



JOURNEES NATIONALES
MACONNERIE

5ème édition – Bordeaux

12 et 13 Juin 2025



Dimensionnement des murs de soutènement en pierre sèche

Volet sismique

OSMAN, H., VINCENS, E., SAVALLE, N., HANS, S.

Introduction



- **Technique constructive (pierre sèche)**
 - Consiste à un assemblage savant et sans mortier de moellons de pierre peu retravaillés
 - Inscrite sur la liste du patrimoine culturel immatériel par l'UNESCO depuis 2018
- **Structures les plus représentatives : murs de soutènement**
 - Soutenir les terres des versants ou ouvrage routier (versant + véhicule)



© C. Cornu



© C. Cornu

Introduction



- **Regain d'intérêt depuis deux décennies :**
 - Des ouvrages vieillissants nécessitant réparations
 - Réponse à la décarbonation du secteur du BTP
 - Conservation de l'authenticité des paysages (attractivité touristique)



© C. Cornu



© C. Cornu

- **Défis actuels**

- Perte de la connaissance scientifique et hors cadre de l'Eurocode 7 même si existence de Règles Professionnelles pour soutènement de talus en statique
- Un savoir-faire peu répandu parmi les maçons
- Depuis deux décennies, des études essaient de reconstruire les connaissances scientifiques et d'établir des règles pour leur conception



Montpellier, France



Saint-Martin-de-Castillon, France

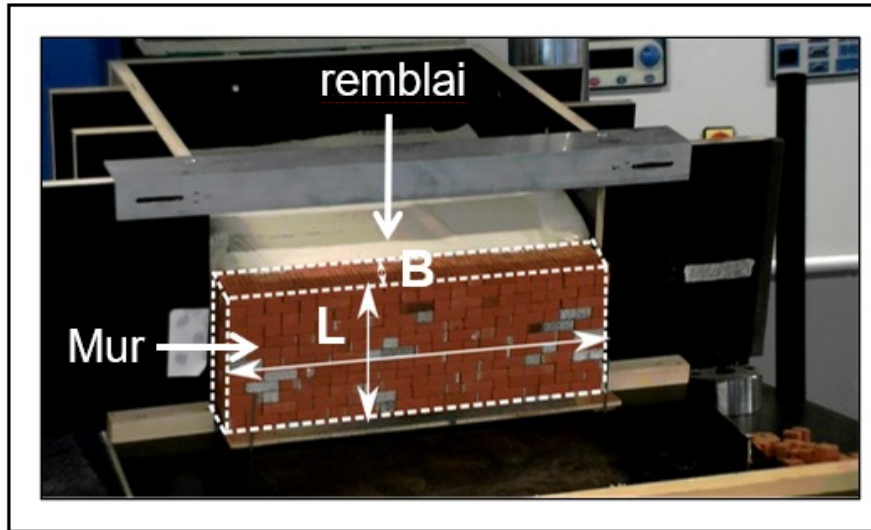
Introduction



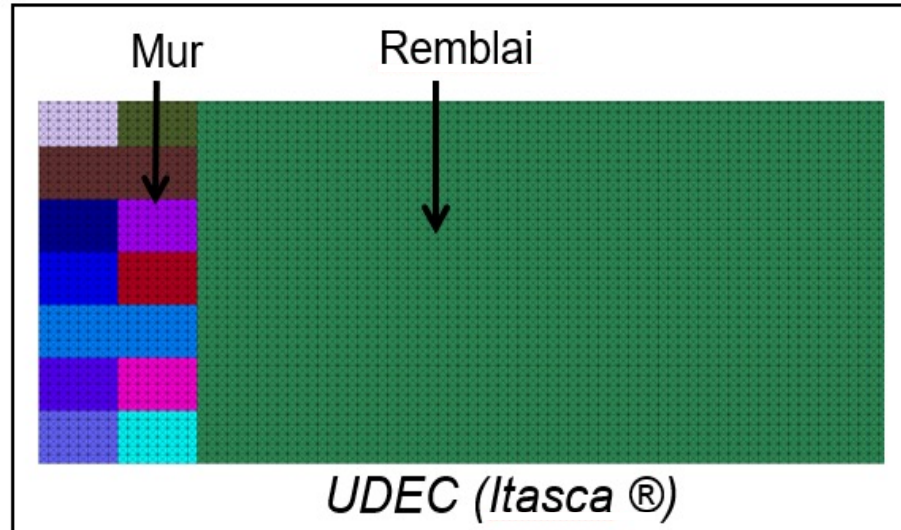
- Études précédentes au LTDS

- 2 thèses de doctorat dont celle de N. SAVALLE (2019) « Étude du comportement sismique des murs de soutènement de talus en pierre sèche »

Études expérimentales à échelle réduite



Études numériques en « 2D »



- Études précédentes au LTDS

- 2 thèses de doctorat dont celle de N. SAVALLE (2019) « Étude du comportement sismique des murs de soutènement de talus en pierre sèche »
- La problématique : choix d'une section représentative pour le « 2D »

