

Conférences



La recherche scientifique autour de la pierre sèche

par Éric VINCENS

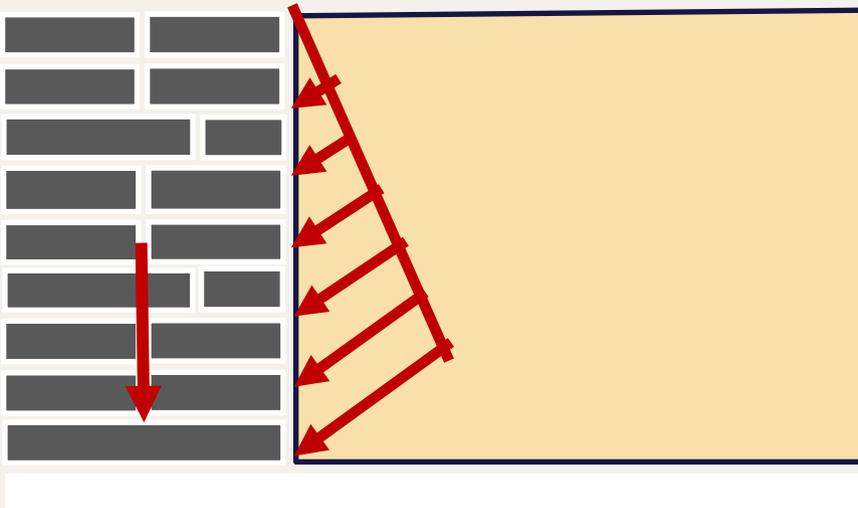


Ouvrages de soutènement en pierre sèche



Mur de soutènement

- Mur construit pour maintenir un sol en place
- Résiste à la poussée du sol grâce à son poids → mur-poids



Action du sol sur mur est inclinée car frottement entre sol et mur

Mur de soutènement

- Mur construit pour maintenir un sol en place
- Résiste à la poussée du sol grâce à son poids
- Deux types de murs de soutènement



© C. Cornu

Mur de soutènement de talus



© C. Cornu

Mur de soutènement routier

Approche scientifique

- **Expérimentation à l'échelle 1/10**
Dégager des phénomènes principaux
Constituer une première base de données de résultats
- **Expérimentation à l'échelle 1**
Se mettre en conditions réelles
Base de données en conditions réelles
- **Construction de modèle analytique** capables de retranscrire les phénomènes observés
Construction d'abaques pour l'artisan
Outils informatiques pour l'ingénieur
- **Modélisation numérique**
Utilisation – construction de logiciels pour réaliser des études de cas ou études plus fines

Travail avec les maillages dès le début de la réflexion



Les murs de soutènement de talus



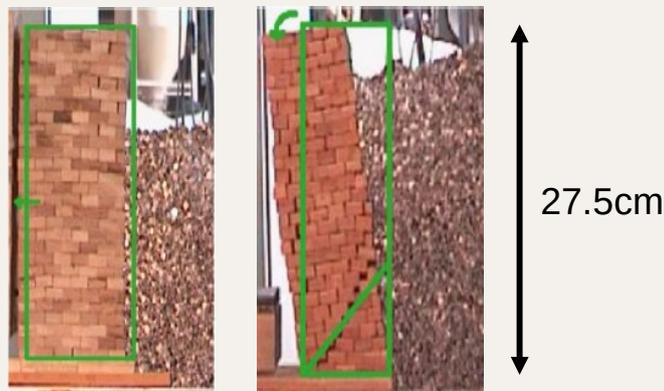
Mode de rupture

Essais échelle 1/10

- **Rupture par**

- Glissement (brique de bois) → à gauche

- Renversement (briques d'argile) → à droite



Expérience échelle 1/10, Colas, ENTPE (2009)

- **Rupture monolithique** dépendant du matériau constitutif des blocs
- Rupture « 2D »

Mode de rupture

Essais échelle 1

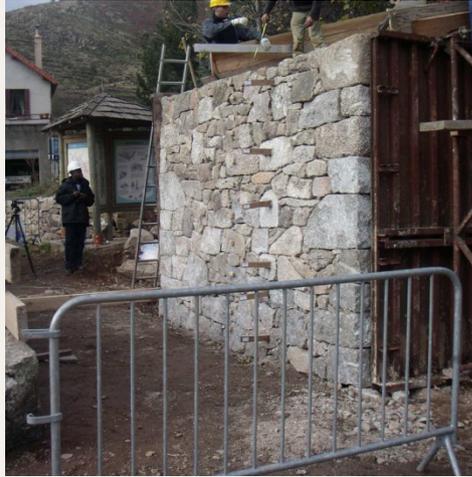


Expériences de Boris Villemus, ENTPE/Ecole des Ponts ParisTech, (2004)

- Murs en granite, en schiste
- Construits selon les règles de l'Art
- Chargés par un poche d'eau (pression hydrostatique)

Mode de rupture

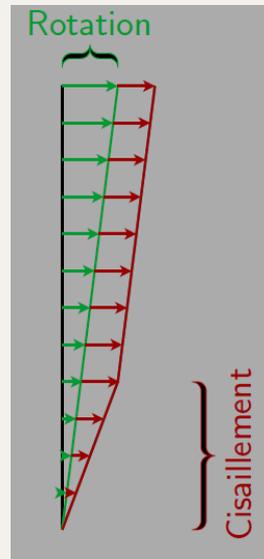
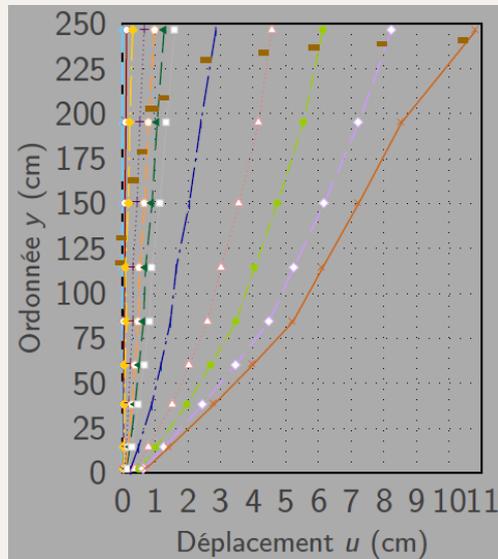
Essais échelle 1



