



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Webinaire « Doctorants en géotechnique »

Dimensionnement des murs de soutènement en pierre sèche

OSMAN, Hussein



14 JANVIER 2024

Introduction

Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS)

- ▶ Créé en 1992 à l'École Centrale de Lyon
- ▶ Spécialisé dans différents domaines de la mécanique
- ▶ Localisation : Lyon (ECL, ENTPE), Saint-Étienne (ENISE)
- ▶ Les équipes de recherche : 4 équipes



Tribologie, Physico-chimie, Dynamique des interfaces(TPCDI)

Dynamiques des Systèmes Complexes (DySCo)

Bio-Ingénierie & Perception, Mécanique Numérique et Procédés (BPMNP)

Géomatériaux et Construction durable (GCD)

Introduction

Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS)

- Créé en 1992 à l'École Centrale de Lyon
- Spécialisé dans différents domaines de la mécanique
- Localisation : Lyon (ECL, ENTPE), Saint-Étienne (ENISE)
- Les équipes de recherche : 4 équipes



Tribologie, Physico-chimie, Dynamique des interfaces(TPCDI)

Dynamiques des Systèmes Complexes (DySCo)

Bio-Ingénierie & Perception, Mécanique Numérique et Procédés (BPMNP)

Géomatériaux et Construction durable (GCD)

- Décarbonisation de la construction
- Résilience des structures face au changement climatique



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Dimensionnement des murs de soutènement en pierre sèche Introduction

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
- Intimement lié à l'activité économique (dont agricole) et a permis le développement de communautés dans des zones semi-montagneuses

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 :

- 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

Introduction

Défis actuels

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



Montpellier , France



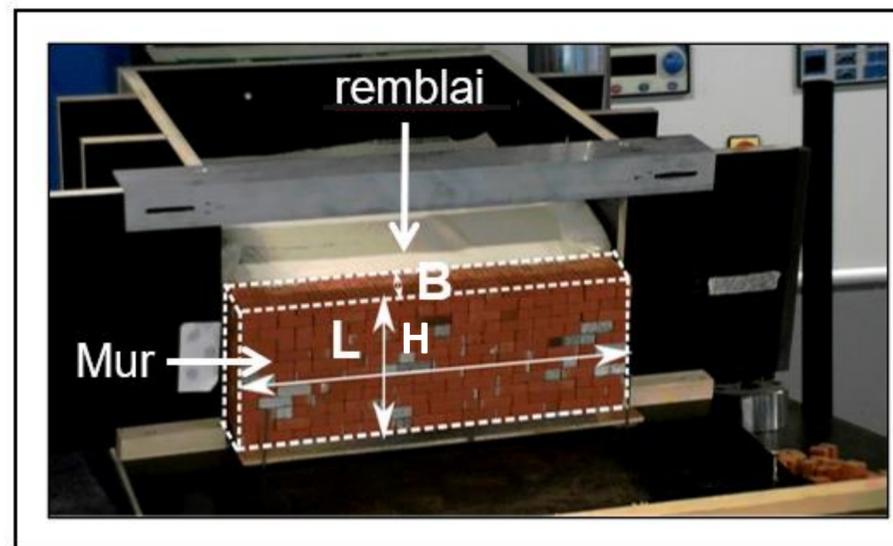
Saint-Martin-de-Castillon, France

Introduction

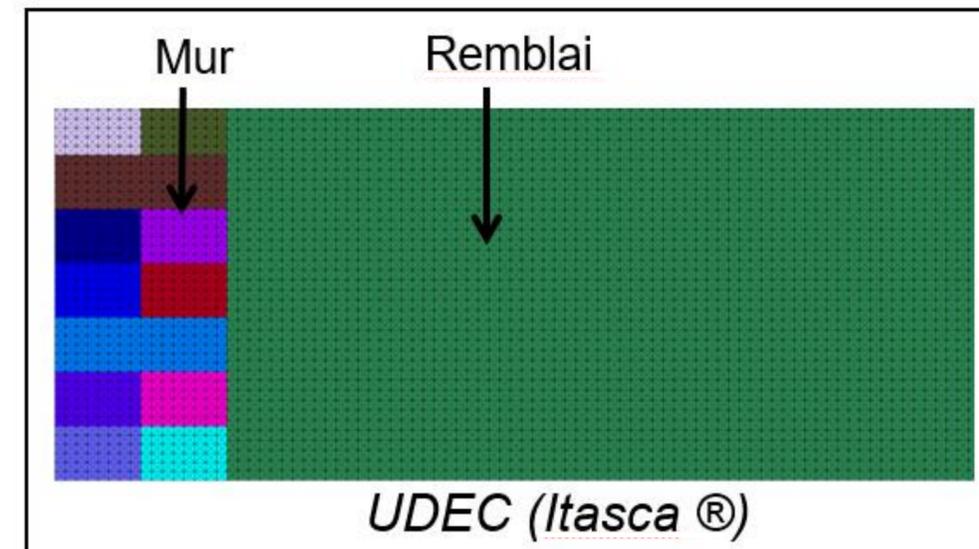
Études précédentes au LTDS

- 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 »