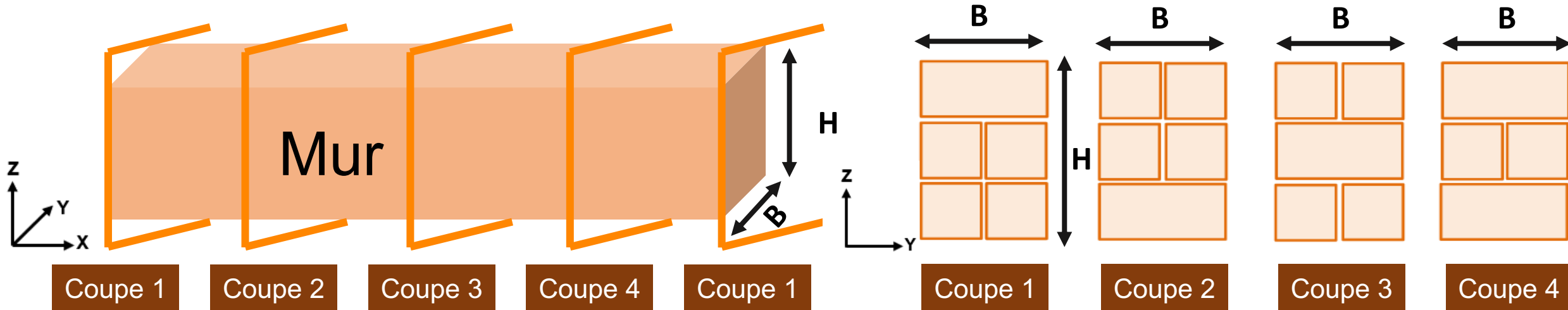


Introduction



- Études précédentes au LTDS

- 2 thèses de doctorat dont celle de N. SAVALLE (2019) « Étude du comportement sismique des murs de soutènement de talus en pierre sèche »
- La problématique : choix d'une section représentative pour le « 2D »



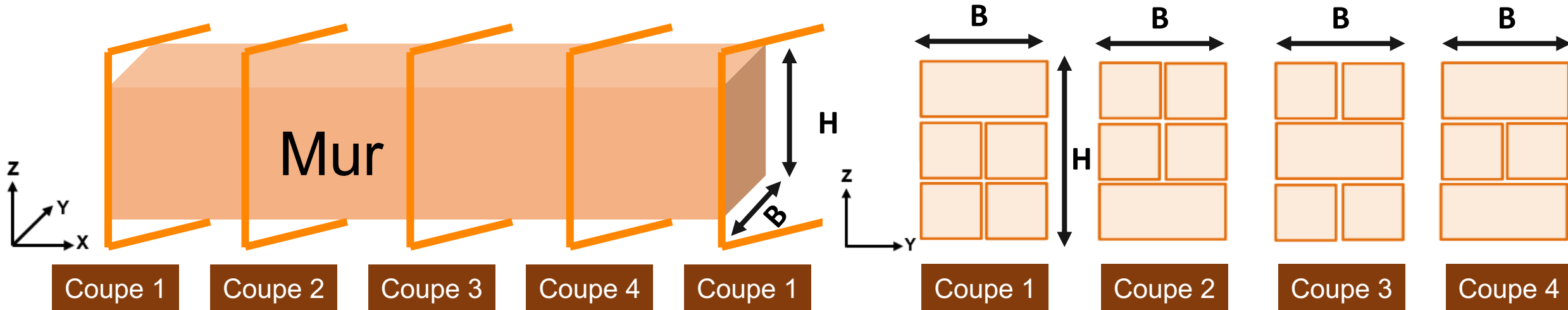
B : représente la largeur du mur (34 mm)
 $33 \text{ mm} < H < 130 \text{ mm}$

Introduction



- Études précédentes au LTDS

- 2 thèses de doctorat dont celle de N. SAVALLE (2019) « Étude du comportement sismique des murs de soutènement de talus en pierre sèche »
- La problématique : choix d'une section représentative pour le « 2D »

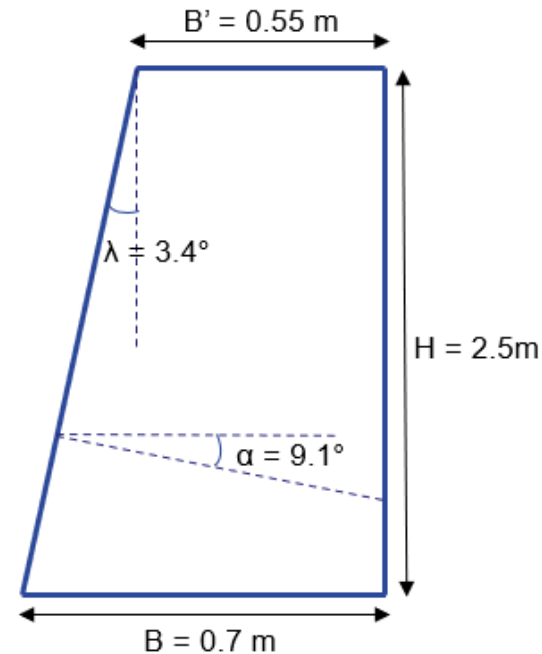


→ Nécessité de produire des modèles numériques en 3D

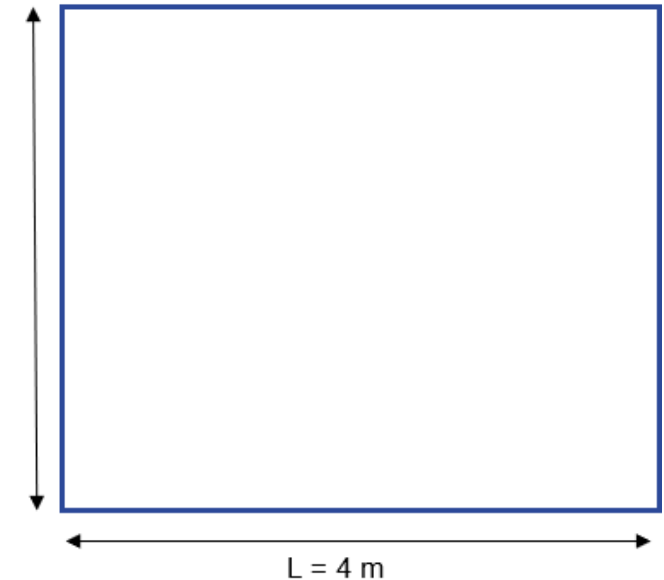
- Application à des murs de taille réelle
 - Mur C3s en schiste d'A-S. Colas (2009)



