



# Modélisation sous macrogravité d'une paroi clouée respectant le phasage de construction

J. de Sauvage

Université Gustave Eiffel, Département GERS

F. Tfayli, T. Dubreucq et J.-P. Rajot

JST CFMS « Modélisation physique en géotechnique », 06  
octobre 2022



# Déroulé de la présentation

Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions

- 1 Les parois clouées et leur dimensionnement
- 2 Modélisation sous macrogravité
- 3 Résultats expérimentaux
- 4 Conclusions et Perspectives



# Déroulé de la présentation



Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions

- 1 Les parois clouées et leur dimensionnement
- 2 Modélisation sous macrogravité
- 3 Résultats expérimentaux
- 4 Conclusions et Perspectives



# Principe du clouage des sols

Clouage des  
Sols

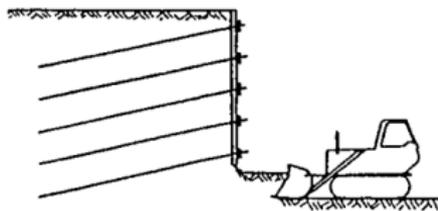
de Sauvage

Contexte

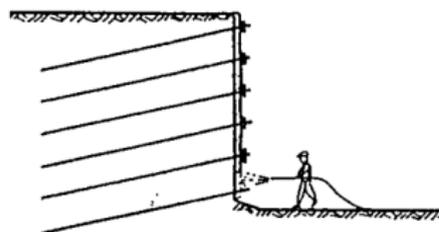
Modélisation

Résultats

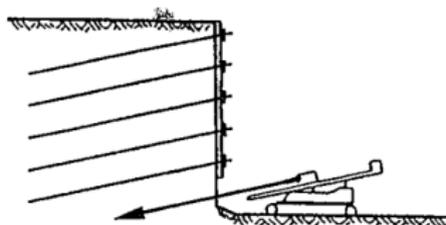
Conclusions



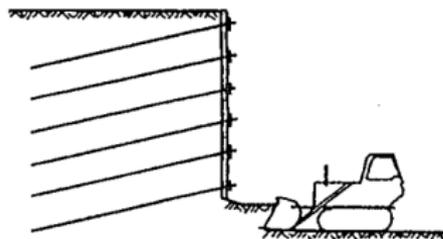
1 . Terrassement



3 . Béton projeté armé  
( ou pose d'éléments préfabriqués )



2 . Mise en place des barres



4 . Terrassement

Clouterre, 1991



# Importance du phasage

Clouage des  
Sols

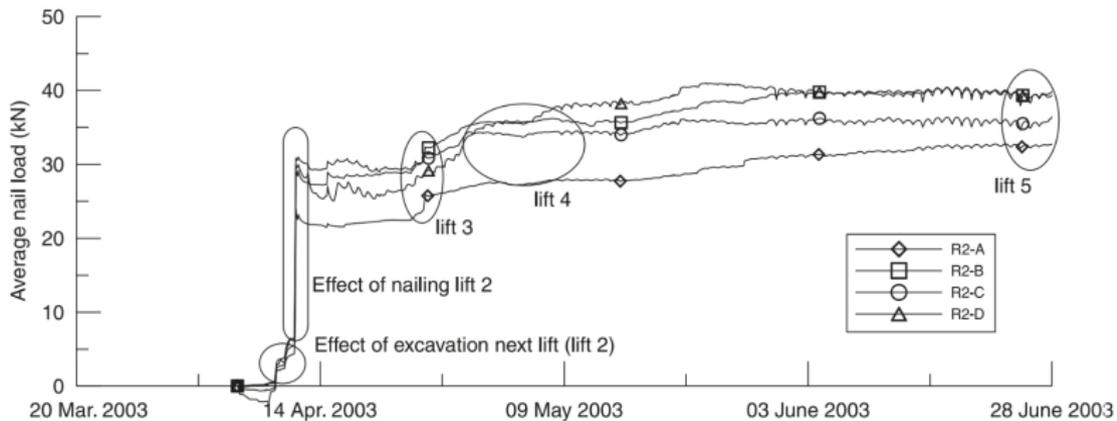
de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions



moraines glaciaires, Dublin, Menkiti et Long, 2008

**Ancrage passif mobilisé par le déplacement relatif**

Rôle du déconfinement, mobilisation progressive,  
clou inférieur peu chargé



Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

Modélisation

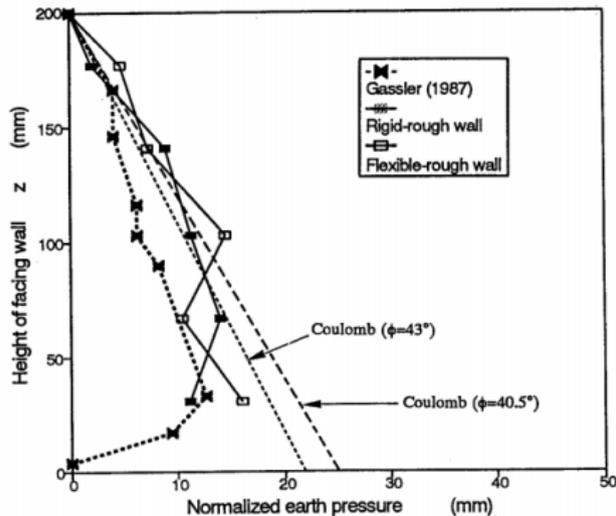
Résultats

Conclusions

- **1972** : élargissement plateforme SNCF Versailles



- 1972 : élargissement plateforme SNCF Versailles
- 1987 : premier ouvrage instrumenté (Gassler, *Bodenvernagelung*) → point de référence