Introduction

Études précédentes au LTDS

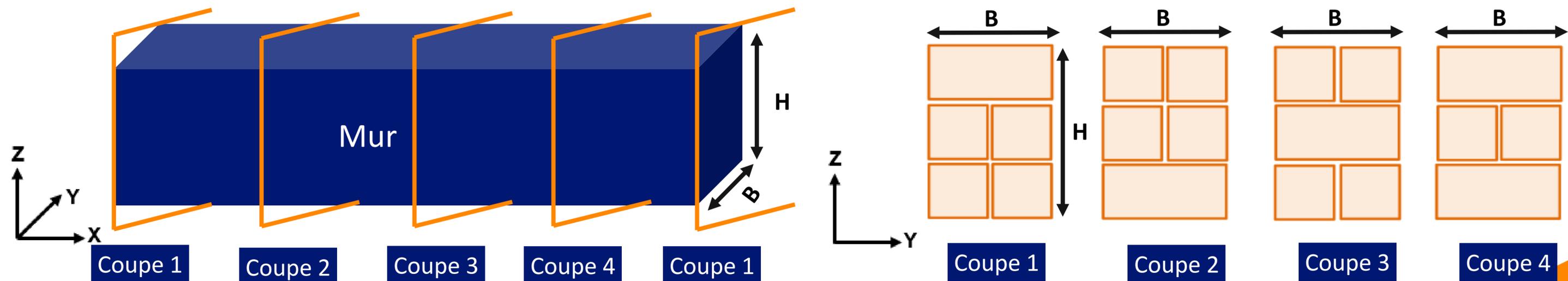
- 2 thèses de doctorat dont celle de N. SAVALLE (2019) « Étude du comportement sismique des murs de soutènement de talus en pierre sèche »
- La problématique : choix d'une section représentative pour le 2D



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
 - 4 profils différents identifiés dans la longueur (sections disponibles)
 - Chaque profil induit une réponse particulière dans le modèle numérique
 - Nécessité de recombinaison des 4 réponses pour avoir la réponse globale



- 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
- Rupture des soutènements de talus (les terres des versants) se fait en déformation plane mais la rupture des soutènements routiers se fait en 3D



© C. Cornu



© C. Cornu

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
- Rupture des soutènements de talus (les terres des versants) se fait en déformation plane mais la rupture des soutènements routiers se fait en 3D



© C. Cornu



© C. Cornu

- **Nécessité de produire des modèles numériques en 3D**



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Dimensionnement des murs de soutènement en pierre sèche Méthodologie et Modèle en 3D

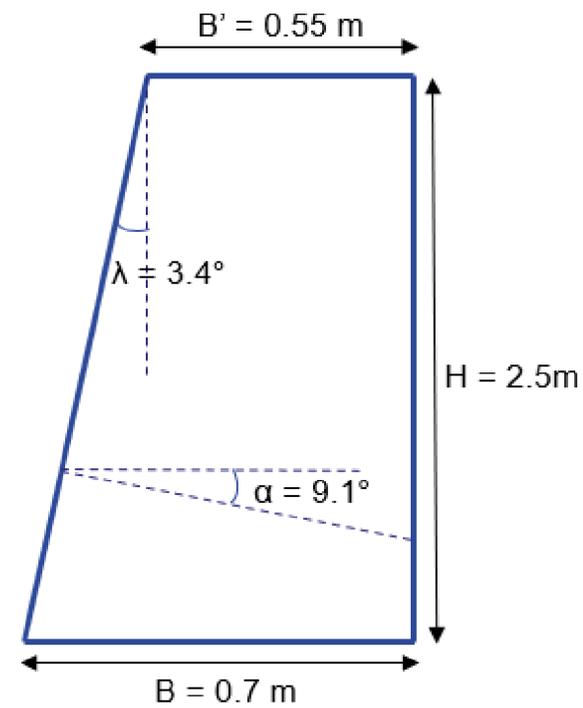
Géométrie

Application à des murs de taille réelle

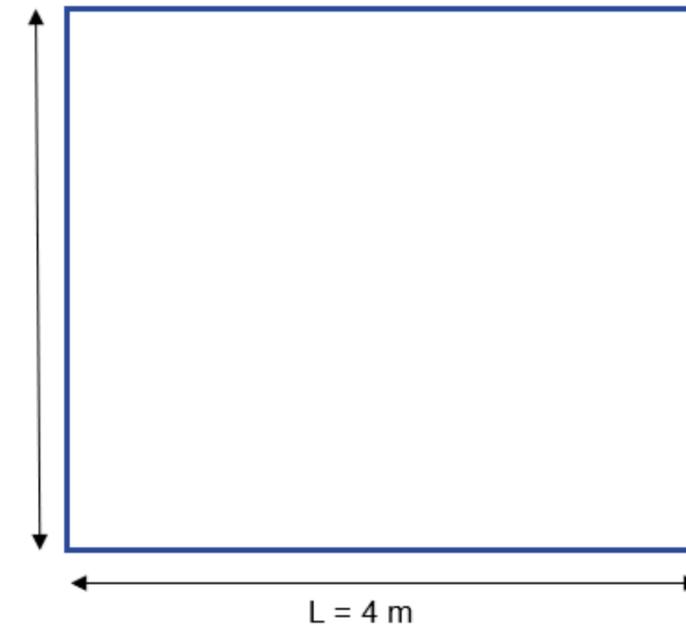
➤ Mur C3s en schiste d'A-S. Colas (2009)