Image du mur C3s



Coupe

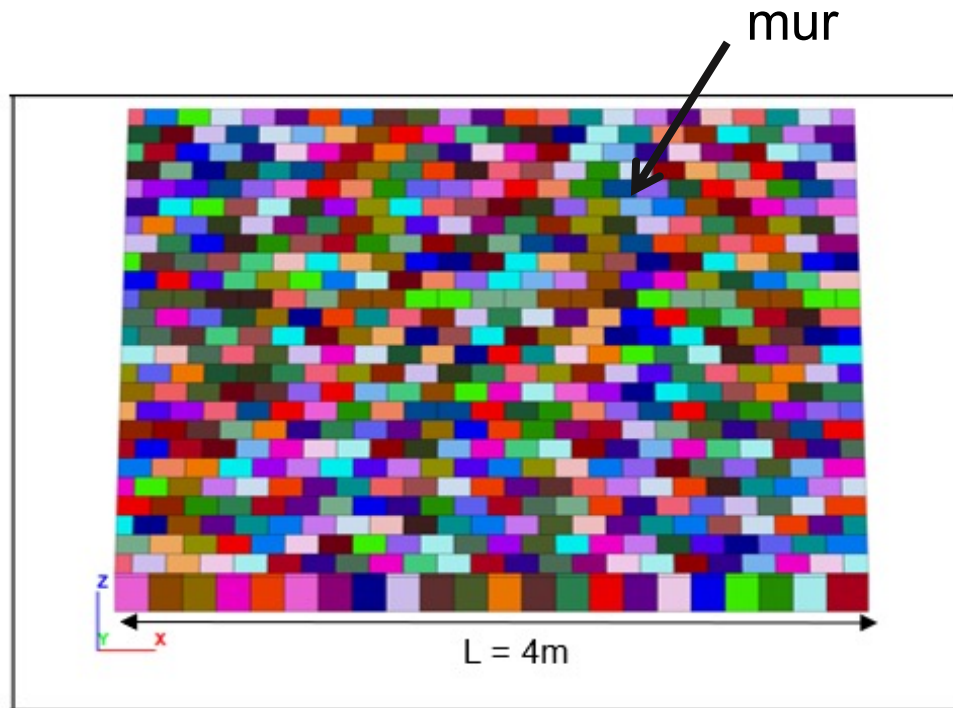


Vue de face

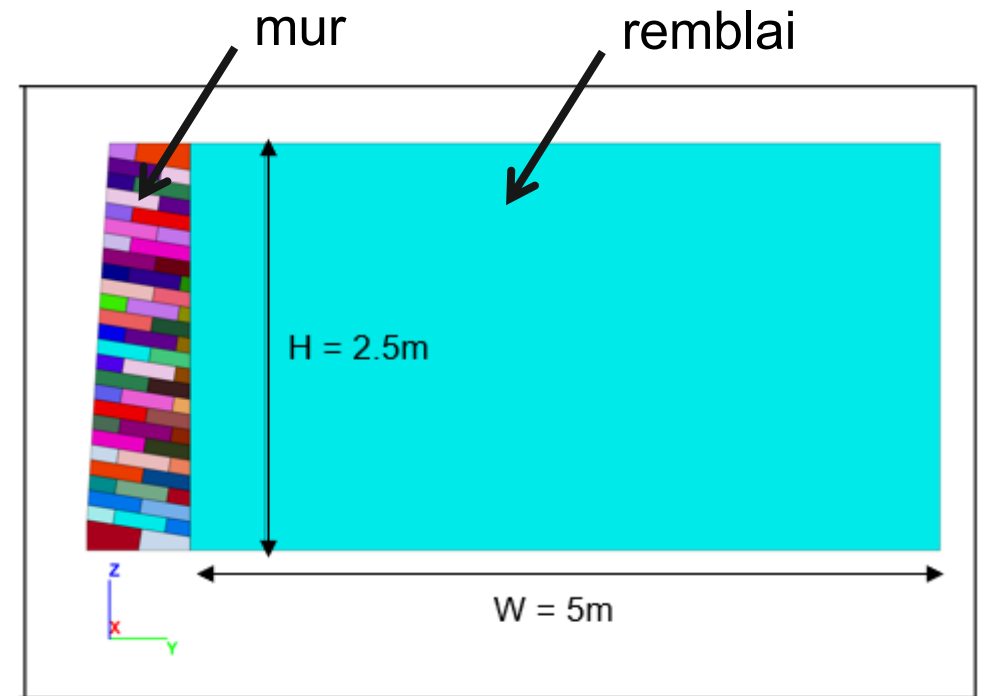
Source: COLAS, A-S. Mécanique des murs de soutènement en pierre sèche : Modélisation par le calcul à la rupture et expérimentation échelle 1. Lyon : Thèse ENTPE, 2009.