# Historique

Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions

- **1972** : élargissement plateforme SNCF Versailles
- **1987** : premier ouvrage instrumenté (Gassler, *Bodenvernagelung*) → **point de référence**
- **1991** : publication de Clouterre I



# Historique

Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions

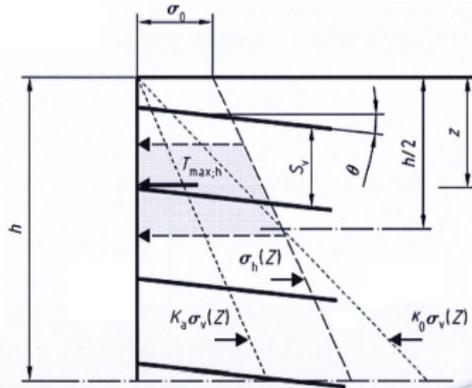
- **1972** : élargissement plateforme SNCF Versailles
- **1987** : premier ouvrage instrumenté (Gassler, *Bodenvernagelung*) → **point de référence**
- **1991** : publication de Clouterre I
- **2002** : publication de Clouterre II



- 1972 : élargissement plateforme SNCF Versailles
- 1987 : premier ouvrage instrumenté (Gassler, *Bodenvernagelung*) → **point de référence**
- 1991 : publication de Clouterre I
- 2002 : publication de Clouterre II
- 2018 : révision NF P 94-270

Application :

- Ouvrages courants
- Sol homogène
- Talus amont horizontal





- **1972** : élargissement plateforme SNCF Versailles
- **1987** : premier ouvrage instrumenté (Gassler, *Bodenvernagelung*) → **point de référence**
- **1991** : publication de Clouterre I
- **2002** : publication de Clouterre II
- **2018** : révision NF P 94-270

Questions sur le dimensionnement du parement ...

... et sur le comportement des murs en sol cloué



# Déroulé de la présentation

Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

**Modélisation**

Résultats

Conclusions

- 1 Les parois clouées et leur dimensionnement
- 2 Modélisation sous macrogravité**
- 3 Résultats expérimentaux
- 4 Conclusions et Perspectives



- **1869** : *De L'Equilibre Des Solides Elastiques Semblables*,  
E. Phillips



# Historique



Clouage des  
Sols  
de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions

- **1869** : *De L'Equilibre Des Solides Elastiques Semblables*, E. Phillips
- **1931** : première mise en pratique (Bucky puis Pokrovsky et Fedorov en 1936)



# Historique



Clouage des  
Sols  
de Sauvage

Contexte

Modélisation

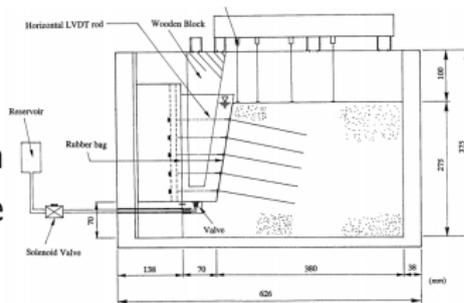
Résultats

Conclusions

- **1869** : *De L'Equilibre Des Solides Elastiques Semblables*, E. Phillips
- **1931** : première mise en pratique (Bucky puis Pokrovsky et Fedorov en 1936)
- **1982** : paroi réalisée à 1g (Shen)

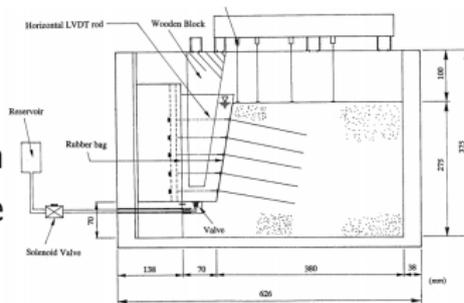


- **1869** : *De L'Equilibre Des Solides Elastiques Semblables*, E. Phillips
- **1931** : première mise en pratique (Bucky puis Pokrovsky et Fedorov en 1936)
- **1982** : paroi réalisée à 1g (Shen)
- **1993** : excavation en vol par vidange de fluide (Tei)



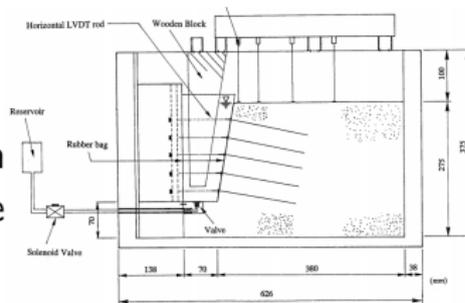


- **1869** : *De L'Equilibre Des Solides Elastiques Semblables*, E. Phillips
- **1931** : première mise en pratique (Bucky puis Pokrovsky et Fedorov en 1936)
- **1982** : paroi réalisée à 1g (Shen)
- **1993** : excavation en vol par vidange de fluide (Tei)





- **1869** : *De L'Equilibre Des Solides Elastiques Semblables*, E. Phillips
- **1931** : première mise en pratique (Bucky puis Pokrovsky et Fedorov en 1936)
- **1982** : paroi réalisée à 1g (Shen)
- **1993** : excavation en vol par vidange de fluide (Tei)



