Laboratoire
Sols Solides Structures Risques

Comportement sismique des structures en terre crue

Dynamique des structures, Eurocode 8 et renforcement, du matériau au bâtiment

F. Vieux-Champagne

Laboratoire 3SR, Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP

École d'automne du GDR Matériaux de construction bio et géosourcés (MBGS)

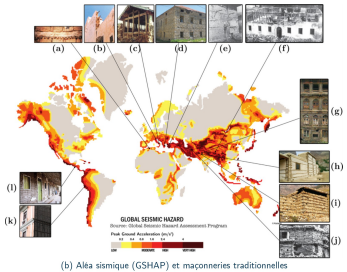
Pornichet, 14 octobre 2026

Pourquoi la terre crue sous séisme ?

- **Habitat en terre** en zone sismique : Andes, Iran, Asie centrale, Népal, Maghreb



(a) Architecture de terre dans le monde



(b) Aléa sismique (GSHAP) et maçonneries traditionnelles

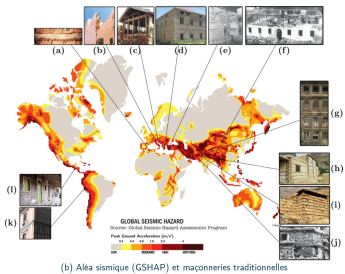
(b) Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP).

Pourquoi la terre crue sous séisme ?

- **Habitat en terre** en zone sismique : Andes, Iran, Asie centrale, Népal, Maghreb
- **Bam 2003**, Pisco 2007, Gorkha 2015 : effondrement de constructions en terre non renforcée



(a) Architecture de terre dans le monde



(b) Aléa sismique (GSHAP) et maçonneries traditionnelles

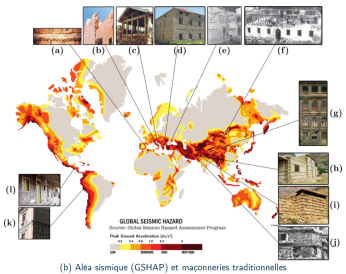
(b) Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP).

Pourquoi la terre crue sous séisme ?

- **Habitat en terre** en zone sismique : Andes, Iran, Asie centrale, Népal, Maghreb
- **Bam 2003**, Pisco 2007, Gorkha 2015 : effondrement de constructions en terre non renforcée
- En France : pisé, bauge, maçonnerie de terre, **pas de cadre réglementaire** propre à la terre crue



(a) Architecture de terre dans le monde



(b) Aléa sismique (GSHAP) et maçonneries traditionnelles

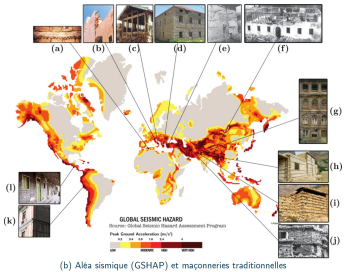
(b) Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP).

Pourquoi la terre crue sous séisme ?

- **Habitat en terre** en zone sismique : Andes, Iran, Asie centrale, Népal, Maghreb
- **Bam 2003**, Pisco 2007, Gorkha 2015 : effondrement de constructions en terre non renforcée
- En France : pisé, bauge, maçonnerie de terre, **pas de cadre réglementaire** propre à la terre crue
- Deux contextes : reconstruction après un séisme, construction neuve en France



(a) Architecture de terre dans le monde



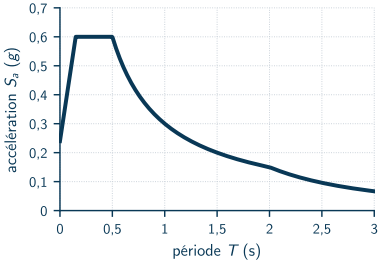
(b) Aléa sismique (GSHAP) et maçonneries traditionnelles

(b) Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP).

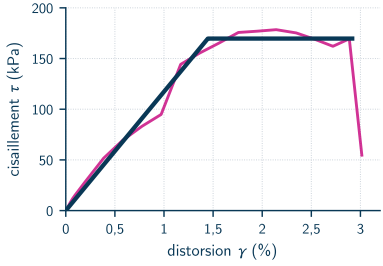
Objectifs : deux figures à savoir lire en sortant

Objectifs

- **Partie 1** : dynamique des structures, de la structure sous sollicitation sismique au spectre de réponse



1 lire un spectre de réponse

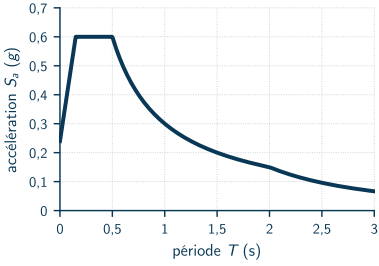


2 lire une courbe de mur renforcé

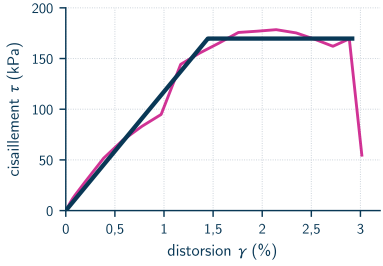
Objectifs : deux figures à savoir lire en sortant

Objectifs

- **Partie 1** : dynamique des structures, de la structure sous sollicitation sismique au spectre de réponse
- **Partie 2** : l'Eurocode 8, du spectre à l'effort de calcul et à la vérification des murs



1 lire un spectre de réponse

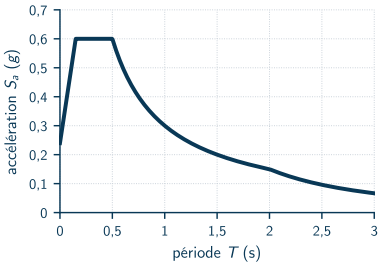


2 lire une courbe de mur renforcé

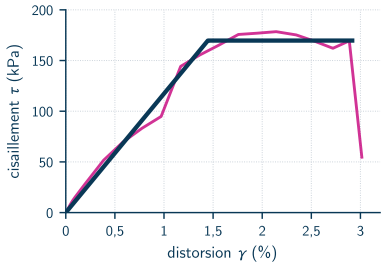
Objectifs : deux figures à savoir lire en sortant

Objectifs

- **Partie 1** : dynamique des structures, de la structure sous sollicitation sismique au spectre de réponse
- **Partie 2** : l'Eurocode 8, du spectre à l'effort de calcul et à la vérification des murs
- **Partie 3** : ce que les essais du laboratoire 3SR sur la terre crue apportent à ces grandeurs



1 lire un spectre de réponse

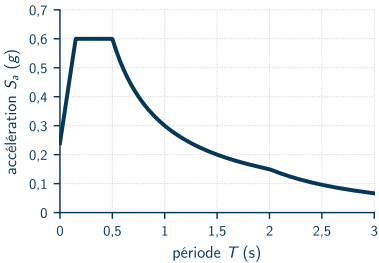


2 lire une courbe de mur renforcé

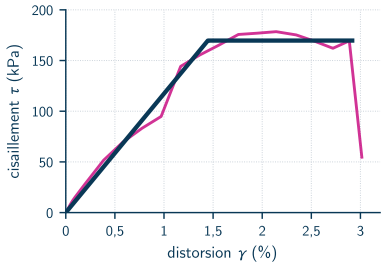
Objectifs : deux figures à savoir lire en sortant

Objectifs

- **Partie 1** : dynamique des structures, de la structure sous sollicitation sismique au spectre de réponse
- **Partie 2** : l'Eurocode 8, du spectre à l'effort de calcul et à la vérification des murs
- **Partie 3** : ce que les essais du laboratoire 3SR sur la terre crue apportent à ces grandeurs
- Questions **Digistorm** au fil de l'exposé



1 lire un spectre de réponse



2 lire une courbe de mur renforcé

Vos réponses pendant la séance

Objectifs

- Scannez le QR code **une fois**, ou saisissez le code **2218708** : l'événement reste ouvert toute la séance

2218708



Vos réponses pendant la séance

Objectifs

- Scannez le QR code **une fois**, ou saisissez le code **2218708** : l'événement reste ouvert toute la séance
- Indiquez vos **nom et prénom** à l'arrivée. Les résultats projetés sont anonymes

2218708

1

Dynamique des structures

1. Dynamique des structures

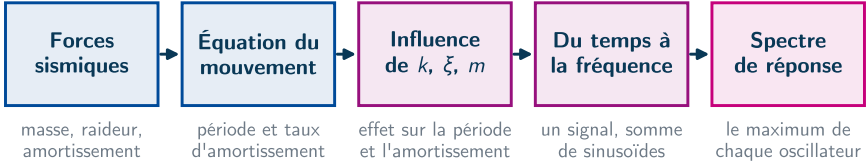
2. Le dimensionnement parasismique : l'Eurocode 8

3. La terre crue, du matériau au bâtiment

Partie 1 : cheminement

Objectifs

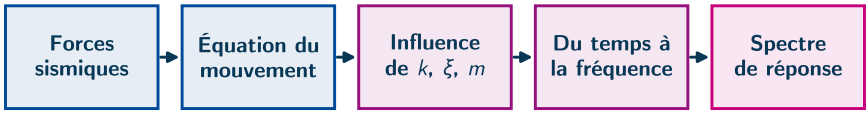
- Cinq étapes, de la structure **sous sollicitation sismique** au **spectre de réponse**



Partie 1 : cheminement

Objectifs

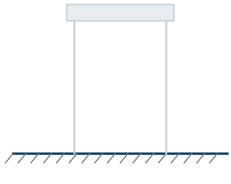
- Cinq étapes, de la structure **sous sollicitation sismique** au **spectre de réponse**
- Dans chaque boîte, la notion ; sous la boîte, ce qu'il faut en retenir



D'où viennent les forces sismiques ?

Forces sismiques

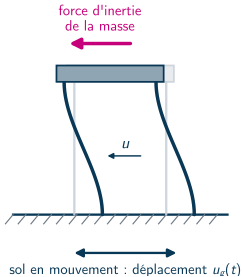
- Le sol est **en mouvement** : la base de la structure suit ce mouvement



D'où viennent les forces sismiques ?

Forces sismiques

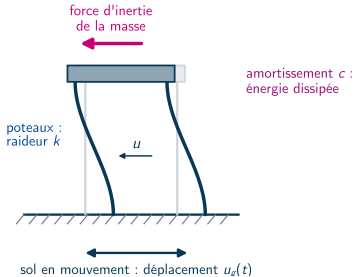
- Le sol est **en mouvement** : la base de la structure suit ce mouvement
- La **masse** s'oppose à sa mise en mouvement : force d'inertie



D'où viennent les forces sismiques ?

Forces sismiques

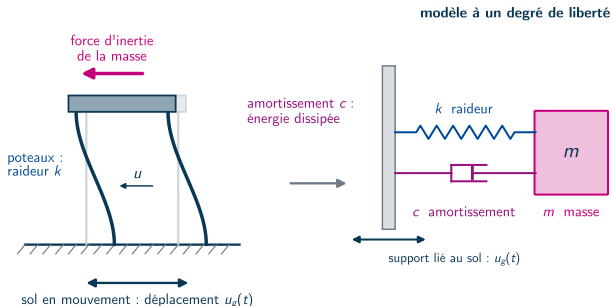
- Le sol est **en mouvement** : la base de la structure suit ce mouvement
- La **masse** s'oppose à sa mise en mouvement : force d'inertie
- La **raideur** des poteaux ramène la masse, l'**amortissement** dissipe l'énergie



D'où viennent les forces sismiques ?

Forces sismiques

- Le sol est **en mouvement** : la base de la structure suit ce mouvement
- La **masse** s'oppose à sa mise en mouvement : force d'inertie
- La **raideur** des poteaux ramène la masse, l'**amortissement** dissipe l'énergie
- Modèle à un degré de liberté : masse m, raideur k, amortissement c



L'équation du mouvement

Équation du mouvement

u : déplacement de la masse par rapport au sol

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t)$$

Chopra, « Dynamics of Structures », chapitre 1.

L'équation du mouvement

Équation du mouvement

u : déplacement de la masse par rapport au sol

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t)$$

force d'inertie

Chopra, « Dynamics of Structures », chapitre 1.

L'équation du mouvement

Équation du mouvement

u : déplacement de la masse par rapport au sol

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t)$$

force d'inertie

force d'amortissement

Chopra, « Dynamics of Structures », chapitre 1.

L'équation du mouvement

Équation du mouvement

u : déplacement de la masse par rapport au sol

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t)$$

force d'inertie — force d'amortissement — force élastique

Chopra, « Dynamics of Structures », chapitre 1.

L'équation du mouvement

Équation du mouvement

u : déplacement de la masse par rapport au sol

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t)$$

force d'inertie	force d'amortissement	force élastique	action du séisme (mouvement du sol)

divisée par m : $\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2 u = -\ddot{u}_g(t)$, $\omega = 2\pi/T$, $T = 2\pi\sqrt{m/k}$, $\xi = c/(2\sqrt{km})$

le déplacement $u(t)$ dépend de T et ξ ; l'effort $ku = m\omega^2 u$ dépend aussi de m

Chopra, « Dynamics of Structures », chapitre 1.

Question 1 : raideur, amortissement, masse

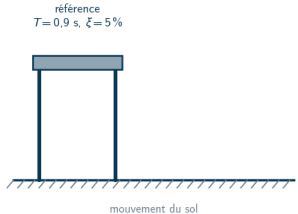
Raideur, masse, amortissement

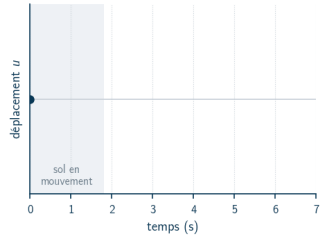
Question 1 (Digistorm, trois volets)

Selon vous, que devient la période T de la structure de référence si l'on :

- (a) divise la **raideur** k par 3 ?
- (b) porte le taux d'**amortissement** à $\xi = 20\,\%$?
- (c) multiplie la **masse** m par 3 ?

Réponses : elle augmente, elle diminue, elle ne change pas.

