
Sols renforcés par inclusions rigides :

Modélisation physique en centrifugeuse

de remblais et de dallage

Université de Nantes – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Gaëlle Baudouin
gaelle.baudouin@polytech.univ-bpclermont.fr

Objectifs

Etude paramétrique sur modèle physique en centrifugeuse

- Densité d'inclusions sur la surface renforcée
- Hauteur du matelas de transfert de charge

Modélisation en centrifugeuse

Principe de la modélisation en centrifugeuse

→ Contrainte verticale dans un sol à la profondeur H [m]

$$\sigma = \rho \times g \times H_{\text{prototype}}$$

→ Dans un modèle réduit à l'échelle $1/N$

$$\sigma = \rho \times g \times H_{\text{prototype}} / N$$

→ Sans centrifugeuse géotechnique $\sigma_{\text{modèle}} = \sigma_{\text{prototype}} / N$

→ Avec la centrifugeuse géotechnique

$$\sigma = \rho \times N g \times H_{\text{prototype}} / N$$

$$\sigma_{\text{modèle}} = \sigma_{\text{prototype}}$$

Plan de la présentation

Modèle expérimental

Programme expérimental – Déroulement d'un essai

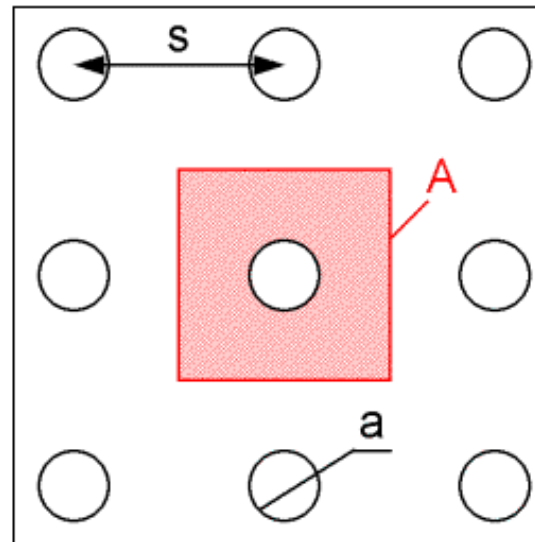
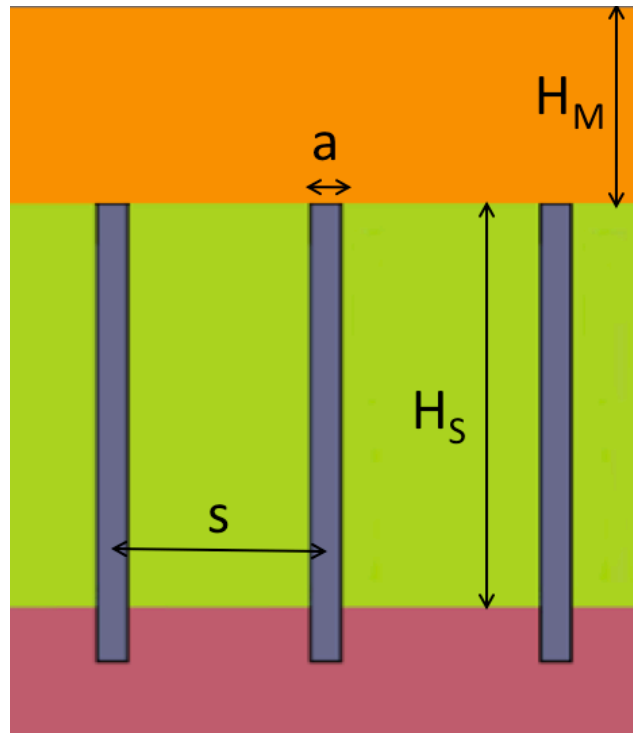
Résultats expérimentaux

Conclusion et perspectives

Modèle expérimental

- Dimensions
- Matériaux
- Instrumentation

Modèle expérimental : Dimensions



$$A_P = \frac{\pi a^2}{4} \quad A = s^2$$

Taux de couverture :

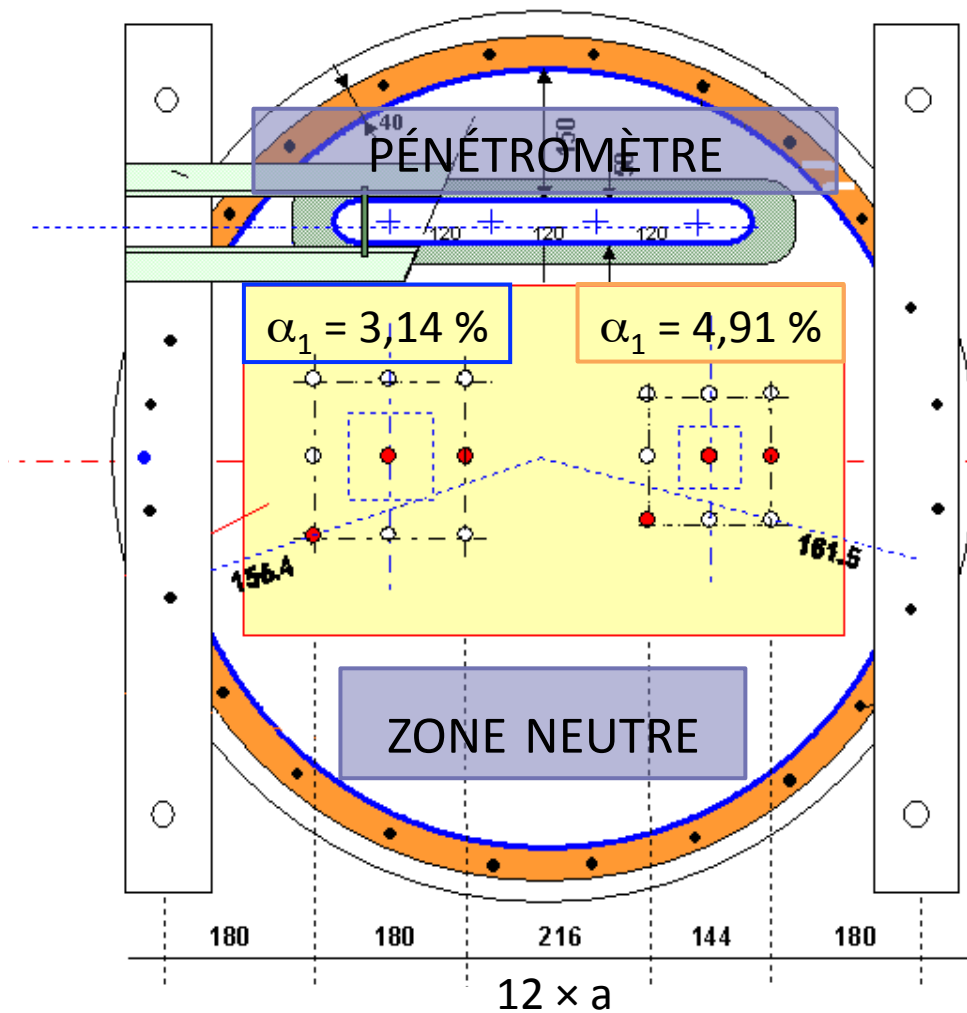
$$\alpha = \frac{A_P}{A}$$

Dimensions du modèle :

- Dimensions des inclusions
- Dimensions des capteurs
- Dimensions du conteneur d'essais
- Granulométrie du matelas

$$N = 27,8$$

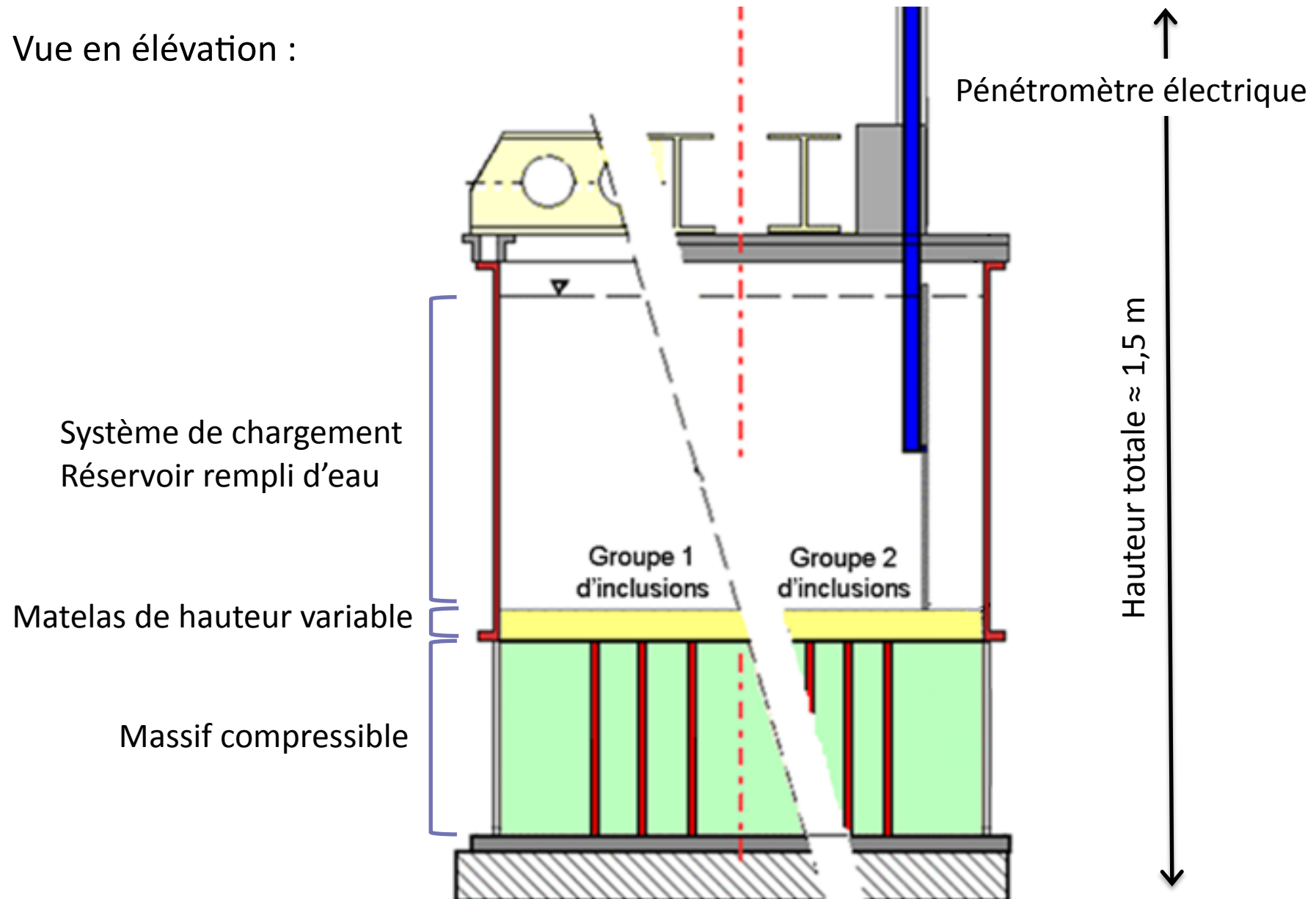
Modèle expérimental : Dimensions



	Prototype	Modèle
H_S	10 m	360 mm
H_M	0,3 à 1,5 m	11 à 54 mm
a	50 cm	18 mm
s_1	2,5 m	90 mm
s_2	2 m	72 mm

Modèle expérimental : Dimensions

Vue en élévation :