Expériences de Anne-Sophie Colas, ENTPE/Ecole des Ponts ParisTech, (2009)

- Murs en calcaire, en granite, en schiste
- Construits selon les règles de l'Art
- Chargés par du gravier

Enseignements

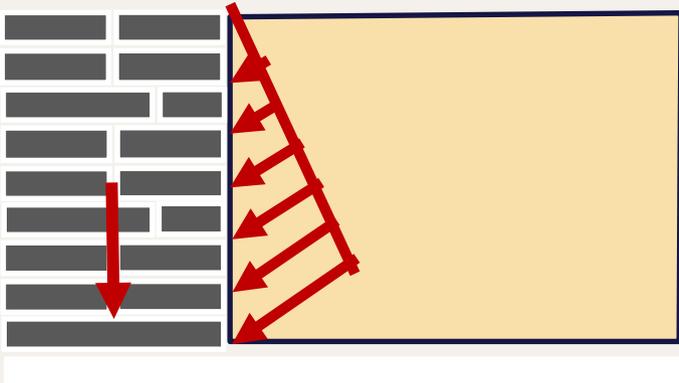


Expériences de Anne-Sophie Colas

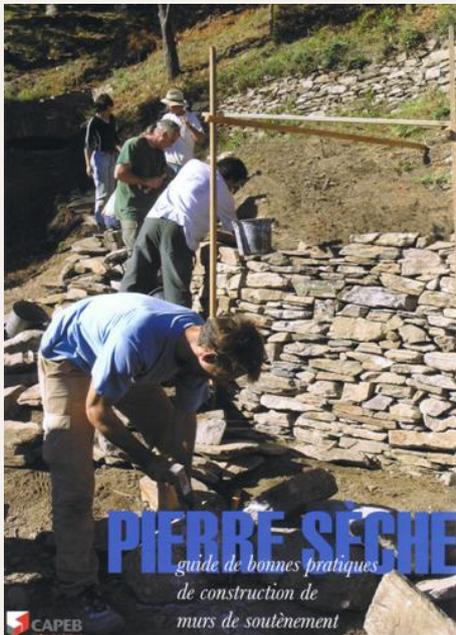
- Ruptures monolithiques avec le mode dépendant du matériau
 - Calcaire → par renversement
 - Schiste → mixte renversement-glisserment

Calculs pour le dimensionnement

Calcul analytique dit « analyse limite » - B. Villemus (2004)



A la limite de la rupture, la poussée du sol est connue



Guide de Bonnes Pratiques de construction des MSPS (2007)

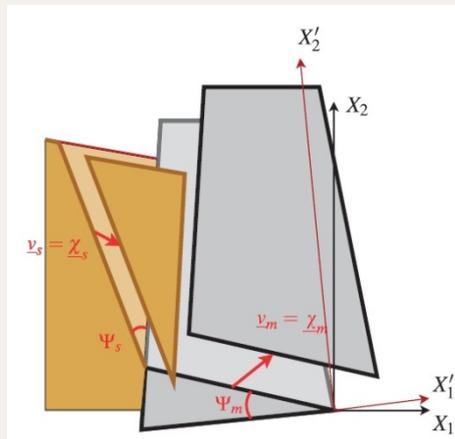
Abaques de dimensionnement de MSPS pour un **talus sans cohésion**

Collaborations entre universitaires et artisans-spécialistes de la pierre sèche

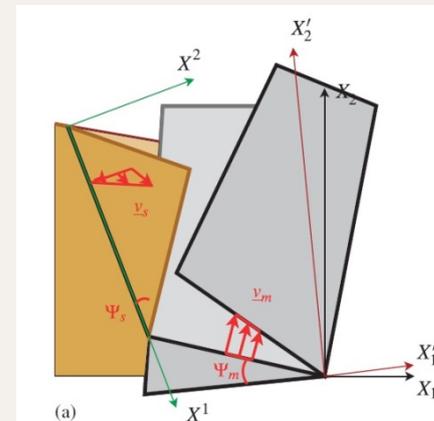
Calculs pour le dimensionnement

Calcul analytique à la rupture – AS. Colas (2009)

- Critère qui limite les contraintes dans les matériaux (mur + sol)
- Un mode de rupture du système remblai-mur
- Le travail des forces résistantes doit équilibrer le travail des forces sollicitantes



glissement

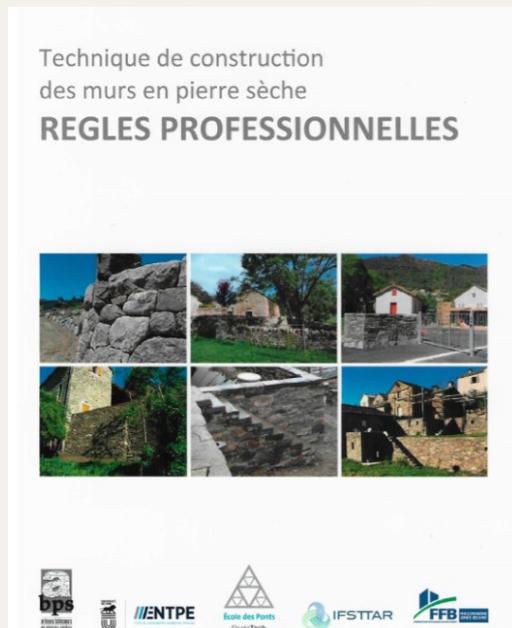


renversement

Calculs pour le dimensionnement

Calcul analytique à la rupture – AS. Colas (2009)

- Critère qui limite les contraintes dans les matériaux (mur + sol)
- Un mode de rupture du système remblai-mur
- Le travail des forces résistantes doit équilibrer le travail des forces sollicitantes



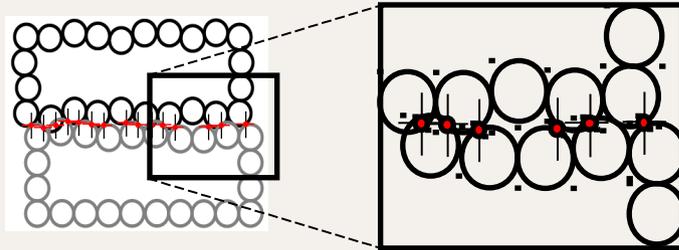
Règles Professionnelles de construction des MSPS (2017)

