



## Modèle simplifié 3D de l'interaction sol-structure: implantation dans Cast3m.

Stéphane Grange  
(Post-Doctorant IRSN)

MCF Université Joseph Fourier/Laboratoire 3S-R

Journée du club Cast3m  
Jeudi 26 Novembre 2009





**Priority 1.1.6.3**  
*Global Change and Ecosystems*

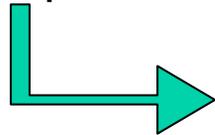
## *Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides*



*Réduction des risques pour les séismes et les glissements de terrains*

**46 partenaires universitaires ou industriels à travers l'Europe  
travaillant sur divers projets:**

-conceptions issues des déplacements (« displacement based design »)



*-développement de stratégies de résolution simplifiée  
3D pour des structures en béton armé avec des  
conditions aux limites particulières (ISS)*

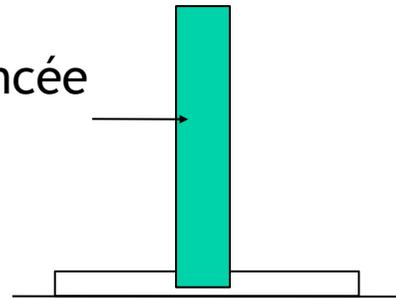
**+Contrat Post-doctoral à l'IRSN:**



## *But: Modéliser une fondation superficielle*



- structure élancée
- pile de pont



fondation superficielle

Nécessité de déterminer les conditions aux limites et d'étudier l'interaction sol-structure (ISS)

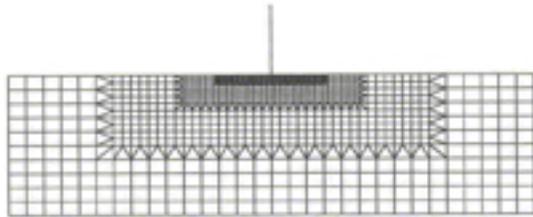


1. *Introduction au problème d'Interaction Sol-Structure (ISS) et au concept de macro-élément*
2. *Description des mécanismes non-linéaires*
  - mécanisme de plasticité*
  - mécanisme de décollement*
  - prise en compte de l'amortissement radiatif*
3. *Mise en œuvre numérique du macro-élément*
4. *Résultats numériques/ expérimentaux*
5. *Conclusion et développements futurs*



## 3 types de méthodes existent:

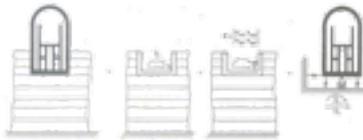
-méthodes directes



$$\underline{\underline{M}} \cdot \underline{\underline{\ddot{u}}} + \underline{\underline{C}} \cdot \underline{\underline{\dot{u}}} + \underline{\underline{K}} \cdot \underline{\underline{u}} = -\underline{\underline{M}} \cdot \underline{\underline{I}} a$$

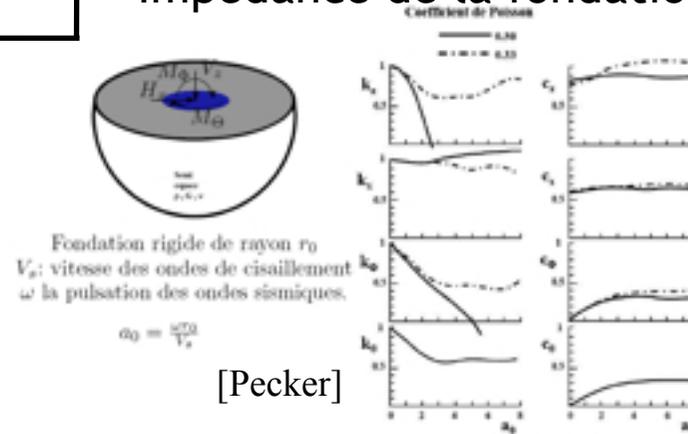
Impédance de la fondation

-méthode des sous-structures

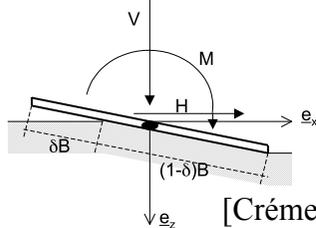


[Aubry, 1986]