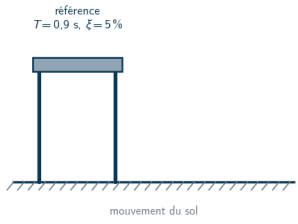


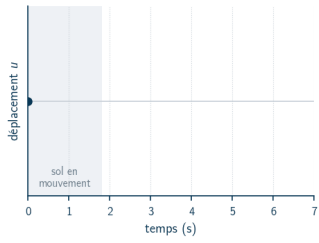


Réponse 1 : seul le rapport m/k fixe la période

Raideur, masse, amortissement

- (a) et (c) : la période **augmente** ; (b) : elle **ne change pas**
- Référence : $T = 0{,}9$ s, $\xi = 5\,\%$

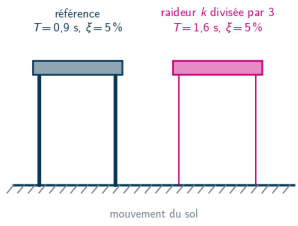


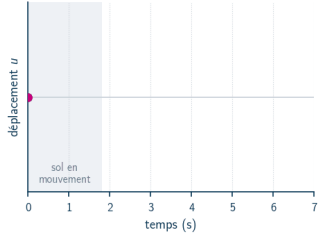


Réponse 1 : seul le rapport m/k fixe la période

Raideur, masse, amortissement

- (a) et (c) : la période **augmente** ; (b) : elle **ne change pas**
- Référence : $T = 0{,}9$ s, $\xi = 5\,\%$
- **Raideur divisée par 3** : structure plus souple, **période multipliée par 1,7**

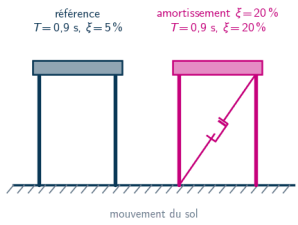


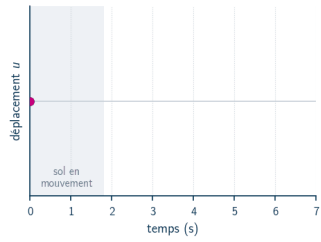


Réponse 1 : seul le rapport m/k fixe la période

Raideur, masse, amortissement

- (a) et (c) : la période **augmente** ; (b) : elle **ne change pas**
- Référence : $T = 0{,}9$ s, $\xi = 5\,\%$
- **Raideur divisée par 3** : structure plus souple, **période multipliée par 1,7**
- $\xi = 20\,\%$: oscillations **amorties plus vite**, période inchangée

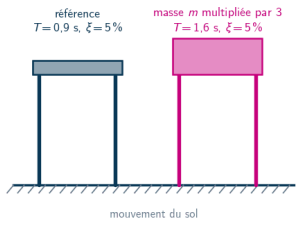


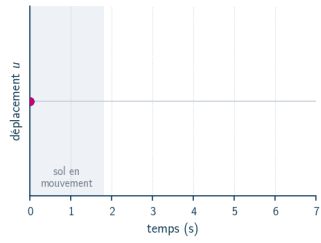


Réponse 1 : seul le rapport m/k fixe la période

Raideur, masse, amortissement

- (a) et (c) : la période **augmente** ; (b) : elle **ne change pas**
- Référence : $T = 0{,}9$ s, $\xi = 5\,\%$
- **Raideur divisée par 3** : structure plus souple, **période multipliée par 1,7**
- $\xi = 20\,\%$: oscillations **amorties plus vite**, période inchangée
- **Masse multipliée par 3** : **période multipliée par 1,7**, comme pour la raideur divisée par 3





Question 2 : on double l'épaisseur des murs

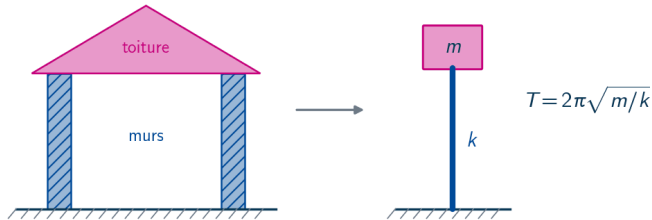
Raideur, masse, amortissement

Question 2 (Digistorm, deux volets)

On double l'épaisseur de tous les murs : la raideur k double. Que devient la période T si la masse vient surtout :

- (a) des **murs** ?
- (b) de la **toiture** ?

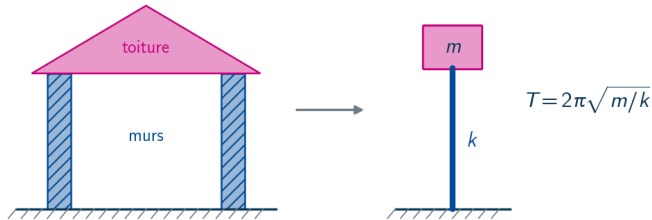
Réponses : inchangée, diminue, augmente.



Réponse 2 : tout dépend de la répartition de la masse

Raideur, masse, amortissement

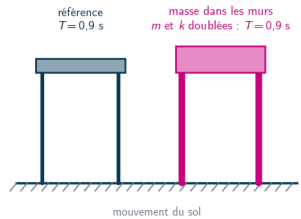
- (a) masse dans les murs : période **inchangée** ; (b) masse en toiture : période **diminuée**
- Murs deux fois plus épais : **raideur doublée**

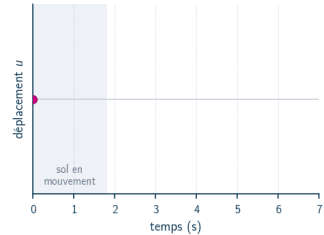


Réponse 2 : tout dépend de la répartition de la masse

Raideur, masse, amortissement

- (a) masse dans les murs : période **inchangée** ; (b) masse en toiture : période **diminuée**
- Murs deux fois plus épais : **raideur doublée**
- Masse dans les murs : masse doublée aussi, **période inchangée**

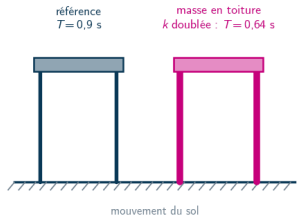


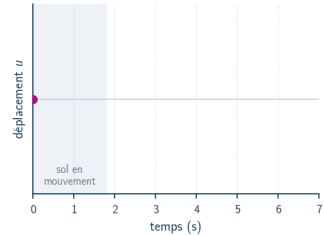


Réponse 2 : tout dépend de la répartition de la masse

Raideur, masse, amortissement

- (a) masse dans les murs : période **inchangée** ; (b) masse en toiture : période **diminuée**
- Murs deux fois plus épais : **raideur doublée**
- Masse dans les murs : masse doublée aussi, **période inchangée**
- Masse en toiture : masse inchangée, **période divisée par 1,4**

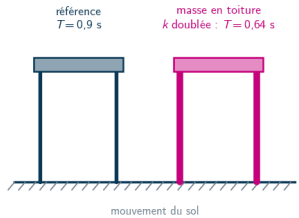


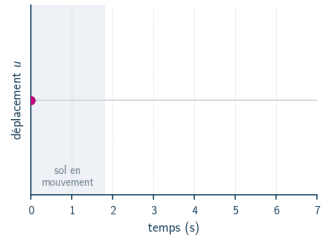


Réponse 2 : tout dépend de la répartition de la masse

Raideur, masse, amortissement

- (a) masse dans les murs : période **inchangée** ; (b) masse en toiture : période **diminuée**
- Murs deux fois plus épais : **raideur doublée**
- Masse dans les murs : masse doublée aussi, **période inchangée**
- Masse en toiture : masse inchangée, **période divisée par 1,4**
- Murs plus épais : **masse plus grande**, donc effort sismique plus grand





Du temps à la fréquence

Fréquence

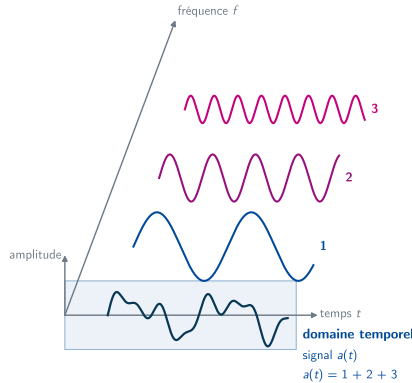
- Un **signal** quelconque, fonction du temps



Du temps à la fréquence

Fréquence

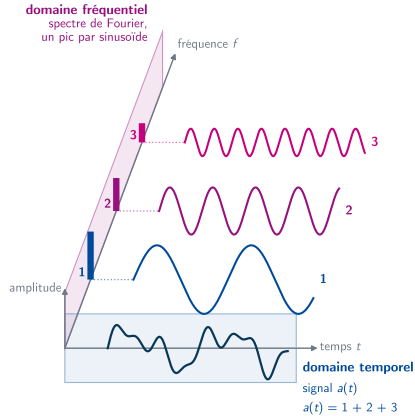
- Un **signal** quelconque, fonction du temps
- Ce signal est une **somme de sinusoïdes** de fréquences différentes



Du temps à la fréquence

Fréquence

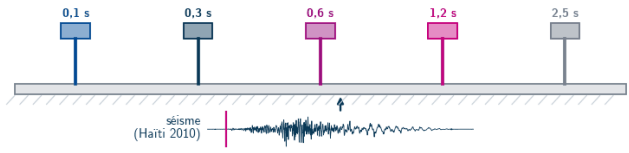
- Un **signal** quelconque, fonction du temps
- Ce signal est une **somme de sinusoïdes** de fréquences différentes
- Son **spectre de Fourier** donne l'amplitude de chaque sinusoïde en fonction de sa fréquence



Le spectre de réponse, oscillateur par oscillateur

Spectre de réponse

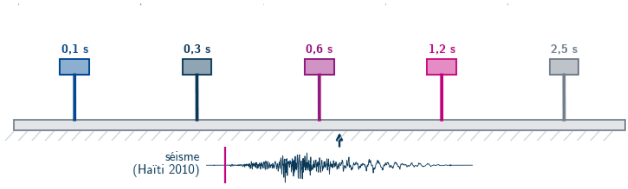
- **Signal sismique** : accélération du sol



Le spectre de réponse, oscillateur par oscillateur

Spectre de réponse

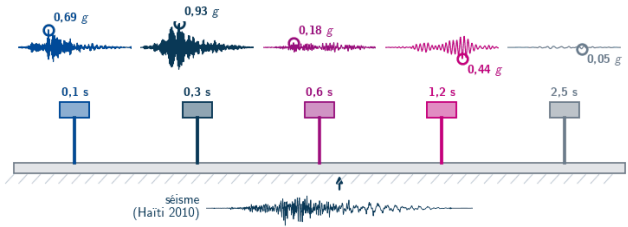
- **Signal sismique** : accélération du sol
- **Mise en mouvement** des oscillateurs (0,1 à 2,5 s)



Le spectre de réponse, oscillateur par oscillateur

Spectre de réponse

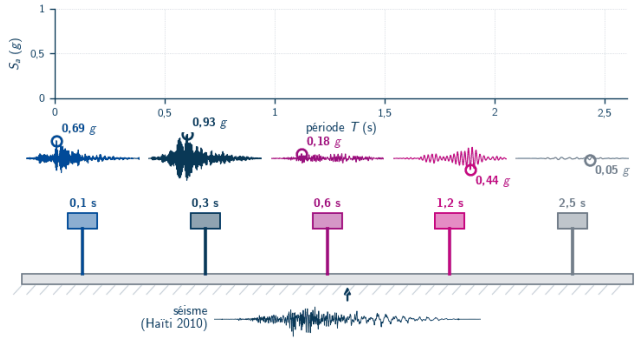
- **Signal sismique** : accélération du sol
- **Mise en mouvement** des oscillateurs (0,1 à 2,5 s)
- **Sélection du maximum** d'accélération de chaque oscillateur



Le spectre de réponse, oscillateur par oscillateur

Spectre de réponse

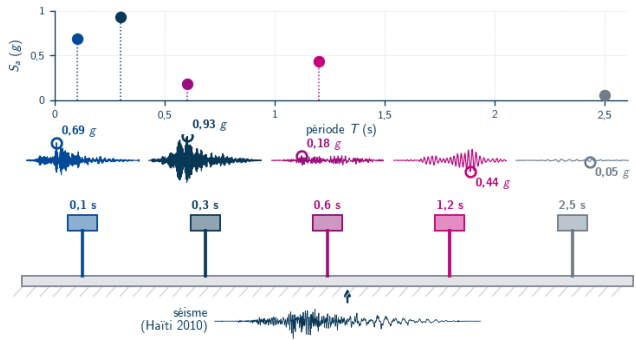
- **Signal sismique** : accélération du sol
- **Mise en mouvement** des oscillateurs (0,1 à 2,5 s)
- **Sélection du maximum** d'accélération de chaque oscillateur
- **Domaine spectral** : période T en abscisse, accélération spectrale S_a en ordonnée



Le spectre de réponse, oscillateur par oscillateur

Spectre de réponse

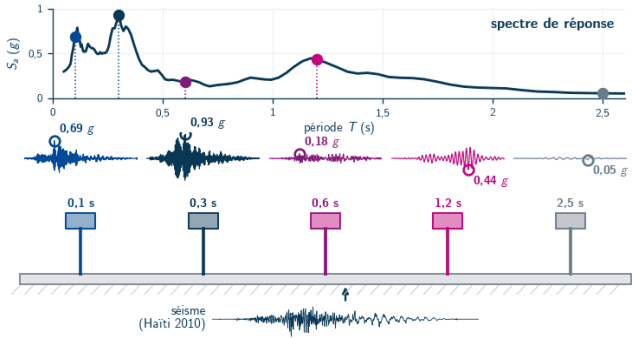
- **Signal sismique** : accélération du sol
- **Mise en mouvement** des oscillateurs (0,1 à 2,5 s)
- **Sélection du maximum** d'accélération de chaque oscillateur
- **Domaine spectral** : période T en abscisse, accélération spectrale S_a en ordonnée
- **Report des maxima** au-dessus de chaque période



Le spectre de réponse, oscillateur par oscillateur

Spectre de réponse

- **Signal sismique** : accélération du sol
- **Mise en mouvement** des oscillateurs (0,1 à 2,5 s)
- **Sélection du maximum** d'accélération de chaque oscillateur
- **Domaine spectral** : période T en abscisse, accélération spectrale S_a en ordonnée
- **Report des maxima** au-dessus de chaque période
- **Spectre de réponse** : la courbe des maxima



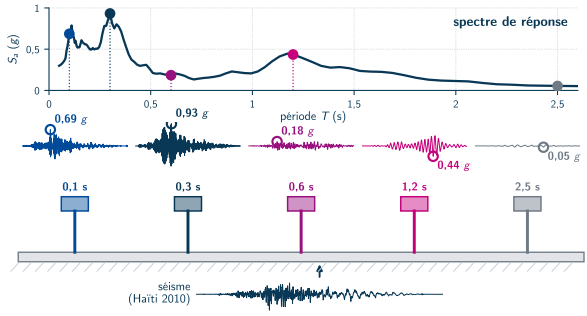
Question 3 : que représente un point du spectre ?