- **Modélisation numérique**

- Approche 3D mixte Discrète (mur) – Continue (remblai) avec le code 3DEC (ITASCA SAS)



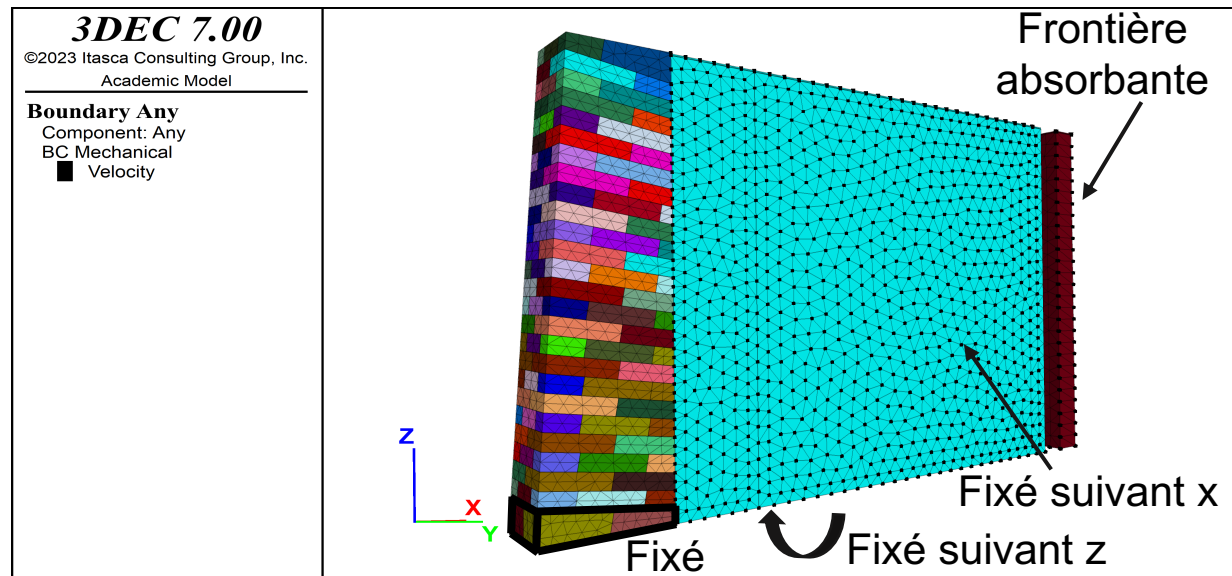
Vue de face



Coupe

- **Modélisation numérique**

- Approche 3D mixte Discrète (mur) – Continue (remblai) avec le code 3DEC (ITASCA SAS)
- Conditions aux limites



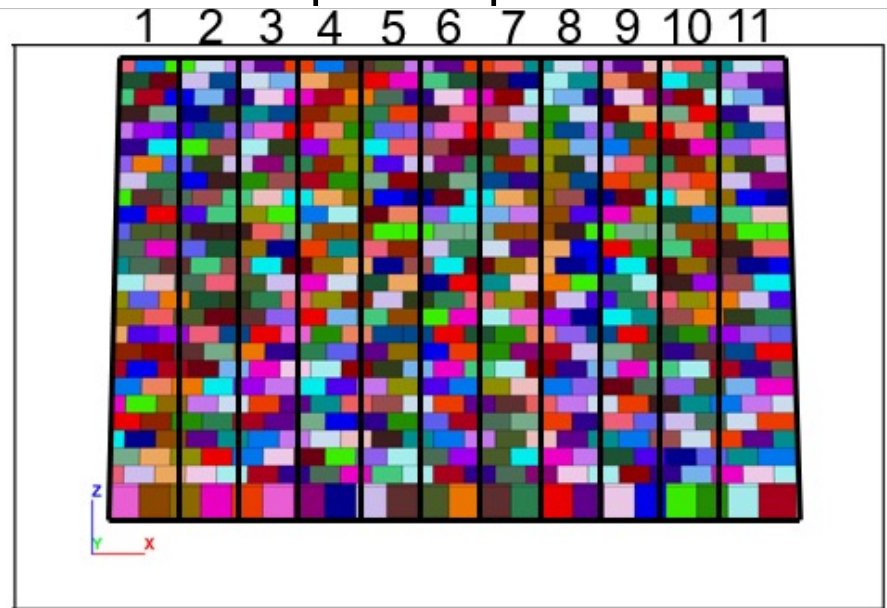


- **Modélisation numérique**

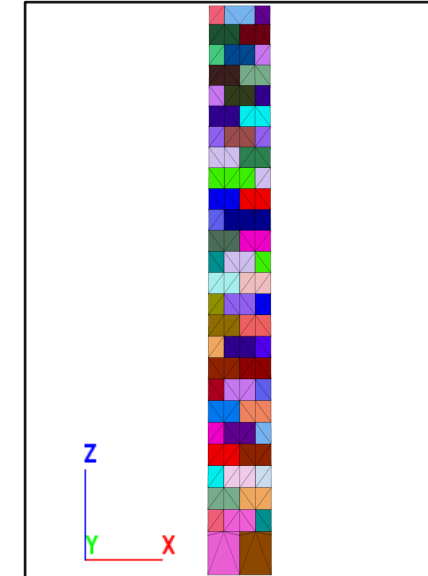
- Approche 3D mixte Discrète (mur) – Continue (remblai) avec le code 3DEC (ITASCA SAS)
- Conditions aux limites
- Lois de comportement matériaux, contacts et interfaces
 - Pierres du mur : Elastique linéaire (K, G)
 - Remblai : élastique parfaitement plastique - loi de Coulomb (K, G, ϕ, C)
 - Contacts pierre-pierre & pierre-remblai : loi moyennée, du type élastique linéaire avec critère de Coulomb bornant les contraintes de cisaillement (k_n, k_s, ϕ)

