

Vulnérabilité des bâtiments aux aléas affaissement et fontis : apport de modèles physiques réduits



F. EMERIAULT et M. CAUDRON



Laboratoire
Sols
Solides
Structures
Risques



LGCIE
LABORATOIRE DE GÉNIE CIVIL
& INGÉNIERIE ENVIRONNEMENTALE

CFMS – Paris, 08/12/2010

INERIS

PLAN

1. Contexte

- Mouvements de terrain
- Vulnérabilité des structures

2. Modèle physique analogique bidimensionnel

3. Modèle physique 3D

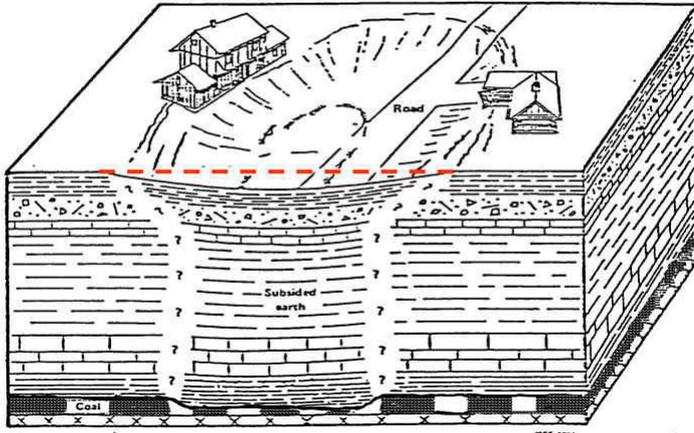
- Du prototype au modèle
- La maquette de bâtiment et l'interaction sol-structure
- Vers l'étude de solutions techniques de protection

4. Conclusions

- Complémentarité des approches
- Perspectives

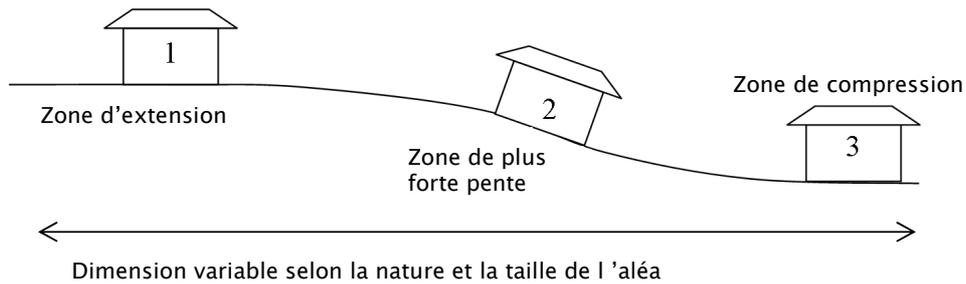
Contexte

- Vulnérabilité du bâti vis-à-vis des mouvements de terrain
 - Influence de la présence de la structure sur le MVT
 - Transmission des déformations du sol vers la structure
- Evaluation de la performance de techniques de protection

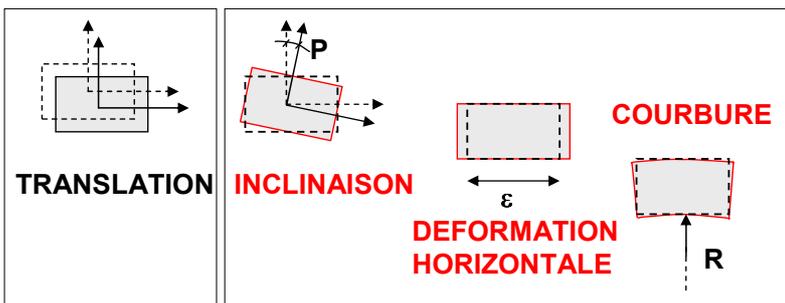


Contexte

Le sol se déforme



La structure aussi



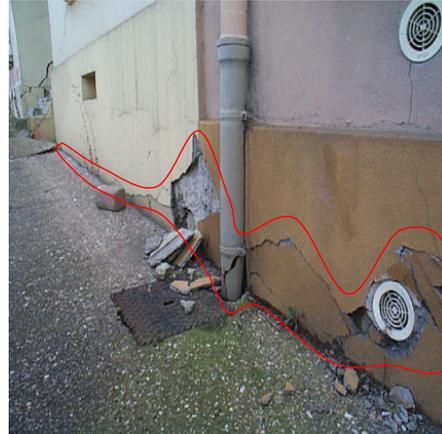
Paramètre	Ordre de grandeur
Am	mètre
ϵ	mm/m
R	km
P	%

Contexte

RUPTURE DU TERRAIN



RUPTURE DE LA STRUCTURE



Vulnérabilité : nécessité de considérer l'Interaction Sol-Structure

Comment les mouvements du terrain se transmettent-ils à la structure ?

Comment la structure modifie t'elle le mouvement de terrain (taille, masse, rigidité, système de fondation)?

Contexte

- Programme d'Appui Technique au MEDDTL (EAT-DRS-02)
- Deux axes de Recherche:
 - phénomène: Compréhension, Modélisation et Surveillance de la déformation et de la rupture des massifs rocheux
 - enjeux : Evaluation et Réduction de la Vulnérabilité des biens aux Aléas Naturels et Miniers

Moyens :

- Essais et données in-situ
- Modélisation physique à échelle réduite
 - 2D : LGCIE-INSA de Lyon
 - 3D : INERIS
- Modèles numériques

Modèle physique bidimensionnel analogique

Objectifs:

- Créer une cavité et provoquer son effondrement
- Suivre les mouvements du sol depuis la source jusqu'à la surface
- Mesurer l'impact de/sur une structure en surface
- Etudier l'effet de la position de la structure, de sa rigidité, de disposition de protection
- Manipulation aisée et répétable

