Interactions cycliques sol-pipe dans les fonds marins sous l'effet de la houle

P. Foray
Laboratoire Sols,Solides, Structures (3S)
Institut National Polytechnique de Grenoble
UMR 5521

Journée CFMS « Cycles et fatigue en géotechnique » 7 avril 2006

Co-auteurs et collaborations

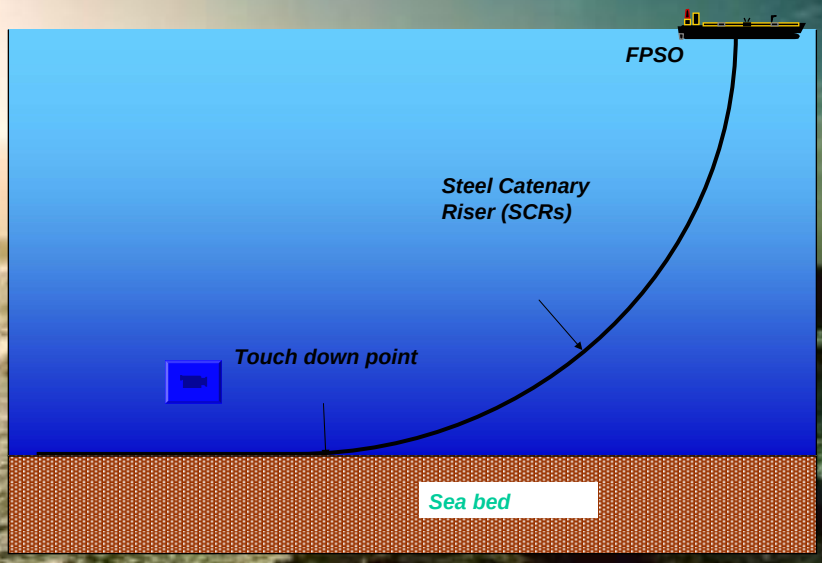
- Doctorants et Masters 3S:
  David Bonjean, Denis Branque,
  Marcos Orozco, Luis Soler, Kadir Zvrko
- Coflexip, Geodia
- Total/IFP E. Fontaine, J.F Nauroy, A. Roux, H. Gueveneux
- Programme CLAROM "Grands Fonds"
- Programme européen LIMAS (Liquefaction around Marine Structures)
  DTU Lyngby, UPPA Pau, UC Cambridge,NTNU Trondheim,TU Braunschweig, Geodelft,HR Wallingford, Liceng DK, IBW Gdansk
  http://vb.mek.dtu.dk/research/limas.html

Journée CFMS « Cycles et fatigue en géotechnique » 7 avril 2006

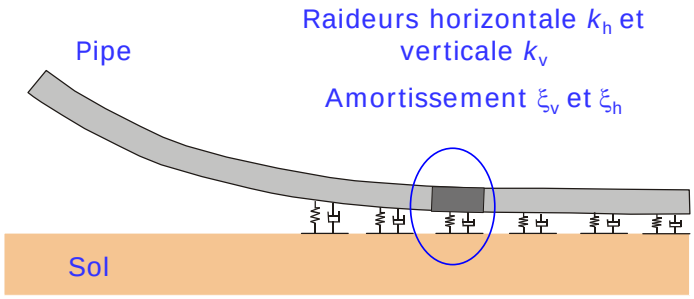
Plan de l'exposé

- Introduction
- Dispositif expérimental
- Interactions cycliques sol-pipe dans les grands fonds marins argileux
- Interactions cycliques sol-fluide-pipe dans les fonds côtiers sableux
- Liquéfaction induite par la houle
- Conclusions

Problématique « grands fonds »



INTERACTION CYCLIQUE PIPE-SOL



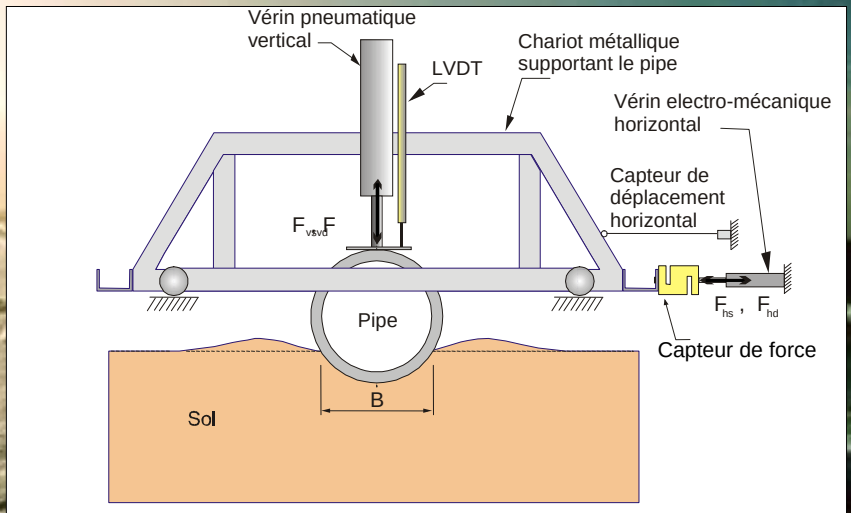
Méthodologie

- Modélisation physique de l'action de la houle sur un pipe partiellement ensouillé ou reposant sur le fond marin
- Modélisation à l'échelle 1 ou en semi-grandeur
- Simulation de l'action de la houle par l'application de chargements cycliques
- Mesure des pressions interstitielles à l'interface sol-pieu et au sein du massif

Dispositif expérimental

- Cuve rigide de 2m*1m*1m
- Visualisation latérale
- Le pipe est supporté par un chariot libre de bouger verticalement
- Charges cycliques verticales/horizontales appliquées par des vérins
- Cycles à forces ou déplacements contrôlés

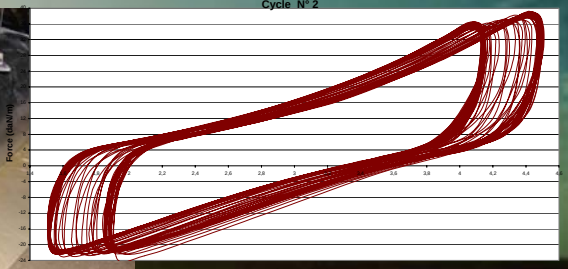
Simulation des charges cycliques

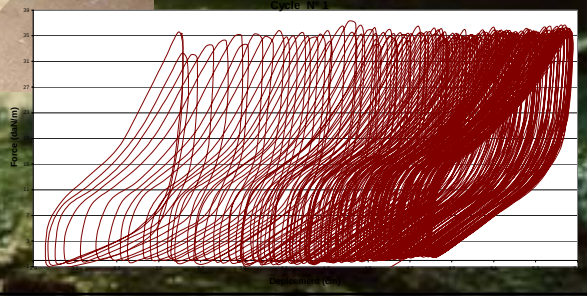


Interactions cycliques verticales en Offshore profond (Zvrko 2003)

-Cuve de 2m×1m×0,5m
- Sol argileux très mou représentatif des grands fonds marins
Cu = 1 et 3,5 kPa