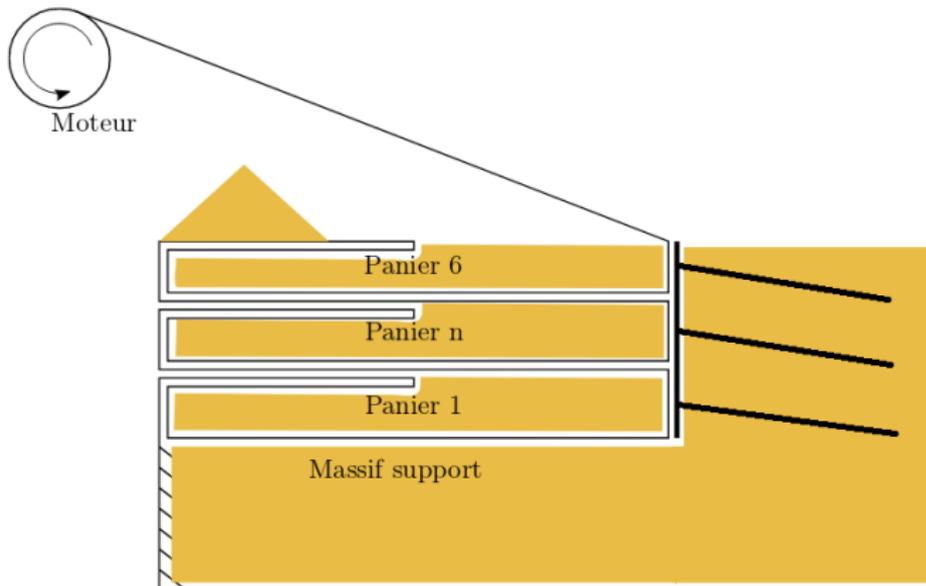
## Difficulté majeure

Excaver en vol pour respecter le phasage et le chemin de contraintes



## Enroulement de géotextile

- Non-renforcement du sol : géotextile lâche
- Sol pulvérulent : utilisation de paniers





## Enroulement de géotextile

- Non-renforcement du sol : géotextile lâche
- Sol pulvérulent : utilisation de paniers





## Enroulement de géotextile

- Non-renforcement du sol : géotextile lâche
- Sol pulvérulent : utilisation de paniers





## Enroulement de géotextile

- Non-renforcement du sol : géotextile lâche
- Sol pulvérulent : utilisation de paniers





## Enroulement de géotextile

- Non-renforcement du sol : géotextile lâche
- Sol pulvérulent : utilisation de paniers





## Enroulement de géotextile

- Non-renforcement du sol : géotextile lâche
- Sol pulvérulent : utilisation de paniers





## Enroulement de géotextile

- Non-renforcement du sol : géotextile lâche
- Sol pulvérulent : utilisation de paniers





## Enroulement de géotextile

- Non-renforcement du sol : géotextile lâche
- Sol pulvérulent : utilisation de paniers





## Enroulement de géotextile

- Non-renforcement du sol : géotextile lâche
- Sol pulvérulent : utilisation de paniers





# Principes de similitude

Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions

## Conservation de la rhéologie

- Utilisation du matériau prototype
- Conservation des contraintes  $\Rightarrow l \rightarrow \frac{l}{N}, g \rightarrow Ng$

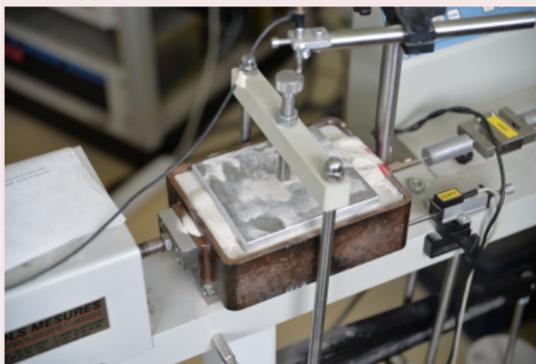


## Conservation de la rhéologie

- Utilisation du matériau prototype
- Conservation des contraintes  $\Rightarrow l \rightarrow \frac{l}{N}, g \rightarrow Ng$

## Limites de la similitude

- Existence VER  $\Rightarrow \phi_{clous} > 10 \phi_{grains}$
- Existence loi de frottement  $\Rightarrow \phi_{clous} > 80 \phi_{grains}$  (pieux)



- Essais d'arrachement sous presse

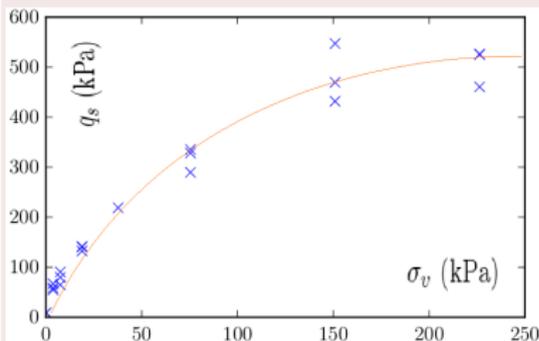


## Conservation de la rhéologie

- Utilisation du matériau prototype
- Conservation des contraintes  $\Rightarrow l \rightarrow \frac{l}{N}, g \rightarrow Ng$

## Limites de la similitude

- Existence VER  $\Rightarrow \phi_{clous} > 10 \phi_{grains}$
- Existence loi de frottement  $\Rightarrow \phi_{clous} > 80 \phi_{grains}$  (pieux)