Modèle expérimental

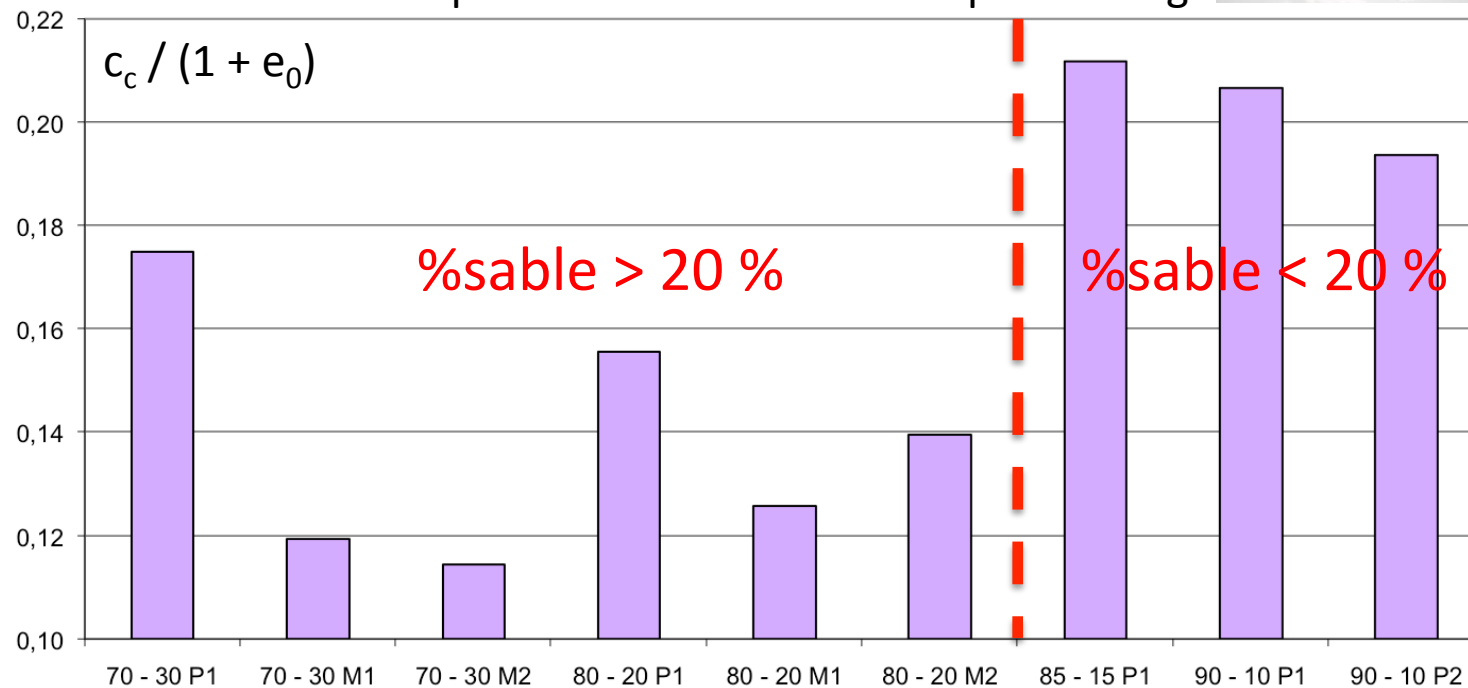
- Dimensions
- **Matériaux**
- Instrumentation

Modèle expérimental : Sol compressible

- kaolin Speswhite (80%) + sable de Fontainebleau (20%)
- $c_c / (1 + e_0) = 0,13$

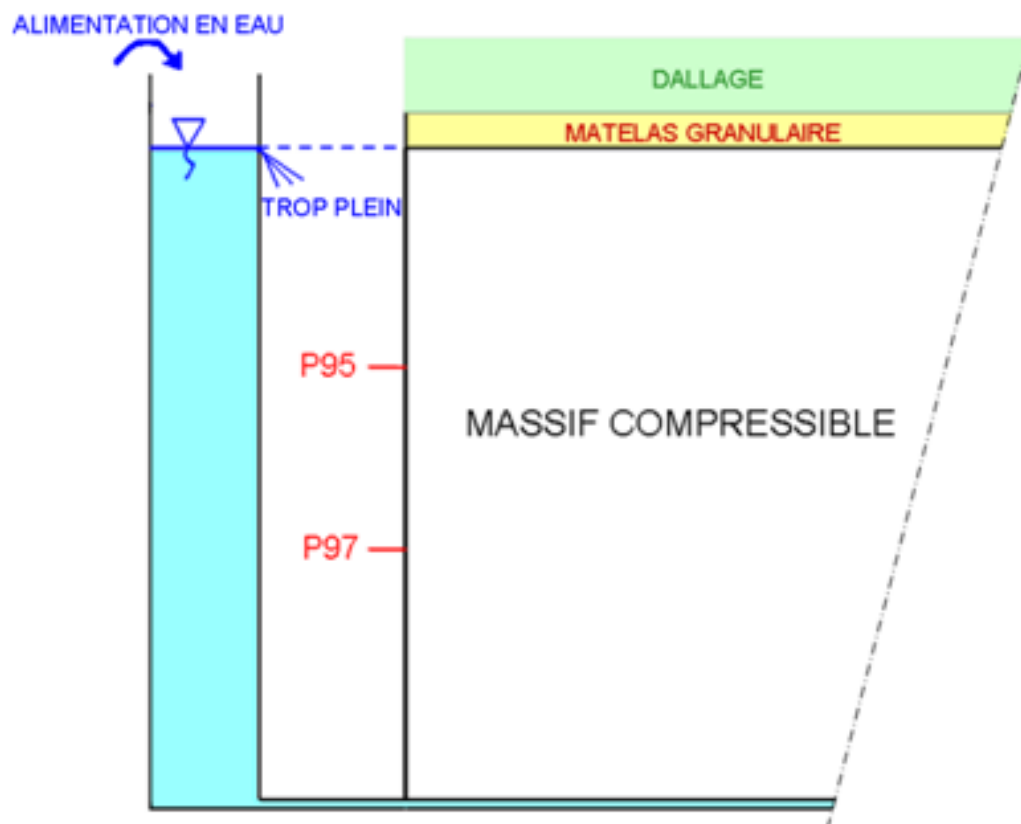


Variation de la compressibilité en fonction du pourcentage de sable



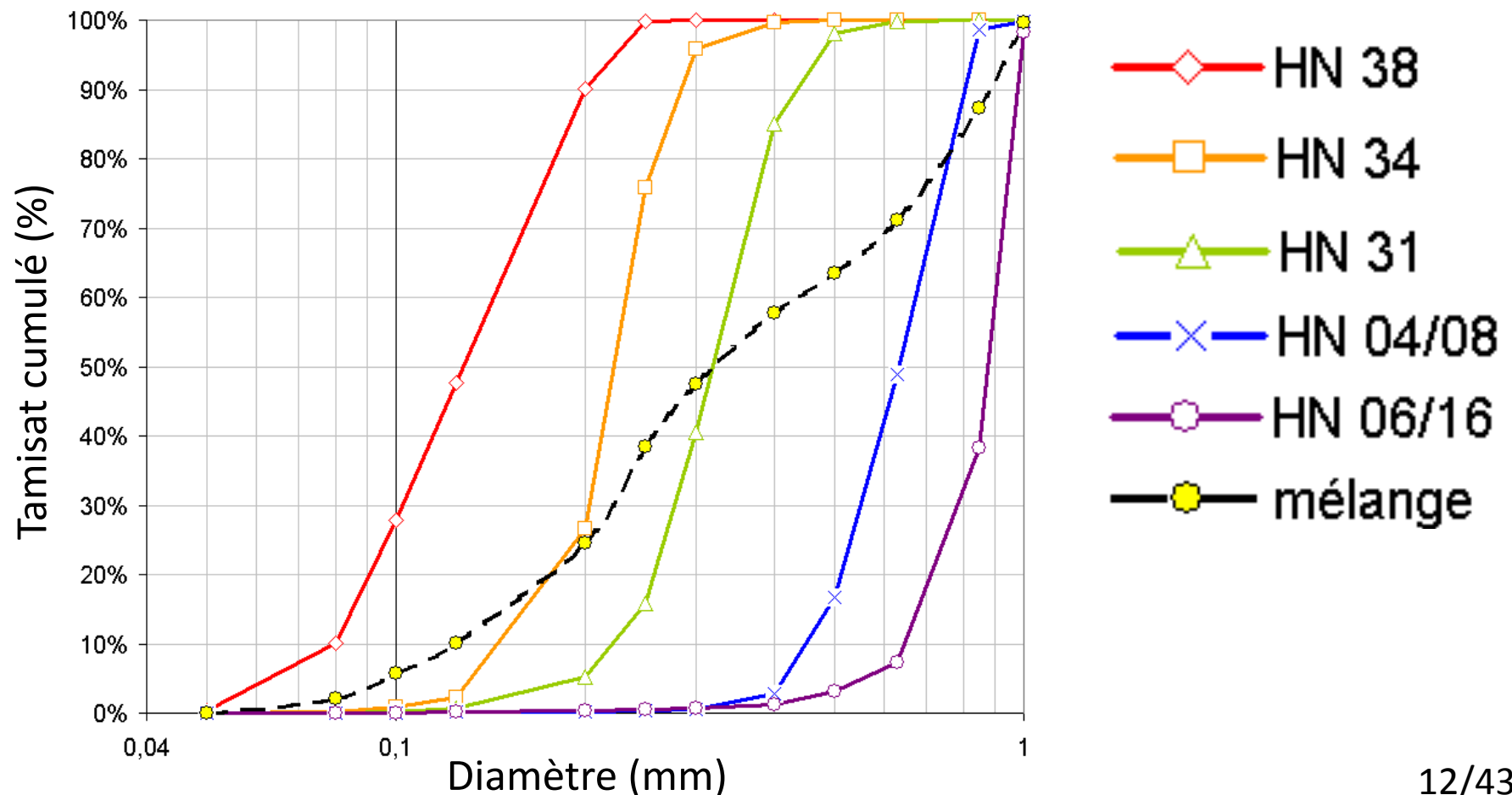
Modèle expérimental : Sol compressible

Maintien du niveau de la nappe dans le massif



Modèle expérimental : Sable du matelas

- Mélange de 5 fractions du sable d'Hostun (0 – 1 mm) $\approx$ Grave B3, 0-31,5 (GTR)
- Coefficient d'uniformité : $C_u = 3,52$
- Angle de frottement interne : $\phi' = 42^\circ$ pour $I_D = 0,9$