Abaques de dimensionnement de MSPS pour un talus avec cohésion

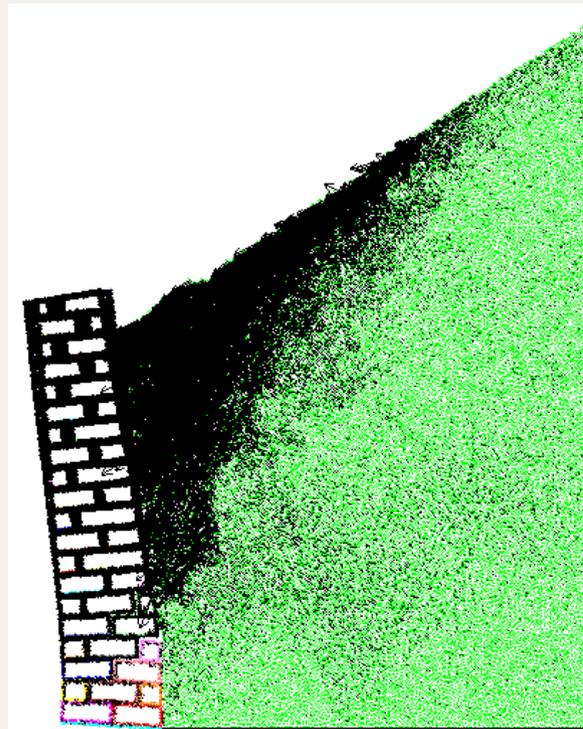
Calculs numériques

Approche discrète – J. Oetomo, ECL (2014)

- Reconstitution des blocs



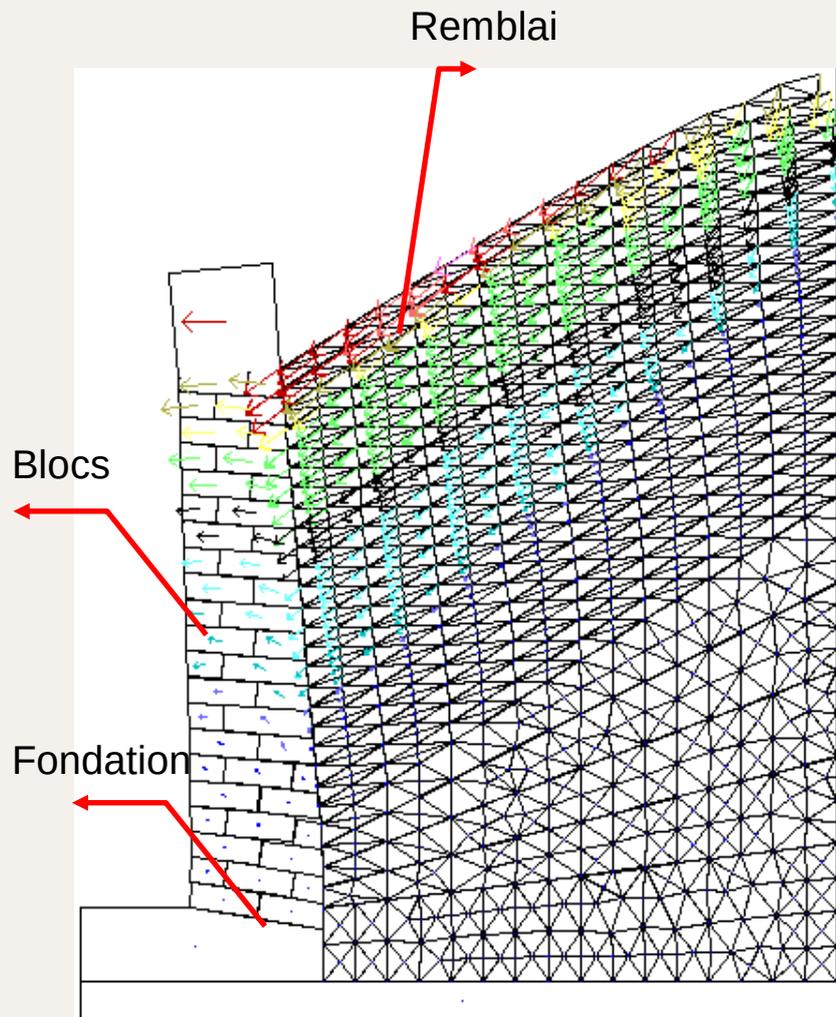
- Reconstitution des grains du remblai



Vitesses de déplacement,
James Oetomo, 2014

Calculs numériques

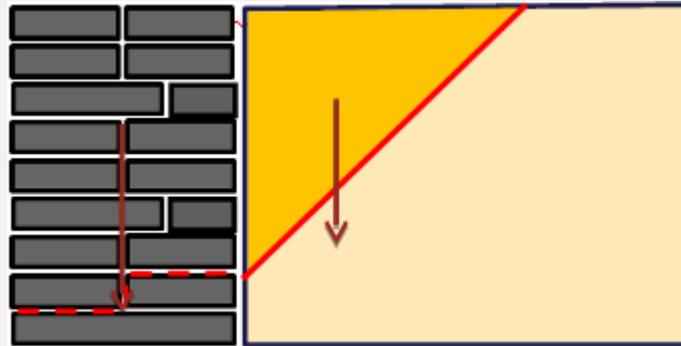
Approche mixte discrète-continue – J. Oetomo, ECL (2014)



- Atout de la méthode :
- Maximum 7% d'erreur avec les résultats expérimentaux □ très précis !
- Calculs rapides (4h)