- Essais d'arrachement sous presse
- Répétabilité et détermination  $q_s$



# Réalisation du parement

Clouage des  
Sols  
de Sauvage

Contexte

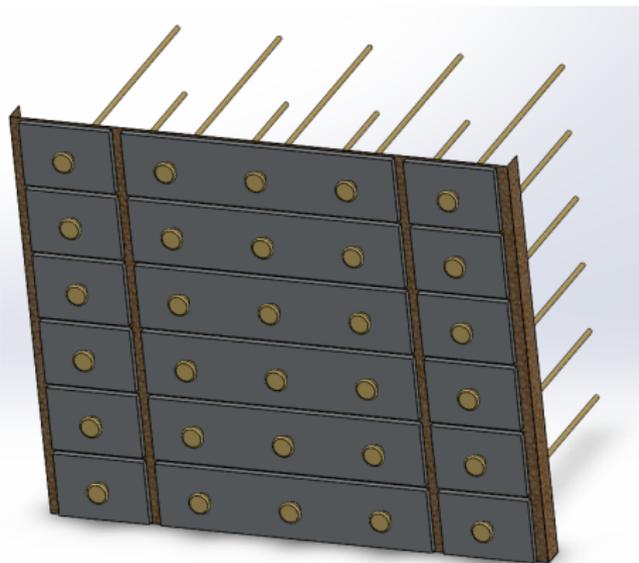
Modélisation

Résultats

Conclusions

Paroi "en place" + effets de bords

→ Articulation de la paroi horizontale et verticale





# Réalisation du parement

Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

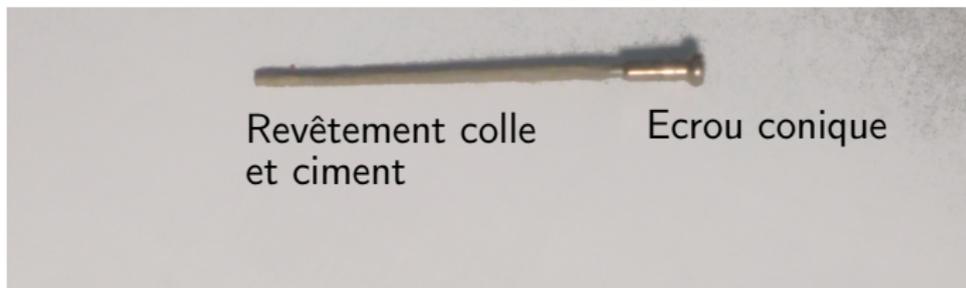
Modélisation

Résultats

Conclusions

Tiges métalliques ( $\phi_{clous} = 2mm$ ) rotulées

Encollées et recouvertes de ciment





# Reconstitution du sol

Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions

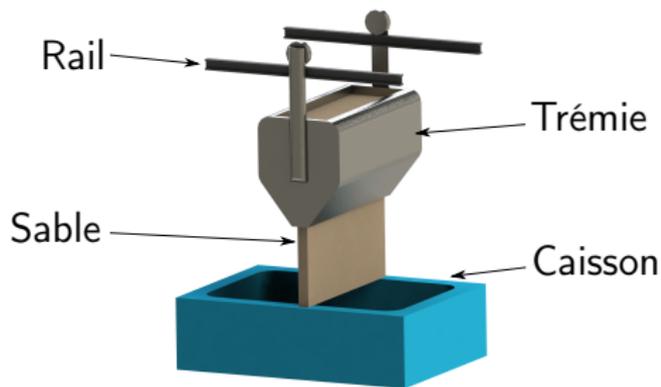
Sol pulvérulent très fin

Sable HN38 ( $d_{50} = 120\mu m$ ,  $C_U = 1,97$ )



## Défauts de pluviation

Effets d'écran de la paroi et des clous ?





## Défauts de pluviation

Effets d'écran de la paroi et des clous ?



## Contrôle

- Injection d'agar-agar
- Pesée hydrostatique
- $I_D$  varie entre 80% et 85%



Clouage des  
Sols

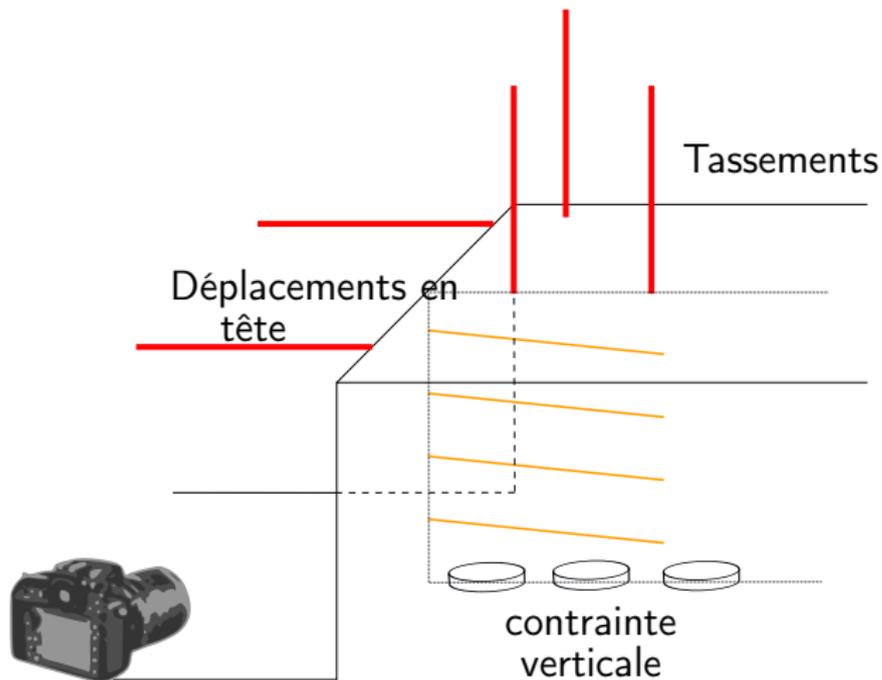
de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions





