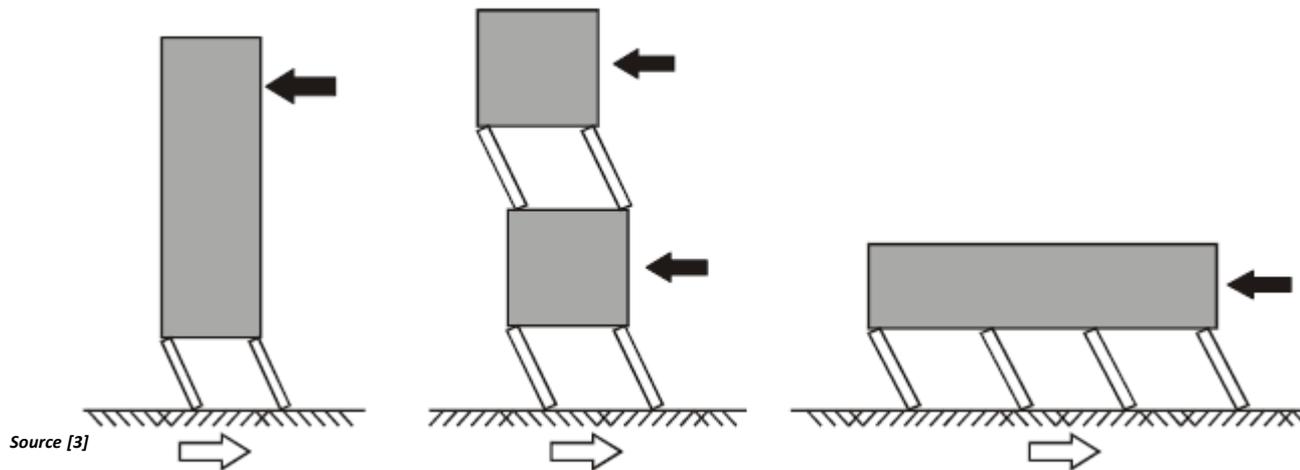


Création de plusieurs blocs de bâtiment séparés par un joint sismique

Conception parasismique

Principe n°2 : régularité en élévation

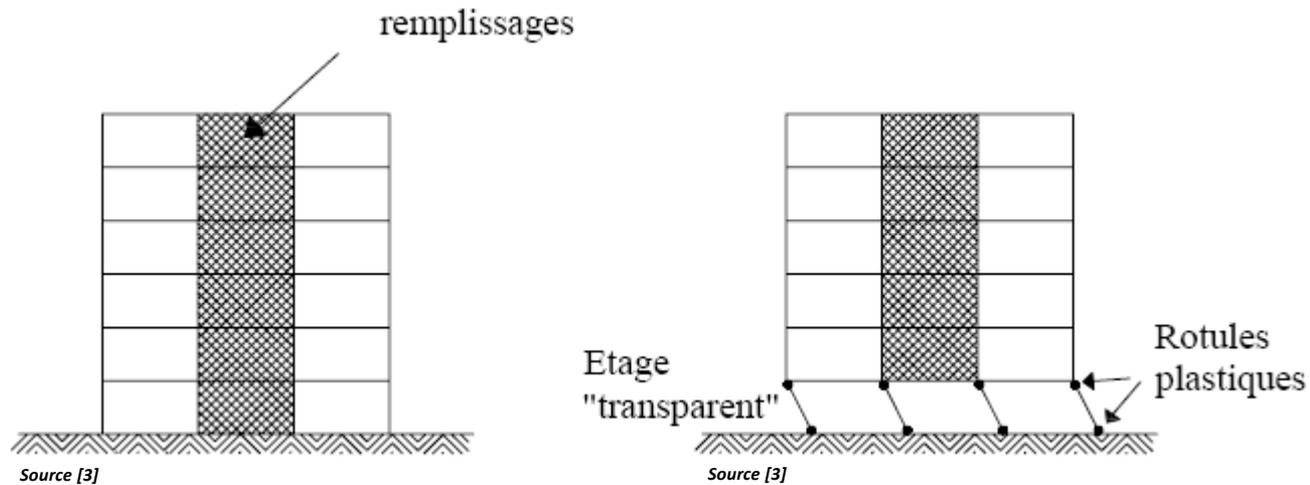
Eviter les niveaux transparents – variations brutales de rigidité



Conception parasismique

Principe n°2 : régularité en élévation

RDC transparent



Conception parasismique

Principe n°2 : régularité en élévation

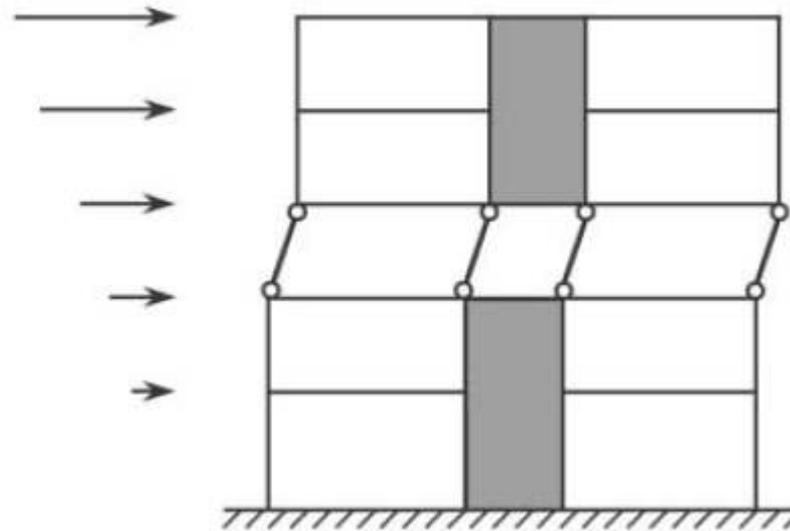
RDC transparent



Conception parasismique

Principe n°2 : régularité en élévation

Variation brutales de rigidité entre étages



Source [3]

Conception parasismique

Principe n°2 : régularité en élévation



Séisme de Kobé, 1995

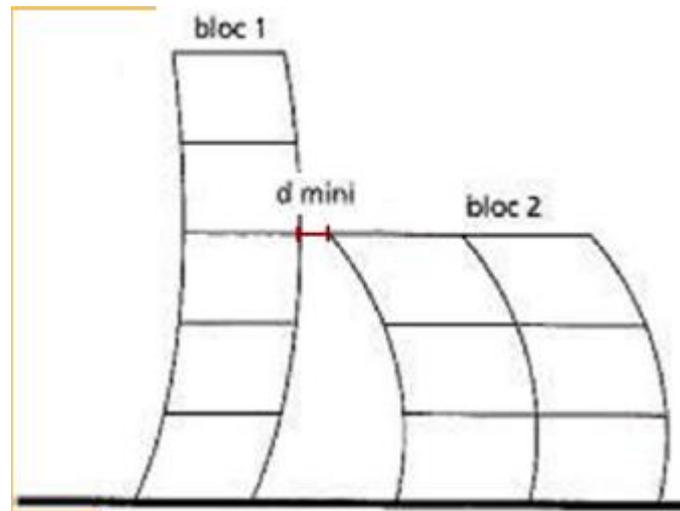
Conception parasismique

Principe n°2 : régularité en élévation



Conception parasismique

**Principe n°3 : largeur de joints suffisante
Risque d'entrechoquement**



Conception parasismique

**Principe n°3 : largeur de joints suffisante
Risque d'entrechoquement**



Conception parasismique

Principe n°4 : éviter les poteaux courts

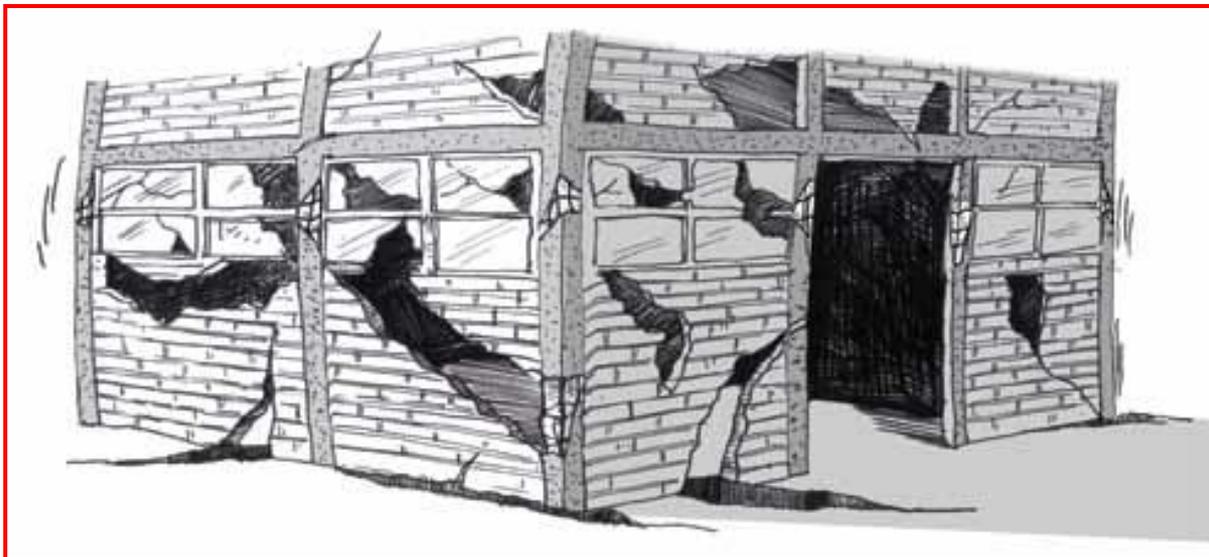
Poteaux dont le rapport de l'élançement sur la section est trop faible.



Conception parasismique

Principe n°4 : éviter les poteaux courts

Poteaux dont le rapport de l'élançement sur la section est trop faible.



Conception parasismique

Principe n°4 : éviter les poteaux courts

Poteaux dont le rapport de l'élançement sur la section est trop faible.



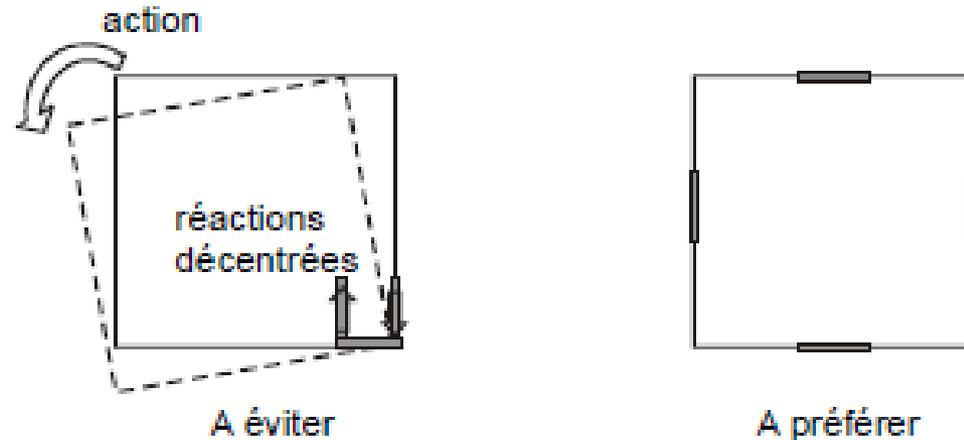
Séisme Antilles, 2007



Séisme d'Athènes, 1999

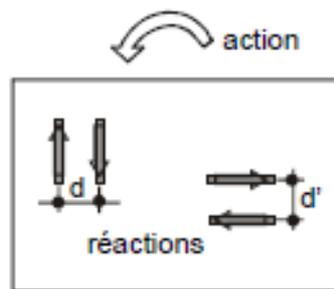
Conception parasismique

Principe n°5 : Eviter les phénomènes de torsion



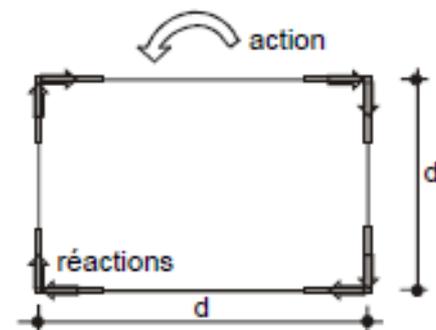
Conception parasismique

Principe n°6 : positionnement des murs pour la reprise de la torsion



petits bras de levier

A éviter



grands bras de levier

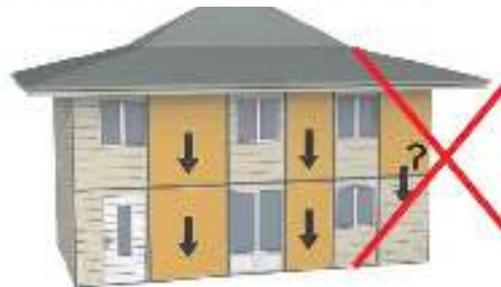
A préférer

Conception parasismique

Principe n°7 : continuité des murs jusqu'aux fondations



Continuité des panneaux de contreventement

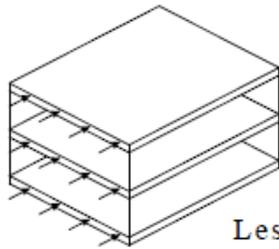


Mur de contreventement d'étage non fondé

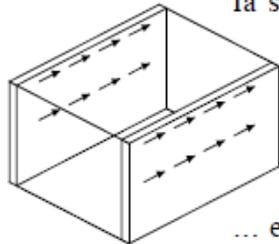


Absence de transmission directe des efforts

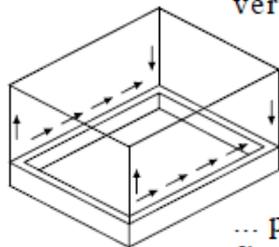
Dimensionnement parasismique



Les forces sont collectées par la structure horizontale,...



... et distribuées au système vertical d'ancrage,...

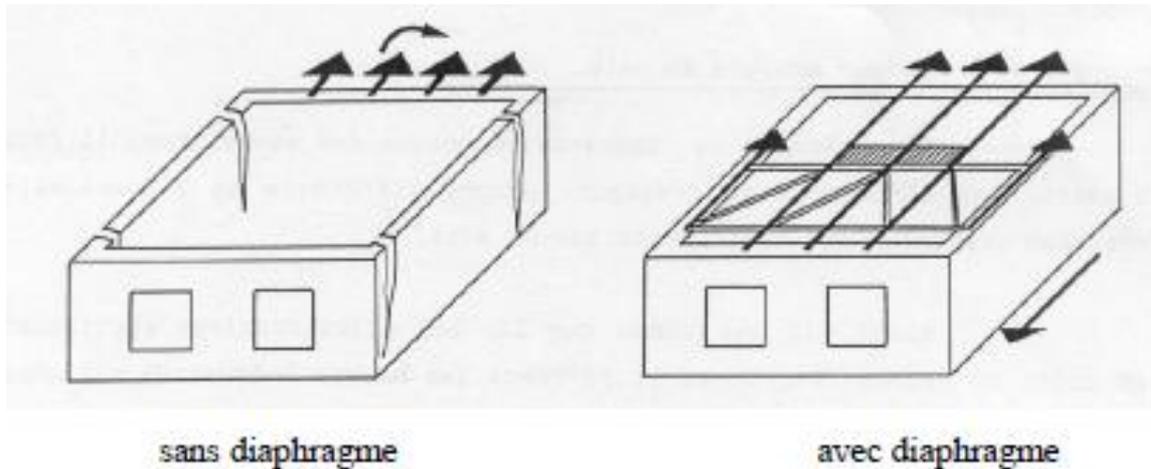


... pour être transmises finalement aux fondations.