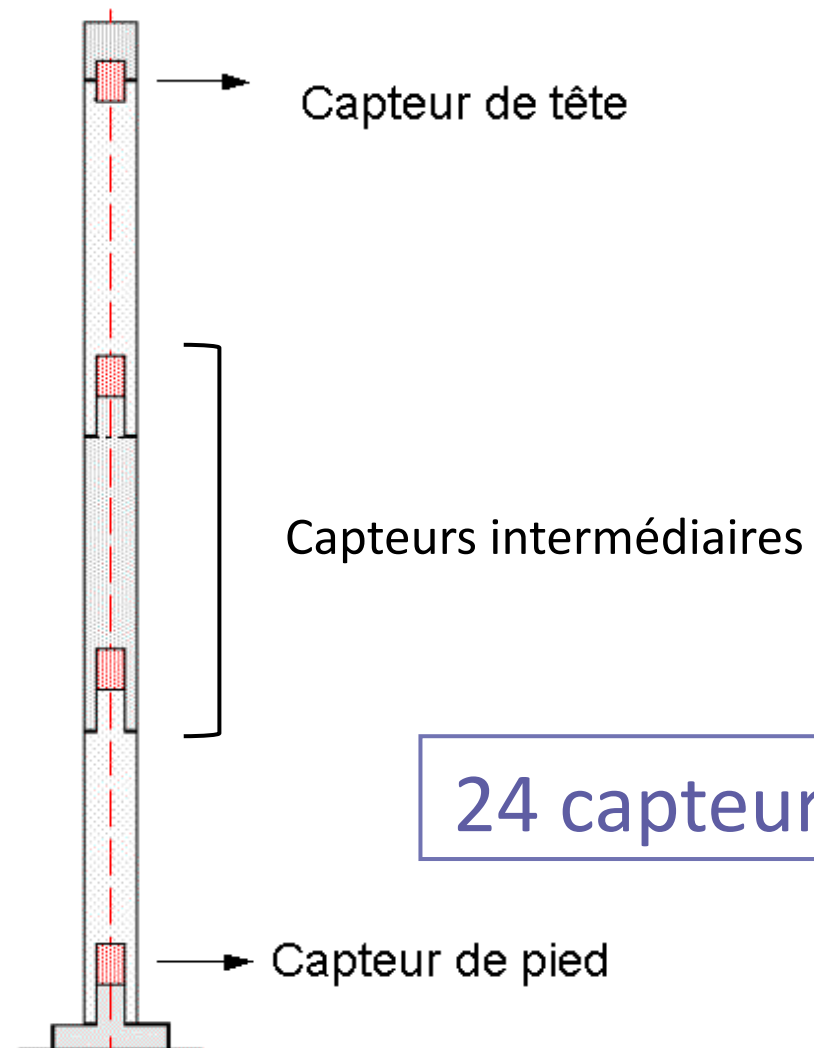
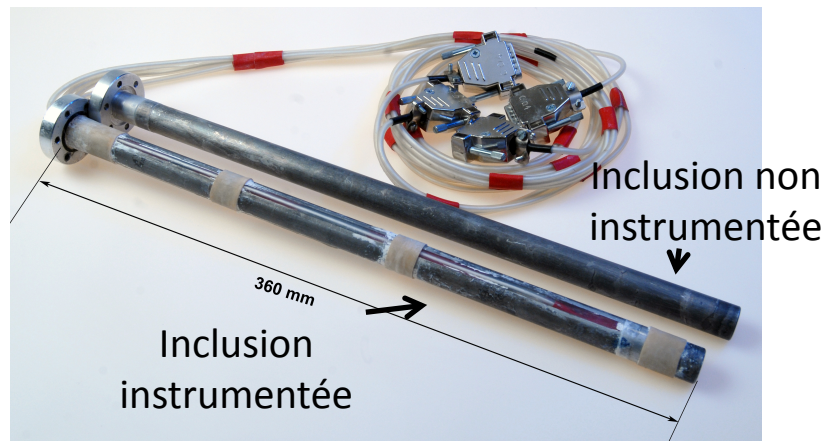
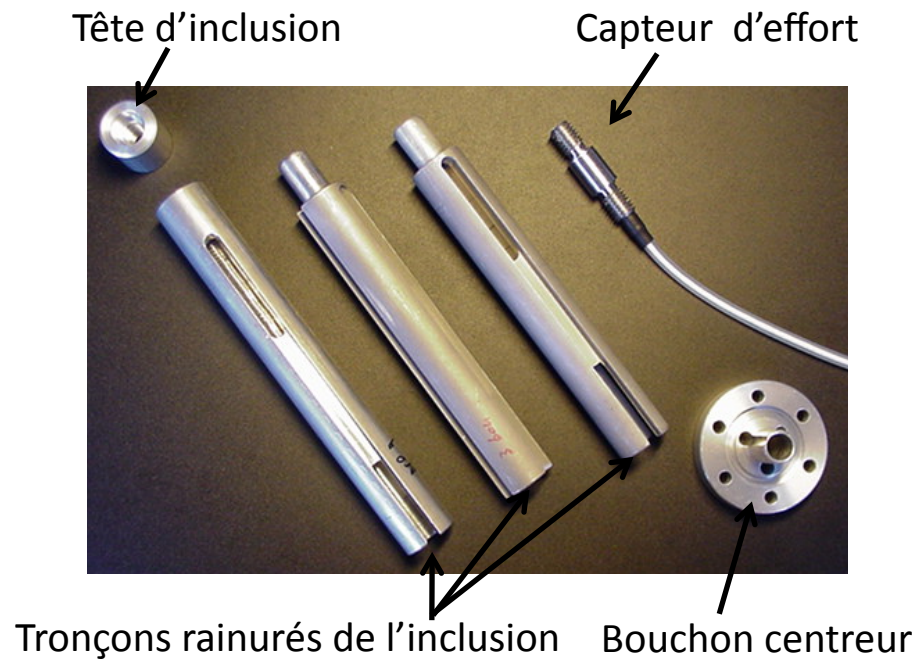


Modèle expérimental

- Dimensions
- Matériaux
- Instrumentation

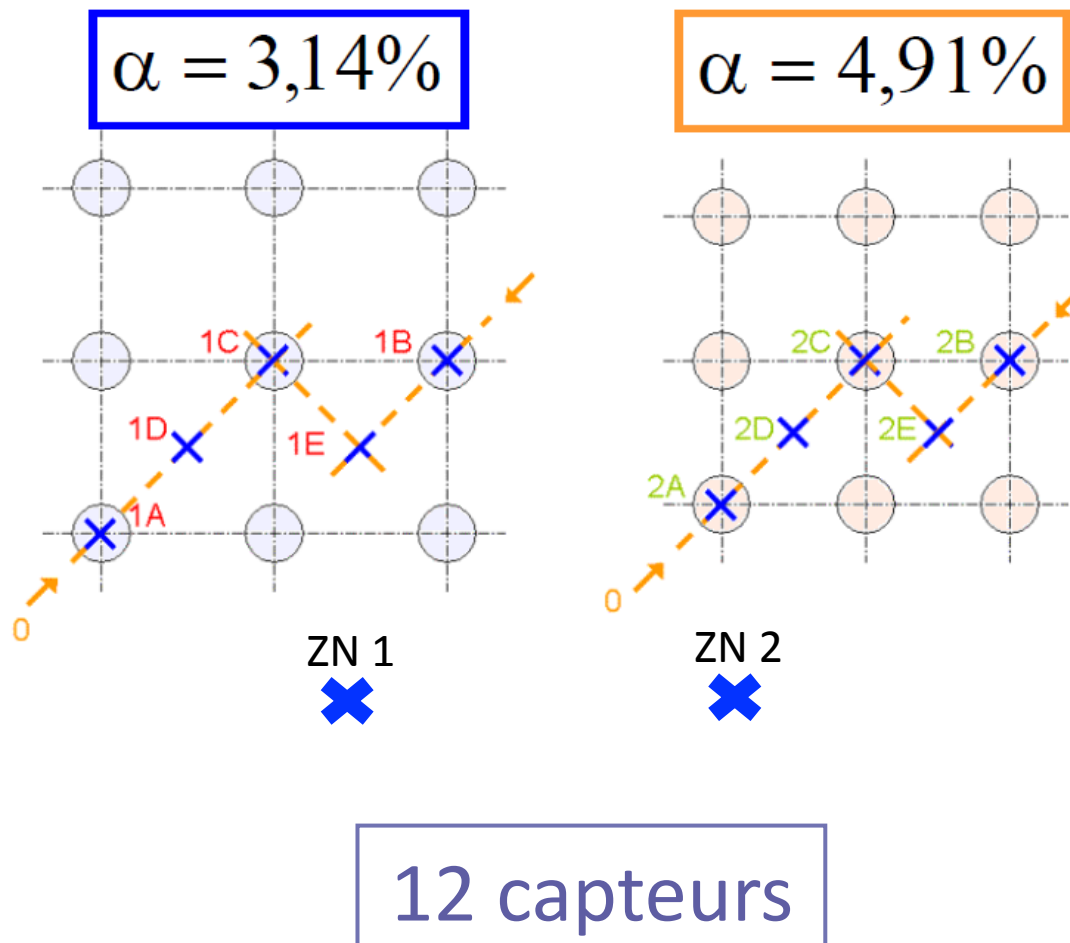
Modèle expérimental : Instrumentation

Mesure des efforts verticaux dans les inclusions

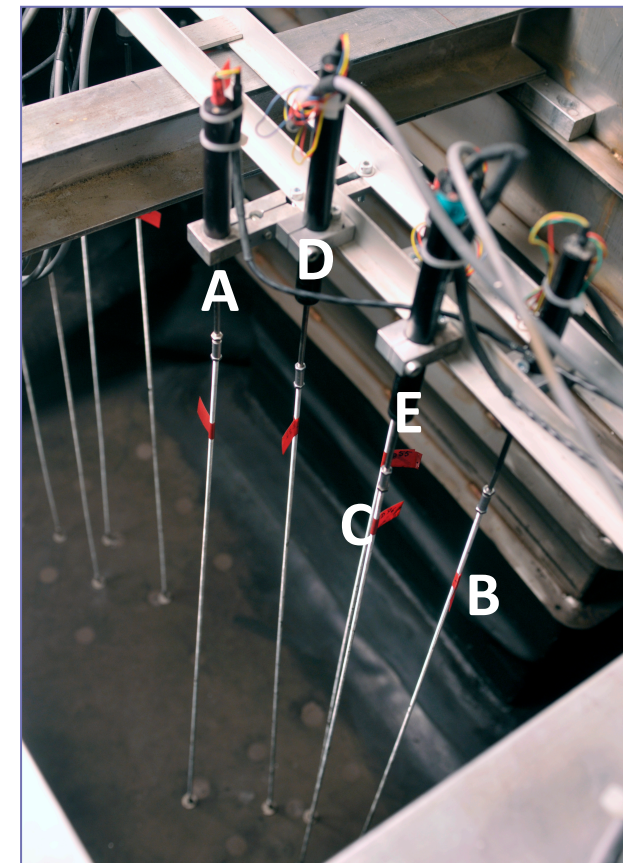


Modèle expérimental : Instrumentation

Mesure des déplacements en surface du matelas



Capteurs de déplacement, groupe 2



Modèle expérimental : Instrumentation

Instrumentation complémentaire

- 2 sondes de pression interstitielle
→ mesure surpressions dans le massif
- 2 sondes de pression
→ mesure de la charge appliquée
- 2 capteurs de déplacement et 1 capteur d'effort
→ pénétromètre électrique

7 capteurs

43 capteurs

Modèle expérimental : Préparation et essai

[Vidéo](#)

Plan de la présentation

Modèle expérimental

Programme expérimental – Déroulement d'un essai

Résultats expérimentaux

Conclusion et perspectives

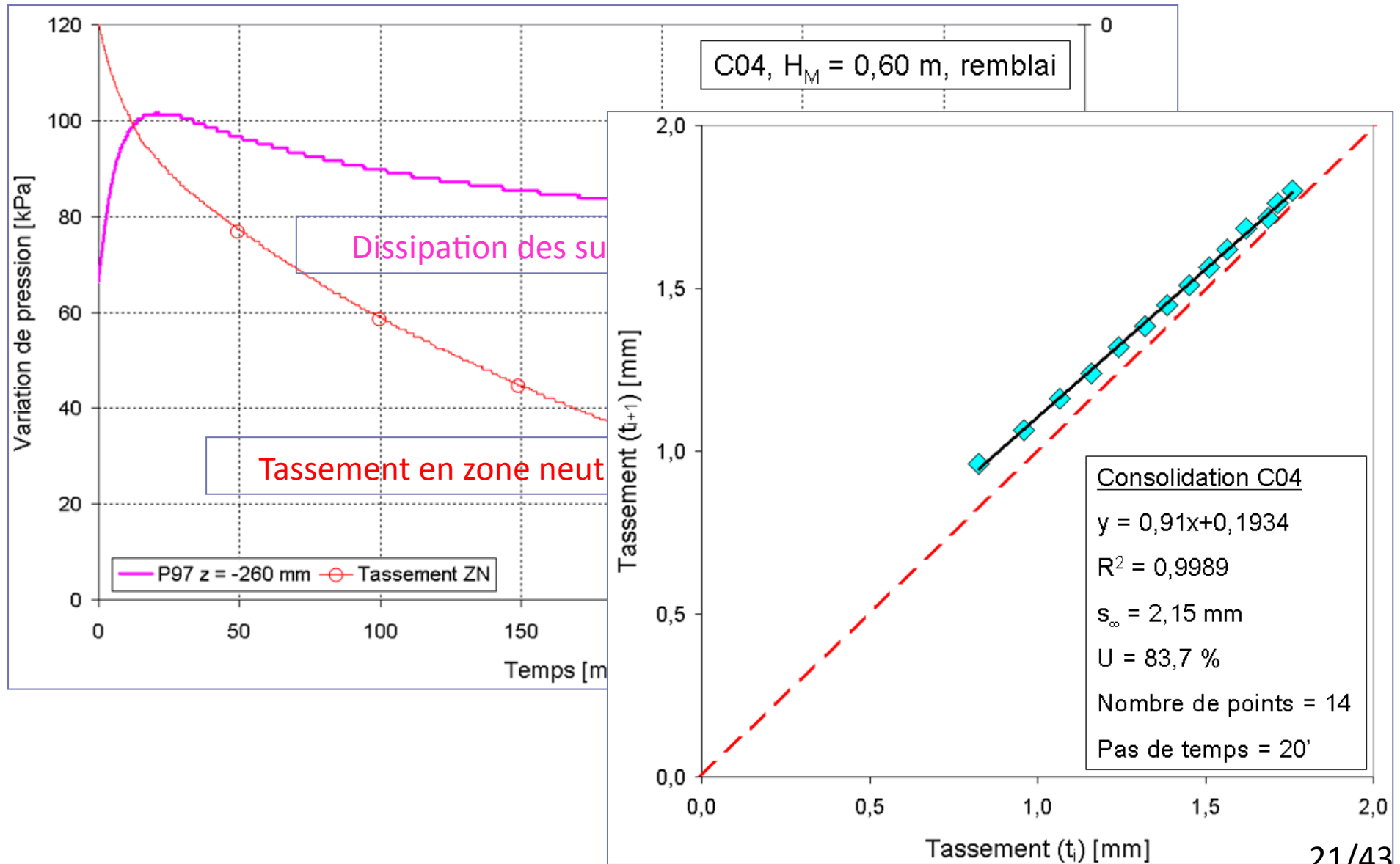
Programme expérimental, déroulement d'un essai