- **Modélisation numérique**

- Approche 3D mixte Discrète (mur) – Continue (remblai) avec le code 3DEC (ITASCA SAS)
- Conditions aux limites
- Lois de comportement matériaux, contacts et interfaces
- Notion de tranche « périodique » → 1 tranche produit un comportement identique au mur entier



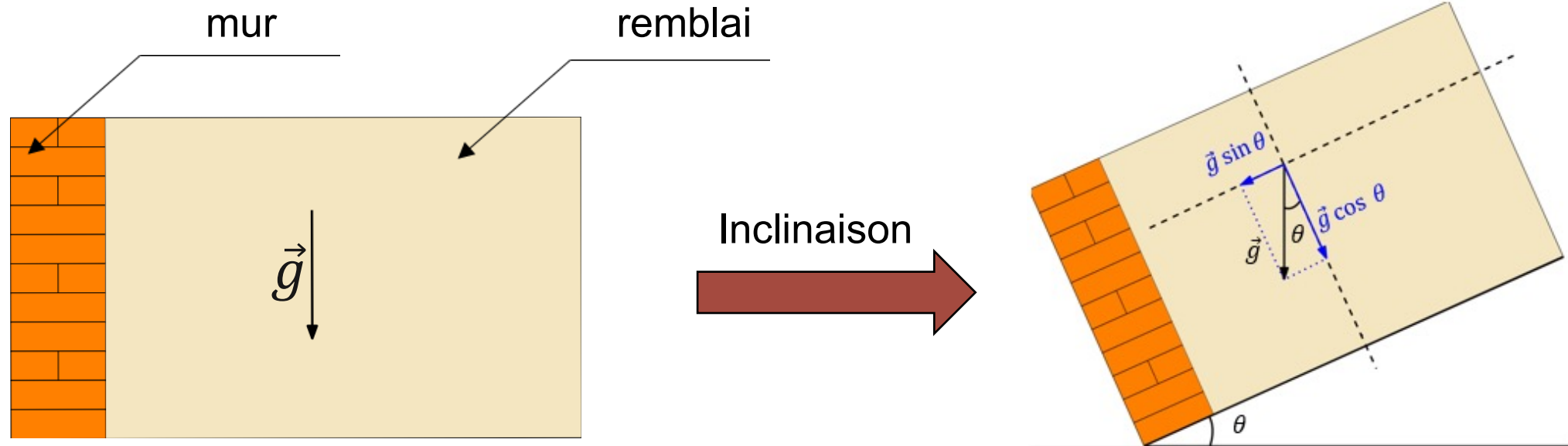
mur entier : 11 motifs



motif

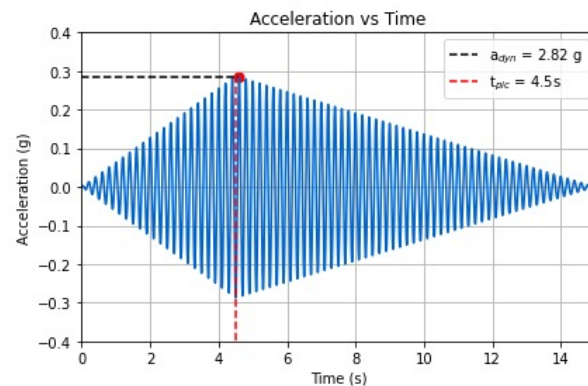
- **Modélisation numérique**

- Approche 3D mixte Discrète (mur) – Continue (remblai) avec le code 3DEC (ITASCA SAS)
- Conditions aux limites
- Lois de comportement matériaux, contacts et interfaces
- Notion de tranche « périodique » → 1 tranche produit un comportement identique au mur entier
- Analyse pseudo-statique (Eurocode 8) → résistance pseudo-statique (a_{pstat})

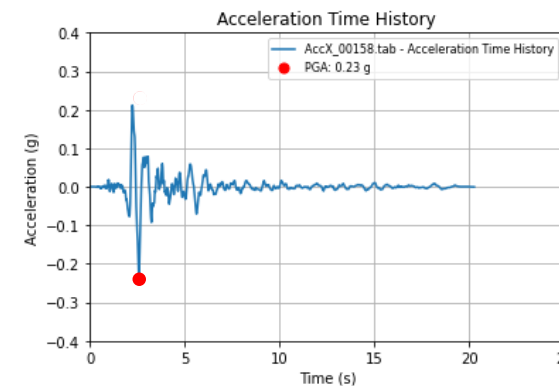


- **Modélisation numérique**

- Approche 3D mixte Discrète (mur) – Continue (remblai) avec le code 3DEC (ITASCA SAS)
- Conditions aux limites
- Lois de comportement matériaux, contacts et interfaces
- Notion de tranche « périodique » → 1 tranche produit un comportement identique au mur entier
- Analyse pseudo-statique (Eurocode 8) → résistance pseudo-statique (a_{pstat})
- Analyse dynamique → accélération maximale acceptable dans un calcul dynamique vrai (a_{dyn}) (déplacement en tête de mur < 20%H)