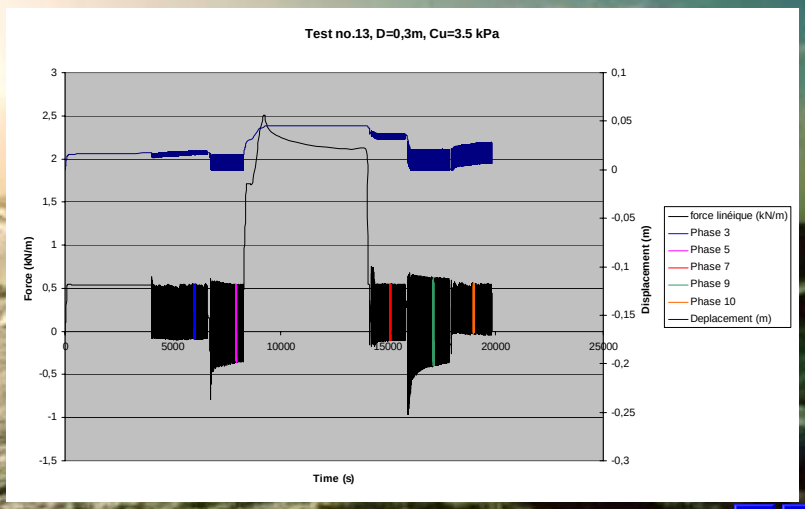
Pipes de 100,200 et 300mm



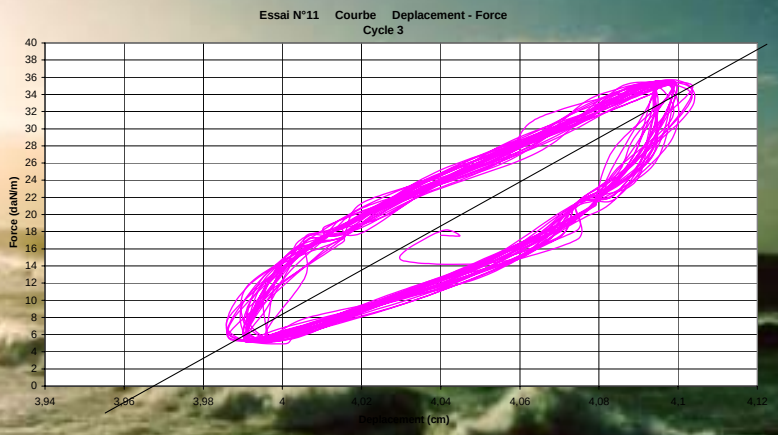


Chargement cyclique

Time sequence - phases

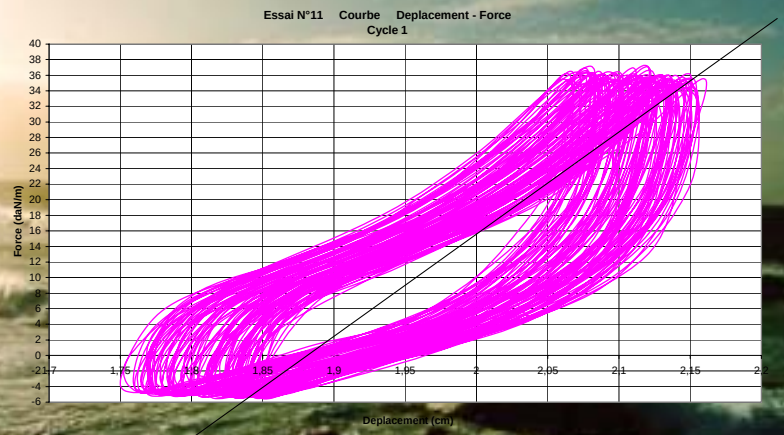


Cycles non alternés



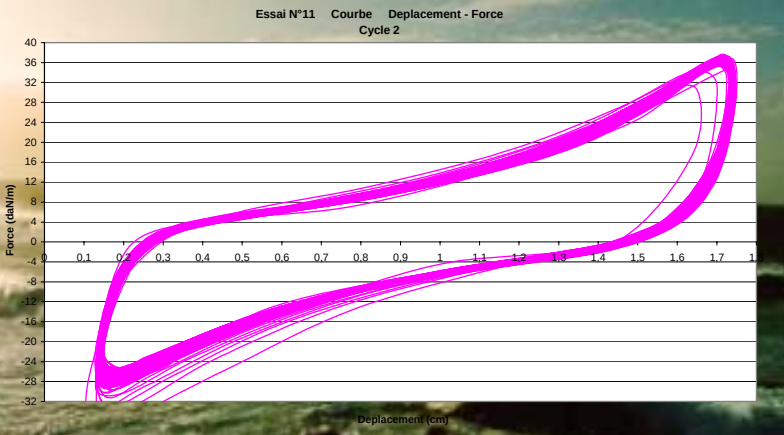
Graphique Cycle n°3

Cycles alternés avec faible traction



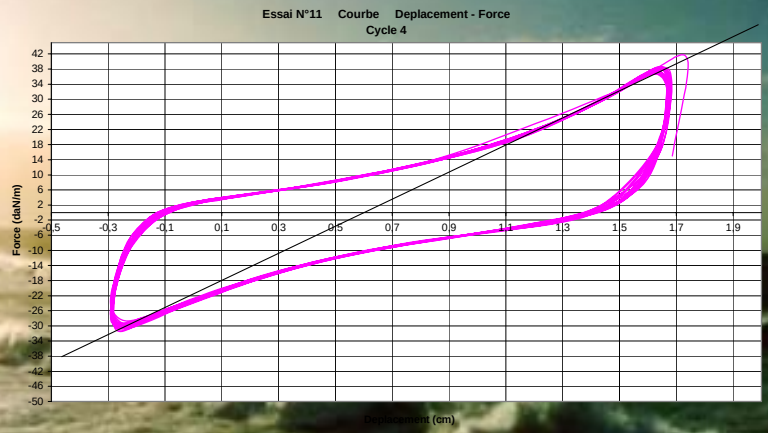
Graphique Cycle n°1

Cycles alternés symétriques



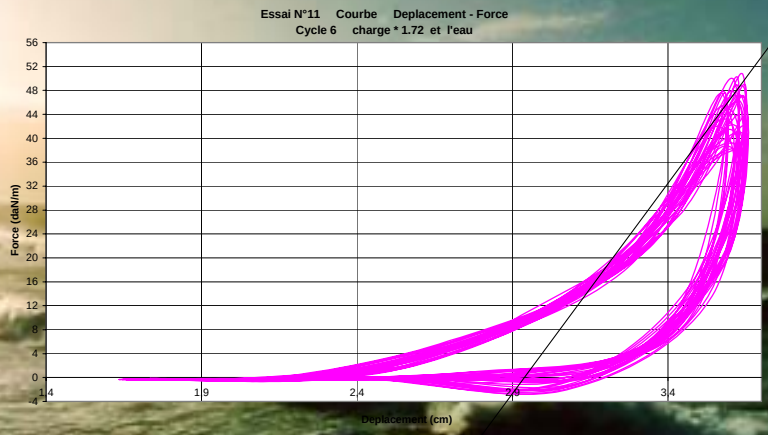
Graphique Cycle n°2

Evaluation de la raideur verticale moyenne



Graphique Cycle n°4

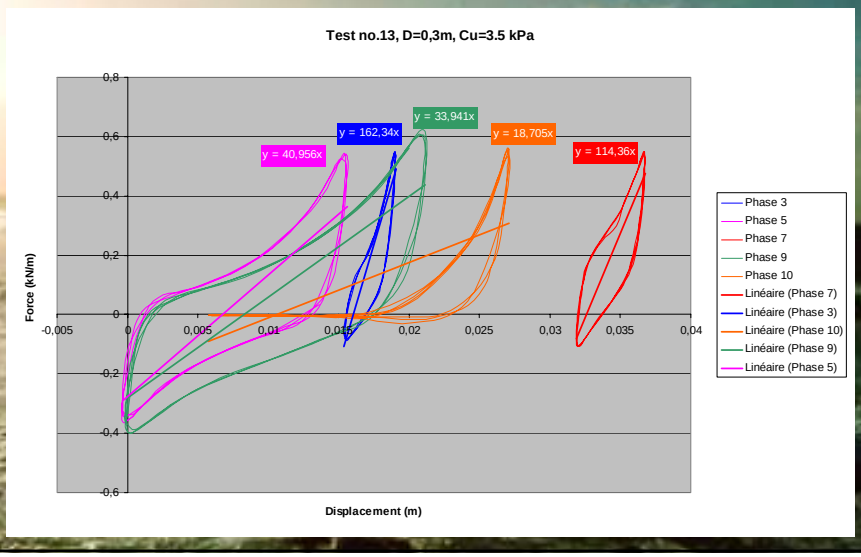
Cycles sans adhérence sol-pipe



Graphique Cycle n°4 avec de l´eau

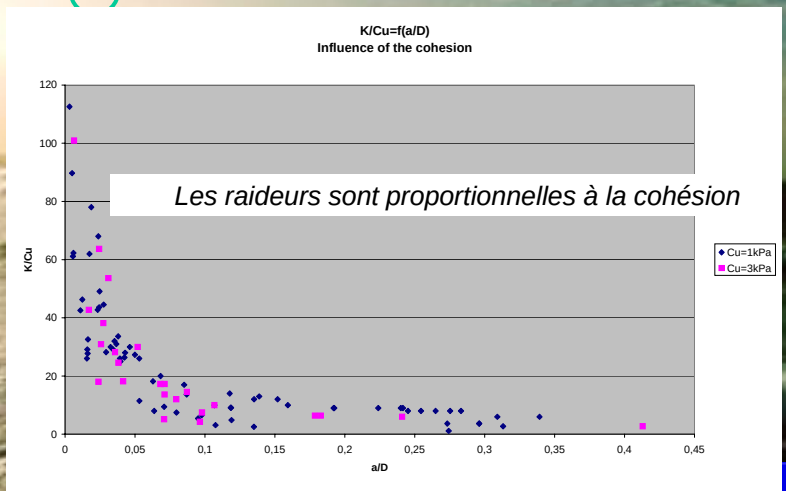
Evolution de la raideur cyclique verticale moyenne avec l'amplitude

(Fontaine et al ISOPE 2004)



Normalisation des raideurs verticales (Fontaine et al ISOPE 2004)

