

# Analyse du comportement sous séisme des structures en matériaux bio et géo sourcées

3ème Ecole d'automne du GDR

Durabilité des matériaux de construction biosourcés

---



L. Daudeville<sup>1</sup>, Y. Malécot<sup>1</sup>, Y. Sieffert<sup>1</sup>, F. Vieux-Champagne<sup>1</sup> et al.

19 octobre 2023

<sup>1</sup>3SR lab, UGA



## Objectifs et contexte

---

- Origine de la sollicitation sismique
- Éléments clefs de dynamique des structures
- Contexte de la construction en matériaux bio et géo sourcé
- Éléments d'analyse de leur comportement sous séisme

# Architectures en terre

Une part importante de la population mondiale vit dans des habitations en terre.



**Figure 1:** Répartition des architectures en terre, portions de la grande muraille [2] Gwydion Williams (Flickr, creative commons)

# Architectures en terre

Une part importante de la population mondiale vit dans des habitations en terre.



(a) Shibam / Yémen, J. Tastaban



(b) Théra / île de Santorin, Grèce, A. titi



(c) Arche de Ctesiphon / Irak, R. Schwab



(d) Tuluk / Ethiopie, I. Odiaua

# Architectures en terre

Une part importante de la population mondiale vit dans des habitations en terre.



**(a)** Cité de Ghardaia, M'Zab valley / Algerie, M. Aupicon



**(b)** Palais de Saad Ibn Saud / Arabie Saoudite, T. Joffroy



**(c)** Maison fortifiée du Ksar d'Aït-Ben-Haddou / Maroc, S. Moriset



**(d)** Le mur d'enceinte de la ville de Ping Yao / Chine, T. Joffroy

# Architectures en terre

Une part importante de la population mondiale vit dans des habitations en terre.



**(a)** Quartier saint-Just, Lyon, D. Alex



**(b)** Villefontaine Domaine de la Terre, France, J.-M. Le Tiec



**(c)** Ecole de Villefranche, France, M.-N. Toinon



**(d)** Colombage, France. E. Westerveld

# Table of Contents

Objectifs et contexte

Séisme

Éléments de dynamique des structures<sup>1</sup>

Notions de calculs parasismique

Comportement sous séisme des structures en matériaux bio et géo-sourcés

    Pisé

    Paille porteuse avec enduit terre structurel

    Structures en maçonnerie

    Structures à ossature en bois avec remplissage

    Structures à ossature en bois avec remplissage

Conclusion

<sup>1</sup>Ce chapitre est basé sur le cours de [1]

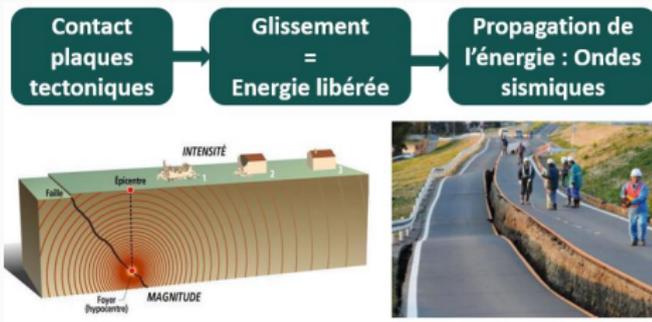
# Séisme

---

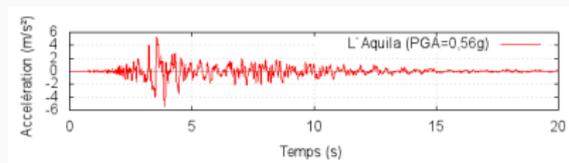
# Origine d'un séisme

Mouvement du sol à la surface dépend de :

- Energie libérée (Magnitude)
- Distance parcourue
- Milieux traversés (type de sols)



Mesure du mouvement du sol : accélérogramme



# Occurrence d'un séisme

M	Description	Fréquence
M<3	Non ressenti	8000 par jour
3<M<5	Ressenti, pas dommages	150 par jour
5<M<7	Dommages aux bâti non adaptés	900 par an
7<M<9	Dommages sévères	20 par an
M>9	Dommages sévères sur grande zone	1 à 5 par siècle

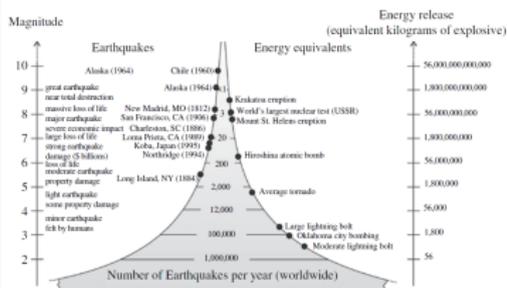
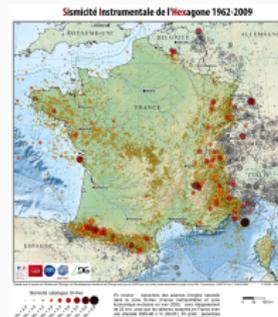


Figure 1.16 Correlation between magnitude and energy release. (After Bolt, 1999).



## Ces séismes ressentis récemment

Zones à risque: ● Très faible ● Faible ● Modérée ● Moyenne



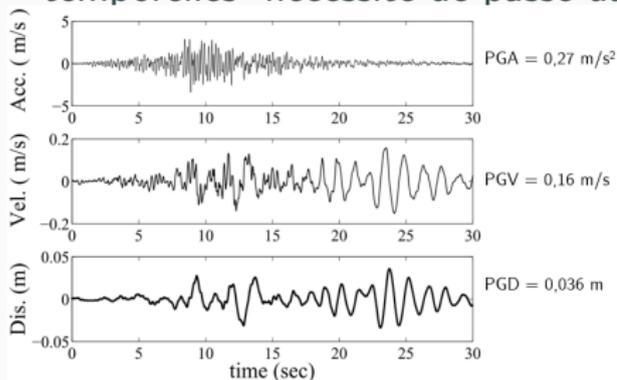
\* D'après les relevés sont faibles. L'INFORMAISON. SOURCES: PLANSISSEMI, BUREAU CENTRAL SISMOLOGIQUE FRANÇAIS.

# Contenu spectrale d'un séisme

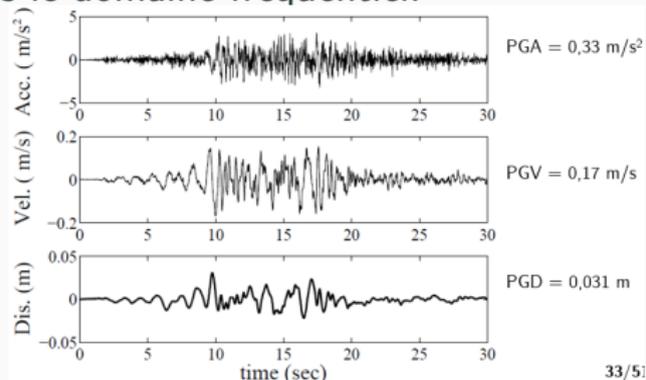
Un séisme est unique et sera plus ou moins nocif pour une structure donnée. Voici 2 contenus temporels correspondant à 2 séismes de magnitude proche.

## Observation

Difficile de conclure sur la nocivité potentielle à partir des temporelles nécessité de passer dans le domaine fréquentiel.