[Chebli et al., 2008] [Kausel et al., 1978]



-macro-éléments



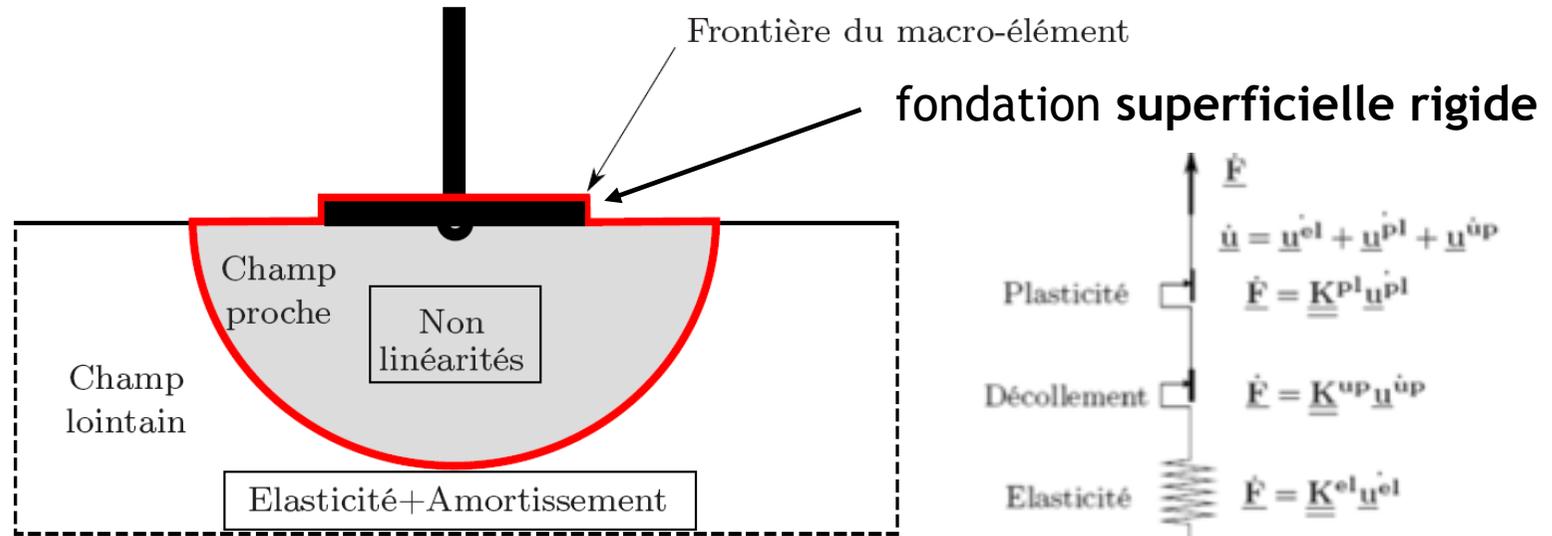
[Crémer, 2001]

*industrie off-shore*  
*problèmes cycliques*  
*Prob. dynamiques*

[Nova et Montrasio, 1991],  
[Martin, 1994], [Cassidy et al., 2002],  
[Montrasio et Nova, 1997], [Pedretti, 1998],  
[di Prisco et al., 2002], [di Prisco et Galli, 2006]  
[Paolucci et Pecker, 1997a], [Crémer, 2001],  
[Crémer et al., 2001], [Crémer et al., 2002].