$$\frac{(Rn/L)}{Cu.D} = f(\frac{a}{D}, \frac{z0}{D})$$

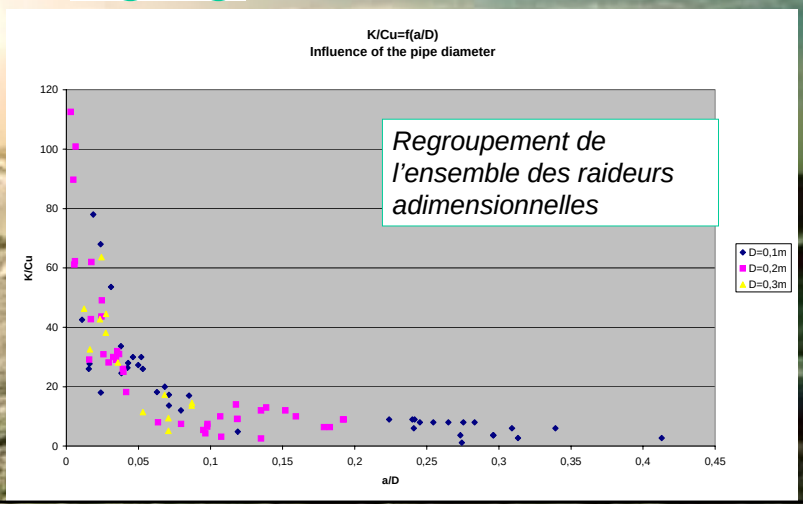


Les raideurs sont proportionnelles à la cohésion

Normalisation des raideurs verticales moyennes

$$\frac{(Rn/L)}{Cu.D} \approx f\left(\frac{a}{D}\right)$$

Effet du diamètre du pipe



Regroupement de l'ensemble des raideurs adimensionnelles

Conclusions sur les interactions verticales cycliques dans les sols mous

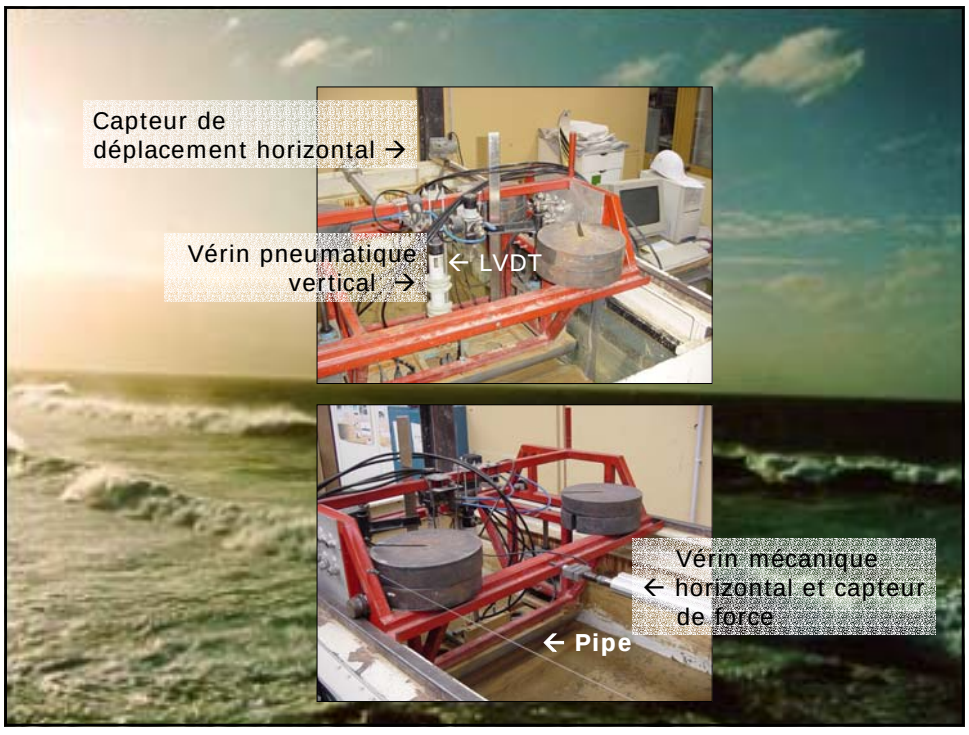
- La raideur moyenne verticale:
- est assez peu influencée par l'enfoncement initial
- Dépend fortement du type de chargement cyclique (alterné/non alterné, avec ou sans succion,…)
- Les rapports k/Cu sont généralement inférieurs à 70, mais décroissent fortement avec l'amplitude des cycles (valeurs de l'ordre de 20 pour de grandes amplitudes)
- Stabilisation de la raideur après un grand nombre de cycles (>200)

INTERACTIONS CYCLIQUES HORIZONTALES en OFFSHORE PROFOND

(Orozco 2006)

Amplitude mm	T s	Nombre de cycles
6	10.5	100
6	9.4	100
10	15.0	80
20	12.5	100
30	14.2	100
40	17.2	100
50	16.0	95
60	14.4	200

