

Débats AFGC

Évaluation structurale des murs de soutènement en maçonnerie

Anne-Sophie COLAS
Ifsttar/MAST/SDOA
Paris – 15 novembre 2016



IFSTTAR

Sommaire

- 1 Contexte
- 2 Modélisation par le calcul à la rupture
- 3 Modélisation physique
- 4 Expérimentation échelle 1
- 5 Conclusions



Sommaire

- 1 Contexte
- 2 Modélisation par le calcul à la rupture
- 3 Modélisation physique
- 4 Expérimentation échelle 1
- 5 Conclusions



Sommaire

- 1 Contexte
- 2 Modélisation par le calcul à la rupture
- 3 Modélisation physique
- 4 Expérimentation échelle 1
- 5 Conclusions



Sommaire

- 1 Contexte
- 2 Modélisation par le calcul à la rupture
- 3 Modélisation physique
- 4 Expérimentation échelle 1
- 5 Conclusions



Sommaire

- 1 Contexte
- 2 Modélisation par le calcul à la rupture
- 3 Modélisation physique
- 4 Expérimentation échelle 1
- 5 Conclusions



Sommaire

- 1 Contexte
- 2 Modélisation par le calcul à la rupture
- 3 Modélisation physique
- 4 Expérimentation échelle 1
- 5 Conclusions

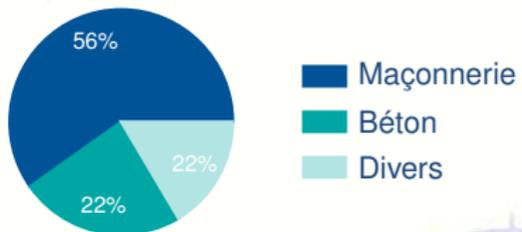


Contexte

- Constructions anciennes, robustes, très représentées
- Pathologies dues au vieillissement
- Méconnaissances de ces structures



Répartition totale

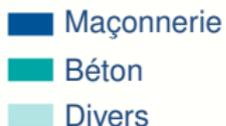
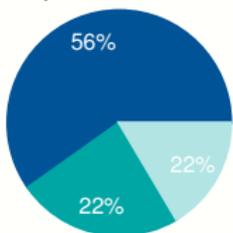


Contexte

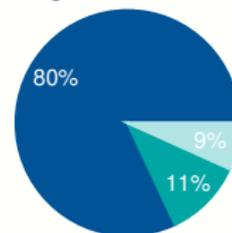
- Constructions anciennes, robustes, très représentées
- Pathologies dues au vieillissement
- Méconnaissances de ces structures



Répartition totale



Ouvrages endommagés



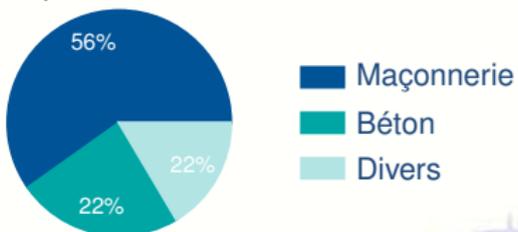
D'après IQOA 2015 pour le réseau routier national

Contexte

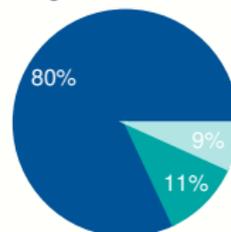
- Constructions anciennes, robustes, très représentées
- Pathologies dues au vieillissement
- Méconnaissances de ces structures



Répartition totale



Ouvrages endommagés



D'après IQOA 2015 pour le réseau routier national

Choix de l'approche

Calcul de structure

- Évaluation structurale des ouvrages existants
- Dimensionnement de solutions de réparation

Méthodologie

- Modélisation par le calcul à la rupture
- Modélisation physique
- Expérimentations à l'échelle 1 *in situ*



Choix de l'approche

Calcul de structure

- Évaluation structurale des ouvrages existants
- Dimensionnement de solutions de réparation

Méthodologie

- Modélisation par le calcul à la rupture
- Modélisation physique
- Expérimentations à l'échelle 1 *in situ*



Choix de l'approche

Calcul de structure

- Évaluation structurale des ouvrages existants
- Dimensionnement de solutions de réparation

Méthodologie

- Modélisation par le calcul à la rupture
- Modélisation physique
- Expérimentations à l'échelle 1 *in situ*



Choix de l'approche

Calcul de structure

- Évaluation structurale des ouvrages existants
- Dimensionnement de solutions de réparation

Méthodologie

- Modélisation par le calcul à la rupture
- Modélisation physique
- Expérimentations à l'échelle 1 *in situ*



Choix de l'approche

Calcul de structure

- Évaluation structurale des ouvrages existants
- Dimensionnement de solutions de réparation

Méthodologie

- Modélisation par le calcul à la rupture
- Modélisation physique
- Expérimentations à l'échelle 1 *in situ*



Sommaire

- 1 Contexte
- 2 Modélisation par le calcul à la rupture**
- 3 Modélisation physique
- 4 Expérimentation échelle 1
- 5 Conclusions



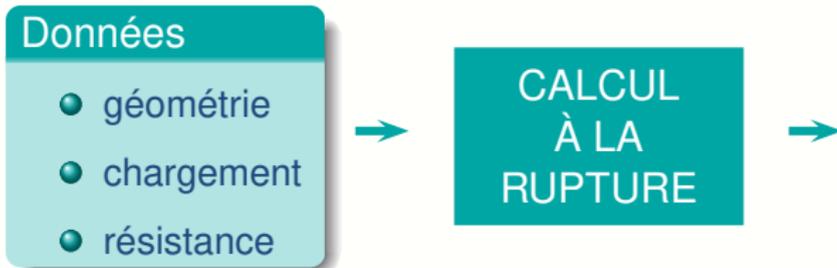
Introduction au calcul à la rupture

Données

- géométrie
- chargement
- résistance



Introduction au calcul à la rupture



Introduction au calcul à la rupture



Introduction au calcul à la rupture

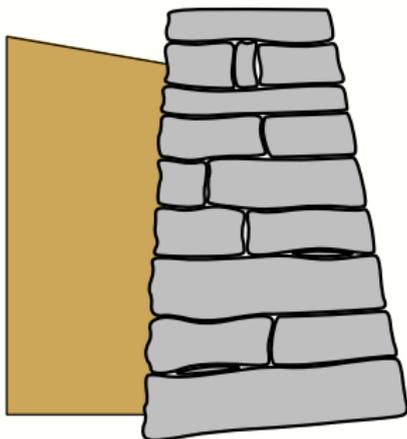


Domaine d'application

Géotechnique, massifs rocheux fracturés, dalles en béton armé, voûte en maçonnerie. ...



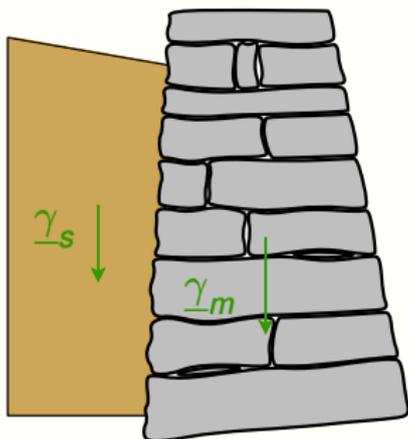
Système d'étude



Données

- ✓ géométrie
- ✗ chargement
- ✗ résistance

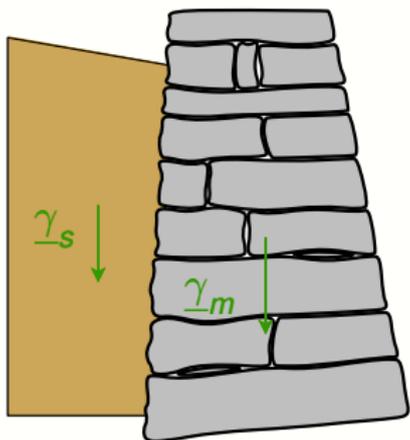
Système d'étude



Données

- ✓ géométrie
- ✓ chargement
- ✗ résistance

Système d'étude



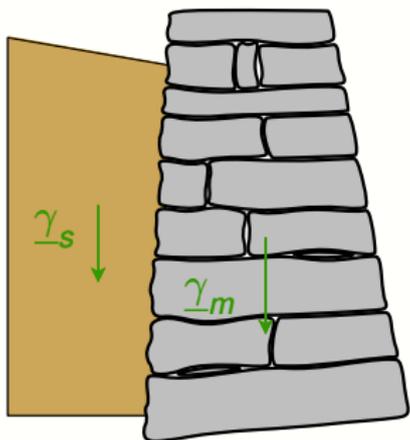
Données

- ✓ géométrie
- ✓ chargement
- ✗ résistance



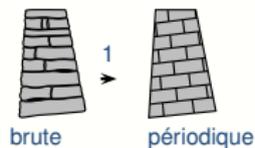
brute

Système d'étude

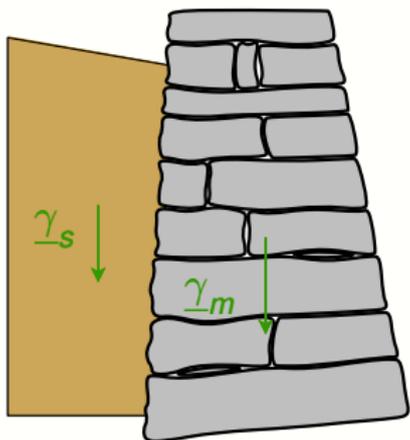


Données

- ✓ géométrie
- ✓ chargement
- ✗ résistance



Système d'étude



Données

- ✓ géométrie
- ✓ chargement
- ✗ résistance



brute

1



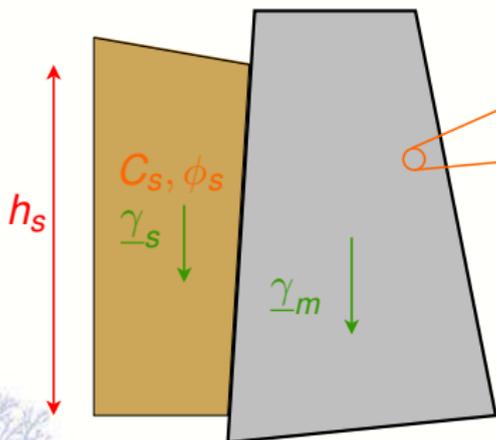
périodique

2



homogénéisée

Système d'étude



Données

- C_m, ϕ_m ✓ géométrie
- ✓ chargement
- ✓ résistance

Théorie du calcul à la rupture

STABILITÉ POTENTIELLE de l'ouvrage sous \underline{Q}



Compatibilité entre { ÉQUILIBRE quasi-statique sous \underline{Q}
capacités de RÉSISTANCE du matériau