Comportement au séisme

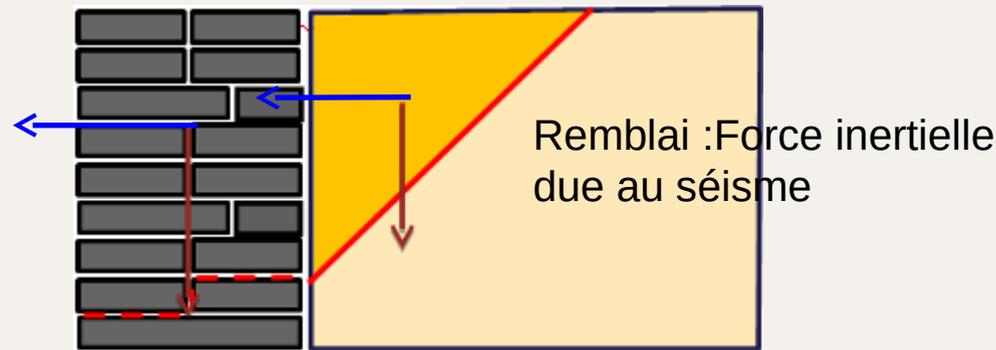
- Eurocode 8 → approche simplifiée dite : pseudo-statique
- Effet du séisme = force constante inertielle appliquée à un objet en mouvement



Comportement au séisme

- Eurocode 8 → approche simplifiée dite : pseudo-statique
- Effet du séisme = force constante inertielle appliquée à un objet en mouvement

Mur :
Force inertielle
due au séisme

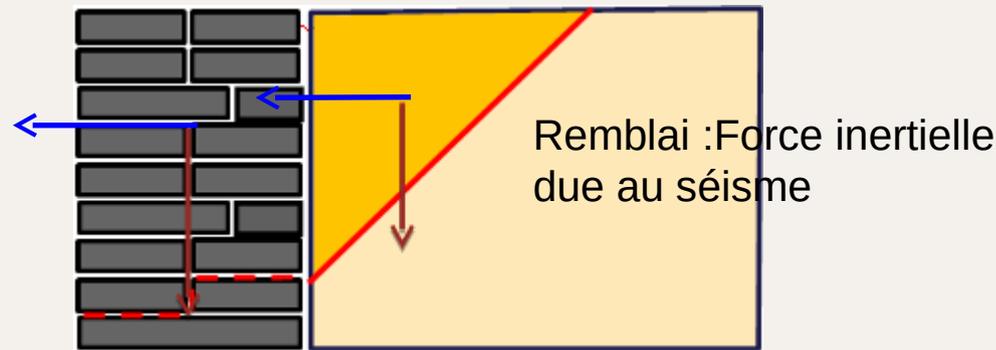


Juste avant la rupture

Comportement au séisme

- Eurocode 8 → approche simplifiée dite : pseudo-statique
- Effet du séisme = force constante inertielle appliquée à un objet en mouvement
- Calcul analytique dit « analyse limite » Nathanael Savalle, ECL/ENTPE (2019)

Mur :
Force inertielle
due au séisme



Juste avant la rupture

Définition du séisme

Accélération maximale sur un site donné :

- Impacts économiques/humains de l'ouvrage en cas de rupture

Définition du séisme

Accélération maximale sur un site donné :

- Impacts économiques/humains de l'ouvrage en cas de rupture
- Effets de site : amplification possible des mouvements due à des conditions de nature de sol

Définition du séisme

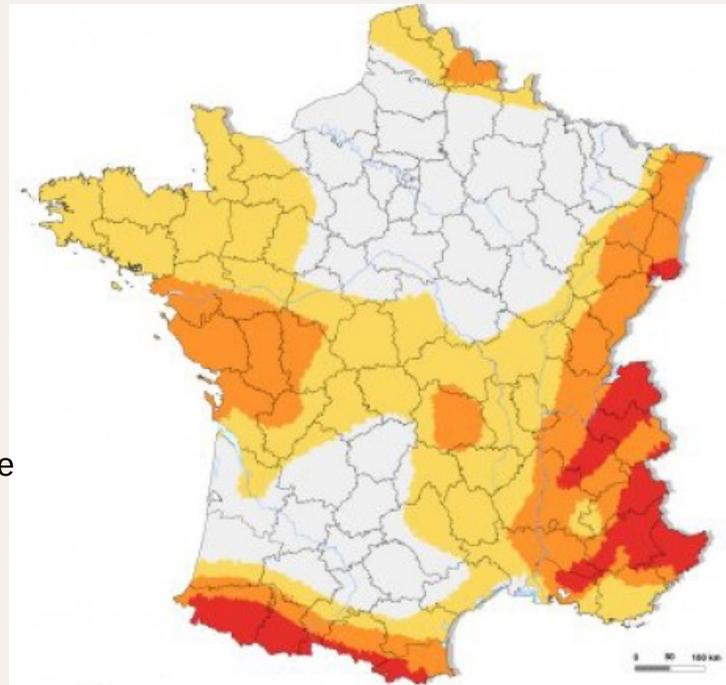
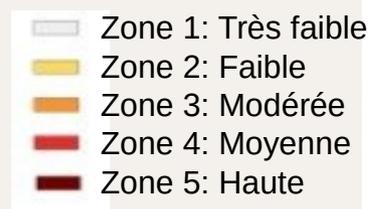
Accélération maximale sur un site donné :

- Impacts économiques/humains de l'ouvrage en cas de rupture
- Effets de site : amplification possible des mouvements due à des conditions de nature de sol
- Effet topographique : amplification possible selon la position sur un versant

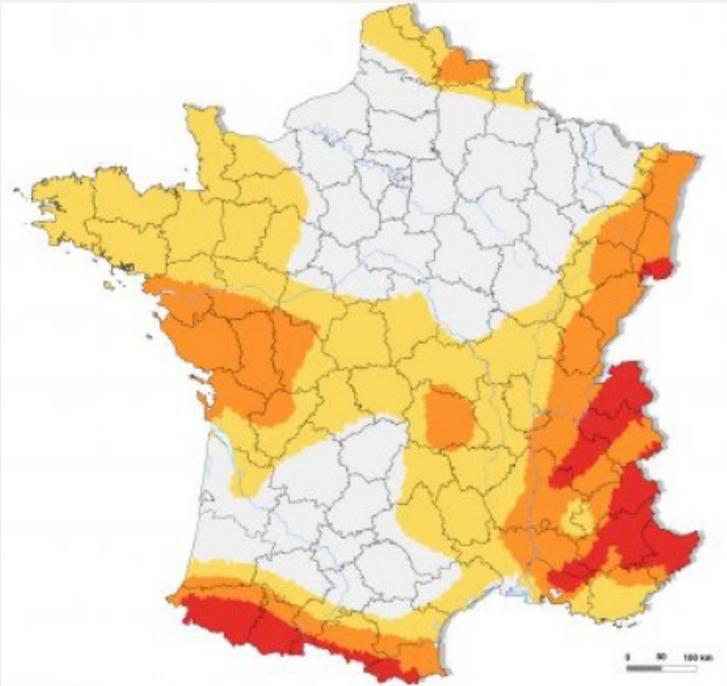
Définition du séisme

Accélération maximale sur un site donné :