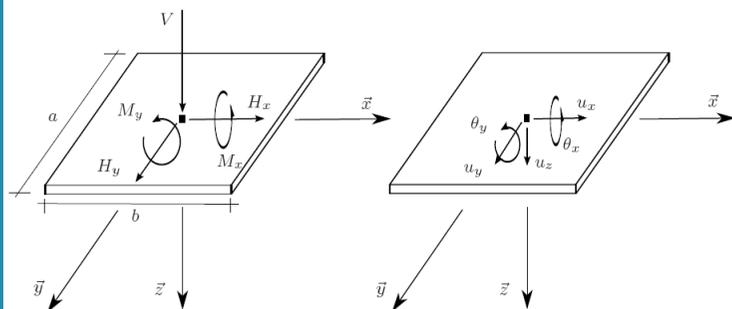


## • Concept de Macro-élément

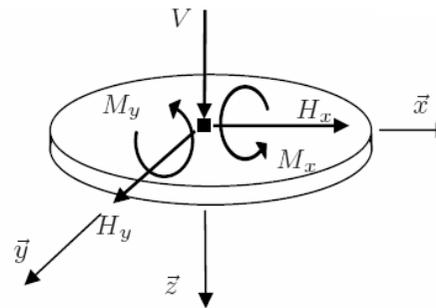


$$\begin{aligned} \underline{\dot{F}} &= \underline{\dot{u}}^{el} + \underline{\dot{u}}^{pl} + \underline{\dot{u}}^{up} \\ \text{Plasticité} & \quad \underline{\dot{F}} = \underline{K}^{pl} \underline{\dot{u}}^{pl} \\ \text{Décollement} & \quad \underline{\dot{F}} = \underline{K}^{up} \underline{\dot{u}}^{up} \\ \text{Elasticité} & \quad \underline{\dot{F}} = \underline{K}^{el} \underline{\dot{u}}^{el} \end{aligned}$$

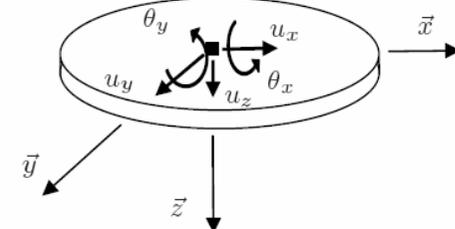
2 sous-domaines: champ proche et champ lointain



Adimensionnement adéquat des variables

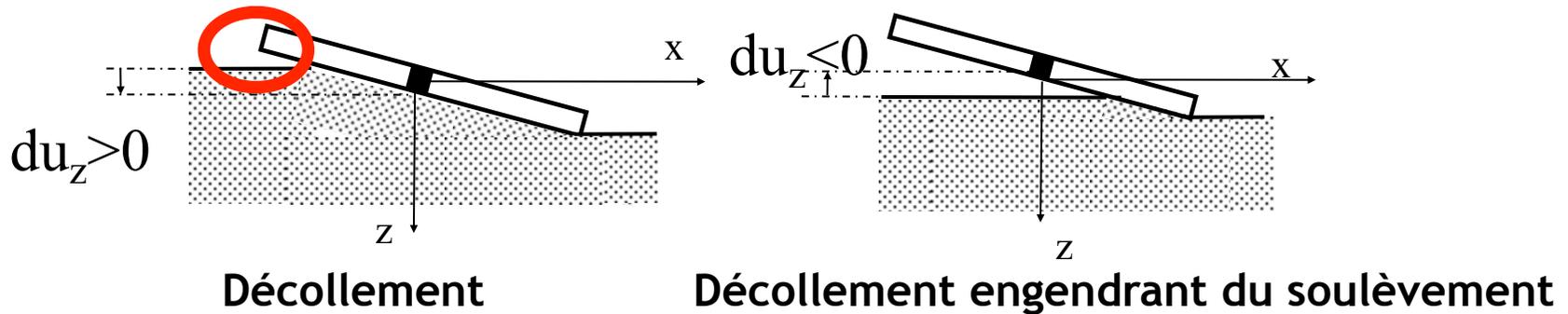


Efforts globaux



déplacements globaux

- Qu'est ce que « décollement » de la fondation veut dire??