Approche par l'intérieur

Approche par l'extérieur

$$\underline{v}(x) \in G(x) \Rightarrow \underline{Q} \in K$$

$$\underline{Q} \in K \Rightarrow \mathcal{P}^e(\underline{Q}, \dot{q}) \leq \mathcal{P}^{rm}(v)$$

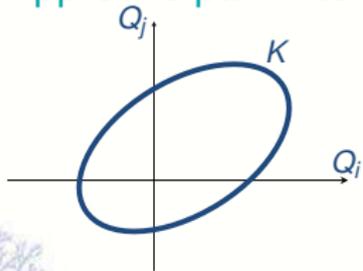
Théorie du calcul à la rupture

STABILITÉ POTENTIELLE de l'ouvrage sous \underline{Q}



Compatibilité entre { ÉQUILIBRE quasi-statique sous \underline{Q}
capacités de RÉSISTANCE du matériau

Approche par l'intérieur



$$\underline{\underline{\sigma}}(\underline{x}) \in \underline{G}(\underline{x}) \Rightarrow \underline{Q} \in K$$

Approche par l'extérieur

$$\underline{Q} \in K \Rightarrow \mathcal{P}^e(\underline{Q}, \underline{\dot{q}}) \leq \mathcal{P}^{rm}(\underline{v})$$

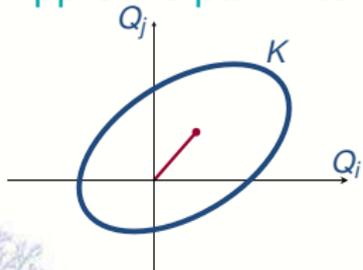
Théorie du calcul à la rupture

STABILITÉ POTENTIELLE de l'ouvrage sous \underline{Q}



Compatibilité entre { ÉQUILIBRE quasi-statique sous \underline{Q}
capacités de RÉSISTANCE du matériau

Approche par l'intérieur



Approche par l'extérieur

$$\underline{\underline{\sigma}}(\underline{x}) \in \underline{G}(\underline{x}) \Rightarrow \underline{Q} \in K$$

$$\underline{Q} \in K \Rightarrow \mathcal{P}^e(\underline{Q}, \underline{\dot{q}}) \leq \mathcal{P}^{rm}(\underline{v})$$

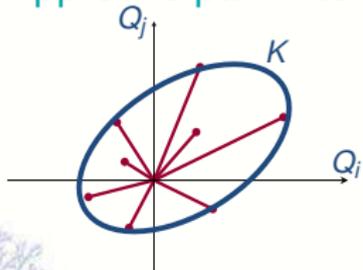
Théorie du calcul à la rupture

STABILITÉ POTENTIELLE de l'ouvrage sous \underline{Q}



Compatibilité entre { ÉQUILIBRE quasi-statique sous \underline{Q}
capacités de RÉSISTANCE du matériau

Approche par l'intérieur



Approche par l'extérieur

$$\underline{\underline{\sigma}}(\underline{x}) \in \underline{G}(\underline{x}) \Rightarrow \underline{Q} \in K$$

$$\underline{Q} \in K \Rightarrow \mathcal{P}^e(\underline{Q}, \underline{\dot{q}}) \leq \mathcal{P}^{rm}(\underline{v})$$

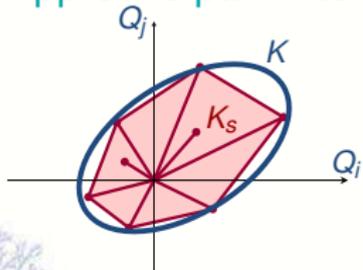
Théorie du calcul à la rupture

STABILITÉ POTENTIELLE de l'ouvrage sous \underline{Q}



Compatibilité entre { ÉQUILIBRE quasi-statique sous \underline{Q}
capacités de RÉSISTANCE du matériau

Approche par l'intérieur



Approche par l'extérieur

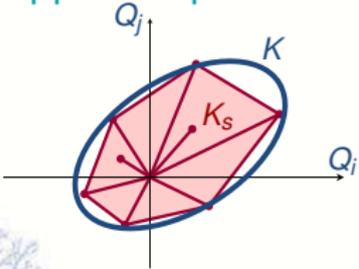
$$\underline{\sigma}(\underline{x}) \in G(\underline{x}) \Rightarrow \underline{Q} \in K$$

$$\underline{Q} \in K \Rightarrow \mathcal{P}^e(\underline{Q}, \underline{\dot{q}}) \leq \mathcal{P}^{rm}(\underline{v})$$

Théorie du calcul à la rupture

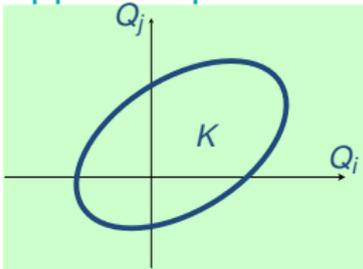


Approche par l'intérieur



$$\underline{\sigma}(\underline{x}) \in G(\underline{x}) \Rightarrow \underline{Q} \in K$$

Approche par l'extérieur



$$\underline{Q} \in K \Rightarrow \mathcal{P}^e(\underline{Q}, \underline{\dot{q}}) \leq \mathcal{P}^{rm}(\underline{v})$$

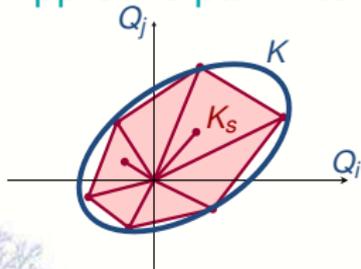
Théorie du calcul à la rupture

STABILITÉ POTENTIELLE de l'ouvrage sous \underline{Q}



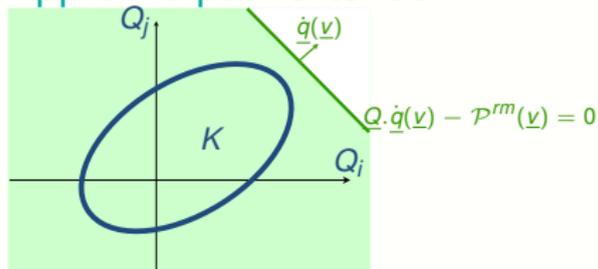
Compatibilité entre { ÉQUILIBRE quasi-statique sous \underline{Q}
capacités de RÉSISTANCE du matériau

Approche par l'intérieur



$$\underline{\sigma}(\underline{x}) \in G(\underline{x}) \Rightarrow \underline{Q} \in K$$

Approche par l'extérieur



$$\underline{Q} \in K \Rightarrow \mathcal{P}^e(\underline{Q}, \underline{\dot{q}}) \leq \mathcal{P}^{rm}(\underline{v})$$

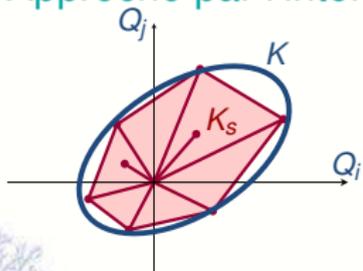
Théorie du calcul à la rupture

STABILITÉ POTENTIELLE de l'ouvrage sous \underline{Q}

↕

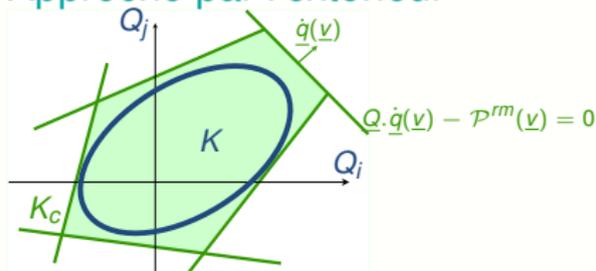
Compatibilité entre { ÉQUILIBRE quasi-statique sous \underline{Q}
capacités de RÉSISTANCE du matériau

Approche par l'intérieur



$$\underline{\sigma}(\underline{x}) \in G(\underline{x}) \Rightarrow \underline{Q} \in K$$

Approche par l'extérieur



$$\underline{Q} \in K \Rightarrow \mathcal{P}^e(\underline{Q}, \underline{\dot{q}}) \leq \mathcal{P}^{rm}(\underline{v})$$

Approche par l'extérieur du calcul à la rupture

Approche analytique

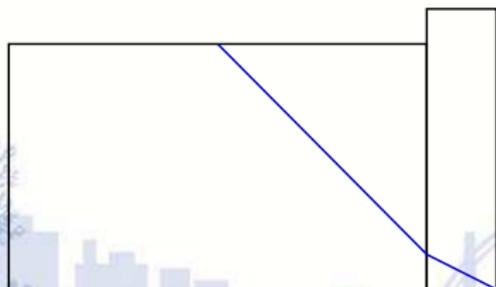
- nombre fini de mécanismes
- formule analytique
- temps de calcul quasi-nul