Données temporelles du séisme d'Haïti de 2010

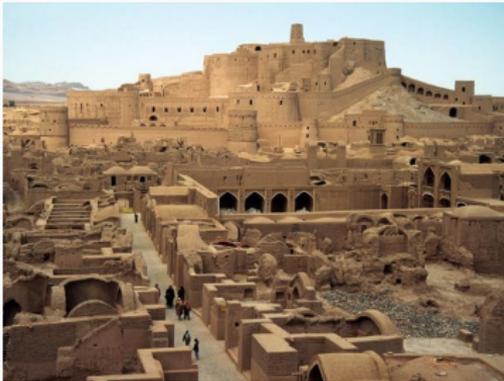


Données temporelle du signal de Guadeloupe

33/51

# Période de retour du séisme

- Importance de la période de retour sur les cultures constructives

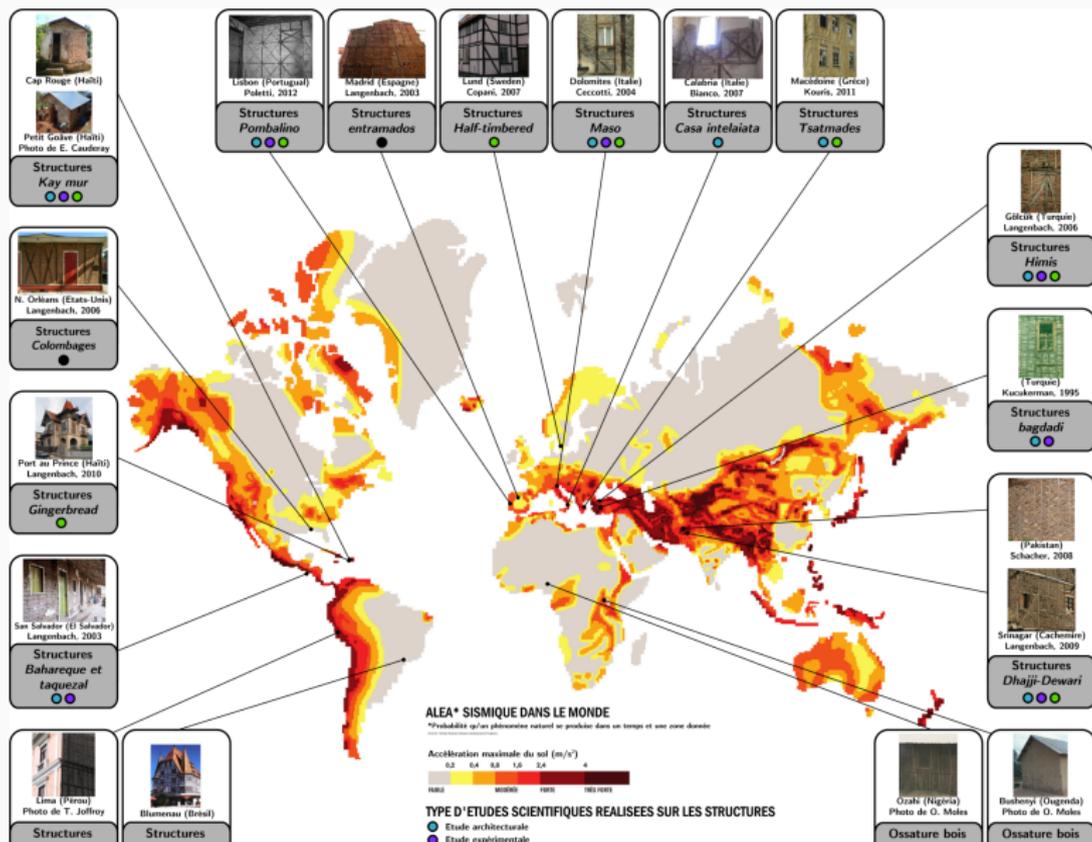


Avant séisme

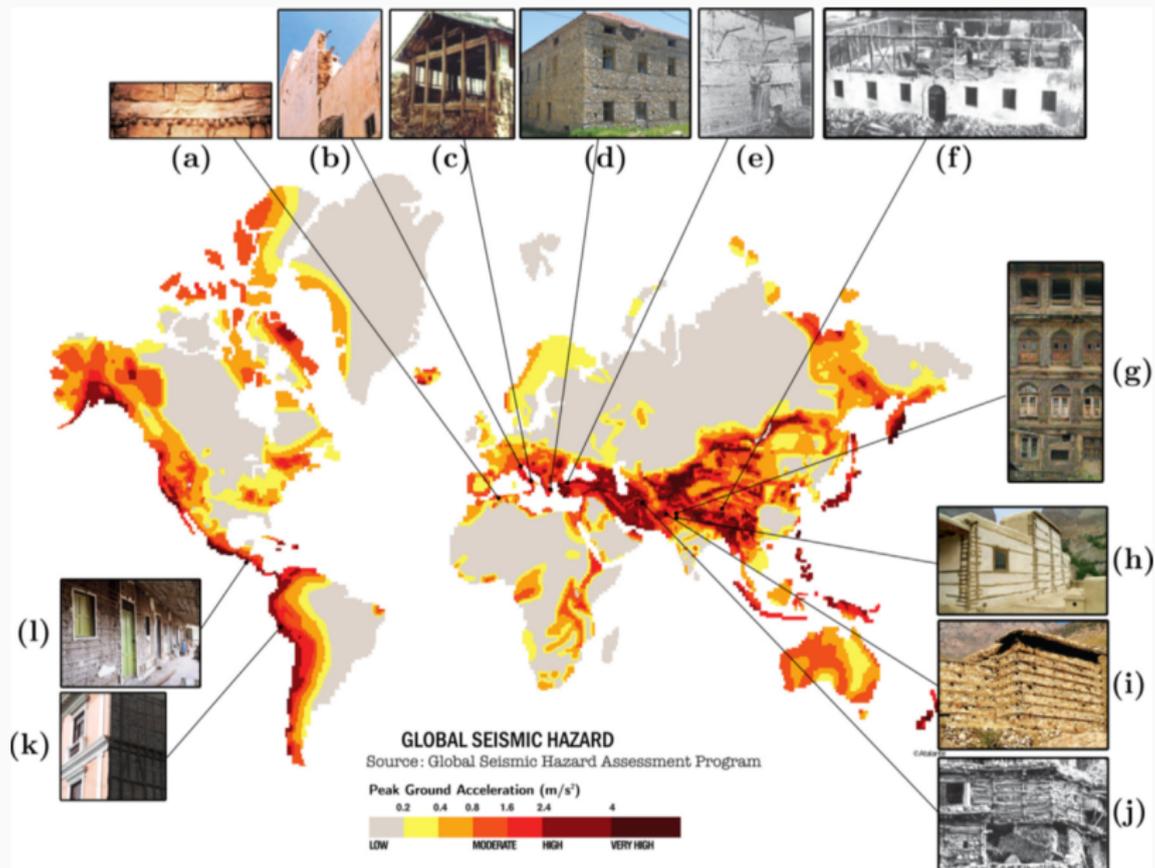


Après séisme

# Les constructions à ossatures en bois avec remplissage dans les zones sismiques



# Les constructions en maçonnerie dans les zones sismiques



# Comportement sismique des structures en matériaux bio et géosourcés

2 contextes distinctes :

## **En France**

pas de cadre réglementaire existant pour les matériaux bio et géosourcés (hors filière bois industrialisée)

- 4 Cultures constructives traditionnelles (pisé, bauge, maçonnerie, colombage) : pas de mémoire sismique, pas de typologie développée en connaissance du risque sismique
- De nombreux développements pour adapter ces cultures constructives au contexte sismique
- Mieux comprendre et cadrer le comportement parasismique de ces structures avec et sans renforcements

# Comportement sismique des structures en matériaux bio et géo-sourcés

2 contextes distinctes :

## **Dans le monde**

Cultures constructives parasismiques existantes mais souvent abandonnées au profit de matériaux industrialisés souvent mal adaptés aux populations locales n'ayant pas les moyens d'entretenir ces solutions

# Éléments de dynamique des structures<sup>a</sup>

---

<sup>a</sup>Ce chapitre est basé sur le cours de [1]

# Effort dans la structure

Efforts dû au séisme dans une structures :

- Liés aux masses de la structure
  - Poids propre
  - Charges d'exploitation
- Atténués par l'amortissement



# Equation de la dynamique

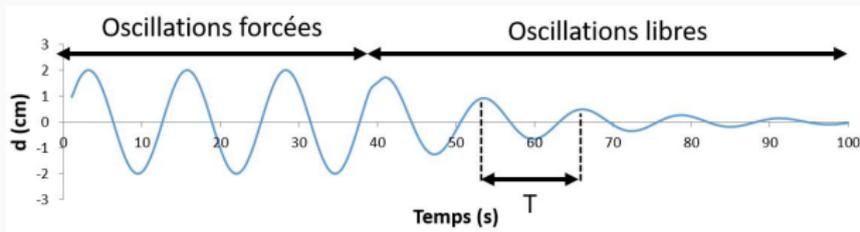
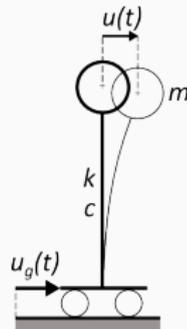
$$m \cdot \ddot{u}(t) + c \cdot \dot{u}(t) + k \cdot u(t) = m \cdot \ddot{u}_g(t)$$