Quels sont les grands principes à respecter pour concevoir un bâtiment pouvant reprendre les efforts sismiques?

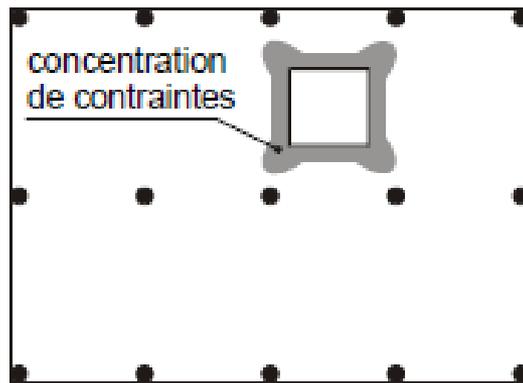
Dimensionnement parasismique

Principe n°1: Efficacité des diaphragmes

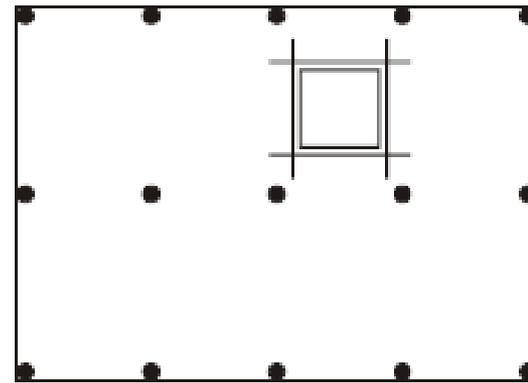


Dimensionnement parasismique

Principe n°1 : Efficacité des diaphragmes



trémie



amatures de renforcement
en périphérie de la trémie

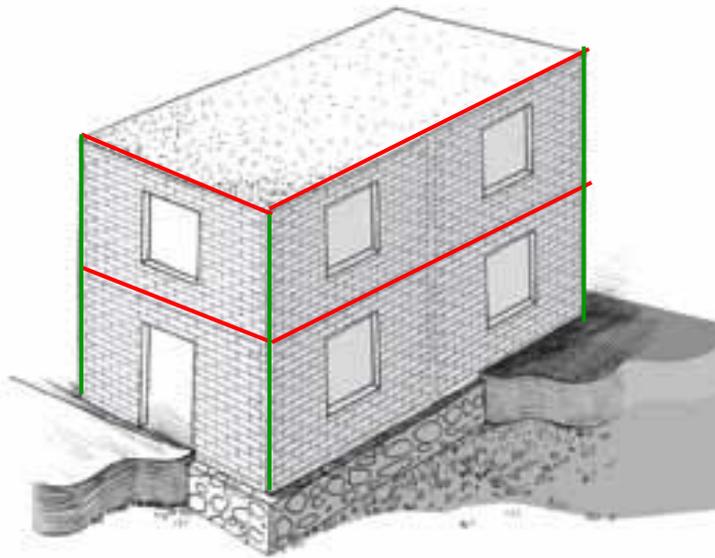
Dimensionnement parasismique

Principe n°2 : Chainages de la structure

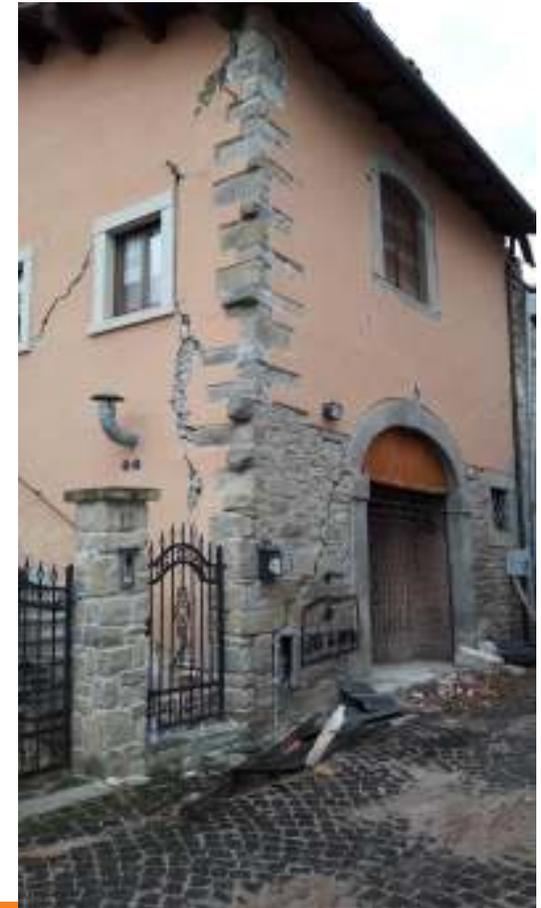


Dimensionnement parasismique

Principe n°2 : Chainages de la structure



Dimensionnement parasismique



FSP – Prise en compte du risque sismique

Dimensionnement parasismique



Avant
séisme

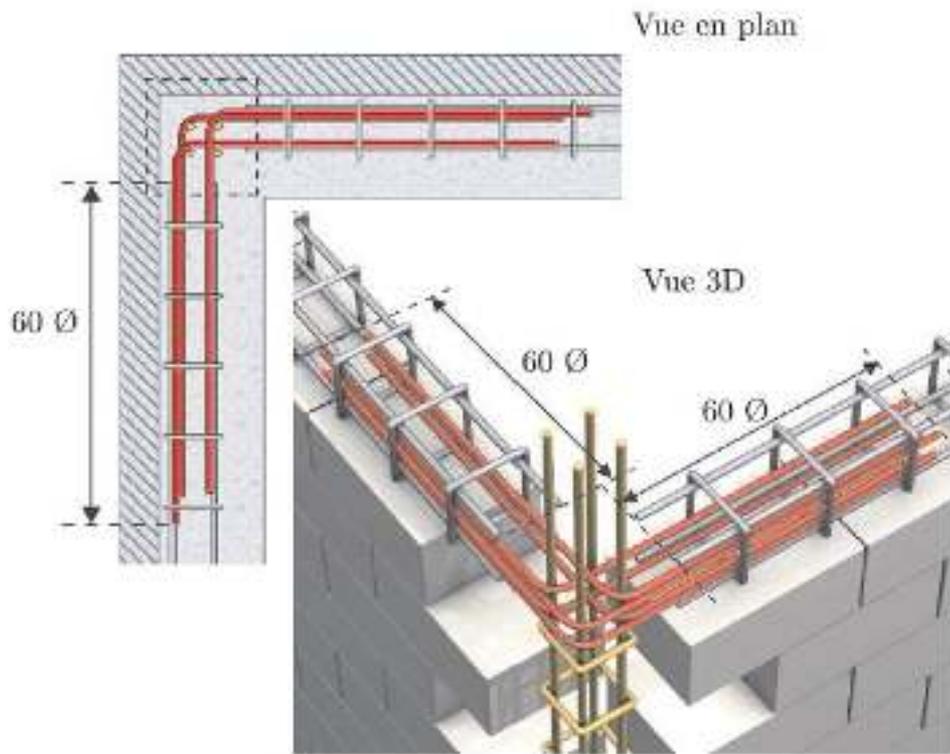
Après séisme



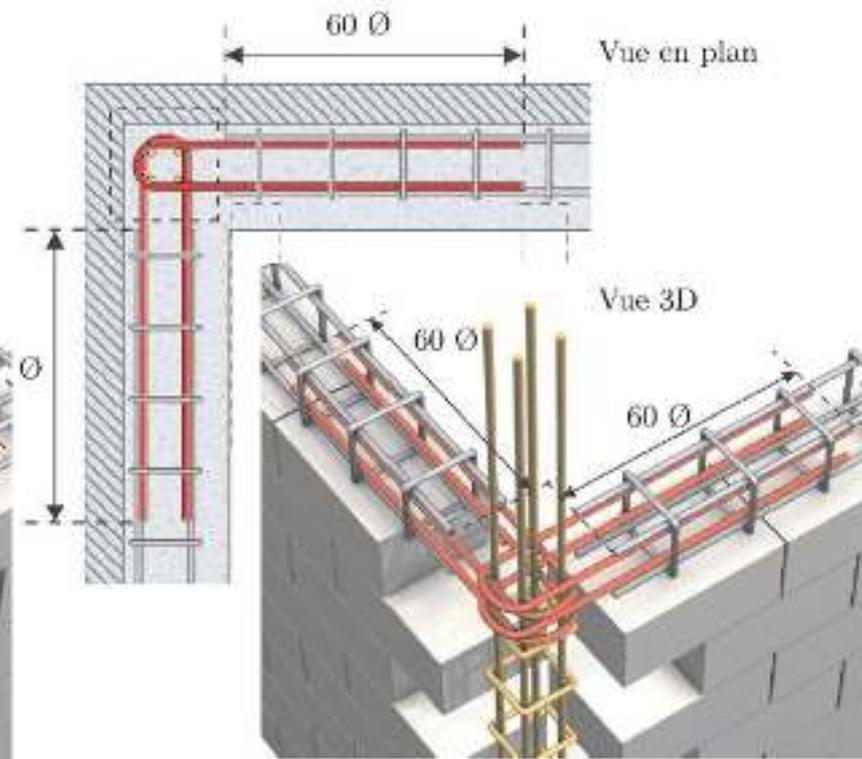
Dimensionnement parasismique

Dispositions constructives – continuité des chaînages horizontaux

Liaison en angle avec équerres

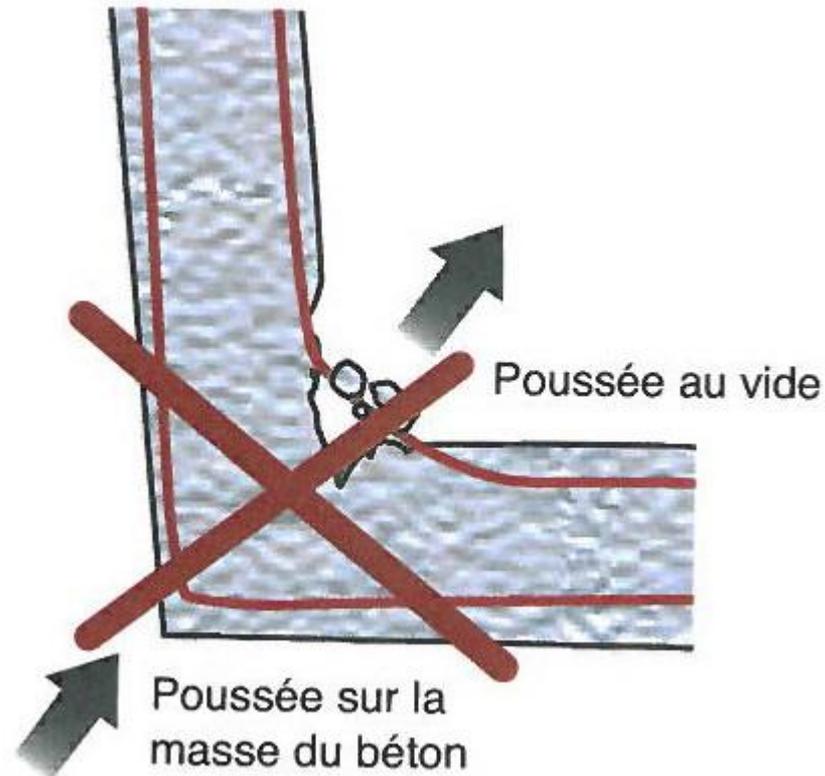


Liaison en angle avec boucles



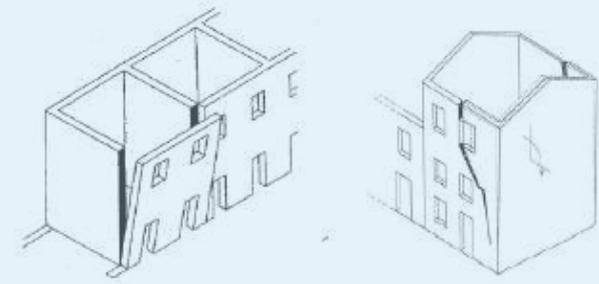
Dimensionnement parasismique

Dispositions constructives – continuité des chaînages horizontaux