Approche par l'extérieur du calcul à la rupture

Approche analytique

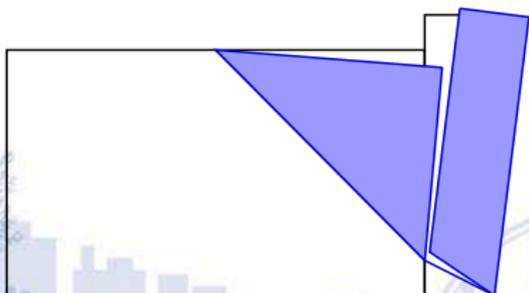
- nombre fini de mécanismes
- formule analytique
- temps de calcul quasi-nul



Approche par l'extérieur du calcul à la rupture

Approche analytique

- nombre fini de mécanismes
- formule analytique
- temps de calcul quasi-nul



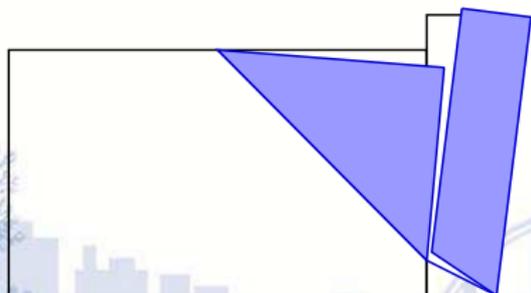
Approche par l'extérieur du calcul à la rupture

Approche analytique

- nombre fini de mécanismes
- formule analytique
- temps de calcul quasi-nul

Approche numérique

- nombre infini de mécanismes
- discrétisation
- temps de calcul faible



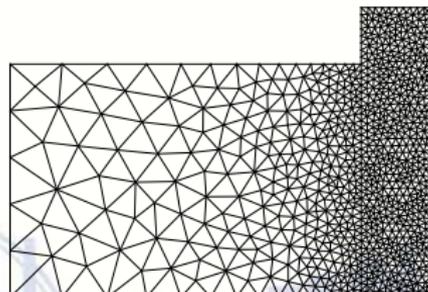
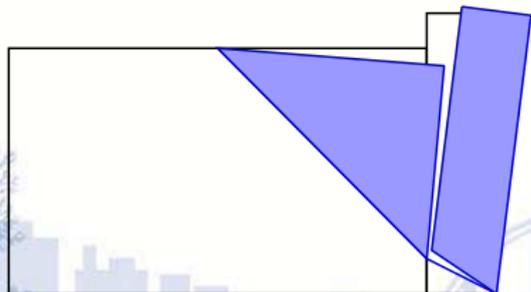
Approche par l'extérieur du calcul à la rupture

Approche analytique

- nombre fini de mécanismes
- formule analytique
- temps de calcul quasi-nul

Approche numérique

- nombre infini de mécanismes
- discrétisation
- temps de calcul faible



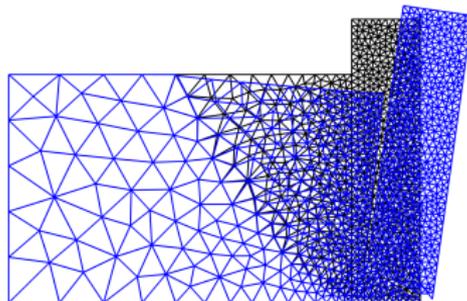
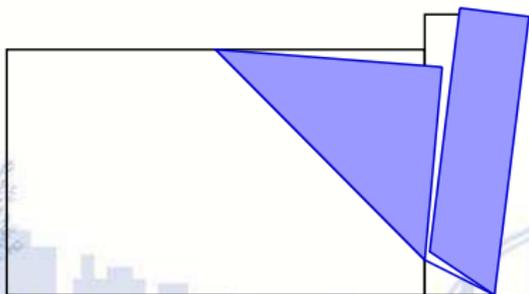
Approche par l'extérieur du calcul à la rupture

Approche analytique

- nombre fini de mécanismes
- formule analytique
- temps de calcul quasi-nul

Approche numérique

- nombre infini de mécanismes
- discrétisation
- temps de calcul faible



Détermination de la charge limite

- Approche par l'extérieur du calcul à la rupture :

$$\forall \underline{v}_{m,s} \quad \mathcal{P}^e(\underline{\gamma}_{m,s}, \underline{v}_{m,s}) \leq \mathcal{P}^{rm}(C_{m,s}, \phi_{m,s}, \underline{v}_{m,s})$$

- Optimisation sur $\underline{v}_{m,s}$ pour déterminer le chargement critique :

$$Q_s^{\max} = \text{fonction}(\underline{\gamma}_m, C_{m,s}, \phi_{m,s})$$

- Visualisation des mécanismes de ruine dans le mur et le sol



Détermination de la charge limite

- Approche par l'extérieur du calcul à la rupture :

$$\forall \underline{v}_{m,s} \quad \mathcal{P}^e(\underline{\gamma}_{m,s}, \underline{v}_{m,s}) \leq \mathcal{P}^{rm}(C_{m,s}, \phi_{m,s}, \underline{v}_{m,s})$$

- Optimisation sur $\underline{v}_{m,s}$ pour déterminer le chargement critique :

$$Q_s^{\max} = \text{fonction}(\underline{\gamma}_m, C_{m,s}, \phi_{m,s})$$

- Visualisation des mécanismes de ruine dans le mur et le sol



Détermination de la charge limite

- Approche par l'extérieur du calcul à la rupture :

$$\forall \underline{v}_{m,s} \quad \mathcal{P}^e(\underline{\gamma}_{m,s}, \underline{v}_{m,s}) \leq \mathcal{P}^{rm}(C_{m,s}, \phi_{m,s}, \underline{v}_{m,s})$$

- Optimisation sur $\underline{v}_{m,s}$ pour déterminer le chargement critique :

$$Q_s^{\max} = \text{fonction}(\underline{\gamma}_m, C_{m,s}, \phi_{m,s})$$

- Visualisation des mécanismes de ruine dans le mur et le sol



Sommaire

- 1 Contexte
- 2 Modélisation par le calcul à la rupture
- 3 Modélisation physique**
- 4 Expérimentation échelle 1
- 5 Conclusions



Présentation des modèles physiques

- Intérêt du modèle physique :
 - Respect des hypothèses du modèle
 - Facilité de mise en œuvre
- Moyens expérimentaux :
 - Murs de brique/bois/béton
 - Remblai de rouleaux de Schneebeli
 - Analyse d'images sur 1 section
- Résultats attendus :
 - Validation du modèle
 - Validation des cinématiques de rupture
 - Sensibilité du modèle aux paramètres



Présentation des modèles physiques

- Intérêt du modèle physique :
 - Respect des hypothèses du modèle
 - Facilité de mise en œuvre
- Moyens expérimentaux :
 - Murs de brique/bois/béton
 - Remblai de rouleaux de Schneebeli
 - Analyse d'images sur 1 section
- Résultats attendus :
 - Validation du modèle
 - Validation des cinématiques de rupture
 - Sensibilité du modèle aux paramètres



Présentation des modèles physiques

- Intérêt du modèle physique :
 - Respect des hypothèses du modèle
 - Facilité de mise en œuvre
- Moyens expérimentaux :
 - Murs de brique/bois/béton
 - Remblai de rouleaux de Schneebeli
 - Analyse d'images sur 1 section
- Résultats attendus :
 - Validation du modèle
 - Validation des cinématiques de rupture
 - Sensibilité du modèle aux paramètres



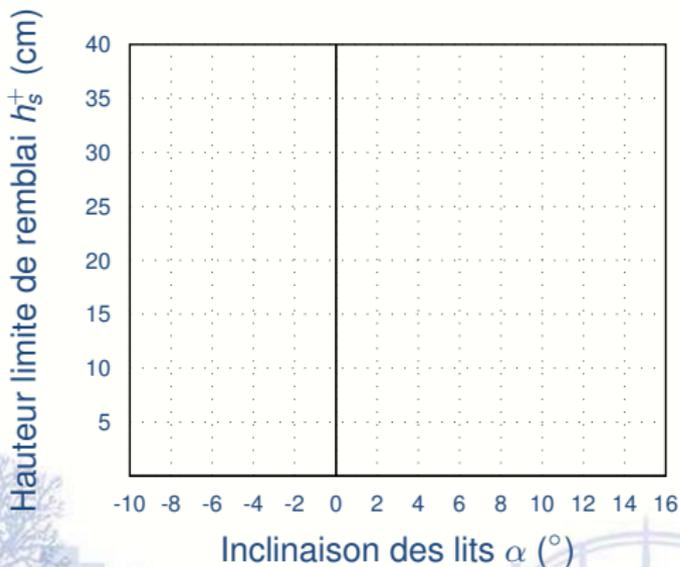
Tests des configurations géométriques

Tests sur paramètres géométriques :



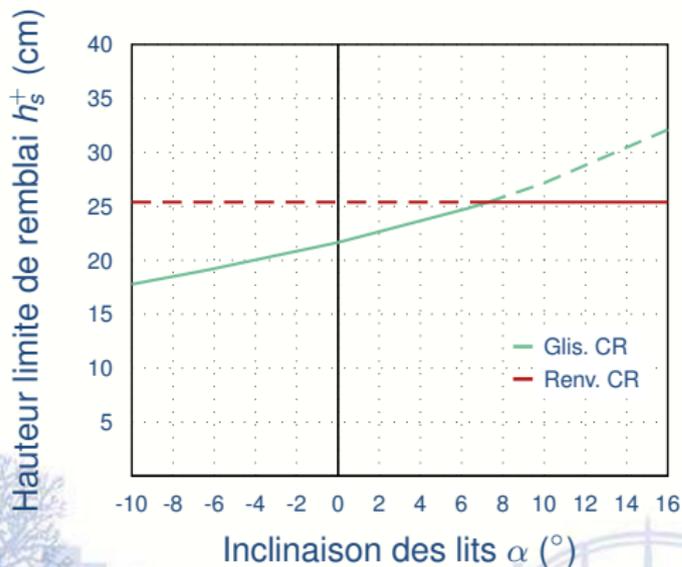
Tests des configurations géométriques

Tests sur paramètres géométriques :