- Paramètres testés
- Suivi de la consolidation
- Reconnaissance pénétrométrique

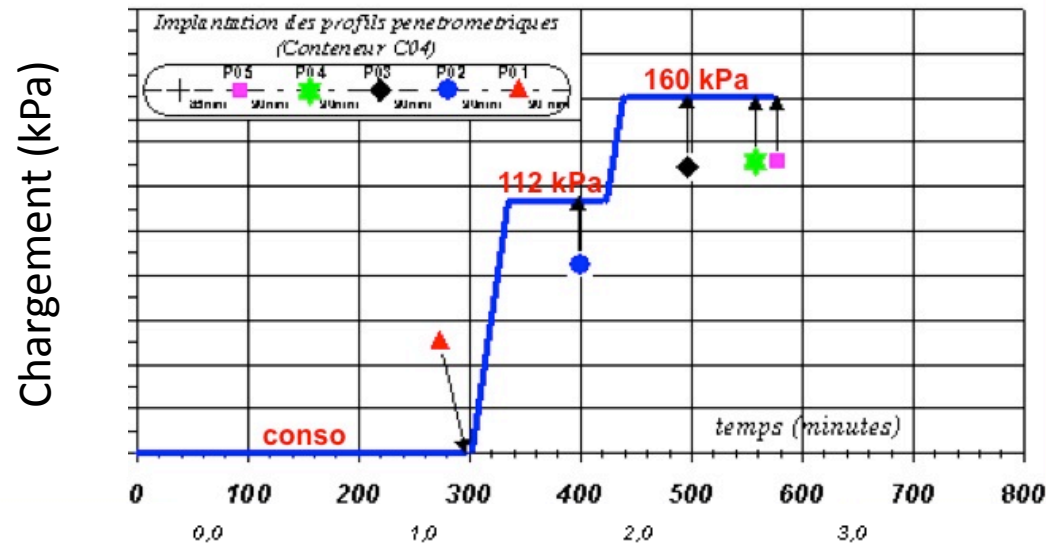
Programme expérimental : Paramètres testés

	Hauteur de matelas		Durée consolidation	Palier n°1	Durée du palier n°1	Palier n°2	Durée du palier n°2
	Modèle (mm)	H_M	(minutes)	(kPa)	(minutes)	(kPa)	(minutes)
C01	54	0,6 m	307	≈112 kPa		≈164 kPa	
C02	36	1,0 m	330	112,6	81	161,3	103
C03	36	1,5 m	208	112,6	79	160,9	161
C04	21	0,6	307	114,3	93	160,9	154
C05	54	1,5	342	115,5	93	163,8	130

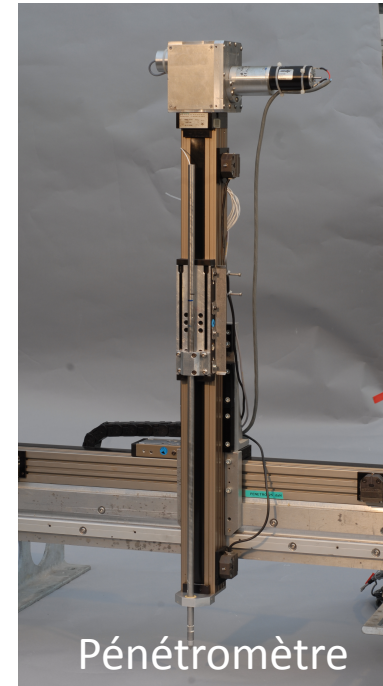
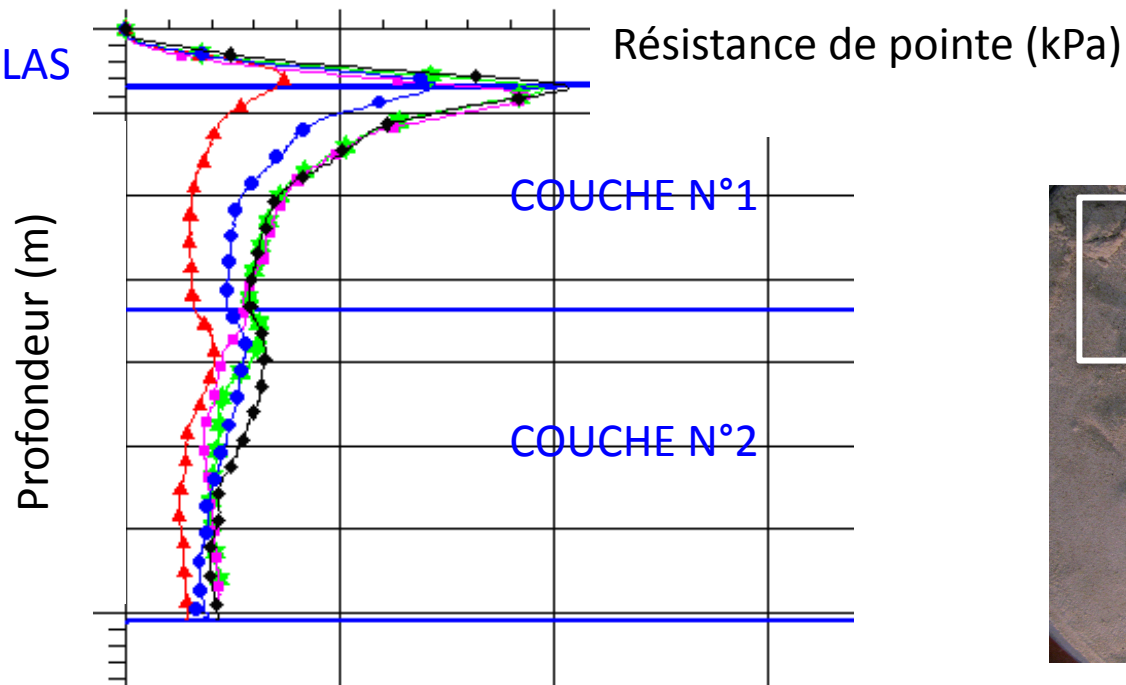
Programme expérimental : Suivi de la consolidation



Programme expérimental : Pénétromètre



MATELAS



Plan de la présentation

Modèle expérimental

Programme expérimental – Déroulement d'un essai

Résultats expérimentaux

Conclusion et perspectives

Résultats expérimentaux

- Chargement de type remblai
 - Tassements
 - Tassements différentiels
 - Efforts en tête

Résultats expérimentaux

- Chargement de type remblai
 - Tassements
 - Tassements différentiels
 - Efforts en tête

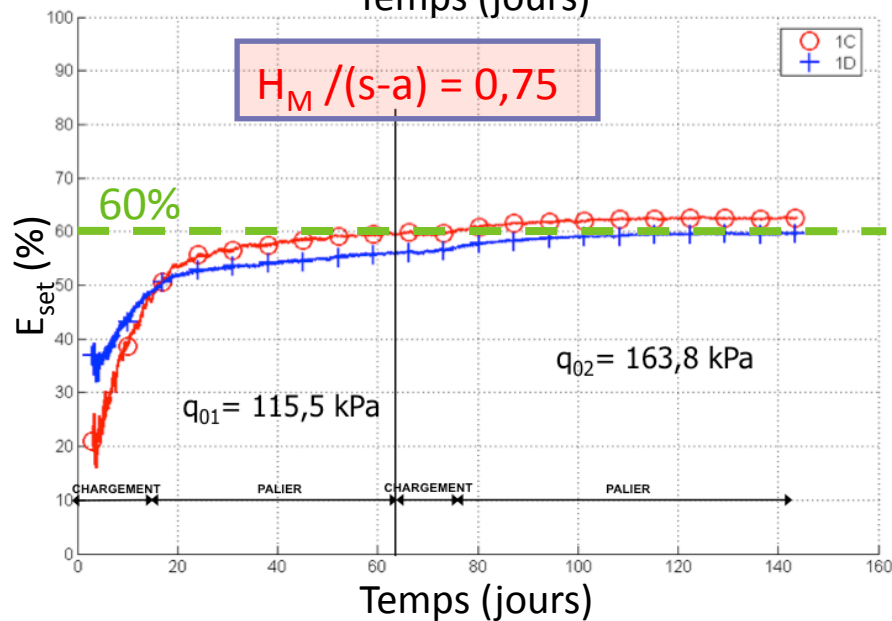
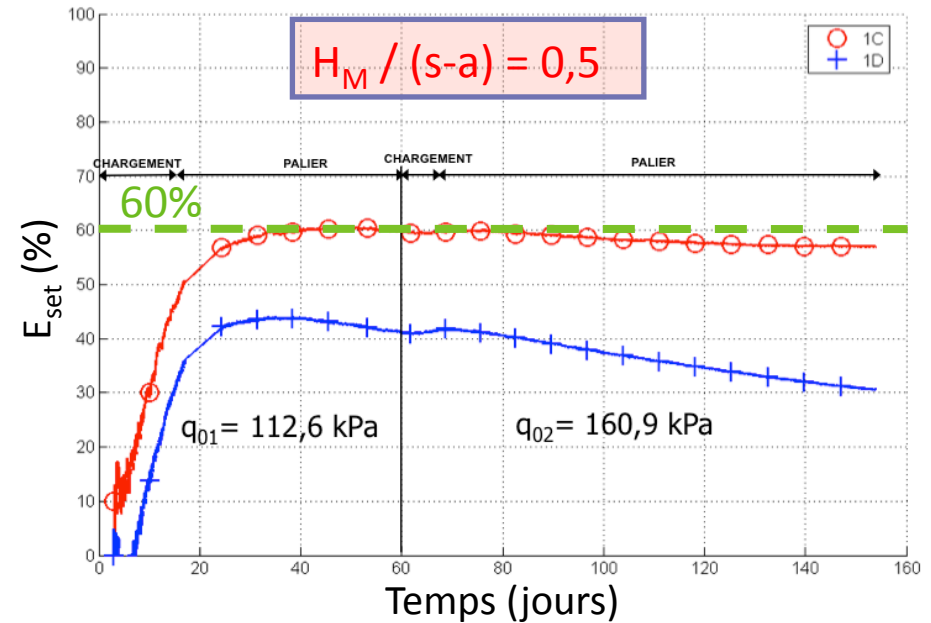
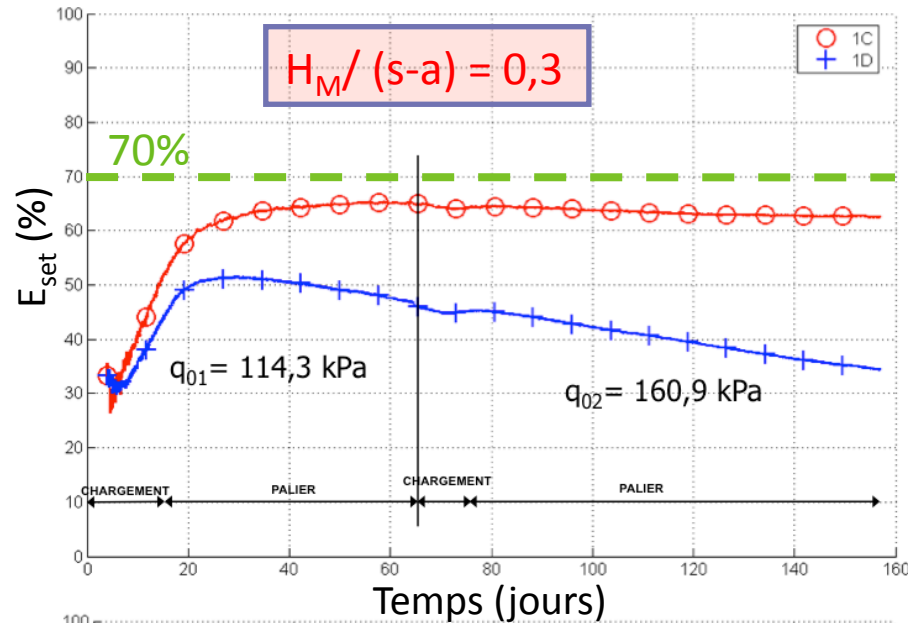
Chargement type remblai : Tassements

Efficacité en tassement, E_{set}

$$E_{set} = 1 - \frac{tassement_{zone.renforcée}(t)}{tassement_{zone.neutre}(t)}$$

Cette valeur varie de 1 si il n'y a pas de tassement en surface de la zone renforcée à 0 si il n'y a pas de réduction de tassement.