# Instrumentation : efforts dans les clous

Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

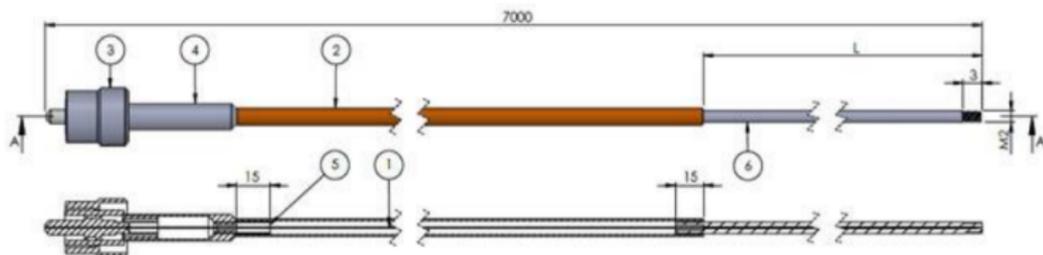
Modélisation

Résultats

Conclusions

## Encollage de la fibre dans les clous (LGS)

$\phi_c = 2\text{mm} \Rightarrow$  Intérieur capillaire  $\Rightarrow$  Pas de flexion





# Instrumentation : efforts dans les clous

Clouage des  
Sols

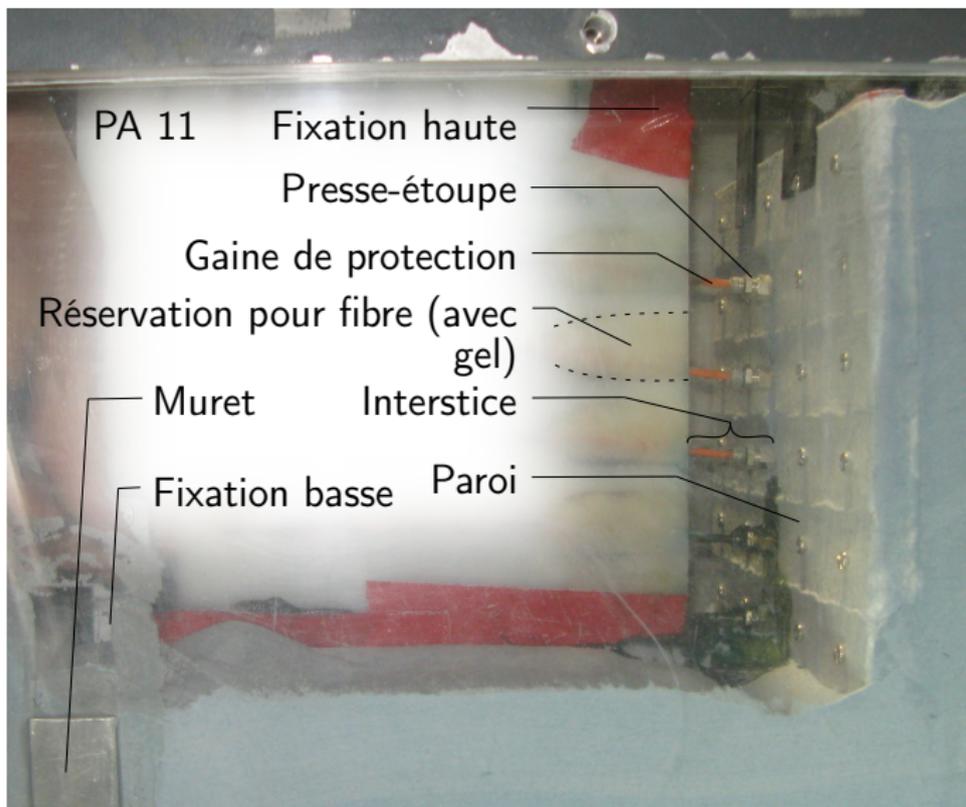
de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions





# Instrumentation : efforts dans les clous

Clouage des  
Sols

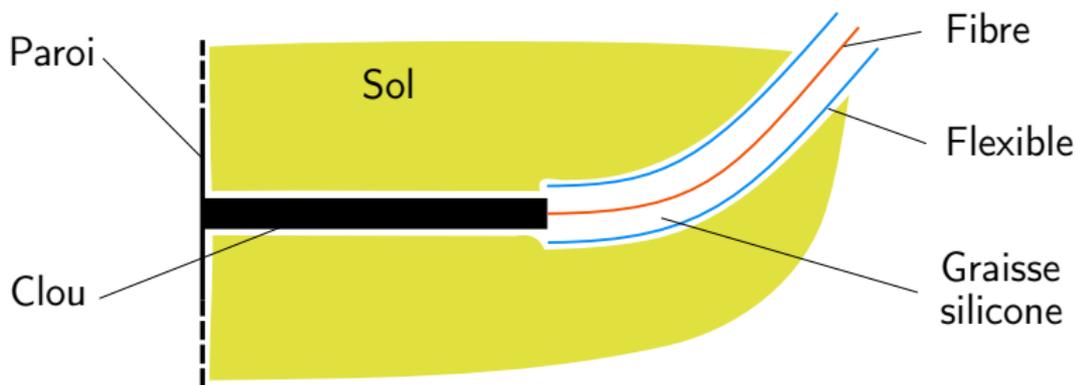
de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions





# Instrumentation : efforts dans les clous

Clouage des  
Sols

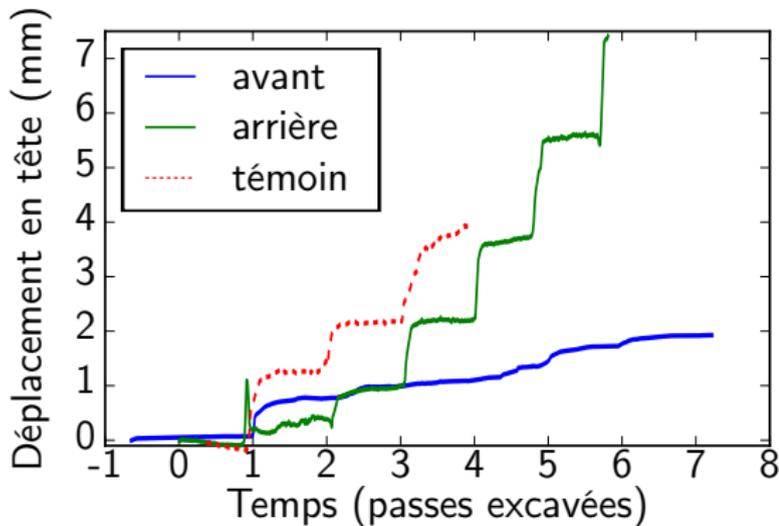
de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions



Une instrumentation intrusive

Sortie arrière moins pénalisante



# Instrumentation : GeoPIV

Clouage des  
Sols

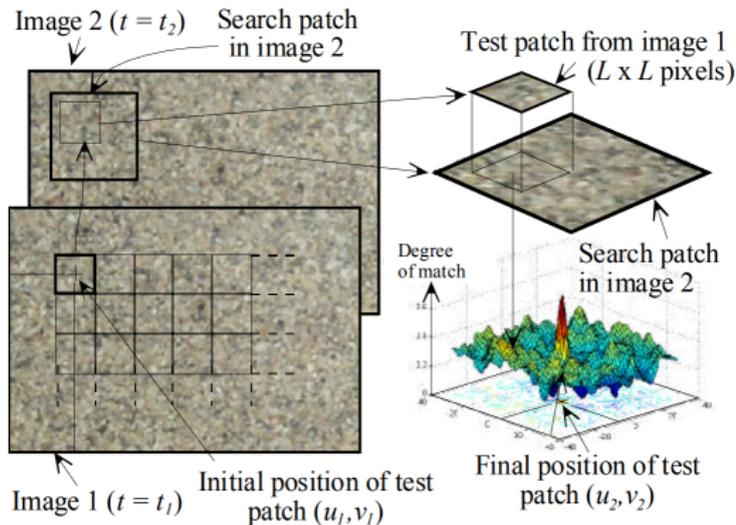
de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions



Stanier et al, 2015

Besoin de contraste

Coloration au bleu de méthylène (10% masse)



# Instrumentation : GeoPIV

Clouage des  
Sols

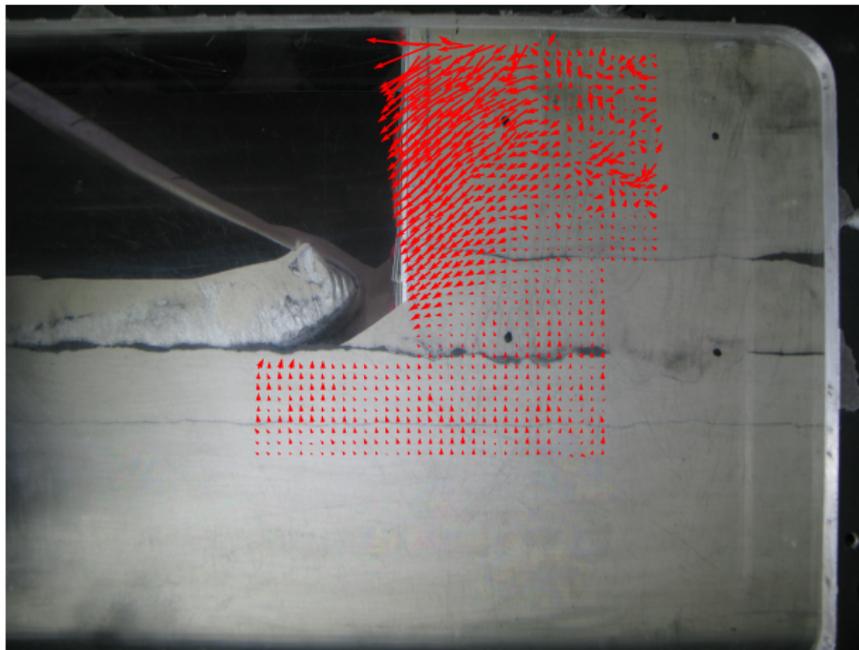
de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions





# Déroulé de la présentation



Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

Modélisation

**Résultats**

Conclusions

- 1 Les parois clouées et leur dimensionnement
- 2 Modélisation sous macrogravité
- 3 Résultats expérimentaux**
- 4 Conclusions et Perspectives



# Contrainte verticale à la base du massif cloué

Clouage des  
Sols

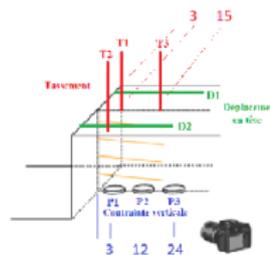
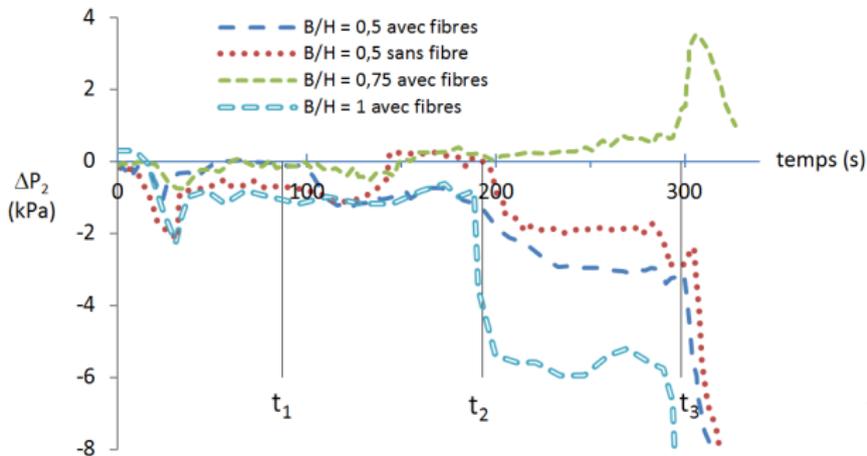
de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions



- Peu d'impact des fibres
- Importance de l'élancement
- Variations faibles ( $P_2 \simeq 150kPa$ )



# Contrainte verticale à la base du massif cloué

Clouage des Sols

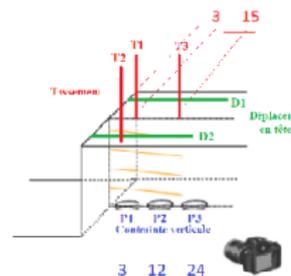
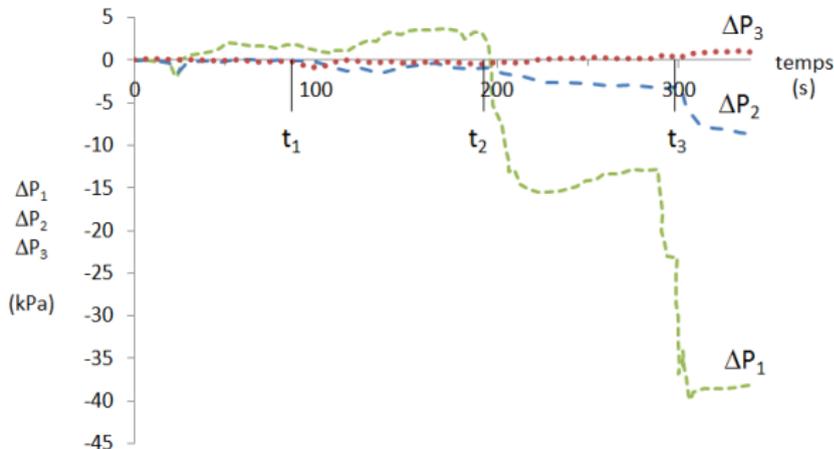
de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions



- Effet du déconfinement localisé au voisinage du parement



# Efforts dans les clous

Clouage des  
Sols

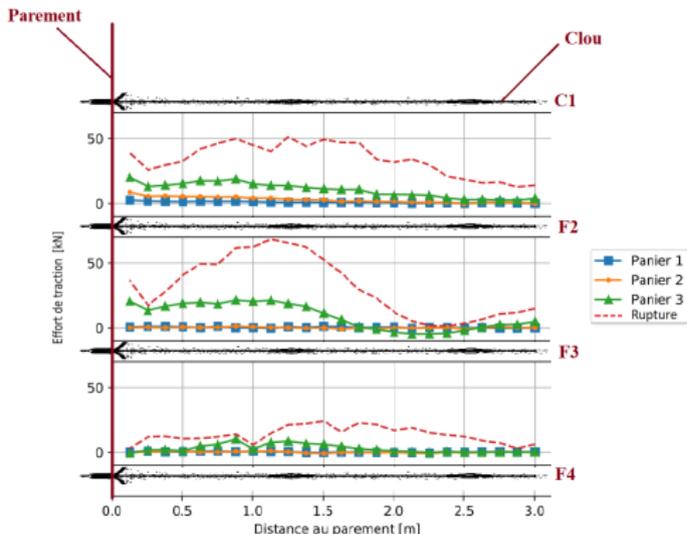
de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions



## Élancement 0.5

- Mobilisation phasée
- F4 en légère tension initialement : impact non nul ab initio
- pas de ligne de rupture claire



# Déplacement horizontal en tête du massif cloué

Clouage des  
Sols

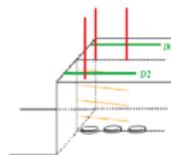
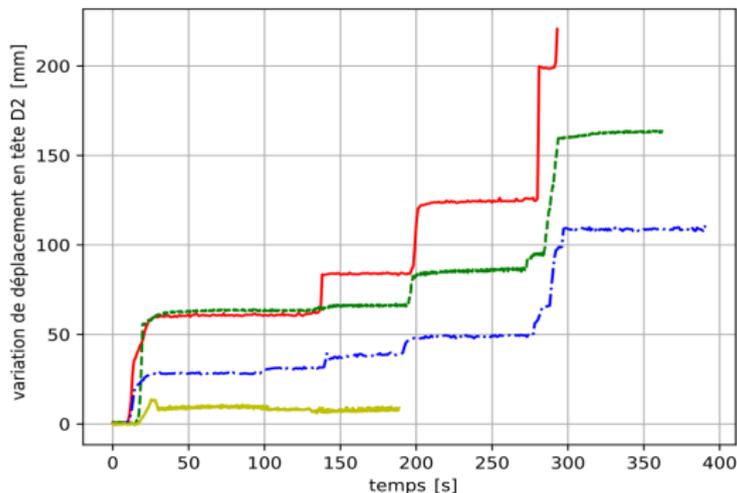
de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions



- Déplacements très grands devant  $4H/1000$
- Effet des rondelles de caoutchouc ?
- Question plus large sur le déplacement au pic ?