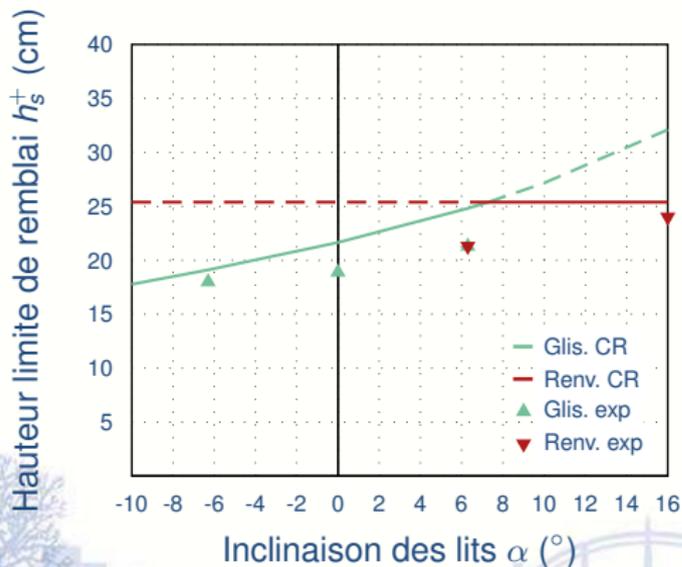
Tests des configurations géométriques

Tests sur paramètres géométriques :



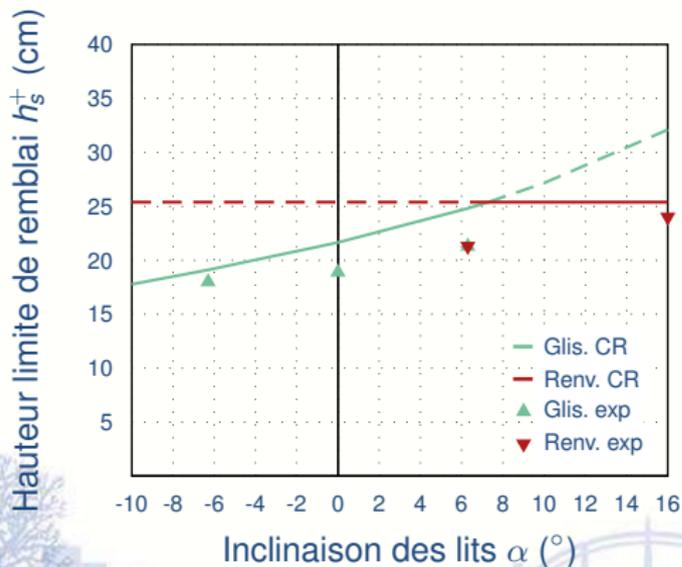
Tests des configurations géométriques

Tests sur paramètres géométriques :



Tests des configurations géométriques

Tests sur paramètres géométriques :