Image du mur C3s



Coupe



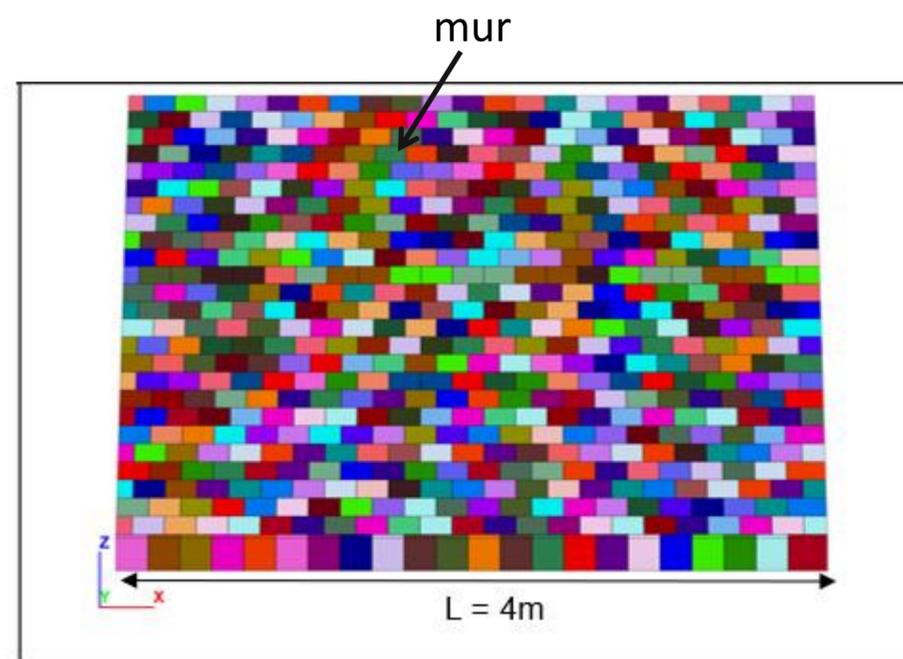
Vue de face

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.

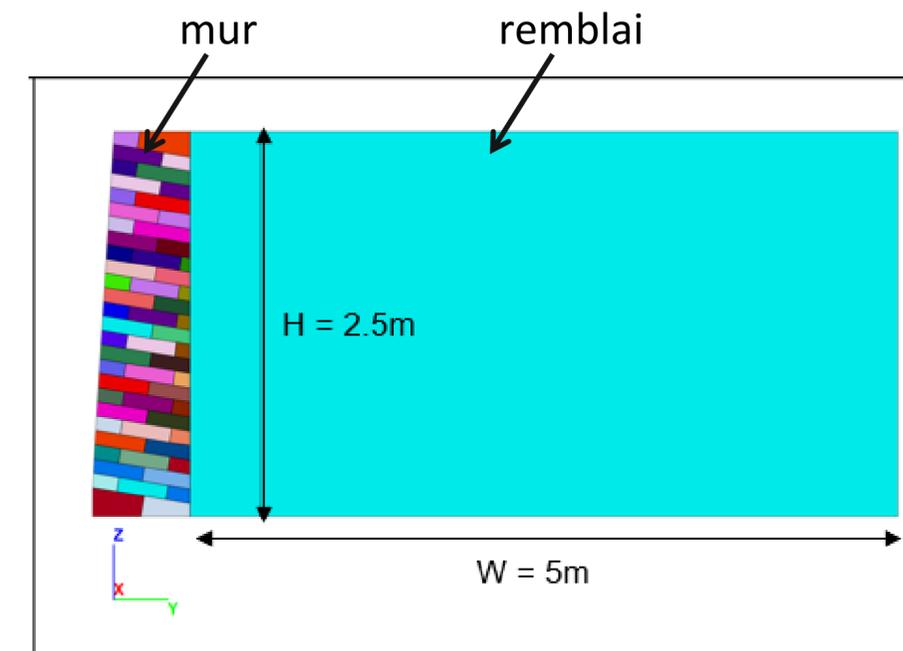
Méthodologie

Modélisation numérique

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



Vue de face



Coupe

Méthodologie

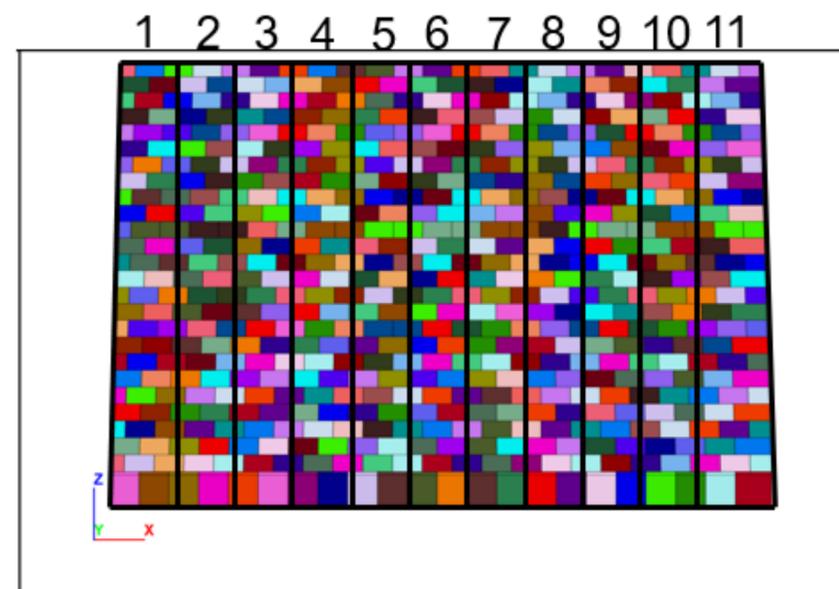
Modélisation numérique

- Approche 3D mixte Discrète (mur) – Continue (remblai) (3DEC, ITASCA SAS)
- Conditions aux limites
- Lois de comportement matériaux, contacts et interfaces
 - Pierres du mur : Élastique 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)