Force dans la structure

Force sur la structure

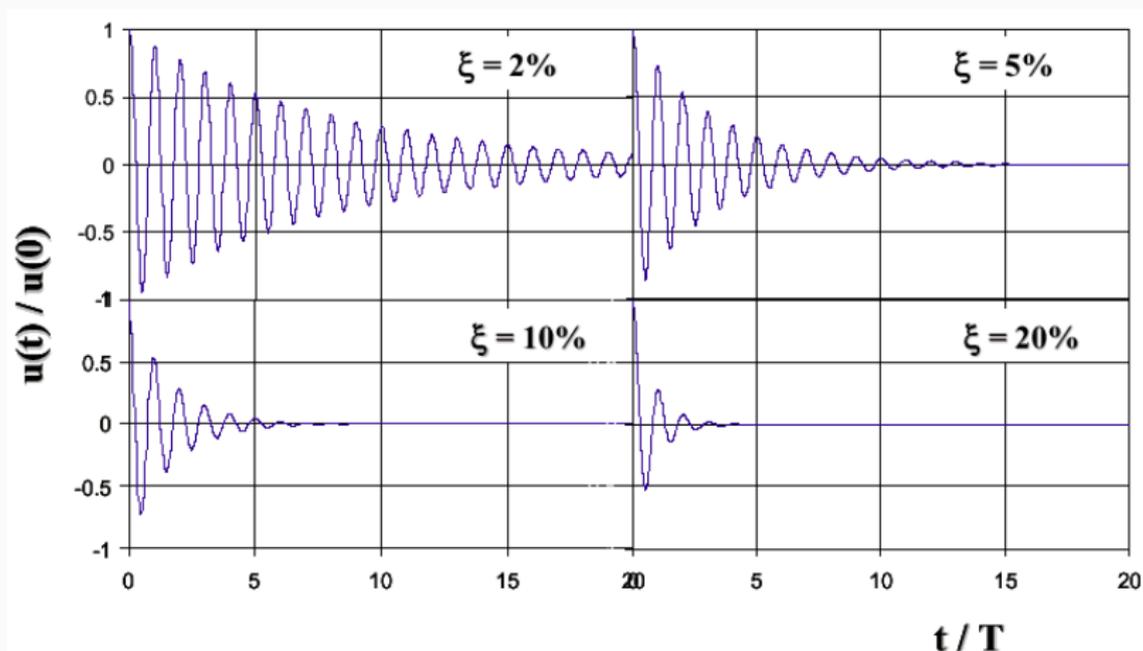
où :

- $m$  : forces d'inertie
- $c$  : forces d'amortissement visqueux
- $k$  : forces internes



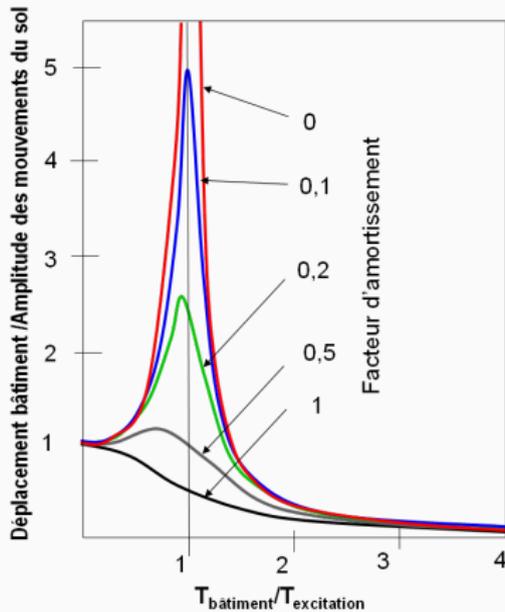
# Équation de la dynamique

Influence de l'amortissement :



# Équation de la dynamique

Résonance :



Exemple de la résonance du pont de Tacoma

# Équation de la dynamique

- Influence de la masse : plus la masse  $m$  ↗, plus la période ↗ et donc fréquence propre ↘
- Influence de la hauteur : plus la hauteur ↗, plus la période ↗ et donc fréquence propre ↘
- Plus la raideur du matériau  $k$  et/ou liaison ↗, plus la période ↘ et donc fréquence propre ↗.
- Plus l'amortissement  $c$  ↗, plus la période ↗ et donc fréquence propre ↘.

# Équation de la dynamique

- Structure à  $n$  degrés de liberté : dans la réalité, une structure possède autant de modes propres que de possibilités de déplacement.

# Équation de la dynamique

- Structure à  $n$  degrés de liberté : dans la réalité, une structure possède autant de modes propres que de possibilités de déplacement.

## Conclusion

Ainsi paramètres  $k$ ,  $m$ ,  $c$  et la géométrie vont déterminer les fréquences fondamentales de la structure. Ces fréquences de vibration sont le point sensible de la structure. On s'intéressera aux modes les plus importants.

# Équation de la dynamique

- Structure à  $n$  degrés de liberté : dans la réalité, une structure possède autant de modes propres que de possibilités de déplacement.

## Conclusion

Ainsi paramètres  $k$ ,  $m$ ,  $c$  et la géométrie vont déterminer les fréquences fondamentales de la structure. Ces fréquences de vibration sont le point sensible de la structure. On s'intéressera aux modes les plus importants.

## Attention

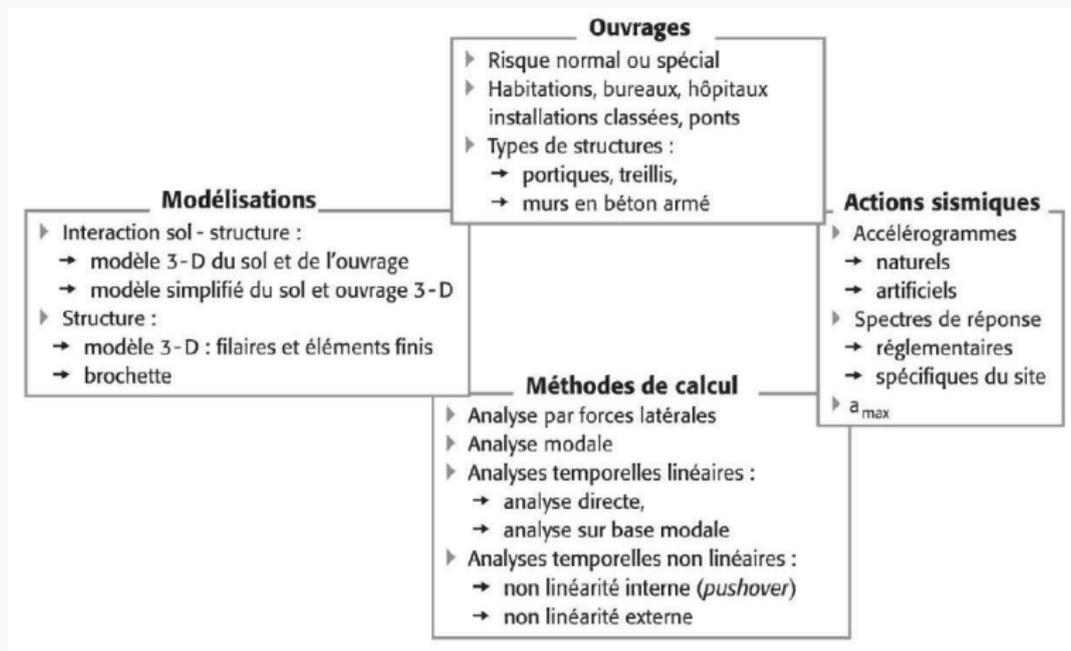
L'interaction sol-structure peut entraîner des effets locaux.

Pour aller plus loin, les ouvrages suivants représentent des références en la matière : [2]–[4]