Dimensionnement parasismique

Sollicitation hors plan



Avant séisme

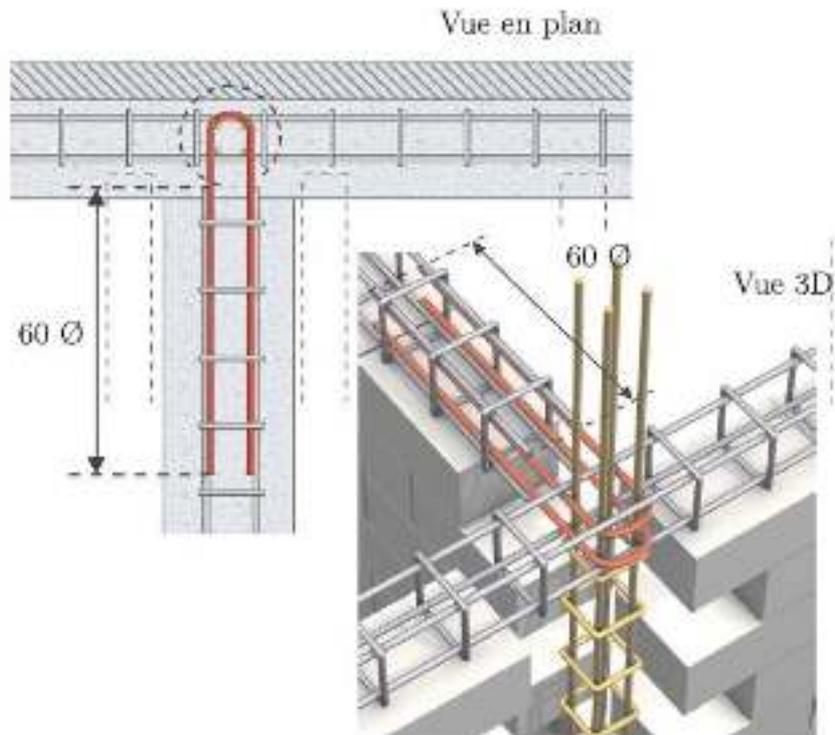


Après séisme

Dimensionnement parasismique

Dispositions constructives – continuité des chaînages horizontaux

Liaison en partie courante avec boucles

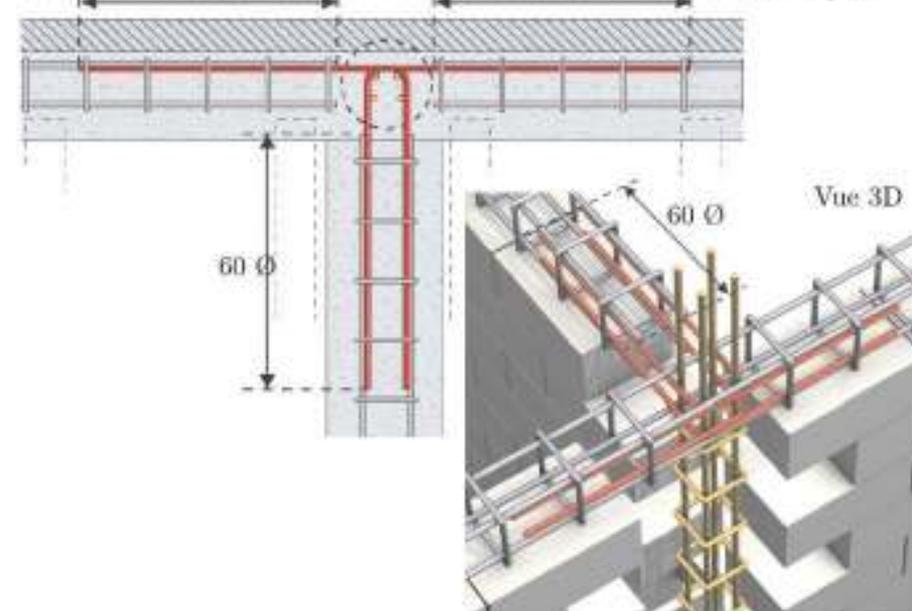


Liaison en partie courante avec équerres

60 Ø

60 Ø

Vue en plan



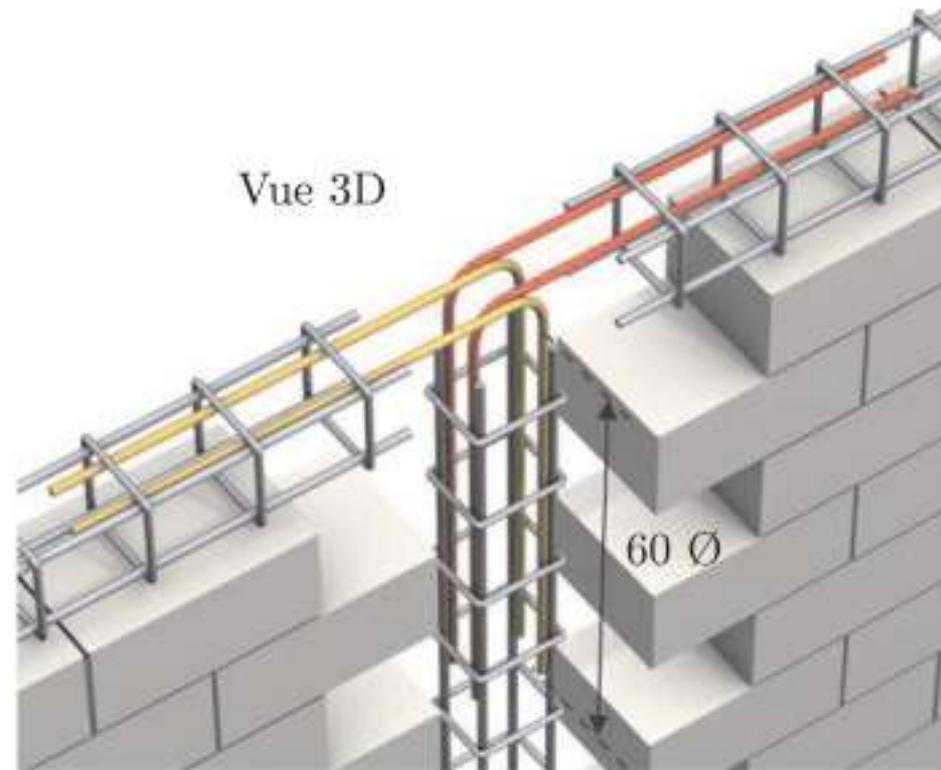
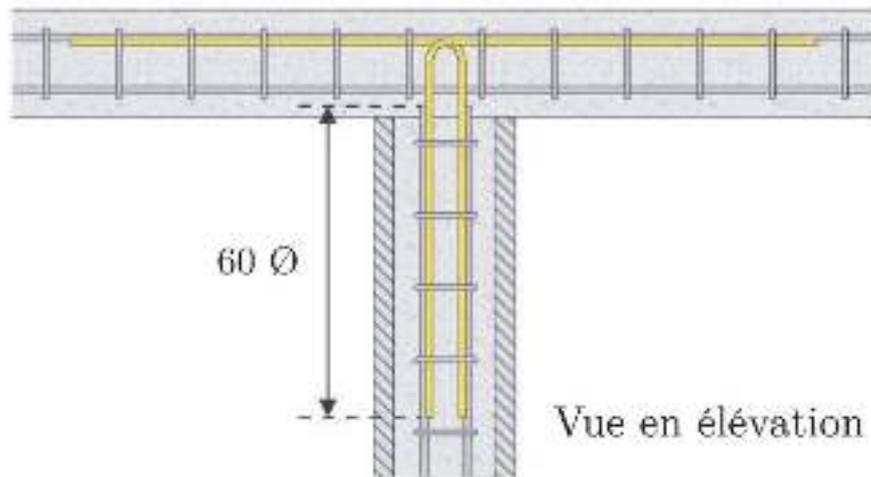
Dimensionnement parasismique

Toiture



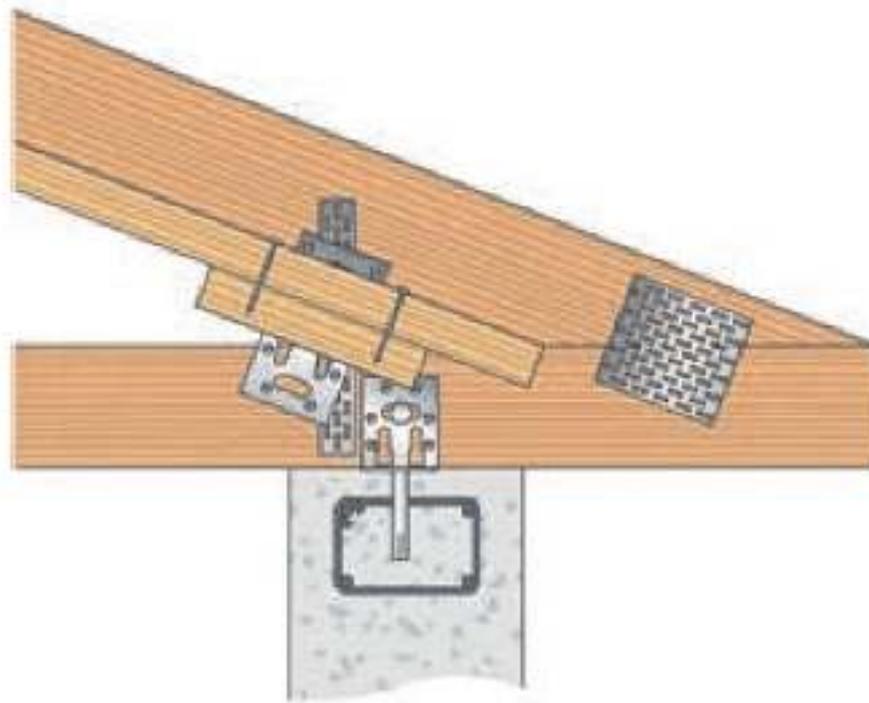
Dimensionnement parasismique

Toiture



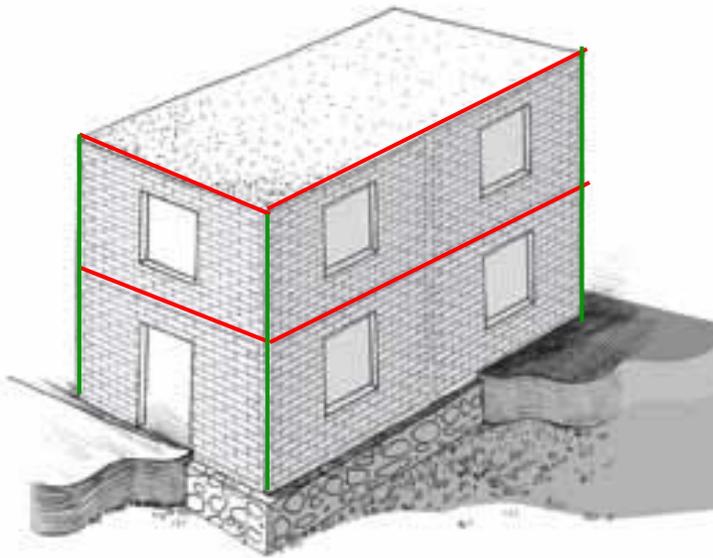
Dimensionnement parasismique

Toiture



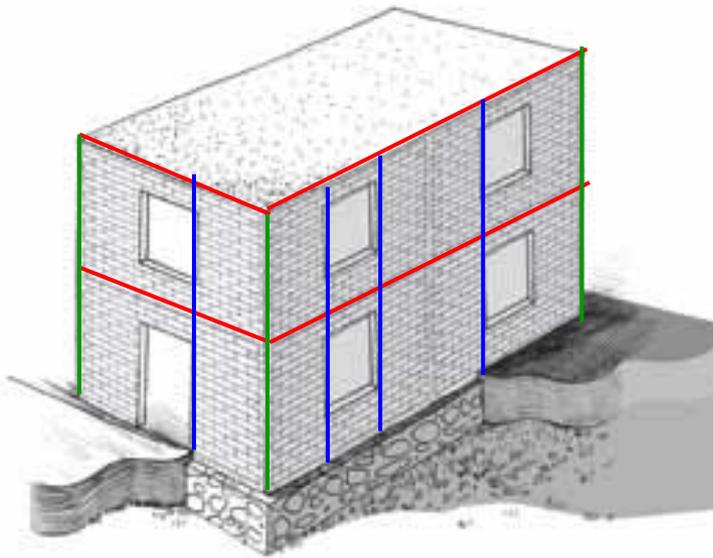
Dimensionnement parasismique

Principe n°2 : Chainages de la structure



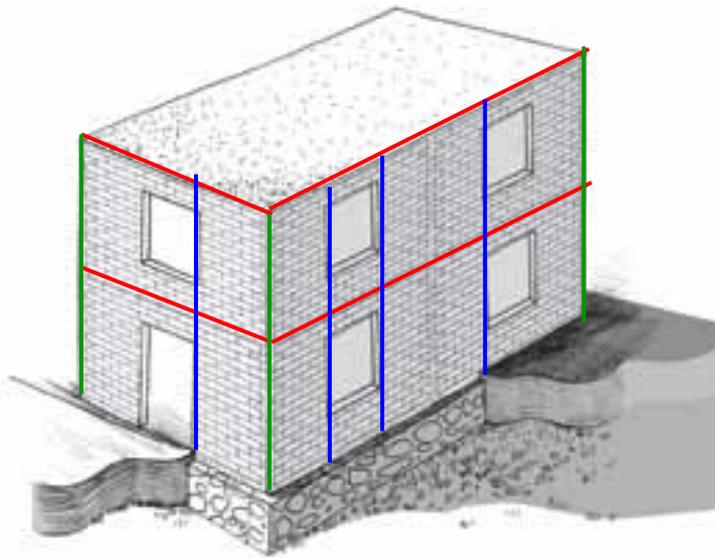
Dimensionnement parasismique

Principe n°3 : Panneaux de contreventement



Dimensionnement parasismique

Principe n°3 : Panneaux de contreventement



Murs primaires/ murs secondaires

Répartition des efforts dans les murs primaires

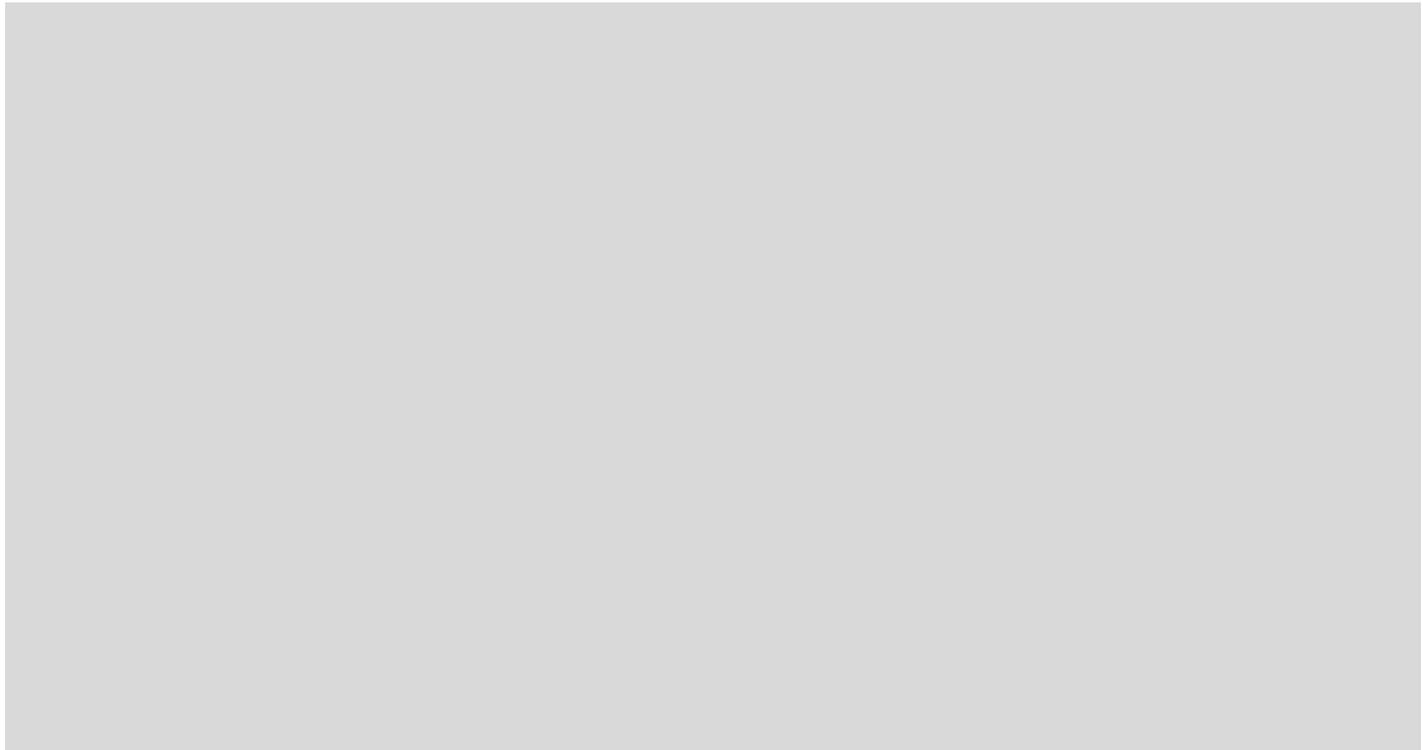
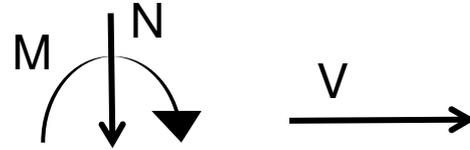
Dimensionnement parasismique

