

# Amélioration et renforcement des sols

## Le projet national ASIRI+

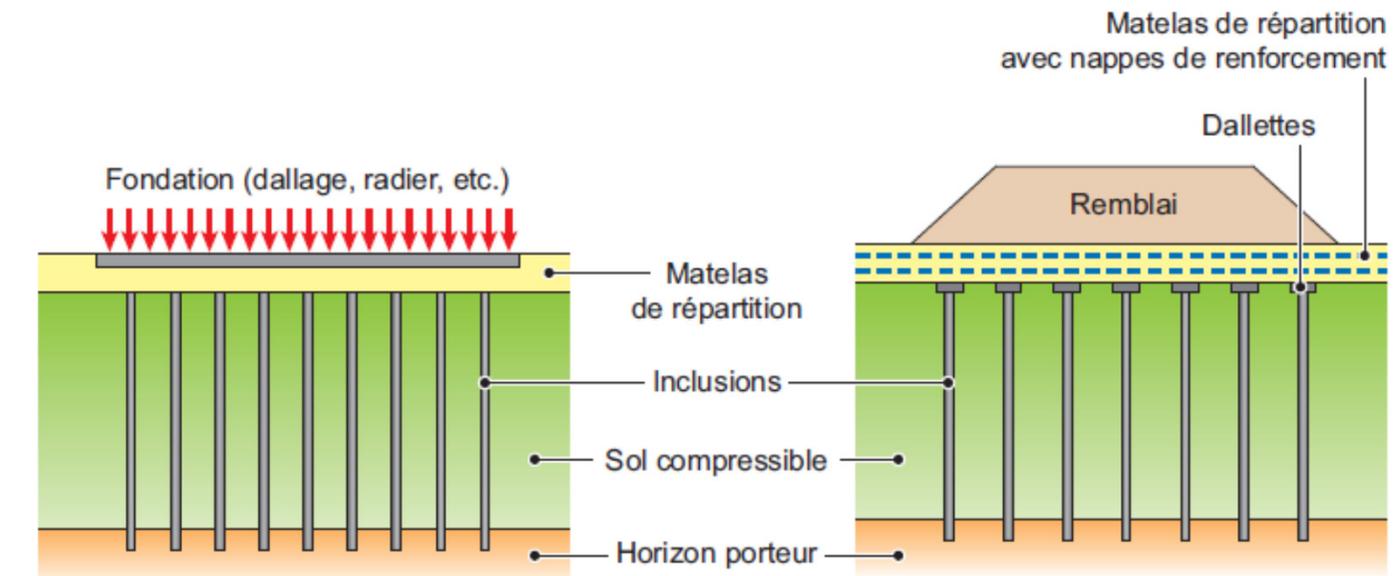
Bruno SIMON – Terrasol



26 AVRIL 2018



# Renforcement par inclusions rigides



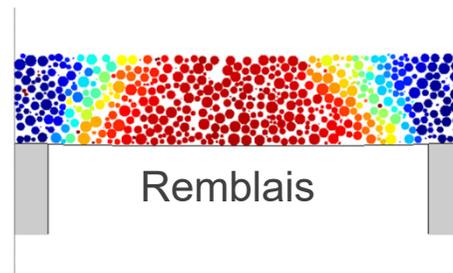
26 AVRIL 2018



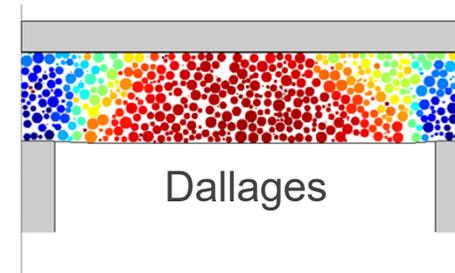
CFMS

# Le Projet national ASIRI (2005 – 2011)

› Accent mis sur sollicitations **verticales, statiques** et **uniformes**



Remblais



Dallages

# Evaluation des Recommandations (2016)

## › Enquête IREX

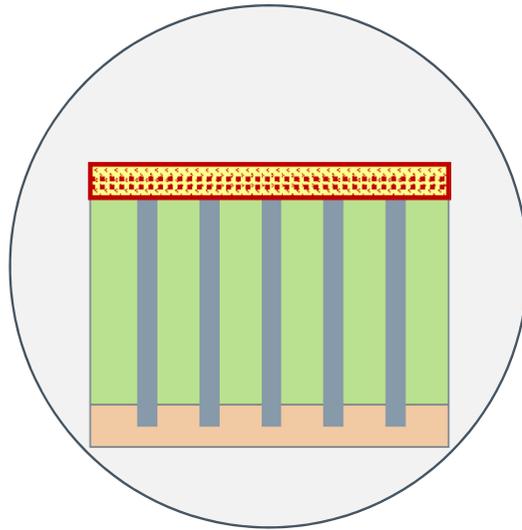
- 88 réponses
- Recommandations
  - › Connues de 90 %
  - › Utilisées par 85 %
- 44 organismes prêts pour une suite

## › Journée CFMS (21/09/2016)

- 170 participants
- Etat de la pratique
- Recensement des besoins
- Table ronde

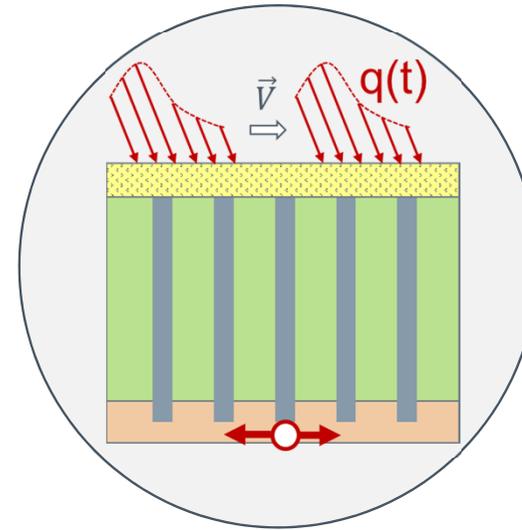
- 
- Développer la **composition du matelas** de répartition
  - **Élargir** le champ des ouvrages et des chargements

# Sujets nécessitant de nouvelles recherches



## Matelas de répartition

- Renforcement
- Matériau constitutif
- Epaisseur



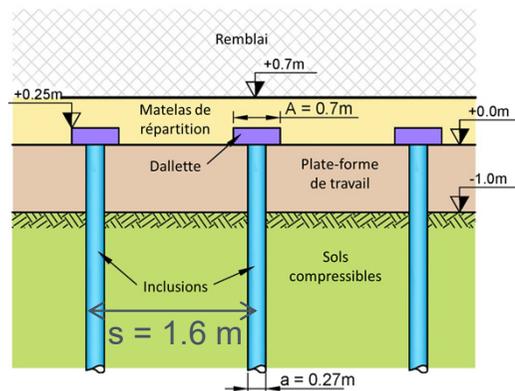
## Sollicitations complexes

- Inclinaées ou non uniformes
- Permanentes ou variables
- Fixes ou mobiles
- Sismiques

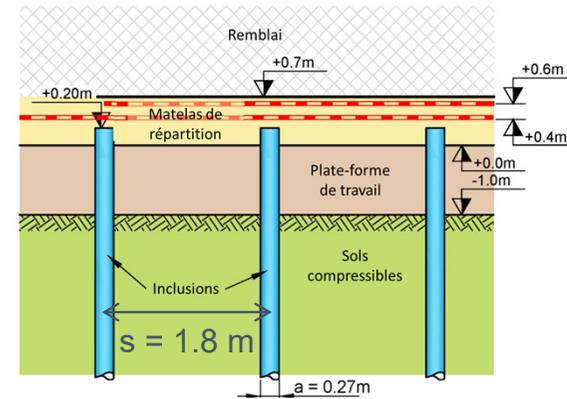
# Matelas de répartition (1)

## › Renforcement par nappes géosynthétiques

Exemple de la traversée des marais de la Virvée (LGV SEA - 2012)



Solution de base



Variante

Variante validée par un plot expérimental + dimensionnement spécifique

Variante a permis d'augmenter la dimension des mailles

➔ gain 28 % sur linéaire des inclusions rigides

# Matelas de répartition (2)

## › Matériau constitutif

En général, un matériau granulaire est utilisé comme constituant du matelas de répartition

MAIS

Problèmes d'approvisionnement  
dans certaines régions

➔ Traitement du sol en place



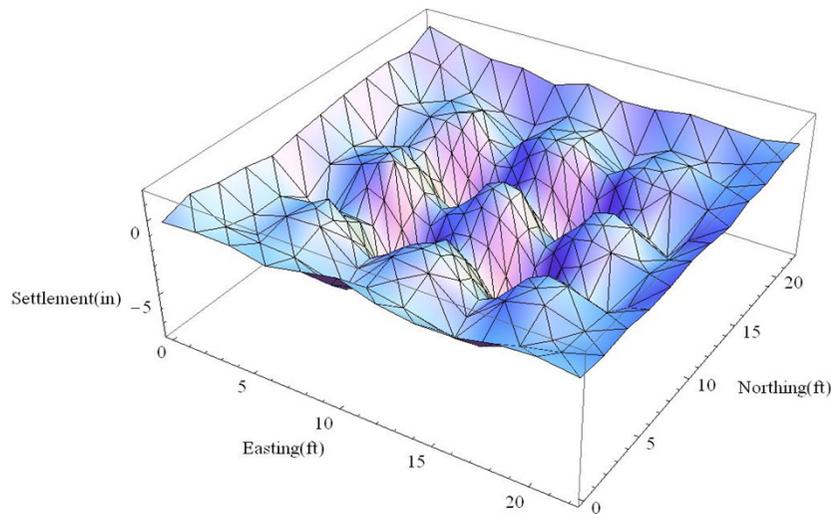
Solution respectueuse de l'environnement