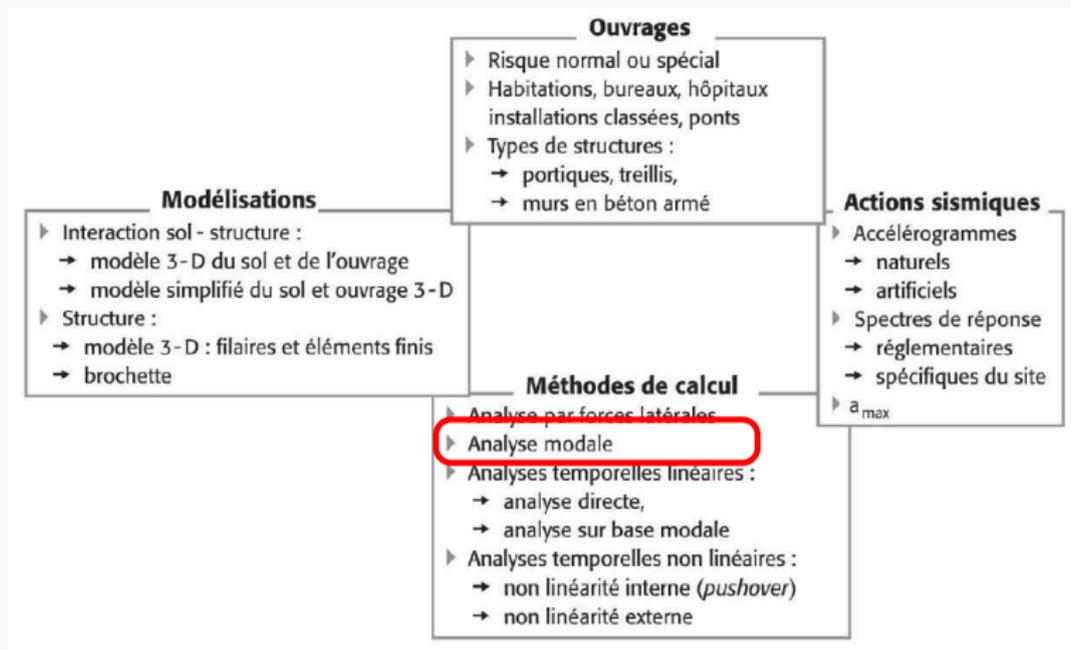
# Notions de calculs parasismique

---

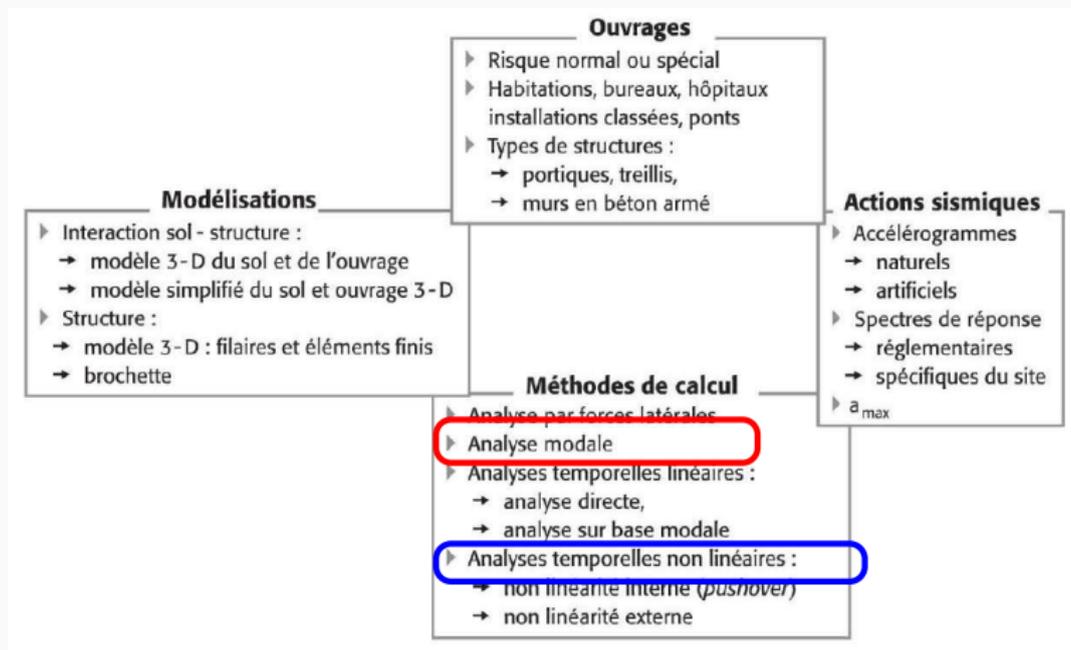
# Cadre de l'étude du comportement sous séisme des structures



# Cadre de l'étude du comportement sous séisme des structures

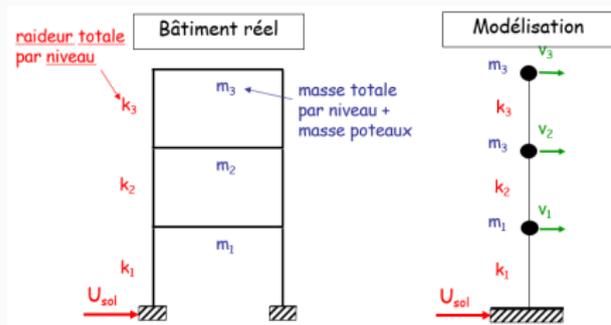


# Cadre de l'étude du comportement sous séisme des structures

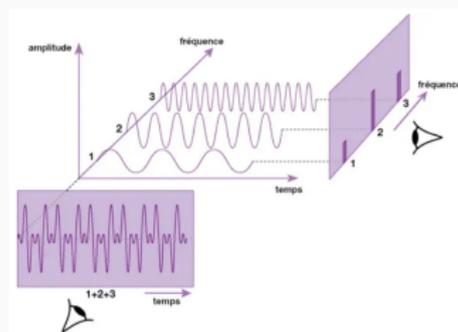


# Cadre de l'étude du comportement sous séisme des structures

## Décomposition modale et passage du temporelle au fréquentiel

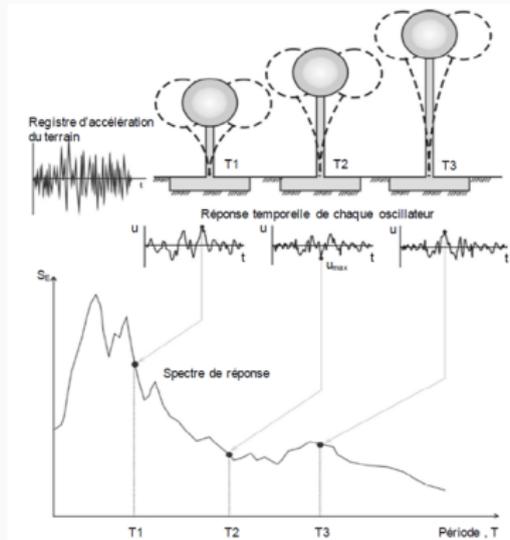


Modélisation d'une structure en un modèle brochette à 3ddl



Passage temps-fréquence et décomposition modale

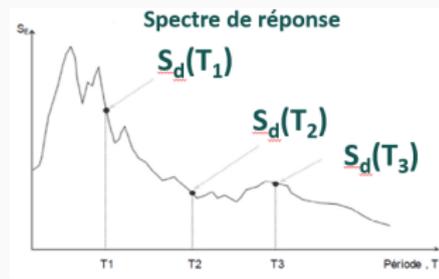
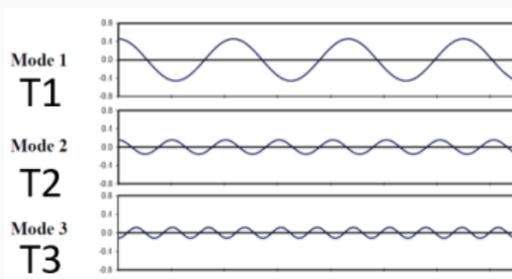
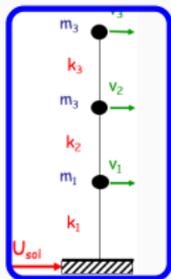
# Cadre de l'étude du comportement sous séisme des structures



Construction d'un Spectre d'oscillateur à partir des valeurs maximales des réponses de différents oscillateurs couvrant la gamme de fréquences qui nous intéresse

# Cadre de l'étude du comportement sous séisme des structures

## Analyse modale spectrale



Combinaisons des réponses

$$F_A \quad F_B \quad F_C$$

Forces modales

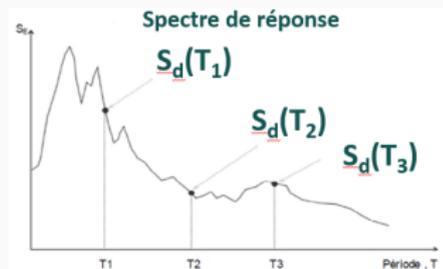
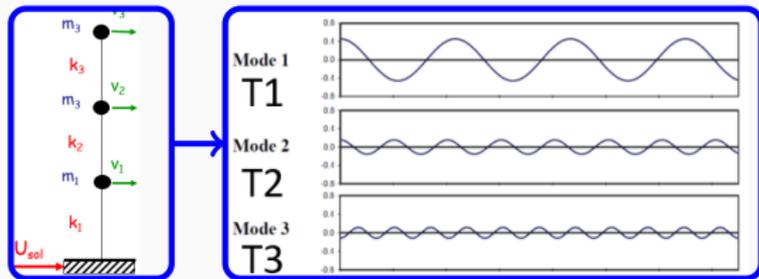
$$F_1 = m_1 S_d(T_1)$$