soulèvement

=

décollement

+

déplacement vertical négatif



## 2. Description du modèle de plasticité

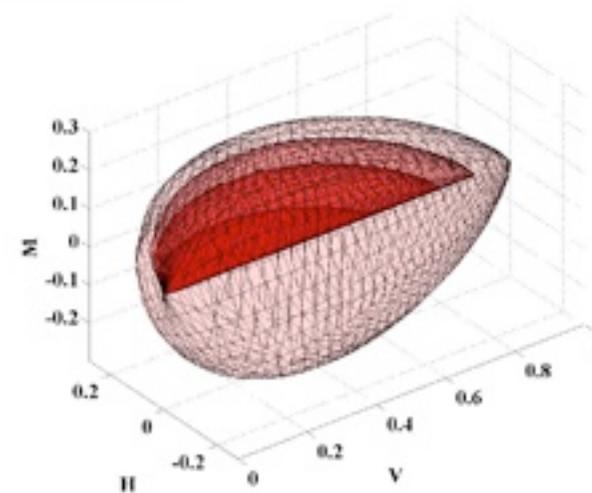
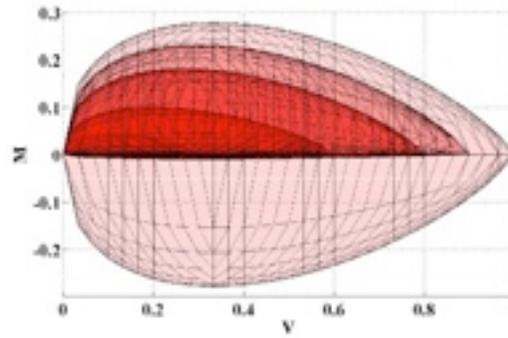
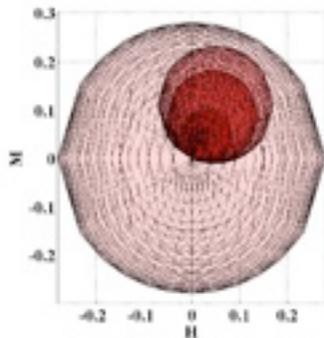
- Critère de rupture (développé pour décrire la plasticité avec décollement)

$$f_{\infty} \equiv \left( \frac{H'_x}{aV'^c(1-V')^d} \right)^2 + \left( \frac{M'_y}{bV'^e(1-V')^f} \right)^2 + \left( \frac{H'_y}{aV'^c(1-V')^d} \right)^2 + \left( \frac{M'_x}{bV'^e(1-V')^f} \right)^2 - 1 = 0$$

- Surface de charge

$$f_c(\underline{\mathbf{F}}, \underline{\mathbf{T}}, \rho, \gamma) \equiv \left( \frac{H'_x}{\rho a V'^c (\gamma - V')^d} - \frac{\alpha}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{M'_y}{\rho b V'^e (\gamma - V')^f} - \frac{\beta}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{H'_y}{\rho a V'^c (\gamma - V')^d} - \frac{\delta}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{M'_x}{\rho b V'^e (\gamma - V')^f} - \frac{\eta}{\rho} \right)^2 - 1 = 0$$