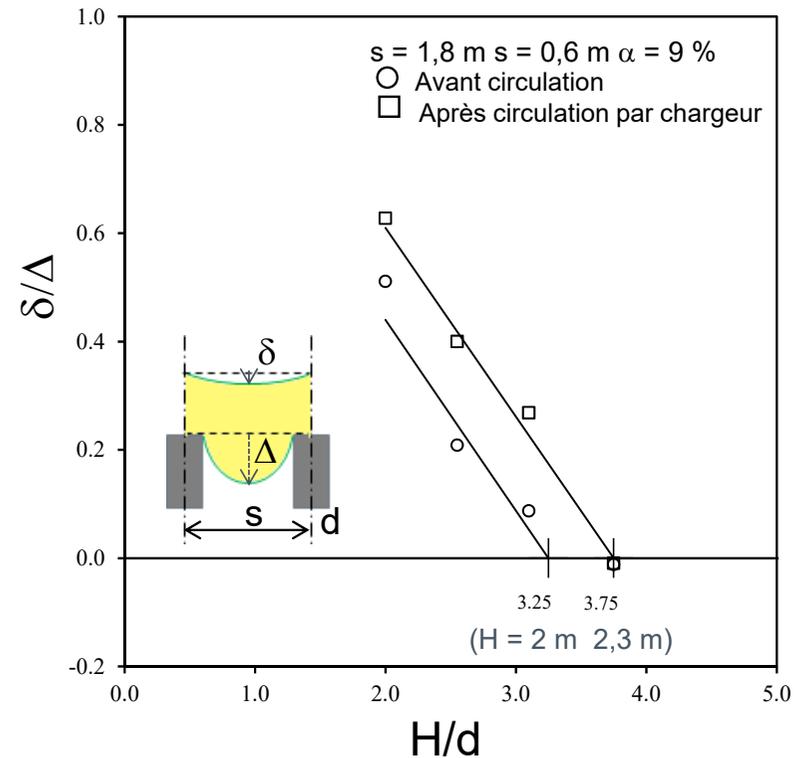
Problèmes de la caractérisation des propriétés et leur pérennité sous sollicitations répétées

# Matelas de répartition (3)

## › Hauteur critique



Sloan., 2011



Importance du dimensionnement pour les ouvrages souples sur remblais de faible épaisseur (chaussées, voies ferrées)

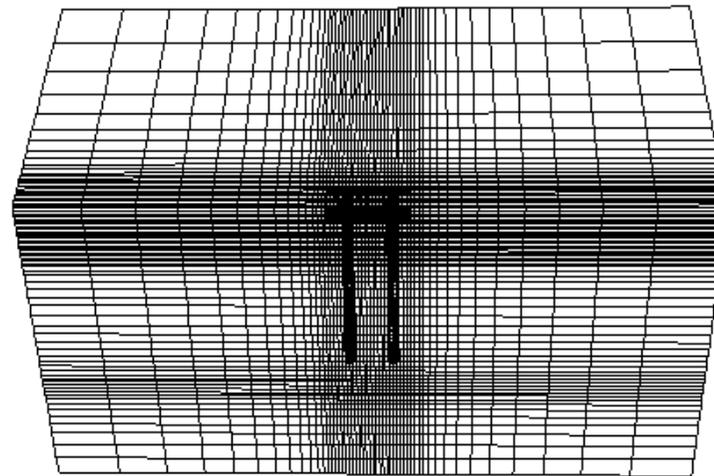
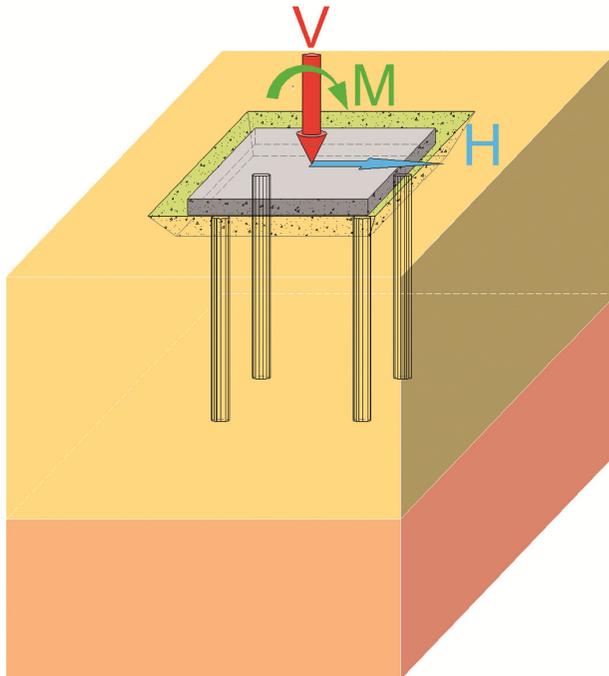
# Chargements complexes (1) : permanents

- › Chargements non uniformes et/ou inclinés
- › Chargement sismique étudié en pseudo-statique



# Charges non uniformes et/ou inclinées

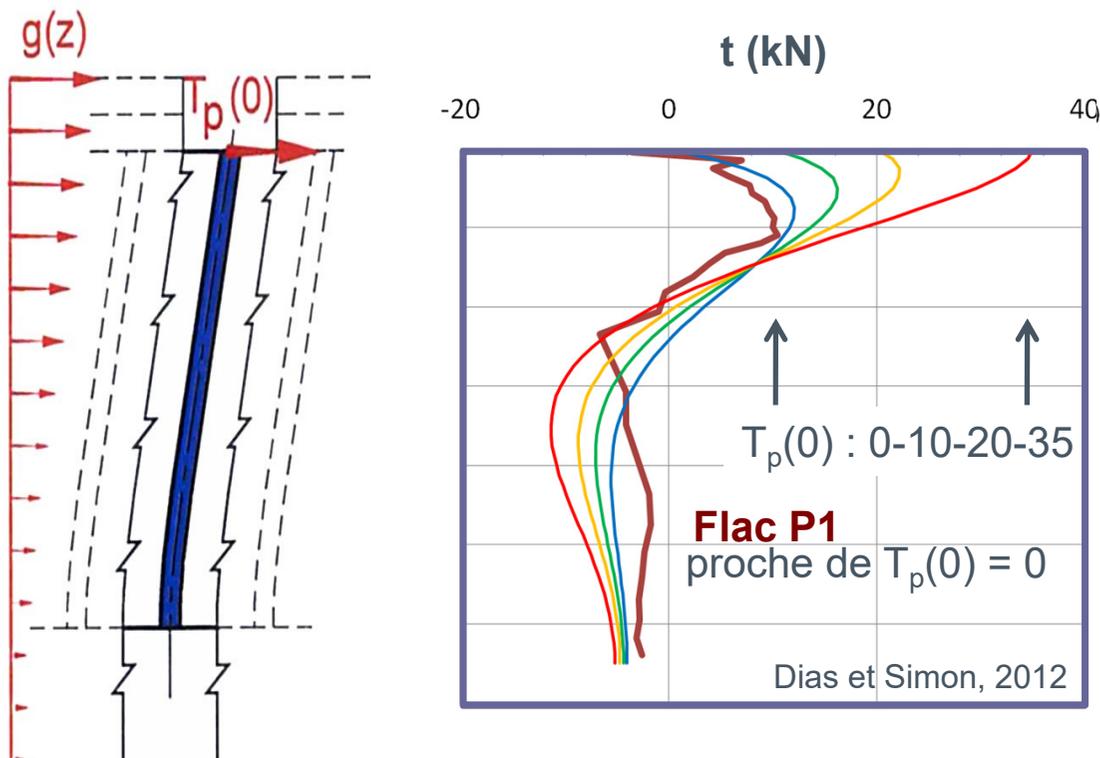
- › Benchmark semelle superficielle
  - Modèle FLAC 3D / approche analytique ASIRI (*MV3* & *MH3*)



Dias et Simon, 2012

# Charges non uniformes et/ou inclinées

- › Benchmark semelle superficielle
  - Sous chargement incliné



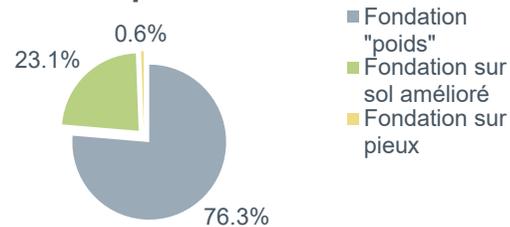
Si la composante V est appliquée avant composante H, la résistance au cisaillement du matelas complètement mobilisée sous V, ne laisse aucune capacité résiduelle de réaction par frottement en tête des IR sous l'action d'un déplacement relatif sol-inclusion complémentaire