$$F_2 = m_2 S_d(T_2)$$

$$F_3 = m_3 S_d(T_3)$$

# Cadre de l'étude du comportement sous séisme des structures

## Analyse modale spectrale



Combinaisons des réponses

$$F_A \quad F_B \quad F_C$$

Forces modales

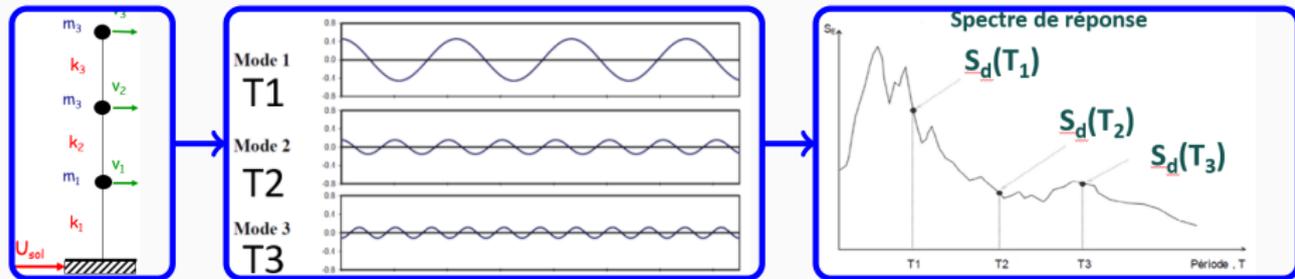
$$F_1 = m_1 S_d(T_1)$$

$$F_2 = m_2 S_d(T_2)$$

$$F_3 = m_3 S_d(T_3)$$

# Cadre de l'étude du comportement sous séisme des structures

## Analyse modale spectrale



Combinaisons des réponses

$F_A$   $F_B$   $F_C$

Forces modales

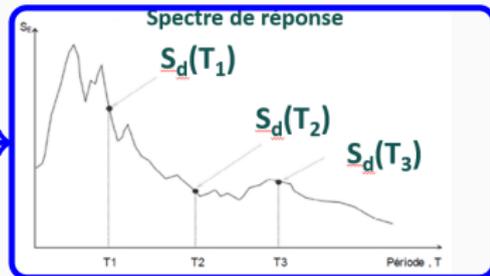
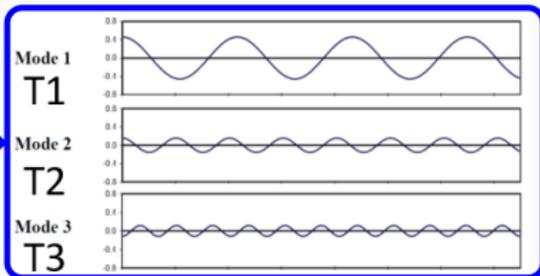
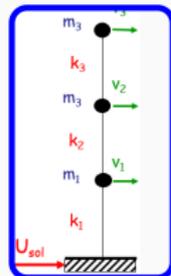
$$F_1 = m_1 S_d(T_1)$$

$$F_2 = m_2 S_d(T_2)$$

$$F_3 = m_3 S_d(T_3)$$

# Cadre de l'étude du comportement sous séisme des structures

## Analyse modale spectrale



Combinaisons des réponses

$F_A$   $F_B$   $F_C$

Forces modales

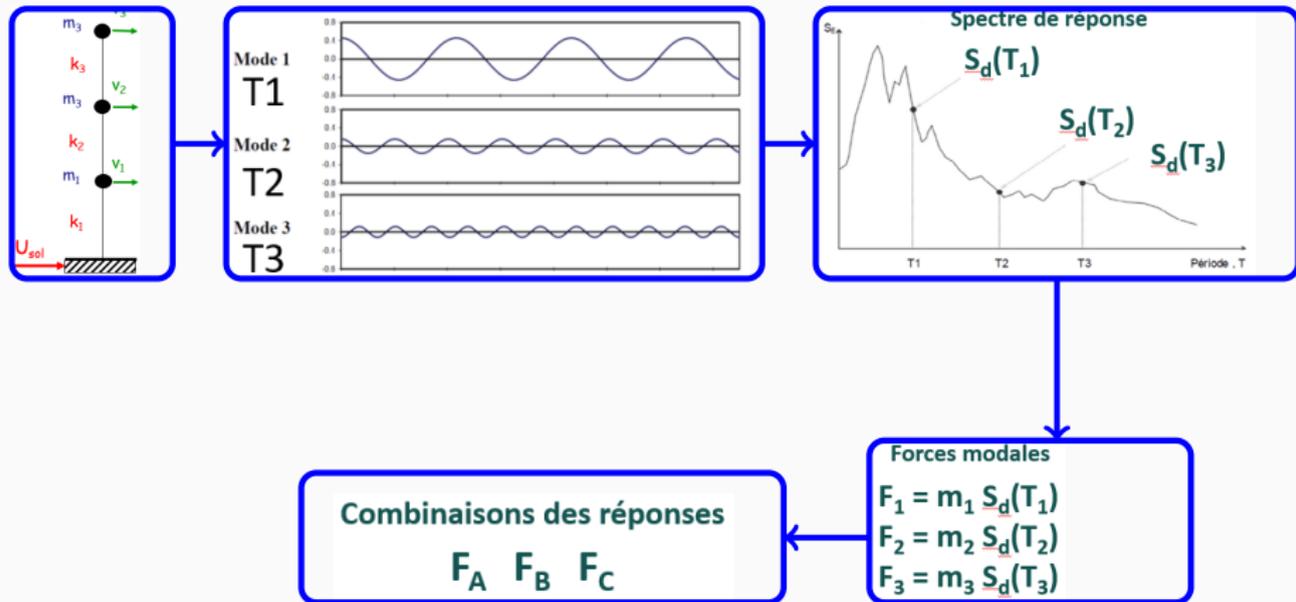
$$F_1 = m_1 S_d(T_1)$$

$$F_2 = m_2 S_d(T_2)$$

$$F_3 = m_3 S_d(T_3)$$

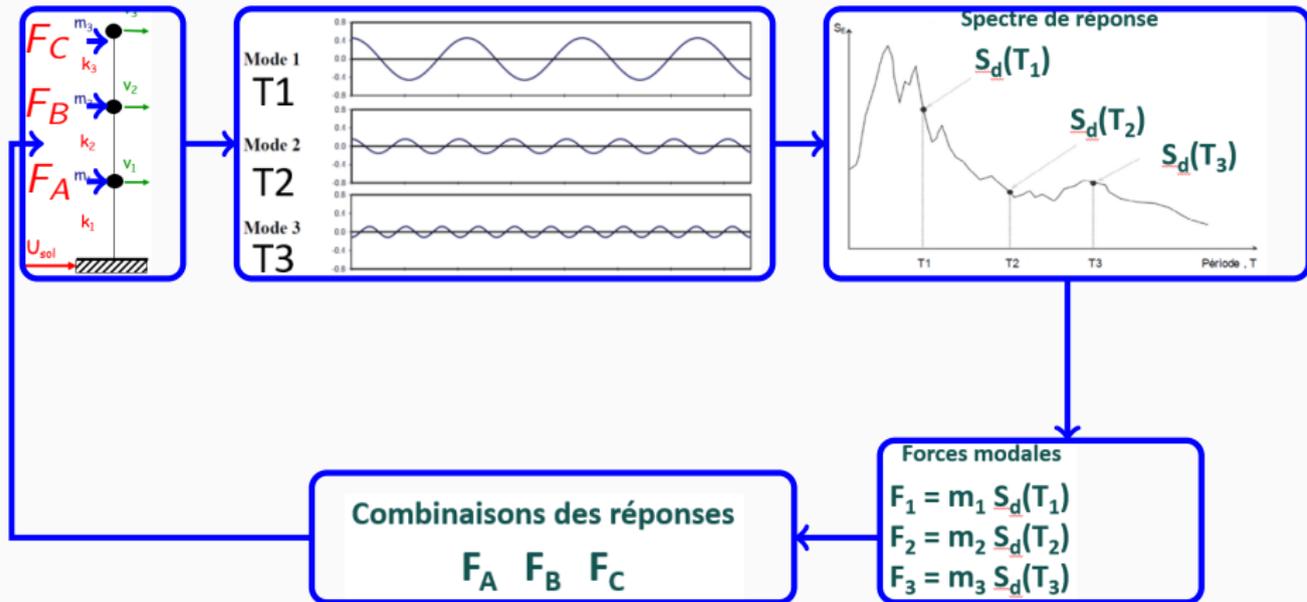
# Cadre de l'étude du comportement sous séisme des structures

## Analyse modale spectrale



# Cadre de l'étude du comportement sous séisme des structures

## Analyse modale spectrale



Selon [5], il est possible de classer de façon plus rationnelle le risque sismique fort (Tab. 1). Cela suppose que les facteurs principaux à prendre en compte pour l'étude parasismique des structure sont :

- Raideur
- Résistance/demande
- Ductilité : capacité de la structure à se déformer au-delà de sa limite élastique.

Période de retour	Magnitude	Caract. méca.	État limite d'ingénierie	État limite socio-économique
75-200	4.5-5.5	Raideur	Damage faible	Structure reste opérationnelle
400-500	5.5-6.5	Demande	Dommages réparables	Perte économique limitée
2000-2500	6.5-7.5	Ductilité	Éviter l'effondrement	Éviter la perte de vie humaines

**Table 1:** Relation entre le séisme, les caractéristiques structurales et les états limites

# **Comportement sous séisme des structures en matériaux bio et géo-sourcés**

---

# Activités au laboratoire 3SR

Afin d'étudier ce type de structure, des approches multi-échelles expérimentales et numériques sont développées.