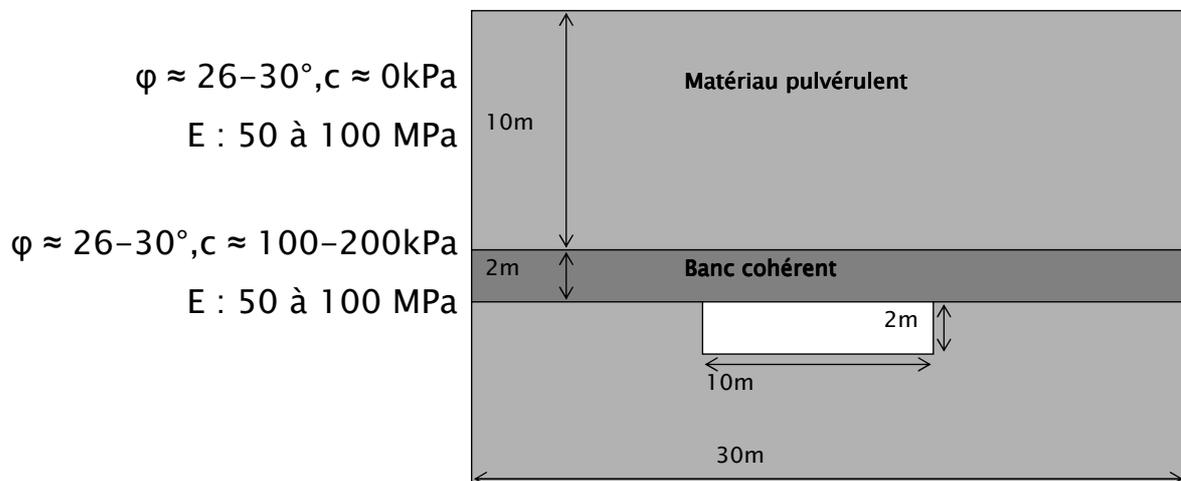
Choix:

- Matériau analogique 2D de Schneebeli
- Introduction de cohésion
- Respect des conditions de similitude
- Mesure de déplacement par corrélation d'image

7 / 39

Massif de sol et cavité

- ❑ Banc cohérent au toit de la cavité (2 m)
- ❑ Horizon de matériau pulvérulent en surface
- ❑ Rupture possible uniquement **au toit**



Echelle géométrique : 1 / 40

8 / 39

Introduction de cohésion

- ❑ Solution de colle aqueuse
- ❑ Large plage de cohésion accessible
- ❑ Utilisation – nettoyage aisé
- ❑ Essais biaxiaux – analyse par imagerie numérique
- ❑ Détermination de la concentration
- ❑ Caractéristiques à l'échelle du prototype

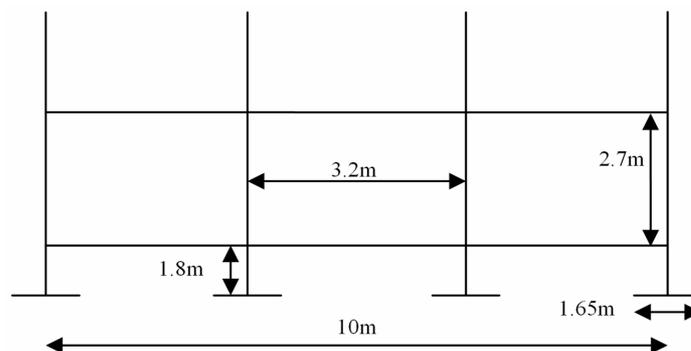


Matériau	φ (°)	c (kPa)
Pulvérulent (Schneebeli)	25-27	0
Cohérent (Schneebeli + colle C/8)	28-30	80
Cohérent (Objectif)	26-30	100-200

9 / 39

Structure de type maison individuelle

- ❑ Trois travées
- ❑ Deux niveaux
- ❑ Structure poutre-poteau en acier (comportement élastique)
- ❑ Chargement de 10 kPa/m²
- ❑ Deux modèles: acier ou PVC = différence de rigidité



Caractéristiques	Acier	PVC
Section	0,8*8 mm ²	4*6 mm ²

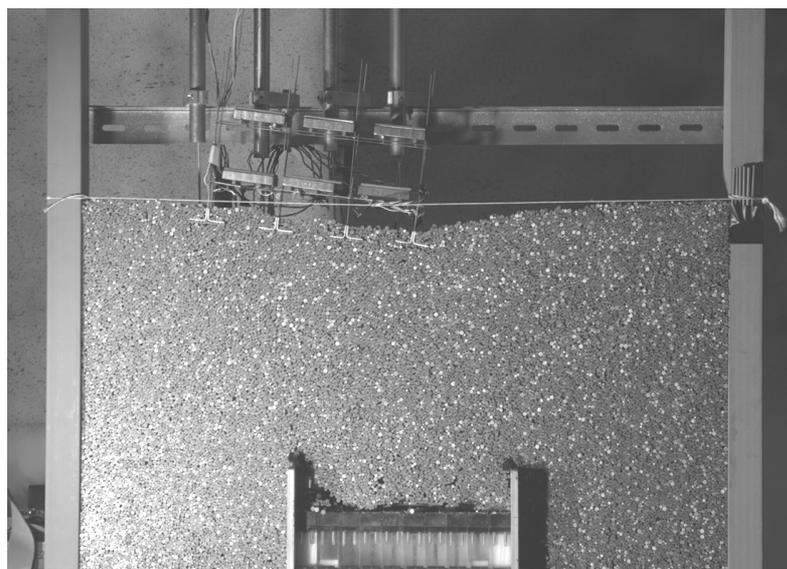
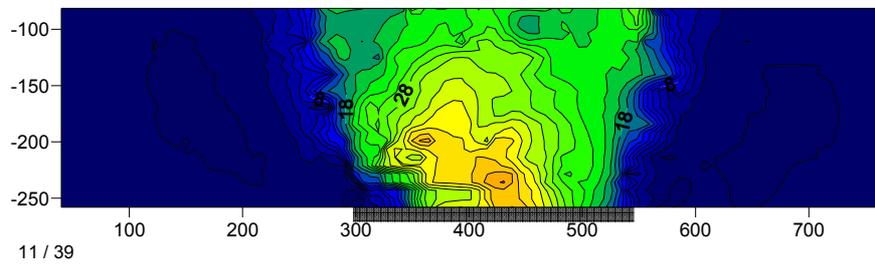
10 / 39

Dispositif

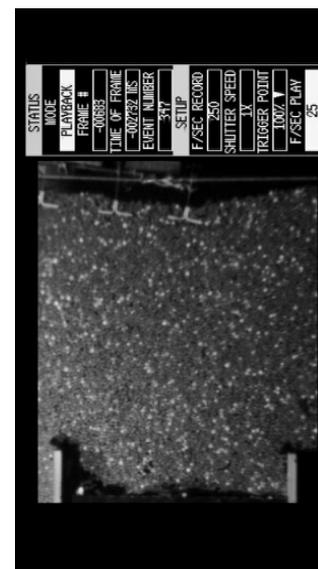
- ❑ Ouverture de la cavité en 5 étapes
- ❑ Structure instrumentée:
 - ❑ jauges de déformations
 - ❑ LVDT sur semelles



- ❑ Suivi par images numériques
- ❑ Traitement par Icasoft (LaMCoS - INSA Lyon)