# Chargements complexes (2) : variables

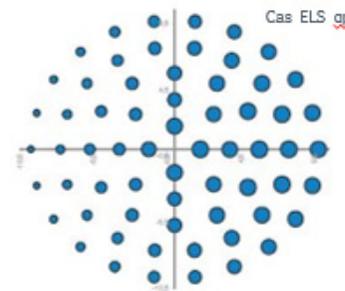
- › Chargements variables dans le temps
  - Charges périodiques ou non



Modes de fondation -  
Statistiques Antea Group  
depuis 2013



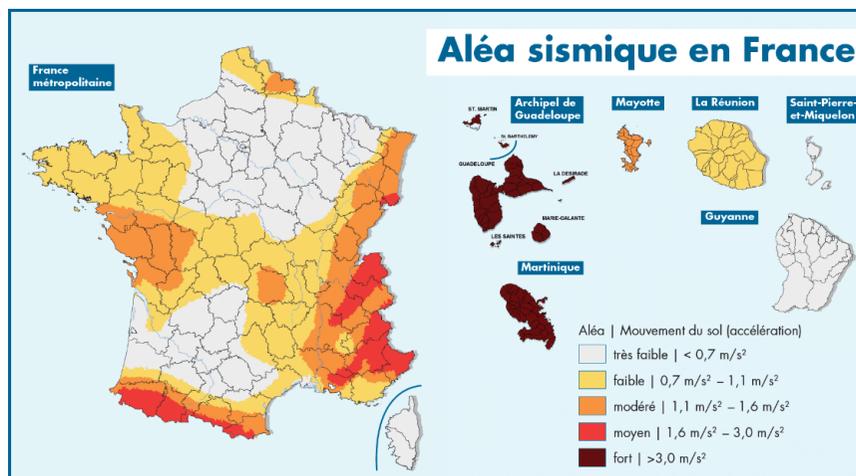
\*Etude portant sur 511



Chargement concentré et répété  
(avec effets de bord)

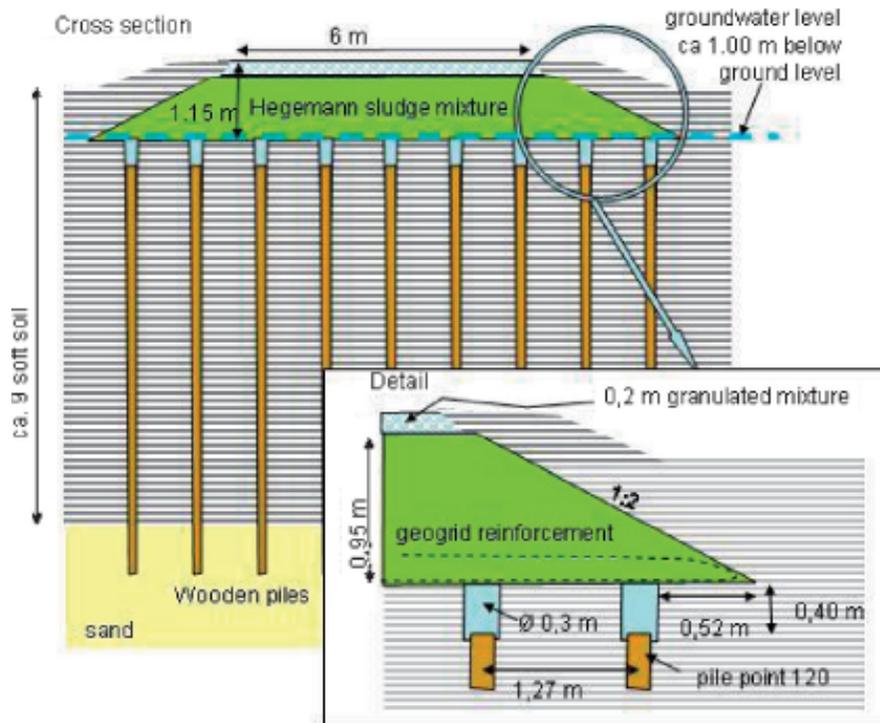
# Chargements complexes (2) : variables

- › Chargements variables dans le temps
  - Charges périodiques ou non
- › Chargement variables dans l'espace
  - Charges mobiles (circulation)
- Comportement sous sollicitations sismiques

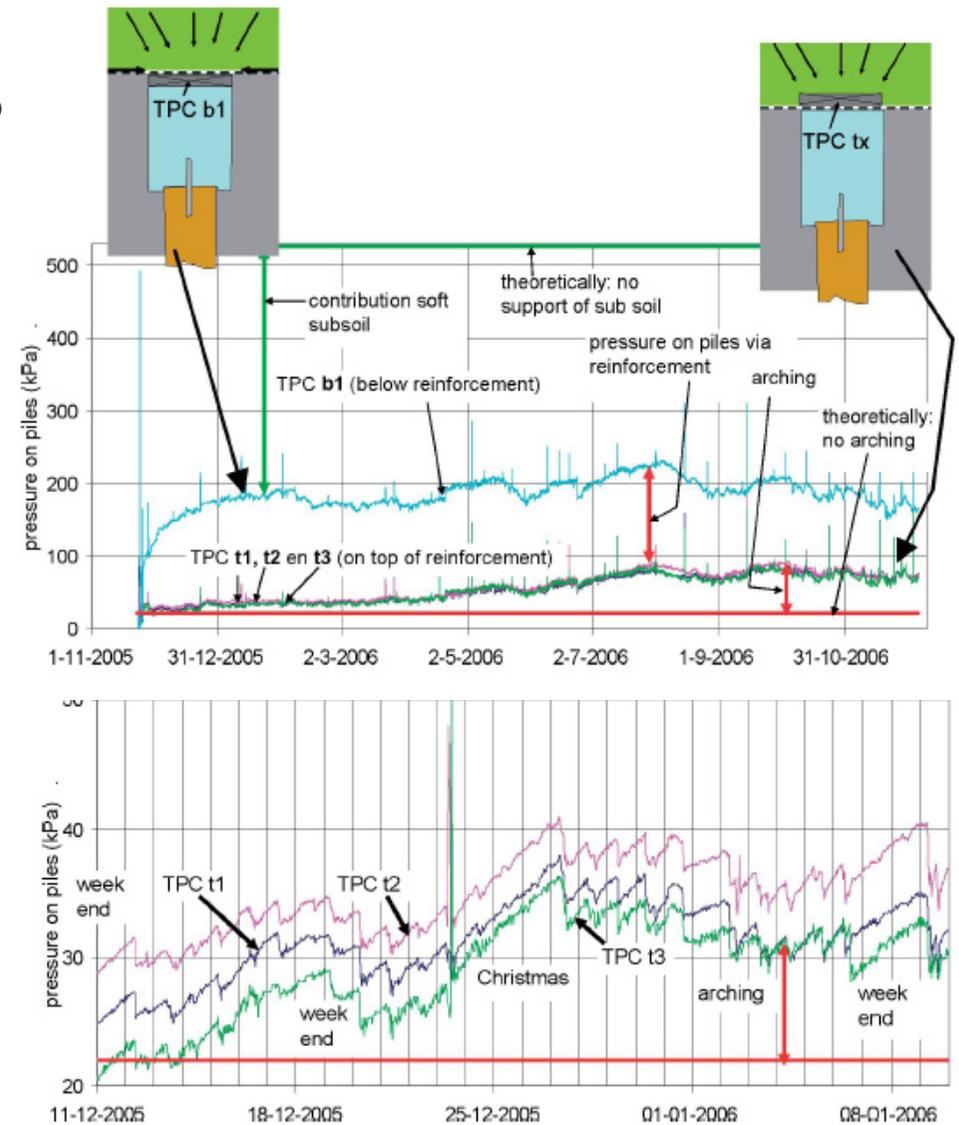


# Chargements variables

› Influence d'une circulation



Eekelen et al., 2007

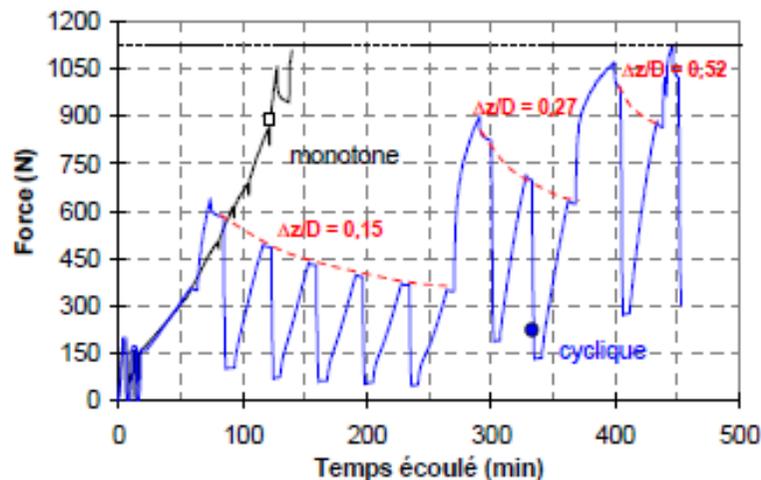


# Chargements variables

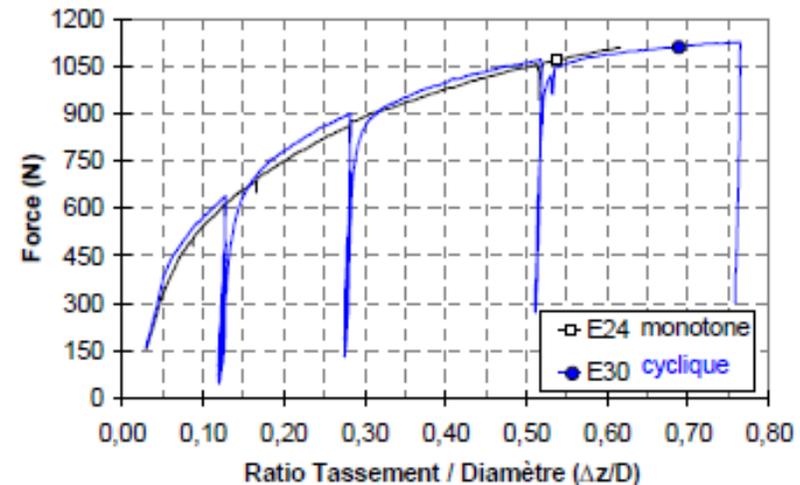
## › Influence des cycles de charge-décharge