interaction dans les plans  
 $H'_x$ - $H'_y$  et  $M'_x$ - $M'_y$ :  
cercles

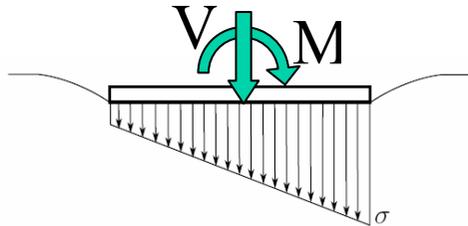


Adimensionnement des variables  $\Rightarrow$  axisymétrie



## 2. Description du modèle de décollement

### - Hyp: répartition linéaire et comportement sur sol élastique

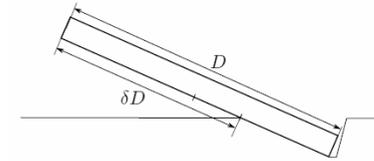


-Moment de renversement:  $M'_c = \frac{V'}{2}$

-Moment d'initiation au décollement

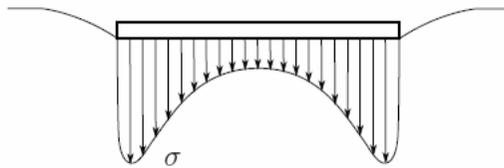
(rectangulaire-filante):  $M'_0 = \frac{V'}{6}$

(circulaire):  $M'_0 = \frac{V'}{8}$



$\delta$  pourcentage de décollement  $\rightarrow$  variable d'état pour le mécanisme de décollement