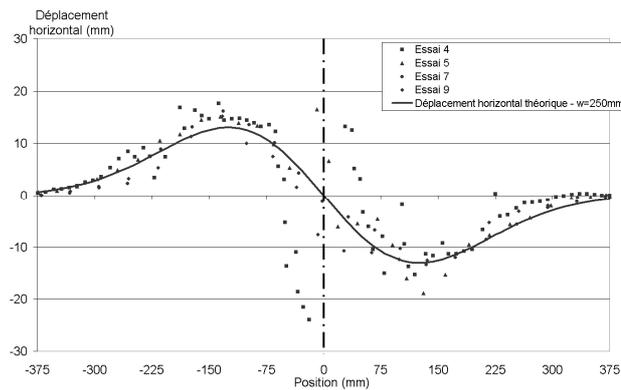


Appareil photo numérique
Suivi de l'ensemble du massif



Caméra rapide (250 images /s)
Suivi du toit de la cavité

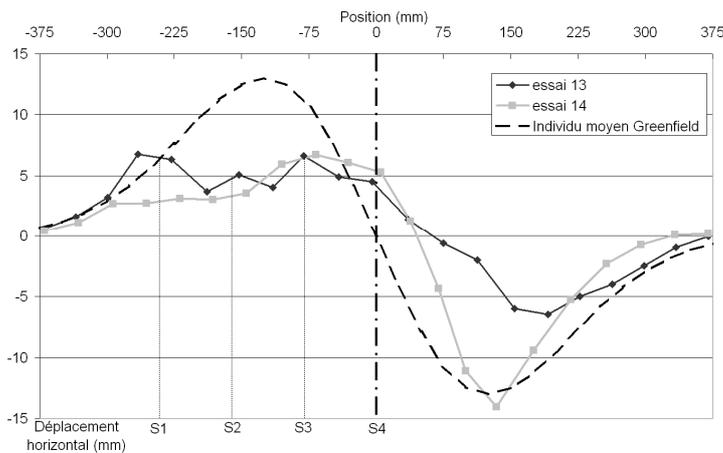
Essais en terrain vierge



- ❑ Reproduction satisfaisante du phénomène d'affaissement avec cuvette de tassement et profil de déplacement horizontal
- ❑ Une certaine variabilité des résultats (mécanismes de rupture différents – phénomène dynamique)
- ❑ Grands déplacements et rotations des grains, problèmes de convergence du logiciel de traitement d'images
- ❑ Résultats retrouvés par simulation numérique discrète (PFC^{2D})

13 / 39

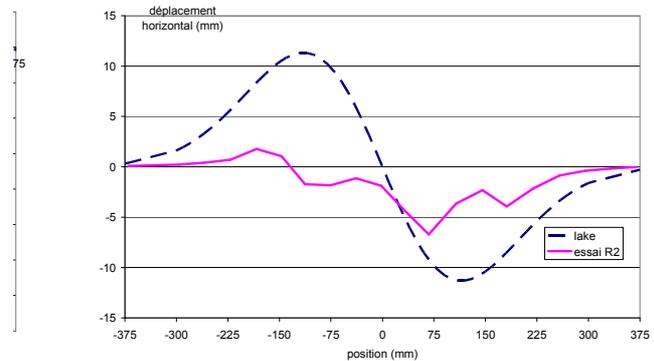
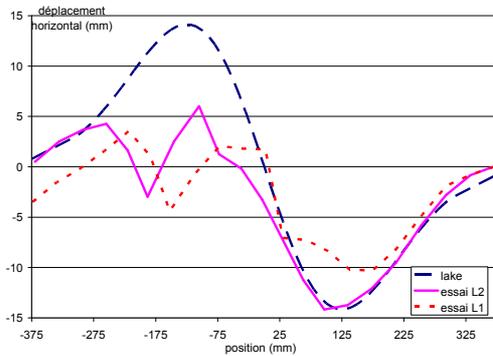
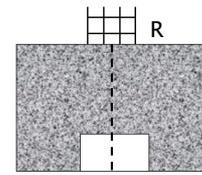
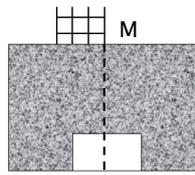
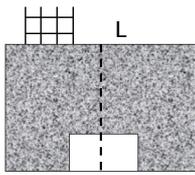
Essais avec structure



- ❑ Structure peu encastrée
- ❑ Augmentation du tassement maxi et diminution des déplacements horizontaux **Mouvement de corps rigide**
- ❑ Variabilité des résultats (mécanismes de rupture différents)
- ❑ Résultats qualitatifs retrouvés par PFC^{2D}

14 / 39

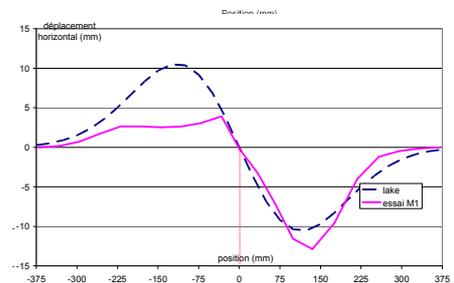
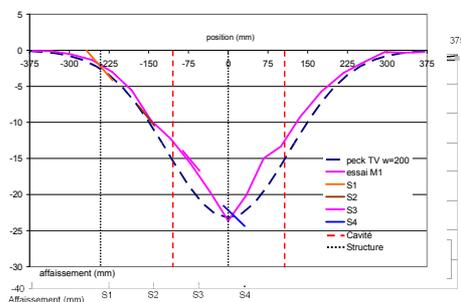
Effet de la position de la structure



- ❑ Effet marqué sur la cuvette de tassement et le profil de déplacements horizontaux

Effet de la raideur de la structure

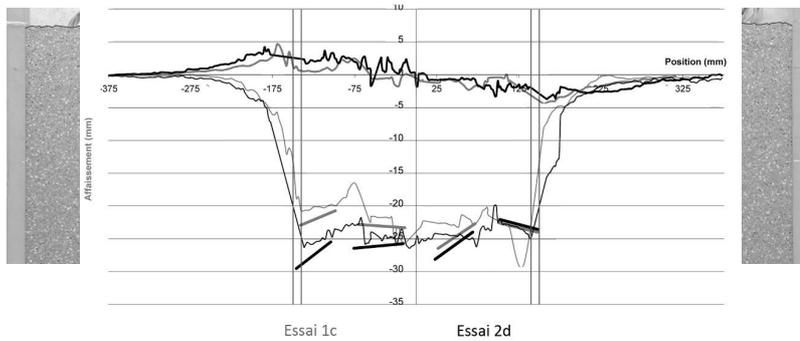
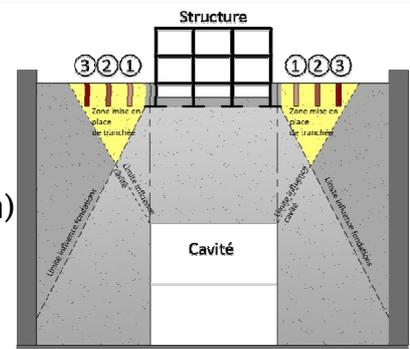
Caractéristiques	Acier	PVC
Section	0,8*8 mm ²	4*6 mm ²
Module d'Young	210 GPa	2.875 GPa
ES	2.69 MN	0.05 ES _{Acier}
EI	0.143 Nm ²	1.28 EI _{Acier}