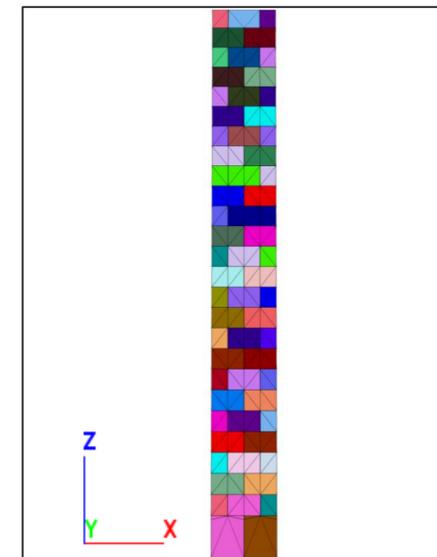
Méthodologie

Modélisation numérique

- Approche 3D mixte Discrète (mur) – Continue (remblai) (3DEC, ITASCA SAS)
- Conditions aux limites
- Lois de comportement matériaux, contacts et interfaces
- Notion de tranche « périodique » → 1 tranche a le même comportement que tout le mur → gain de temps de calcul



mur entier : 11 motifs

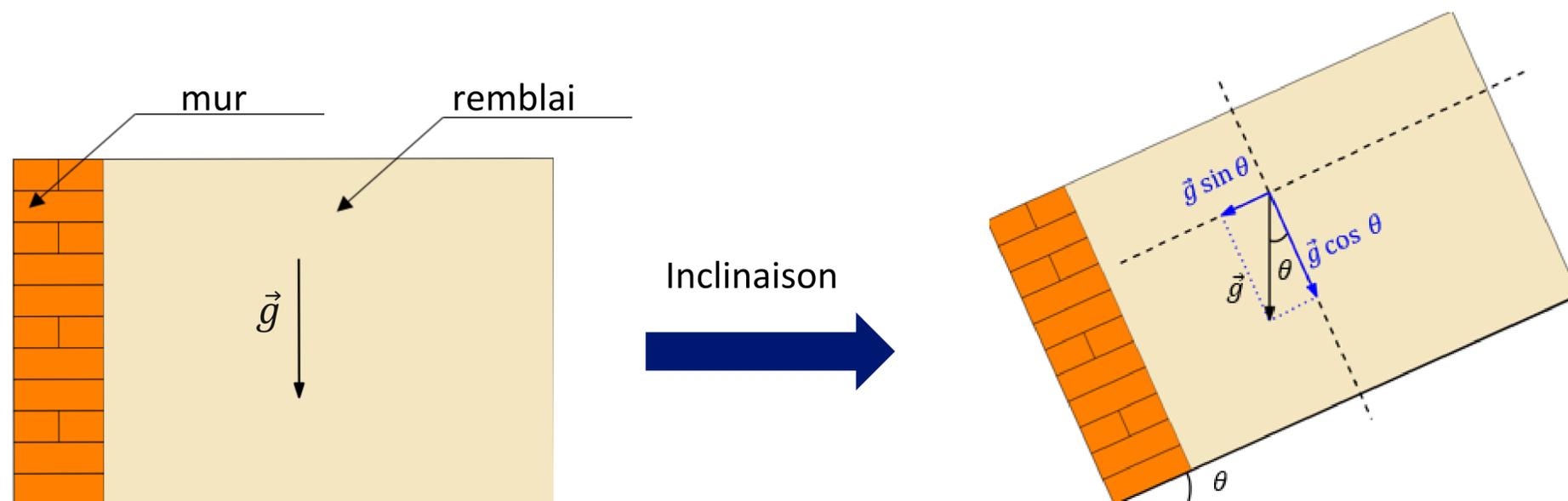


motif

Méthodologie

Modélisation numérique

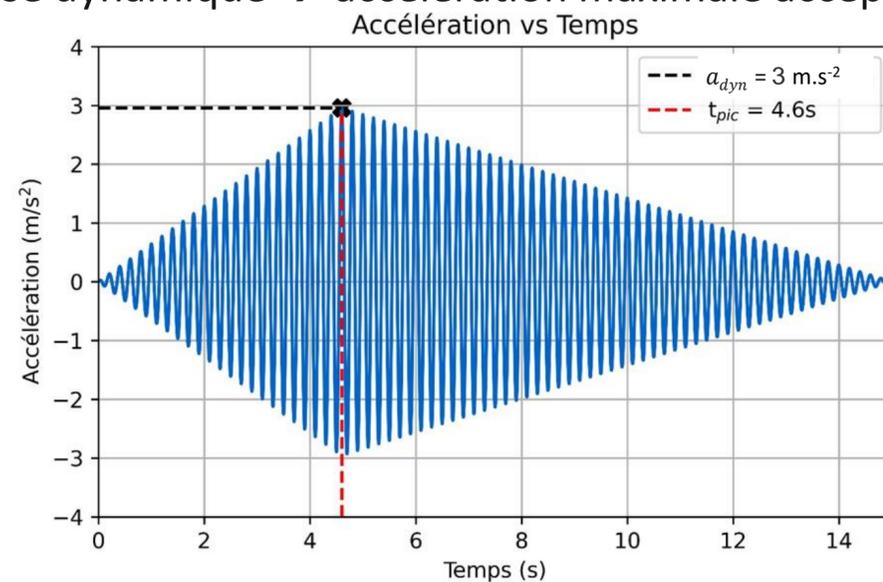
- Approche 3D mixte Discrète (mur) – Continue (remblai) (3DEC, ITASCA SAS)
- Conditions aux limites
- Lois de comportement matériaux, contacts et interfaces
- Notion de tranche « périodique » → 1 tranche a le même comportement que tout le mur → gain de temps de calcul
- Analyse pseudo-statique (Eurocode 8) → résistance pseudo-statique (a_{pstat})