– Exemple d'un remblai ( $\alpha = 1,23\%$ )

(Thèse Umur S. Okyay, 2010)



a) Evolution des efforts en fonction du temps



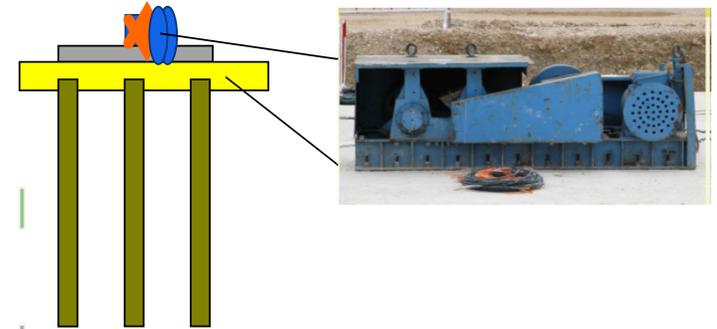
b) Evolution des efforts en fonction du déplacement adimensionnel

- L'efficacité diminue durant les cycles
- L'efficacité peut être restaurée par un tassement faible à l'issue des cycles

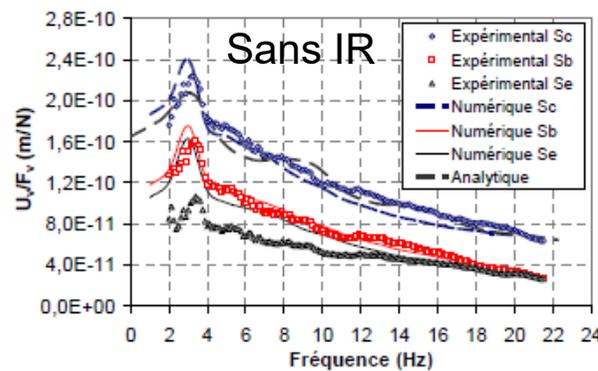
# Réponse temporelle à chargement dynamique

## Exemple plots d'essai ICEDA

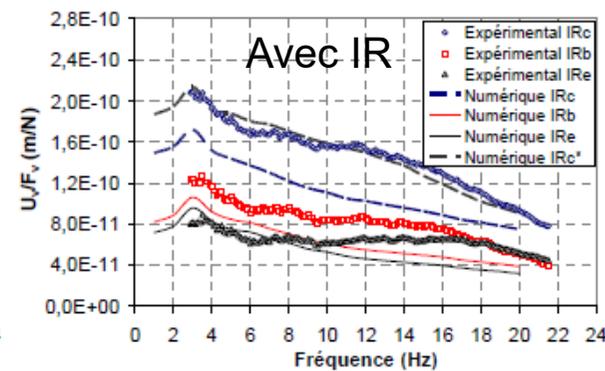
- chargement 2 – 20 Hz
- plot non renforcé / plot renforcé



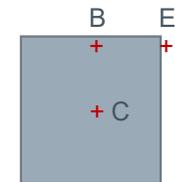
- › Pas d'influence des IR vis-à-vis sollicitations horizontales
- › Sous sollicitations verticales, le comportement dépend de la présence ou non des IR



26 AVRIL 2018



CFMS

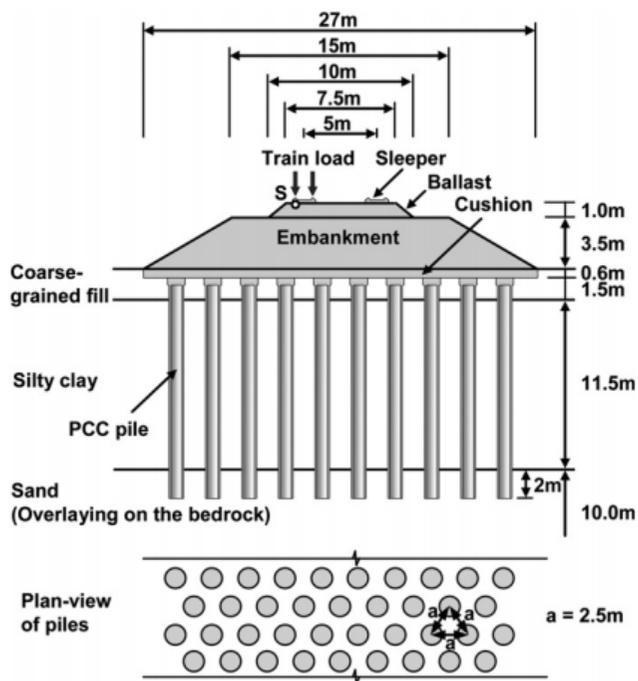


Thèse Umur S. Okay, 2010)

16

# Charges mobiles ferroviaires

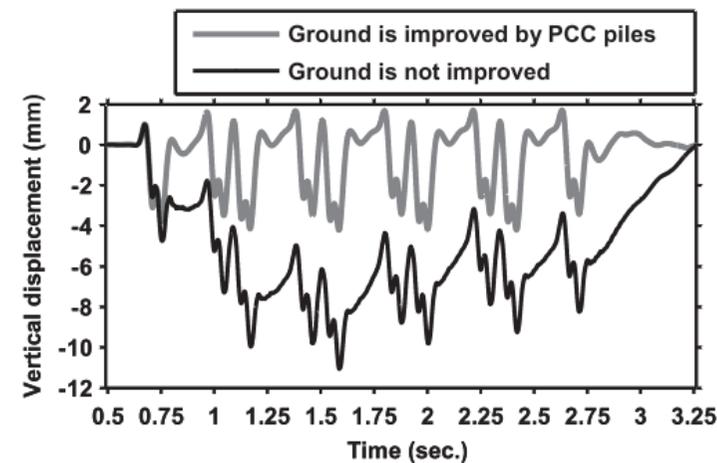
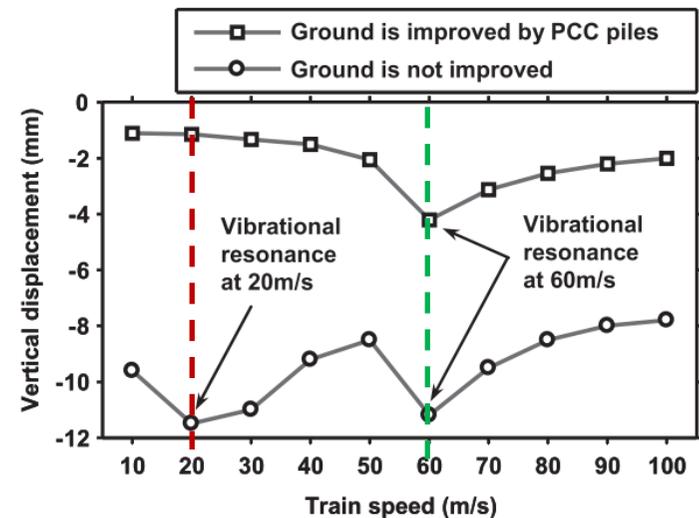
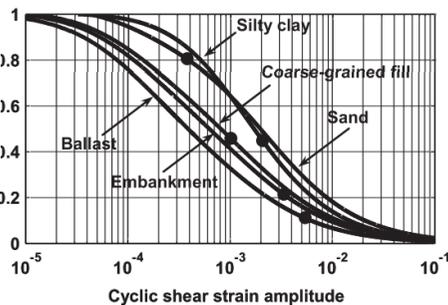
## Modélisation numérique