T moyenne = 13.7 s



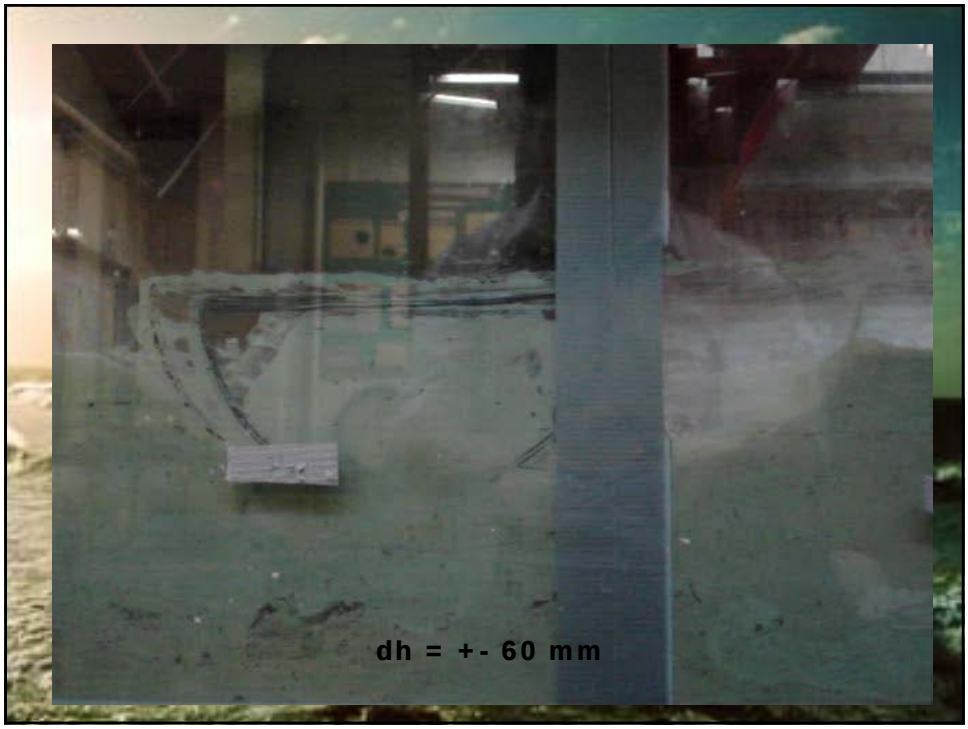
Interaction cyclique horizontale

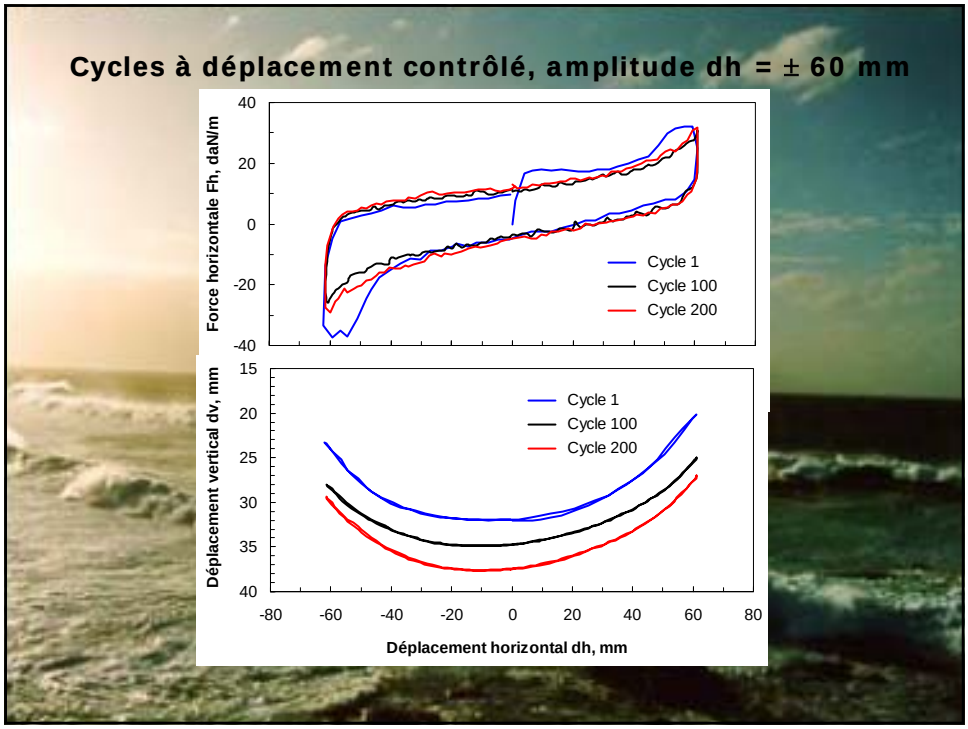
Pipe: D= 0.2 m
poids = 0.36 kN/m

dh = 0 mm

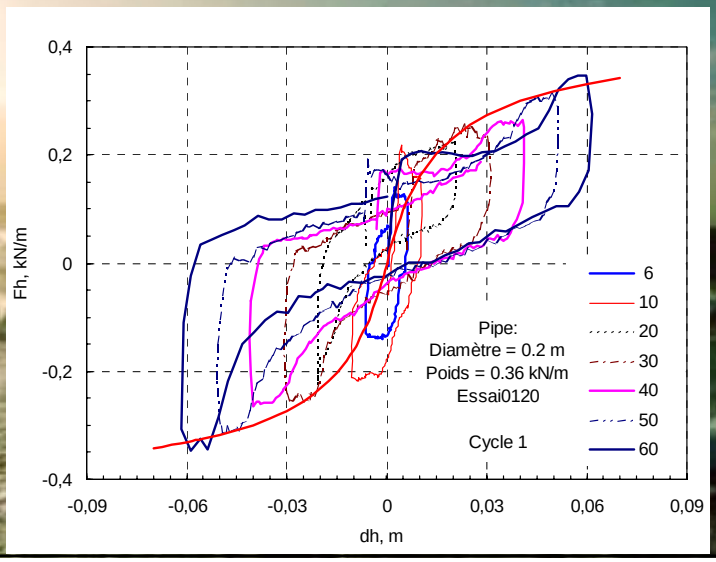
dh = +30 mm

dh = +- 60 mm

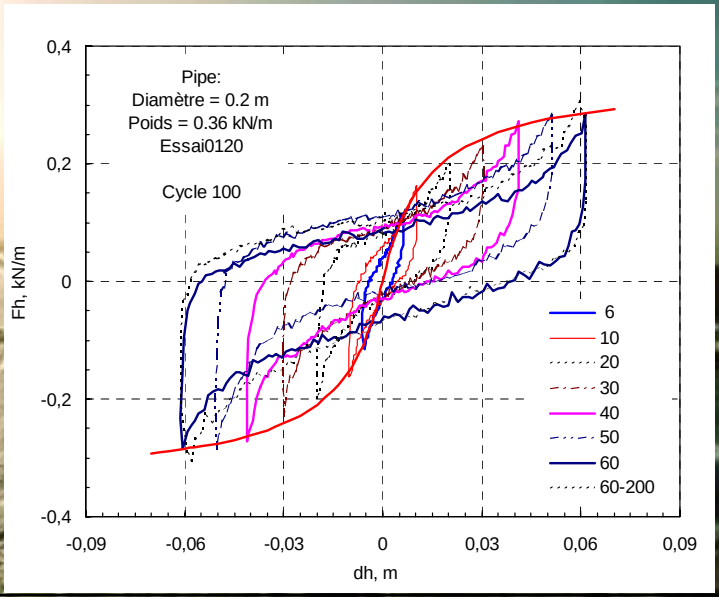

dh = +- 60 mm


Cycles à déplacement contrôlé, amplitude dh = ± 60 mm
Force horizontale Fh, daN/m
40
20
0
-20
-40
Cycle 1
Cycle 100
Cycle 200
Déplacement vertical dv, mm
15
20
25
30
35
40
Cycle 1
Cycle 100
Cycle 200
-80
-60
-40
-20
0
20
40
60
80
Déplacement horizontal dh, mm

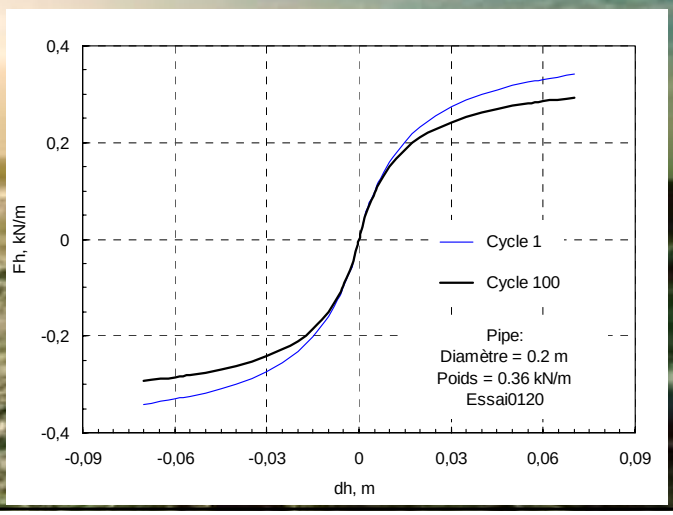
Effet de l'amplitude sur la forme des cycles alternés (cycle 1)



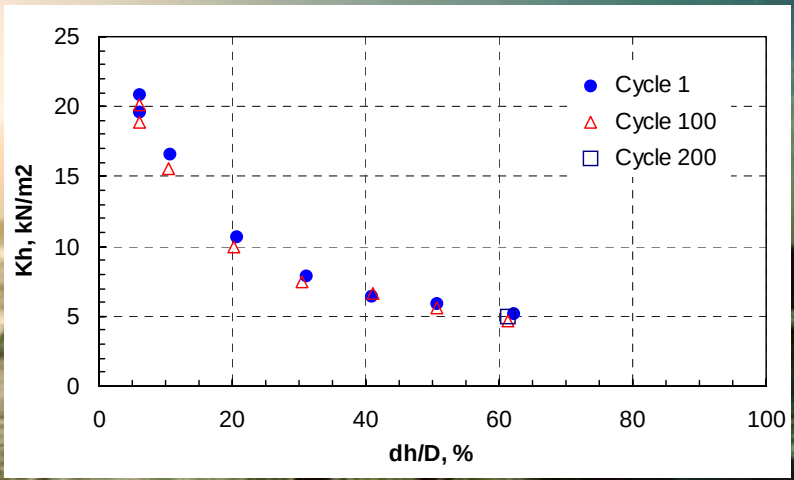
Effet de l'amplitude sur la forme des cycles alternés (cycle 100)



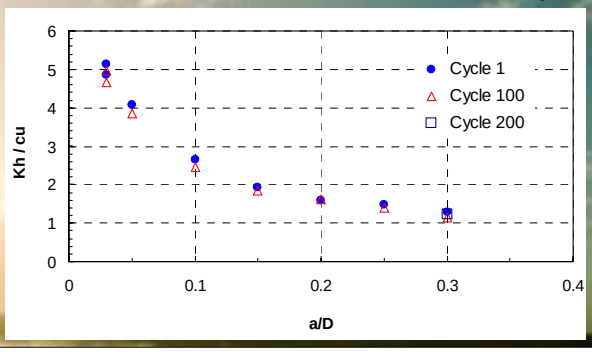
Evolution de la courbe de résistance« enveloppe »



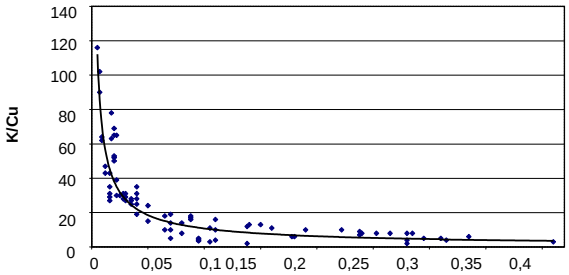
RAIDEURS D'INTERACTION HORIZONTALE



Raideurs horizontales normalisées

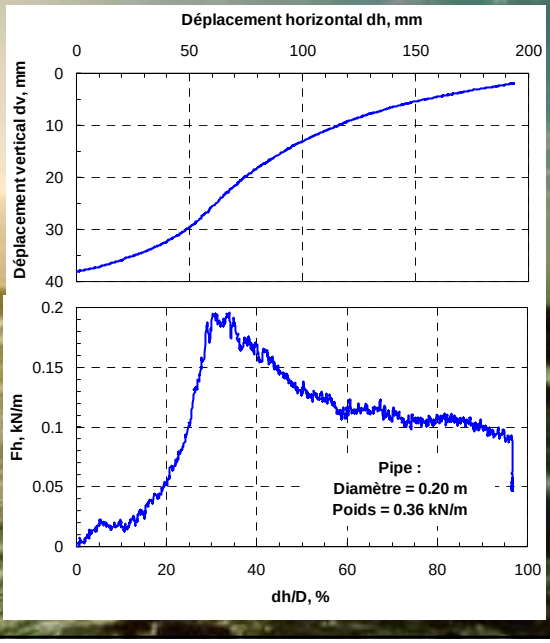


Horizontal



Vertical
(étude 2004)

RESISTANCE STATIQUE HORIZONTALE

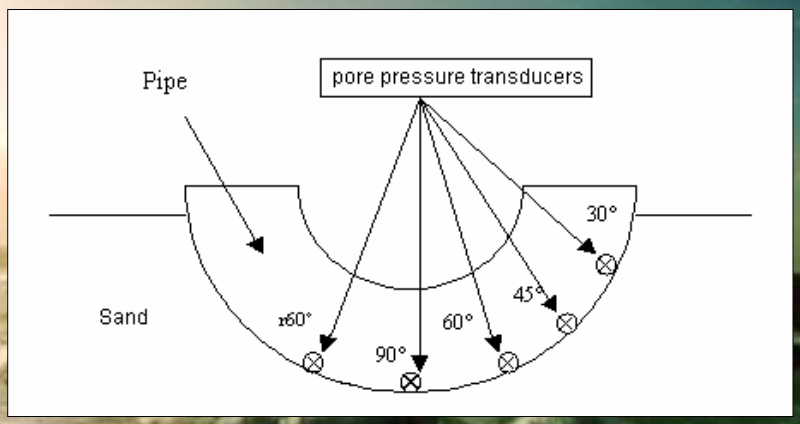


Observations expérimentales pour les interactions horizontales dans les sols argileux grands fonds

- Formation d'une tranchée très ouverte
- « Glissement » du pipe le long des parois de la tranchée
- Pas d'évidence de zone en butée
- Zone fortement remaniée au contact sol-pipe (modification de la cohésion au contact ?)
- Peu d'effet des cycles sur les raideurs par rapport à celui de l'amplitude
- Faible réponse des capteurs de pression interstitielle

Interactions horizontales fluide-sol-pipe dans les sables

(Branque et al 2002, Bonjean 2006, Soler 2005)



Instrumentation du pipe
(diamètre : 200 mm)