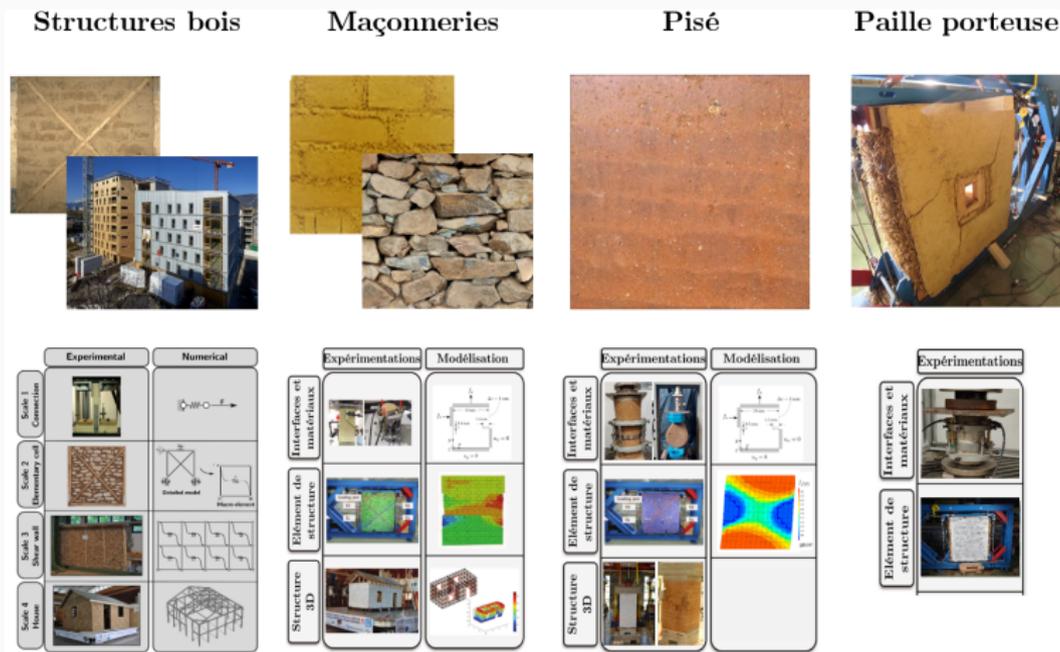
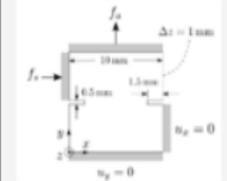
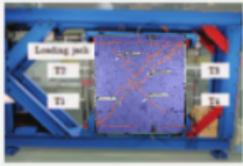
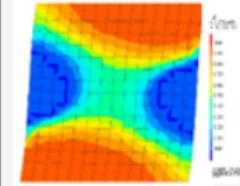
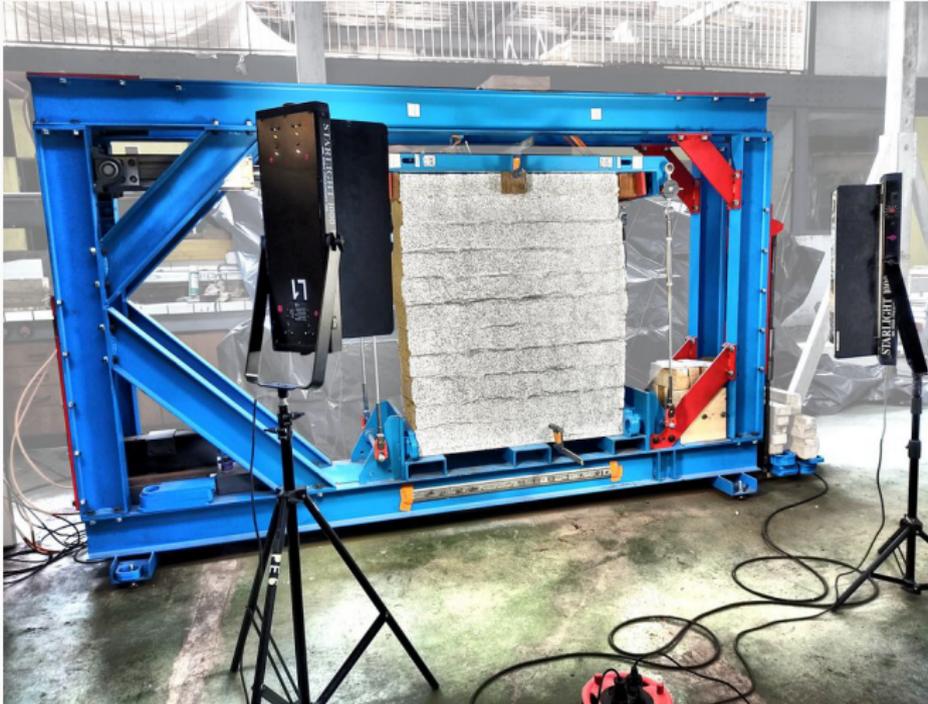


Figure 5: Activités de recherche

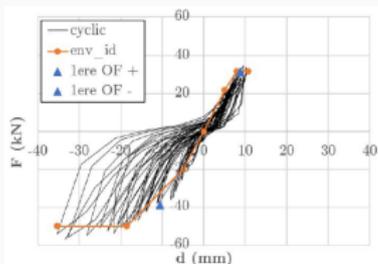
	Expérimentations	Modélisation
Interfaces et matériaux		
Élément de structure		
Structure 3D		



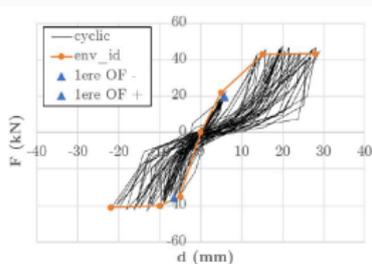
**Figure 6:** Portique de réaction – essais en cisaillement et en flexion hors plan

Ici, des murs en pisé de  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  ont été testés avec renforcement par géogrille ( $\phi$ ) et sans  $\rightarrow$  déterminer la ductilité, les raideurs, l'énergie dissipée, le coefficient de cisaillement  $G$  et éventuellement le module d'élasticité  $E$

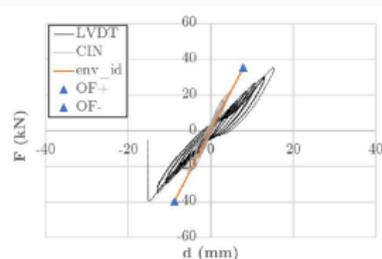
- comportement fragile du pisé non renforcé en cisaillement.
- $\mu = 1$  sans renforcement et  $\mu = 4 - 5$  avec renforcement.



(a) échantillon geo1

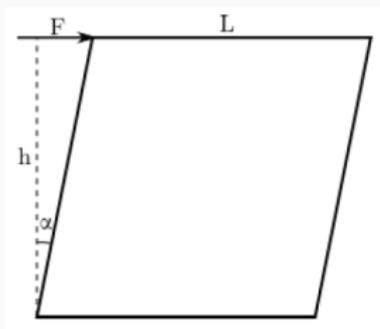


(b) échantillon geo2

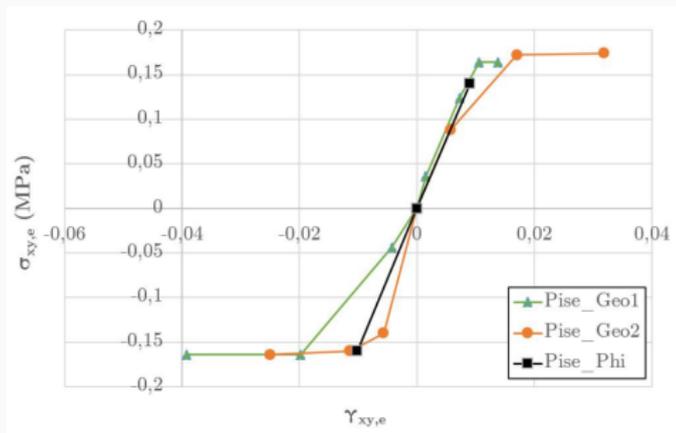


(c) échantillon phi

- comportement fragile du pisé non renforcé en cisaillement.
- $\mu = 1$  sans renforcement et  $\mu = 4 - 5$  avec renforcement.