- Impacts économiques/humains de l'ouvrage en cas de rupture
- Effets de site : amplification possible des mouvements due à des conditions de nature de sol
- Effet topographique : amplification possible selon la position sur un versant
- Zone sismique



Enseignements



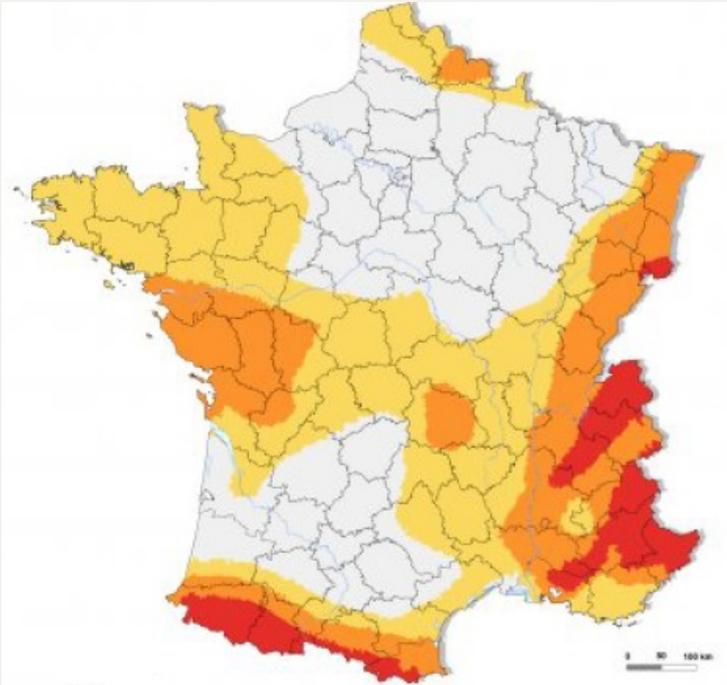
- Zone 1: Très faible
- Zone 2: Faible
- Zone 3: Modérée
- Zone 4: Moyenne
- Zone 5: Haute

Largeur supplémentaire pour B (%)

	Schiste	Calcaire
Zone 1	1%	4%

Dimensionnement statique
suffisant

Enseignements

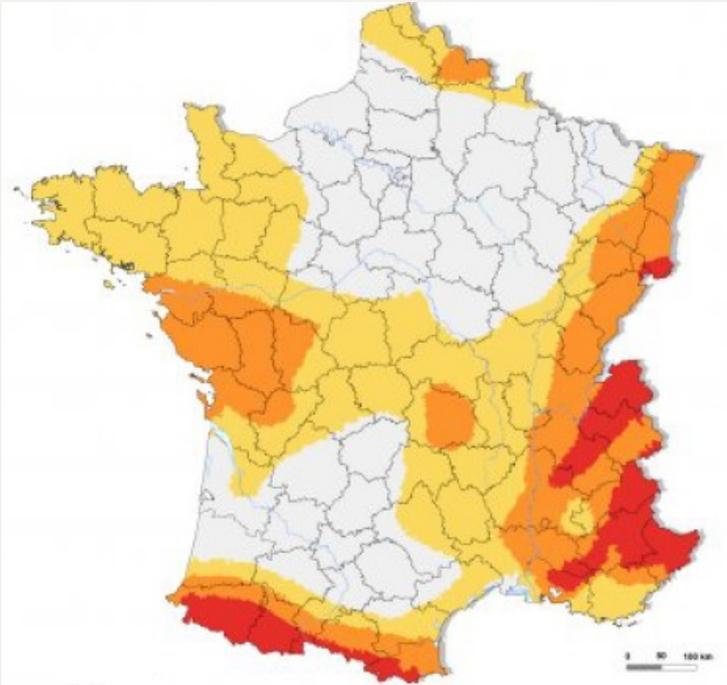


- Zone 1: Très faible
- Zone 2: Faible
- Zone 3: Modérée
- Zone 4: Moyenne
- Zone 5: Haute

Largeur supplémentaire pour B (%)

	Schiste	Calcaire
Zone 1	1%	4%
Zone 2	21%	22%

Enseignements



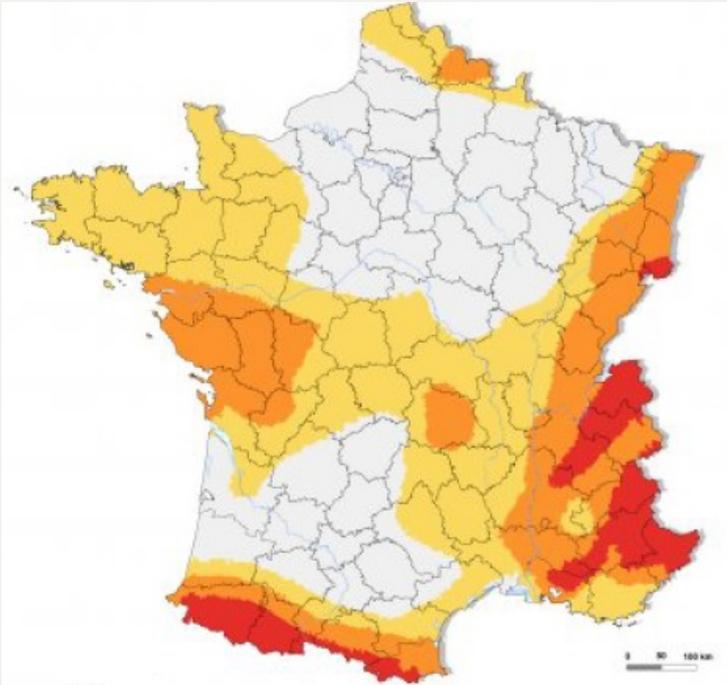
- Zone 1: Très faible
- Zone 2: Faible
- Zone 3: Modérée
- Zone 4: Moyenne
- Zone 5: Haute