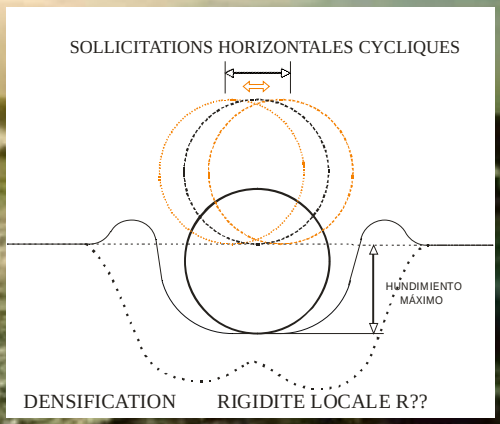
Programme expérimental

Paramètres étudiés :

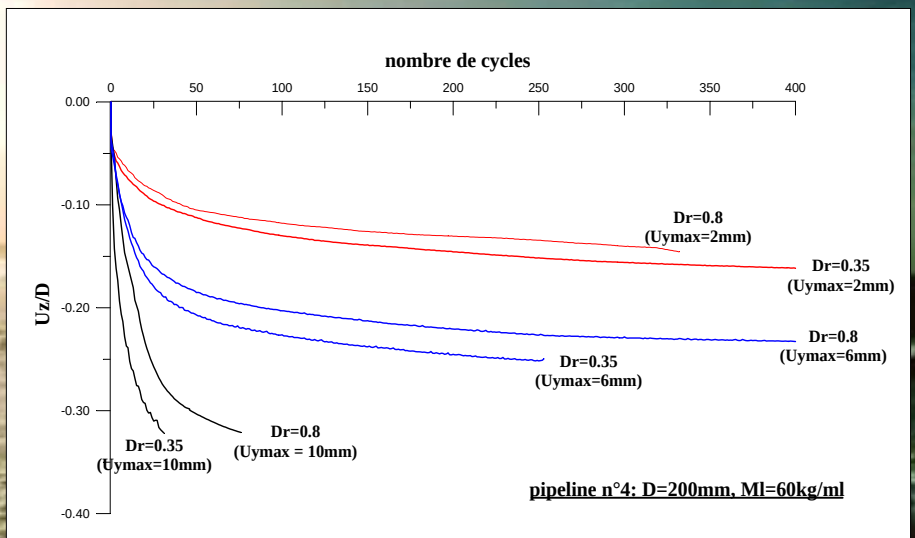
- Densité relative du sable : 35 & 60 %
- Période de chargement: 1 to 15 s

- Amplitudes en force contrôlée : 30 to 90 daN
- Amplitudes en déplacement contrôlé : 10 to 80 mm

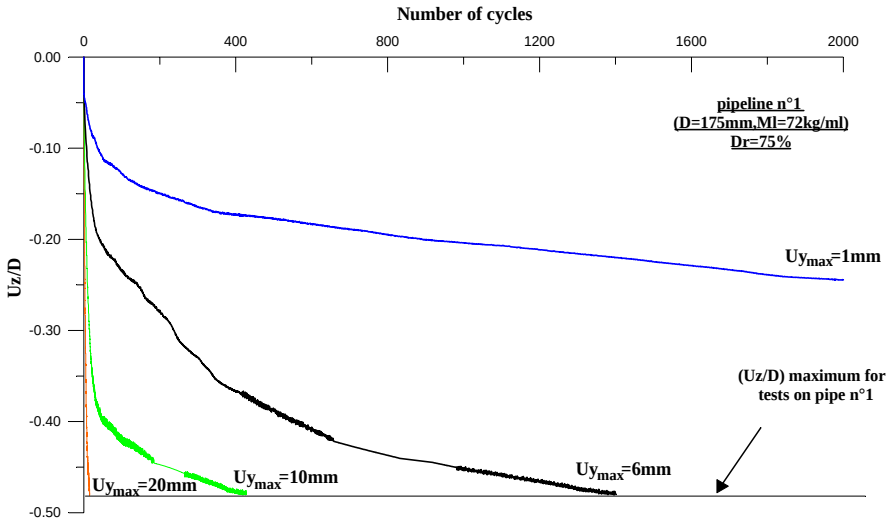
Pénétration du pipe sous l'effet des charges cycliques



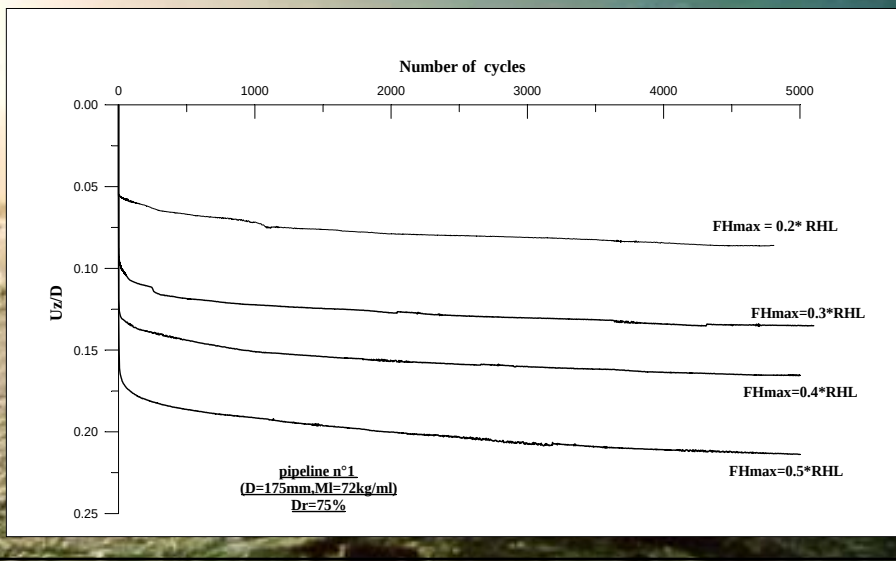
Effet de la densité sur la pénétration cyclique



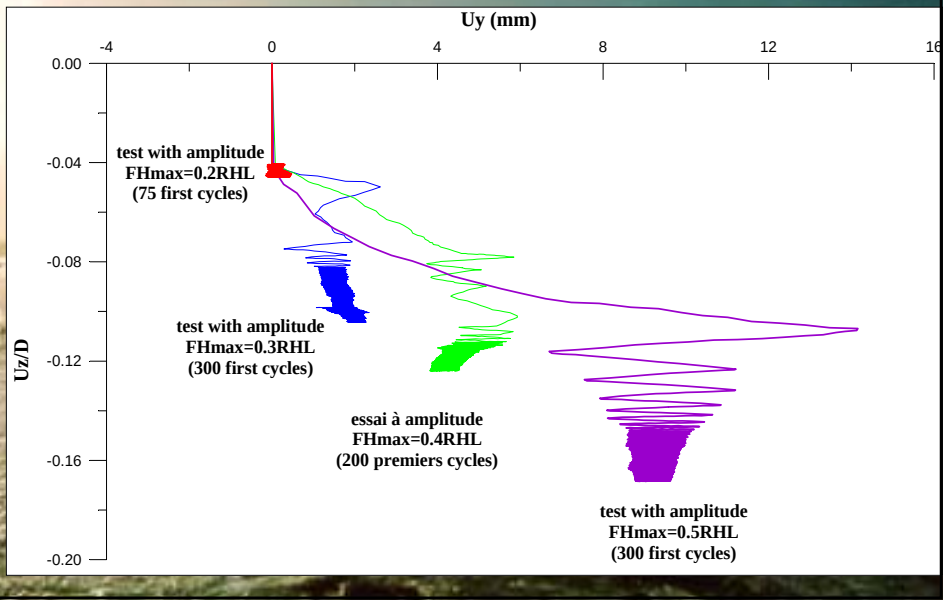
Effet de l'amplitude des cycles sur la pénétration (déplacement contrôlé)



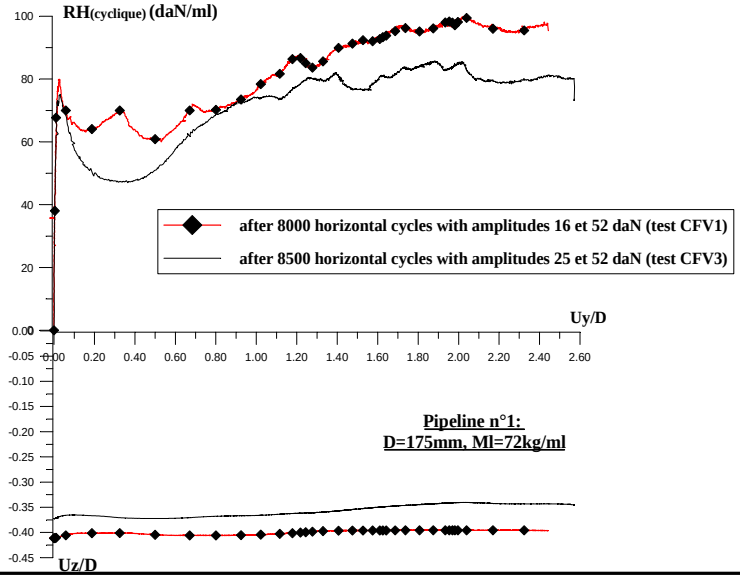
Effet de l'amplitude des cycles (cycles à force imposée)