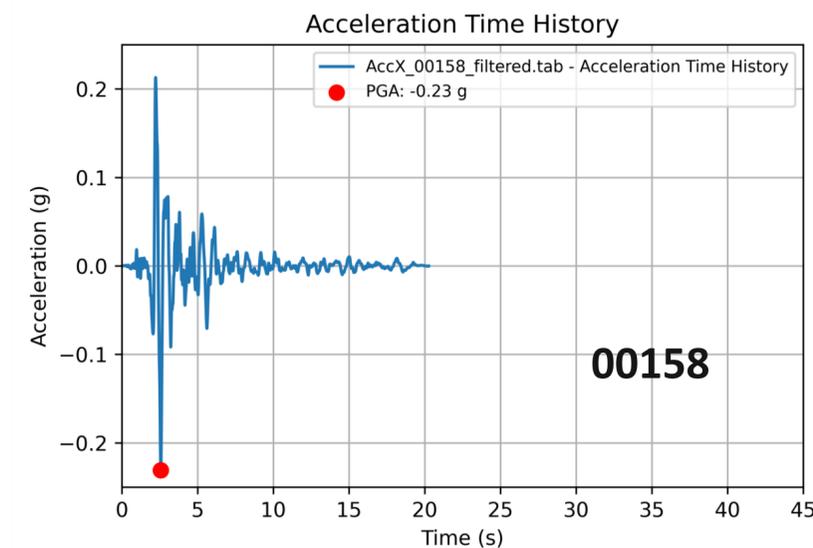
Méthodologie

Modélisation numérique

- Approche 3D mixte Discrète (mur) – Continue (remblai) (3DEC, ITASCA SAS)
- Conditions aux limites
- Lois de comportement matériaux, contacts et interfaces
- Notion de tranche « périodique » → 1 tranche a le même comportement que tout le mur → gain de temps de calcul
- 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

Méthodologie

Modélisation numérique

- Approche 3D mixte Discrète (mur) – Continue (remblai) (3DEC, ITASCA SAS)
- Conditions aux limites
- Lois de comportement matériaux, contacts et interfaces
- Notion de tranche « périodique » → 1 tranche a le même comportement que tout le mur → gain de temps de calcul
- 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 $r_g = \frac{a_{dyn}}{a_{pstat}} \rightarrow$!!! Pas le même sens physique que Eurocode 8



cfms

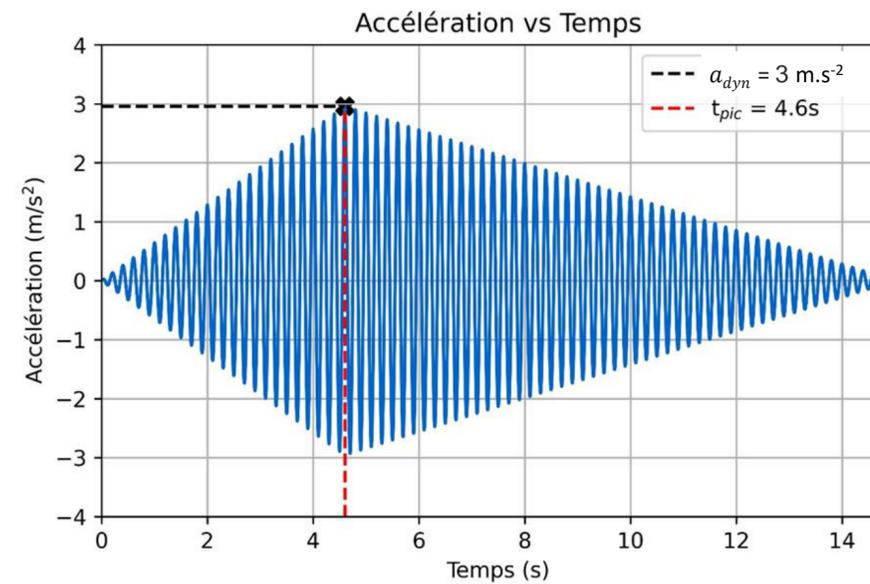
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Dimensionnement des murs de soutènement en pierre sèche Analyse Dynamique

Analyse dynamique

Résultats

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 :

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

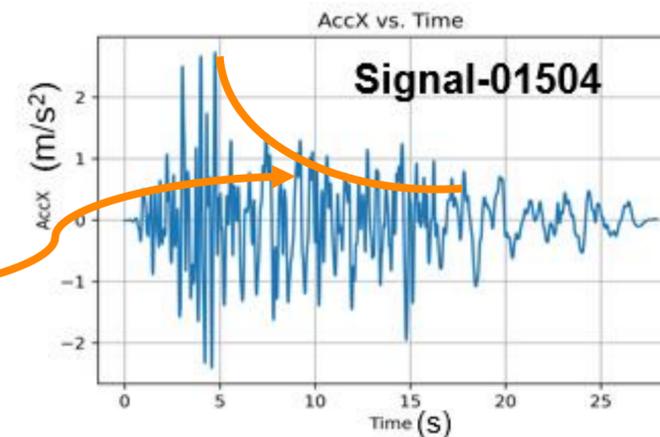
- Coefficient de comportement global de 1,8 est obtenu à partir d'un signal harmonique (5 Hz) composé d'une phase ascendante et d'une phase descendante