Sollicitation dans le plan

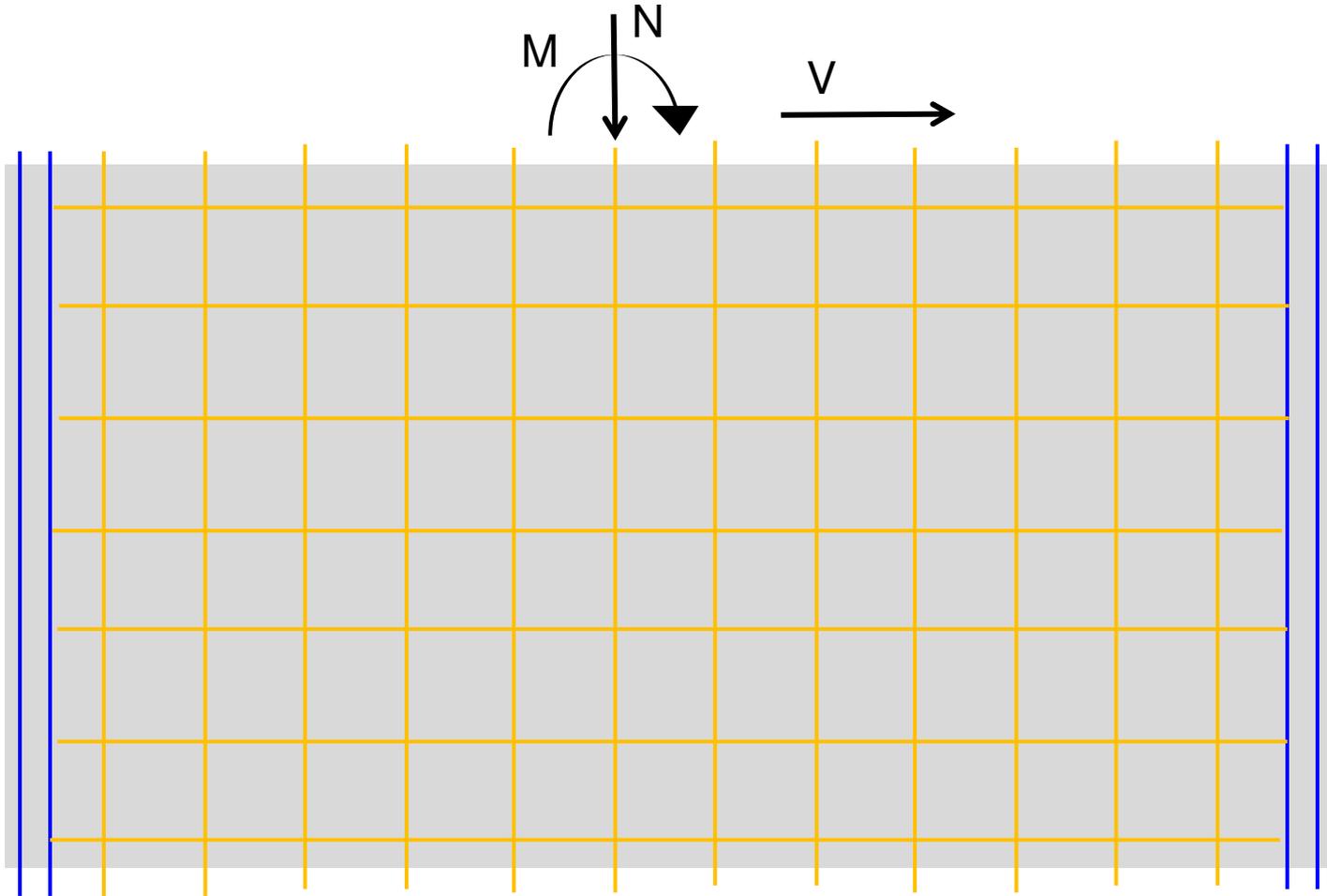


FSP – Prise en compte du risque sismique

Dimensionnement mur primaire

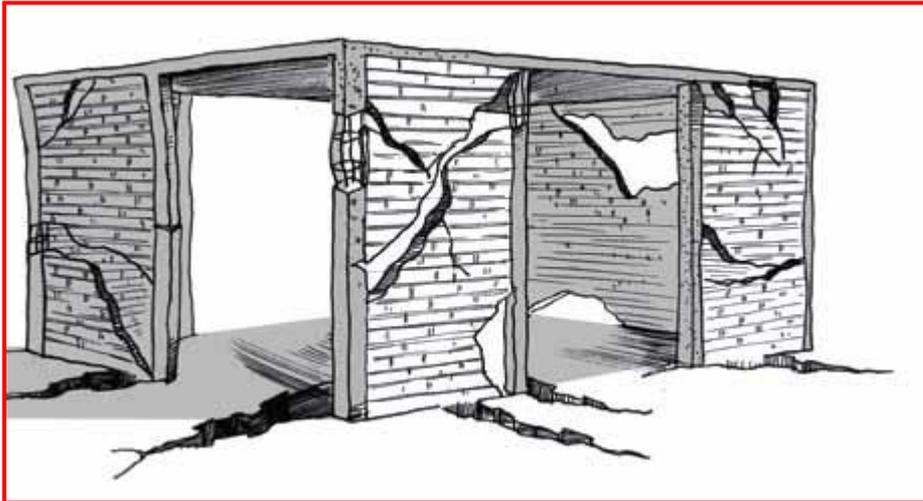


Mur en béton armé



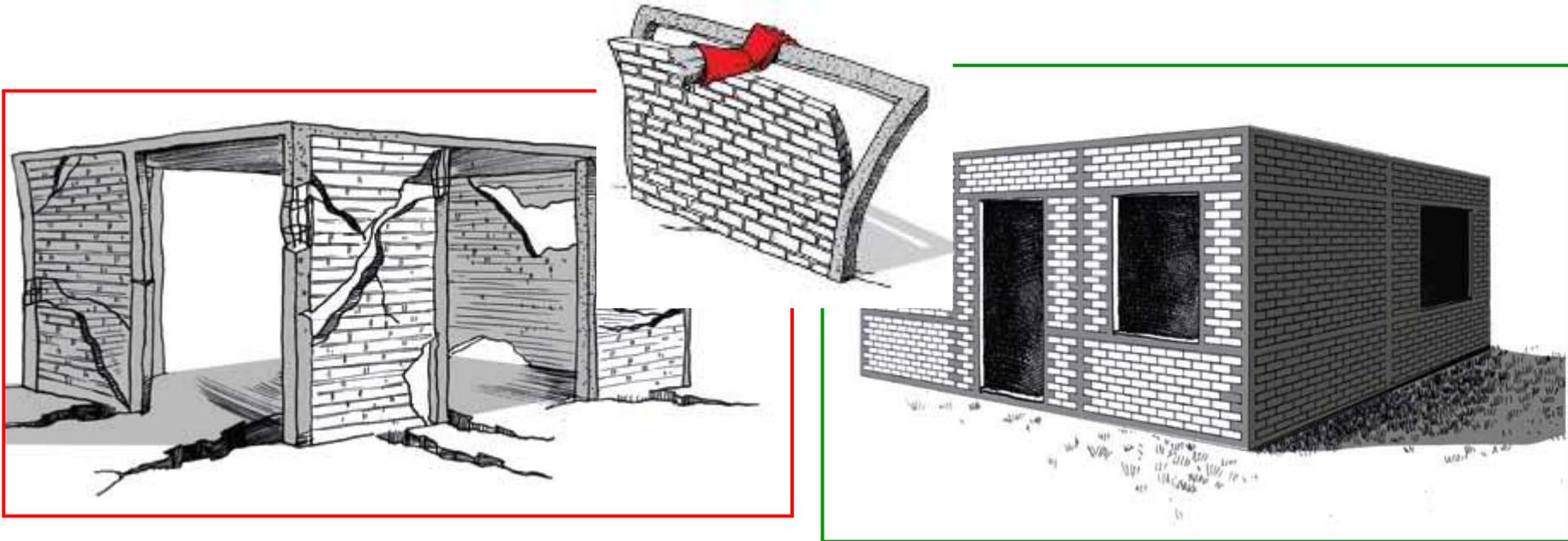
Maçonnerie chaînée

Maçonnerie chaînée coulée à l'italienne



Maçonnerie chaînée

Maçonnerie chaînée coulée à l'italienne

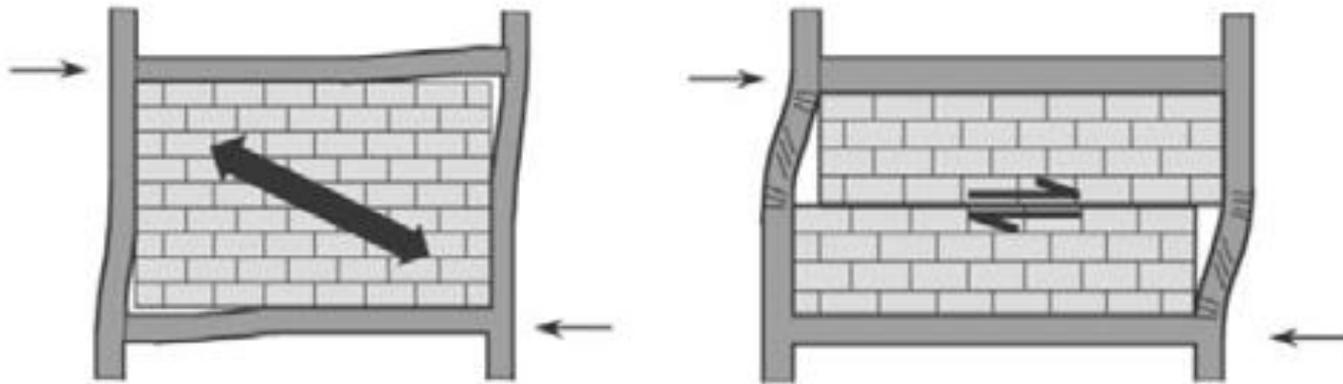


Portique avec remplissage



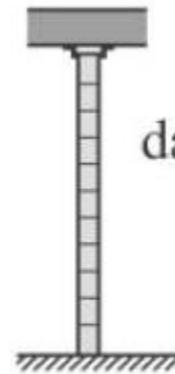
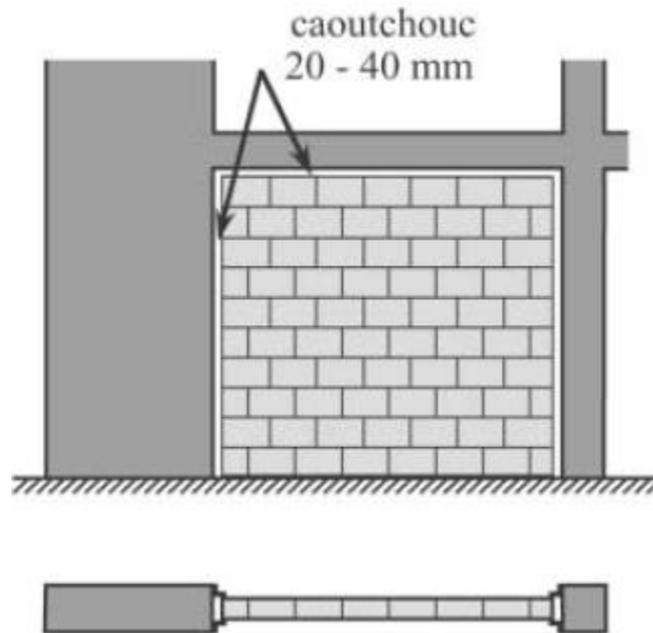
Séisme Amatrice (Italie), août 2016

Portique avec remplissage



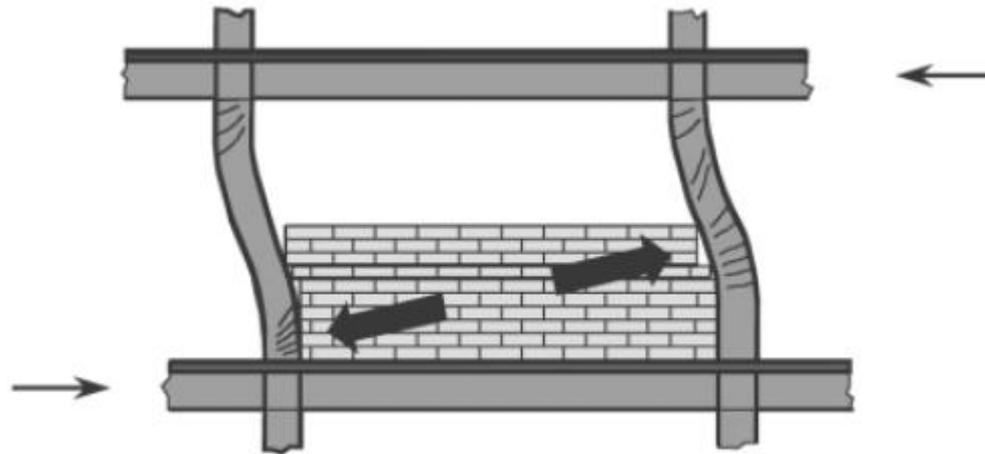
Bielle de compression dans les remplissage

Portique avec remplissage



Séparer les
parois en maçonnerie
dans les bâtiments stabilisés
par des refends
par des joints et les
assurer contre les
accélérations transversales!