Spectre de réponse

Question 3 (Digistorm)

Un point du spectre de réponse, c'est :

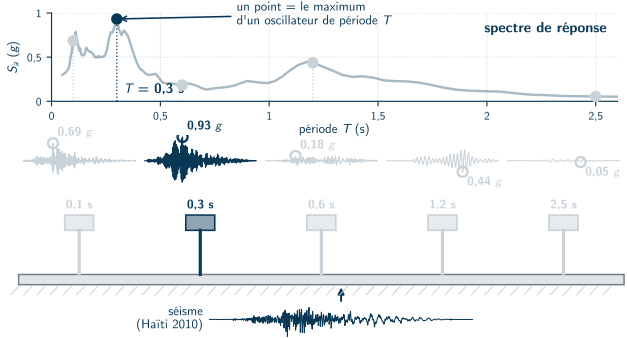
- (a) l'accélération du sol à un instant donné
- (b) l'accélération maximale d'un oscillateur de période T soumis à ce séisme
- (c) la fréquence propre du bâtiment



Réponse 3 : le maximum d'un oscillateur

Spectre de réponse

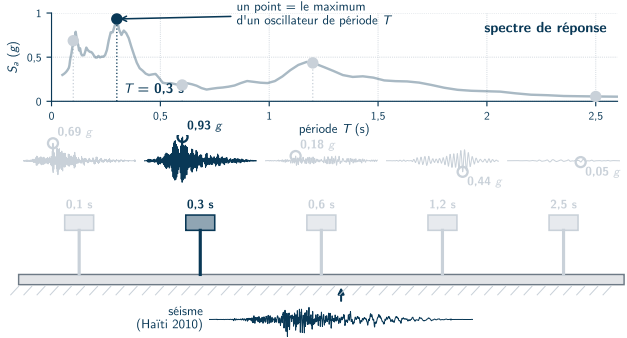
- Réponse (b) : un point du spectre est l'accélération **maximale** d'**un oscillateur** de période T



Réponse 3 : le maximum d'un oscillateur

Spectre de réponse

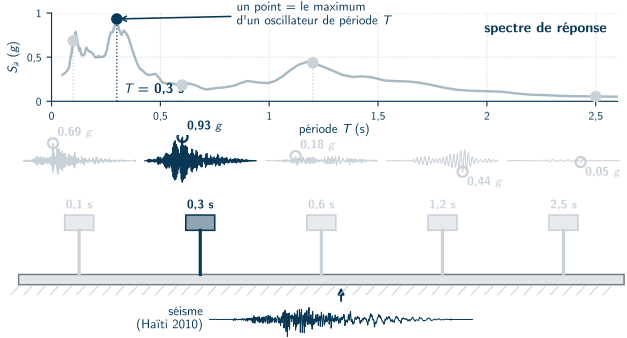
- Réponse (b) : un point du spectre est l'accélération **maximale** d'**un oscillateur** de période T
- Le spectre caractérise le **séisme**, pas le bâtiment



Réponse 3 : le maximum d'un oscillateur

Spectre de réponse

- Réponse (b) : un point du spectre est l'accélération **maximale** d'**un oscillateur** de période T
- Le spectre caractérise le **séisme**, pas le bâtiment
- Le spectre donne l'accélération d'un bâtiment de période T, d'où l'effort maximal $F_{max} = m\,S_a(T)$



Question 4 : quel séisme pour quel bâtiment ?

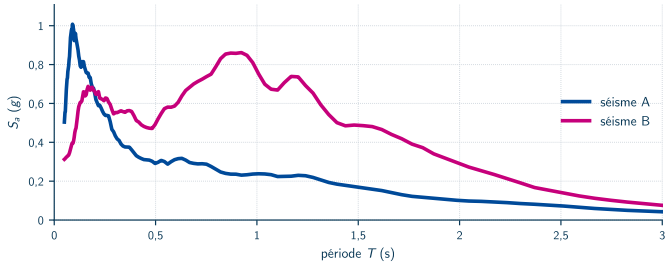
Spectre de réponse

Question 4 (Digistorm, deux volets)

Deux séismes de même accélération maximale du sol, 0,3 g. Lequel impose l'effort le plus grand :

- (a) à une **maison** de période 0,15 s ?
- (b) à un **bâtiment** de période 1,2 s ?

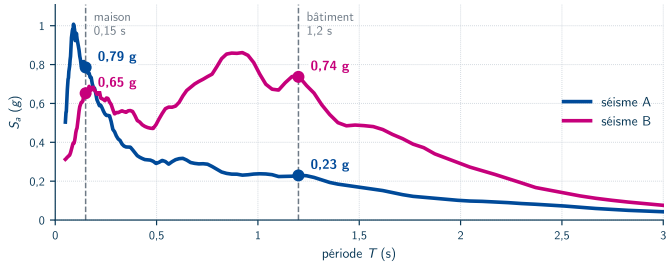
Réponses : séisme A, séisme B.



Réponse 4 : A pour la maison, B pour le bâtiment

Spectre de réponse

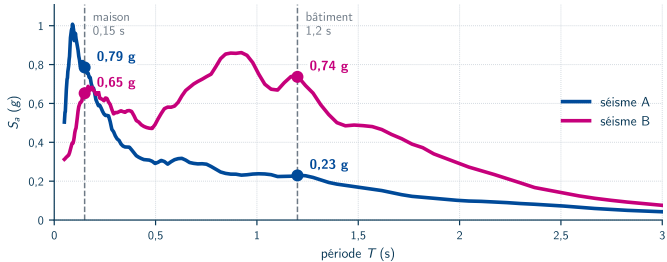
- Maison de période 0,15 s : **séisme A**



Réponse 4 : A pour la maison, B pour le bâtiment

Spectre de réponse

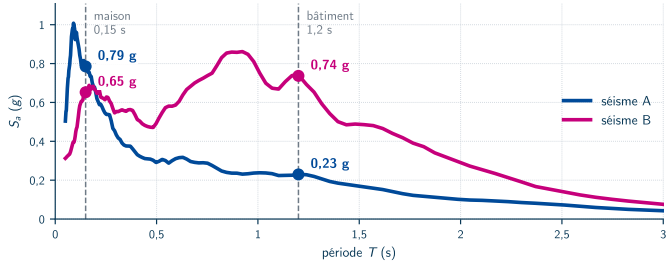
- Maison de période 0,15 s : **séisme A**
- Bâtiment de période 1,2 s : **séisme B**



Réponse 4 : A pour la maison, B pour le bâtiment

Spectre de réponse

- Maison de période 0,15 s : **séisme A**
- Bâtiment de période 1,2 s : **séisme B**
- Même accélération maximale du sol, effets différents : l'effort dépend de la **période de la structure**



2

Le dimensionnement parasismique : l'Eurocode 8

1. Dynamique des structures

2. Le dimensionnement parasismique : l'Eurocode 8

3. La terre crue, du matériau au bâtiment

Partie 2 : cheminement

Objectifs

- La dynamique des structures est en place : la réglementation transforme l'accélération maximale lue sur un spectre en **effort de calcul**, puis vérifie la **résistance des murs**



Partie 2 : cheminement

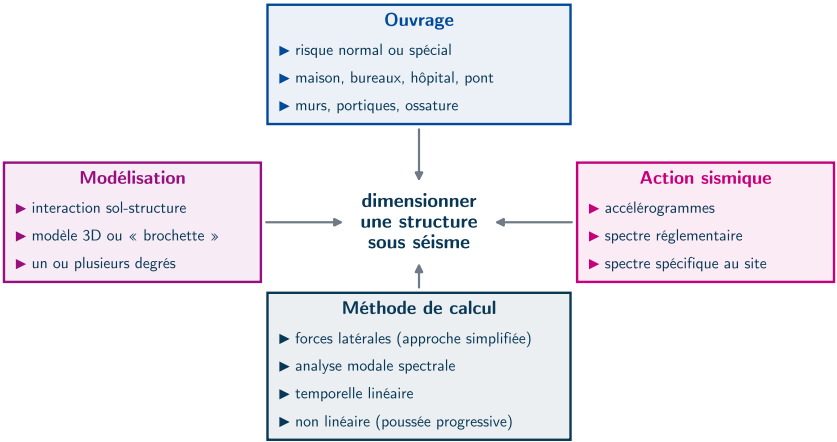
Objectifs

- La dynamique des structures est en place : la réglementation transforme l'accélération maximale lue sur un spectre en **effort de calcul**, puis vérifie la **résistance des murs**
- Dans chaque boîte, la notion ; sous la boîte, ce qu'il faut en retenir



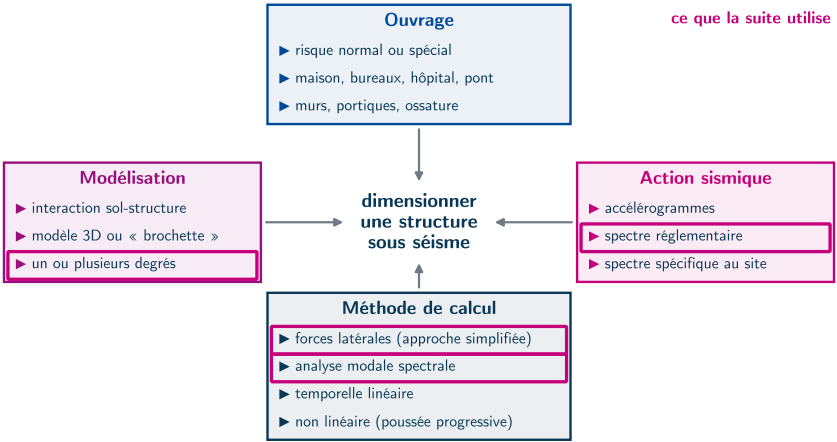
Le cadre du dimensionnement parasismique

Cadre



Le cadre du dimensionnement parasismique

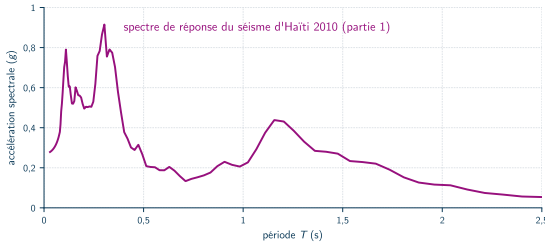
Cadre



Le spectre de l'Eurocode 8

Spectre réglementaire

- Spectre de réponse d'un **séisme enregistré** (Haïti 2010, partie 1)

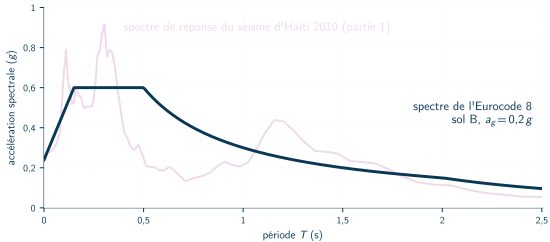


EN 1998-1 § 3.2.2.2 : expressions (3.2) à (3.5), figure 3.1, tableaux 3.2 et 3.3 (S, T_B, T_C, T_D) ; η : expression (3.6).

Le spectre de l'Eurocode 8

Spectre réglementaire

- Spectre de réponse d'un **séisme enregistré** (Haïti 2010, partie 1)
- Le règlement le remplace par un **spectre lissé** : enveloppe des séismes possibles au site

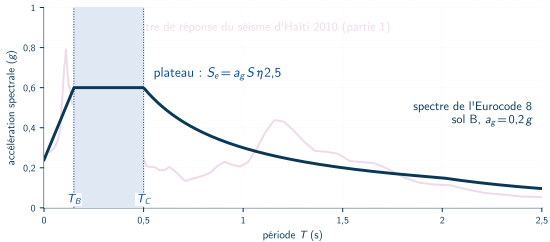


EN 1998-1 § 3.2.2.2 : expressions (3.2) à (3.5), figure 3.1, tableaux 3.2 et 3.3 (S, T_B, T_C, T_D) ; η : expression (3.6).

Le spectre de l'Eurocode 8

Spectre réglementaire

- Spectre de réponse d'un **séisme enregistré** (Haïti 2010, partie 1)
- Le règlement le remplace par un **spectre lissé** : enveloppe des séismes possibles au site
- **Plateau** entre T_B et T_C : $S_e = a_g \, S \, \eta \, 2{,}5$



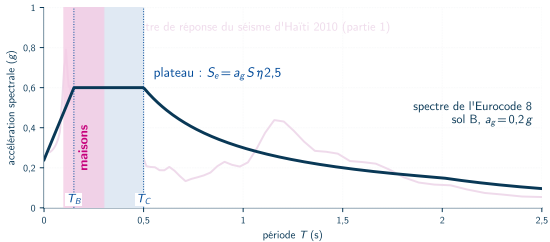
- a_g : accélération de calcul au rocher (zone sismique, importance) ; S, T_B, T_C : selon la classe de sol
- η : correction d'amortissement, 1 pour $\xi = 5\,\%$; 2,5 : rapport moyen entre l'accélération du plateau et l'accélération maximale du sol, pour $\xi = 5\,\%$

EN 1998-1 § 3.2.2.2 : expressions (3.2) à (3.5), figure 3.1, tableaux 3.2 et 3.3 (S, T_B, T_C, T_D) ; η : expression (3.6).

Le spectre de l'Eurocode 8

Spectre réglementaire

- Spectre de réponse d'un **séisme enregistré** (Haïti 2010, partie 1)
- Le règlement le remplace par un **spectre lissé** : enveloppe des séismes possibles au site
- **Plateau** entre T_B et T_C : $S_e = a_g\, S\, \eta\, 2{,}5$
- Maisons de 1 à 2 niveaux : **sur le plateau** (période estimée à la diapositive suivante)



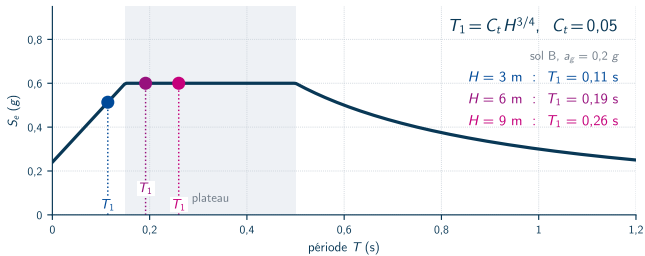
- a_g : accélération de calcul au rocher (zone sismique, importance) ; S, T_B, T_C : selon la classe de sol
- η : correction d'amortissement, 1 pour $\xi = 5\,\%$; 2,5 : rapport moyen entre l'accélération du plateau et l'accélération maximale du sol, pour $\xi = 5\,\%$

EN 1998-1 § 3.2.2.2 : expressions (3.2) à (3.5), figure 3.1, tableaux 3.2 et 3.3 (S, T_B, T_C, T_D) ; η : expression (3.6).

L'approche simplifiée : estimer la période sans modèle

Spectre réglementaire

- Formule empirique $T_1 = C_t\, H^{3/4}$, H hauteur du bâtiment (m)
- C_t : **coefficient empirique** selon la structure : 0,085 pour les portiques en acier, 0,075 pour les portiques en béton, **0,05 pour les autres structures** (maçonnerie)

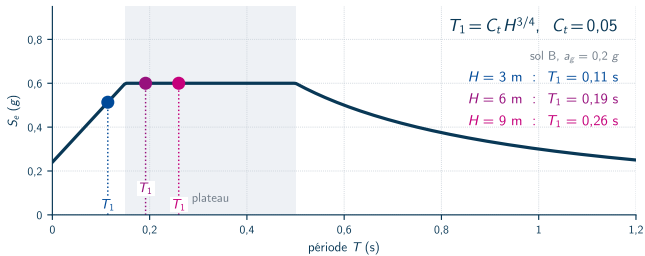


EN 1998-1 § 4.3.3.2.2 et § 4.3.3.2.3. H : hauteur du bâtiment depuis les fondations.