Validation du modèle

- quantitative ($e \leq 10\%$)
- qualitative

Rupture du mur

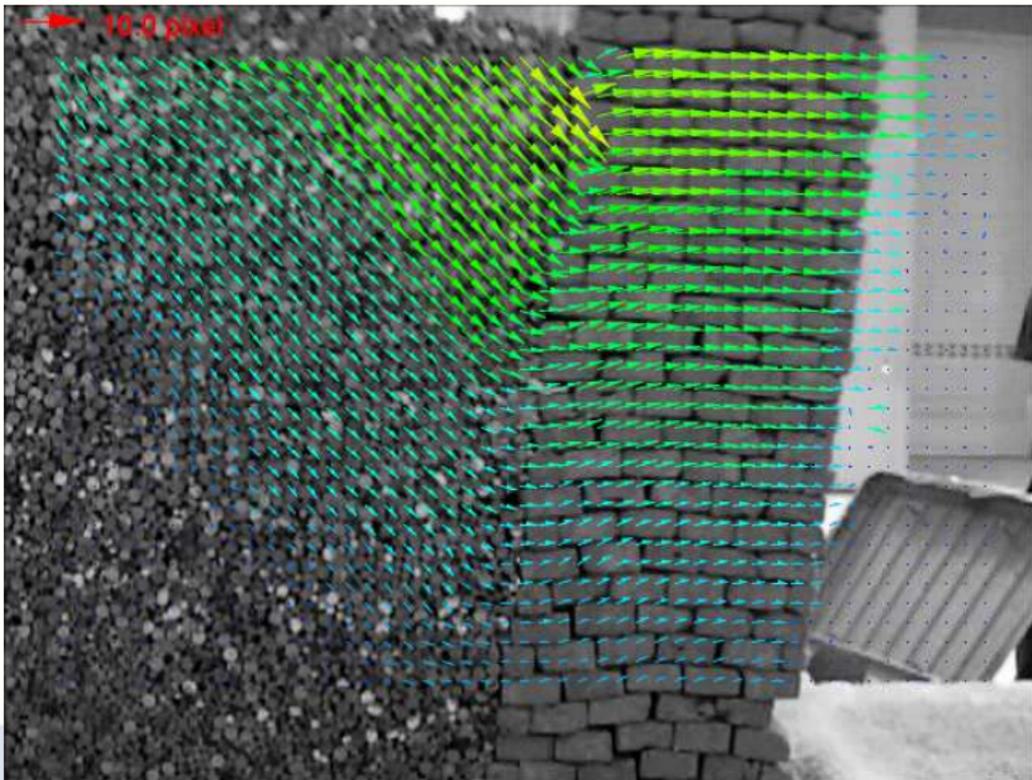


Glissement

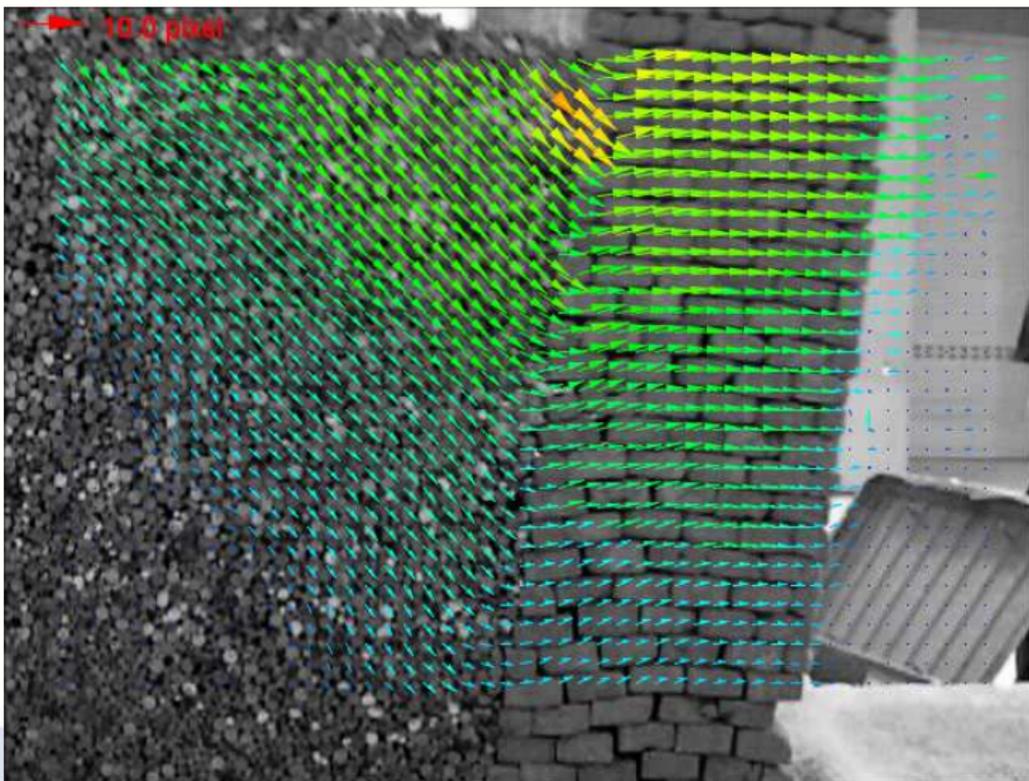


Renversement

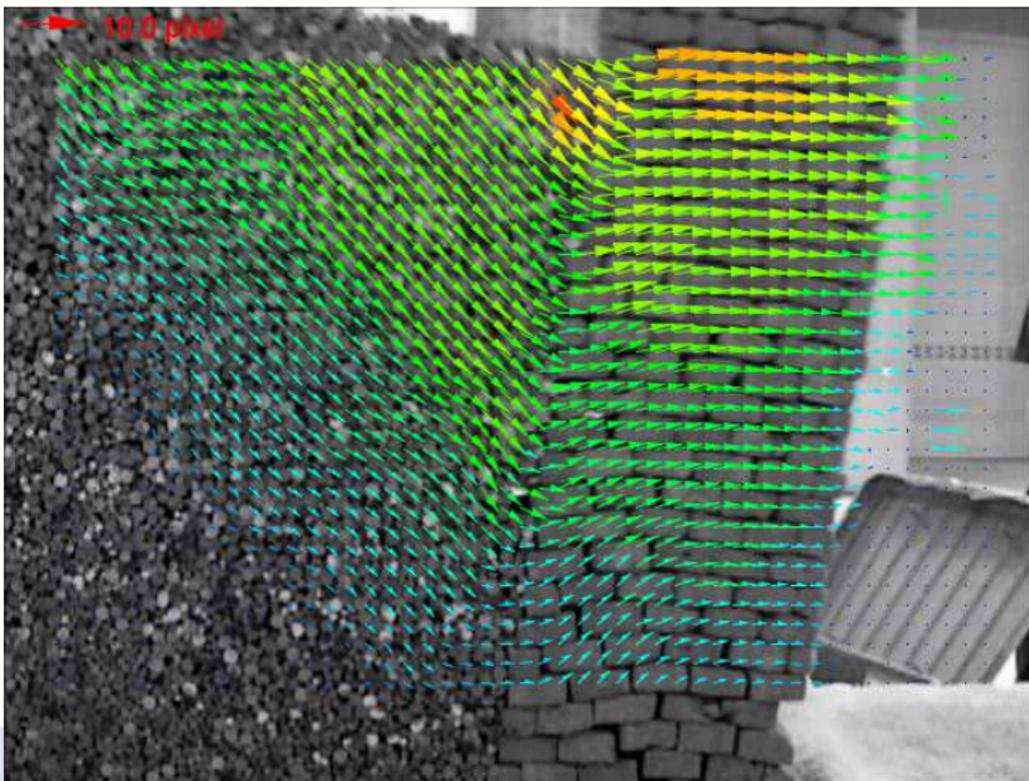
Rupture du sol



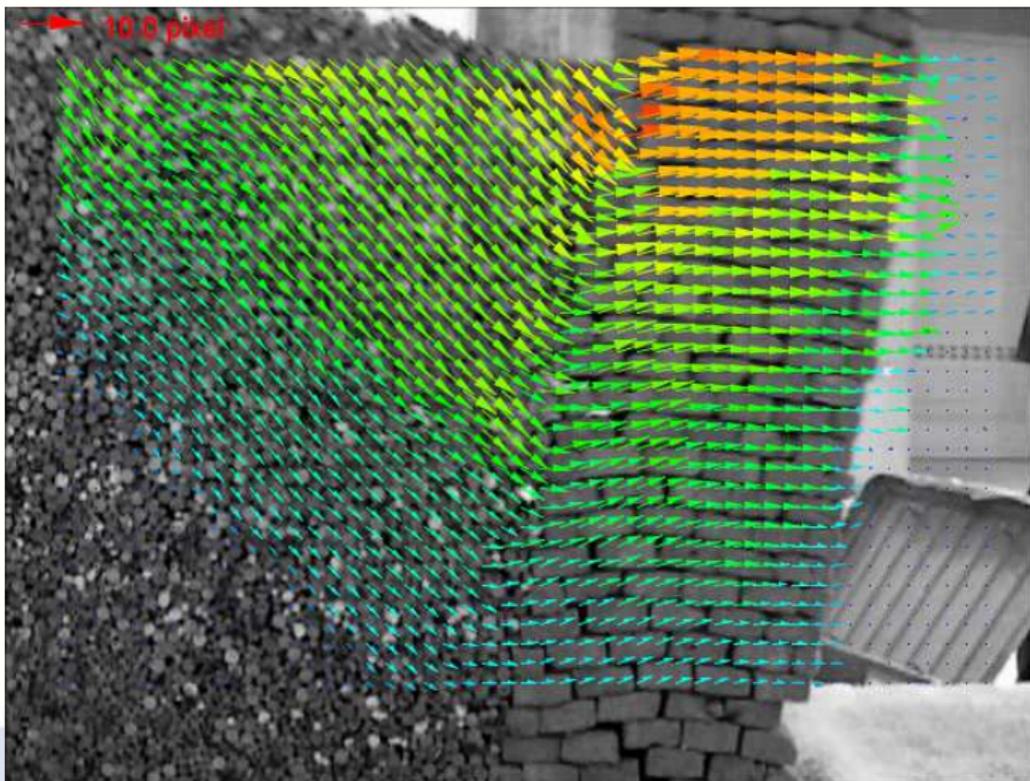
Rupture du sol



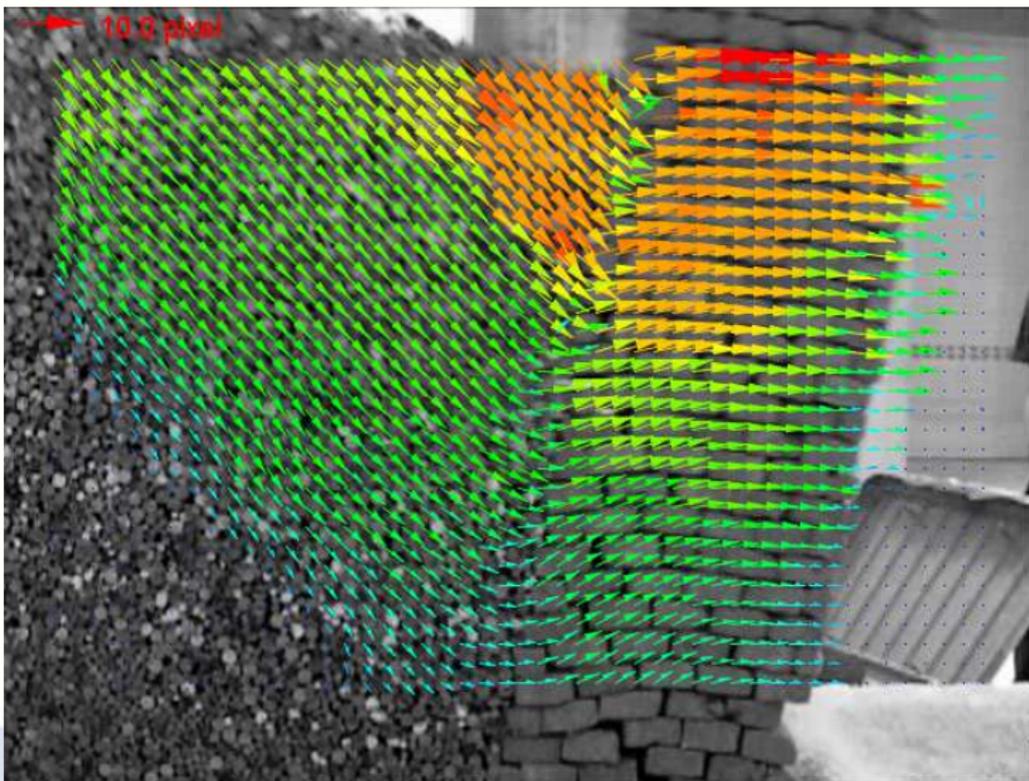
Rupture du sol



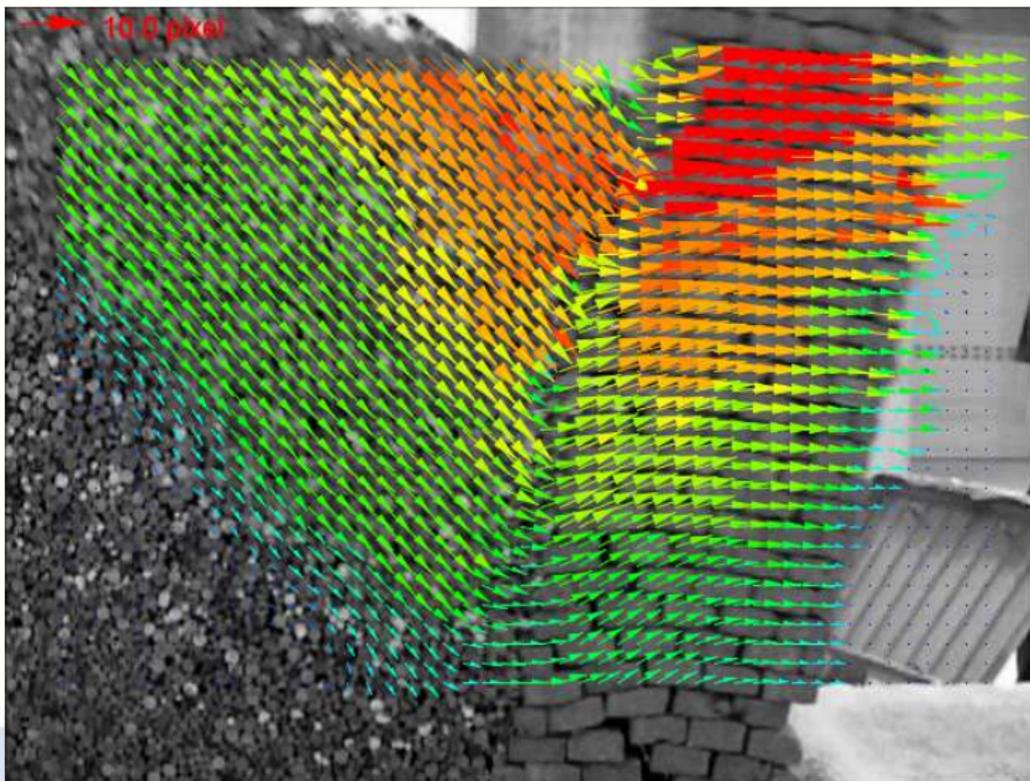
Rupture du sol



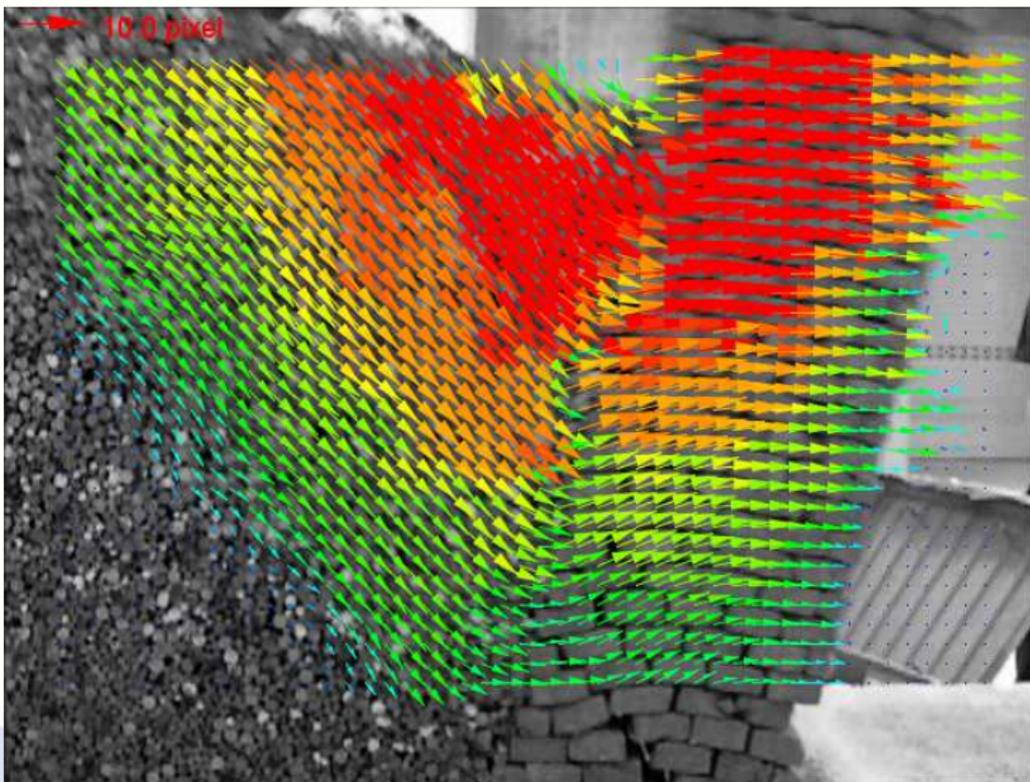
Rupture du sol



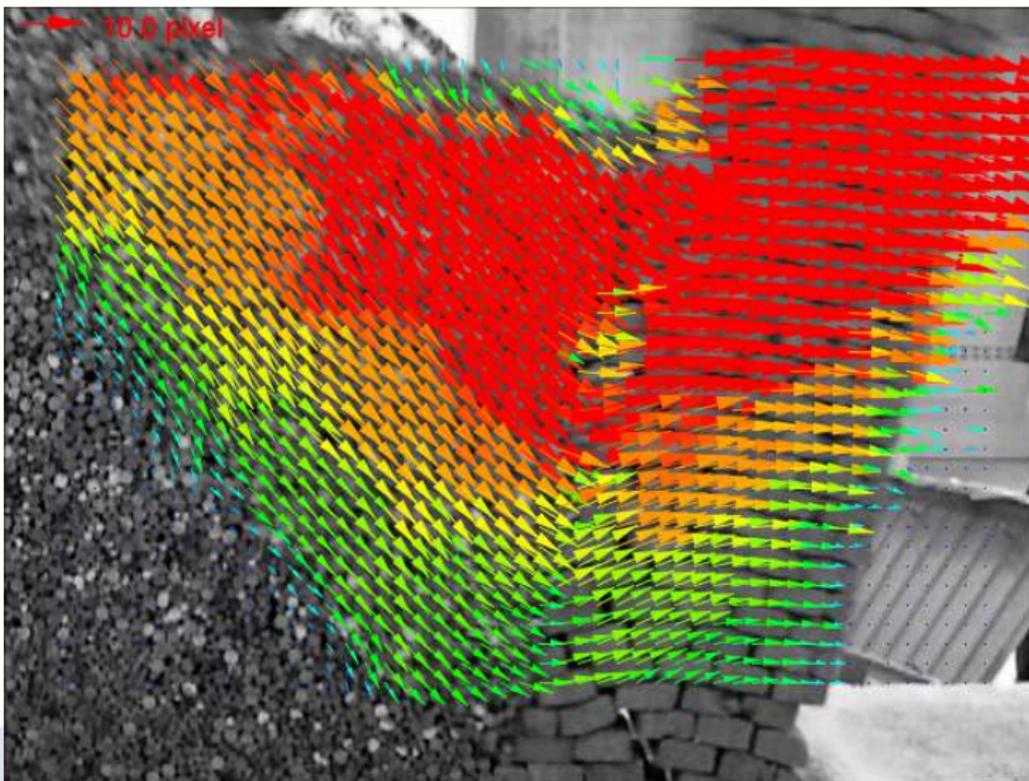
Rupture du sol



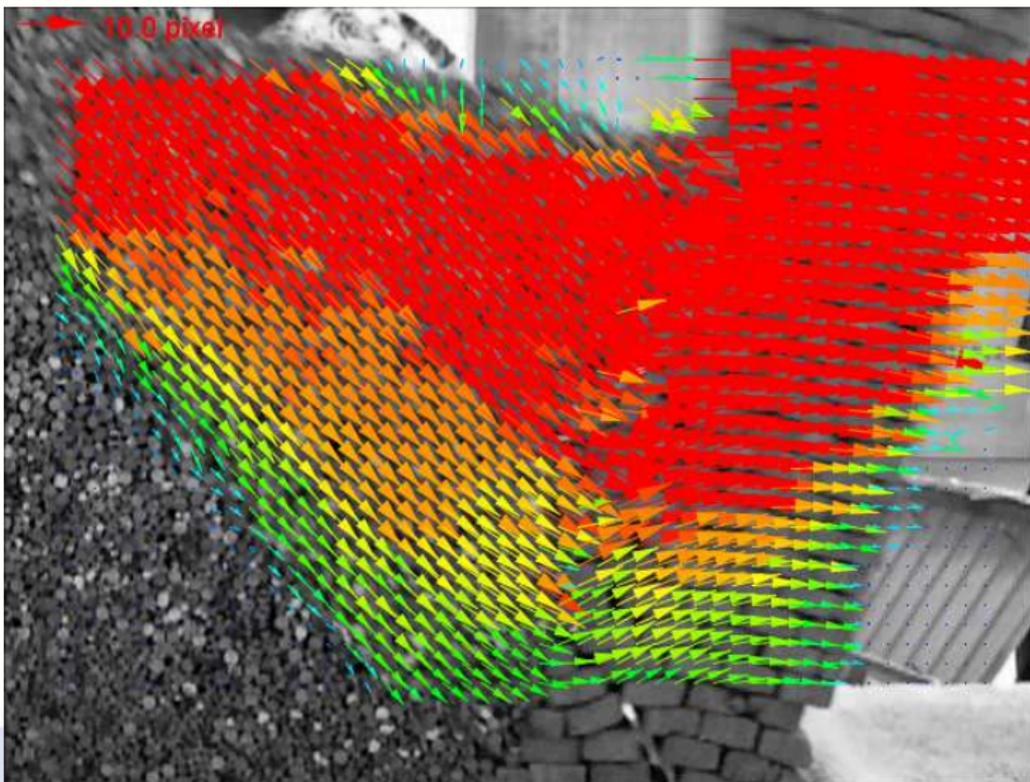
Rupture du sol



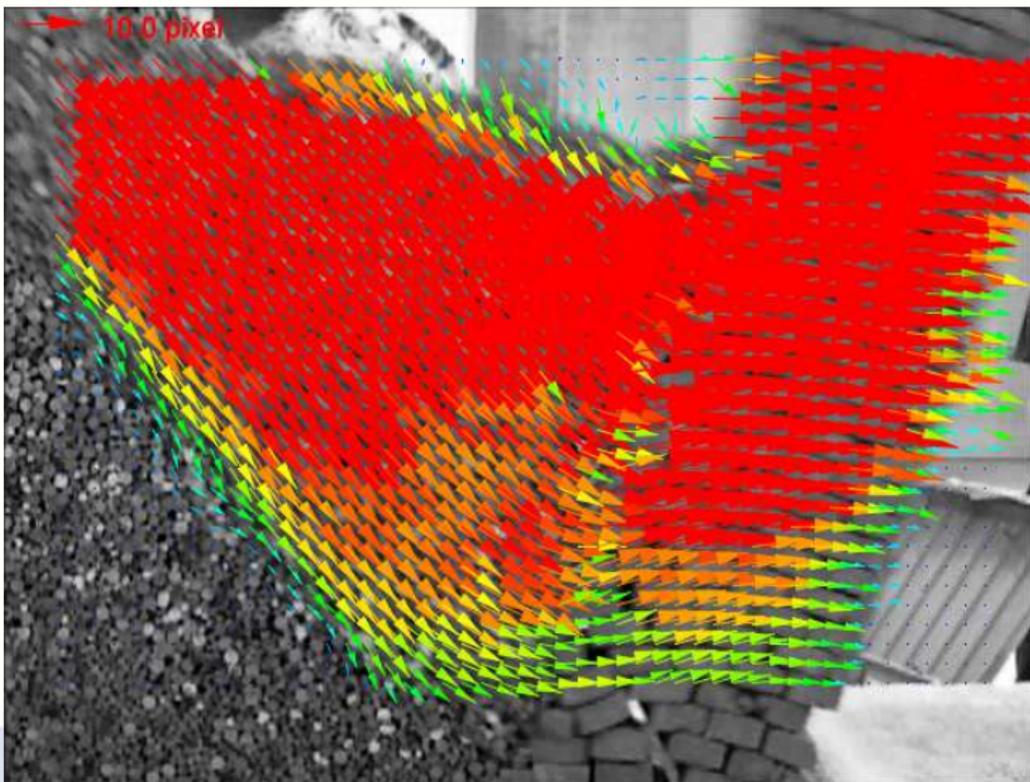
Rupture du sol



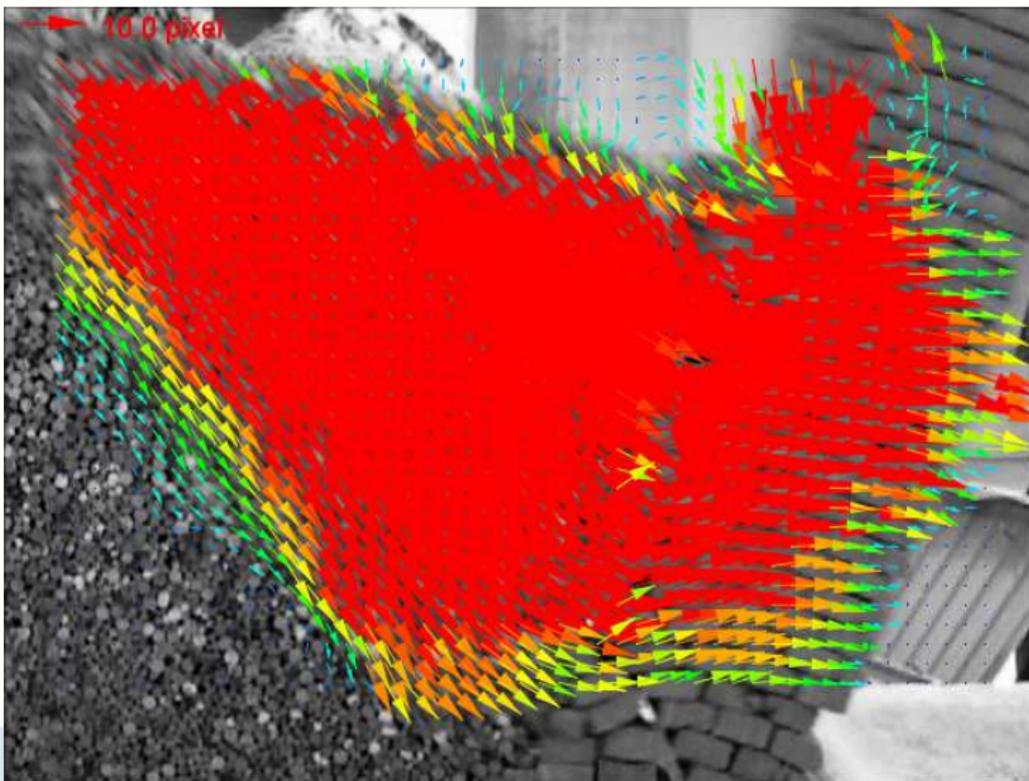
Rupture du sol



Rupture du sol



Rupture du sol



Sommaire

- 1 Contexte
- 2 Modélisation par le calcul à la rupture
- 3 Modélisation physique
- 4 Expérimentation échelle 1**
- 5 Conclusions



Présentation des expérimentations échelle 1

- Intérêt des essais échelle 1 :
 - Forte hétérogénéité de la maçonnerie
 - Interaction sol/structure
- Moyens expérimentaux :
 - Mur construit selon les règles de l'art
 - Mesures des déplacements dans 3 sections
- Résultats attendus :
 - Pertinence du modèle
 - Caractéristiques des matériaux



Présentation des expérimentations échelle 1

- Intérêt des essais échelle 1 :
 - Forte hétérogénéité de la maçonnerie
 - Interaction sol/structure
- Moyens expérimentaux :
 - Mur construit selon les règles de l'art