Analyse dynamique

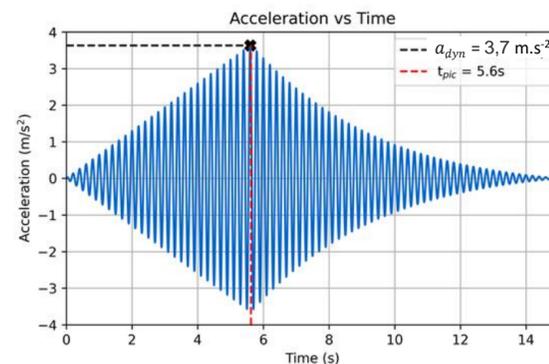
Modélisation de décroissance exponentielle

➔ 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

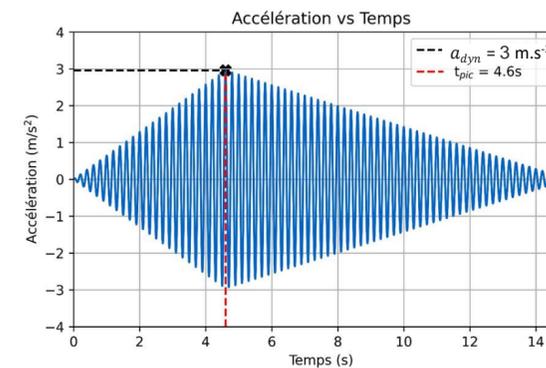


$$a_{dyn} = 3,7 \text{ m.s}^{-2}$$

Coefficient de comportement global :

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

Exponentielle VS Linéaire



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

Coefficient de comportement global :

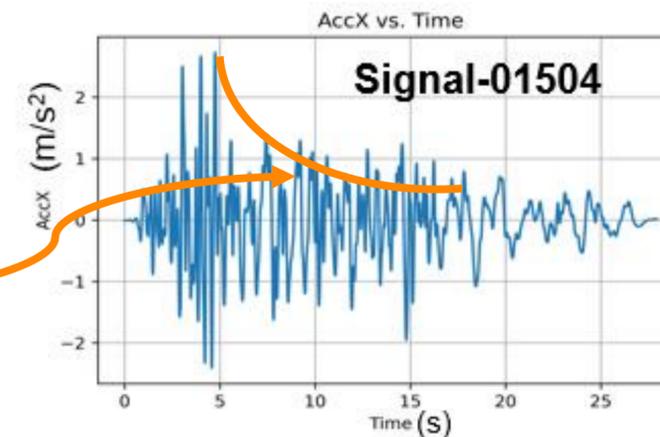
$$r_g = \frac{a_{dynamique}}{a_{pseudo}} = 1,8$$

Analyse dynamique

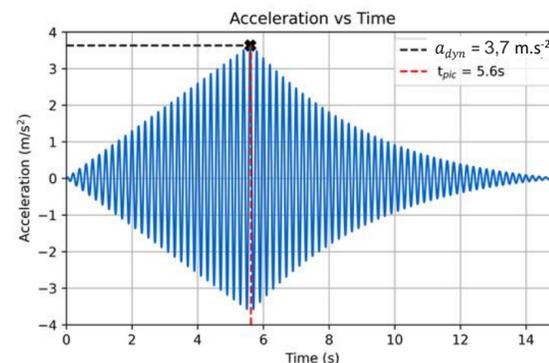
Modélisation de décroissance exponentielle

- La décroissance exponentielle de la forme :

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

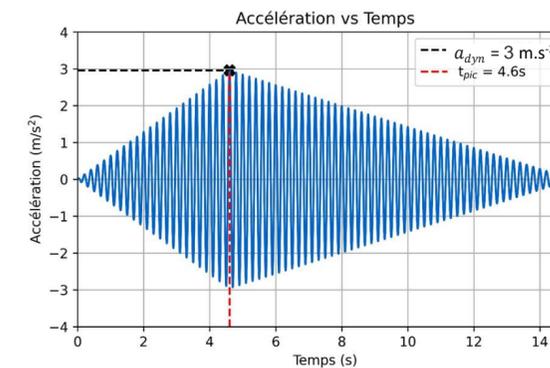


- Un essai ($\lambda = 0,3$) a été mené pour étudier l'influence de la forme de la phase descendante