Clouage des  
Sols

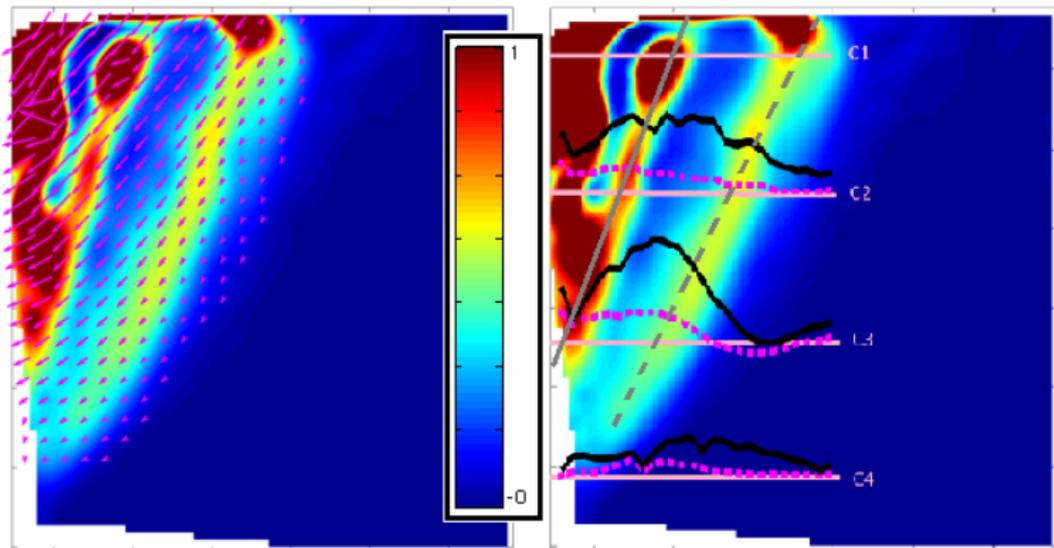
de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions



- Mécanisme par ruptures emboîtées ?
- Déplacements aberrants aux bords du domaine d'observation



# Evolution de la ligne de rupture

Clouage des  
Sols

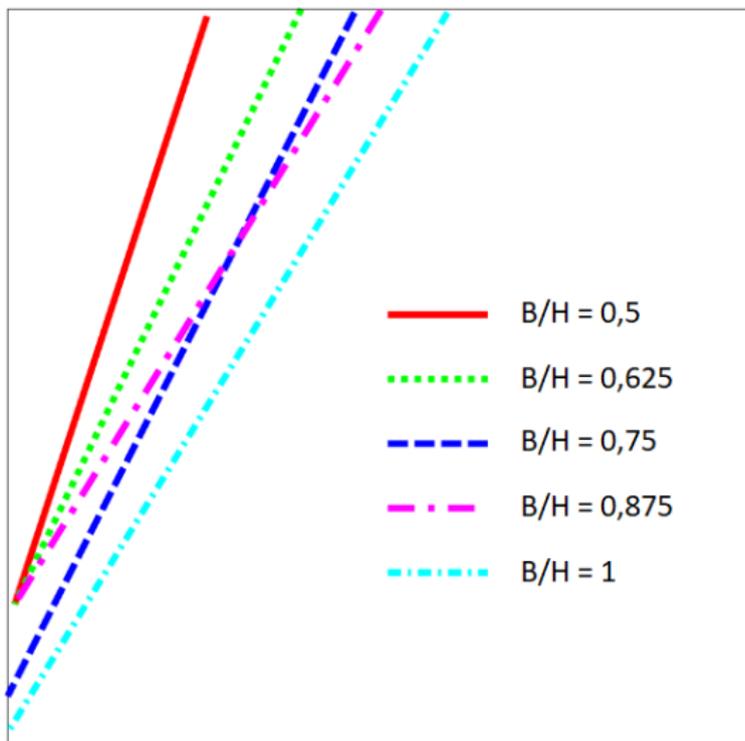
de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions



Tout se passe  
comme si  
l'augmenta-  
tion de la  
longueur des  
clous  
diminuait  
l'angle de  
frottement  
d'un massif  
homogène  
équivalent



# Déroulé de la présentation



Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions

- 1 Les parois clouées et leur dimensionnement
- 2 Modélisation sous macrogravité
- 3 Résultats expérimentaux
- 4 Conclusions et Perspectives



## Une modélisation complexe

- Une similitude difficile à établir
- Des résultats en accord avec la littérature (profils d'efforts)
- Mais des divergences non négligeables (déplacement)



## Une modélisation complexe

- Une similitude difficile à établir
- Des résultats en accord avec la littérature (profils d'efforts)
- Mais des divergences non négligeables (déplacement)

## Un impact sur le dimensionnement ?

- Un mécanisme complexe militant pour un dimensionnement prenant en compte le phasage de construction
- Un impact de l'élançement sur le dimensionnement à l'ELS? (réduction des tassements)



Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions

Question "fondamentale"

Similitude de la loi de frottement (et du déplacement en tête?)



Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions

## Question "fondamentale"

Similitude de la loi de frottement (et du déplacement en tête?)

## Méthode expérimentale

Coupler GeoPIV et "tracking" pour une meilleure observation des déplacements?



Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions

## Question "fondamentale"

Similitude de la loi de frottement (et du déplacement en tête?)

## Méthode expérimentale

Coupler GeoPIV et "tracking" pour une meilleure observation des déplacements?

## Pour aller plus loin

Et sous séisme?



Merci pour votre attention

Clouage des  
Sols

de Sauvage

Contexte

Modélisation

Résultats

Conclusions

Des questions ?