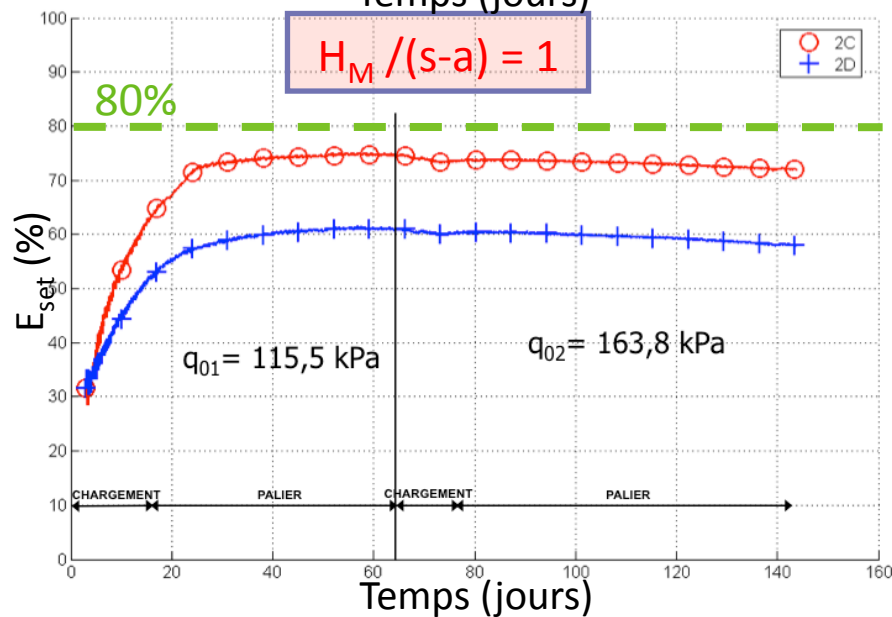
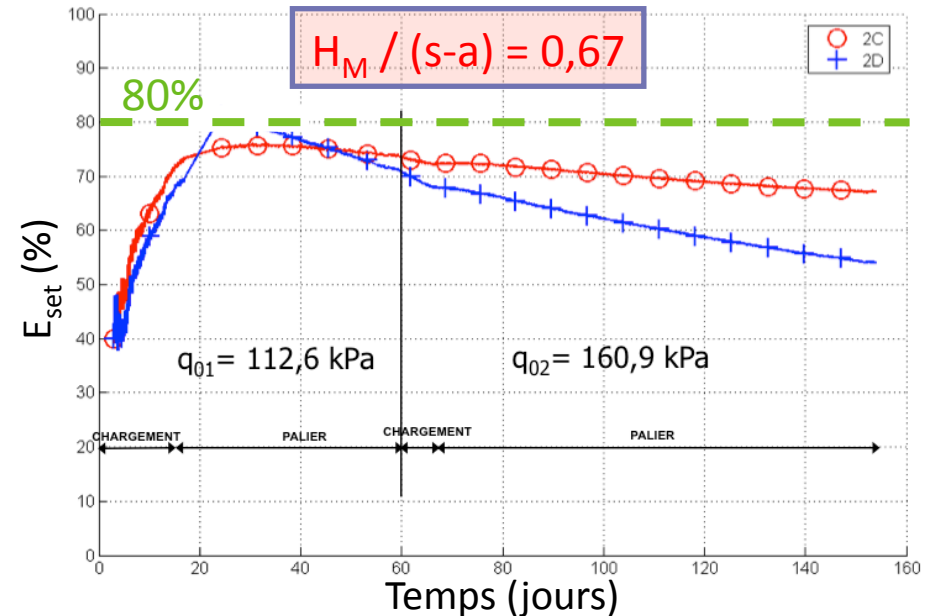
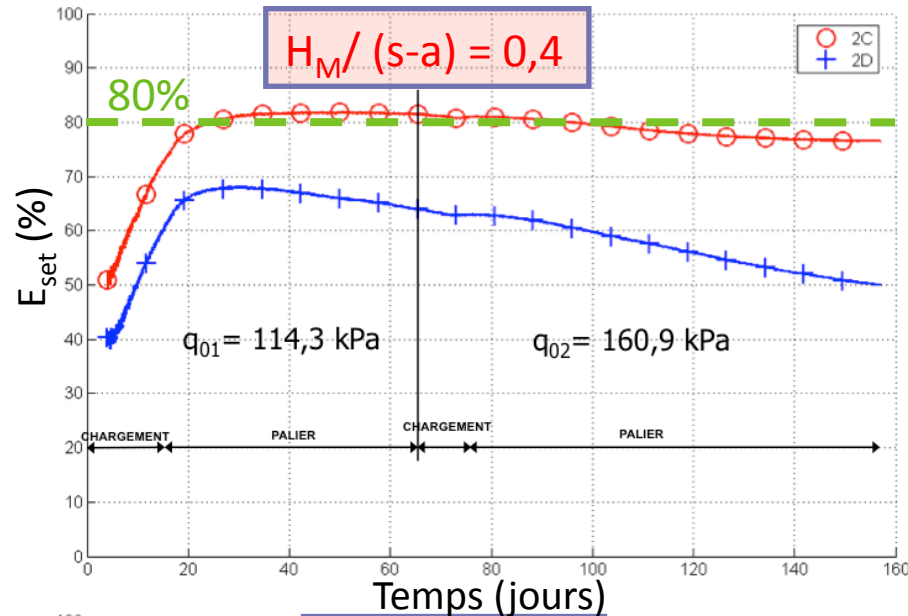
Chargement type remblai : Tassements



$\alpha_1 = 3,14 \%$

○ Inclusion centrale
+ Sol entre inclusion

Chargement type remblai : Tassements



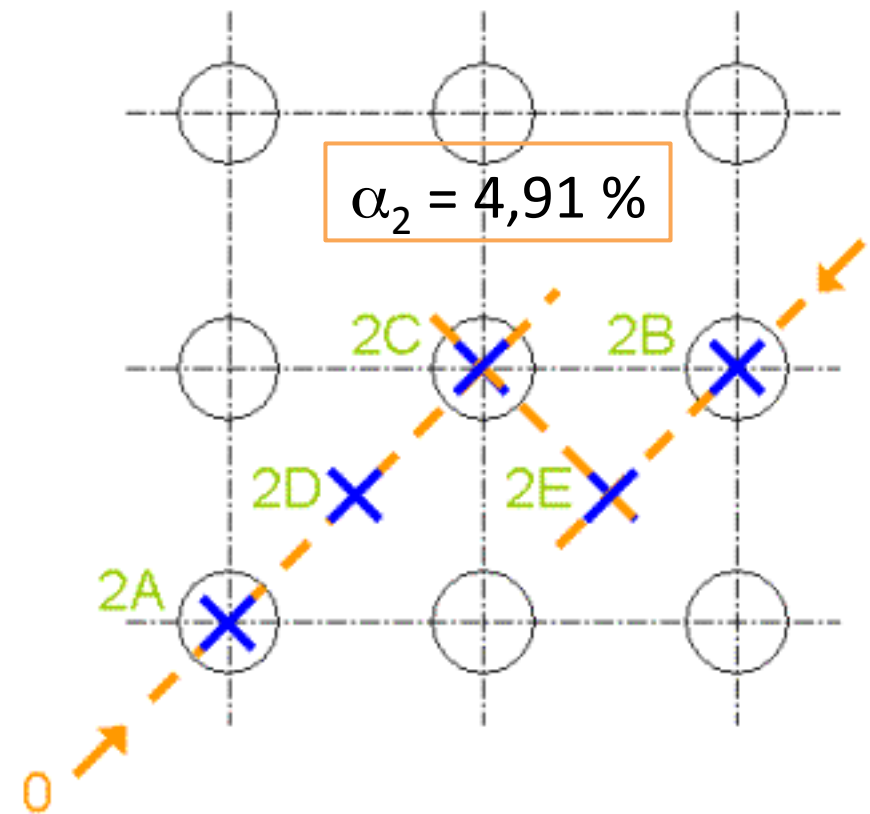
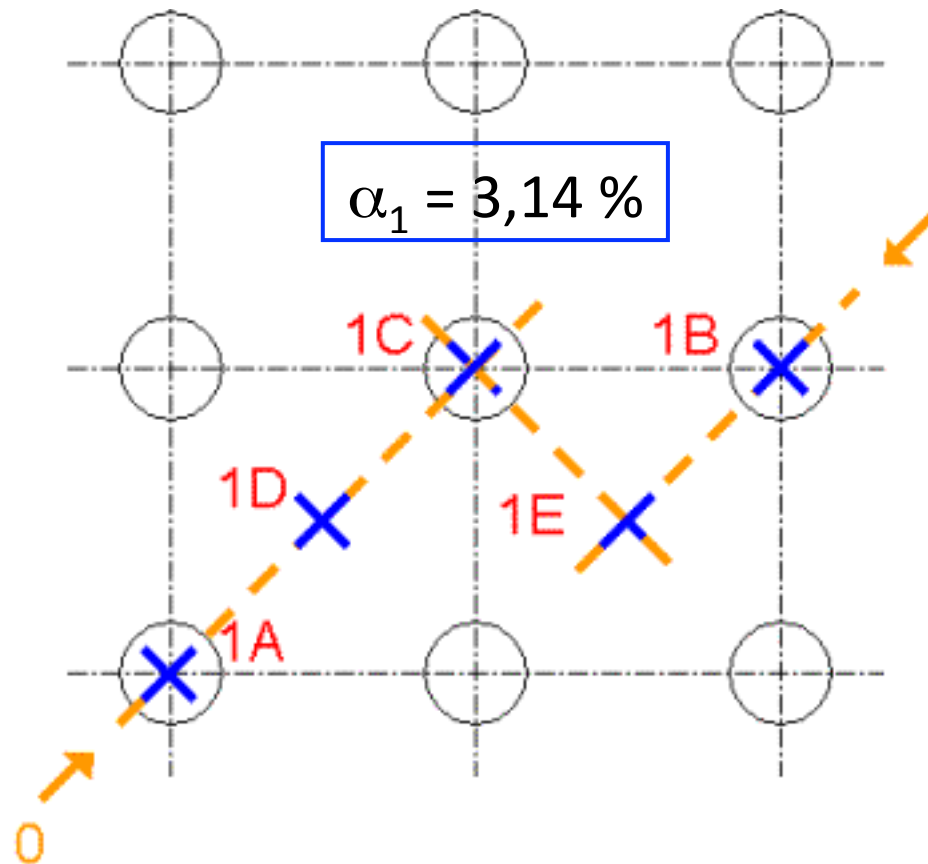
$$\alpha_2 = 4,91 \%$$