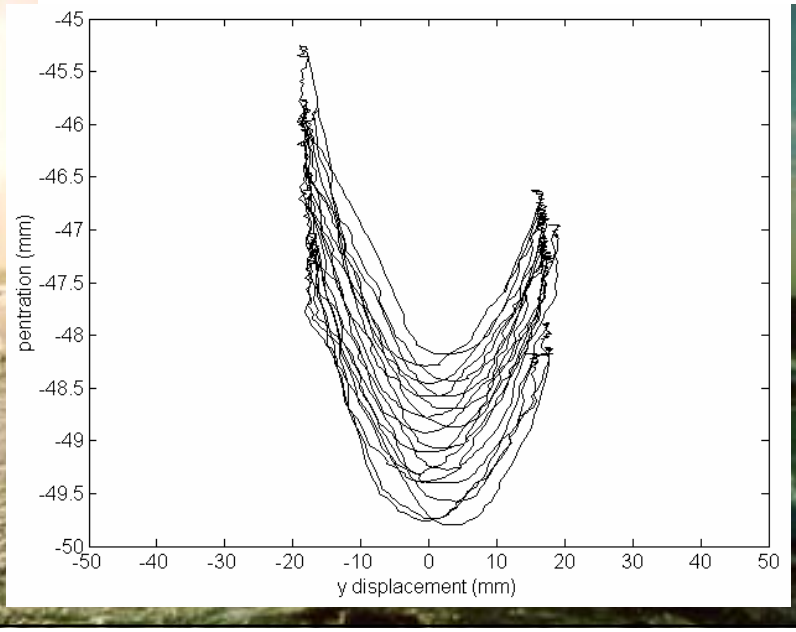
Décroissance du déplacement horizontal avec l'ensouillage (cycles à force contrôlée)

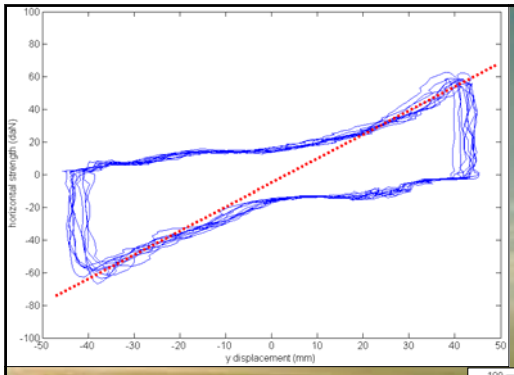


Résistance latérale après l'application des cycles

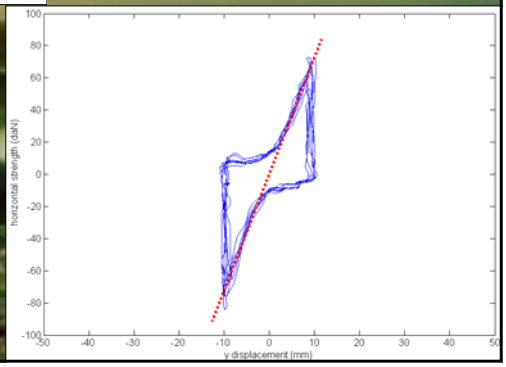


Courbes cycliques Pénétration-déplacement horizontal



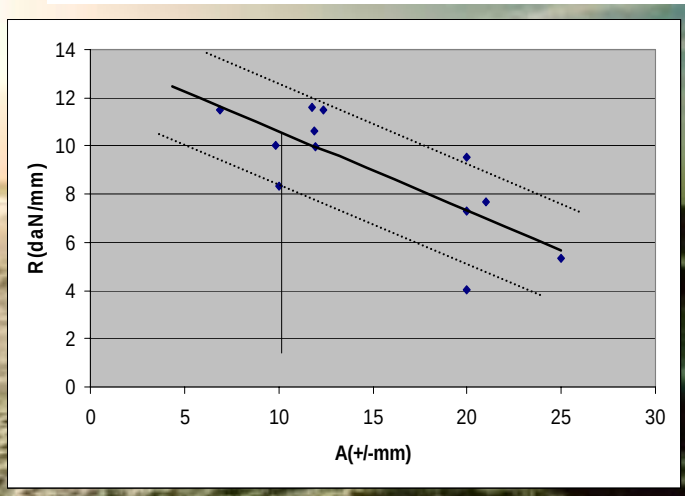


Load controlled test
Double amplitude 120 daN
Period 6s
Pipe-soil Lateral Stiffness: 7 daN/mm



Displacement controlled test
Double amplitude 21mm
Pipe-Soil Lateral Stiffness: 3 daN/mm

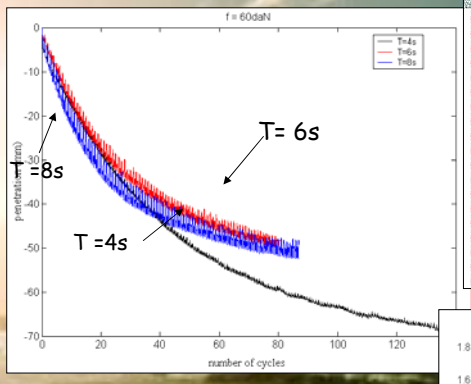
Décroissance de la raideur latérale avec l'amplitude des cycles

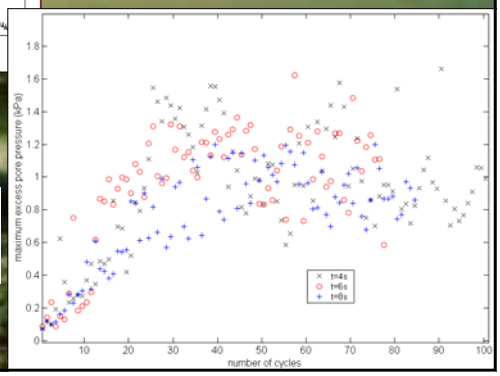


R ~ 10daN/mm

R ~ 100 kN/m2

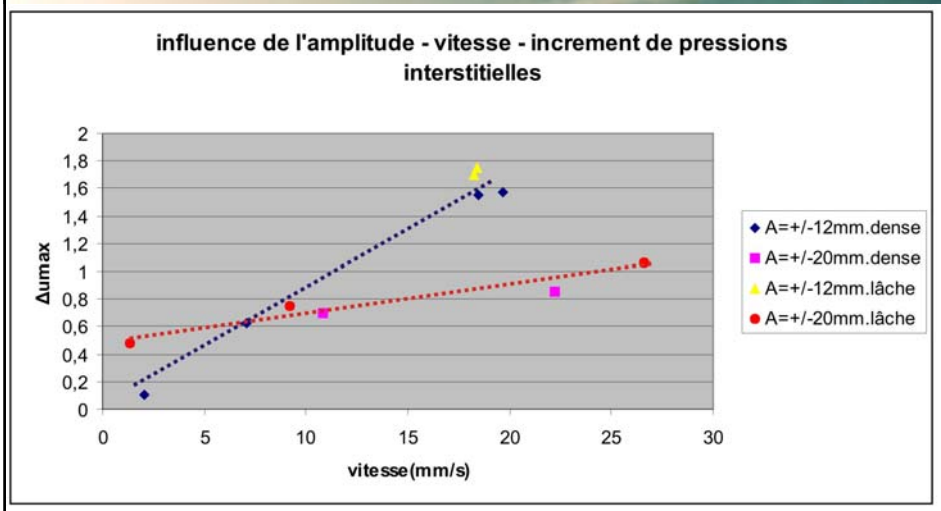
Influence de la Période de chargement sur la pénétration du pipe Amplitude 60 daN, D_R=60%, périodes 4, 6 & 8s



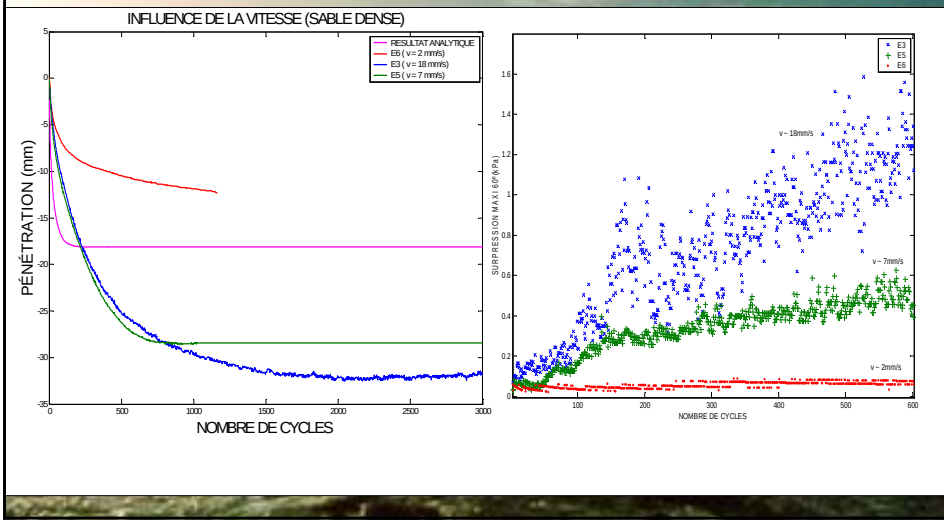


Conditions drainées/partiellement drainées ou non drainées selon la période et l'amplitude des cycles