L'approche simplifiée : estimer la période sans modèle

Spectre réglementaire

- Formule empirique $T_1 = C_t\, H^{3/4}$, H hauteur du bâtiment (m)
- C_t : **coefficient empirique** selon la structure : 0,085 pour les portiques en acier, 0,075 pour les portiques en béton, **0,05 pour les autres structures** (maçonnerie)
- 1 à 3 niveaux : T_1 de 0,11 à 0,26 s, **sur le plateau** ou juste avant

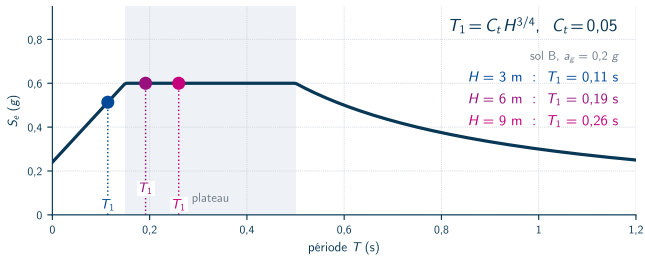


EN 1998-1 § 4.3.3.2.2 et § 4.3.3.2.3. H : hauteur du bâtiment depuis les fondations.

L'approche simplifiée : estimer la période sans modèle

Spectre réglementaire

- Formule empirique $T_1 = C_t\, H^{3/4}$, H hauteur du bâtiment (m)
- C_t : **coefficient empirique** selon la structure : 0,085 pour les portiques en acier, 0,075 pour les portiques en béton, **0,05 pour les autres structures** (maçonnerie)
- 1 à 3 niveaux : T_1 de 0,11 à 0,26 s, **sur le plateau** ou juste avant
- À comparer à la **période mesurée** (partie 3)



- Méthode des **forces latérales** : effort tranchant à la base $F_b = m\, S_d(T_1)$, réparti entre les niveaux au prorata du produit masse par hauteur ; maison d'un niveau : force horizontale appliquée au niveau de la toiture

EN 1998-1 § 4.3.3.2.2 et § 4.3.3.2.3. H : hauteur du bâtiment depuis les fondations.

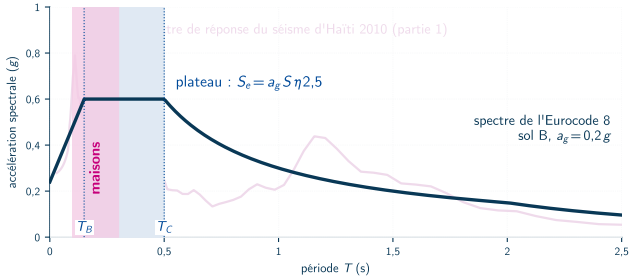
Question 5 : réduire l'effort sismique sur le plateau

Spectre réglementaire

Question 5 (Digistorm)

Pour un bâtiment dont la période est sur le plateau du spectre, quelle modification réduit l'effort sismique de calcul ?

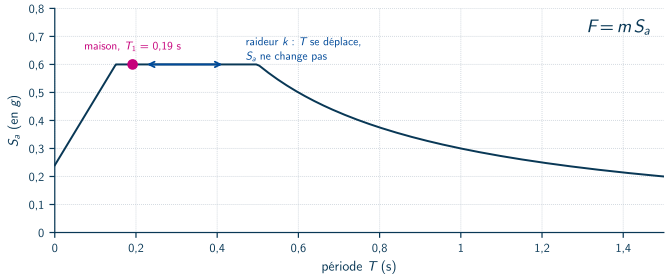
- augmenter la **raideur**
- réduire la **masse**
- augmenter l'**amortissement**



Réponse 5 : la masse

Spectre réglementaire

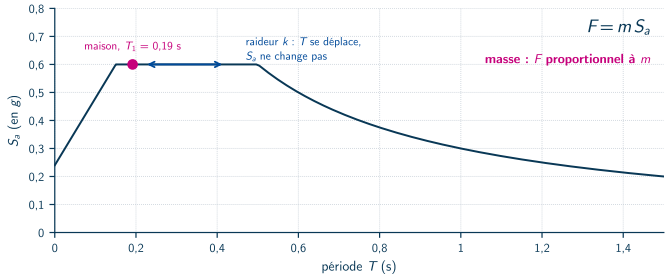
- Seule la **réduction de la masse** réduit l'effort sismique de calcul
- **Raideur** : la période change mais reste sur le plateau, S_a ne change pas



Réponse 5 : la masse

Spectre réglementaire

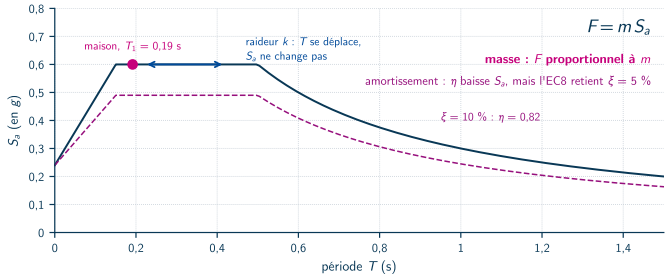
- Seule la **réduction de la masse** réduit l'effort sismique de calcul
- **Raideur** : la période change mais reste sur le plateau, S_a ne change pas
- **Masse** : $F = m\,S_a$, l'effort est proportionnel à la masse



Réponse 5 : la masse

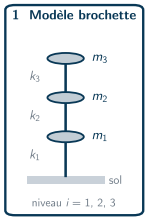
Spectre réglementaire

- Seule la **réduction de la masse** réduit l'effort sismique de calcul
- **Raideur** : la période change mais reste sur le plateau, S_a ne change pas
- **Masse** : $F = m\,S_a$, l'effort est proportionnel à la masse
- **Amortissement** : η réduit S_a, mais l'Eurocode 8 retient $\xi = 5\,\%$ sauf justification par des essais



Plusieurs niveaux : analyse modale spectrale

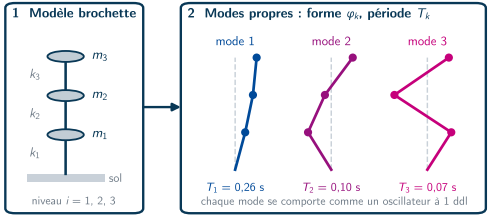
Spectre réglementaire



Indices : i niveau, k mode. φ_k forme du mode k, Γ_k facteur de participation, M_k^* masse modale effective. Bâtiment de trois niveaux, $m = 200, 200, 150$ t, $k = 500$ MN/m par niveau. EN 1998-1 § 4.3.3.3.

Plusieurs niveaux : analyse modale spectrale

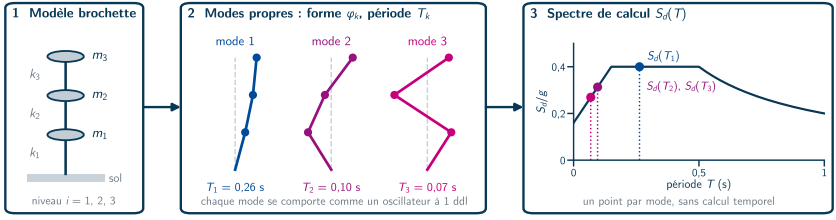
Spectre réglementaire



Indices : i niveau, k mode. φ_k forme du mode k, Γ_k facteur de participation, M_k^* masse modale effective. Bâtiment de trois niveaux, $m = 200, 200, 150$ t, $k = 500$ MN/m par niveau. EN 1998-1 § 4.3.3.3.

Plusieurs niveaux : analyse modale spectrale

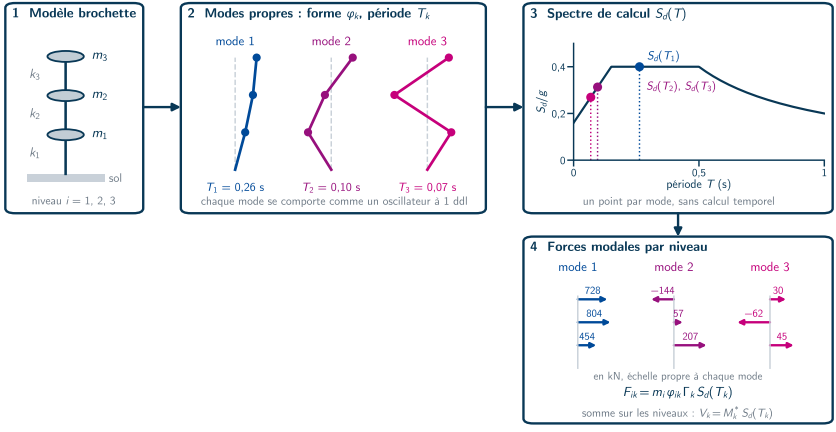
Spectre réglementaire



Indices : i niveau, k mode. φ_k forme du mode k, Γ_k facteur de participation, M_k^* masse modale effective. Bâtiment de trois niveaux, $m = 200, 200, 150$ t, $k = 500$ MN/m par niveau. EN 1998-1 § 4.3.3.3.

Plusieurs niveaux : analyse modale spectrale

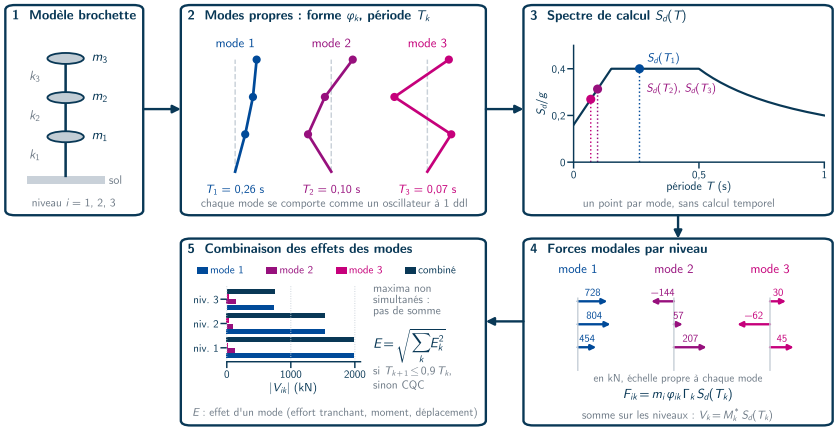
Spectre réglementaire



Indices : i niveau, k mode. φ_k forme du mode k, Γ_k facteur de participation, M_k^* masse modale effective. Bâtiment de trois niveaux, $m = 200$, 200, 150 t, $k = 500$ MN/m par niveau. EN 1998-1 § 4.3.3.3.

Plusieurs niveaux : analyse modale spectrale

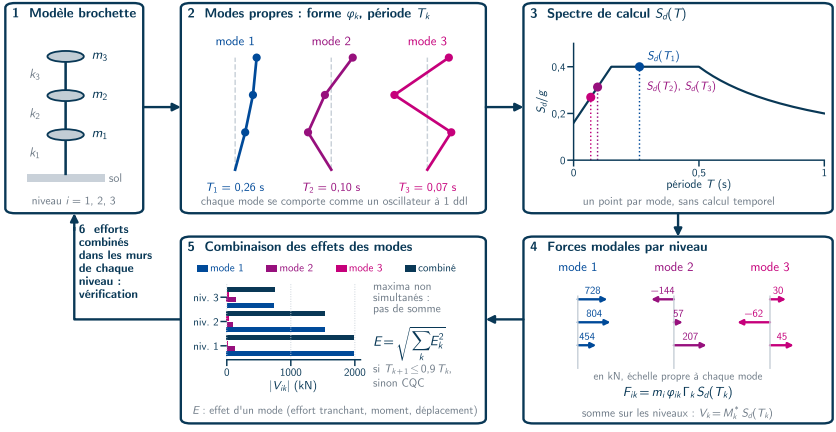
Spectre réglementaire



Indices : i niveau, k mode. φ_k forme du mode k, Γ_k facteur de participation, M_k^* masse modale effective. Bâtiment de trois niveaux, $m = 200$, 200, 150 t, $k = 500$ MN/m par niveau. EN 1998-1 § 4.3.3.3.

Plusieurs niveaux : analyse modale spectrale

Spectre réglementaire

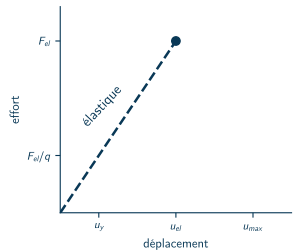


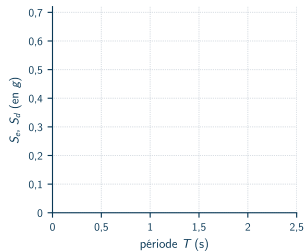
Indices : i niveau, k mode. φ_k forme du mode k, Γ_k facteur de participation, M_k^* masse modale effective. Bâtiment de trois niveaux, $m = 200, 200, 150$ t, $k = 500$ MN/m par niveau. EN 1998-1 § 4.3.3.3.

Comportement élastique ou élastoplastique

Coefficient de comportement q

- Comportement **élastique** : la structure doit résister à l'effort F_{el}, très élevé



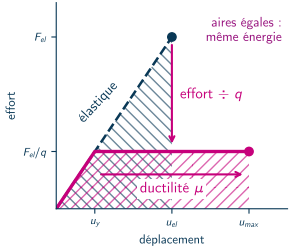


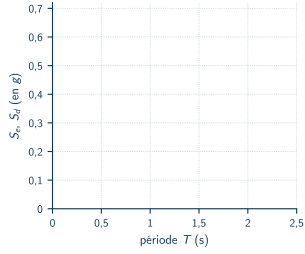
EN 1998-1 § 2.1, § 3.2.2.5 et annexe B. Équivalence énergétique : Tomaževič (1999).

Comportement élastique ou élastoplastique

Coefficient de comportement q

- Comportement **élastique** : la structure doit résister à l'effort F_{el}, très élevé
- Comportement **élastoplastique** : la structure se déforme sans atteindre la rupture ; l'effort de dimensionnement est **divisé par** q
- **Équivalence énergétique** : le palier plastique absorbe la même énergie que le comportement élastique, au prix d'une **ductilité** $\mu = u_{max}/u_y$, avec $q = \sqrt{2\mu - 1}$



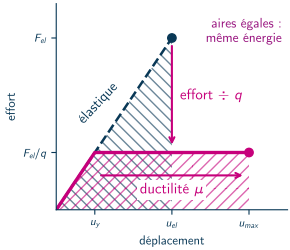


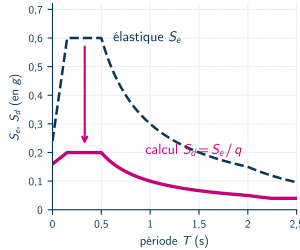
EN 1998-1 § 2.1, § 3.2.2.5 et annexe B. Équivalence énergétique : Tomaževič (1999).