 - Mesures des déplacements dans 3 sections
- Résultats attendus :
 - Pertinence du modèle
 - Caractéristiques des matériaux



Présentation des expérimentations échelle 1

- Intérêt des essais échelle 1 :
 - Forte hétérogénéité de la maçonnerie
 - Interaction sol/structure
- Moyens expérimentaux :
 - Mur construit selon les règles de l'art
 - Mesures des déplacements dans 3 sections
- Résultats attendus :
 - Pertinence du modèle
 - Caractéristiques des matériaux





Bilan des expérimentations

- Caractéristiques des matériaux (indice des vides du mur)
- Déformation plane du mur
- Validation du critère de résistance de la maçonnerie
 - pertinence de l'homogénéisation
 - influence de l'irrégularité des blocs
- Validation de la ligne de rupture interne dans le mur
- Validation de la rupture du mur en renversement/glisement



Bilan des expérimentations

- Caractéristiques des matériaux (indice des vides du mur)
- Déformation plane du mur
- Validation du critère de résistance de la maçonnerie
 - pertinence de l'homogénéisation
 - influence de l'irrégularité des blocs
- Validation de la ligne de rupture interne dans le mur
- Validation de la rupture du mur en renversement/glisement



Bilan des expérimentations

- Caractéristiques des matériaux (indice des vides du mur)
- Déformation plane du mur
- Validation du critère de résistance de la maçonnerie
 - pertinence de l'homogénéisation
 - influence de l'irrégularité des blocs