Portique avec remplissage

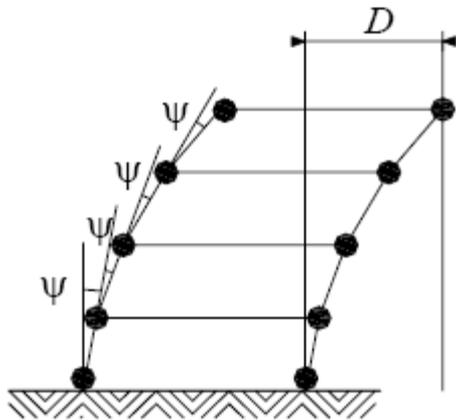


Éviter les remplissage partiel => effet de poteau court

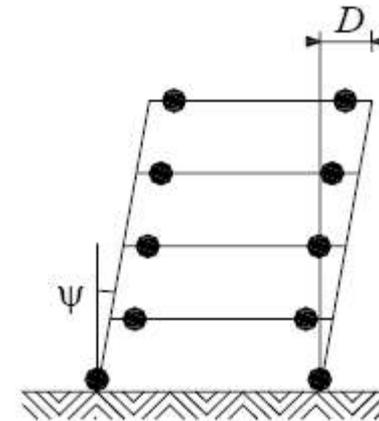
Portique avec remplissage



Portique avec remplissage

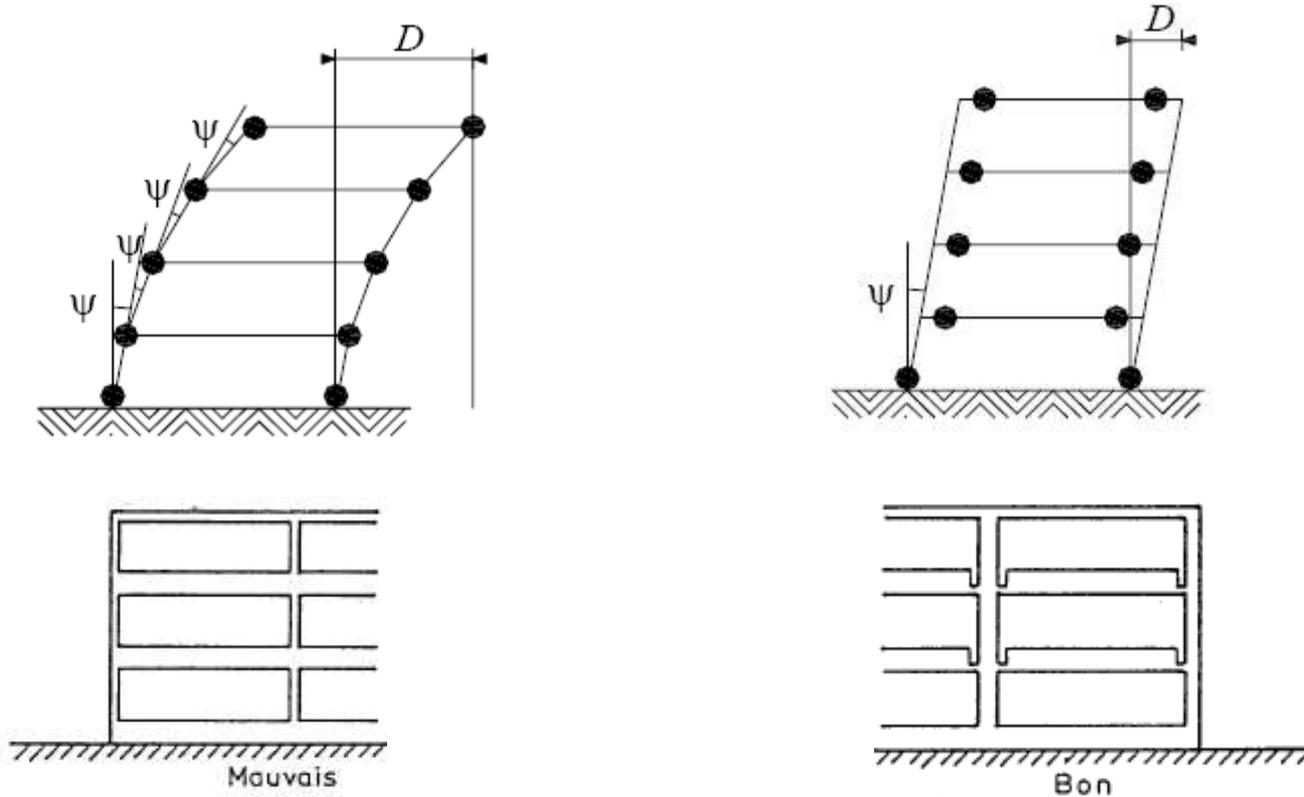


La création de rotules plastiques au niveau des nœuds ou des poteaux entraînent généralement l'effondrement du bâtiment



Des planchers et des poutres mêmes fortement endommagés peuvent rester suspendus par les armatures

Portique avec remplissage



Conception poteau fort – poutre faible

Dimensionnement parasismique

Principe n°4 : Murs secondaires

Vérification de la capacité des murs secondaires à reprendre les efforts malgré le déplacement imposé par le séisme

Dimensionnement parasismique

Principe n°5 : Fixation des éléments non structuraux et des équipements



Éléments non structuraux:

- Façades légères et lourds
- Revêtement attachés ou collés
- Cloisons
- Plafonds suspendus
- Couverture
- Souches de cheminées



Exemple de revêtement en pierres attachées

Dimensionnement parasismique

Principe n°5 : Fixation des éléments non structuraux et des équipements



*Déplacement/chute du mobilier suite au séisme de novembre 2007 aux Antilles
Centre hospitalier à la Trinité (Martinique)*



*Structure porteuse non effondrée mais chute des
panneaux de façade
Bâtiment à Kobe (Japon) en 1995*

Dimensionnement parasismique

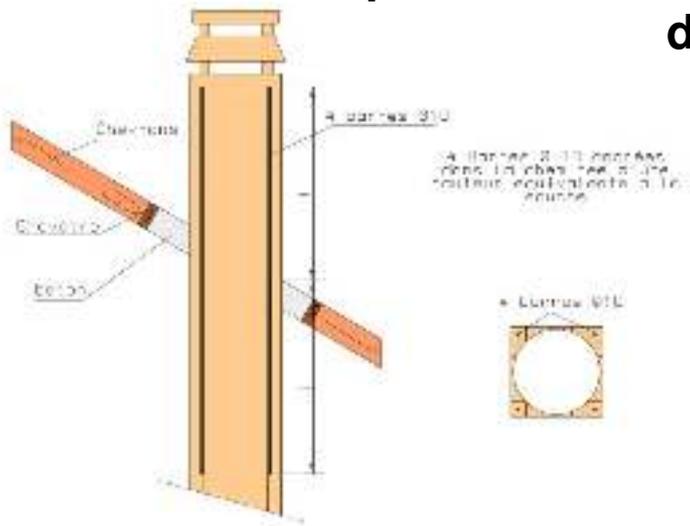
Principe n°5 : Fixation des éléments non structuraux et des équipements



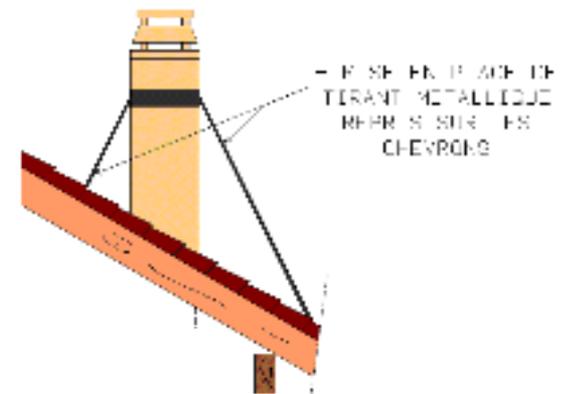
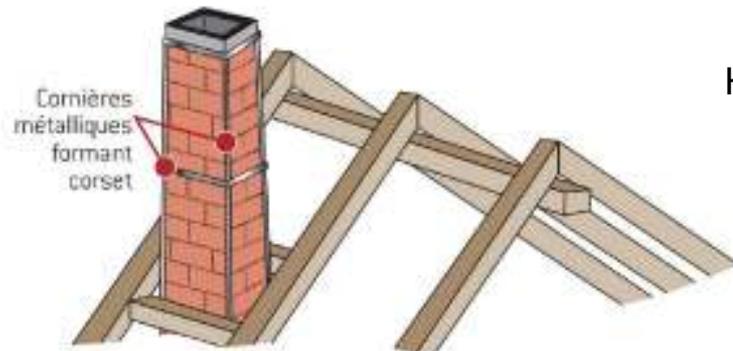
Séisme Amatrice (Italie) en 2016 – immeuble dans Amatrice

Dimensionnement parasismique

Principe n°5 : Fixation des éléments non structuraux et des équipements



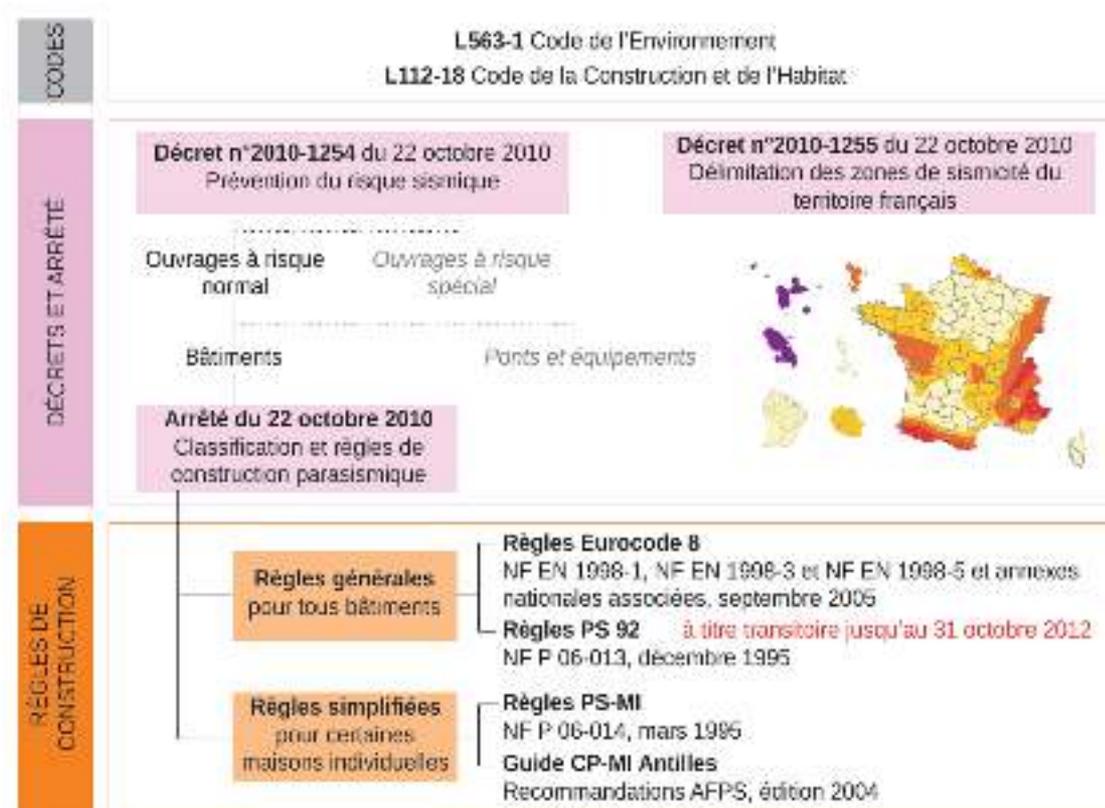
Prolongement du conduit maçonné à l'intérieur du bâtiment



Haubanage de la cheminée (solution adaptée à l'existant)

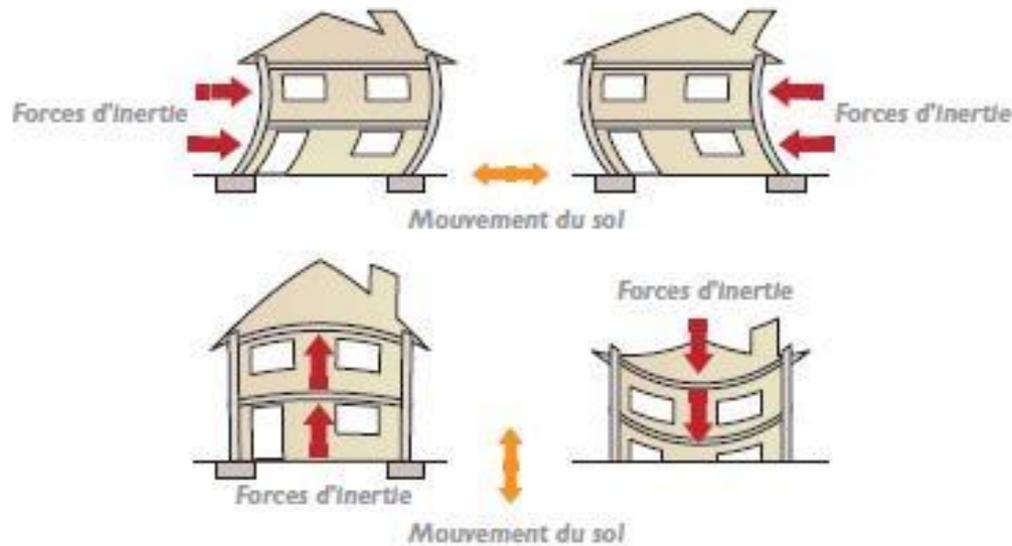
Risque sismique

Quel risque? Aléa ? Vulnérabilité? Enjeux?



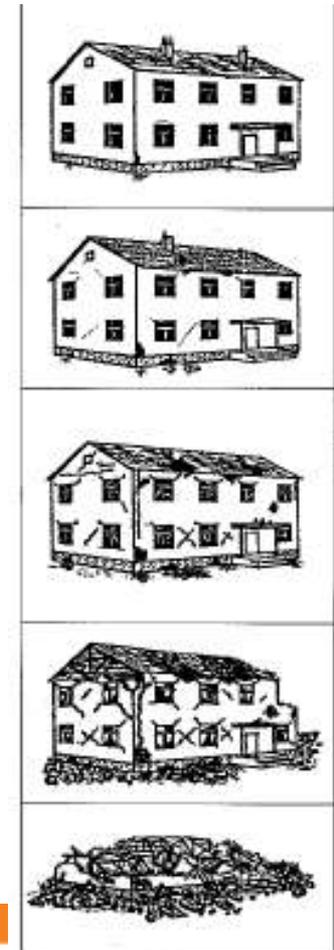
Risque sismique

Quel risque? Aléa ? Vulnérabilité? Enjeux?



Quel mouvement de sol?