- ❑ Peu d'effet marqué
- ❑ Différence « faible » de rigidité en flexion
- ❑ Structure peu encastree – mouvement de corps rigide
- ❑ Variabilité des résultats liée au terme source

Effet de tranchées périphériques

- ❑ Structure en position centrée (compression)
- ❑ Encastrement plus marqué
- ❑ Tranchées représentées par blocs de mousse (module faible...)



- ❑ Peu d'effet marqué
- ❑ Comportement des tranchées trop rigide

17 / 39

Conclusions

- ❑ Première approche de l'effet de mouvements de terrain sur une structure de surface
- ❑ Matériau 2D avec/sans cohésion
- ❑ Bonne reproduction du phénomène en terrain vierge
- ❑ Analyse de l'effet d'une structure (position, rigidité, mesures de protection)
- ❑ Limites de l'approche:
 - ❑ Prise en compte du terme source
 - ❑ Matériau granulaire: variabilité, convergence du traitement d'image, mesure des déformations de la structure
 - ❑ Modèle 1g: respect des lois de similitude, non linéarité des matériaux, ...

18 / 39



Modèle Physique 3D sous gravité réelle

- Du prototype au modèle
 - Objectifs
 - Hypothèses
 - Le modèle physique
- Maquette de bâtiment et l'interaction sol-structure
- Vers l'étude de solutions techniques de protection



Modèle Physique 3D

Du prototype au modèle

Objectifs:

- Représenter en surface les mouvements de terrain conséquent de différents phénomènes (affaissement, effondrement, fontis)
- Etudier le transfert des déformations du sol vers un bâtiment
- Etudier le comportement d'un bâtiment soumis à un mouvement de terrain : étudier sa vulnérabilité

On fait donc abstraction totale de la source, par exemple la cavité minière, pour ne s'intéresser qu'à la dizaine de mètres de terrain en surface.

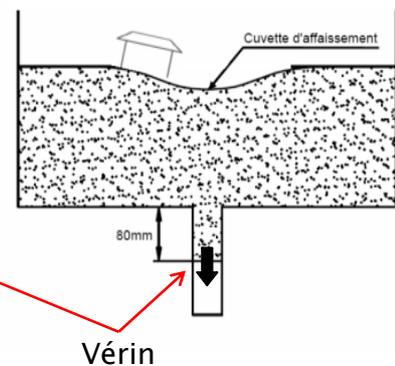
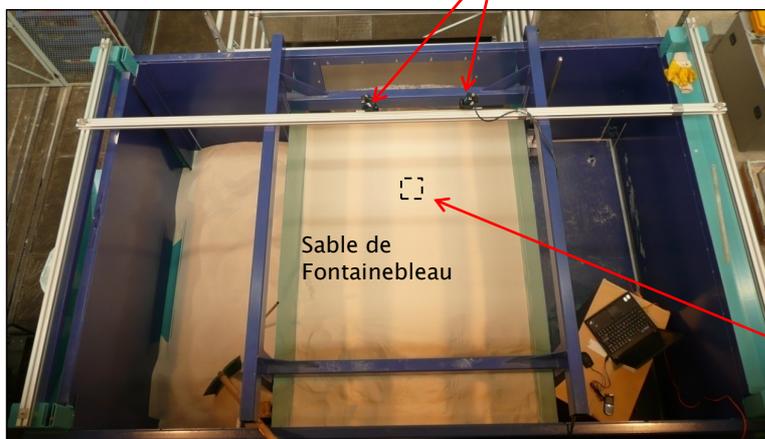
Du prototype au modèle

Principes:

- Utilisation de vérins électriques pour recréer une perturbation
- Constitution d'un massif de géomatériau d'une dizaine de mètres d'épaisseur (à pleine échelle)
- Utilisation d'un système d'instrumentation permettant de suivre l'évolution du champ de déplacements/déformations sur toute la surface du massif durant un essai

Du prototype au modèle

Caméras pour suivi optique des déformations

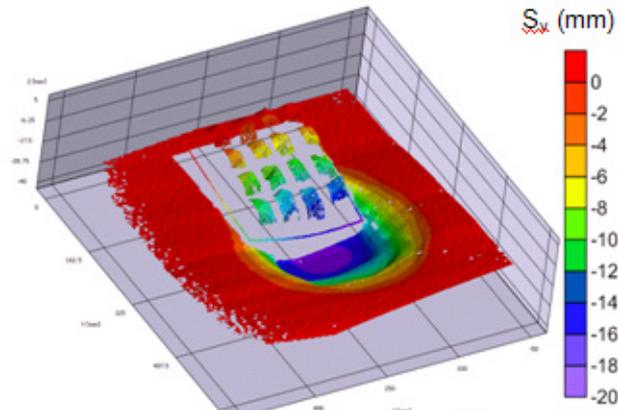
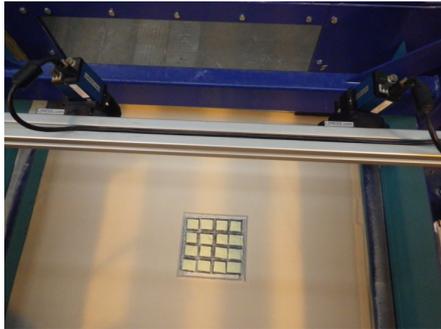
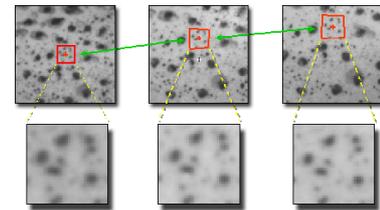


	Modèle	Prototype
Largeur (m)	2	100
Longueur (m)	3	150
Épaisseur (m)	1	50
Déplacement du vérin (m)	0.15	7,5

Facteur d'échelle géométrique maximal : 1/50

Du prototype au modèle

- ➔ **VIC3D : Corrélation d'images (DIC)** : analyse des déplacements/déformations en 2,5D
- ➔ Acquisition à 10 img/s maximum.
- ➔ Bonne précision (<0.05mm sur le sable)



Exemple de résultats obtenus: carte du déplacement vertical sur une cuvette d'affaissement

Du prototype au modèle

Besoin de connaître l'état initial du sable de Fontainebleau et les caractéristiques associées car l'état de contraintes moyen est très faible (<10kPa).