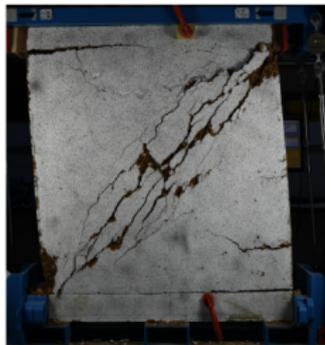


Essais en cisaillement –  
Notations

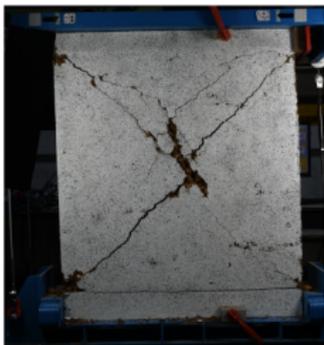


Essais en cisaillement – diagramme  
contrainte de cisaillement  $\tau$  – distorsion  $\gamma$  –  
courbes enveloppes

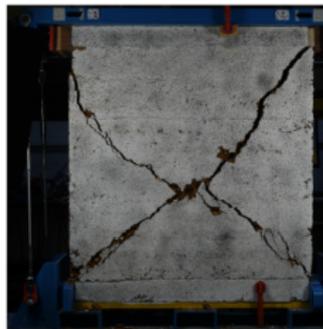
Faciès de rupture → ductilité traduite par la multi-fissuration des murs renforcés.



(d) Rupture échantillon 1  
côté rentrée de tige



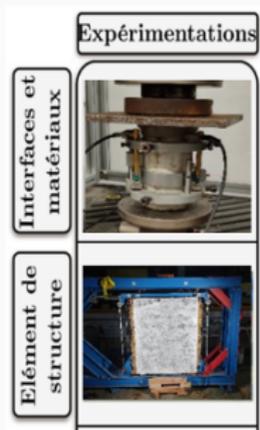
(e) Rupture échantillon 2  
côté rentrée de tige



(f) Rupture échantillon 3

Faciès de rupture

# Paille porteuse avec enduit terre structurel



- Enduit terre structurel fibré  
→ créer des voiles minces travaillants en paille porteuse → on parlera de terre-paille par la suite.
- Campagne expérimentale d'essais monotones sur 6 murs.
- En collaboration avec l'association Nebraska

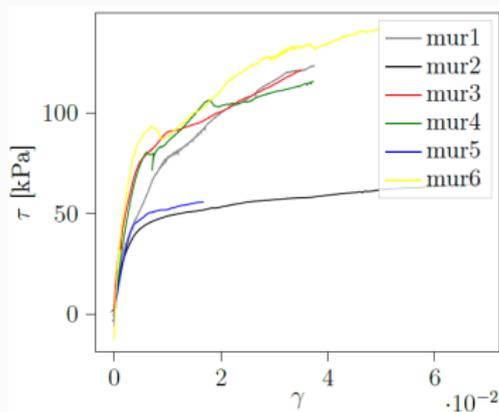
# Paille porteuse avec enduit terre structurel

En comparaison des murs en pisé, les murs terre-paille ont :

- une limite d'élasticité faible
- une grande capacité de déformation dont la limite est difficile à quantifier

N° Mur	Mortier	CL	Détail technique
1	Terre fibrée	Confiné verticalement	-
2	Terre fibrée	Lesté à 400 kg	-
3	Terre fibrée	Confiné verticalement	-
4	Terre non fibrée	Confiné verticalement	-
5	Terre fibrée	Confiné verticalement	Fenêtre centrale
6	Chaux	Confiné verticalement	-

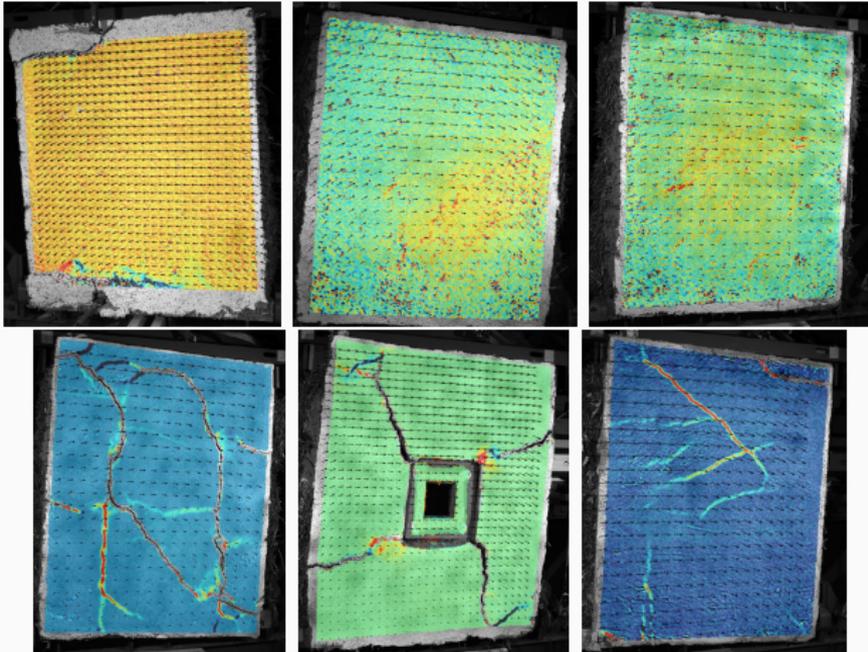
Configurations testées

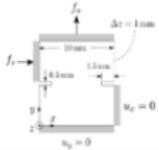
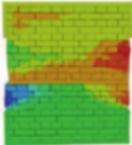
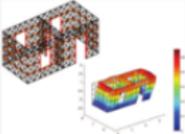


Résultats – Diagramme contrainte de cisaillement  $\tau$  – distorsion  $\gamma$

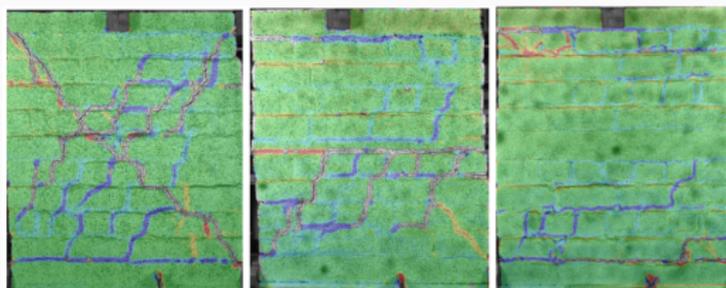
# Paille porteuse avec enduit terre structural

- Atteinte de la limite d'élasticité → décollement des enduits.
- Ensuite, la paille se déforme



	Expérimentations	Modélisation
Interfaces et matériaux		
Élément de structure		
Structure 3D		

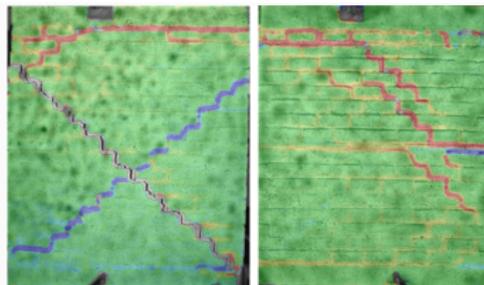
Essais cycliques sur maçonnerie d'adobes et de BTE (brique de terre extrudée)



Without band

With timber band

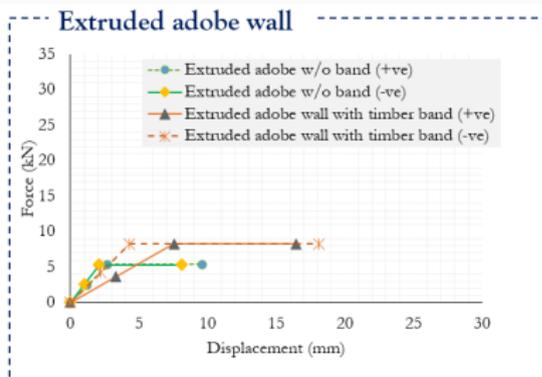
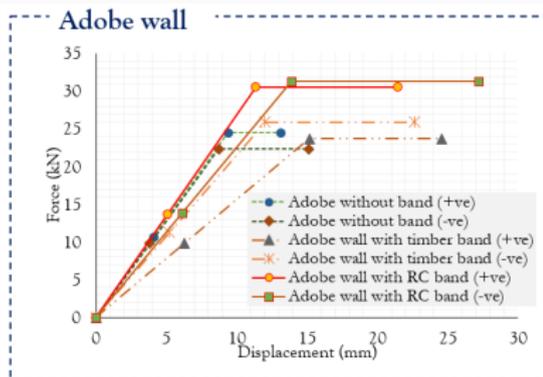
With RC band