- Validation de la ligne de rupture interne dans le mur
- Validation de la rupture du mur en renversement/glisement



Bilan des expérimentations

- Caractéristiques des matériaux (indice des vides du mur)
- Déformation plane du mur
- Validation du critère de résistance de la maçonnerie
 - pertinence de l'homogénéisation
 - influence de l'irrégularité des blocs
- Validation de la ligne de rupture interne dans le mur
- Validation de la rupture du mur en renversement/glisement



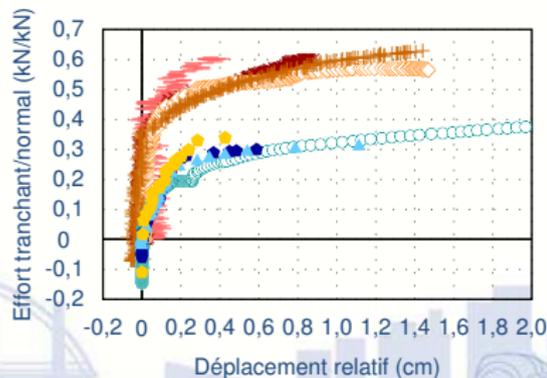
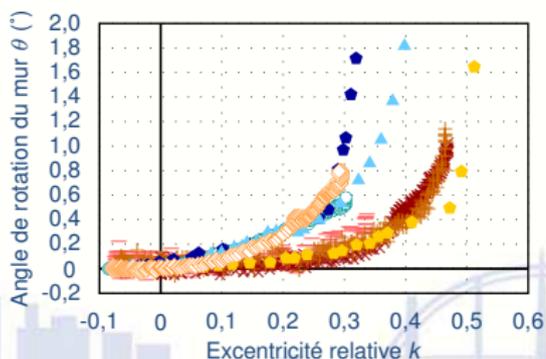
Bilan des expérimentations

- Caractéristiques des matériaux (indice des vides du mur)
- Déformation plane du mur
- Validation du critère de résistance de la maçonnerie
 - pertinence de l'homogénéisation
 - influence de l'irrégularité des blocs
- Validation de la ligne de rupture interne dans le mur
- Validation de la rupture du mur en renversement/glisement



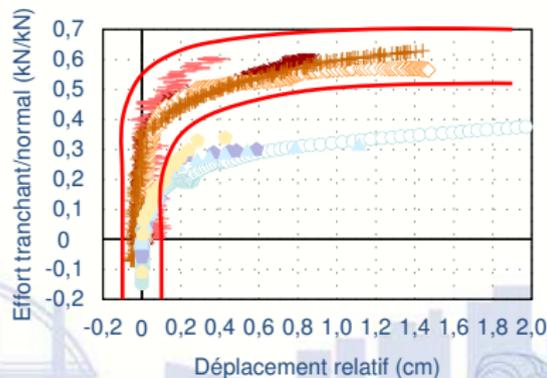
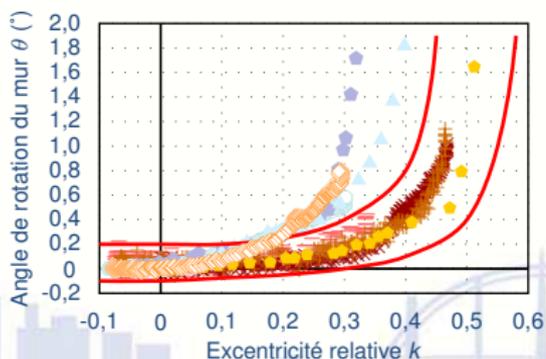
Bilan des expérimentations

- Caractéristiques des matériaux (indice des vides du mur)
- Déformation plane du mur
- Validation du critère de résistance de la maçonnerie
 - pertinence de l'homogénéisation
 - influence de l'irrégularité des blocs
- Validation de la ligne de rupture interne dans le mur
- Validation de la rupture du mur en renversement/glisement



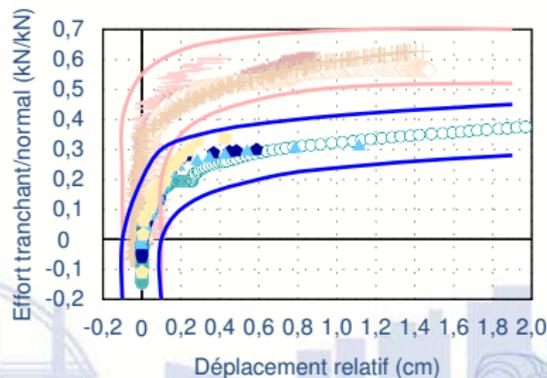
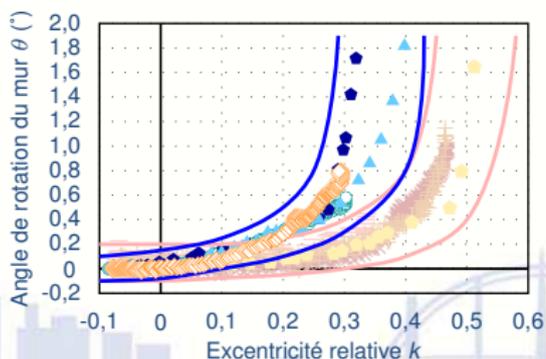
Bilan des expérimentations