Largeur supplémentaire pour B (%)

	Schiste	Calcaire
Zone 1	1%	4%
Zone 2	21%	22%
Zone 3	65%	45%

→ Approche pseudo-statique est limite acceptable

Enseignements



- Zone 1: Très faible
- Zone 2: Faible
- Zone 3: Modérée
- Zone 4: Moyenne
- Zone 5: Haute

Largeur supplémentaire pour B (%)

	Schiste	Calcaire
Zone 1	1%	4%
Zone 2	21%	22%
Zone 3	65%	45%
Zone 4	160%	86%

→ Approche pseudo-statique est réputée trop pénalisante

Conclusion

Dimensionnement des murs de soutènement de talus en zone de sismicité fiable est établie

- Guide de Bonnes Pratiques pour des remblais sans cohésion
- Règles Professionnelles pour des remblais avec cohésion mais document très compact et donc moins pédagogique
- Méthodes numériques éprouvées pour des études de cas
- Nécessité de développer des outils informatiques pour aborder le calcul au séisme
- Des indications sont données pour les zones à sismicité faible à moyenne

Les murs de soutènement routier

Dimensionnement

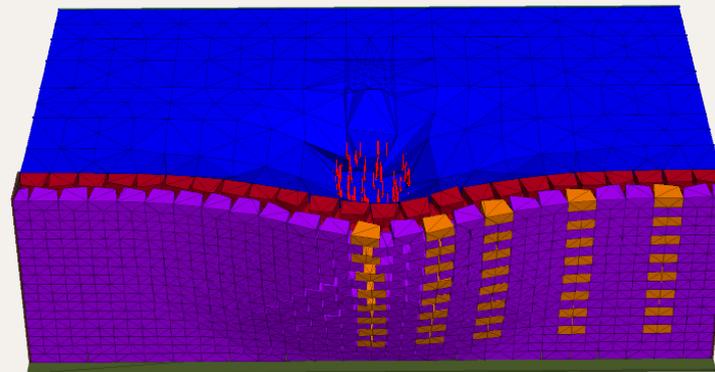
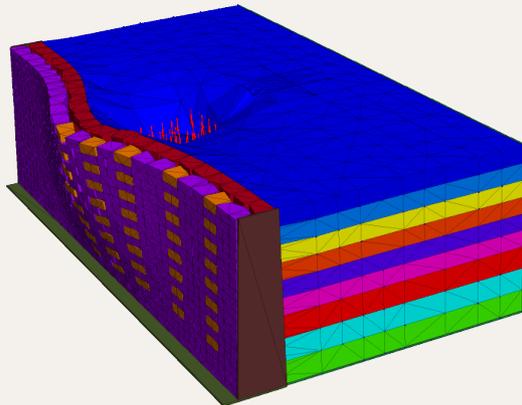


Mode de rupture

- Formation d'un ventre
- action concentrée transmise par les roues au remblai
- déplacement d'autant plus grand que l'on est proche de la roue

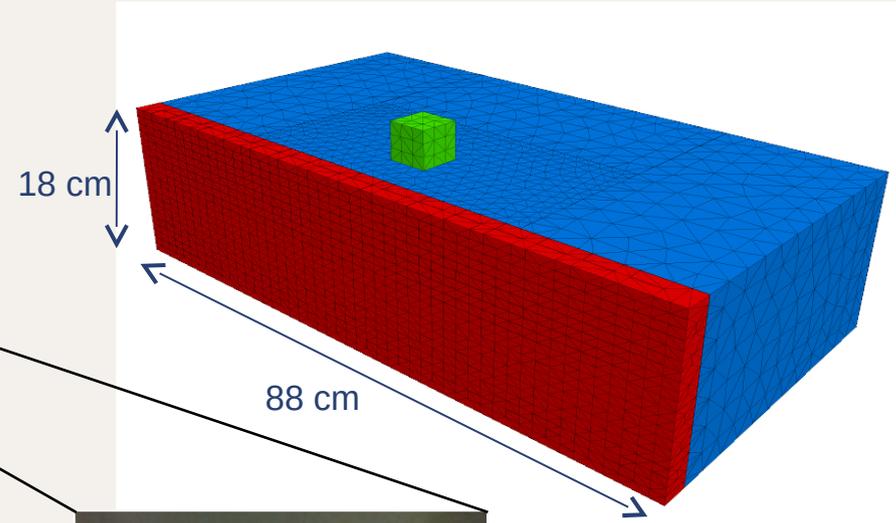
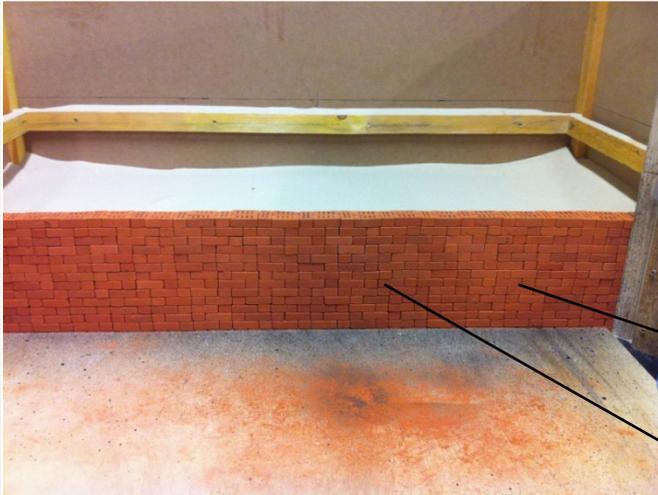


© Paul Mc Combie



© James Oetomo, (2014)