Signal synthétique



Signal réel



- **Modélisation numérique**

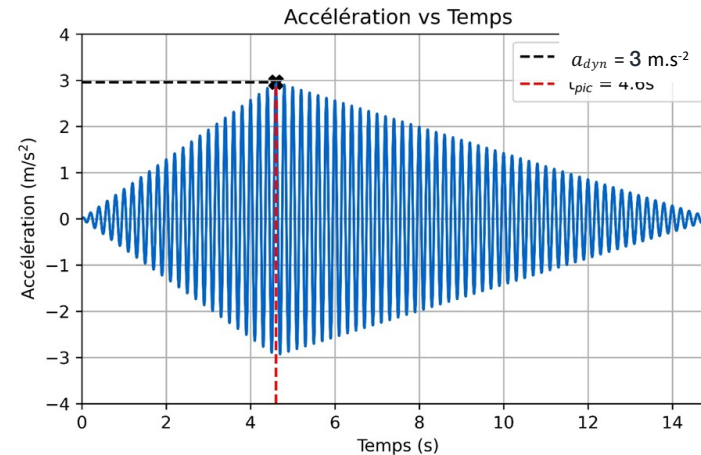
- Approche 3D mixte Discrète (mur) – Continue (remblai) avec le code 3DEC (ITASCA SAS)
- Conditions aux limites
- Lois de comportement matériaux, contacts et interfaces
- Notion de tranche « périodique » → 1 tranche produit un comportement identique au mur entier
- Analyse pseudo-statique (Eurocode 8) → résistance pseudo-statique (a_{pstat})
- Analyse dynamique → accélération maximale acceptable dans un calcul dynamique vrai (a_{dyn}) (déplacement en tête de mur < 20%H)
- Déterminer le coefficient de comportement global $r_g = \frac{a_{dyn}}{a_{pstat}}$

Analyse dynamique



- **Signaux synthétiques**

- Harmonique, $f = 5\text{Hz}$
- Phase ascendante ($\approx 5\text{ s}$)
- phase descendante ($\approx 10\text{ s}$)
- Magnitude $M \approx 7$
- $1\text{ s} \equiv 1\text{ h}$ de calcul



	Mur C3s ($f = 5\text{ Hz}$)
a_{dyn}	3 m.s^{-2}
a_{pstat}	1.6 m.s^{-2}
Ecart relatif (%)	77%

Coefficient de comportement global r_g :

$$r_g = \frac{a_{dyn}}{a_{pstat}} \approx 1.8$$

- Conclusion : Coefficient de comportement global de 1,8 est obtenu à partir d'un signal harmonique (5 Hz) composé de phase ascendante et descendante linéaires

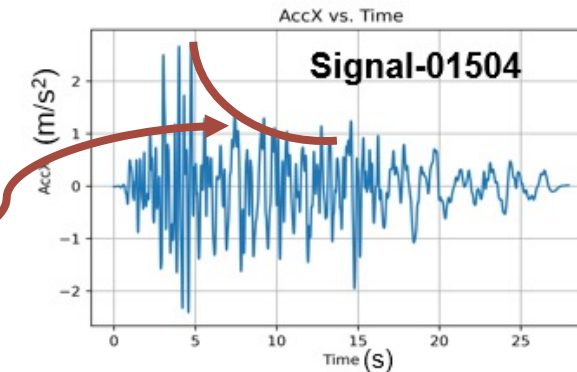
Analyse dynamique



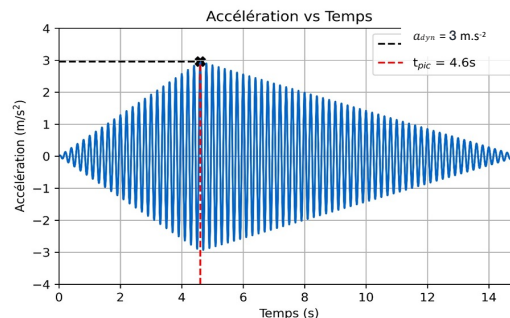
• Signaux synthétiques

- Modélisation de décroissance exponentielle :
 - La décroissance exponentielle de la forme :

$$f(t) = A \cdot e^{-\lambda \cdot (t - t_{pic})}$$



- Un essai ($\lambda = 0,3$) a été mené pour étudier l'influence de la forme de la phase descendante

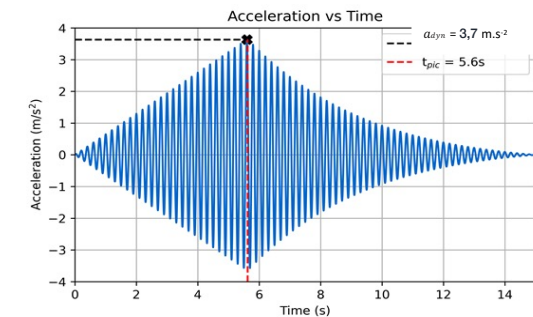


$$a_{dyn} = 3 \text{ m.s}^{-2}$$

Coefficient de comportement global :

$$r_g = \frac{a_{dynamique}}{a_{pseudo}} = 1,8$$

Linéaire VS Exponentielle



$$a_{dyn} = 3,7 \text{ m.s}^{-2}$$

Coefficient de comportement global :