Thach et al., 2013

$V_R \sim 60 \text{ m/s}$

$V_R \sim 20 \text{ m/s}$

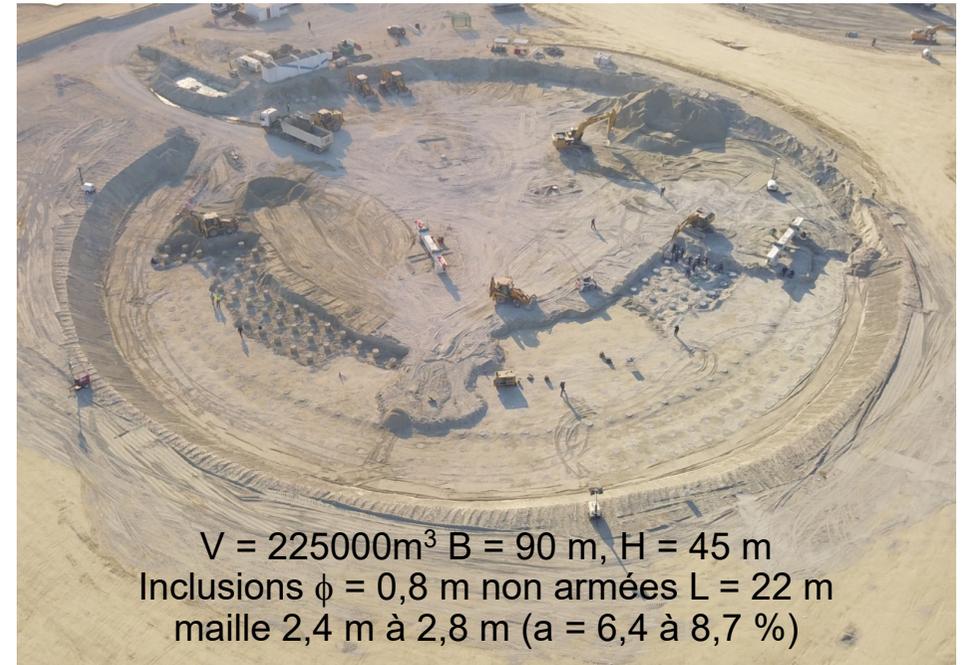


# Situation sismique

## Interaction cinématique

- Réponse en champ libre (SHAKE)  
*Accélérogrammes de référence*
  - profil de modules  
 $G_h^* \sim G_{sol}(\gamma)$
  - Spectre de réponse en surface
  - Déformée  $g_c(z)$  mode fondamental

## Exemple réservoir LNG (Koweït)



# Situation sismique

Exemple réservoir LNG (Koweït)

## Interaction cinématique

- Réponse en champ libre (SHAKE)  
*Accélérogrammes de référence*
  - profil de modules  
 $G_h^* \sim G_{sol}(\gamma)$
  - Spectre de réponse en surface
  - Déformée  $g_c(z)$  mode fondamental

## Interaction inertielle

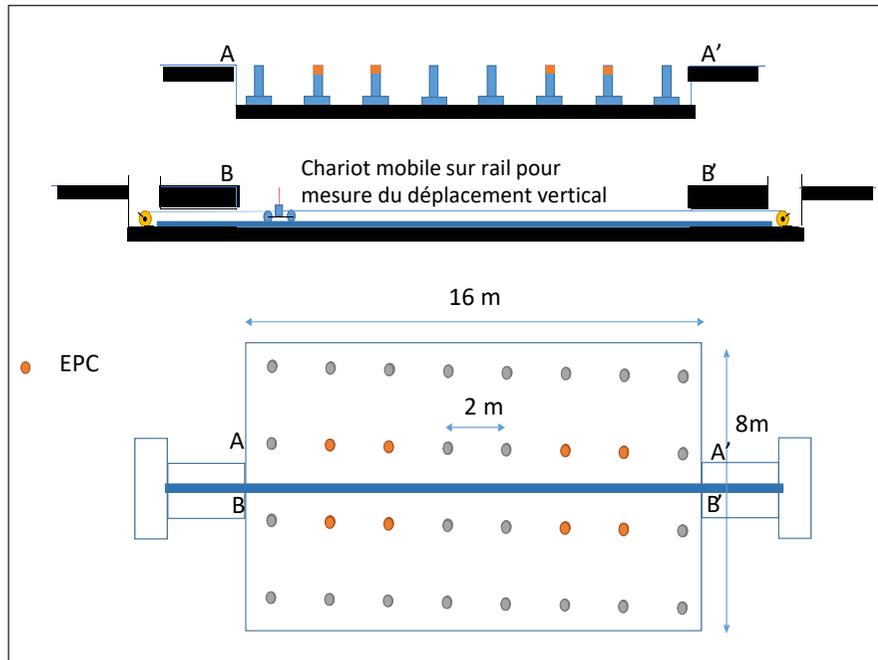
- Modèle cellule élémentaire  
*Loi  $t-z$  compatible avec  $G = G(\gamma)$*   
*Établit module équivalent  $G_v^*$*
- Calcul des impédances  
*verticale et basculement  $G_v^*$*   
*horizontale et torsion  $G_h^* = G_{sol}$*
- Efforts du modèle structure  
appliquées à modèle homogénéisé  
de la fondation (*anisotropie  $G_v^*, G_h^*$* )  
*Établit déformée  $g_i(z)$*

Combinaison selon comparaison fréquences propres structure et du sol

# Une esquisse du programme ASIRI+

- › Expérimentations en vraie grandeur
- › Modélisations numériques
- › Transfert vers l'ingénierie

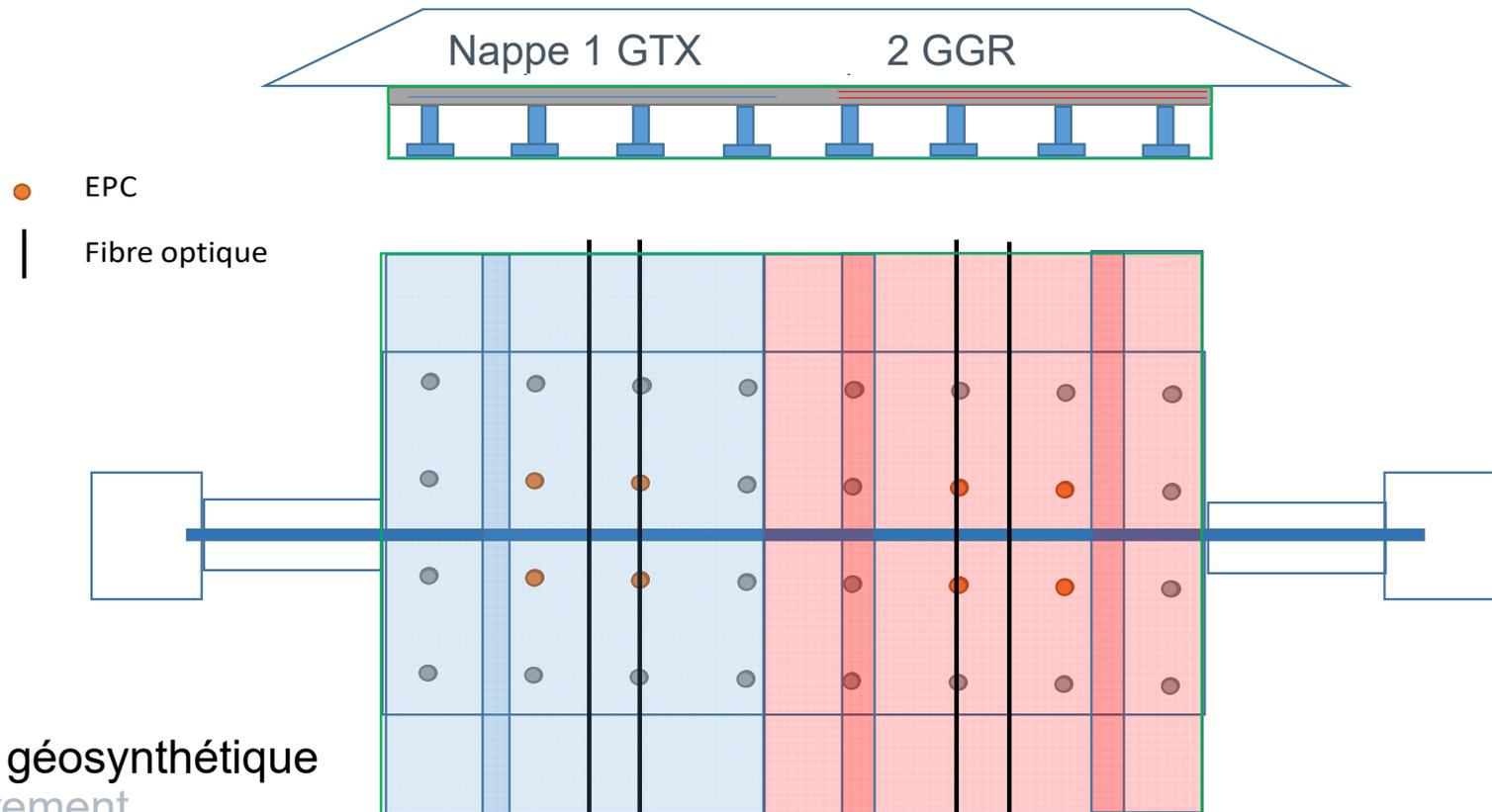
# Expérimentations en vraie grandeur (1)