Réalisation d'essais à la boîte de cisaillement :

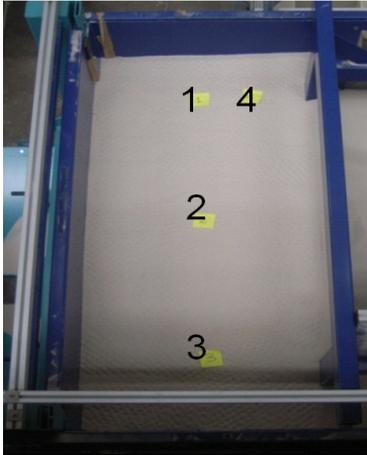
- pour une gamme de contraintes allant de 2 à 476 kPa.
- Pour trois états différents du matériau (dense, intermédiaire et lâche)

γ (KN/m ³)	σ_n (kPa)	ϕ (°)	ϕ_{cr} (°)
16.78 (Dense)	2.17 – 20.05	43	31
	2.17 – 476.05	35.7	27
15.42 (Intermédiaire)	2.17 – 20.05	37	33
	2.17 – 476.05	30.1	25
15.00 (Lâche)	2.17 – 20.05	33	33
	2.17 – 97.60	29.3	28

Modèle Physique 3D

Du prototype au modèle

Réalisation d'essais PANDA pour évaluer la variabilité des massifs de sable reconstitués.



% OPN					
	Sondage 1	Sondage 2	Sondage 3	Sondage 4	Ecart (%)
Massif 1	84,78	85,52	83,83	83,59	2,3
Massif 2	85,94	85,17	85,58	86,57	1,64
Massif 3	85,36	85,68	86,29	85,69	1,1
Ecart (%)	1,36	0,6	2,9	3,6	

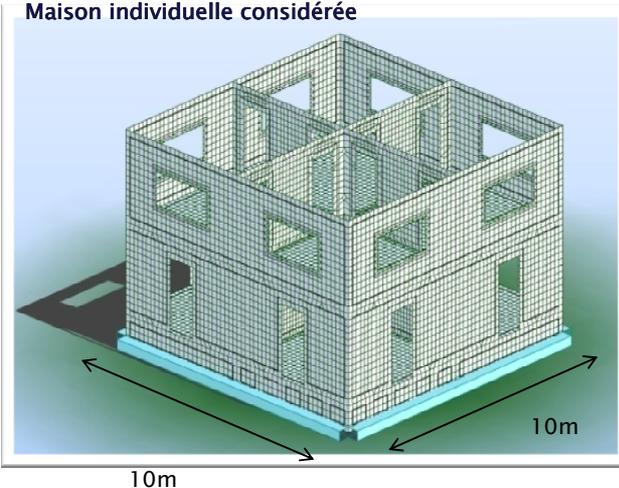
La variation existe et, compte-tenu de la mise en place manuelle, est acceptable par rapport aux autres sources d'erreurs actuelles.

25 / 39

Modèle Physique 3D

Maquette de structure

Maison individuelle considérée



Modèle réduit

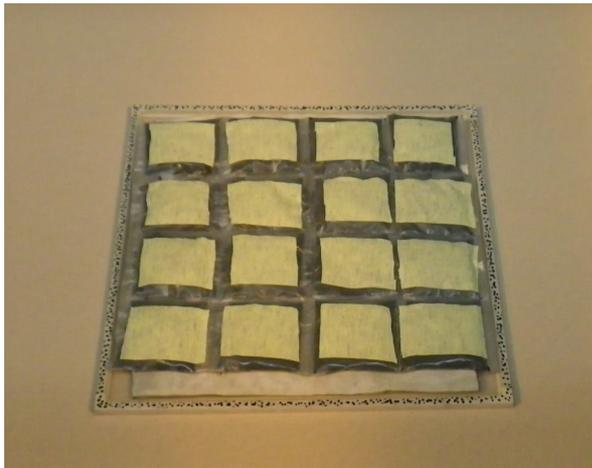
- Etape 1: simplification
Etape 2: assouplissement
Etape 3: transformation

Inspirée par le ReX de constructions endommagées lors d'affaissements miniers (bassin ferrifère lorrain par exemple)

26 / 39

Modèle Physique 3D

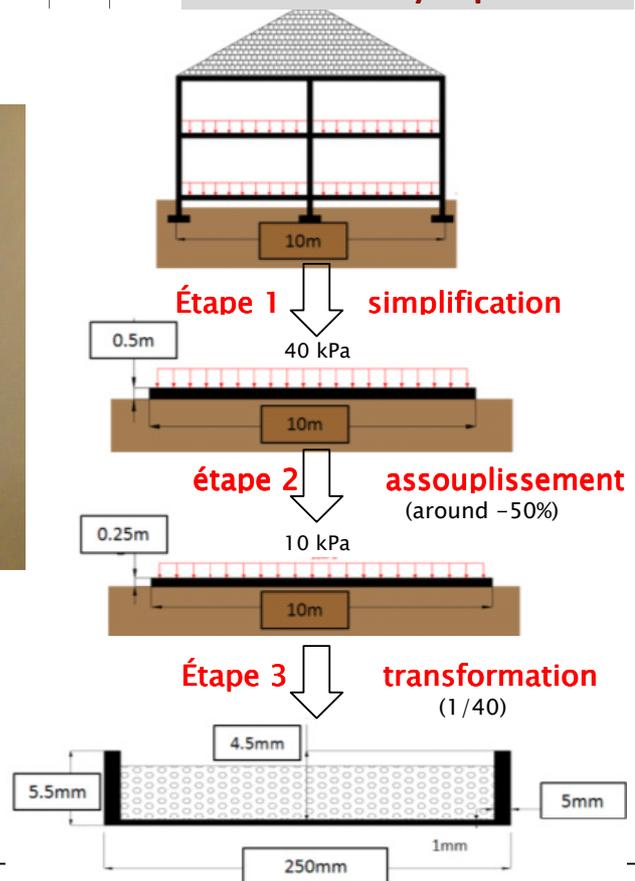
Maquette de structure



La maquette est constituée d'un chassis en polycarbonate et de surcharges (sacs de billes de plomb)