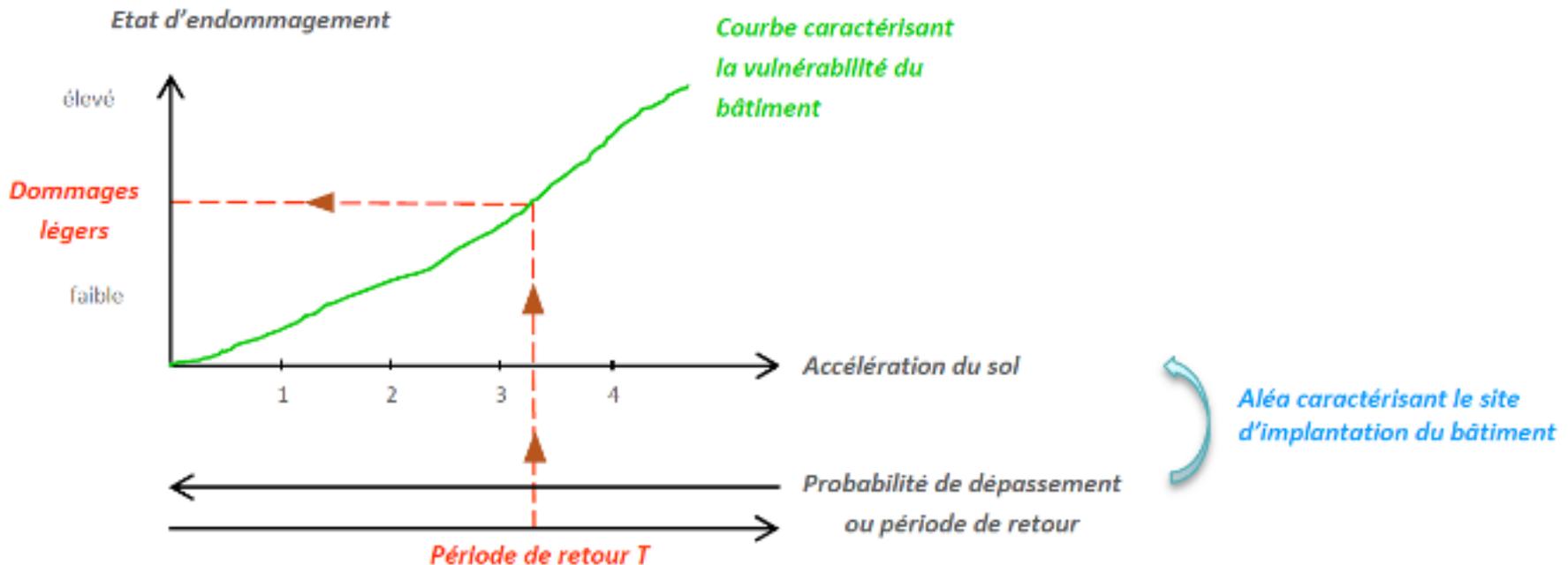
Quel dégâts?



Risque sismique

Quel risque? Aléa ? Vulnérabilité? Enjeux?

$$\text{Risque} = \text{aléa} \times \text{vulnérabilité}$$



Aléa sismique

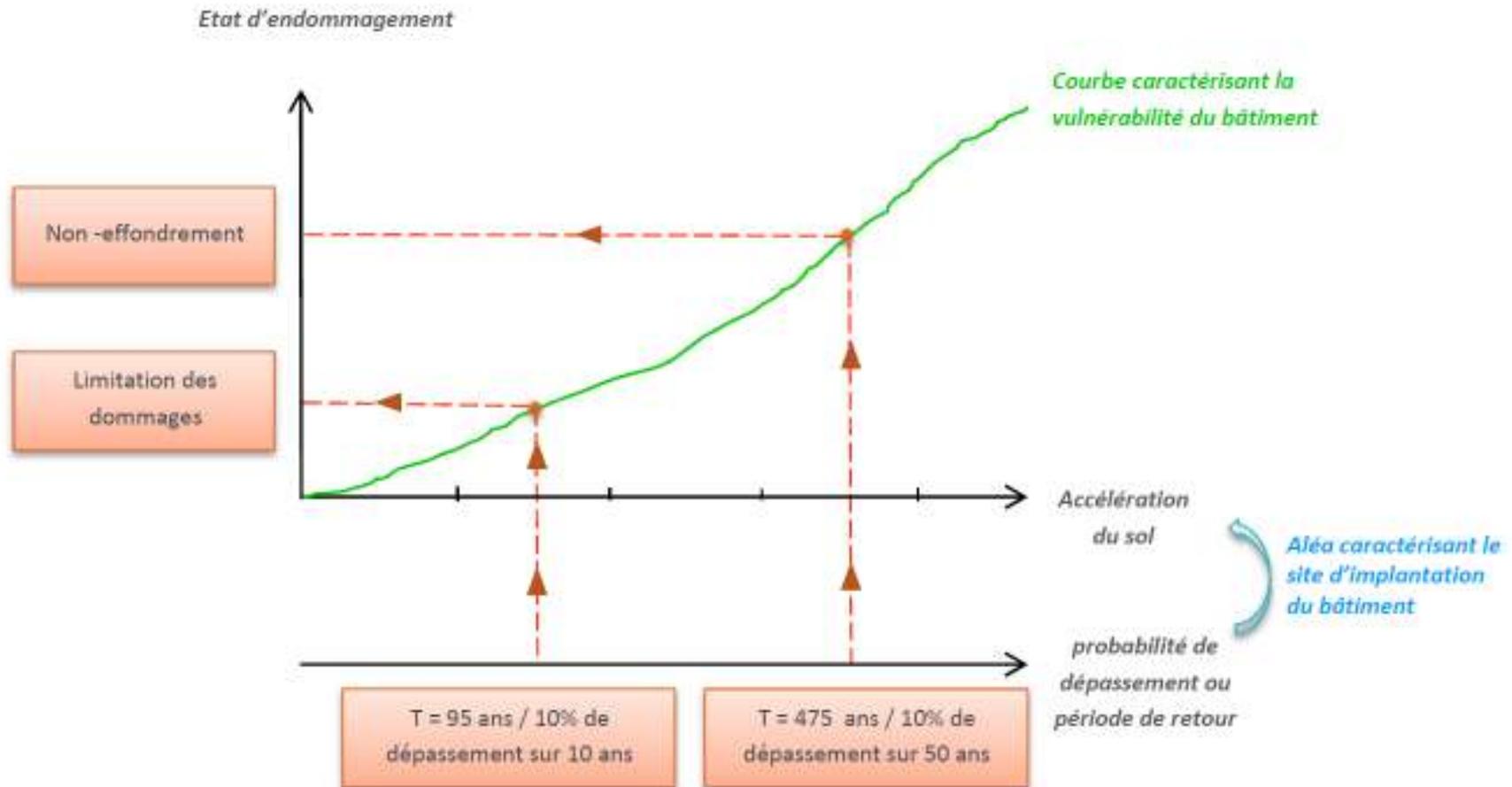
Quel risque? Aléa ? Vulnérabilité? Enjeux?



$$P(a_g > a_{gr}) = 1 - e^{-\frac{D}{T}}$$

Risque sismique

Quel risque? Aléa ? Vulnérabilité? Enjeux?



Renforcement de bâtiments

Dans quels cas renforcer un bâtiment vis-à-vis du risque sismique est obligatoire?

Renforcement de bâtiments

Dans quels cas renforcer un bâtiment vis-à-vis du risque sismique est obligatoire?

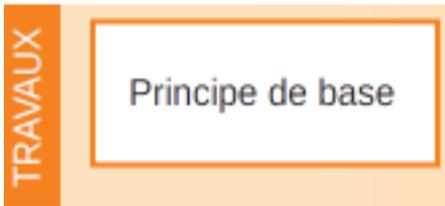
TRAVAUX

Principe de base

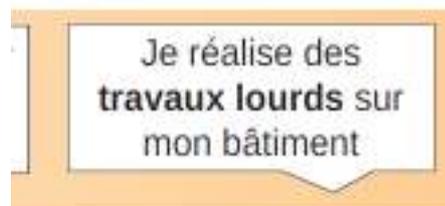
L'objectif minimal de la réglementation sur le bâti existant est la non-aggravation de la vulnérabilité du bâtiment.

Renforcement de bâtiments

Dans quels cas renforcer un bâtiment vis-à-vis du risque sismique est obligatoire?



L'objectif minimal de la réglementation sur le bâti existant est la non-aggravation de la vulnérabilité du bâtiment.



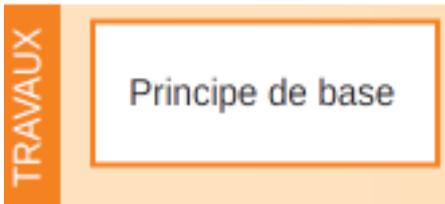
Sous certaines conditions de travaux, la structure modifiée est dimensionnée avec les mêmes règles de construction que le bâti neuf, mais en modulant l'action sismique de référence.

Renforcement de bâtiments

	Cat.	Travaux	Règles de construction
Zone 2	IV	> 30% de SHON créée > 30% de plancher supprimé à un niveau	Eurocode 8³ $a_{gr}=0,42 \text{ m/s}^2$
Zone 3	II	> 30% de SHON créée > 30% de plancher supprimé à un niveau Conditions PS-MI respectées	PS-MI¹ Zone 2
		> 30% de SHON créée > 30% de plancher supprimé à un niveau	Eurocode 8³ $a_{gr}=0,66 \text{ m/s}^2$
	III	> 30% de SHON créée	Eurocode 8³ $a_{gr}=0,66 \text{ m/s}^2$
	IV	> 30% de plancher supprimé à un niveau	
Zone 4	II	> 30% de SHON créée Conditions PS-MI respectées	PS-MI¹ Zone 3
		> 30% de SHON créée > 30% de plancher supprimé à un niveau	Eurocode 8³ $a_{gr}=0,96 \text{ m/s}^2$
	III	> 20% de SHON créée	Eurocode 8³ $a_{gr}=0,96 \text{ m/s}^2$
	IV	> 30% de plancher supprimé à un niveau > 20% des contreventements supprimés Ajout équipement lourd en toiture	

Renforcement de bâtiments

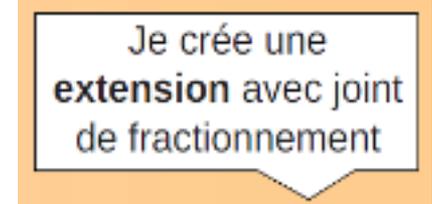
Dans quels cas renforcer un bâtiment vis-à-vis du risque sismique est obligatoire?



L'objectif minimal de la réglementation sur le bâti existant est la non-aggravation de la vulnérabilité du bâtiment.



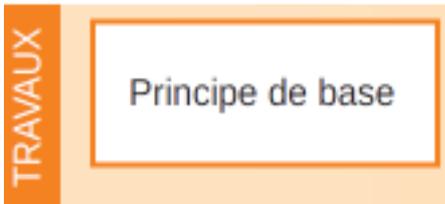
Sous certaines conditions de travaux, la structure modifiée est dimensionnée avec les mêmes règles de construction que le bâti neuf, mais en modulant l'action sismique de référence.



L'extension désolidarisée par un joint de fractionnement doit être dimensionnée comme un bâtiment neuf.

Renforcement de bâtiments

Dans quels cas renforcer un bâtiment vis-à-vis du risque sismique est obligatoire?



Principe de base

L'objectif minimal de la réglementation sur le bâti existant est la non-aggravation de la vulnérabilité du bâtiment.

Je réalise des **travaux lourds** sur mon bâtiment

Sous certaines conditions de travaux, la structure modifiée est dimensionnée avec les mêmes règles de construction que le bâti neuf, mais en modulant l'action sismique de référence.

Je crée une **extension** avec joint de fractionnement

L'extension désolidarisée par un joint de fractionnement doit être dimensionnée comme un bâtiment neuf.

Renforcement volontaire!

Renforcement de bâtiments

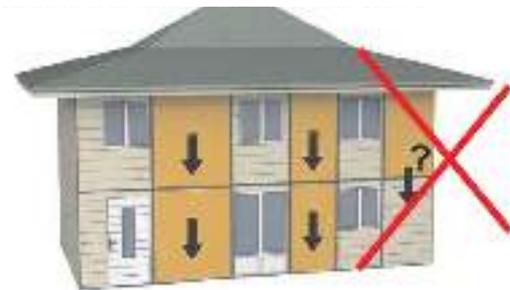
Quels stratégies pour renforcer un bâtiment vis-à-vis du risque sismique?

Renforcement de bâtiments

Objectif A : Diminuer la sollicitation

Objectif A-1 : Améliorer la régularité de la structure

Améliorer la **régularité en élévation** en veillant à la continuité des éléments de contreventement évite les concentrations de contrainte dans les zones de discontinuité.

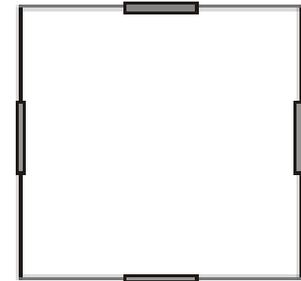


Renforcement de bâtiments

Objectif A : Diminuer la sollicitation

Objectif A-1 : Améliorer la régularité de la structure

Améliorer la **régularité en plan** en répartissant de façon homogène les contreventements sur l'ensemble du bâtiment permet de diminuer les effets de torsion dus au décalage du centre de torsion par rapport au centre de gravité (plus ces deux centres sont éloignés, plus l'effort sismique développé au centre de gravité va engendrer un phénomène de torsion par rapport au centre de torsion du bâtiment).



Renforcement de bâtiments

Objectif A : Diminuer la sollicitation

Objectif A-2 : Diminuer la masse de la structure

Les efforts sismiques étant liés aux efforts d'inertie, plus la masse du bâtiment est élevée plus les efforts sismiques développés dans la structure sont importants. Diminuer la masse de la structure a donc pour effet de diminuer les sollicitations.



Suppression du dernier étage d'un des bâtiment du collège Général de Gaule en Guadeloupe

EXEMPLE DE DIMINUTION DE LA MASSE D'UNE STRUCTURE LORS D'UN RENFORCEMENT

Renforcement de bâtiments

Objectif A : Diminuer la sollicitation

Objectif A-3 : Changer d'affectation

Un changement d'affectation peut conduire à une diminution de la **catégorie d'importance** du bâtiment et ainsi à prendre en compte une accélération de calcul plus faible (du fait de la diminution du coefficient d'importance).

Catégorie d'importance	Coefficient d'importance γ_I
I	0,8
II	1
III	1,2
IV	1,4

Catégorie d'importance	
I	
II	
III	
IV	

Renforcement de bâtiments

Objectif A : Diminuer la sollicitation

Objectif A-4 : Isolation parasismique

L'isolation parasismique consiste en l'insertion d'appuis parasismique qui dissipent une part importante de l'énergie par leur déplacement. L'accélération perçue par le bâtiment est ainsi fortement réduite. Cette technique coûteuse est rarement utilisée si ce n'est pour des bâtiments remarquables dans des zones de forte sismicité



EXEMPLE D'UN RENFORCEMENT PAR ISOLATION
PARASISMIQUE À L'AQUILA (ITALIE)

Renforcement de bâtiments

**Objectif B : Améliorer la capacité de la structure
à reprendre les efforts sismiques**

Objectif B-1 : Rendre le bâtiment moins fragile



Rupture des liaisons entre éléments verticaux et horizontaux d'une structure préfabriquée suite au séisme de Mirabello (Italie - 2012) Eléments verticaux peu endommagés

De par la soudaineté de sa rupture, un élément fragile ne permet pas en général l'évacuation des occupants d'un bâtiment. Eliminer les fragilités est donc une étape primordiale du renforcement même si elle est coûteuse.

Renforcement de bâtiments

**Objectif B : Améliorer la capacité de la structure
à reprendre les efforts sismiques**

Objectif B-2 : Augmenter la ductilité du bâtiment



Application de lamelles de matériau composite sur un mur en maçonnerie pour améliorer sa ductilité

Cette stratégie consiste à **augmenter les capacités de déformation de la structure** avant rupture en améliorant la ductilité de certains éléments structuraux.