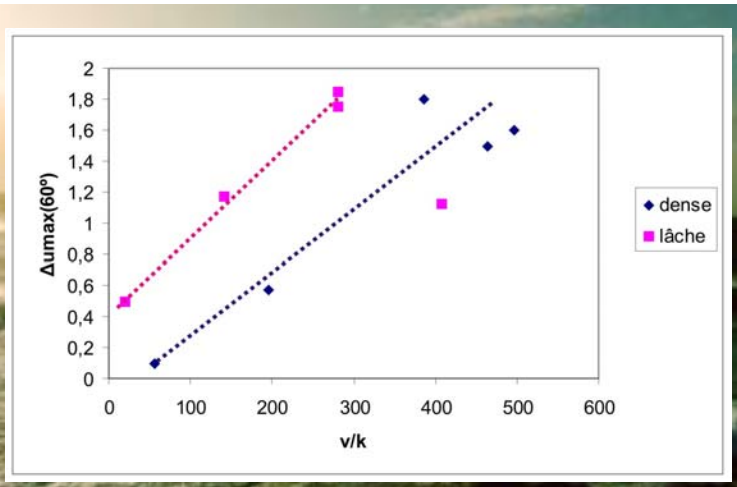
Rôle de la vitesse de déplacement du pipe



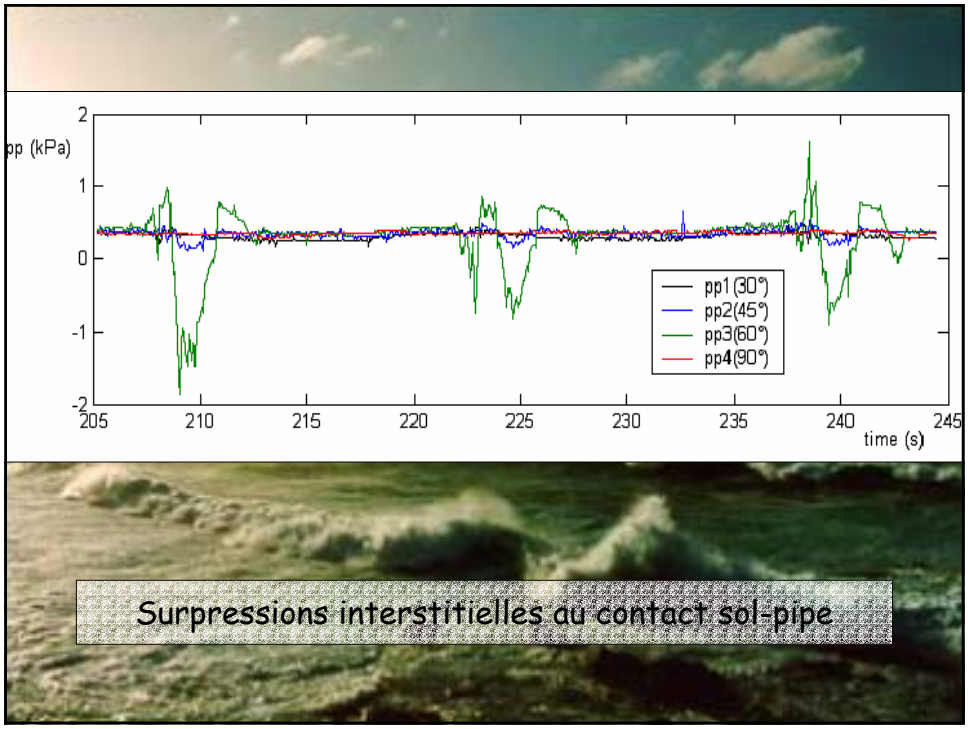
Rôle de la vitesse de sollicitation sur les surpressions interstitielles de contact



Influence du rapport vitesse/perméabilité sur les surpressions interstitielles

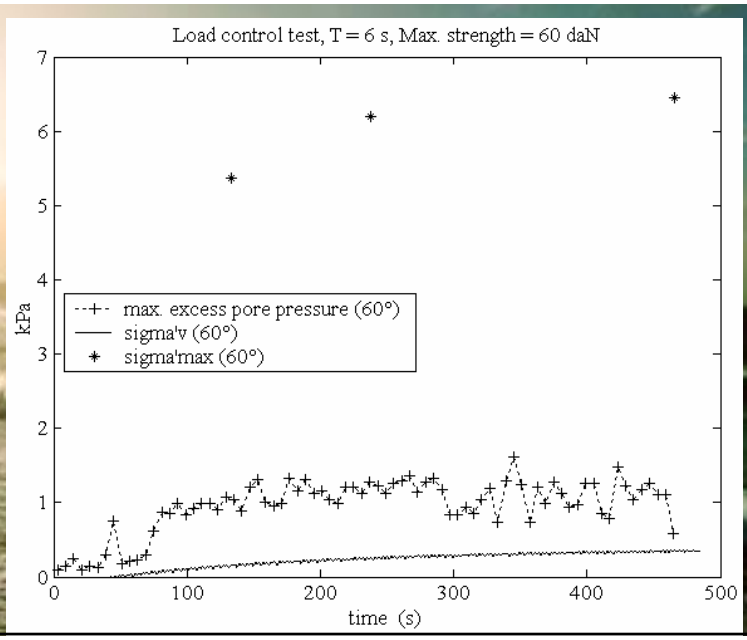


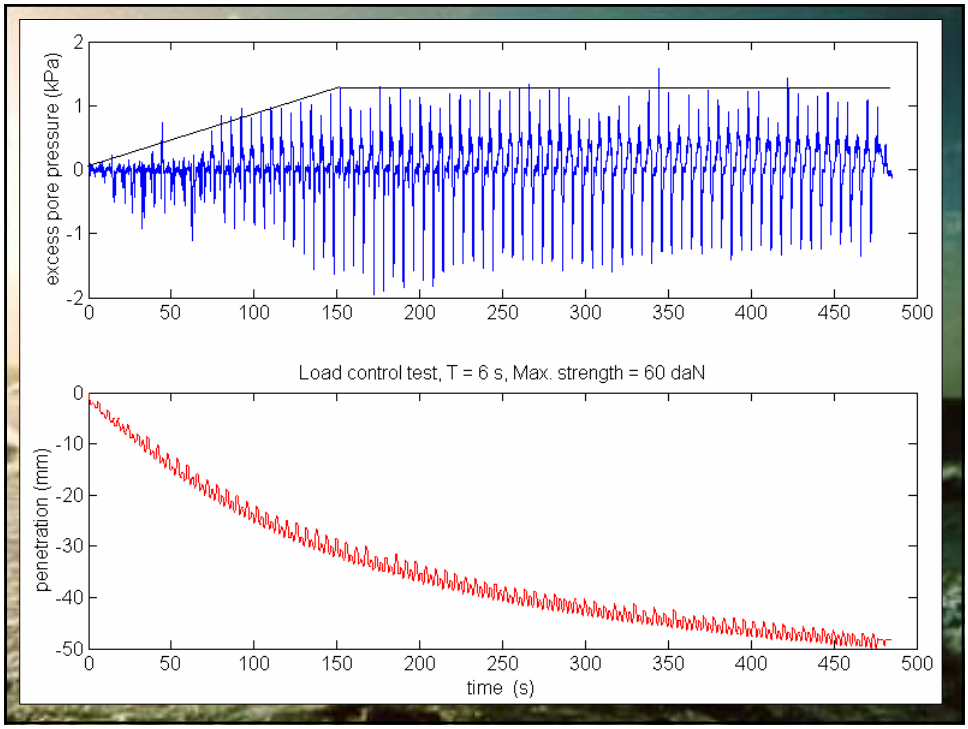
Surpressions interstitielles et liquéfaction



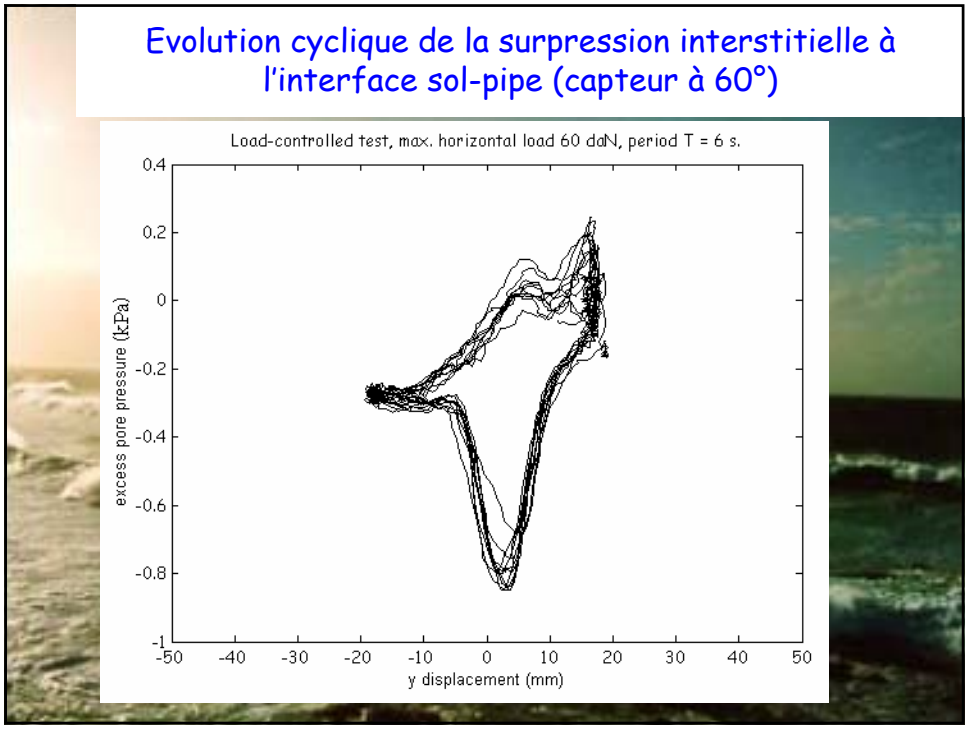
Surpressions interstitielles au contact sol-pipe