### - Répartition réelle des contraintes sur sol plastique

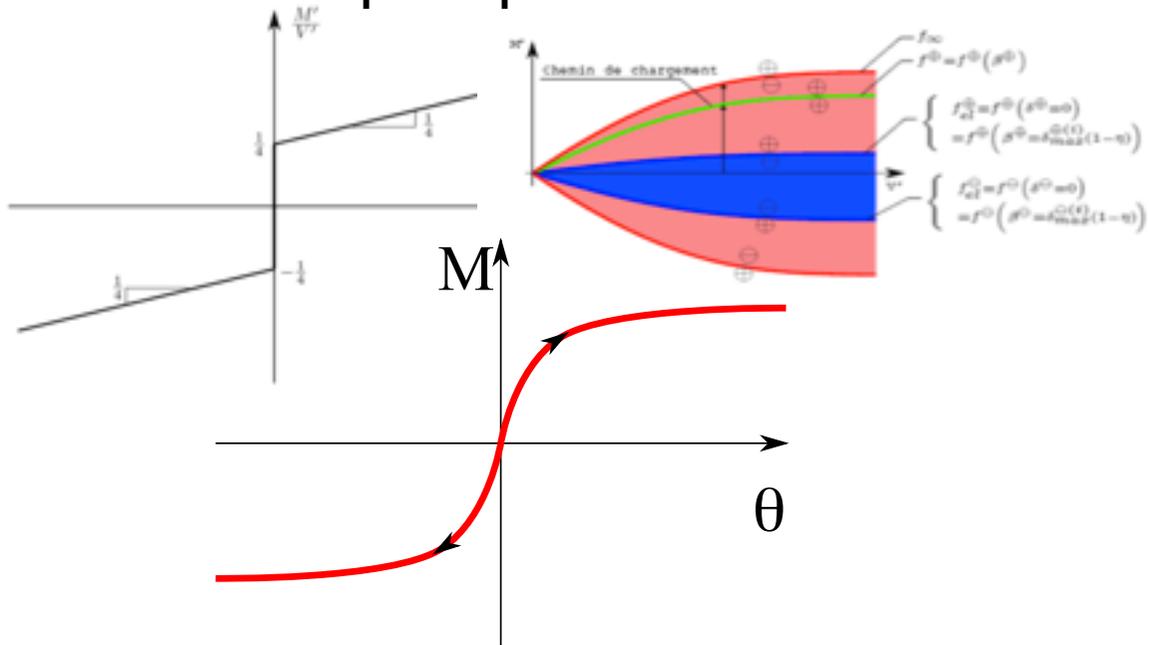


-Moment de renversement:  $M'_c = \frac{V'}{2}$

-Moment d'initiation au décollement

(rectangulaire-filante):  $M'_0 = \frac{V'}{4}$

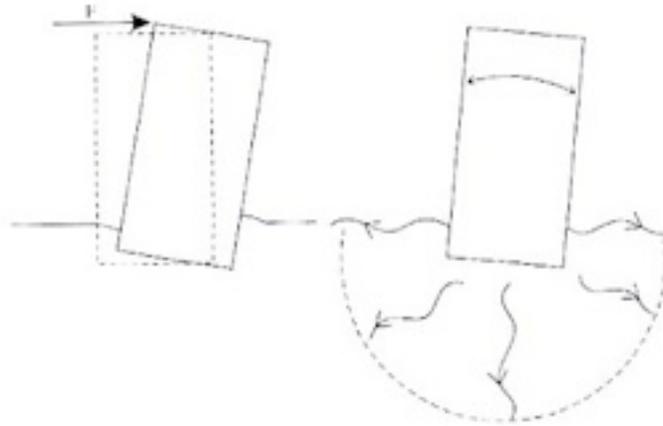
(circulaire):  $M'_0 = \frac{V'}{6}$



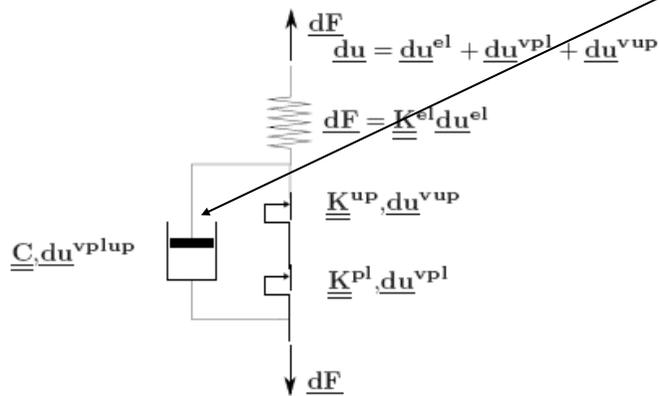
Si sol élastique  $\rightarrow$  comportement non-linéaire réversible du décollement

## 2. Description: Amortissement radiatif

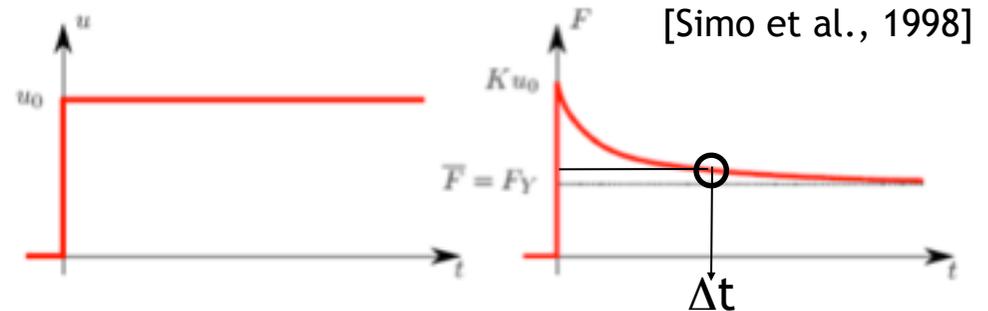
- Amortissement radiatif



Dissipation des ondes dans le massif de sol semi-infini



Ajout d'un amortisseur en parallèle des modèles de plasticité et décollement



Effet de l'amortisseur sur un pas de temps



1. *Introduction au problème d'Interaction Sol-Structure (ISS) et au concept de macro-élément*

2. *Description des mécanismes non-linéaires*

- mécanisme de plasticité*
- mécanisme de décollement*
- prise en compte de l'amortissement radiatif*