Comportement élastique ou élastoplastique

Coefficient de comportement q

- Comportement **élastique** : la structure doit résister à l'effort F_{el}, très élevé
- Comportement **élastoplastique** : la structure se déforme sans atteindre la rupture ; l'effort de dimensionnement est **divisé par** q
- **Équivalence énergétique** : le palier plastique absorbe la même énergie que le comportement élastique, au prix d'une **ductilité** $\mu = u_{max}/u_y$, avec $q = \sqrt{2\mu - 1}$





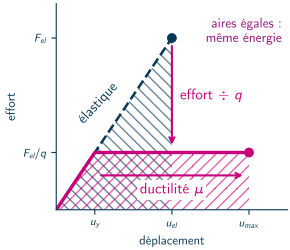
- Spectre de calcul $S_d = S_e/q$

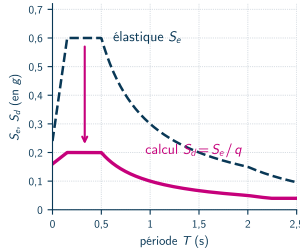
EN 1998-1 § 2.1, § 3.2.2.5 et annexe B. Équivalence énergétique : Tomaževič (1999).

Comportement élastique ou élastoplastique

Coefficient de comportement q

- Comportement **élastique** : la structure doit résister à l'effort F_{el}, très élevé
- Comportement **élastoplastique** : la structure se déforme sans atteindre la rupture ; l'effort de dimensionnement est **divisé par** q
- **Équivalence énergétique** : le palier plastique absorbe la même énergie que le comportement élastique, au prix d'une **ductilité** $\mu = u_{max}/u_y$, avec $q = \sqrt{2\mu - 1}$





- Spectre de calcul $S_d = S_e/q$
- Terre crue : q **non couvert par l'Eurocode 8**, à justifier par des essais

EN 1998-1 § 2.1, § 3.2.2.5 et annexe B. Équivalence énergétique : Tomaževič (1999).

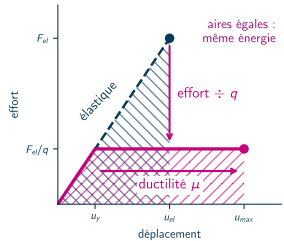
Question 6 : l'effort de calcul d'une maison

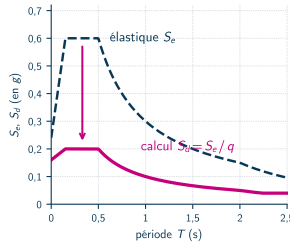
Coefficient q

Question 6 (Digistorm, nombre)

Maison en adobe de masse $m = 200$ t, sur un sol de classe B ($S = 1{,}2$), accélération de calcul $a_g = 0{,}2\,g$ avec $g = 9{,}81$ m/s², période sur le plateau. Avec $q = 3$, quel effort tranchant à la base $F_b = m\,S_d$, en kN ?

- $S_e = a_g\,S\,2{,}5$
- $S_d = S_e/q$



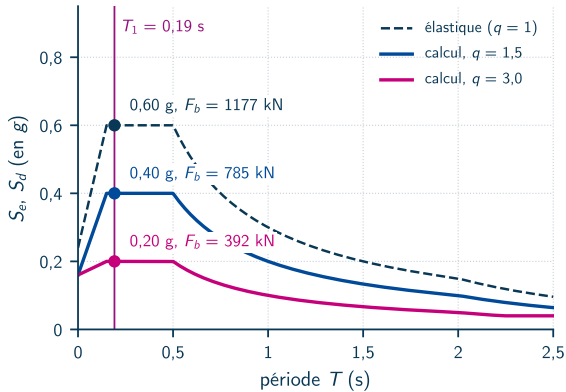


Tolérance : 5 %.

Réponse 6 : 392 kN

Coefficient q

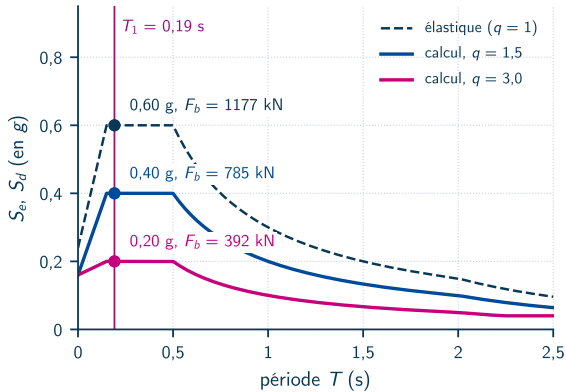
- L'effort tranchant à la base vaut **392 kN**
- $S_e = 0{,}2 \times 1{,}2 \times 2{,}5\,g = 0{,}60\,g$



Réponse 6 : 392 kN

Coefficient q

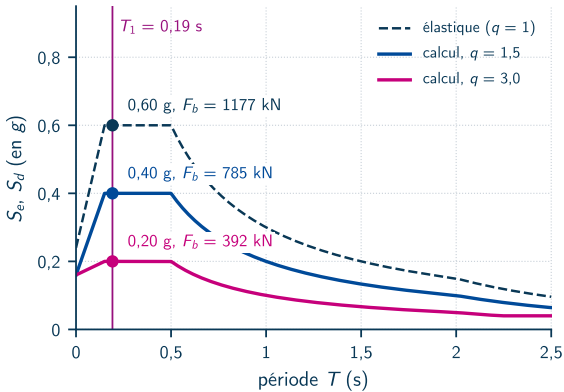
- L'effort tranchant à la base vaut **392 kN**
- $S_e = 0{,}2 \times 1{,}2 \times 2{,}5\,g = 0{,}60\,g$
- $S_d = S_e/q = 0{,}20\,g$ pour $q = 3$



Réponse 6 : 392 kN

Coefficient q

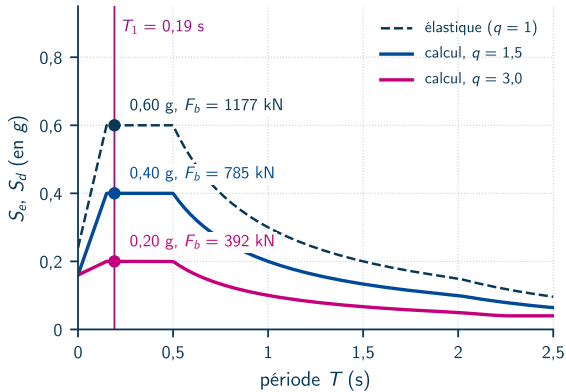
- L'effort tranchant à la base vaut **392 kN**
- $S_e = 0{,}2 \times 1{,}2 \times 2{,}5\,g = 0{,}60\,g$
- $S_d = S_e/q = 0{,}20\,g$ pour $q = 3$
- $F_b = 0{,}20 \times 9{,}81 \times 200 = 392$ **kN**, soit 20 % du poids, contre 785 kN pour $q = 1{,}5$



Réponse 6 : 392 kN

Coefficient q

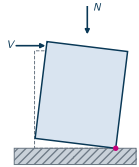
- L'effort tranchant à la base vaut **392 kN**
- $S_e = 0{,}2 \times 1{,}2 \times 2{,}5\,g = 0{,}60\,g$
- $S_d = S_e/q = 0{,}20\,g$ pour $q = 3$
- $F_b = 0{,}20 \times 9{,}81 \times 200 = 392$ **kN**, soit 20 % du poids, contre 785 kN pour $q = 1{,}5$
- Reste à **justifier** q : c'est l'objet de la partie 3



Vérifier un mur : trois mécanismes de rupture dans son plan

Vérification des murs

- Pourquoi : l'effort F_b se répartit entre les **murs de contreventement** parallèles au séisme, au prorata de leur raideur ; chaque mur vérifie $V \leq V_R$
- D'où : **EN 1998-3, annexe C** (murs de maçonnerie)



basculement

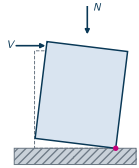
$$\frac{V}{N} = \frac{L}{2H}\left(1 - 1{,}15\frac{\sigma_0}{f_c}\right)$$

N, V efforts vertical et horizontal ; $\sigma_0 = N/(bL)$; f_c, f_t résistances en compression et en traction ; c, φ cohésion et angle de frottement.

Vérifier un mur : trois mécanismes de rupture dans son plan

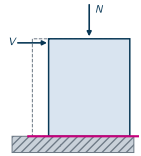
Vérification des murs

- Pourquoi : l'effort F_b se répartit entre les **murs de contreventement** parallèles au séisme, au prorata de leur raideur ; chaque mur vérifie $V \leq V_R$
- D'où : **EN 1998-3, annexe C** (murs de maçonnerie)
- **Basculement** : le mur pivote autour de son pied ; **glissement** : le mur glisse sur sa base ; **fissuration diagonale** : fissure en X



basculement

$\frac{V}{N} = \frac{L}{2H}\left(1 - 1{,}15\frac{\sigma_0}{f_c}\right)$



glissement

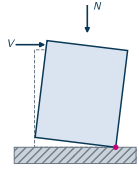
$\frac{V}{N} = \tan\varphi + \frac{c}{\sigma_0}$

N, V efforts vertical et horizontal ; $\sigma_0 = N/(bL)$; f_c, f_t résistances en compression et en traction ; c, φ cohésion et angle de frottement.

Vérifier un mur : trois mécanismes de rupture dans son plan

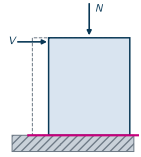
Vérification des murs

- Pourquoi : l'effort F_b se répartit entre les **murs de contreventement** parallèles au séisme, au prorata de leur raideur ; chaque mur vérifie $V \leq V_R$
- D'où : **EN 1998-3, annexe C** (murs de maçonnerie)
- **Basculement** : le mur pivote autour de son pied ; **glissement** : le mur glisse sur sa base ; **fissuration diagonale** : fissure en X
- V_R : le **plus faible** des trois efforts résistants



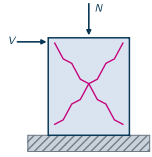
basculement

$$\frac{V}{N} = \frac{L}{2H}\left(1 - 1{,}15\frac{\sigma_0}{f_c}\right)$$



glissement

$$\frac{V}{N} = \tan\varphi + \frac{c}{\sigma_0}$$



fissuration diagonale

$$\frac{V}{N} = \frac{f_t}{b\,\sigma_0}\sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_t}}$$

N, V efforts vertical et horizontal ; $\sigma_0 = N/(bL)$; f_c, f_t résistances en compression et en traction ; c, φ cohésion et angle de frottement.

3

La terre crue, du matériau au bâtiment

1. Dynamique des structures

2. Le dimensionnement parasismique : l'Eurocode 8

3. La terre crue, du matériau au bâtiment

Partie 3 : cheminement

Objectifs

- **Matériau** : caractéristiques physiques et mécaniques



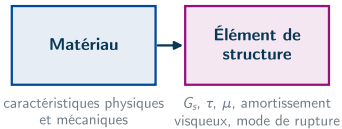
caractéristiques physiques
et mécaniques

Essais du laboratoire 3SR et manuscrit d'HDR de l'auteur (chapitre renforcement).

Partie 3 : cheminement

Objectifs

- **Matériau** : caractéristiques physiques et mécaniques
- **Élément de structure** : module de cisaillement G_s, résistance au cisaillement τ, ductilité μ, amortissement visqueux équivalent (Kumar et al. 2015), mode de rupture

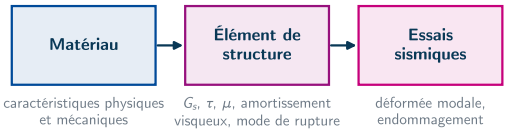


Essais du laboratoire 3SR et manuscrit d'HDR de l'auteur (chapitre renforcement).

Partie 3 : cheminement

Objectifs

- **Matériau** : caractéristiques physiques et mécaniques
- **Élément de structure** : module de cisaillement G_s, résistance au cisaillement τ, ductilité μ, amortissement visqueux équivalent (Kumar et al. 2015), mode de rupture
- **Essais sismiques** : déformée modale, endommagement

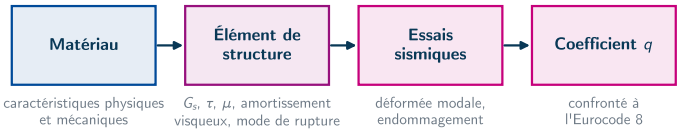


Essais du laboratoire 3SR et manuscrit d'HDR de l'auteur (chapitre renforcement).

Partie 3 : cheminement

Objectifs

- **Matériau** : caractéristiques physiques et mécaniques
- **Élément de structure** : module de cisaillement G_s, résistance au cisaillement τ, ductilité μ, amortissement visqueux équivalent (Kumar et al. 2015), mode de rupture
- **Essais sismiques** : déformée modale, endommagement
- **Coefficient de comportement** q : confronté à l'Eurocode 8



Essais du laboratoire 3SR et manuscrit d'HDR de l'auteur (chapitre renforcement).

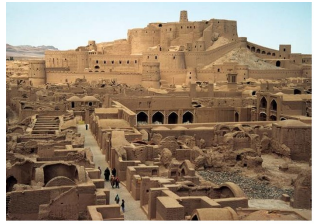
Question 7 : origine de la vulnérabilité sismique ?

Objectifs

Question 7 (Digistorm, sondage)

Selon vous, la vulnérabilité sismique d'un bâtiment en terre tient d'abord :

- au **matériau**
- à la **géométrie**
- aux **connexions** entre murs et avec la toiture



Citadelle de Bam avant 2003



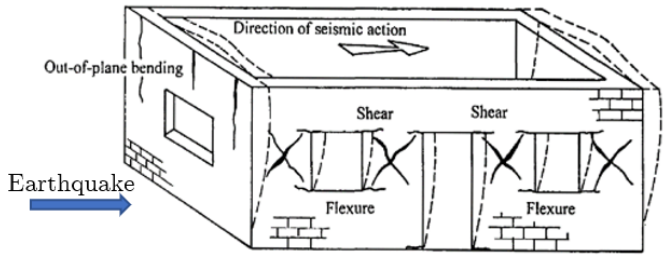
Après le séisme du 26 décembre 2003

Une réponse.

Réponse 7 : les trois, et les connexions décident du mode de ruine

Objectifs

- Les trois facteurs comptent ; les **connexions** décident du mode de ruine



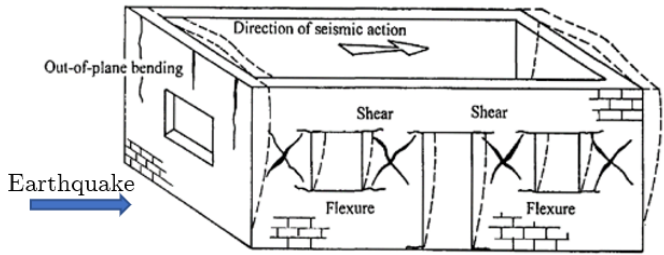
[Tomaževič 1999]

Tomaževič (1999).