$$r_g = 2,3$$

Exponentielle VS Linéaire



$$r_g = 1,8$$

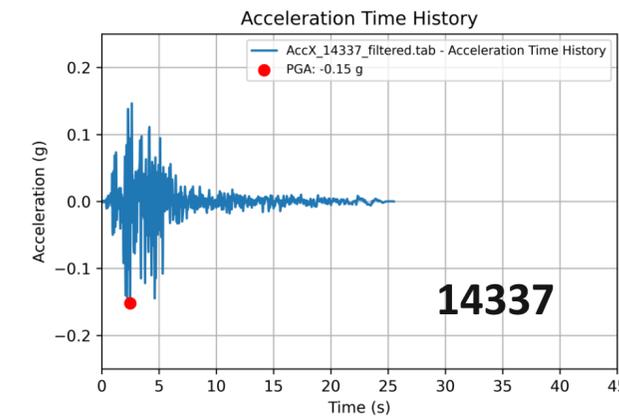
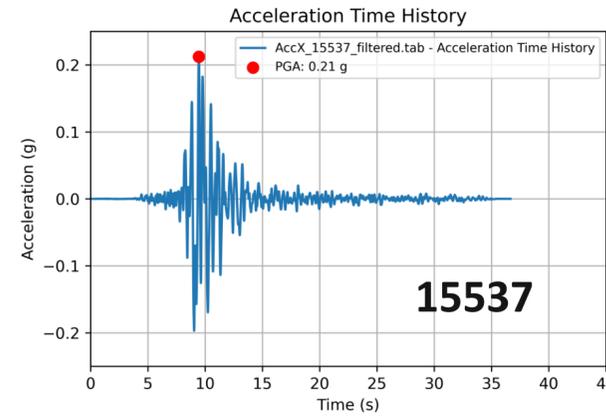
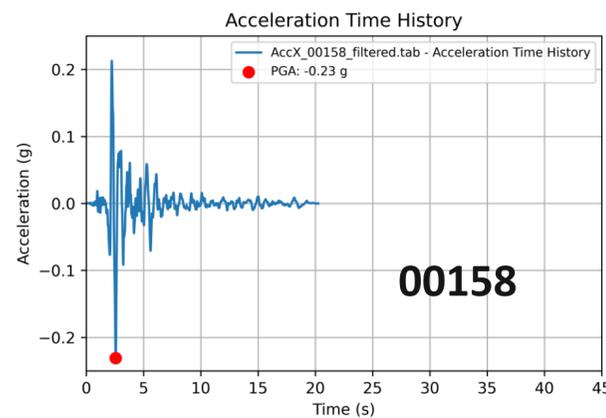
- Conclusion : La forme de la phase descendante est critique \rightarrow le mur est très sensible à l'effet des cycles et non pas uniquement à la valeur du PGA

Analyse dynamique

Signaux dynamiques réels

12 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]

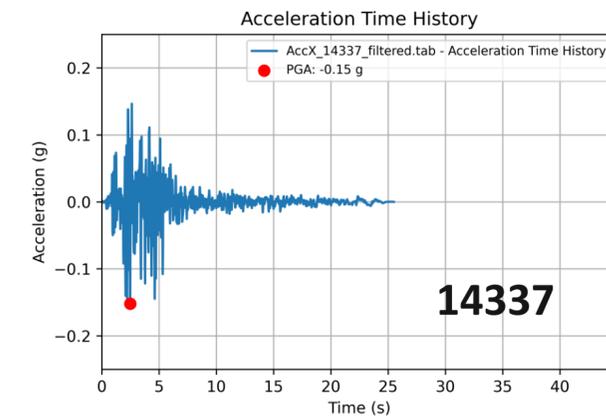
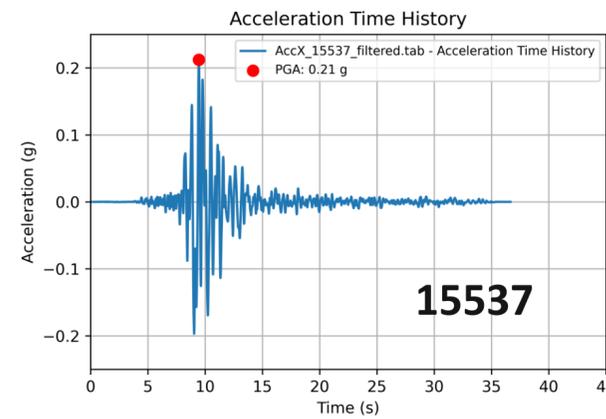
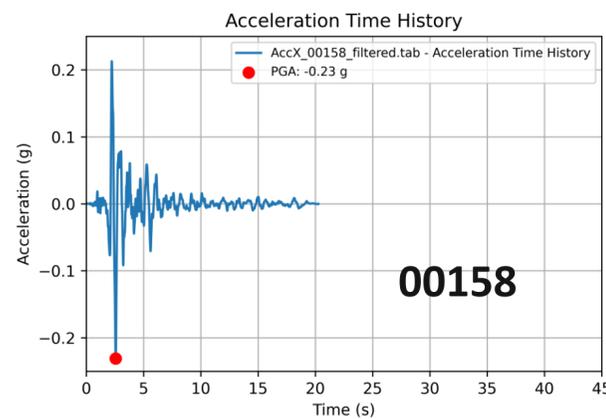


Exemple de signal	Fréquence centrale (Hz)	PGA (g)	phase forte (s)	Durée totale (s)
00158	1,33	0,23	3,5	20,27
15537	1,82	0,21	3,9	36,66
14337	7	0,15	4,8	25

Analyse dynamique

Signaux dynamiques réels

➤ 12 signaux extraits de la base RESORCE avec les caractéristiques suivantes :