$$r_g = \frac{a_{dynamique}}{a_{pseudo}} = 2,3$$

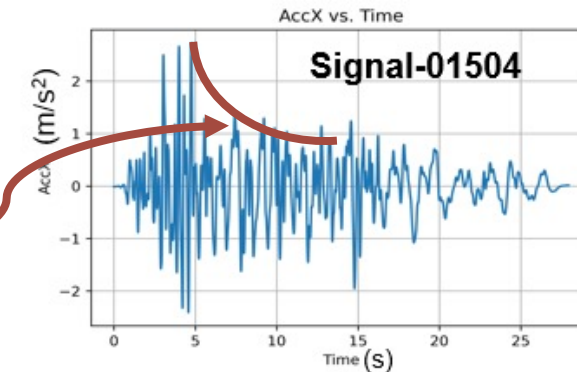
Analyse dynamique



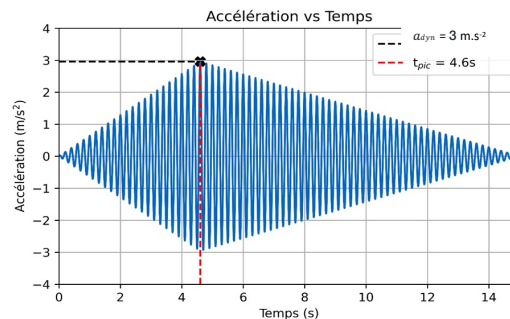
- Signaux synthétiques

- Modélisation de décroissance exponentielle :
 - La décroissance exponentielle de la forme :

$$f(t) = A \cdot e^{-\lambda \cdot (t - t_{pic})}$$

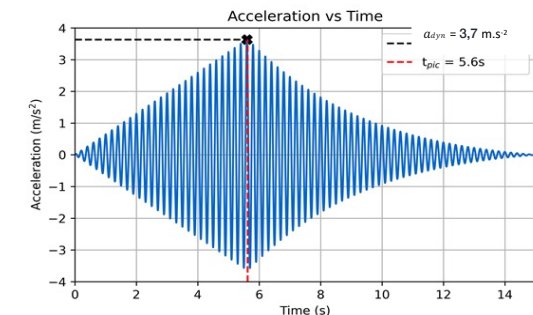


- Un essai ($\lambda = 0,3$) a été mené pour étudier l'influence de la forme de la phase descendante



$$r_g = 1,8$$

Linéaire VS Exponentielle



$$r_g = 2,3$$

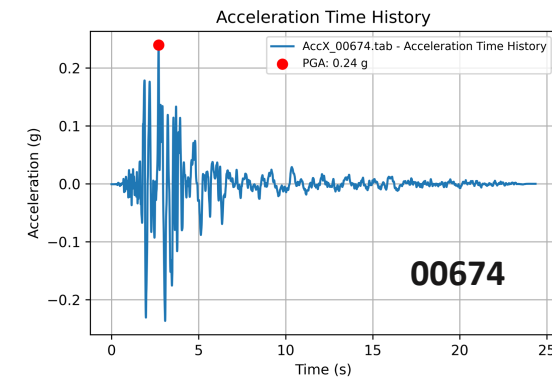
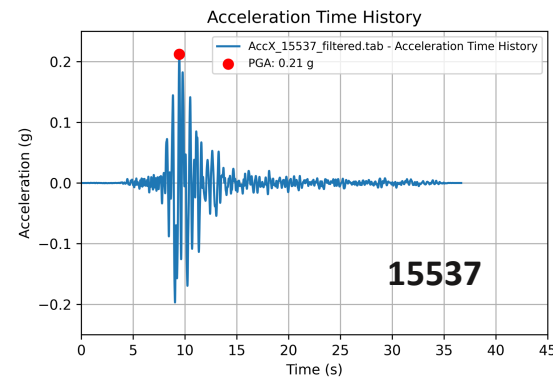
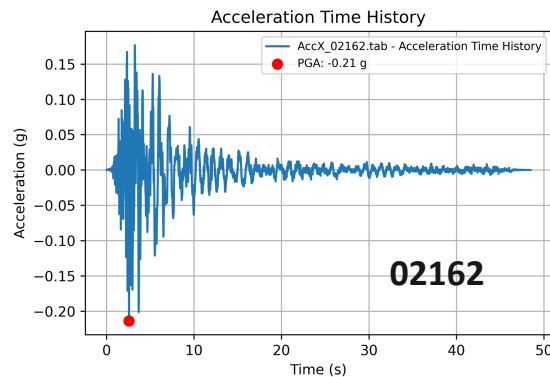
- Conclusion : La forme de la phase descendante est critique → le mur est très sensible à l'effet des cycles post-pic et non pas uniquement à la valeur du PGA

Analyse dynamique



- Signaux réels

- Signaux extraits de la base RESORCE avec les caractéristiques suivantes :
 - Magnitude : [5.5, 6.5]
 - EpiD (km) : [0.0, 20.0]
 - PGA (g) : [0.15, 0.3]