Réponse 7 : les trois, et les connexions décident du mode de ruine

Objectifs

- Les trois facteurs comptent ; les **connexions** décident du mode de ruine
- **Matériau** : résistances en traction et en cisaillement faibles



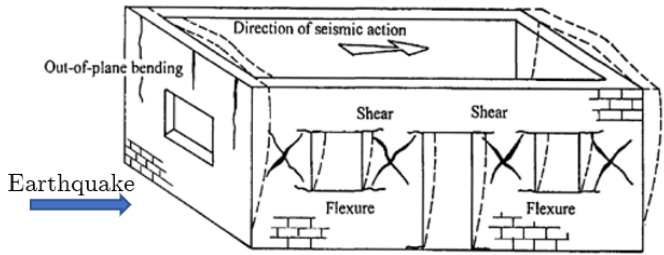
[Tomaževič 1999]

Tomaževič (1999).

Réponse 7 : les trois, et les connexions décident du mode de ruine

Objectifs

- Les trois facteurs comptent ; les **connexions** décident du mode de ruine
- **Matériau** : résistances en traction et en cisaillement faibles
- **Géométrie** : élancement des murs, ouvertures



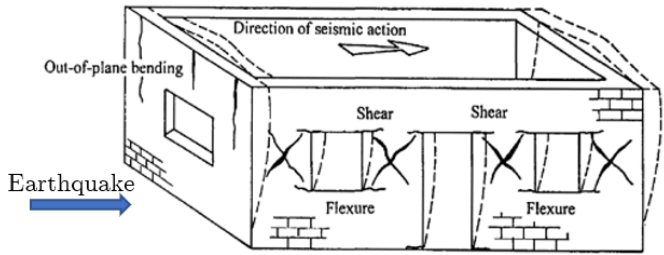
[Tomaževič 1999]

Tomaževič (1999).

Réponse 7 : les trois, et les connexions décident du mode de ruine

Objectifs

- Les trois facteurs comptent ; les **connexions** décident du mode de ruine
- **Matériau** : résistances en traction et en cisaillement faibles
- **Géométrie** : élancement des murs, ouvertures
- **Connexions** entre murs et avec la toiture : elles décident si les murs travaillent **ensemble** ou **un par un**



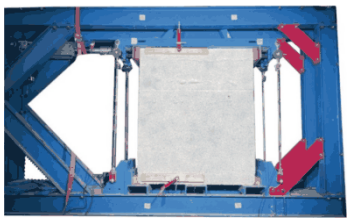
[Tomaževič 1999]

Tomaževič (1999).

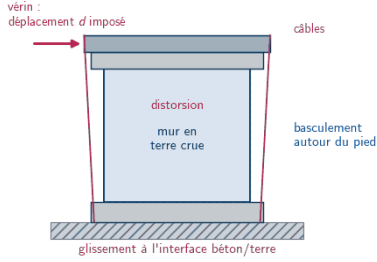
L'essai cyclique sur mur

Mur

- Déplacement imposé en tête, **cycles d'amplitude croissante**, trois cycles par palier



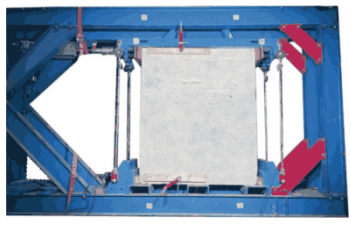
portique du laboratoire 3SR, mur de 1,00 × 1,00 × 0,25 m



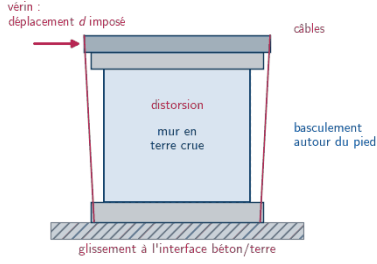
L'essai cyclique sur mur

Mur

- Déplacement imposé en tête, **cycles d'amplitude croissante**, trois cycles par palier
- Sur ce portique, le déplacement en tête combine le **basculement** du mur, le **glissement** aux interfaces béton/terre (partie 2) et la **distorsion** du mur ; leur part dépend du moyen de mesure



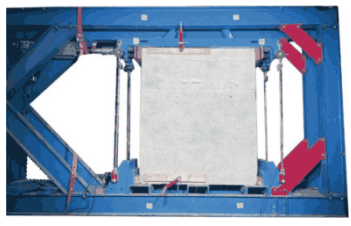
portique du laboratoire 3SR, mur de 1,00 × 1,00 × 0,25 m



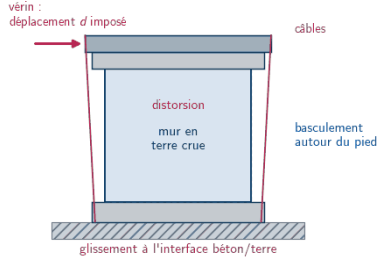
L'essai cyclique sur mur

Mur

- Déplacement imposé en tête, **cycles d'amplitude croissante**, trois cycles par palier
- Sur ce portique, le déplacement en tête combine le **basculement** du mur, le **glissement** aux interfaces béton/terre (partie 2) et la **distorsion** du mur ; leur part dépend du moyen de mesure
- Protocole et bilinéarisation : ISO 21581, **ASTM E2126** ; essai **non couvert par l'Eurocode 8**

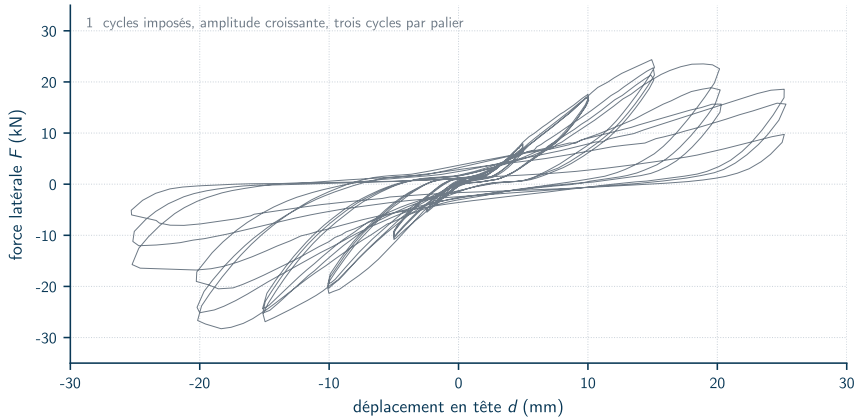


portique du laboratoire 3SR, mur de 1,00 × 1,00 × 0,25 m



Lire une courbe cyclique

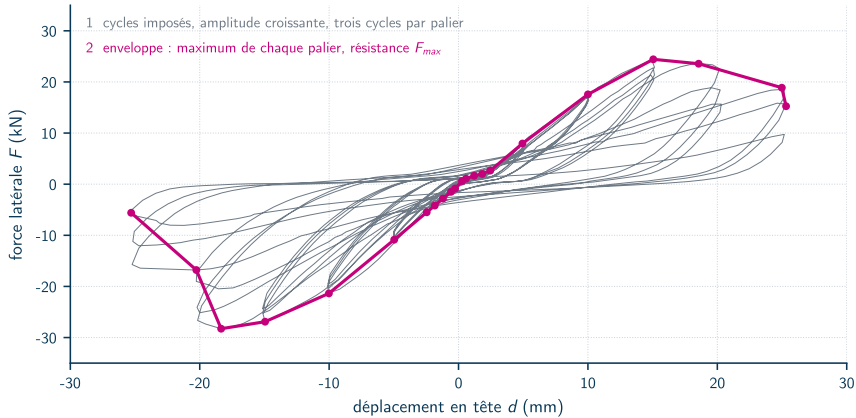
Mur



Mur en briques de terre moulées avec bande en bois (2021_yadav_BTM_bois), 1,00 × 1,00 × 0,25 m, portique 3SR.

Lire une courbe cyclique

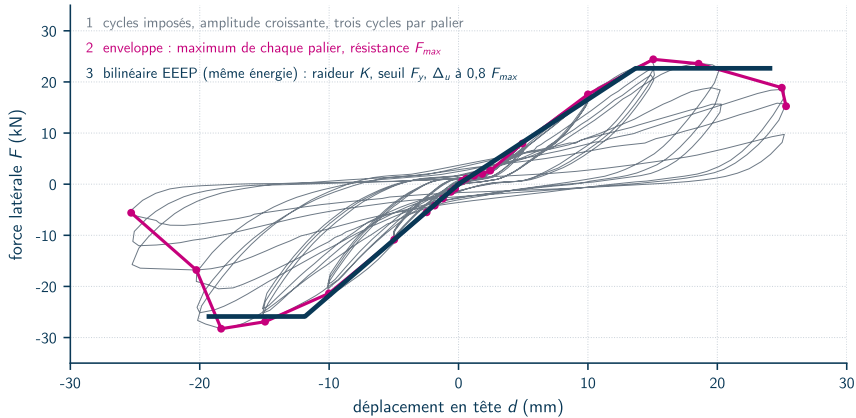
Mur



Mur en briques de terre moulées avec bande en bois (2021_yadav_BTM_bois), 1,00 × 1,00 × 0,25 m, portique 3SR.

Lire une courbe cyclique

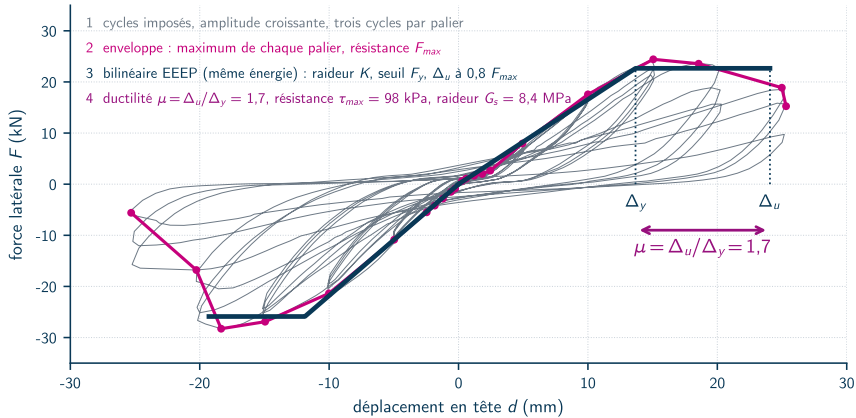
Mur



Mur en briques de terre moulées avec bande en bois (2021_yadav_BTM_bois), 1,00 × 1,00 × 0,25 m, portique 3SR.

Lire une courbe cyclique

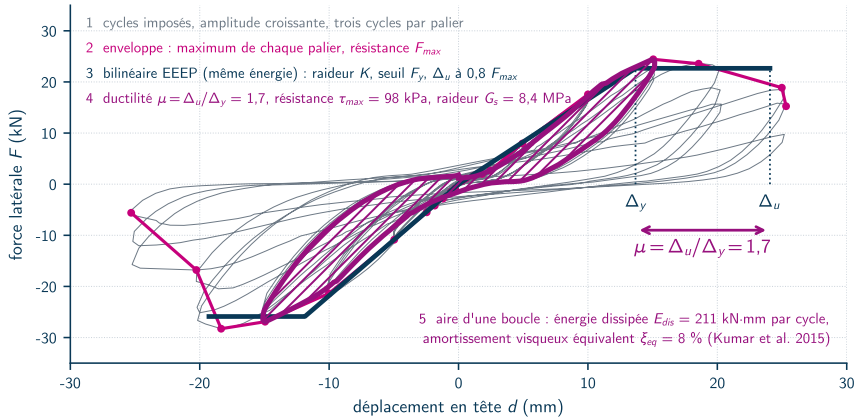
Mur



Mur en briques de terre moulées avec bande en bois (2021_yadav_BTM_bois), 1,00 × 1,00 × 0,25 m, portique 3SR.

Lire une courbe cyclique

Mur



Mur en briques de terre moulées avec bande en bois (2021_yadav_BTM_bois), 1,00 × 1,00 × 0,25 m, portique 3SR.

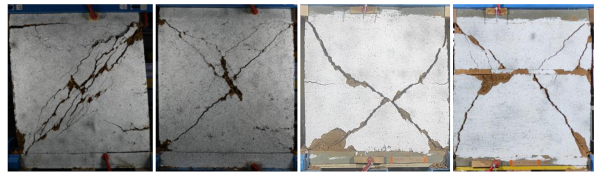
Question 8 : ce que la géogrille change

Renforcement

Question 8 (Digistorm, choix multiples)

Selon vous, sur un mur en pisé, une nappe de géogrille toutes les deux couches modifie surtout :

- la **raideur initiale**
- la **résistance au pic**
- la **ductilité**
- l'**amortissement**



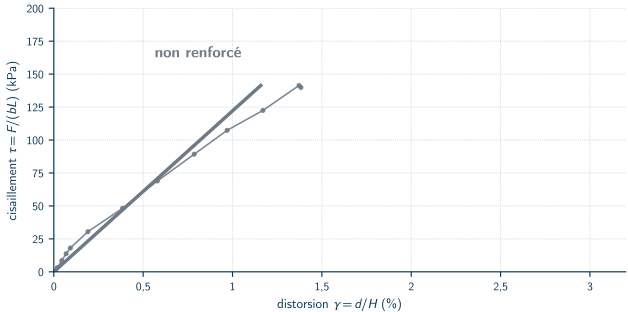
(a) S.R.geo1 (b) S.R.geo2 (c) S.R.coco (d) S.R.wood

Faciès, de gauche à droite : géogrille à chaque couche, toutes les deux couches, nappe de coco, bande en bois.

Réponse 8 : la ductilité et l'amortissement

Renforcement

- La géogrille modifie surtout la **ductilité** et l'**amortissement** ; la raideur initiale et la résistance au pic changent peu
- Pisé non renforcé : **fissuration diagonale** (fissure en X), **rupture fragile**, $\mu = 1$

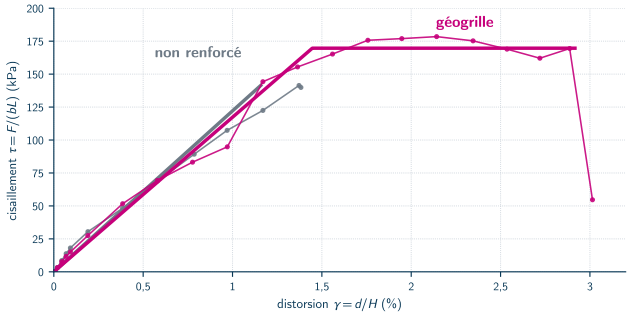


Campagne pisé 3SR 2020-2022, un essai par configuration.