Les renforcements couramment employés consistent en l'application d'un matériau à haute limite élastique sous la forme d'un confinement pour les éléments filaires (poteaux et poutres) et de bandes sur des murs souvent maçonnés.

Renforcement de bâtiments

**Objectif B : Améliorer la capacité de la structure
à reprendre les efforts sismiques**

Objectif B-3 : Augmenter la résistance du bâtiment

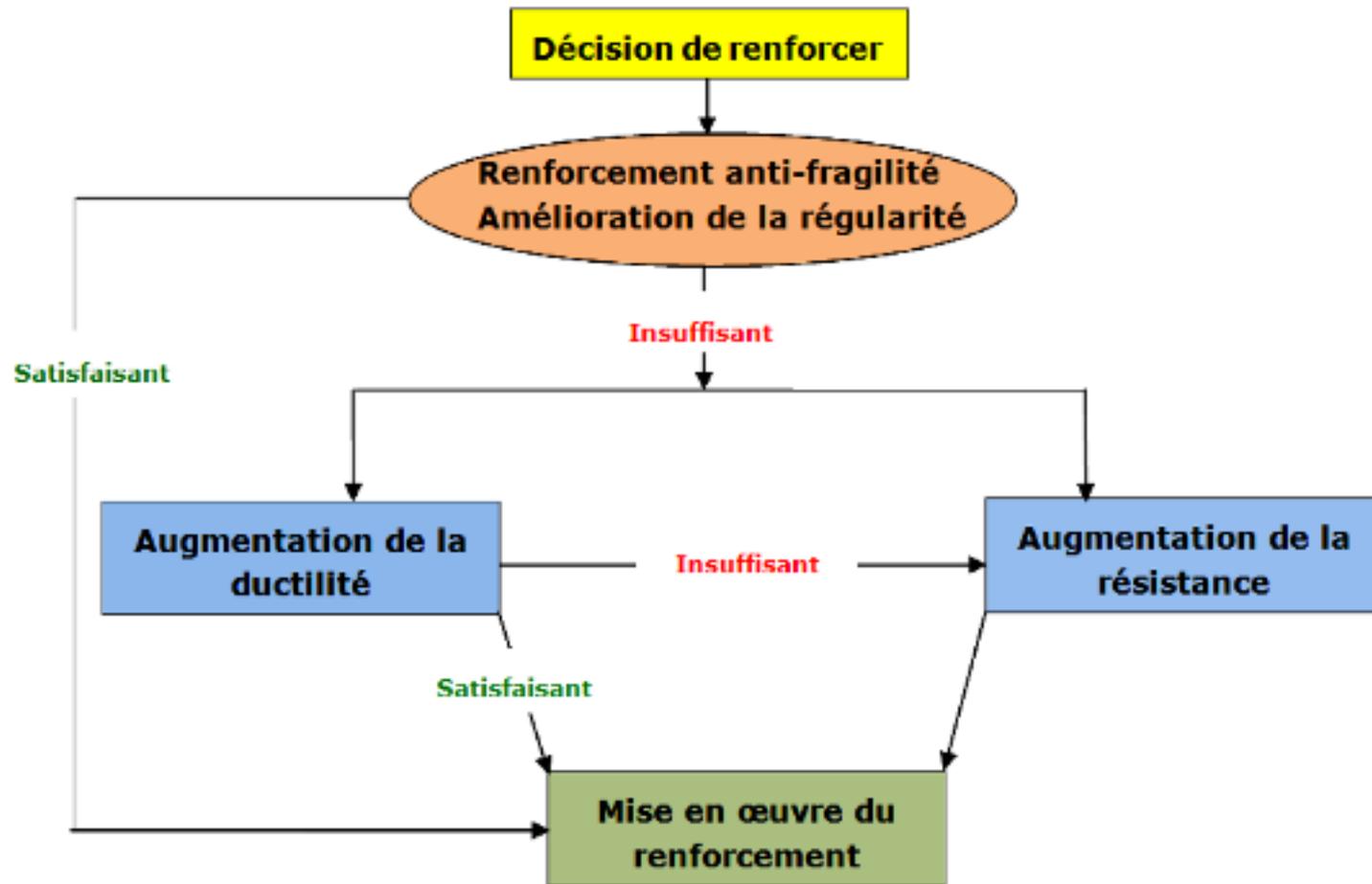


Création d'un voile béton armé pour augmenter la résistance au séisme de l'école Roche carrées (Martinique)

La résistance du bâtiment peut être augmentée par **l'ajout d'éléments de contreventement** ou le renforcement des éléments existants. Le bâtiment est ainsi en mesure de reprendre des efforts sismiques plus élevés et de ce fait, les éléments structuraux horizontaux et le système de fondation doivent être recalculés pour s'assurer de leur bon fonctionnement.

EXEMPLES DE RENFORCEMENTS PARASISMIQUES PAR AUGMENTATION DE LA RIGIDITÉ

Renforcement de bâtiments



Renforcement de bâtiments

Exemple renforcement d'une école en Guadeloupe



FSP – Prise en compte du risque sismique

Renforcement de bâtiments

Exemple renforcement d'une école en Guadeloupe



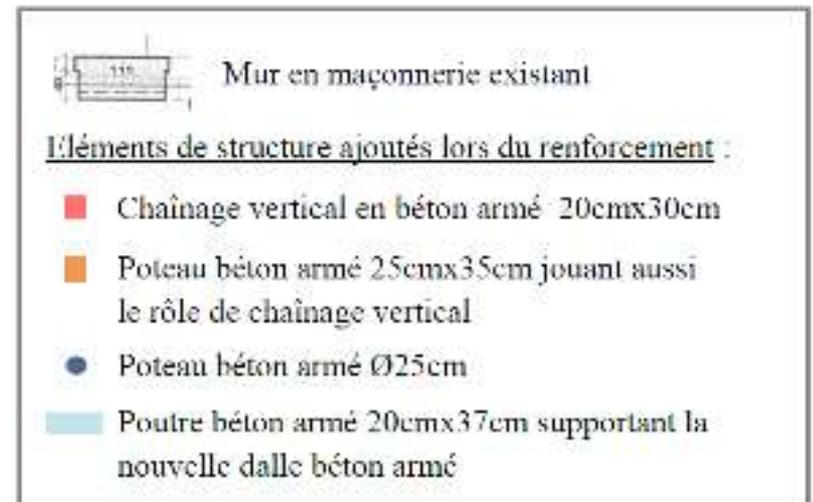
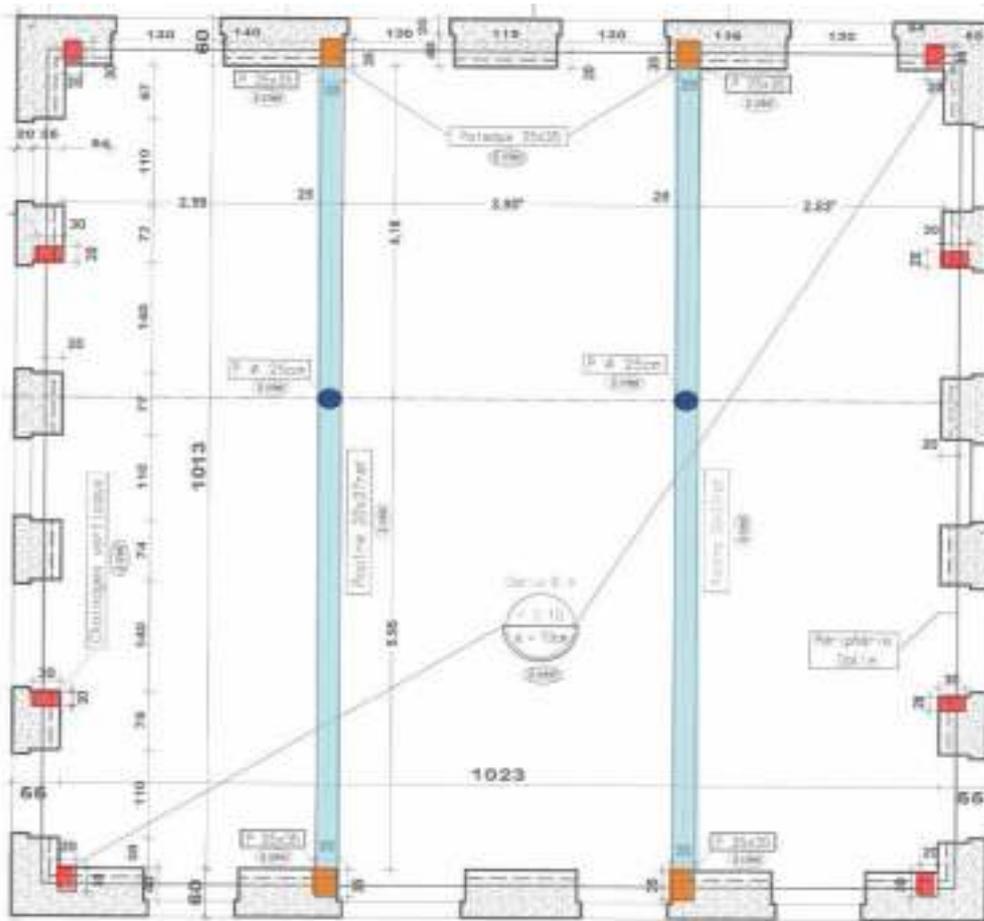
Renforcement de bâtiments

Exemple renforcement d'une école en Guadeloupe



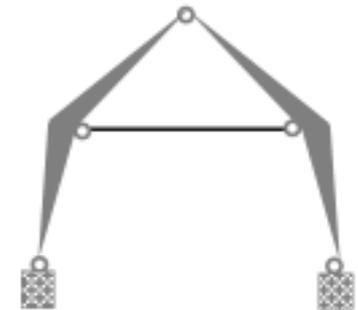
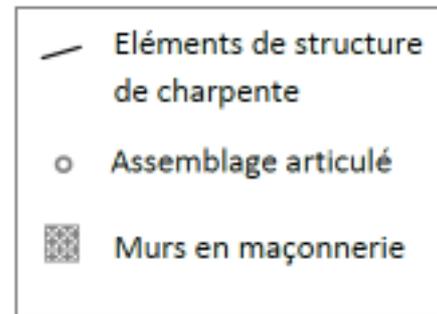
Renforcement de bâtiments