1. Type de géosynthétique
2. Recouvrement
3. Zone en talus
4. Matelas traité

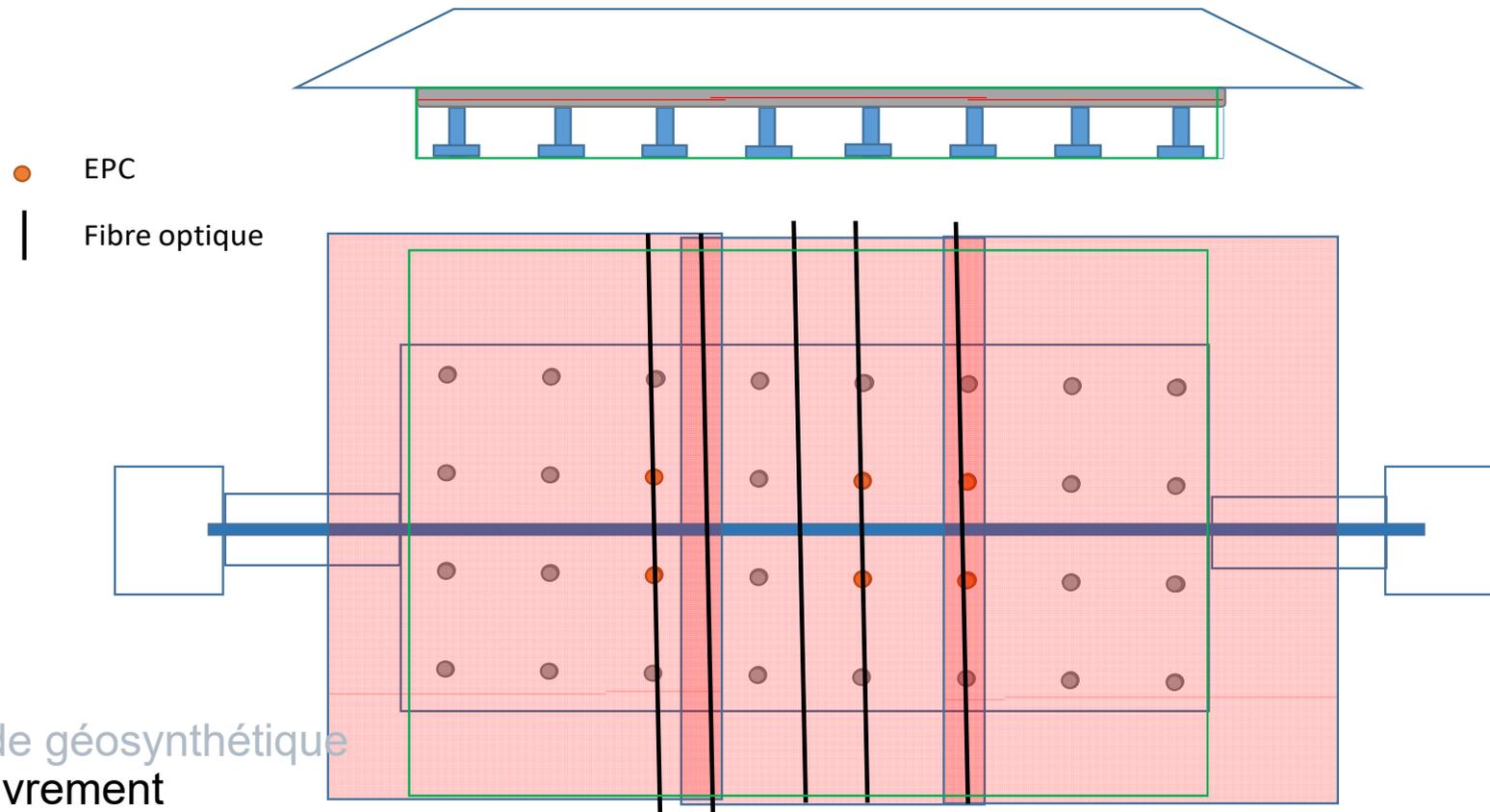
Sloan, 2011

# Expérimentations en vraie grandeur (1)



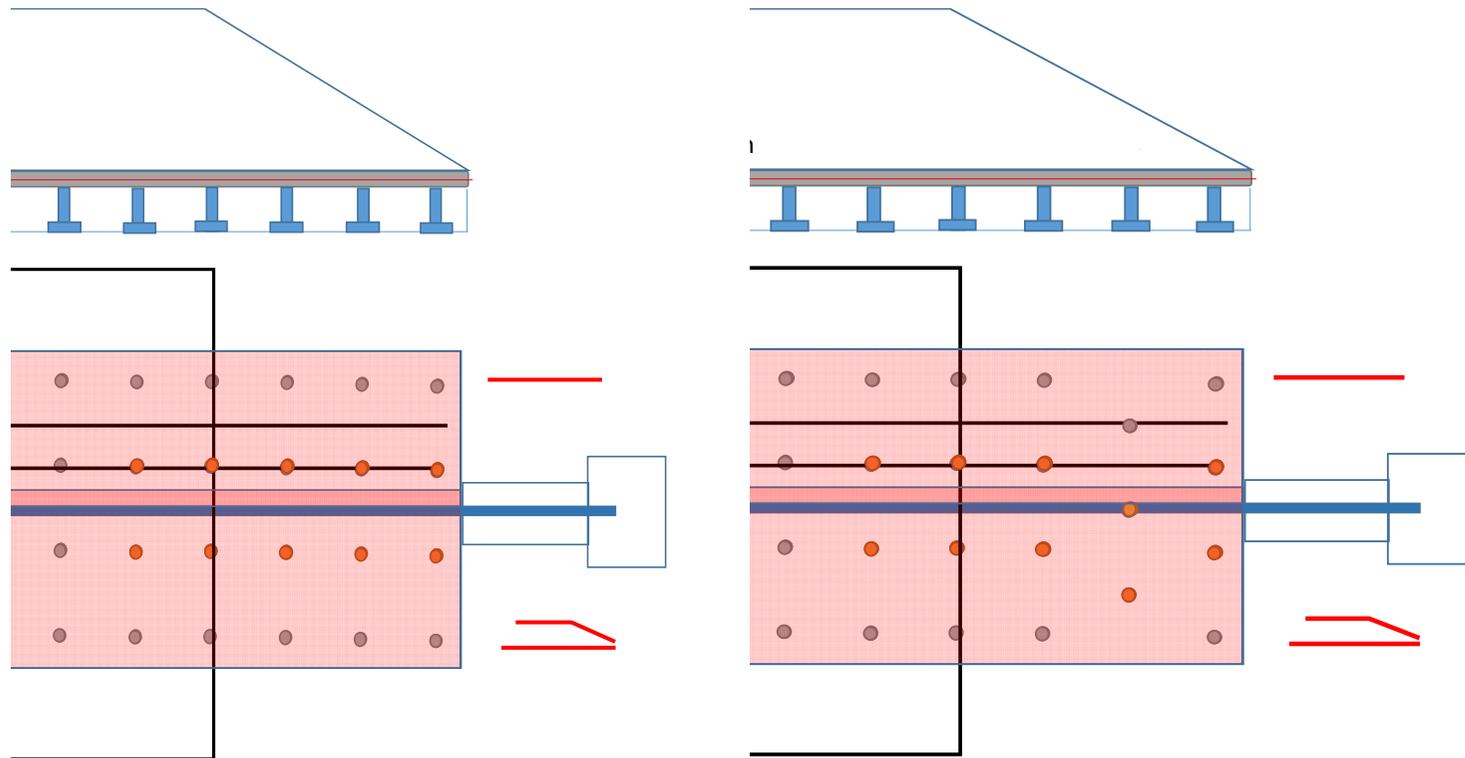
1. Type de géosynthétique
2. Recouvrement
3. Zone en talus
4. Matelas traité

# Expérimentations en vraie grandeur (1)



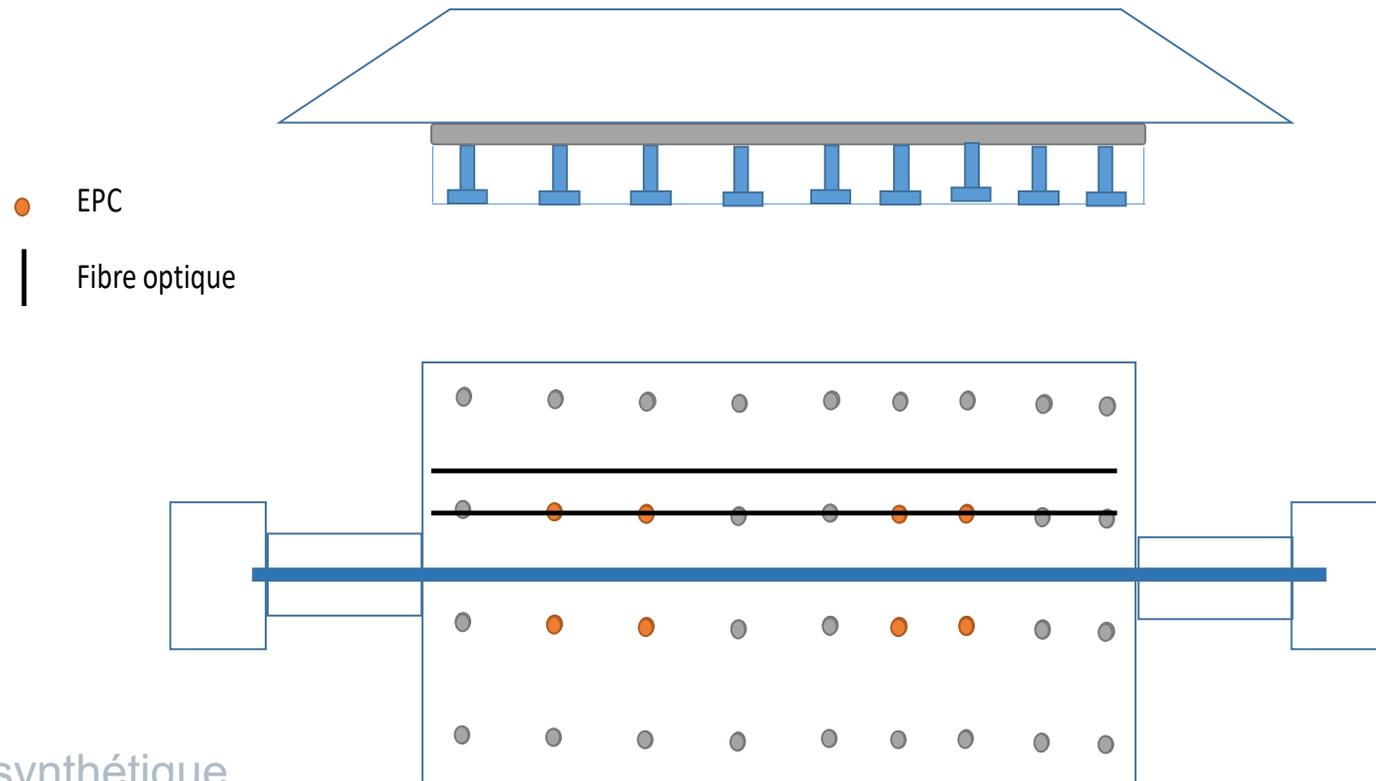
1. Type de géosynthétique
2. Recouvrement
3. Zone en talus
4. Matelas traité