Réponse 8 : la ductilité et l'amortissement

Renforcement

- La géogrille modifie surtout la **ductilité** et l'**amortissement** ; la raideur initiale et la résistance au pic changent peu
- Pisé non renforcé : **fissuration diagonale** (fissure en X), **rupture fragile**, $\mu = 1$
- Géogrille : **raideur inchangée**, résistance augmentée de 10 %, **palier plastique doublé**, $\mu = 2{,}2$
- La nappe **coud la fissure** : la ductilité et l'énergie dissipée augmentent

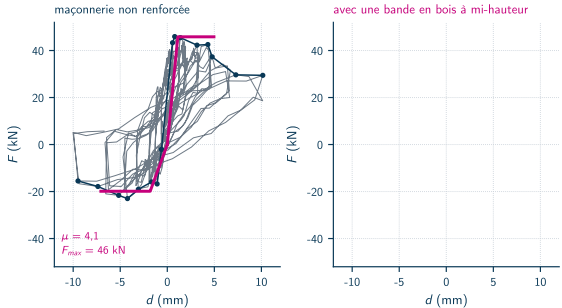


Campagne pisé 3SR 2020-2022, un essai par configuration.

Renforcer la maçonnerie : la bande sismique en bois

Renforcement

- Maçonnerie de briques de terre, confinement 0,2 MPa (INSA Toulouse) : $\mu = 4{,}1$

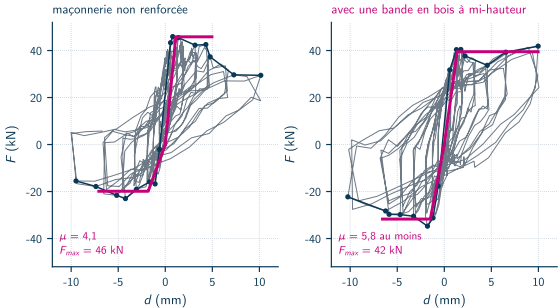


Aranguren et al. (2020). Ordres de grandeur, q se définit à l'échelle du bâtiment.

Renforcer la maçonnerie : la bande sismique en bois

Renforcement

- Maçonnerie de briques de terre, confinement 0,2 MPa (INSA Toulouse) : $\mu = 4{,}1$
- Bande en bois à mi-hauteur : elle sert de **fusible** ; la fissuration se localise à l'**interface échelle/mortier**, où se développe un **frottement de Coulomb**
- Ductilité $\mu \geq 5{,}8$, boucles plus larges

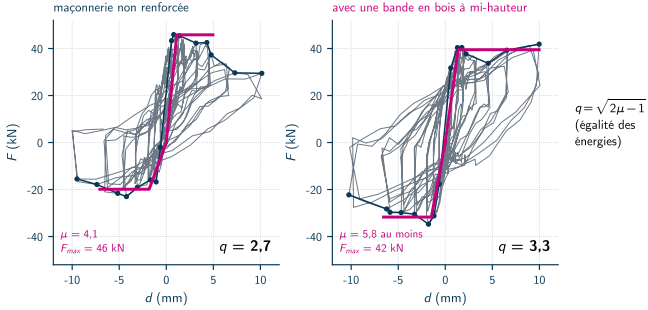


Aranguren et al. (2020). Ordres de grandeur, q se définit à l'échelle du bâtiment.

Renforcer la maçonnerie : la bande sismique en bois

Renforcement

- Maçonnerie de briques de terre, confinement 0,2 MPa (INSA Toulouse) : $\mu = 4{,}1$
- Bande en bois à mi-hauteur : elle sert de **fusible** ; la fissuration se localise à l'**interface échelle/mortier**, où se développe un **frottement de Coulomb**
- Ductilité $\mu \geq 5{,}8$, boucles plus larges



- $q = 2{,}7$ **puis** $3{,}3$, avec $q = \sqrt{2\mu - 1}$, contre 1,5 à 2,5 dans l'Eurocode 8 (maçonnerie non armée)

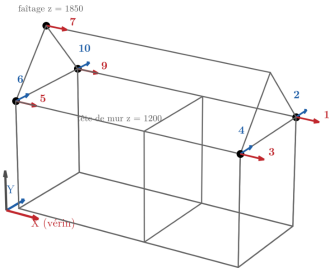
Aranguren et al. (2020). Ordres de grandeur, q se définit à l'échelle du bâtiment.

Essais sismiques : trois maquettes sur table vibrante

Maison

- Maquettes à l'**échelle 1/2** : 3,23 × 1,58 m, murs de 1,20 m, 3,7 à 4,0 t ; sans bande, bande bois, bande béton armé





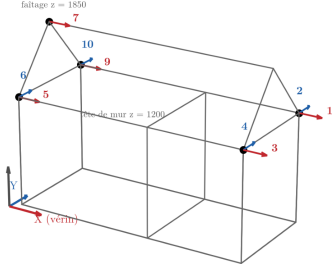
Yadav et al. (2023), manuscrit HDR. Photographie Y. Sieffert.

Essais sismiques : trois maquettes sur table vibrante

Maison

- Maquettes à l'**échelle 1/2** : 3,23 × 1,58 m, murs de 1,20 m, 3,7 à 4,0 t ; sans bande, bande bois, bande béton armé
- Similitude de **Cauchy** : accélérations multipliées par 2, durées divisées par 2 ; table vibrante du **FCBA**, séisme selon X





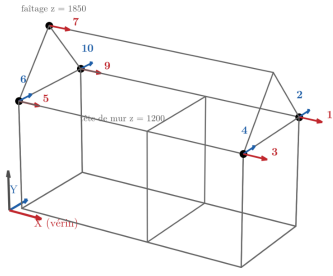
Yadav et al. (2023), manuscrit HDR. Photographie Y. Sieffert.

Essais sismiques : trois maquettes sur table vibrante

Maison

- Maquettes à l'**échelle 1/2** : 3,23 × 1,58 m, murs de 1,20 m, 3,7 à 4,0 t ; sans bande, bande bois, bande béton armé
- Similitude de **Cauchy** : accélérations multipliées par 2, durées divisées par 2 ; table vibrante du **FCBA**, séisme selon X
- Accéléromètres en tête de mur et au faîtage : **fréquences**, **amortissement**, efforts





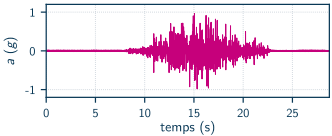
Yadav et al. (2023), manuscrit HDR. Photographie Y. Sieffert.

Essais sismiques : le protocole de chargement

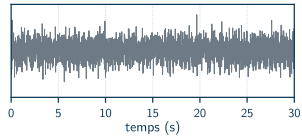
Maison

- **Séisme** : signal de Guadeloupe, joué à **intensité croissante**
- **Bruit blanc** de faible amplitude avant et après chaque séisme : fréquence propre et amortissement

séisme : signal de Guadeloupe, 112 %



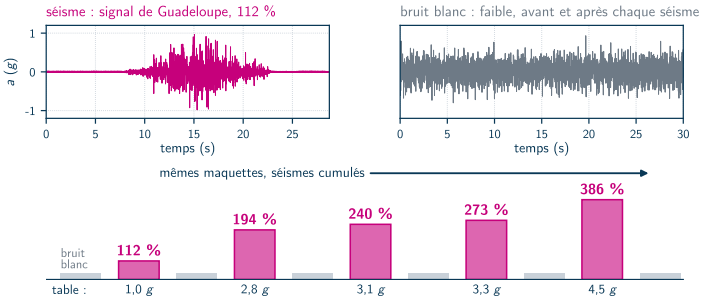
bruit blanc : faible, avant et après chaque séisme



Essais sismiques : le protocole de chargement

Maison

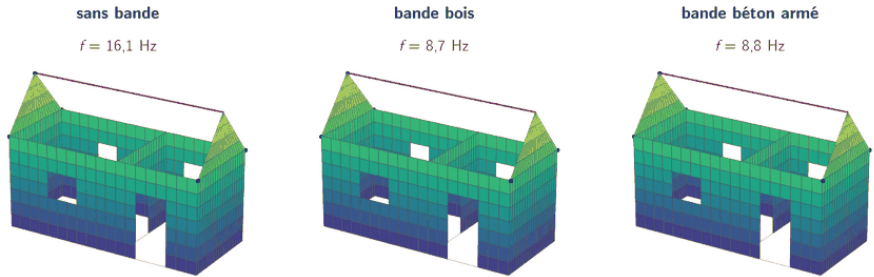
- **Séisme** : signal de Guadeloupe, joué à **intensité croissante**
- **Bruit blanc** de faible amplitude avant et après chaque séisme : fréquence propre et amortissement
- Séismes de 112 à 386 % du signal : accélération maximale de la table de **1 à 4,5** g (maquette)
- Mêmes maquettes : **séismes cumulés**, l'endommagement s'accumule



Essais sismiques : la déformée modale

Maison

- **Mode 1** : translation dans la direction du séisme, 88 à 91 % du mouvement

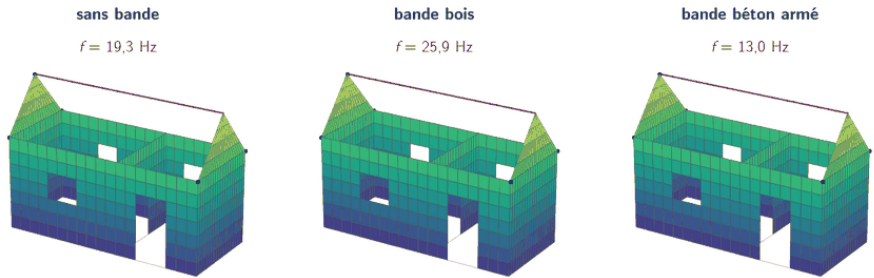


Identification modale (SSI-COV) sur les bruits blancs : état initial, sauf la bande bois (après le séisme de 112 %, état initial non mesuré). Fréquences des maquettes. Manuscrit HDR.

Essais sismiques : la déformée modale

Maison

- **Mode 1** : translation dans la direction du séisme, 88 à 91 % du mouvement
- Mode 2 : **torsion** et translation transversale

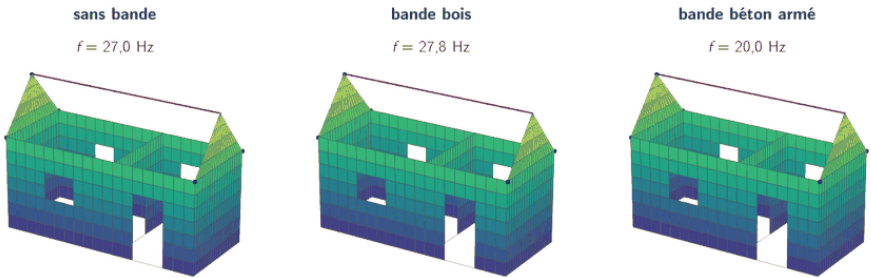


Identification modale (SSI-COV) sur les bruits blancs : état initial, sauf la bande bois (après le séisme de 112 %, état initial non mesuré). Fréquences des maquettes. Manuscrit HDR.

Essais sismiques : la déformée modale

Maison

- **Mode 1** : translation dans la direction du séisme, 88 à 91 % du mouvement
- Mode 2 : **torsion** et translation transversale
- Mode 3 : modes couplés, à fréquence plus élevée

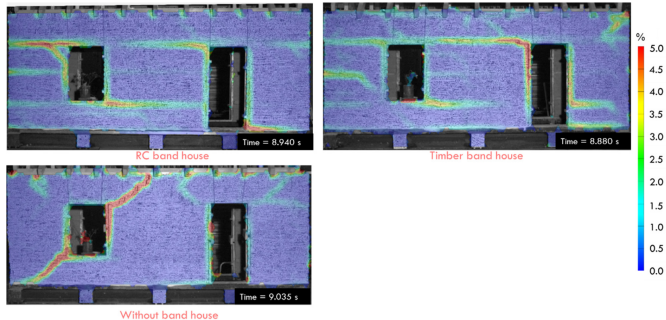


Identification modale (SSI-COV) sur les bruits blancs : état initial, sauf la bande bois (après le séisme de 112 %, état initial non mesuré). Fréquences des maquettes. Manuscrit HDR.

Essais sismiques : modes de rupture (corrélation d'images)

Maison

- Déformation principale majeure du mur sollicité dans son plan, séisme de 194 %

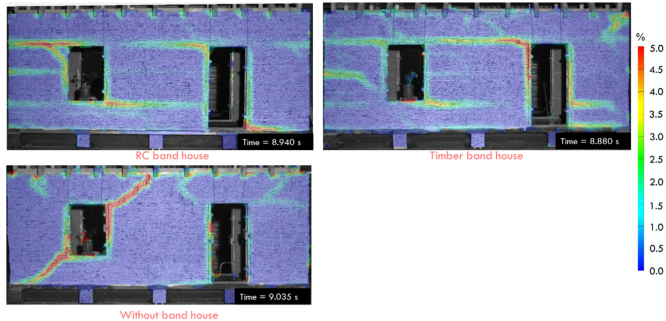


Yadav et al. (2023), figure 21 ; manuscrit HDR. Échelle de couleur de 0 à 5 %.

Essais sismiques : modes de rupture (corrélation d'images)

Maison

- Déformation principale majeure du mur sollicité dans son plan, séisme de 194 %
- Sans bande : **fissure diagonale** partant de l'angle de la fenêtre

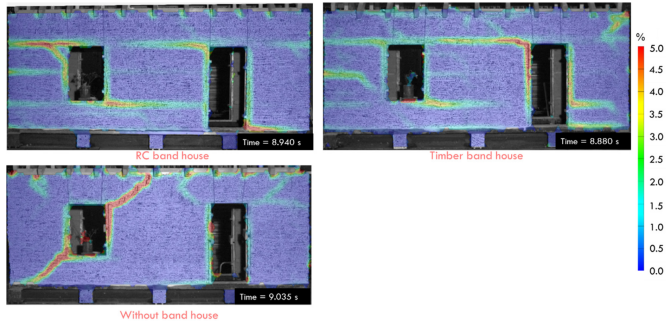


Yadav et al. (2023), figure 21 ; manuscrit HDR. Échelle de couleur de 0 à 5 %.

Essais sismiques : modes de rupture (corrélation d'images)

Maison

- Déformation principale majeure du mur sollicité dans son plan, séisme de 194 %
- Sans bande : **fissure diagonale** partant de l'angle de la fenêtre
- Avec bande : la déformation se localise **le long des bandes**, par **glissement** aux interfaces bande/mortier

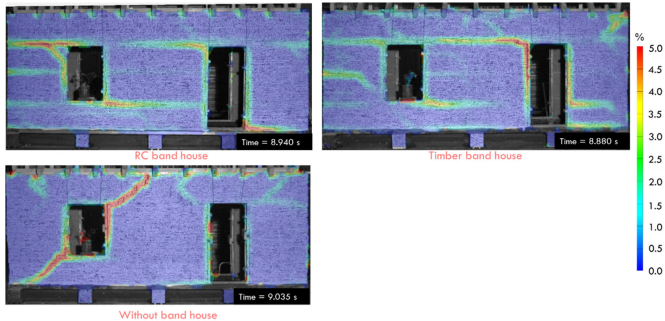


Yadav et al. (2023), figure 21 ; manuscrit HDR. Échelle de couleur de 0 à 5 %.