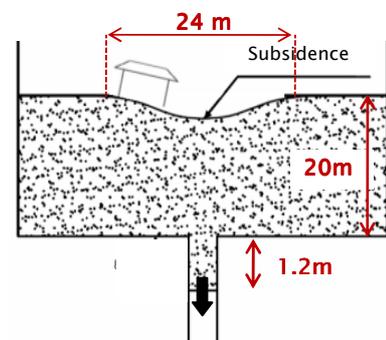
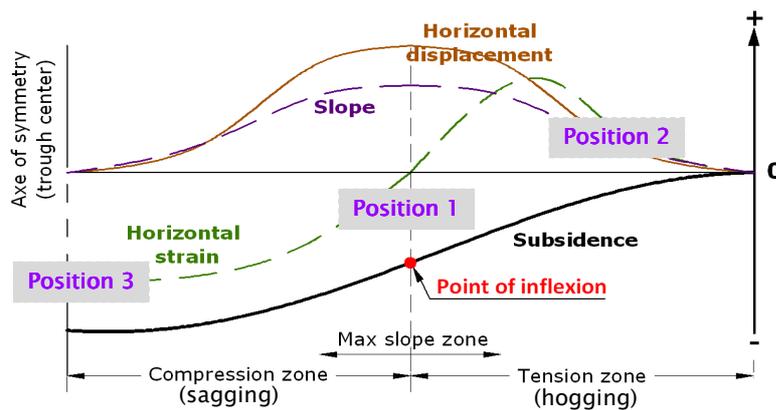
Le suivi des déplacements/déformations se fait par VIC3D sur les quatre bords de la plaque.

27 / 39

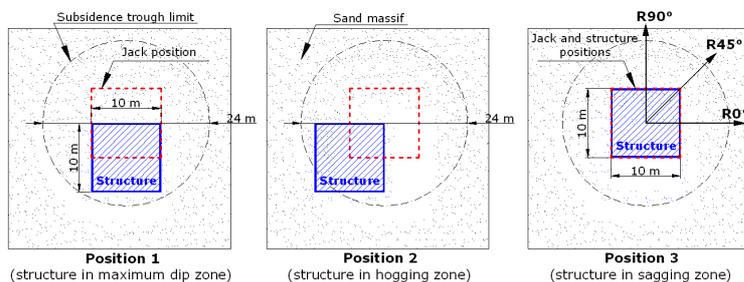


Modèle Physique 3D

Résultats - ISS



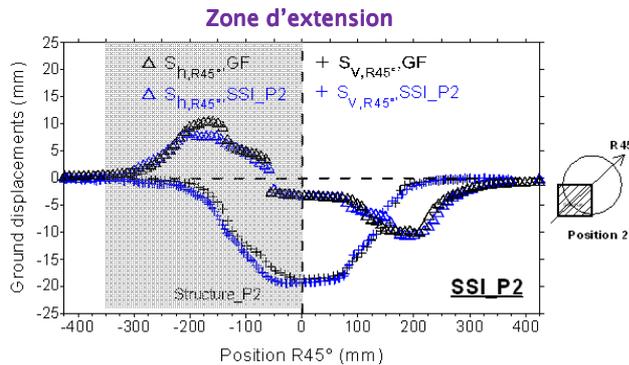
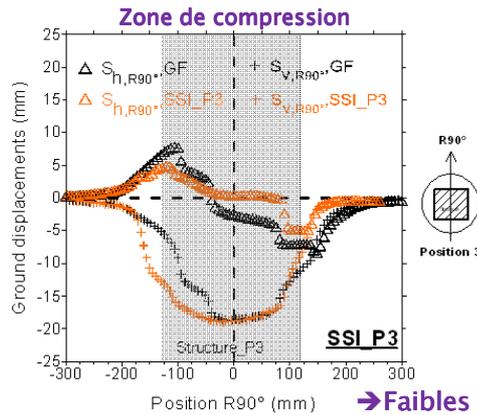
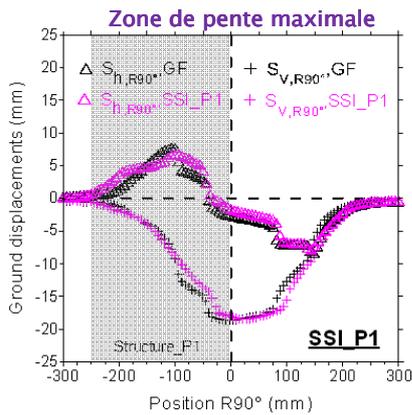
Caractéristiques (échelle prototype)



28 / 39

Trois positions pour la structure (échelle prototype)

Résultats – ISS



→ Faibles modifications de la cuvette d'affaissement

→ Modifications fonction de la position

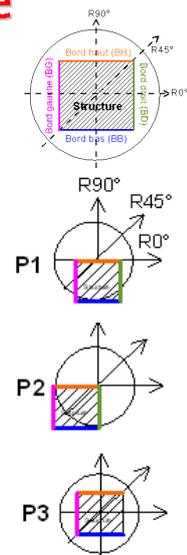
→ Interaction plus importante en zone de compression que pour les deux autres

Transfert des déformations vers la structure

Direction R90° (Left edge for P1 & P3; right edge for P2)						
	Position 1		Position 2		Position 3	
Paramètres	GF	Structure	GF	Structure	GF	Structure
$S_{v,max}$ (m)	-0,75	-0,72	-0,75	-0,53	-0,75	-0,76
α (%)	8,81	9,10	6,74	6,60	0	2,30
$S_{h,max}$ (m)	0,31	0,24	0,32	0,12	0	0,09
$\epsilon_{h,moy}$ (%)	-3,4	-0,23	-2,4	-0,16	-6,7	-0,12

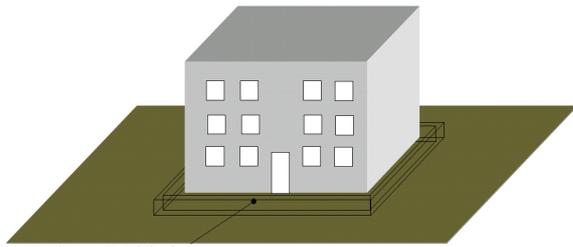
Direction R90° (Left edge for P1 & P3; right edge for P2)						
	Position 1		Position 2		Position 3	
Paramètres	Sol	Structure	Sol	Structure	Sol	Structure
$S_{v,max}$ (m)	-0,74	-0,72	-0,78	-0,53	-0,75	-0,76
α (%)	8,90	9,10	8,50	6,60	0,50	2,30
$S_{h,max}$ (m)	0,34	0,24	0,34	0,12	0,20	0,09
$\epsilon_{h,moy}$ (%)	-3	-0,23	-2,3	-0,16	-2,59	-0,12

$S_{v,max}$, α , $S_{h,max}$ et $\epsilon_{h,moy}$ sont respectivement la déplacement vertical maximal, la pente moyenne, le déplacement maximal horizontal et la déformation horizontale moyenne.