○ Inclusion centrale
+ Sol entre inclusion

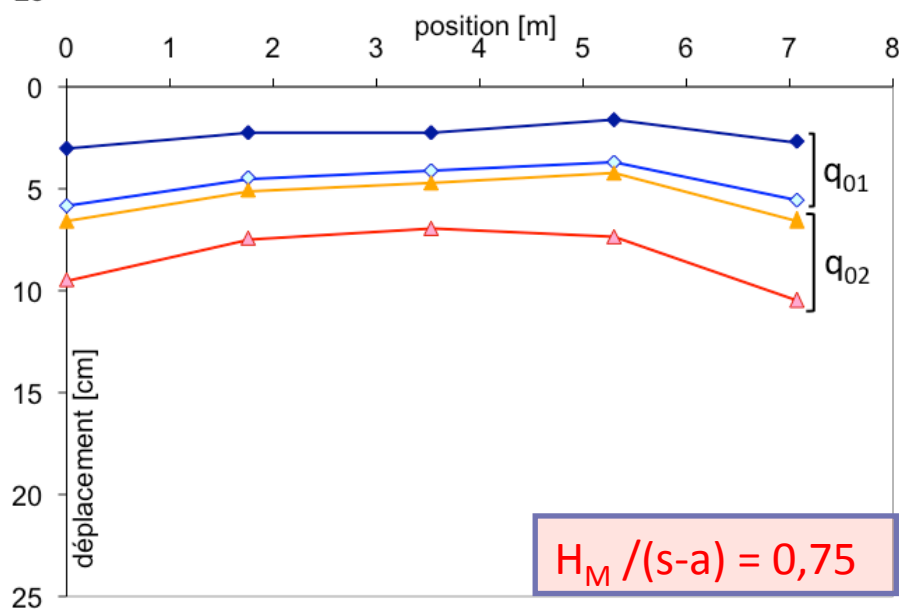
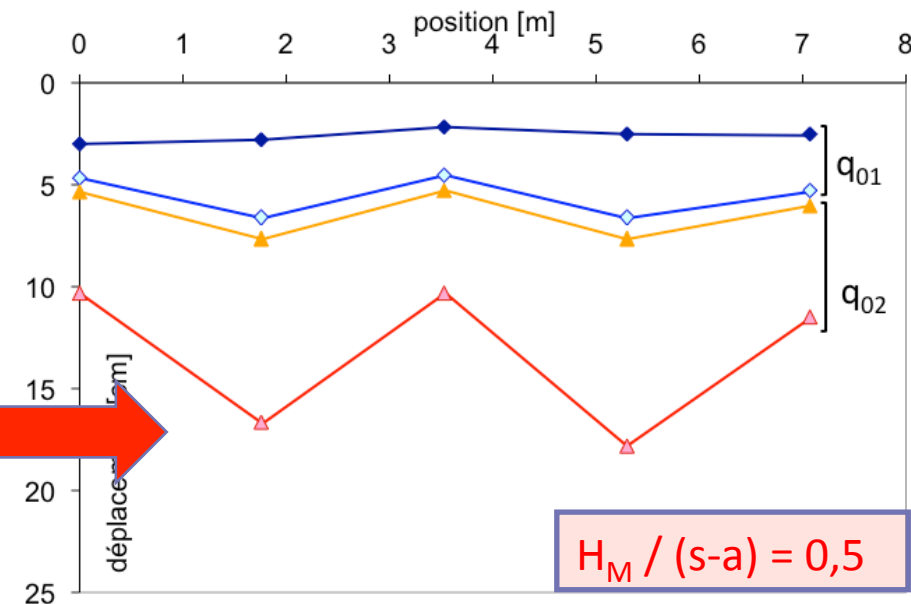
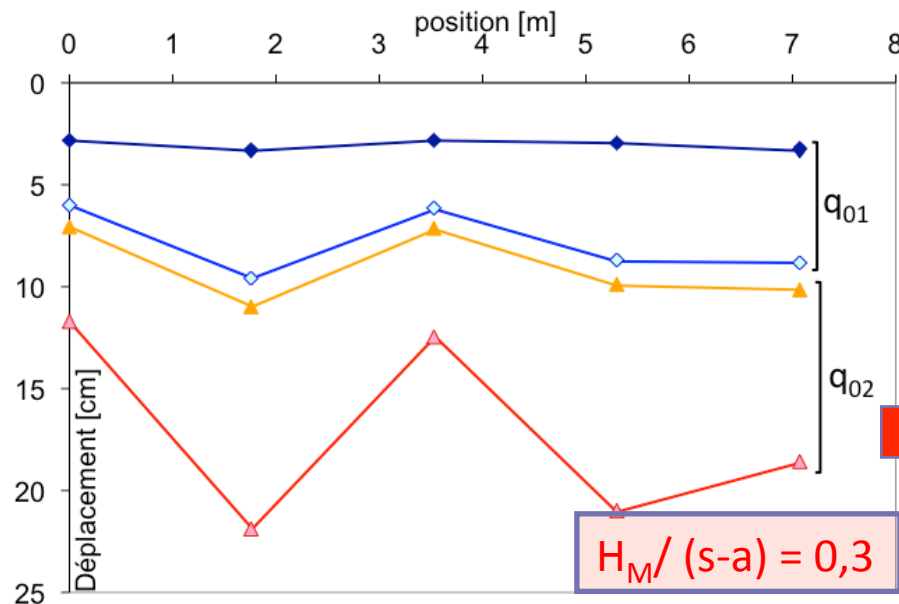
Résultats expérimentaux

- Chargement de type remblai
 - Tassements
 - Tassements différentiels
 - Efforts en tête

Chargement type remblai : Tassements différentiels



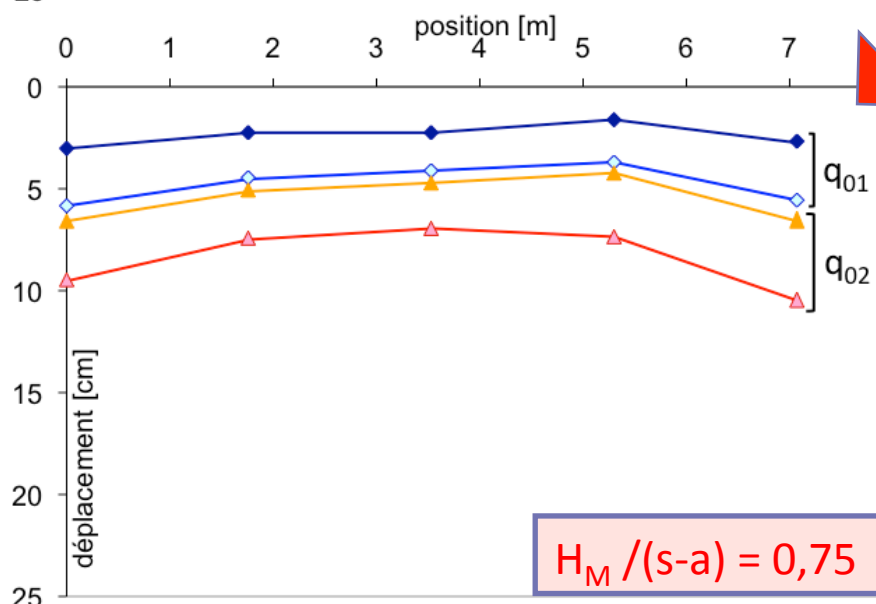
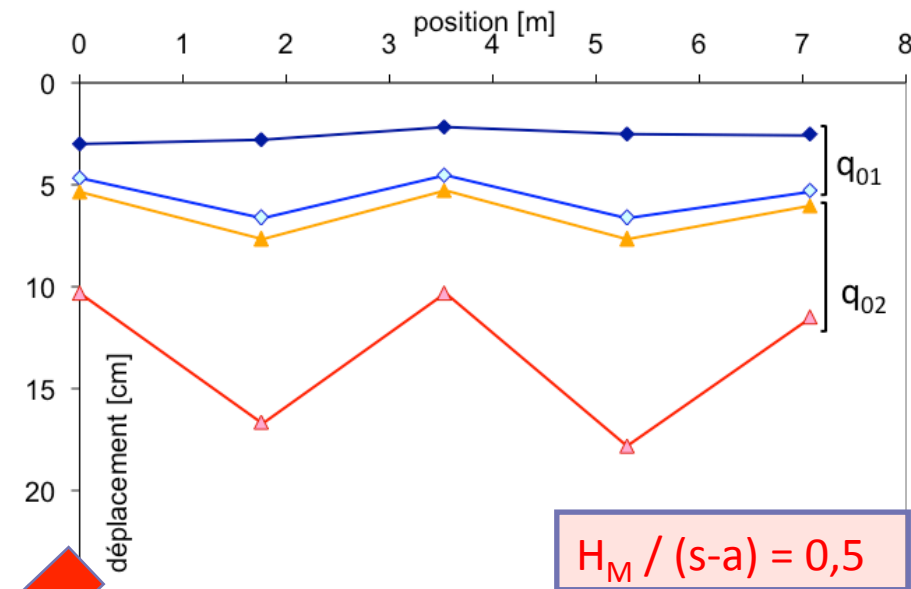
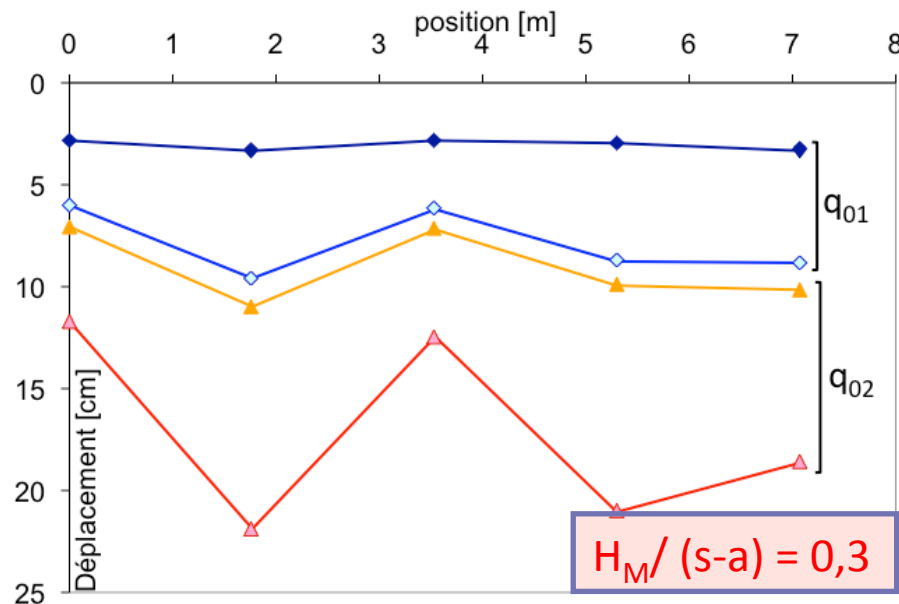
Chargement type remblai : Tassements différentiels



$$\alpha_1 = 3,14 \%$$

Deux phases d'évolution :
• Diminution des tassements

Chargement type remblai : Tassements différentiels

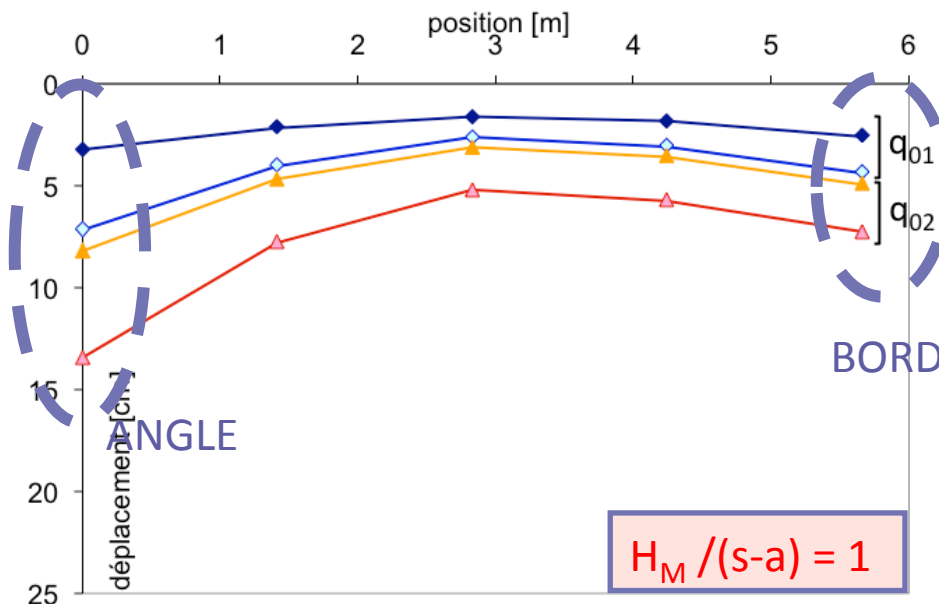
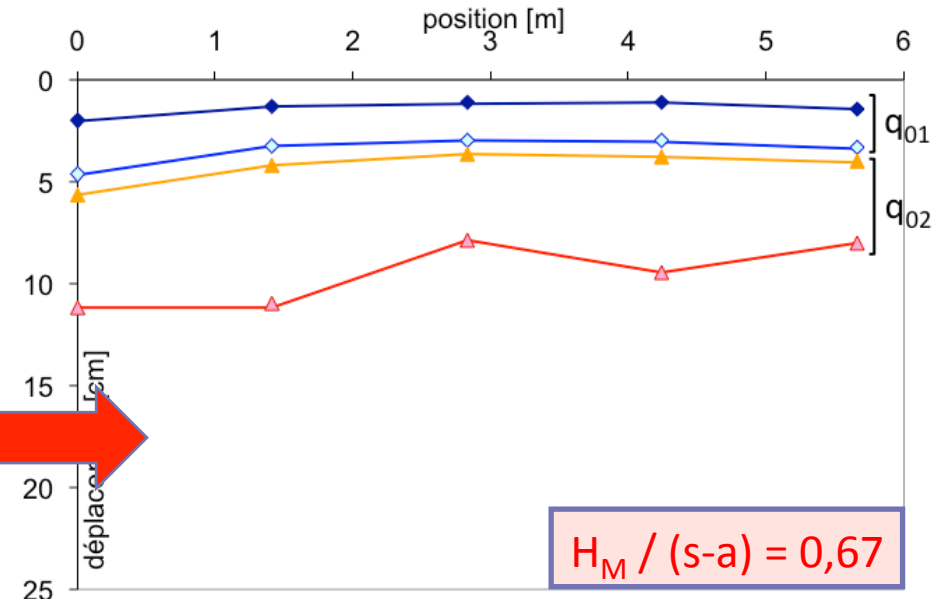
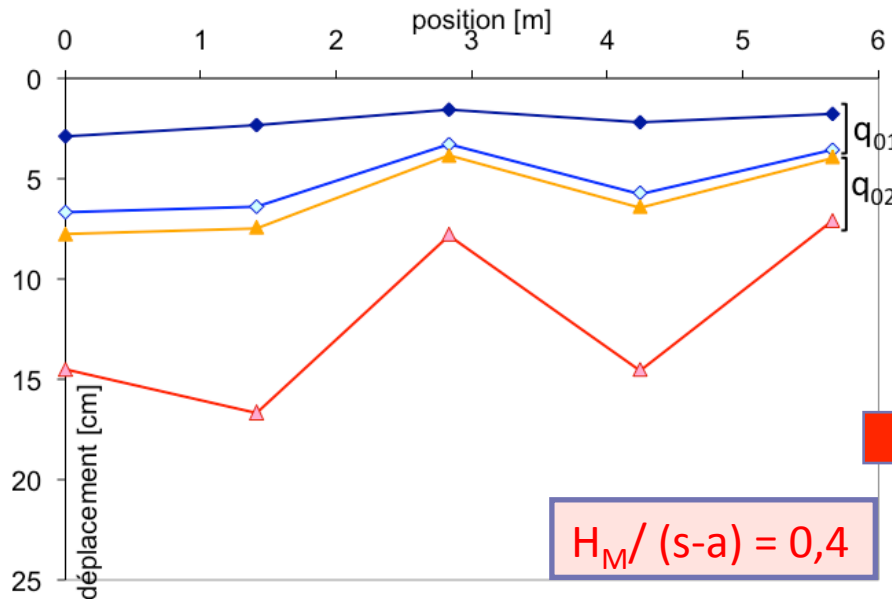