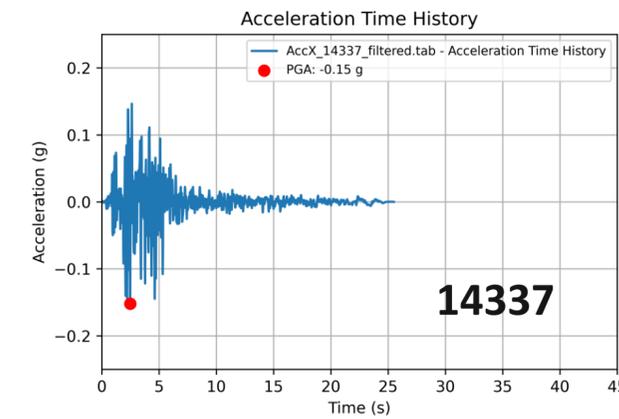
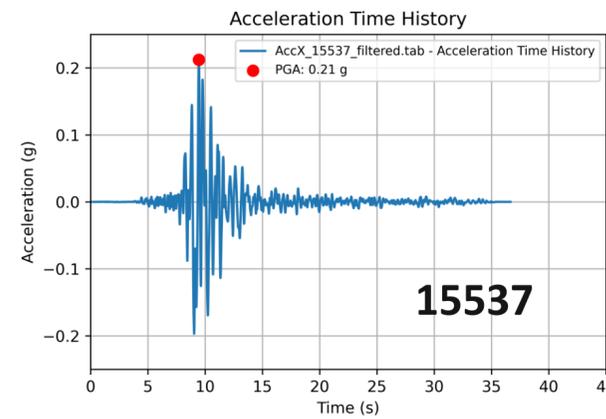
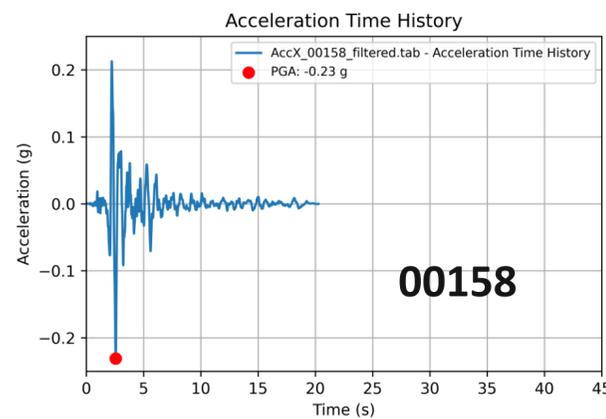


➤ Accélération a été normalisée en l'augmentant progressivement jusqu'à atteindre l'accélération maximale acceptable (a_{dyn})

Analyse dynamique

Signaux dynamiques réels

➤ 12 signaux extraits de la base RESORCE avec les caractéristiques suivantes :



➤ Accélération a été normalisée en l'augmentant progressivement jusqu'à atteindre l'accélération maximale acceptable (a_{dyn})

Exemple de signal	Fréquence centrale (Hz)	PGA (g)	Facteur de normalisation	a_{dyn} (g)	Intensité Arias (m/s)	phase forte (s)	Durée totale (s)	Coefficient de comportement (r_g)
00158	1,33	0,23	3.2	0,74	3	3,5	20,27	4,6
15537	1,82	0,21	2,4	0,51	3	3,9	36,66	3,2
14337	7	0,15	3,9	0,59	3,8	4,8	25	3,7

Analyse dynamique

Conclusion

- Forme de la phase descendante du signal synthétique joue un rôle crucial dans la réponse du mur
- PGA n'est pas un bon indicateur pour détecter la rupture du mur
- 12 Signaux réels donnent des coefficients de comportement globaux r_g entre [1,9 ; 8,4] :
 - significativement plus élevés que les signaux synthétiques (5 Hz) [1,8; 2,3] car énergie sismique 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!

Hussein OSMAN
hussein.osman@ec-lyon.fr

Références

- [1] © F-X Emery dans P. COSTE, C. CORNU, D. LARCENA, R. SETTE, F-X. EMERY Pierre sèche. Le bec en l'air, 2008.
- [2] 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.
- [3] VILLEMUS, B. Etude des murs de soutènement en maçonnerie de pierres sèches. Lyon : Thèse ENTPE, 2004.
- [4] MUNDELL, C. Large Scale Testing of Drystone Retaining Structures. University of Bath, England, 2009.
- [5] TERRADE, B. Evaluation structurale des murs de soutènement en maçonnerie. Université Paris-Est, 2017.
- [6] POWRIE W. , HARKNESS R-M. , ZHANG X. et BUSH D.I. Deformation and failure modes of drystone retaining wall. Geotechnique, 2002, Vol. 52.
- [7] OETOMO, J. J. Comportement à la rupture des murs de soutènements en pierre sèche : une modélisation par approche discrète. Lyon : Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, 2014.
- [8] ENTPE. Guide de bonnes pratiques de construction de murs de soutènement en pierre sèche. Lyon, 2008.
- [9] ENTPE, ABPS, ÉCOLE DES PONTS PARISTECH, IFSTTAR et FFB. Technique de construction des murs en pierre sèche : Règles professionnelles. ENTPE - ABPS, 2017.
- [10] Nathanael Savalle, E. V. (2018). Pseudo-static scaled-down experiments on dry stone retaining walls: Preliminary implications for the seismic design. ELSEVIER.
- [11] N. Savalle, J. B.-g. (2020). Dynamic behaviour of drystone retaining walls: shaking table scaled-down tests. European Journal of Environmental and Civil engineering. doi: 10.1080/19648189.2020.1855477
- [12] Juan-Carlos Quezada, E. V.-C. (2016). 3D failure of a scale-down dry stone retaining wall: a DEM modelling. Engineering Structures.