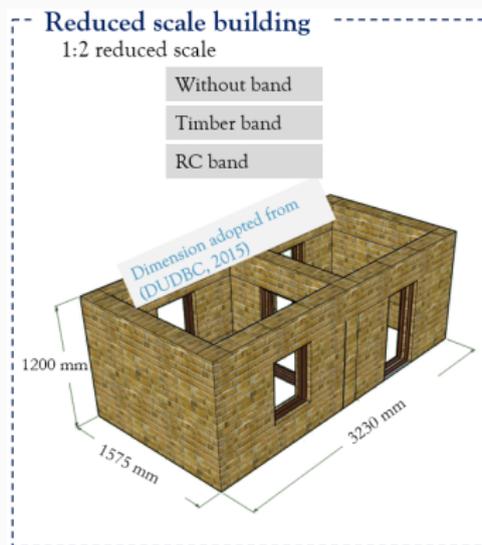
Without band

With timber band

- grande importance de l'interface dans le comportement sous chargement latéral des maçonneries
- apport significatif de la bande de glissement



Essais sismiques sur maçonneries à échelle réduite avec et sans renforcement sur la table du FCBA de Bordeaux [6]



Essais sismiques sur maçonneries de BTE à échelle réduite avec et sans renforcement sur la table du FCBA de Bordeaux

Model without band



Model with timber band



Model with RC band



## Timelines

Construction: 22/10 to 06/11/2020

Drying @ Temp=23 ± 2 °C  
RH=50 ± 5%

Testing: 26/11 ; 30/11 ; 02/12/2020



Timber band



Reinforced concrete band

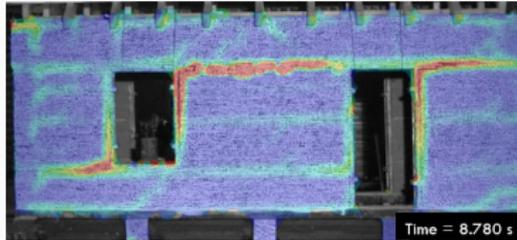
Essais sismique sur maçonnerie non renforcée, 4e séisme d'une intensité 4 fois plus importante que le plus nocif des séismes utilisé pour le dimensionnement des structures en France (signal Guadeloupe).

sans renforcement – GUA386%

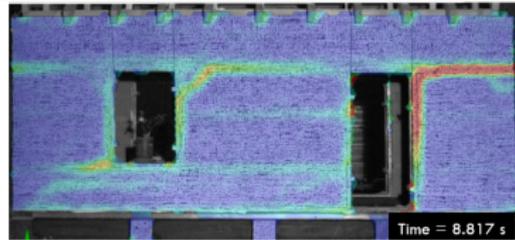
Comparaisons des maçonneries via CIN – GUA240%

Toutes les vidéos de nos essais sont disponibles sur la chaîne Youtube de Yannick Sieffert.

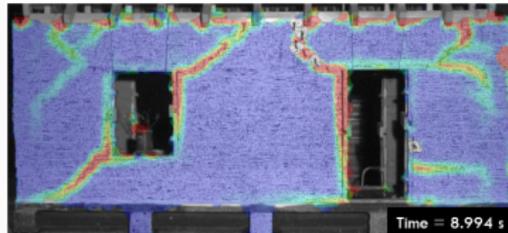
# Maçonneries



Timber band



RC band

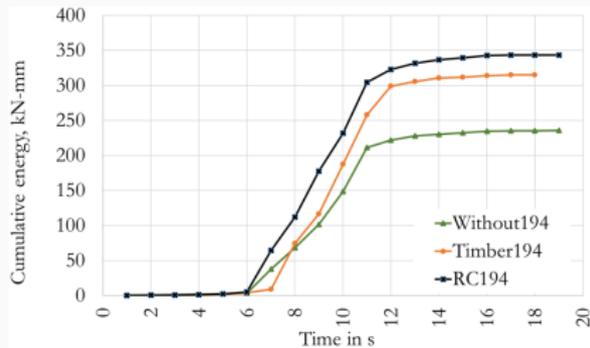
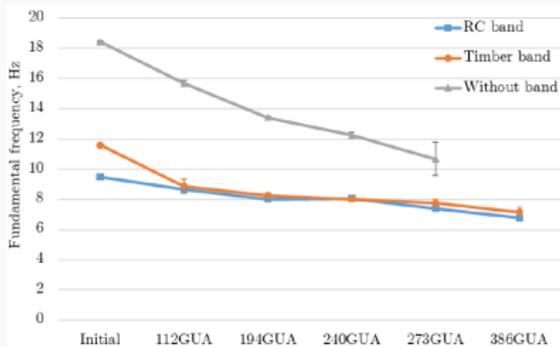


Without band

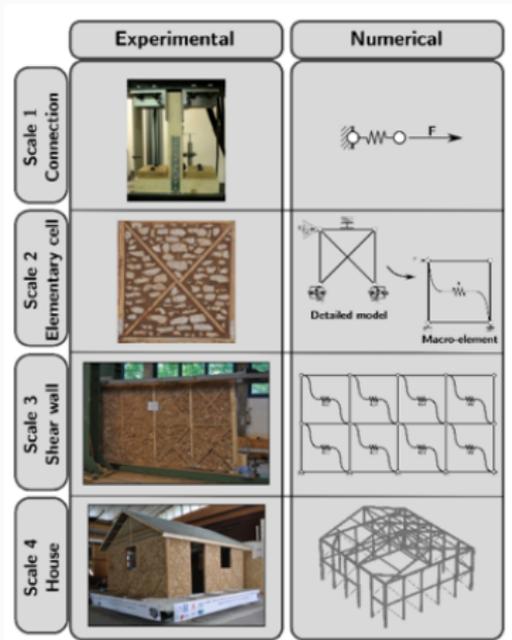
Major principal strain for GUA240

- ❖ Bands help in limiting the crack propagation

- importance des bandes simsiques



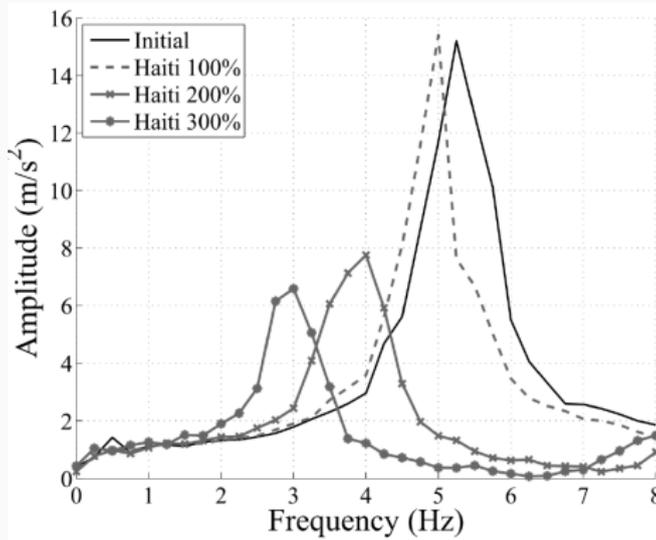
# Structures à ossature en bois avec remplissage



Ce type de structure est intrinsèquement résistante aux sollicitation sismique :

- rapport légèreté/résistance
- grande capacité de déformation des connecteurs métalliques
- apport important du remplissage et de son type sur l'amortissement et donc la dissipation d'énergie.
- importance du contreventement en bois

# Structures à ossature en bois avec remplissage



ossature bois avec remplissage – GUA386%

## Conclusion

---

# Conclusion

- Dynamique des structures :
  - en sismique, importance de  $k$ ,  $m$ ,  $c$  et de la géométrie → ou de la raideur, de la résistance et de la ductilité  $\mu$ .
  - approches modales – domaine fréquentiel : comportement élastique, amortissement visqueux, dimensionnement et suivi des caractéristiques mécaniques.
  - approches temporelles – modélisations non-linéaires
- Comportement sous séisme des structures en matériaux bio et géo sourcés
  - Diversité des comportements entre les structures en matériaux bio-géo-sourcés (ductilité, raideur, dissipation d'énergie, etc.)
  - Importance du renforcement pour les structures fragiles

Nombreuses perspectives afin de cadrer et mieux quantifier les apports observés, notamment grâce à des modèles numériques validés aux différentes échelles.

## References

---

- [1] C. Boudaud, “Justification des structures en bois en situation de séisme,” ESB, Nantes, Tech. Rep., 2023.
- [2] A. K. Chopra, *Dynamics of structures*. Pearson Education India, 2007.
- [3] D. Corvez and V. Davidovici, *Pratique du calcul sismique: Guide d'application de l'Eurocode 8*. Editions Eyrolles, 2016.
- [4] P. Paultre, “Dynamique des structures. application aux ouvrages de génie civil,” *Editions Presses internationales polytechnique, Canada*, 2018.
- [5] A. S. Elnashai and L. Di Sarno, *Fundamentals of earthquake engineering: from source to fragility*. John Wiley & Sons, 2015.