Expérience à échelle 1/10



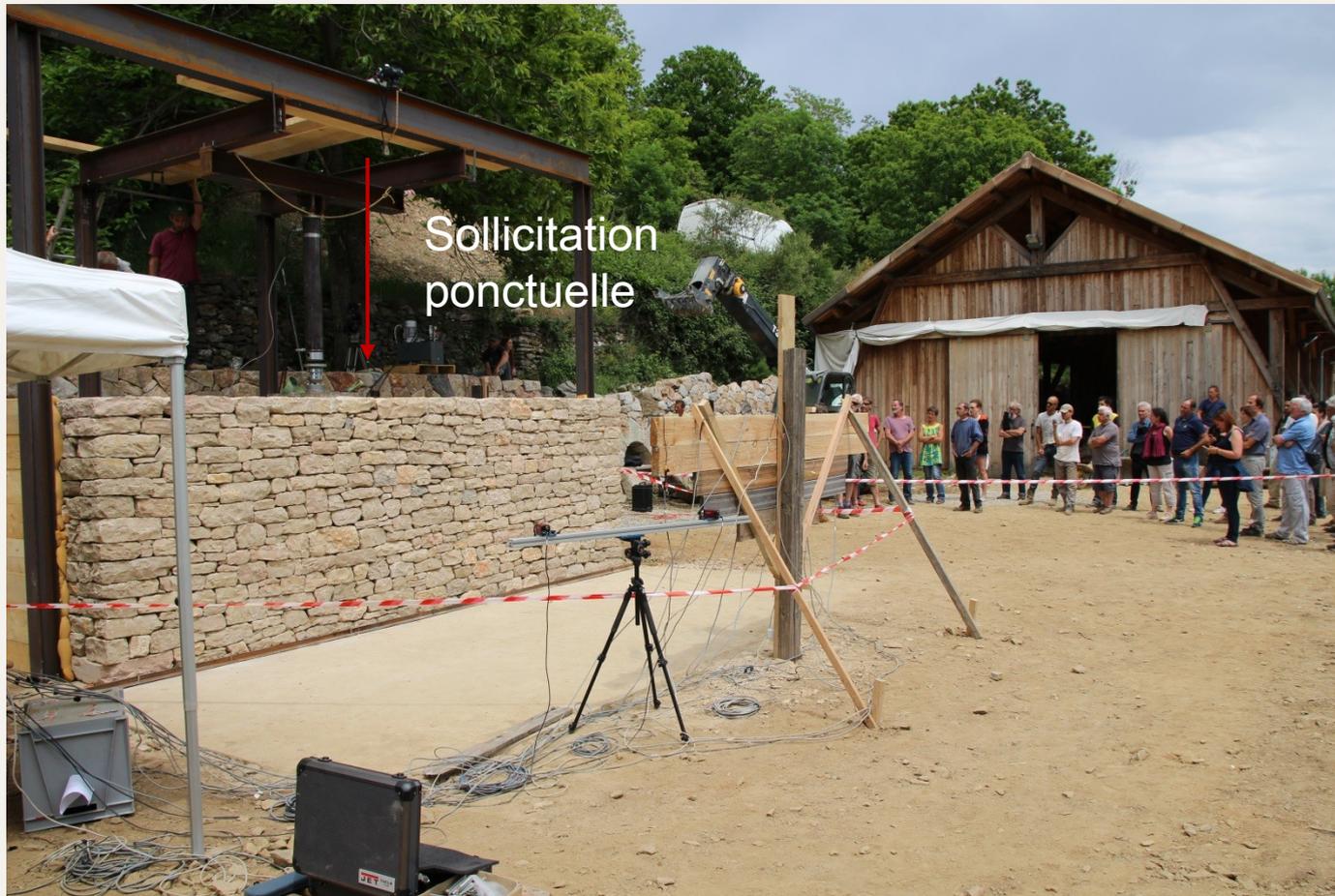
Expériences de Juan-Carlos Quezada,
ECL/ENTPE (2016)