3. *Mise en œuvre numérique du macro-élément*

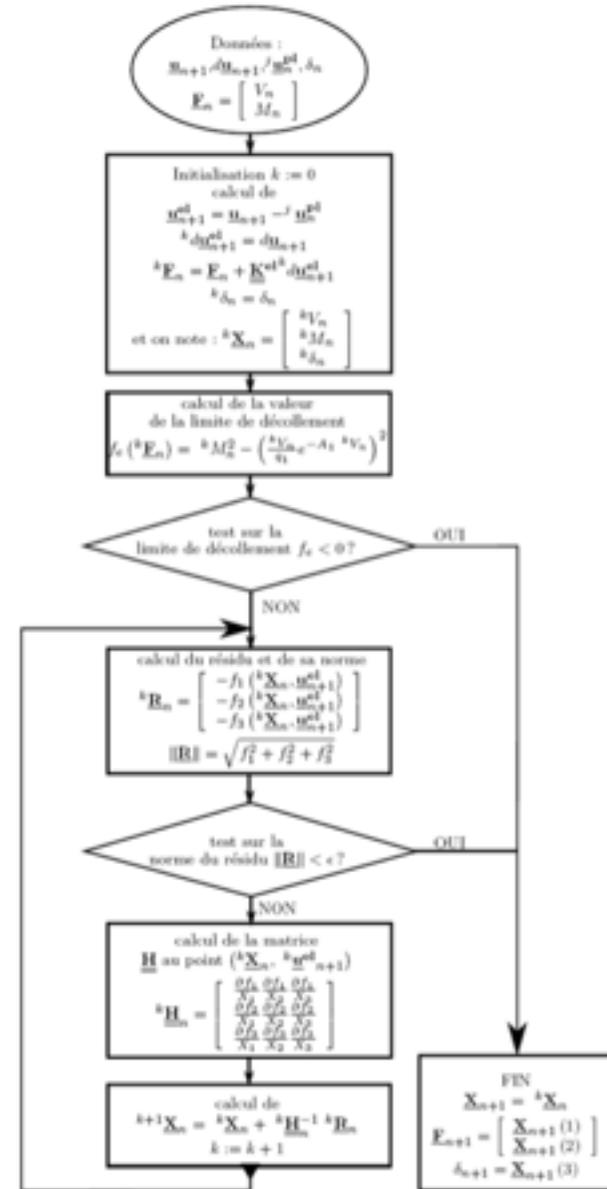
4. *Résultats numériques/ expérimentaux*

5. *Conclusion et développements futurs*



### 3. Mise en œuvre numérique en Fortran

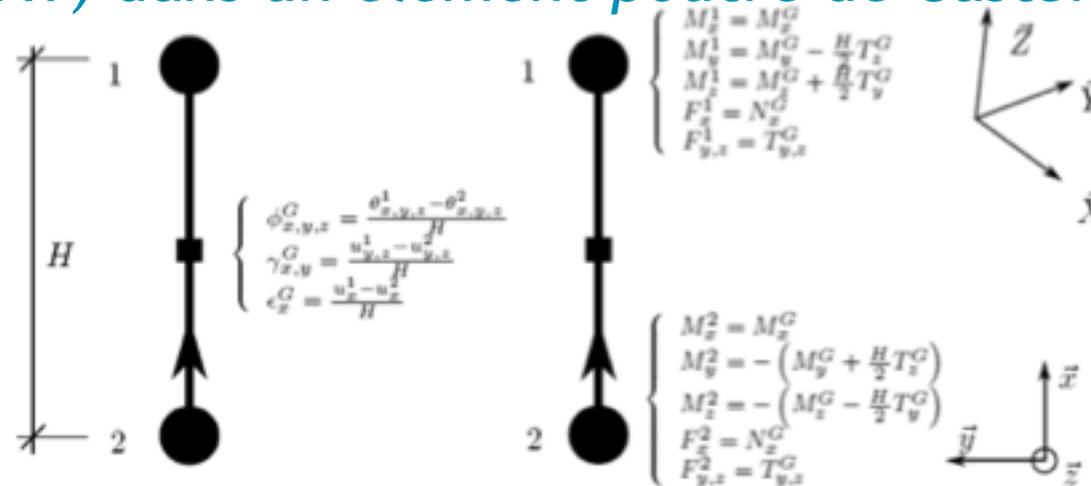
## Algorithme de résolution du modèle de décollement élastique





### 3. Mise en œuvre numérique sous Cast3m

#### « Implantation de l'élément en tant que loi matériau (UMAT) dans un élément poutre de Cast3m



**Avantages:** -simplicité d'implantation

**Inconvénients:**

- on doit donner une longueur arbitraire à l'élément, un module d'Young, coefficient de Poisson, etc...