- Caractéristiques des matériaux (indice des vides du mur)
- Déformation plane du mur
- Validation du critère de résistance de la maçonnerie
 - pertinence de l'homogénéisation
 - influence de l'irrégularité des blocs
- Validation de la ligne de rupture interne dans le mur
- Validation de la rupture du mur en renversement/glisement



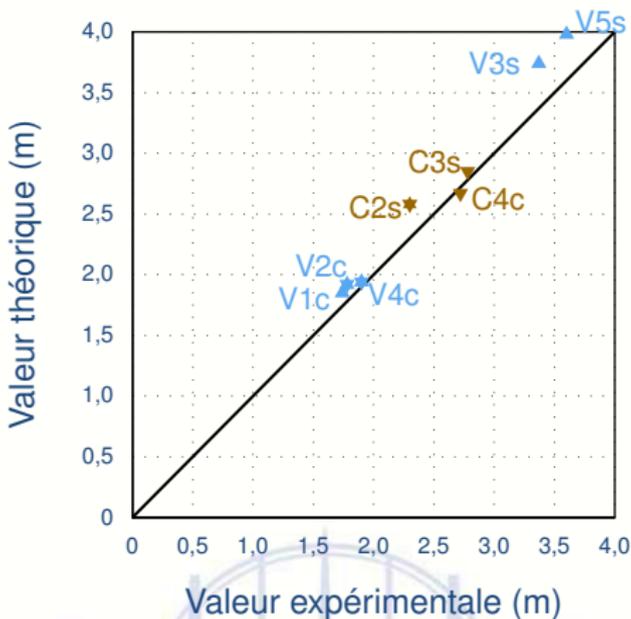
Bilan des expérimentations

- Caractéristiques des matériaux (indice des vides du mur)
- Déformation plane du mur
- Validation du critère de résistance de la maçonnerie
 - pertinence de l'homogénéisation
 - influence de l'irrégularité des blocs
- Validation de la ligne de rupture interne dans le mur
- Validation de la rupture du mur en renversement/glisement



Validation du modèle

Confrontation résultats théoriques et expérimentaux :



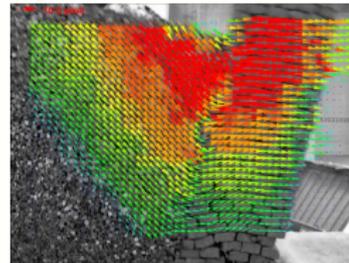
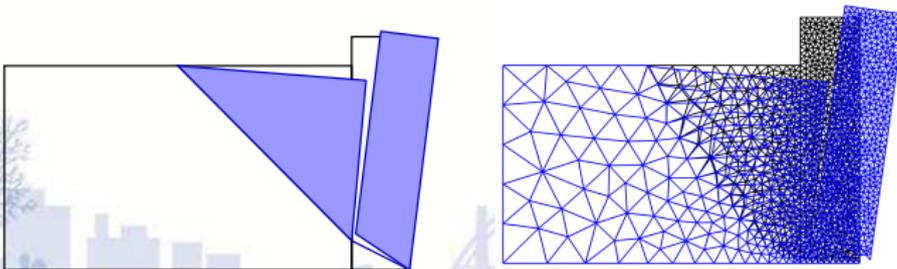
Sommaire

- 1 Contexte
- 2 Modélisation par le calcul à la rupture
- 3 Modélisation physique
- 4 Expérimentation échelle 1
- 5 Conclusions**



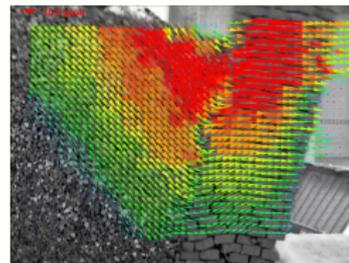
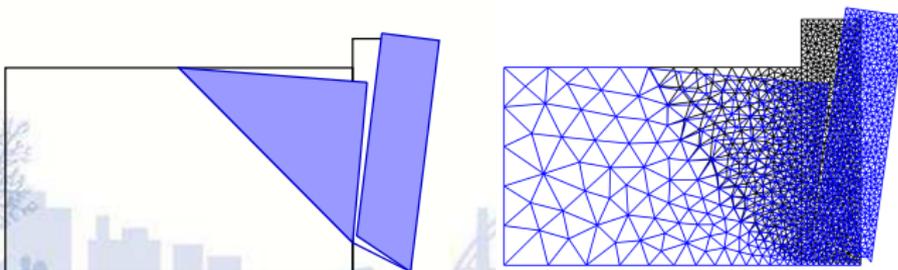
Conclusions

- Modèle de calcul à la rupture :
 - modèle rigoureux et pragmatique
 - formulation analytique ou numérique
 - validé par l'expérimentation
- Domaine d'application :
 - dimensionnement de structures neuves
ex : abaques des règles professionnelles pierre sèche
 - évaluation d'ouvrages existants
 - dimensionnement de réparations



Conclusions

- Modèle de calcul à la rupture :
 - modèle rigoureux et pragmatique
 - formulation analytique ou numérique
 - validé par l'expérimentation
- Domaine d'application :
 - dimensionnement de structures neuves
ex : abaques des règles professionnelles pierre sèche
 - évaluation d'ouvrages existants
 - dimensionnement de réparations



Références

● Thèses

- B. Terrade. Évaluation structurale des murs en maçonnerie, *en cours*.
- H.H. Le. Stabilité des murs de soutènement routiers en pierre sèche, 2013.
- A-S. Colas. Mécanique des murs de soutènement en pierre sèche, 2009.
- B. Villemus. Étude des murs de soutènement en maçonnerie de pierres sèches, 2004.

● Publications de rang A

- B. Terrade, A-S. Colas, D. Garnier. Upper Bound limit analysis of masonry retaining walls using PIV velocity fields, *under review*.
- H.H. Le, D. Garnier, A-S. Colas, B. Terrade, J-C. Morel. 3D homogenised strength criterion for masonry : application to drystone retaining walls. J Mech Phys Solids, 95, 239-253, 2016.
- A-S. Colas, J-C. Morel, D. Garnier. Assessing the two-dimensional behaviour of drystone retaining walls by full-scale experiments and yield design simulation. Géotechnique, 63(2), 107-117, 2013.
- A-S. Colas, J-C. Morel, D. Garnier. Full-scale field trials to assess dry-stone retaining wall stability. Engineering Structures, 32(5), 1215-1222, 2010.
- A-S. Colas, J-C. Morel, D. Garnier. 2D modelling of a dry joint masonry wall retaining a pulverulent backfill. Int J Numer Anal Meth Geomech, 34(12), 1237-1249, 2010.
- B. Villemus, J-C. Morel, C. Boutin. Experimental assessment of dry stone retaining wall stability on a rigid foundation. Engineering Structures, 29(9), 2124-2132, 2007.

Perspectives

- Amélioration et généralisation du modèle
 - développement de l'approche numérique
 - mise en place d'un modèle et d'une campagne expérimentale 3D
 - prise en compte de chargement annexe (écoulement, sismique...)
- Promotion de la technologie
 - participation à la réglementation
 - appui au développement de la formation
 - analyse développement durable



Perspectives

- Amélioration et généralisation du modèle
 - développement de l'approche numérique
 - mise en place d'un modèle et d'une campagne expérimentale 3D
 - prise en compte de chargement annexe (écoulement, sismique...)
- Promotion de la technologie
 - participation à la réglementation
 - appui au développement de la formation
 - analyse développement durable



Perspectives

- Amélioration et généralisation du modèle
 - développement de l'approche numérique
 - mise en place d'un modèle et d'une campagne expérimentale 3D
 - prise en compte de chargement annexe (écoulement, sismique. . .)
- Promotion de la technologie
 - participation à la réglementation
 - appui au développement de la formation
 - analyse développement durable



Perspectives

- Amélioration et généralisation du modèle
 - développement de l'approche numérique
 - mise en place d'un modèle et d'une campagne expérimentale 3D
 - prise en compte de chargement annexe (écoulement, sismique. . .)
- Promotion de la technologie
 - participation à la réglementation
 - appui au développement de la formation
 - analyse développement durable



Perspectives

- Amélioration et généralisation du modèle
 - développement de l'approche numérique
 - mise en place d'un modèle et d'une campagne expérimentale 3D
 - prise en compte de chargement annexe (écoulement, sismique. . .)
- Promotion de la technologie
 - participation à la réglementation
 - appui au développement de la formation
 - analyse développement durable



Perspectives

- Amélioration et généralisation du modèle
 - développement de l'approche numérique
 - mise en place d'un modèle et d'une campagne expérimentale 3D
 - prise en compte de chargement annexe (écoulement, sismique. . .)
- Promotion de la technologie
 - participation à la réglementation
 - appui au développement de la formation
 - analyse développement durable



Merci de votre attention

Anne-Sophie Colas

Ifsttar

Département Matériaux et Structures

Laboratoire Sécurité et Durabilité des Ouvrages d'Art

anne-sophie.colas@ifsttar.fr

www.sdoa.ifsttar.fr