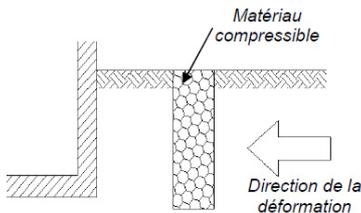


- Influence importante de la position sur les déformations subies
- La déformation horizontale dans la structure est majoritairement de la compression, même si de la traction peut être observée
- Les sollicitations les plus importantes sont pour la position au niveau de la pente maximale
- Faible transmission de la déformation horizontale (structure trop rigide et manque de fondations)

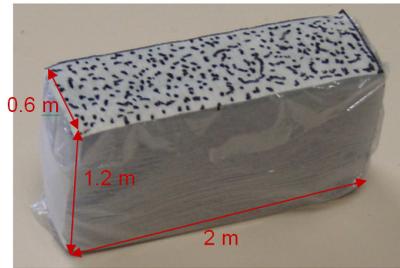
Travail en cours - Tranchée périphérique



Tranchée périphérique en mousse à 1,4m du bâti

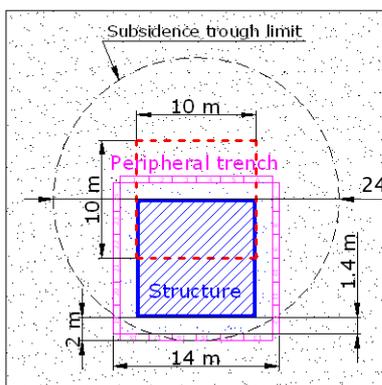


- la raideur de la tranchée périphérique doit être inférieure à celle du sol encaissant ($\sim 14.5 \text{ kPa} \ll 0.6 \text{ MPa}$ à 4 MPa)
- Suivi de la déformation sur la face supérieure par les caméras
- installation reproductible mais délicate

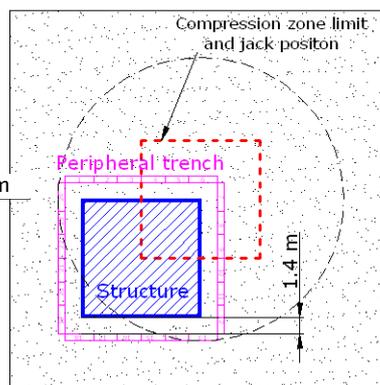


Bloc typique utilisé pour réaliser la tranchée périphérique (dimensions à l'échelle prototype)

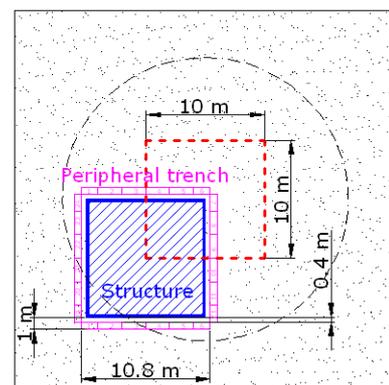
Travail en cours - Tranchée périphérique



Peripheral trench at 1.4 m from structure_P1 (structure in max dip zone)



Peripheral trench at 1.4 m from structure_P2 (structure in hogging zone)



Peripheral trench at 0.4 m from structure_P2 (structure in hogging zone)

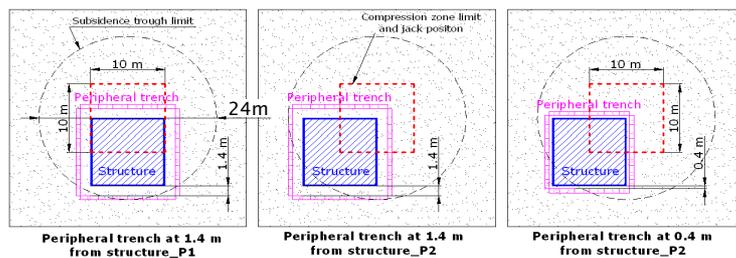
Objectifs :

- ➔ Influence de la position de la structure sur la performance de la tranchée
- ➔ Influence de la distance entre la tranchée et la structure sur la performance

La performance peut être évaluée selon l'influence sur:

1. les déformations horizontales du sol de fondation
2. les déformations de la structure

Travail en cours – Tranchée périphérique



Déformation horizontale moyenne du sol et de la structure

		Position 1	Position 2			
		TP1.4	TP1.4		TP0.4	
		Côté haut	Côté haut	Côté droit	Côté haut	Côté droit
$\varepsilon_{h,moy}^s$ (%)	Sans TP	-0,21	-0,26	-0,16	-0,26	-0,16
	Avec TP	-0,13	-0,18	-0,06	-0,20	-0,09

→ La tranchée périphérique tend à réduire les déformations qui apparaissent dans la structure: de **40% à 60%** de réduction avec la tranchée à 1.4 m (P1 et P2), et **45%** de baisse pour la tranchée à 0,4m.

→ Les résultats correspondent à ceux obtenus par Peng (1996)

→ Une tranchée plus éloignée semble plus efficace, mais quid d'un effet seuil???

→ Besoin de préciser par ailleurs l'influence de la tranchée sur le sol (sans bâti) et l'importance de la profondeur de la tranchée.

33 / 39

2.2. Comparative test with centrifuge physical model

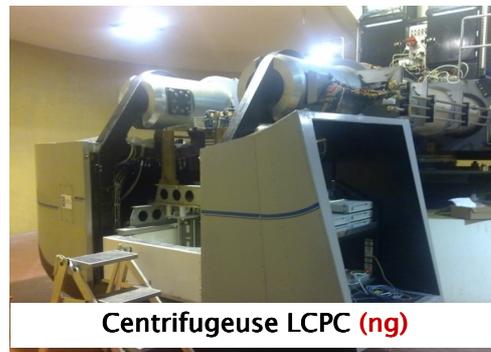
Travail en cours – Essais en centrifugeuse

Objectifs :

- Reproduire différents essais avec un meilleur respect des conditions de similitudes : résultats quantitatifs
- Vrai champs de contraintes – les raideurs (sable et bâti) sont plus aisément connues et gérables
- Comparer avec les essais 1g, évaluer l'influence de cette condition sur les résultats obtenus



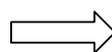
Modèle physique INERIS (1g)



Centrifugeuse LCPC (ng)