# Expérimentations en vraie grandeur (1)



1. Type de géosynthétique
2. Recouvrement
3. Zone en talus
4. Matelas traité

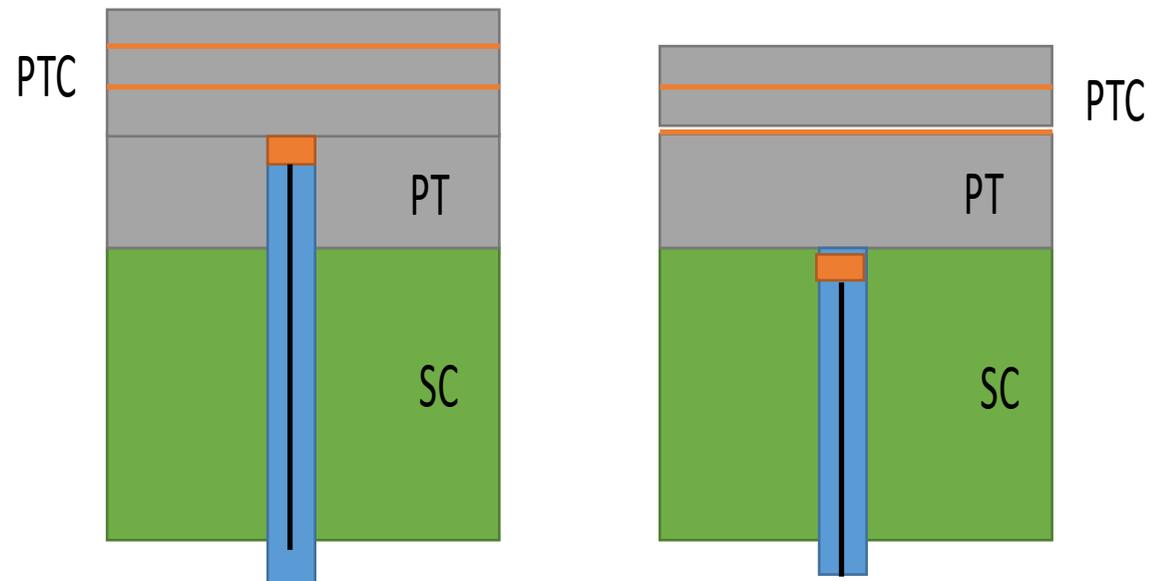
# Expérimentations en vraie grandeur (1)



1. Type de géosynthétique
2. Recouvrement
3. Zone en talus
4. **Matelas traité**

# Expérimentations en vraie grandeur (2)

- › Influence de la cote de recépage
  - Intégration de la plateforme de travail ou non dans PTC

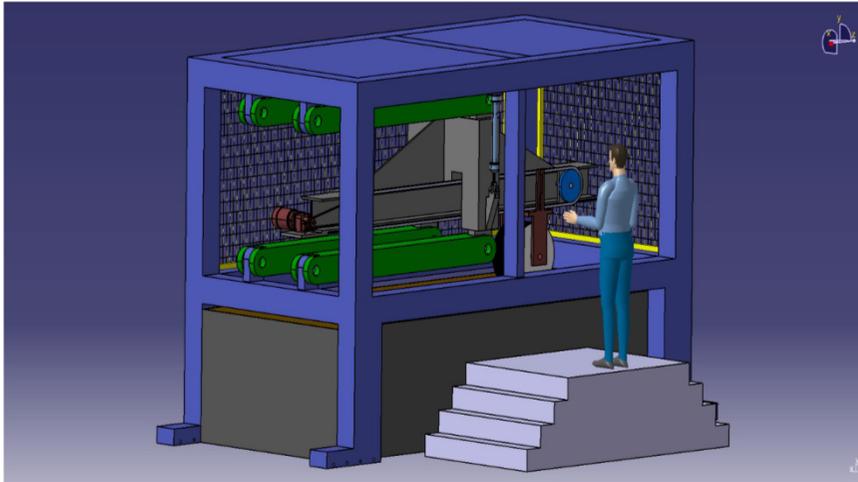


26 AVRIL 2018

CFMS

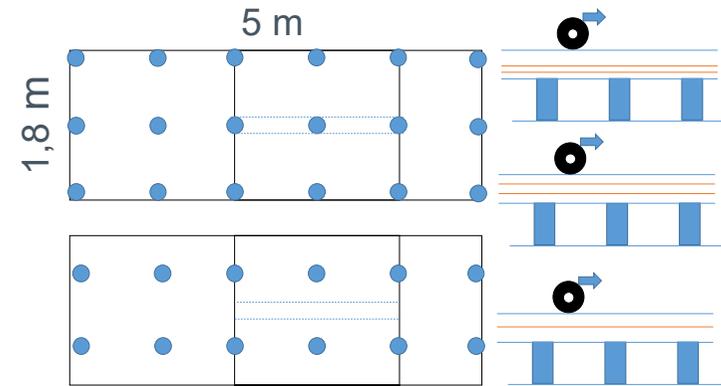
26

# Expérimentations en vraie grandeur (3)

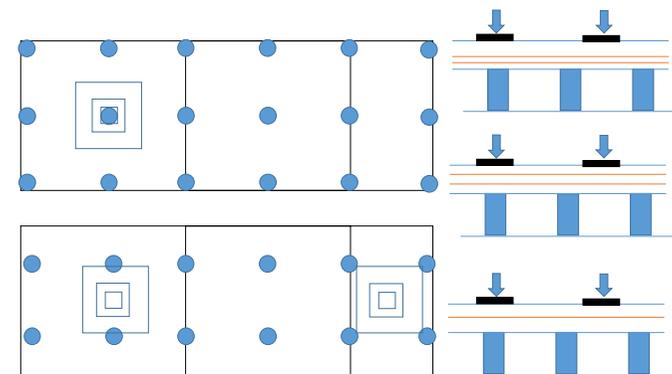


PITAGOR, INSA Lyon

Comparer les effets de charges  
roulantes ou de charges cycliques



Charges roulantes -  $L = 2\text{ m}$   
(*Simulateur Accélérateur de Trafic SAT*)