$$\alpha_1 = 3,14 \%$$

Deux phases d'évolution :

- Diminution des tassements
- Disparition des tassements différentiels en surface

Chargement type remblai : Tassements différentiels



$$\alpha_2 = 4,91 \%$$

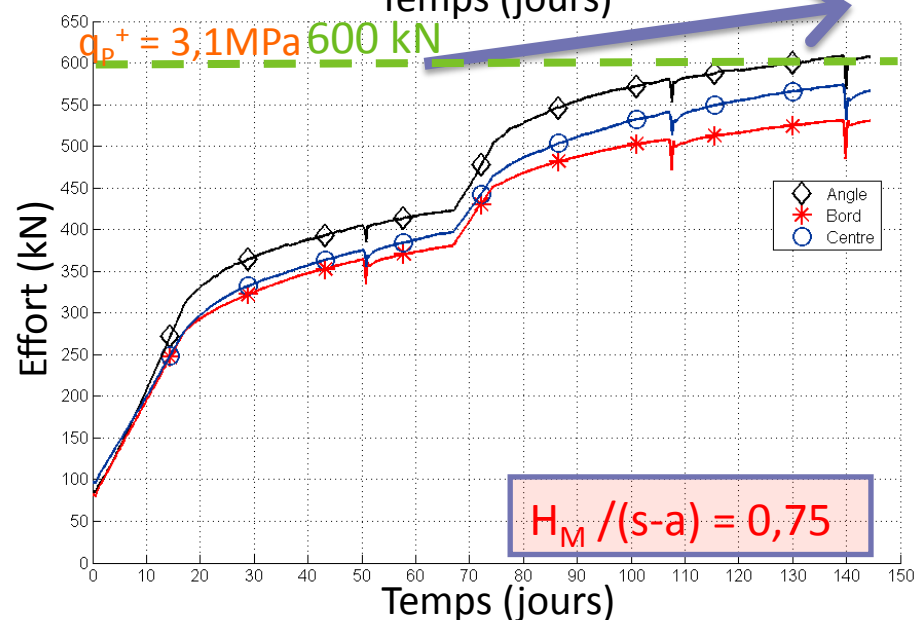
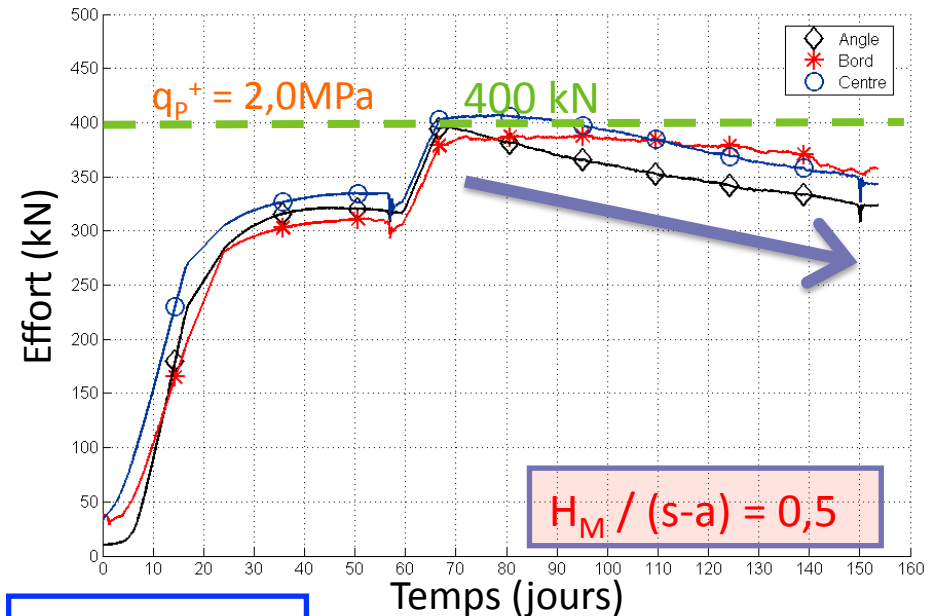
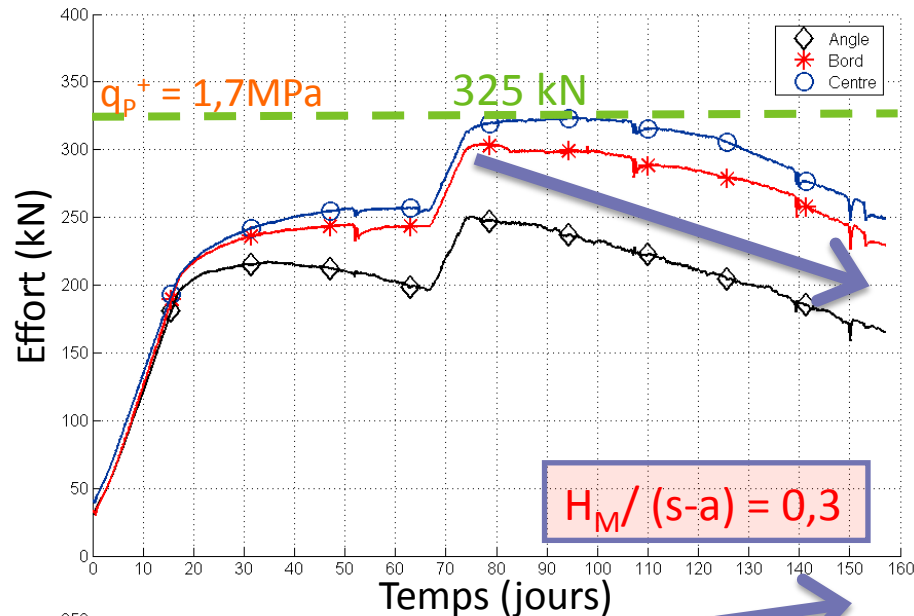
$H_M = 1\text{m}$, plus de tassements différentiels.

Au-delà, tassements périphériques.

Résultats expérimentaux

- Chargement de type remblai
 - Tassements
 - Tassements différentiels
 - Efforts en tête

Chargement type remblai : Efforts en tête

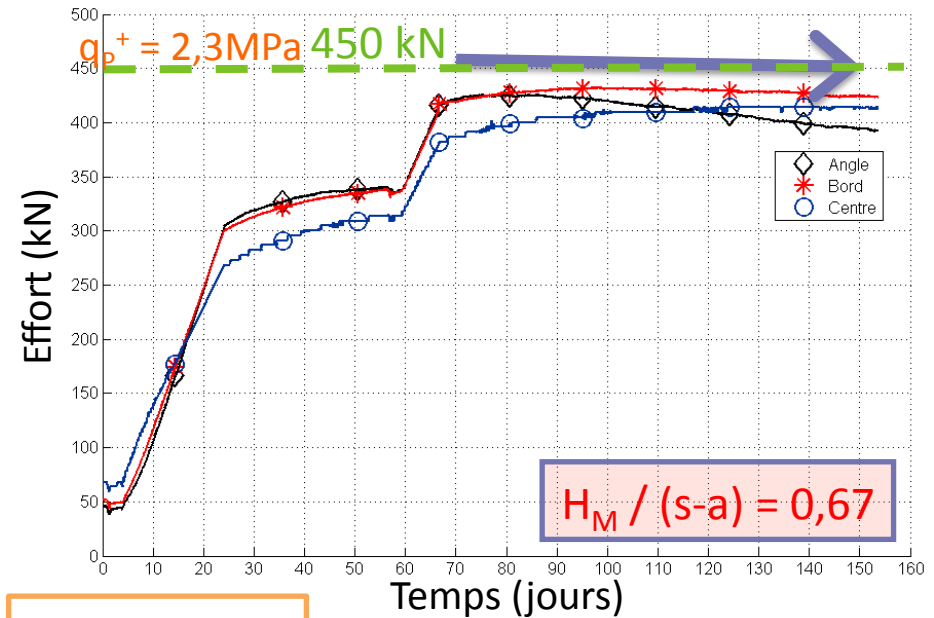
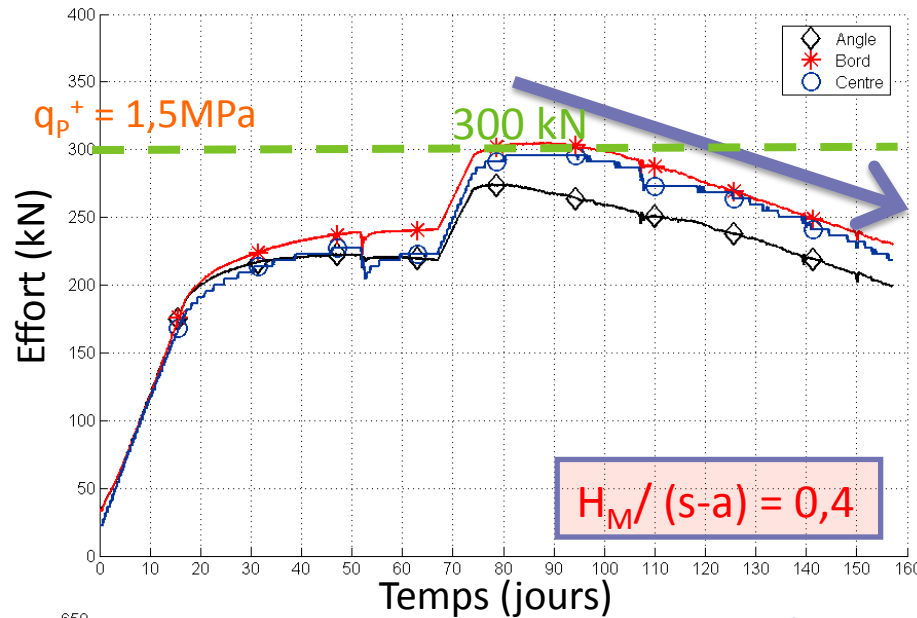