Exemple renforcement d'une école en Guadeloupe



Renforcement de bâtiments

Exemple renforcement d'une école en Guadeloupe



Renforcement de bâtiments

Exemple renforcement d'une école en Guadeloupe



FSP – Prise en compte du risque sismique

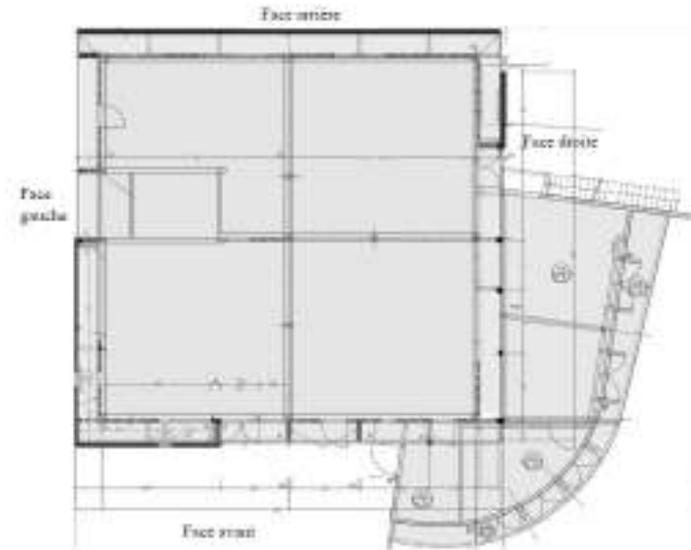
Renforcement de bâtiments

Applications



Renforcement de bâtiments

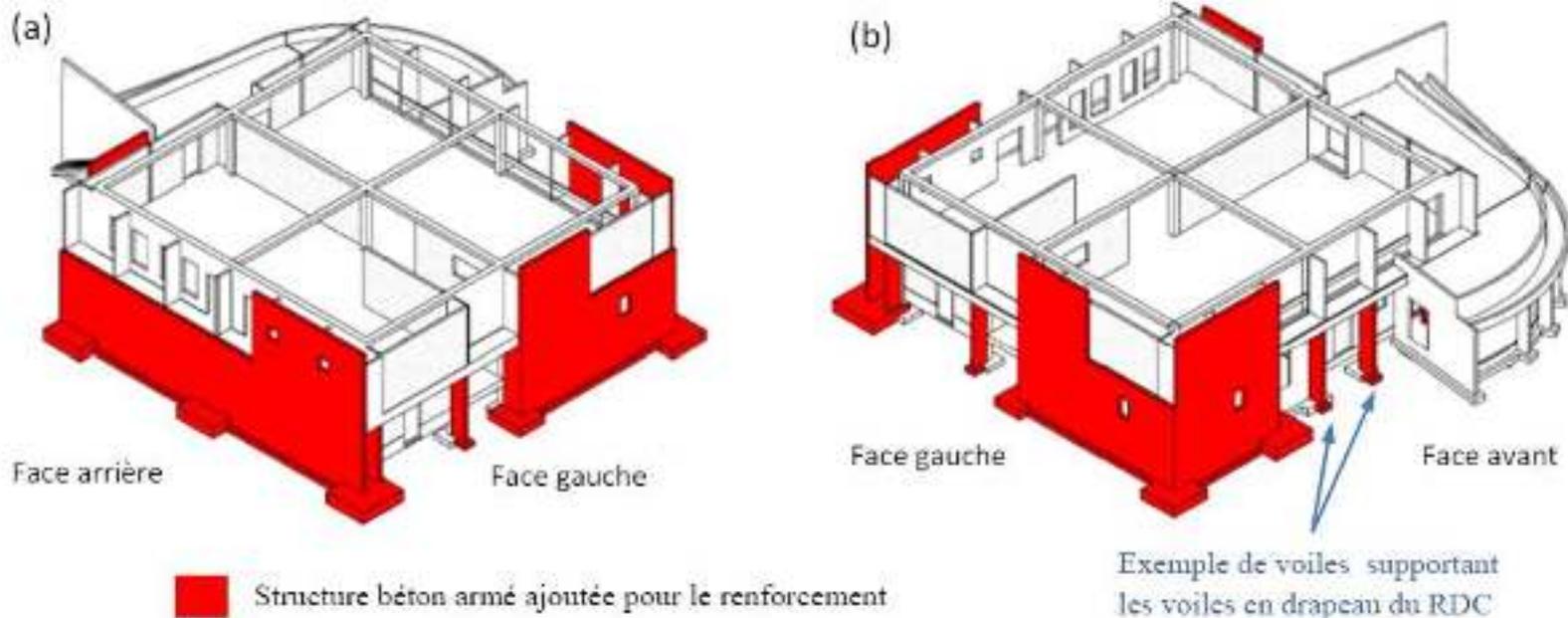
Exemple de projet de renforcement



construction à système poteau-poutre béton armé avec remplissage maçonnerie

Renforcement de bâtiments

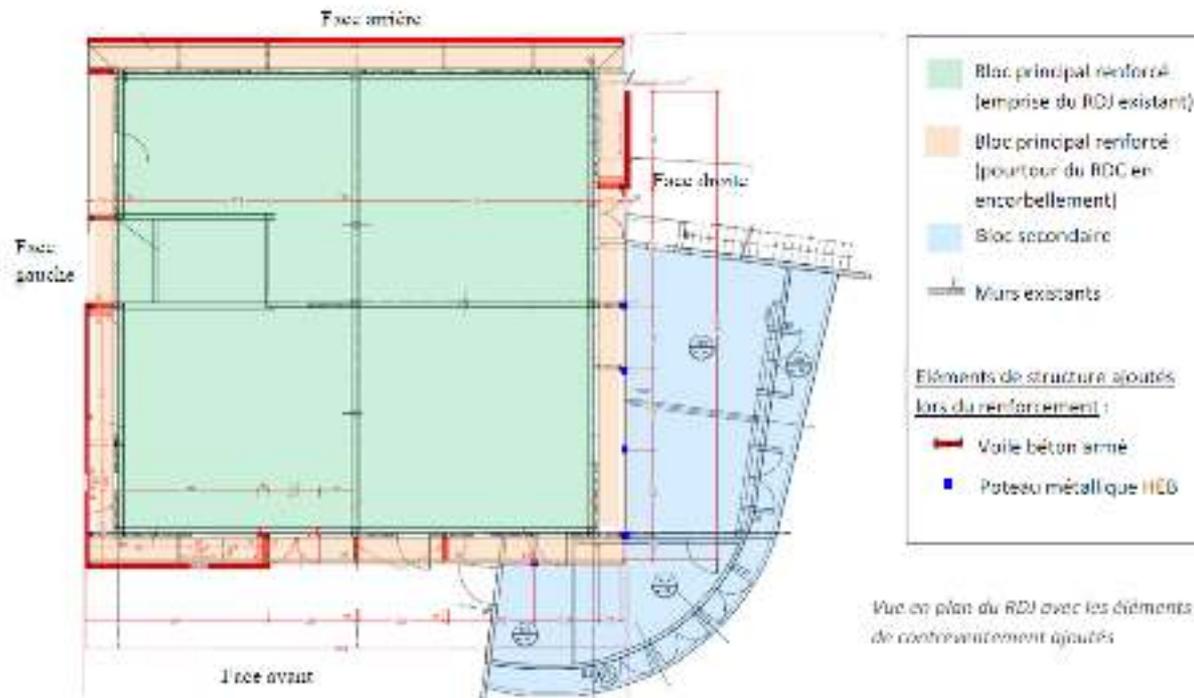
Exemple de projet de renforcement



Visualisation des contreventements ajoutés (voiles béton armé et fondations) : (a) face arrière gauche et (b) face avant

Renforcement de bâtiments

Exemple de projet de renforcement



Renforcement de bâtiments

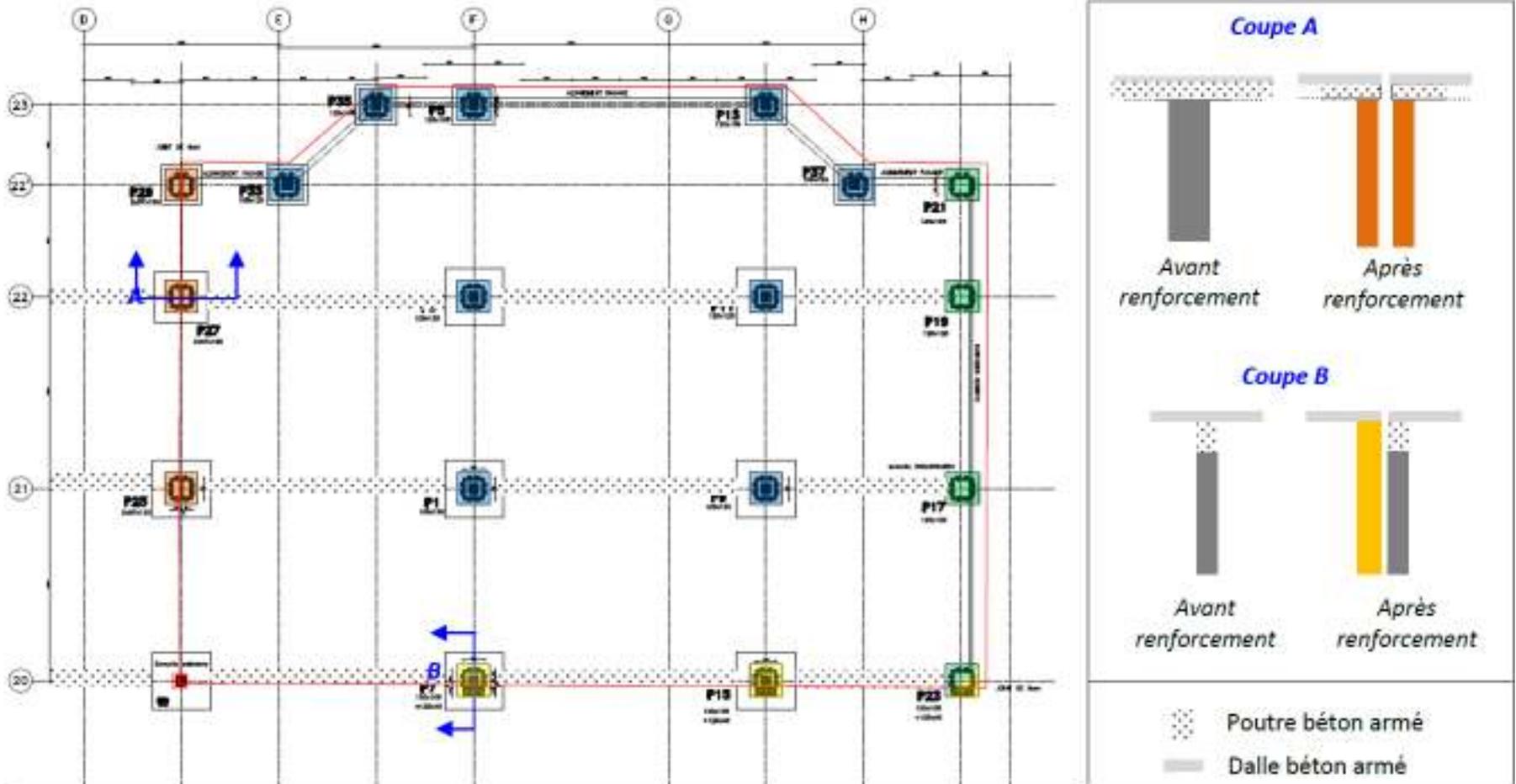
Exemple de projet de renforcement



Construction à système poteau-poutre béton armé
Surélévation de deux niveaux sur 1/3 du RDC (zone rouge)



Renforcement de bâtiments



Renforcement de bâtiments

Exemple de projet de renforcement



Renforcement de bâtiments

Exemple de projet de renforcement

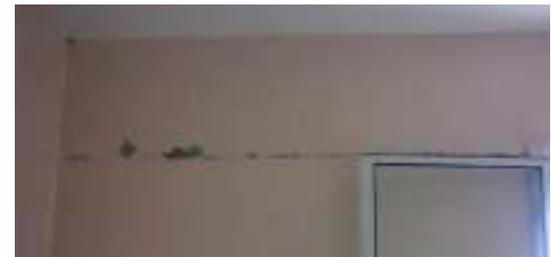


Renforcement de bâtiments

Exemple de projet de renforcement



Déplacement du mobilier suite au séisme de novembre 2007



Fissurations de murs suite au séisme de novembre 2007

Renforcement de bâtiments

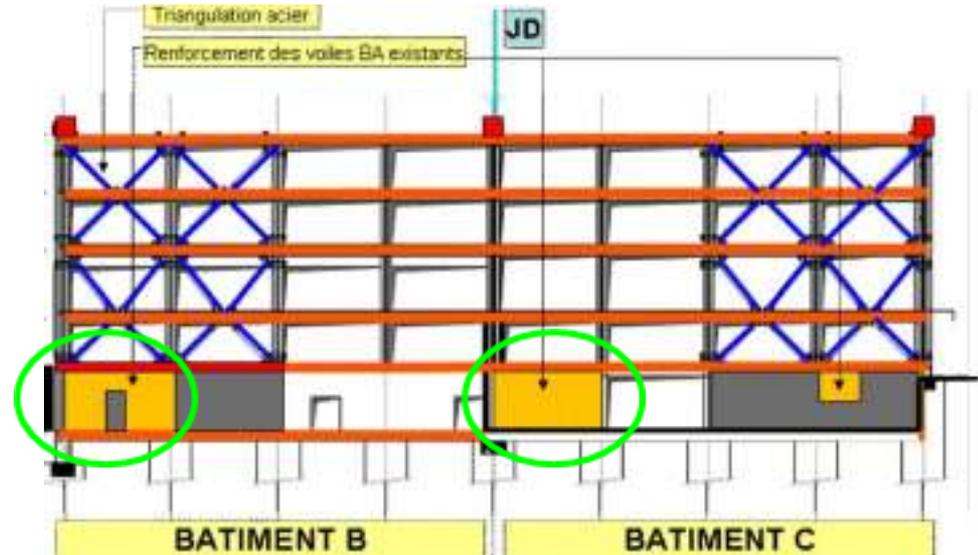
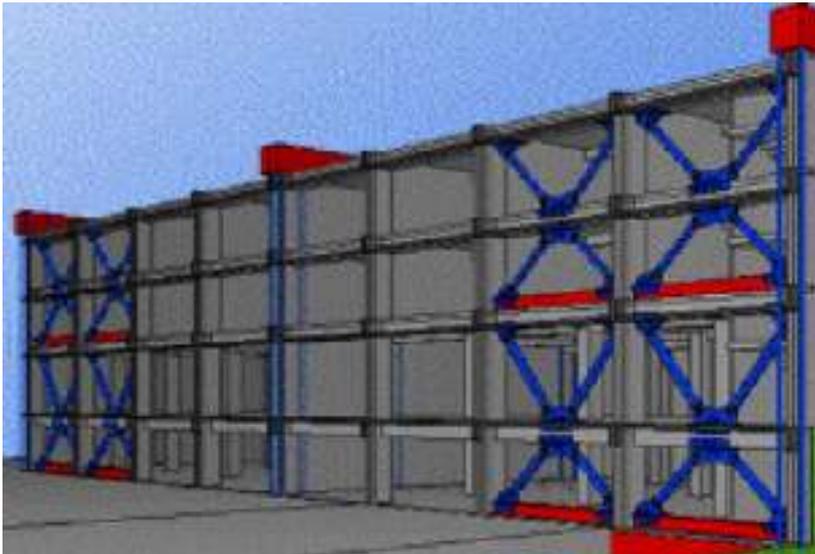
Exemple de projet de renforcement



Démolition des étages supérieurs des blocs B et C (du 5 au 8^{ème} étage)

Renforcement de bâtiments

Exemple de projet de renforcement



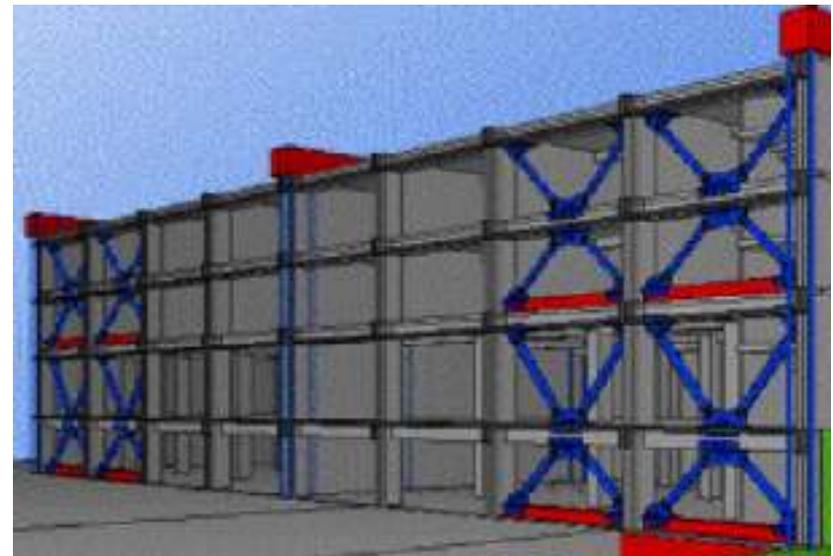
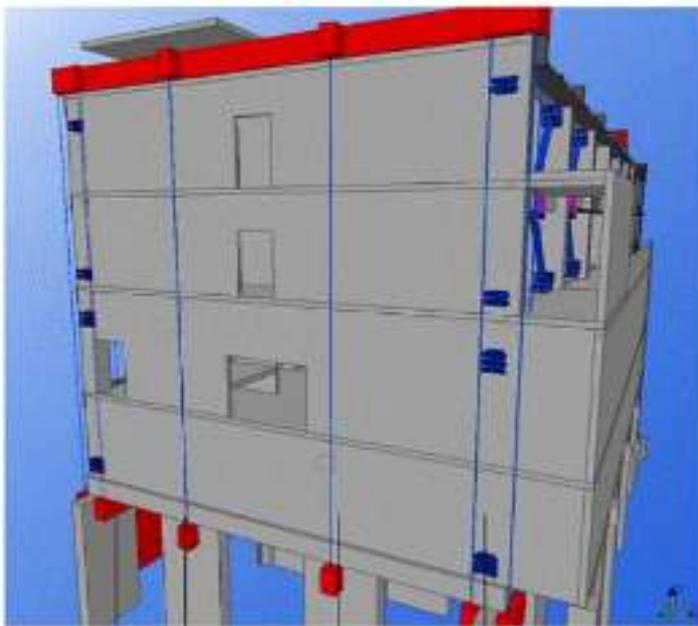
Renforcement de bâtiments

Exemple de projet de renforcement



Renforcement de bâtiments

Exemple de projet de renforcement



Références

- Eurocode 8 NF EN 1998 Calcul des structures pour leur résistance au séisme -
Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments et
Partie 3 : évolution et renforcement des bâtiments
- Arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction
parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal »
- Dynamique des structure et des ouvrages, Alain Pecker, ENPC Paris Tech
- Rapport de la mission post-sismique sur le séisme des Apennins du 24 août
2016 (Italie centrale), Association Française du Génie Parasismique AFPS
- Guide de bonnes pratiques pour la construction de petits bâtiments en
maçonnerie chaînée en Haïti, MTPTC et MICT, septembre 2010
- Diagnostic et renforcement du bâti existant vis-à-vis du séisme. Groupe de
travail AFPS-CSTB. Mars 2013.
- Règles de construction parasismique des maisons individuelles CPMI-EC8
Antilles
- Recueil d'exemples de renforcement parasismique - Cerema
- Chapitre 5 – conception parasismique des bâtiments - André Plumier