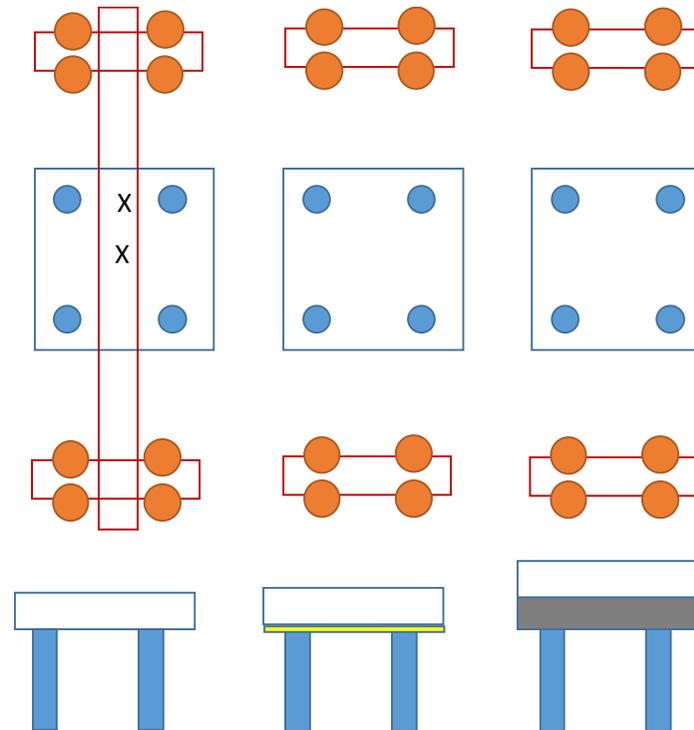


Charges concentrées

# Expérimentations en vraie grandeur (4)

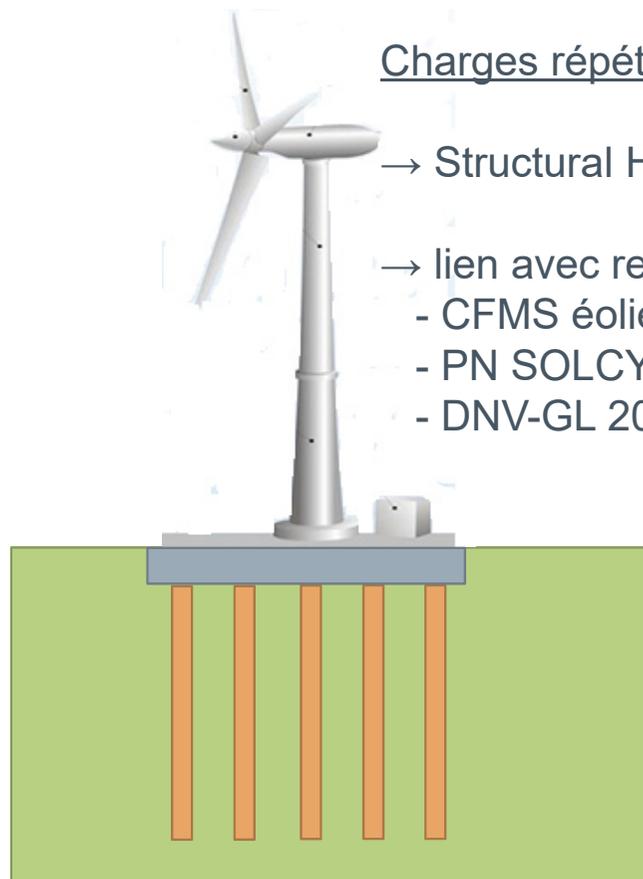
Chargement vertical centré,  
excentré ou incliné  
Chargement horizontal

Matelas d'épaisseur 0, 5 ou 50 cm



# Expérimentations en vraie grandeur (5)

## › Actions de recherche spécifique éolienne (FEDRE)



### Charges répétées

→ Structural Health Monitoring

→ lien avec recommandations

- CFMS éoliennes 2011
- PN SOLCYP 2017
- DNV-GL 2016

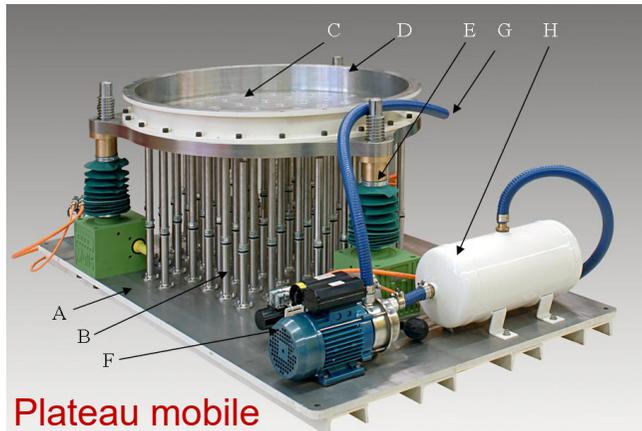
### Fondations Eoliennes Durables et REpowering

- Antea Group
- GEOMAS INSA Lyon
- Ménard
- Parex
- Nordex
- CTE wind

Procédure FUI en cours

# Essais en centrifugeuse

Similitudes  
modèle ↔ prototype



Plateau mobile  
(Okyay, 2010, Rault et al., 2010)

Photo LOPC/H. Delahousse

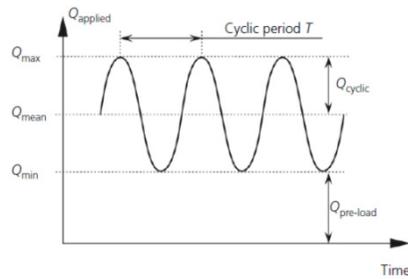
- Matelas traité aux liants (Okyay, 2010)
- Géogrilles (Girout et al., 2014)



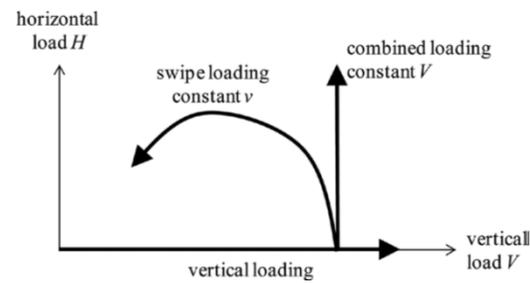
# Essais en centrifugeuse

Similitudes  
modèle ↔ prototype

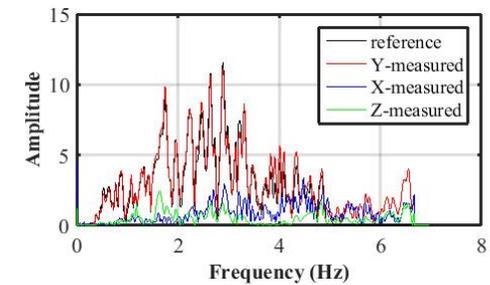
## Charges répétées



## Sollicitations inclinées



## Sollicitations sismiques



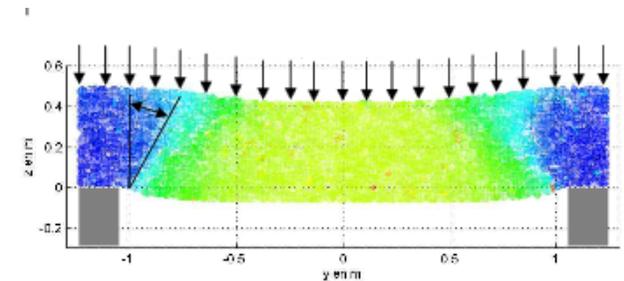
# Modélisation numérique

## › A l'appui des expérimentations et modèles physiques

- Calage
- Etudes paramétriques
- Accéder à des grandeurs non mesurées

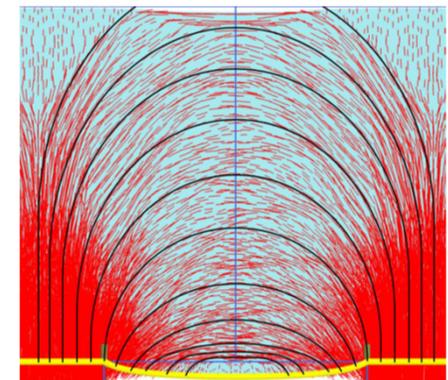
## › A l'échelle du « grain » MED

- interactions dans les interfaces



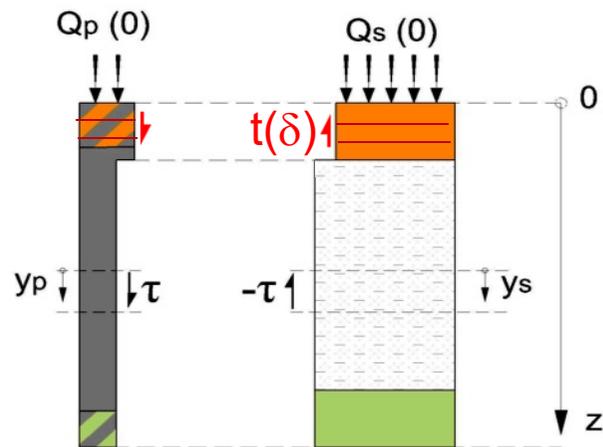
## › A l'échelle de l'ouvrage MEF, MDF

- lois de comportement appropriées
  - › macroéléments
- objectif dimensionnement



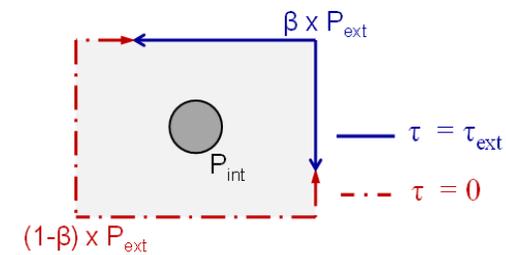
# Transfert vers l'ingénierie

› Matelas



Intégration du renforcement GSY  
dans le modèle de la cellule élémentaire

› Chargement emprise limitée



Intégration des effets de bord  
dans le modèle de la cellule élémentaire

# Transfert vers l'ingénierie

- › Sollicitations complexes
  - Évaluation et développement des modèles ASIRI
  - Règles forfaitaires pour prise en compte influence des cycles
- › Cas particulier des sollicitations sismiques
  - Approche pseudo-statique
    - › Accélération de référence pour dimensionnement IR
  - Approches temporelles ou fréquentielles
    - › Combinaison des sollicitations d'origine cinématique et inertielle
    - › Modifications des valeurs d'impédance et d'amortissement / sol non renforcé
  - Actualisation éventuelle des règles AFPS

# Projet National ASIRI+

- › Etude de faisabilité + programme
  - en phase de finalisation
  - aspects environnementaux, ACV, durabilité
- › Partenariat
  - ASIRI
    - › Bonne appropriation de la technique et des méthodes par les entreprises et les ingénieries
    - › Compétences des partenaires académiques identifiés
  - Extension à nouveaux acteurs (GSY, éoliennes)
  - A ce jour
    - › 14 ingénieries, 9 académiques, 8 entreprises de travaux, 7 industriels,
    - › 3 maîtres d'ouvrages, 2 bureaux de contrôle.
  - Recherche financement thèses CIFRE

Merci...

26 AVRIL 2018

CFMS

30