Surpression interstitielle à 60° sous le pipe comparée à la contrainte effective verticale et à celle de butée





Evolution cyclique de la surpression interstitielle à l'interface sol-pipe (capteur à 60°)



Visualisation de la liquéfaction

Essai à déplacement contrôlé,
Dr = 35 %, T=2s, Uy=10mm

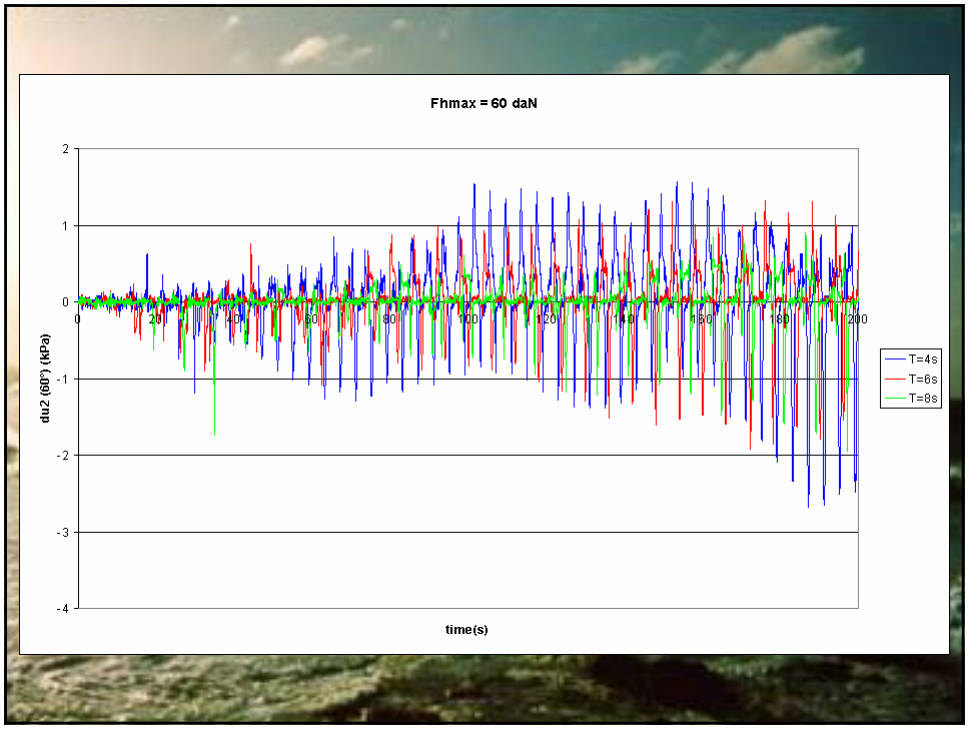
Conclusions

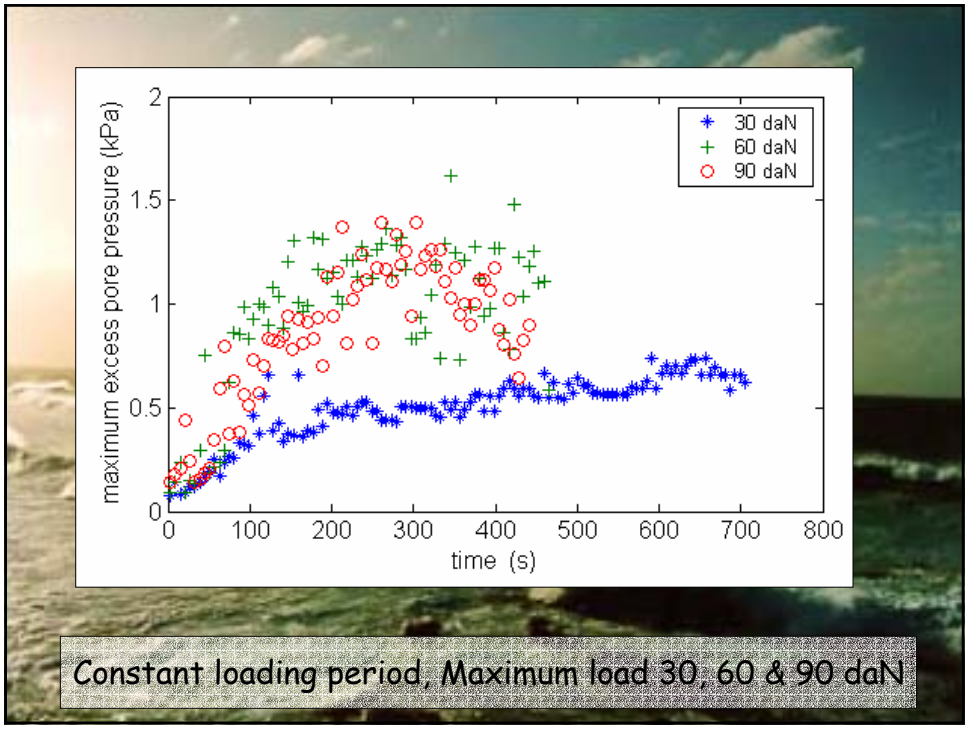
- La pénétration cyclique du pipe est fonction du développement des surpressions interstitielles (liée à la densité du sol, l'amplitude et la période du chargement)
- La visualisation du processus d'ensouillage met en évidence un phénomène de liquéfaction local autour du pipe, qui joue un rôle important dans la pénétration
- Le développement des surpressions dépend de la vitesse de chargement, en relation avec la perméabilité du sol (drainage ou non drainage)

Merci de votre attention

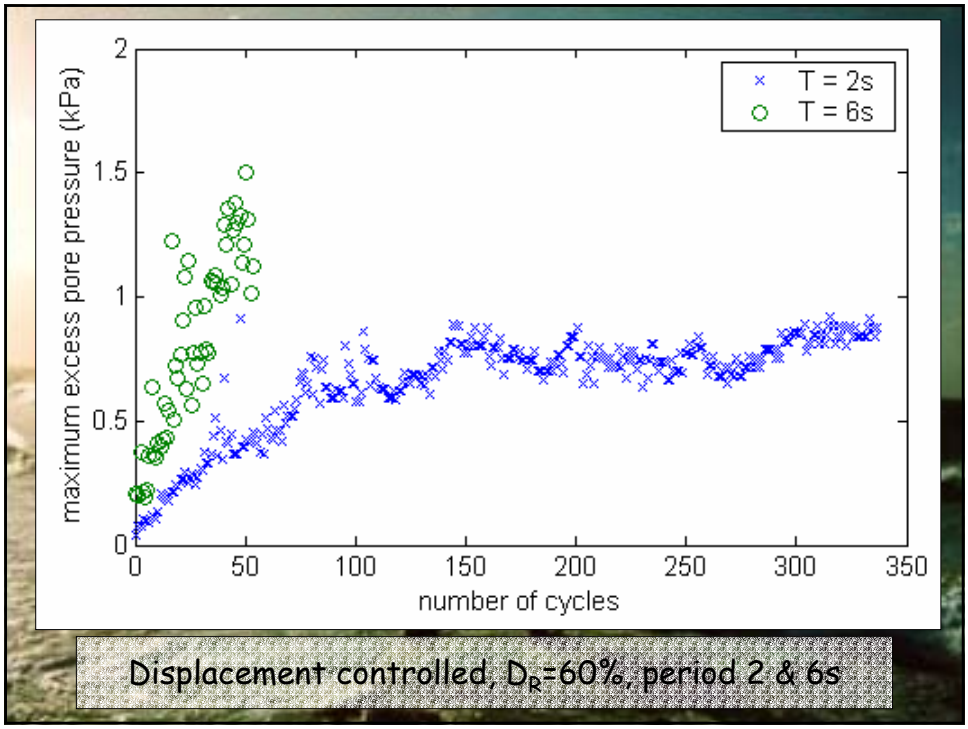
Testing program agrandir le texte

Test Type	Sand Density	Period	Max. Strength	Amplitude'2	Amplitude
load controlled	Dr=35%	T=4s	Fhmax=50daN		
load controlled	Dr=35%	T=2s	Fhmax=50daN		
load controlled	Dr=60%	T=4s	Fhmax=50daN		
load controlled	Dr=60%	T=2s	Fhmax=50daN		
load controlled	Dr=60%	T=4s	Fhmax=30daN		
load controlled	Dr=60%	T=4s	Fhmax=60daN		
load controlled	Dr=60%	T=4s	Fhmax=90daN		
load controlled	Dr=60%	T=6s	Fhmax=60daN		
displacement controlled	Dr=60%	T=2s		Uy=21mm	Uy=10mm
load controlled	Dr=60%	T=8s	Fhmax=60daN		
load controlled	Dr=60%	T=6s	Fhmax=30daN		
displacement controlled	Dr=60%	T=6s		Uy=105mm	Uy=52mm
displacement controlled	Dr=35%	T=1s		Uy=10mm	Uy=5mm
load controlled	Dr=35%	T=6s	Fhmax=60daN		
displacement controlled	Dr=35%	T=15s		Uy=80mm	Uy=40mm
displacement controlled	Dr=35%	T=15s		Uy=120mm	Uy=60mm
displacement controlled	Dr=35%	T=15s		Uy=160mm	Uy=80mm





Constant loading period, Maximum load 30, 60 & 90 daN



Displacement controlled, D_R=60%, period 2 & 6s