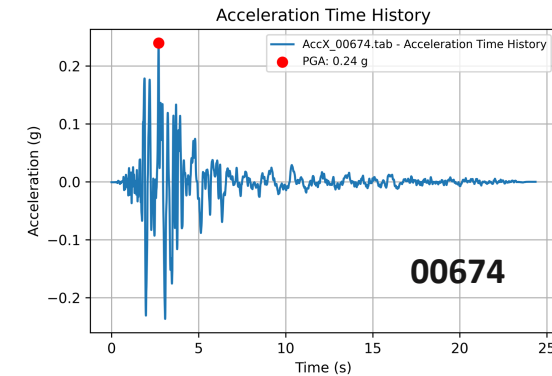
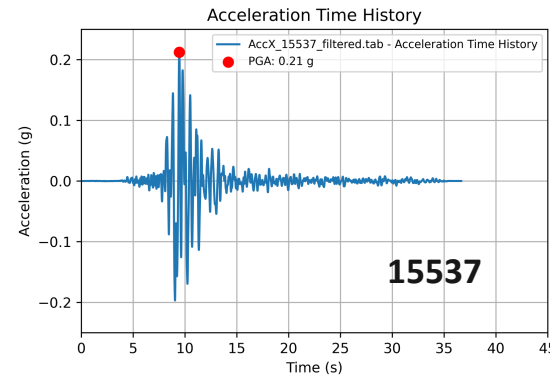
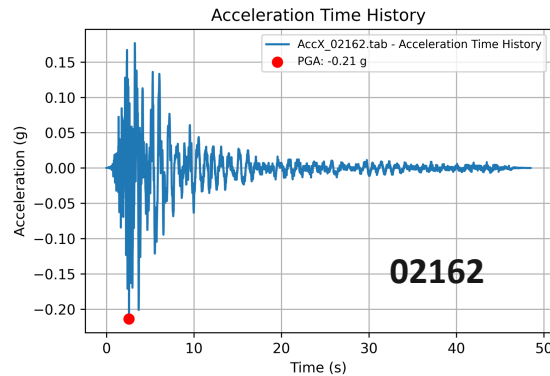
Exemple de signal	Fréquence centrale (Hz)	PGA (g)	phase forte (s)	Durée totale (s)
02162	2,7	0,2	9,75	45
15537	3,4	0,23	3,3	36
00674	3,5	0,24	4,2	24

Analyse dynamique



- Signaux réels

- Signaux extraits de la base RESORCE avec les caractéristiques suivantes :



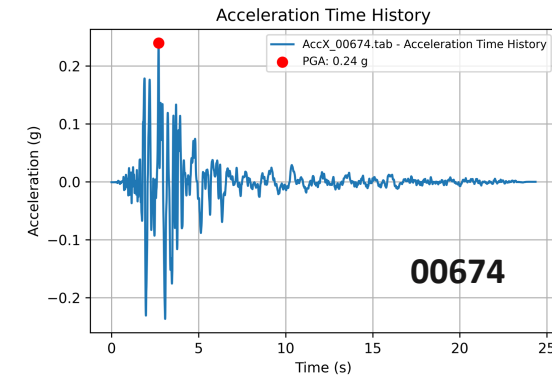
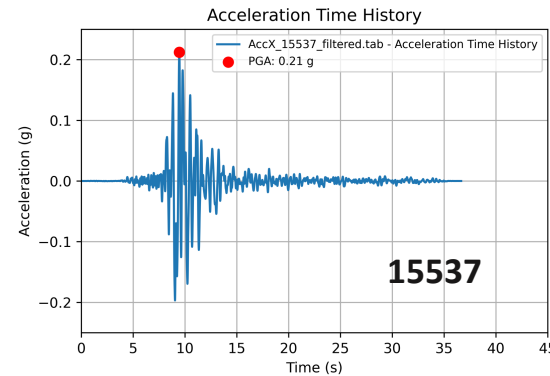
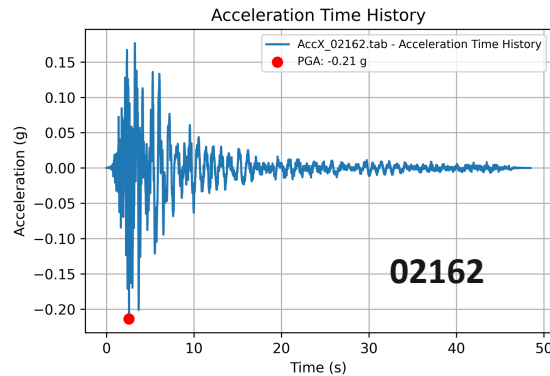
- PGA augmenté progressivement jusqu'à atteindre l'accélération maximale acceptable (a_{dyn})

Analyse dynamique



- **Signaux réels**

- Signaux extraits de la base RESORCE avec les caractéristiques suivantes :



- PGA augmenté progressivement jusqu'à atteindre l'accélération maximale acceptable (a_{dyn})

signal	Fréquence centrale (Hz)	phase forte (s)	PGA (g)	Facteur d'amplification	a_{dyn} (g)	Coefficient de comportement (r_g)
02162	2,7	9,75	0,2	2	0,4	2,9
15537	3,4	3,3	0,23	1,7	0,4	2,9
00674	3,5	4,2	0,24	2,3	0,55	3,9

→ r_g peut être bien supérieure à 2 qui est la valeur maximale de l'Eurocode 8 autorisée

Conclusion



- Forme de la phase descendante du signal synthétique joue un rôle crucial dans la réponse du mur → influence forte l'effet de cumul des cycles
- PGA n'est pas un bon indicateur pour détecter la rupture du mur
- 4 signaux réels donnent des coefficients de comportement globaux r_g entre [2,9 ; 3,9] :
 - significativement plus élevés que les signaux synthétiques (5 Hz) [1,8; 2,3] car énergie sismique est distribuée sur une plus grande gamme de fréquences
- Enjeu d'une proposition raisonnable pour le coefficient de comportement global (déplacement en tête de mur $< 20\%H$)
 - économie de volume de pierres dans le cadre d'un calcul au séisme



Merci de votre attention

Contact :

OSMAN, hussein.osman@ec-lyon.fr