1) Corrélation d'images par VIC3D

2) Simulation d'un affaissement

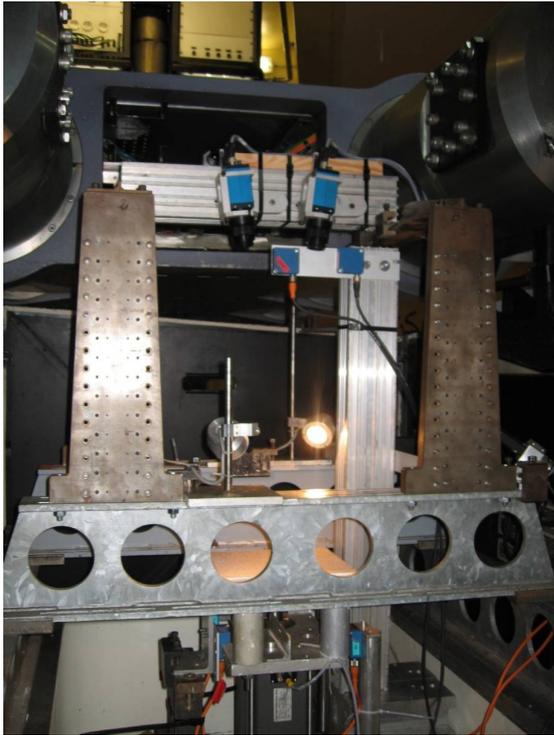


Quelles adaptations pour un fonctionnement à 40g et 60g?

34 / 39

Modèle Physique 3D

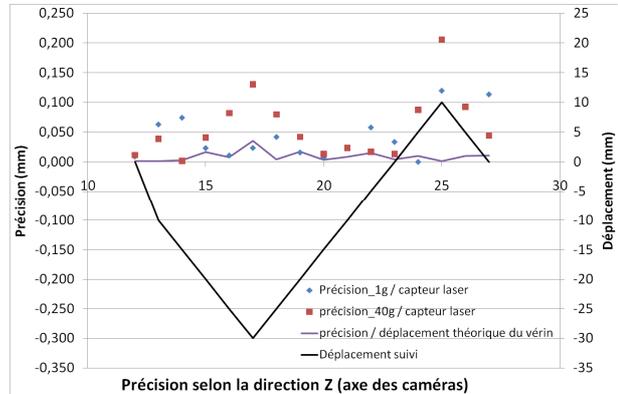
Travail en cours – Essais en centrifugeuse



→ Les caméras tiennent 60g! (dans l'axe)

Mais :

- déformations du bâti support
- faible influence sur la précision

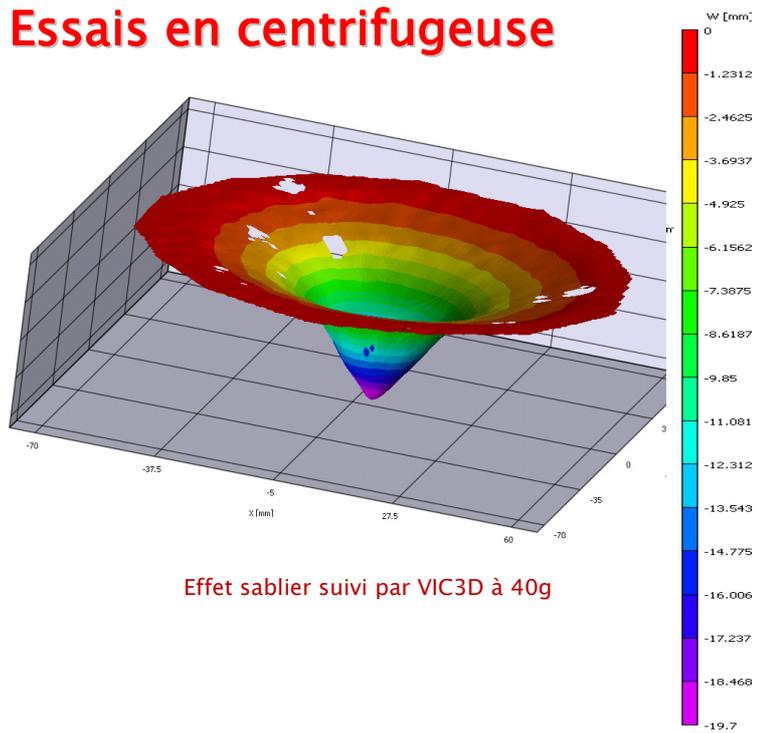
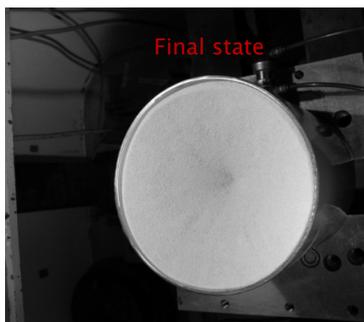
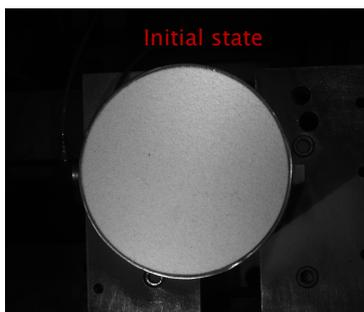


→ La référence est elle aussi perturbée par le fonctionnement en macrogravité (déformation du support) et ne permet pas pour l'instant une évaluation plus précise.

35 / 39

Modèle Physique 3D

Travail en cours – Essais en centrifugeuse



Effet sablier suivi par VIC3D à 40g

36 / 39



Conclusions

- Deux modèles physiques complémentaires : 2D et 3D
- Différents avantages, inconvénients et contraintes d'utilisations

2D (1g) :

- Cohésion du matériau
- Mouvements dans le recouvrement
- Règles de similitudes « simplifiées »

3D (1g):

- Champs de déformations en surface
- Matériau plus proche de la réalité
- Différentes formes de cuvettes d'affaissement/effondrement
- Plus lourd à mettre en œuvre

Mais la gravité réelle rend complexe la mise à l'échelle des structures



Conclusions – Perspectives

- Intérêt de réaliser des essais en centrifugeuse
- Mise au point d'une maquette de structure plus proche de la réalité : 3D + fondations
- « Couplage » avec des modèles numériques pour s'affranchir des différentes contraintes
- Corroborer certains résultats issus de modèles numériques par des essais en modèle physique

Des outils bien adaptés à l'étude de la vulnérabilité des structures soumises à un mouvement de terrain, complémentaires à l'observation in-situ et à la modélisation numérique.



Merci pour votre attention.



Laboratoire
Sols
Solides
Structures
Risques



LGCIE
LABORATOIRE DE GÉNIE CIVIL
& INGÉNIERIE ENVIRONNEMENTALE

INERIS