Chargement :
Bloc acier à différentes distances
du mur

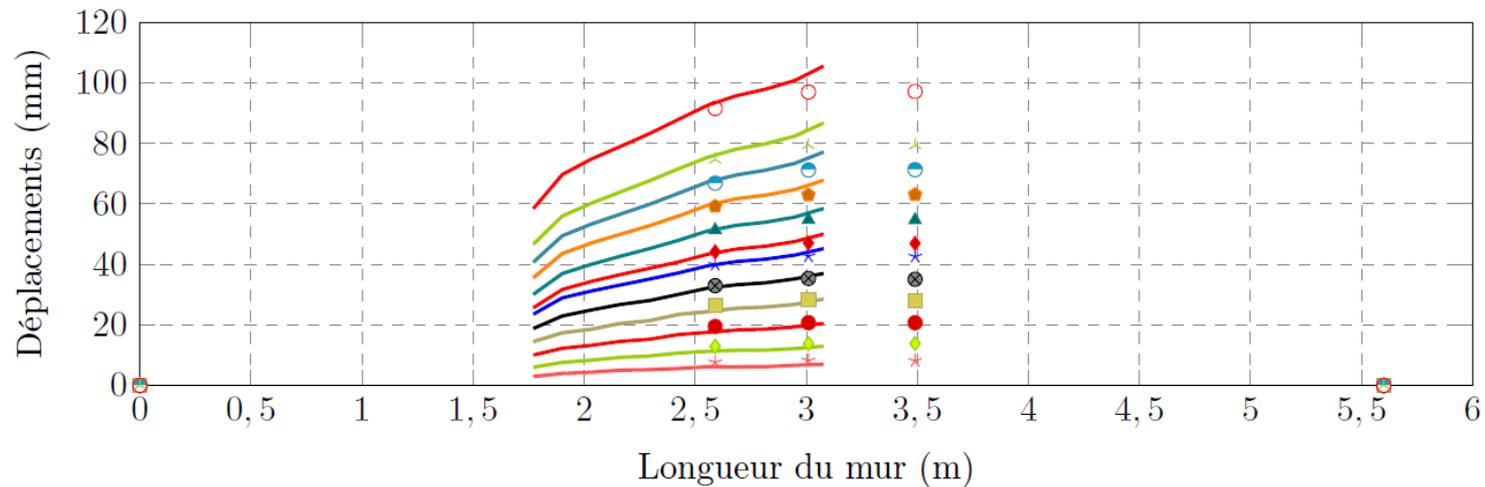
2cm, 3cm, 4cm

Expérience à échelle 1

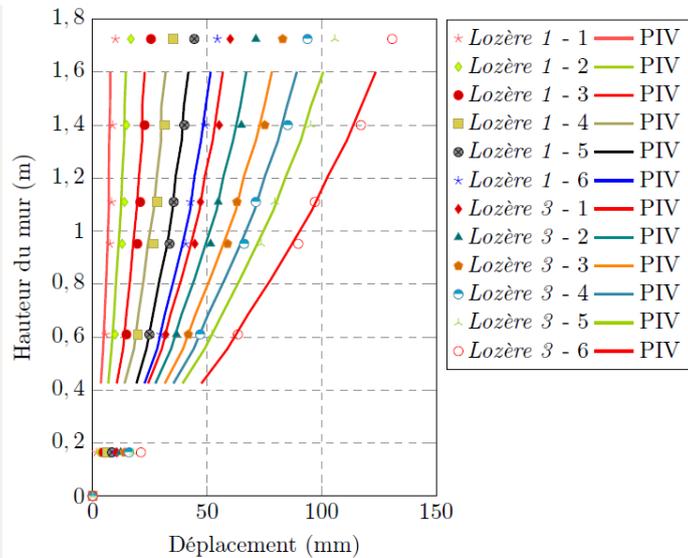


Expériences de Benjamin Terrade, Ecole des Ponts-ParisTech/IFSTTAR (2017)

Expérience à échelle 1



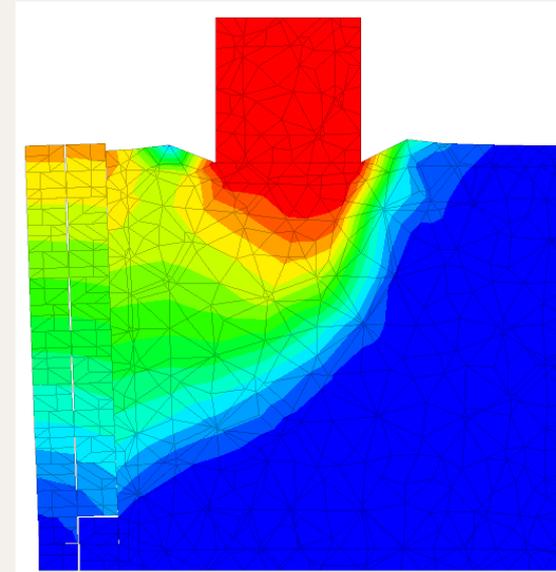
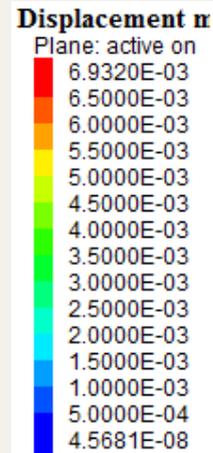
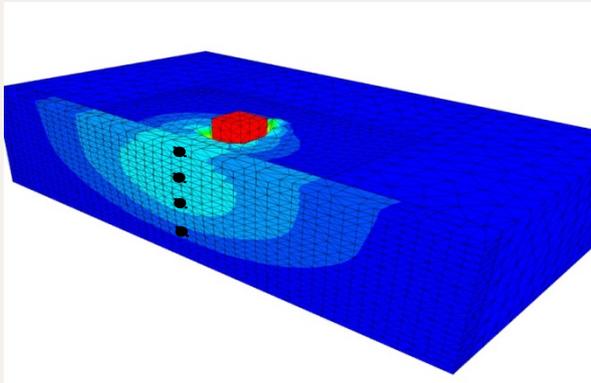
(b) Coupe à 1,15 m du sol



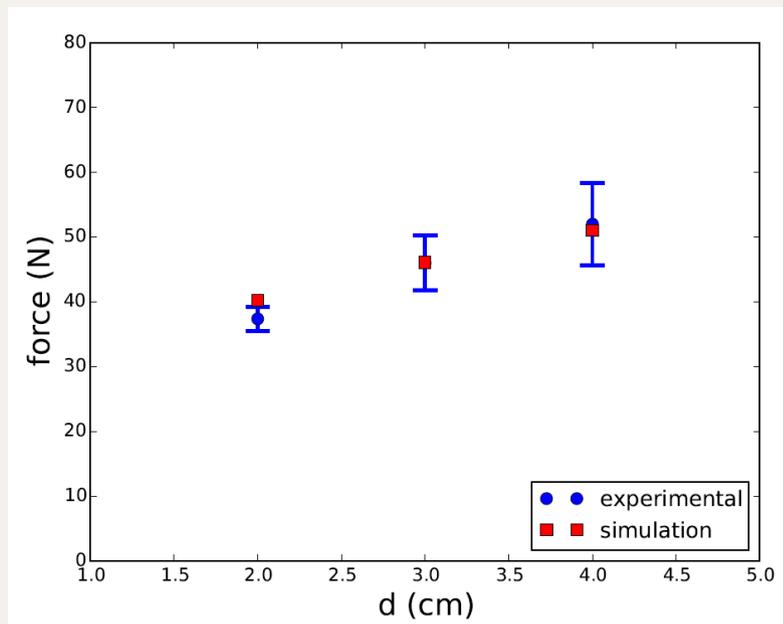
Expériences de Benjamin Terrade

Calcul numérique

Approche mixte discrète-continue



Juan-Carlos Quezada,
ECL/ENTPE (2016)



Conclusions

- Base de données expérimentale disponible (échelle 1/10 et échelle 1)
- Modèle numérique validé pour cette analyse
- Modèle analytique en cours de développement
- Quelques questions en suspens



Conclusion générale



Conclusion générale

Dimensionnement des murs de soutènement de talus

- Zone faiblement sismique → Guide de Bonnes Pratiques & Règles Professionnelles
- Zones sismiques faible à modérée : des indications sont données
- Zone à sismicité moyenne : le travail reste à faire

Dimensionnement des murs de soutènement routier

- Base de données expérimentales est constituée
- Des outils numériques sont disponibles
- Quelques questions en suspens

Remerciements

- A tous les doctorants ou post-doctorants qui ont très largement contribué aux résultats montrés ici
- Anne-Sophie Colas, Juan-Carlos Quezada, Han Le, James Oetomo, Nathanael Savalle, Benjamin Terrade, Boris Villemus
- Aux artisans qui ont réalisés les murs pour les expériences à échelle 1

Artisans et Bâisseurs en Pierres Sèches
Murailleurs de Provence





Frank DEBOUCK

Directeur de l'École Centrale de Lyon