$$\alpha_1 = 3,14 \%$$

Efforts en tête d'inclusion

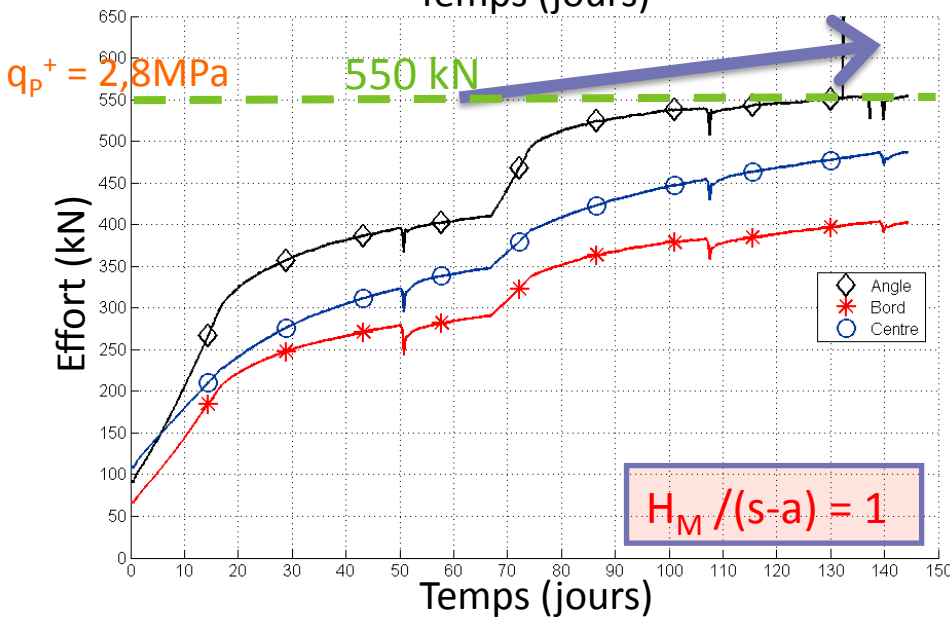
- ◇ Inclusion d'angle
- * Inclusion de bord
- Inclusion centrale

Chargement type remblai : Efforts en tête



$$\alpha_2 = 4,91 \%$$

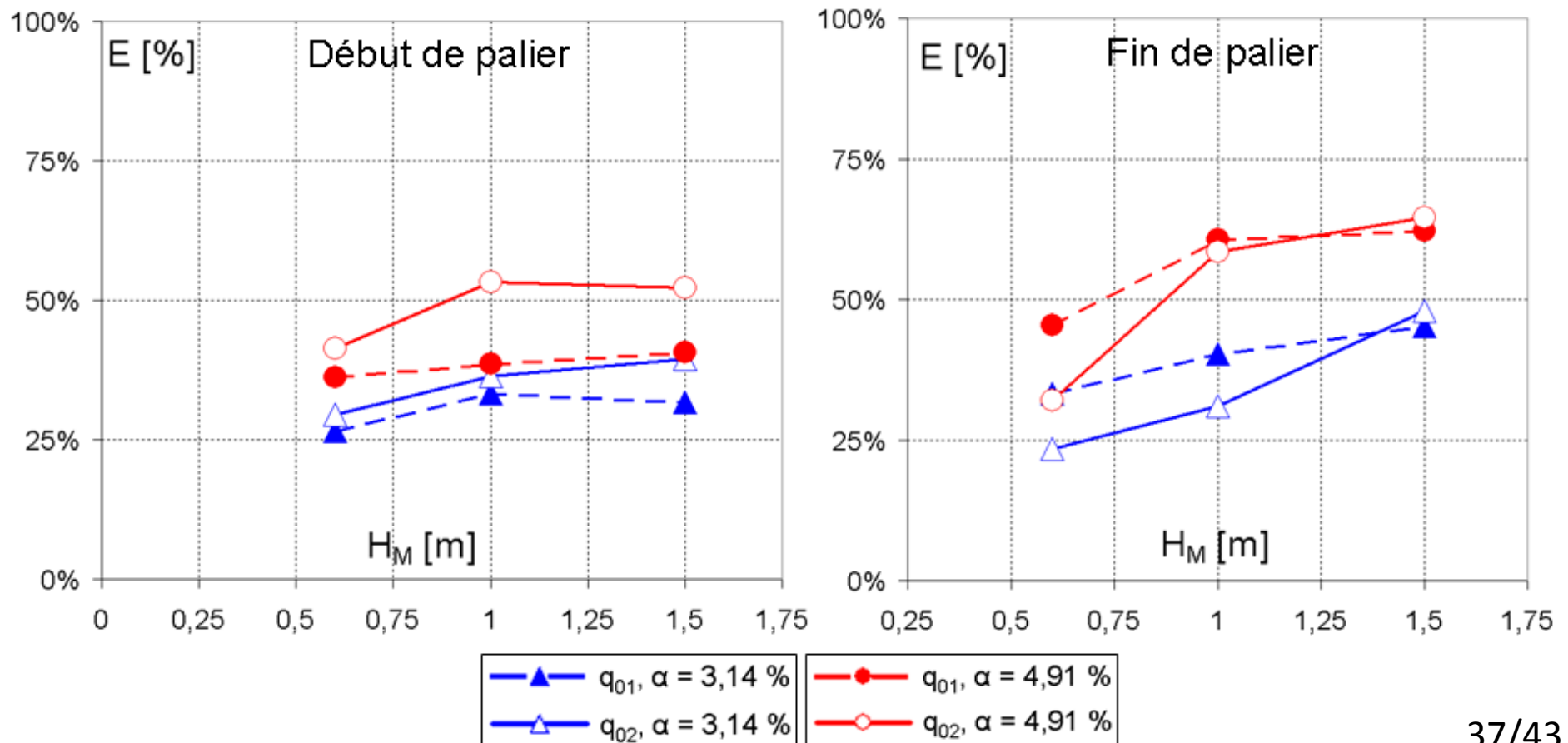
Efforts en tête d'inclusion



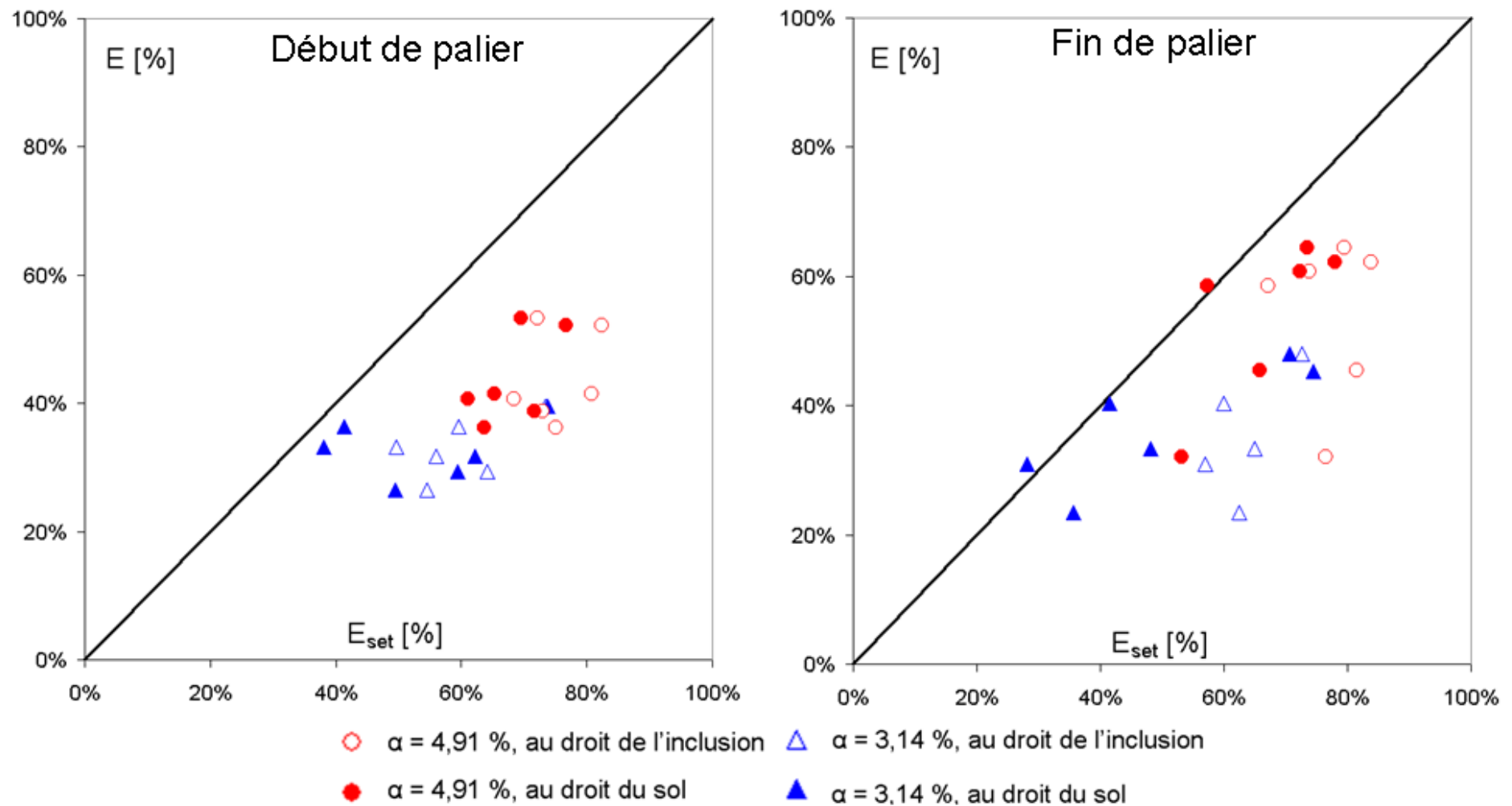
- ◇ Inclusion d'angle
- * Inclusion de bord
- Inclusion centrale

Chargement type remblai : Efficacité

$$E = \frac{Q_P^+}{Q^*} \quad \text{d'après Hewlett \& Randolph, 1988}$$



Chargement type remblai : E - Eset



Plan de la présentation

Modèle expérimental

Programme expérimental – Déroulement d'un essai

Résultats expérimentaux

Conclusion et perspectives

Conclusion

- E_{set} augmente avec l'augmentation de H_M :
pour $H_M / (s-a) = 0,75$, E_{set} atteint 70%.
- L'influence de α sur E_{set} est d'autant plus forte
que H_M est petit.
- Les tassements différentiels «disparaissent »
pour $H_M / (s-a) > 2/3$.

Conclusion

- L'efficacité augmente avec H_M jusqu'à un palier de 65% (pour $H_M / (s-a) \approx 2/3$).
- Quand α augmente de 56%, E augmente de 35%.

Perspectives

- Tester d'autres valeurs de H_M et de (s-a).
- Tester d'autres procédures de chargement.
- Changer les caractéristiques du matelas.
- Ajouter un renforcement de type géogrid.
- Compléter une base de données expérimentales pour le calage de modèles numériques développés.

Perspectives

- Modifier le dispositif pour autoriser le tassement des inclusions et leur mise en place en vol.
- Ajouter des chargements ponctuels dans le cas de simulation du dallage, semelle carrée sur 4 inclusions ou encore des chargement incliné sur semelle.
- Etudier le comportement sous sollicitations sismiques.

Sols renforcés par inclusions rigides :

Modélisation physique en centrifugeuse

de remblais et de dallage

Université de Nantes – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Gaëlle Baudouin
gaelle.baudouin@polytech.univ-bpclermont.fr

Lois de similitude

Grandeurs physiques	Facteurs d'échelle
Masse volumique	1
Longueur	$1 / N$
Déplacement	$1 / N$
Déformation	1
Contrainte	1
Vitesse	1
Accélération	N
Effort	$1 / N^2$
Temps, problèmes dynamiques	$1 / N$
Temps, problèmes de diffusion	$1 / N^2$

Liens entre les indicateurs de report de charge

Taux de réduction de contrainte : $SRR = \frac{q_S^+}{q_S^*}$

Taux de concentration de contrainte : $n = \frac{q_P^+}{q_S^+}$

$$SRR = \frac{1 - E}{1 - \alpha} \quad E = 1 - SRR(1 - \alpha) \quad n = \frac{E(1 - \alpha)}{\alpha(1 - E)}$$