Essais sismiques : modes de rupture (corrélation d'images)

Maison

- Déformation principale majeure du mur sollicité dans son plan, séisme de 194 %
- Sans bande : **fissure diagonale** partant de l'angle de la fenêtre
- Avec bande : la déformation se localise **le long des bandes**, par **glissement** aux interfaces bande/mortier
- Les bandes déplacent la rupture d'une fissure diagonale vers des plans horizontaux de glissement

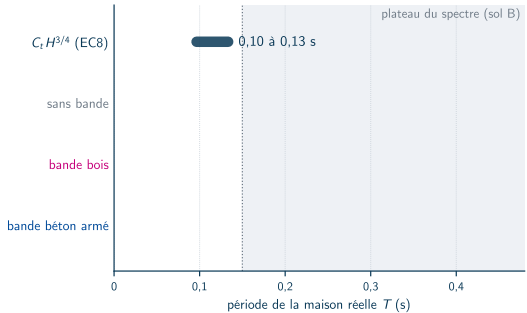


Yadav et al. (2023), figure 21 ; manuscrit HDR. Échelle de couleur de 0 à 5 %.

La période mesurée face à l'approche simplifiée

Maison

- $T_1 = C_t\, H^{3/4}$: 0,10 à 0,13 s pour H de 2,4 à 3,7 m (maison réelle)

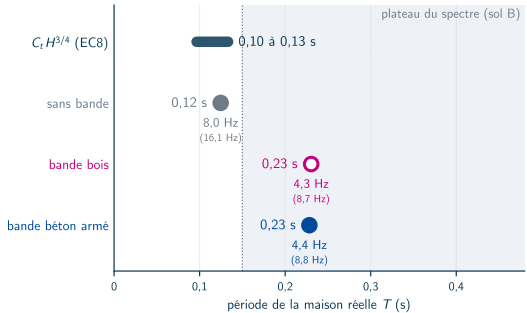


Sous chaque point, la fréquence propre de la maison réelle et, entre parenthèses, celle mesurée sur la maquette. Cercle plein : avant séisme ; cercle creux : bande bois, première mesure après le séisme de 112 % ; losange : après le dernier séisme.

La période mesurée face à l'approche simplifiée

Maison

- $T_1 = C_t\, H^{3/4}$: 0,10 à 0,13 s pour H de 2,4 à 3,7 m (maison réelle)
- Similitude de Cauchy : fréquence de la maison réelle égale à la **moitié** de celle de la maquette, $T = 1/f$
- Première mesure : 8,0 Hz sans bande, 4,3 et 4,4 Hz avec bande à l'échelle 1, soit 0,12 s et **0,23 s**

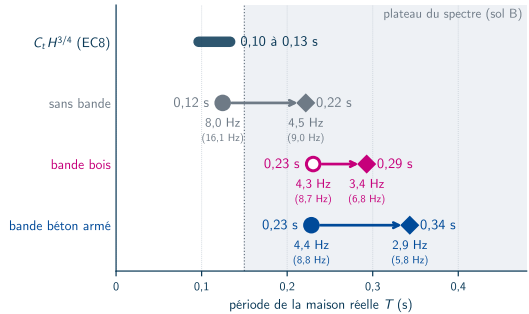


Sous chaque point, la fréquence propre de la maison réelle et, entre parenthèses, celle mesurée sur la maquette. Cercle plein : avant séisme ; cercle creux : bande bois, première mesure après le séisme de 112 % ; losange : après le dernier séisme.

La période mesurée face à l'approche simplifiée

Maison

- $T_1 = C_t\, H^{3/4}$: 0,10 à 0,13 s pour H de 2,4 à 3,7 m (maison réelle)
- Similitude de Cauchy : fréquence de la maison réelle égale à la **moitié** de celle de la maquette, $T = 1/f$
- Première mesure : 8,0 Hz sans bande, 4,3 et 4,4 Hz avec bande à l'échelle 1, soit 0,12 s et **0,23 s**
- Après le dernier séisme : période multipliée par **1,3 à 1,8**, c'est l'**endommagement**



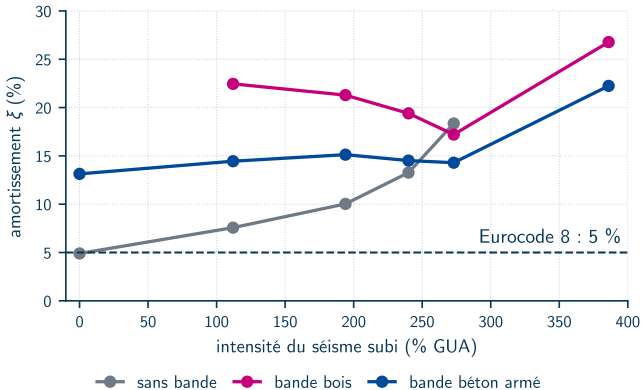
- La hauteur H ne rend compte ni des **détails constructifs** ni de l'**endommagement**

Sous chaque point, la fréquence propre de la maison réelle et, entre parenthèses, celle mesurée sur la maquette. Cercle plein : avant séisme ; cercle creux : bande bois, première mesure après le séisme de 112 % ; losange : après le dernier séisme.

Essais sismiques : amortissement et tenue hors plan

Maison

- **Amortissement** mesuré : 5 à 18 % sans bande, 13 à 27 % avec bande, contre **5 %** retenu par l'Eurocode 8

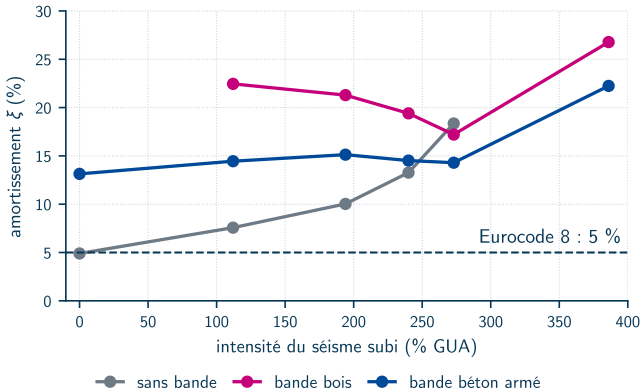


Yadav et al. (2023), FCBA.

Essais sismiques : amortissement et tenue hors plan

Maison

- **Amortissement** mesuré : 5 à 18 % sans bande, 13 à 27 % avec bande, contre **5 %** retenu par l'Eurocode 8
- Déplacement **hors plan** en tête de mur : 60 mm sans bande, 35 mm avec bande bois, 24 mm avec bande béton armé

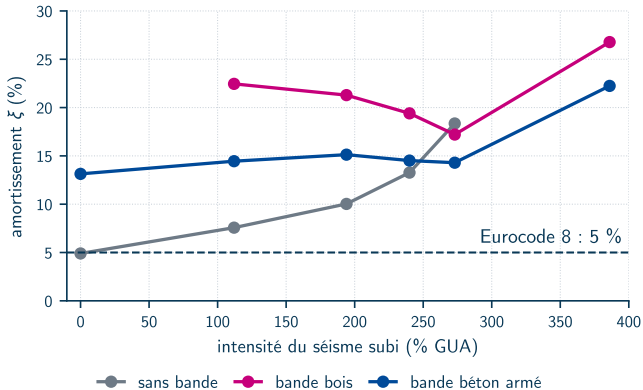


Yadav et al. (2023), FCBA.

Essais sismiques : amortissement et tenue hors plan

Maison

- **Amortissement** mesuré : 5 à 18 % sans bande, 13 à 27 % avec bande, contre **5 %** retenu par l'Eurocode 8
- Déplacement **hors plan** en tête de mur : 60 mm sans bande, 35 mm avec bande bois, 24 mm avec bande béton armé
- La bande joue le rôle d'un **chaînage** : elle limite le déplacement hors plan de la tête des murs

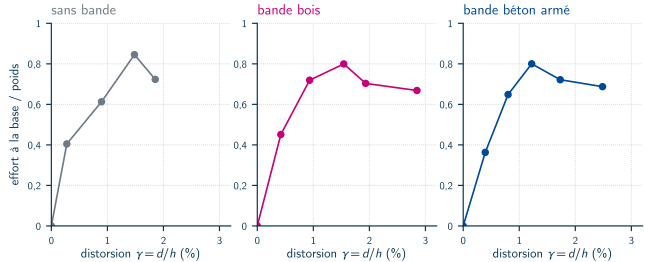


Yadav et al. (2023), FCBA.

Le coefficient de comportement mesuré sur les maquettes

Maison

- Un point par séisme : **effort tranchant à la base rapporté au poids** en fonction de la **distorsion** (déplacement en tête divisé par la hauteur)

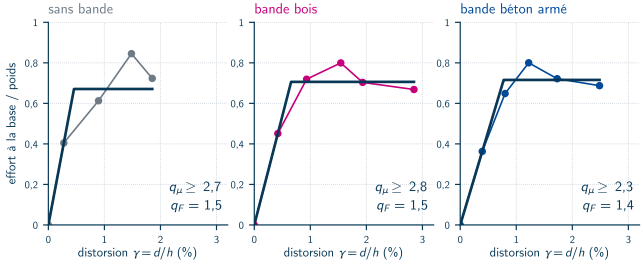


Tomaževič et Weiss (2010). Maquettes uniques, séismes cumulés.

Le coefficient de comportement mesuré sur les maquettes

Maison

- Un point par séisme : **effort tranchant à la base rapporté au poids** en fonction de la **distorsion** (déplacement en tête divisé par la hauteur)
- Modèle bilinéaire, comme pour les murs : ductilité μ
- Eurocode 8 (maçonnerie non armée) : 1,5 à 2,5 ; les essais **encadrent** la valeur réglementaire



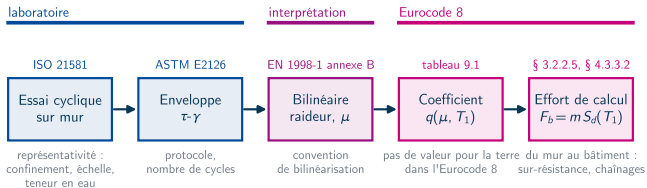
- $q_\mu = \sqrt{2\mu - 1}$ (équivalence énergétique) : $q_\mu \geq 2{,}3$ à $2{,}8$
- q_F : accélération spectrale élastique du séisme joué par la table (à la période de la maquette) divisée par l'accélération maximale mesurée en tête de la maquette : 1,4 à 1,5

Tomaževič et Weiss (2010). Maquettes uniques, séismes cumulés.

Synthèse : de l'essai au dimensionnement

Synthèse

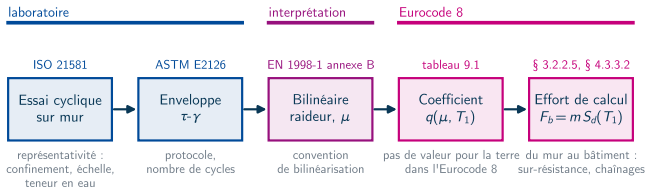
- **Raideur** : elle fixe la période, donc la position sur le spectre ; le renforcement ne la change pas, l'endommagement allonge la période



Synthèse : de l'essai au dimensionnement

Synthèse

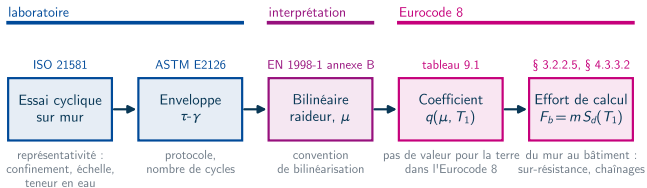
- **Raideur** : elle fixe la période, donc la position sur le spectre ; le renforcement ne la change pas, l'endommagement allonge la période
- **Amortissement** : 8 à 27 % mesurés, 5 % retenus par le règlement sans justification



Synthèse : de l'essai au dimensionnement

Synthèse

- **Raideur** : elle fixe la période, donc la position sur le spectre ; le renforcement ne la change pas, l'endommagement allonge la période
- **Amortissement** : 8 à 27 % mesurés, 5 % retenus par le règlement sans justification
- **Ductilité** : 1 pour la terre non renforcée, 2 à 6 avec bande ou nappe ; elle fixe q



Merci de votre attention

Synthèse

- Questions et discussion



(a) maquette sur la table vibrante du FCBA, toiture posée


(b) bande (échelle) en bois


(c) bande en béton armé

Sources

Synthèse

- Dynamique : Chopra, « Dynamics of Structures ». Boudaud (2023). Signal d'Haïti 2010 ; séismes A et B synthétiques (bruit filtré)
- Eurocode 8 : EN 1998-1 (2005), EN 1998-3 (2005). Tomaževič, « Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings » (1999). Fajfar (2000)

Sources

Synthèse

- Dynamique : Chopra, « Dynamics of Structures ». Boudaud (2023). Signal d'Haïti 2010 ; séismes A et B synthétiques (bruit filtré)
- Eurocode 8 : EN 1998-1 (2005), EN 1998-3 (2005). Tomaževič, « Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings » (1999). Fajfar (2000)
- Essais : ASTM E2126, ISO 21581. Laboratoire 3SR et INSA de Toulouse : Aranguren et al. (2020), Yadav (2021), Yadav et al. (2023), Durhône et al. (2026), manuscrit d'HDR de l'auteur (2026), chapitre « renforcement »

Sources

Synthèse

- Dynamique : Chopra, « Dynamics of Structures ». Boudaud (2023). Signal d'Haïti 2010 ; séismes A et B synthétiques (bruit filtré)
- Eurocode 8 : EN 1998-1 (2005), EN 1998-3 (2005). Tomaževič, « Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings » (1999). Fajfar (2000)
- Essais : ASTM E2126, ISO 21581. Laboratoire 3SR et INSA de Toulouse : Aranguren et al. (2020), Yadav (2021), Yadav et al. (2023), Durhône et al. (2026), manuscrit d'HDR de l'auteur (2026), chapitre « renforcement »
- Terre crue : Bui et al. (2022). Kumar et al. (2015), amortissement visqueux équivalent. Tomaževič et Weiss (2010). Signal de Guadeloupe restitué par la table vibrante du FCBA

Sources

Synthèse

- Dynamique : Chopra, « Dynamics of Structures ». Boudaud (2023). Signal d'Haïti 2010 ; séismes A et B synthétiques (bruit filtré)
- Eurocode 8 : EN 1998-1 (2005), EN 1998-3 (2005). Tomaževič, « Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings » (1999). Fajfar (2000)
- Essais : ASTM E2126, ISO 21581. Laboratoire 3SR et INSA de Toulouse : Aranguren et al. (2020), Yadav (2021), Yadav et al. (2023), Durhône et al. (2026), manuscrit d'HDR de l'auteur (2026), chapitre « renforcement »
- Terre crue : Bui et al. (2022). Kumar et al. (2015), amortissement visqueux équivalent. Tomaževič et Weiss (2010). Signal de Guadeloupe restitué par la table vibrante du FCBA
- Photographies : Y. Sieffert (maquettes), laboratoire 3SR (portique), Durhône et al. (faciès)