- la matrice de raideur (utilisée pour la méthode de Newton) dépend des paramètres élastiques de l'élément Timoshenko et non de ceux de l'élément.

On prend par exemple:  $E_{equiv} = \frac{K_{zz}H}{S}$

- données initiales à rentrer à la main



### 3. Mise en œuvre numérique sous Cast3m

Impédance de la  
fondation [Gazetas]

$n^{\circ}$	variable	unité	$n^{\circ}$	variable	unité
1	$E$	$[N/m^2]$	14	$a$	[.]
2	$\nu$	[.]	15	$b$	[.]
3	$\rho$	$[kg/m^3]$	16	$c$	[.]
4	$\alpha$	$[1/^\circ K]$	17	$d$	[.]
5	$D$	[m]	18	$e$	[.]
6	$L_x$	[m]	19	$f$	[.]
7	$L_y$	[m]	20	$q_{max}$	$[N/m^2]$
8	$H$	[m]	21	$a_9$	[.]
9	$K_{elz}$	$[N/m]$	22	$a_6$	[.]
10	$K_{elh}$	$[N/m]$	23	$\eta_v$	[s]
11	$K_{elry}$	$[Nm/rad]$	24	$d_t$	[s]
12	$K_{elrx}$	$[Nm/rad]$	25	$a_8$	[.]
13	$K_{elt}$	$[Nm/rad]$			

$$\eta_v = \frac{C_z}{K_{elz}}$$

La plus grande partie de ces paramètres reste inchangée



### 3. Mise en œuvre numérique sous Cast3m

#### Données initiales du modèle sous Cast3m

$n^{\circ}$	variable	valeur	$n^{\circ}$	variable	valeur
1	$\epsilon_e$	0	17	$\delta_p$	0
2	$u_{1z}^{pl}$	0	18	$\kappa_p$	1
3	$u_{1x}^{pl}$	0	19	$\xi_p$	1
4	$\theta_{1y}^{pl}$	0	20	$\Delta_{min}$	1
5	$u_{1y}^{pl}$	0			
6	$\theta_{1x}^{pl}$	0			
7	$q_{11}$	0.001	21	$u_{2z}^{pl}$	0
8	$q_{12}$	0.001	22	$u_{2x}^{pl}$	0
9	$q_{13}$	0.001	23	$\theta_{2y}^{pl}$	0
10	$q_{14}$	0.001	24	$u_{2y}^{pl}$	0
11	$q_{15}$	0.05	25	$\theta_{2x}^{pl}$	0
12	$F_{11}$	0	26	$q_{21}$	0.001
13	$F_{12}$	0			
14	$F_{13}$	0			
15	$F_{14}$	0			
16	$F_{15}$	0			



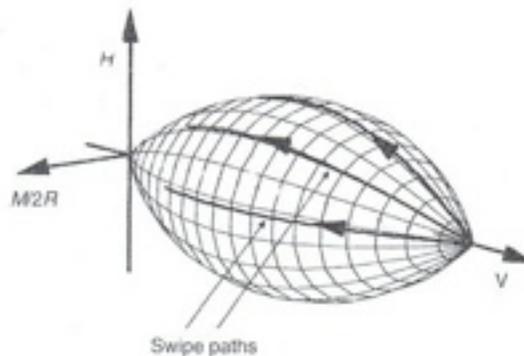
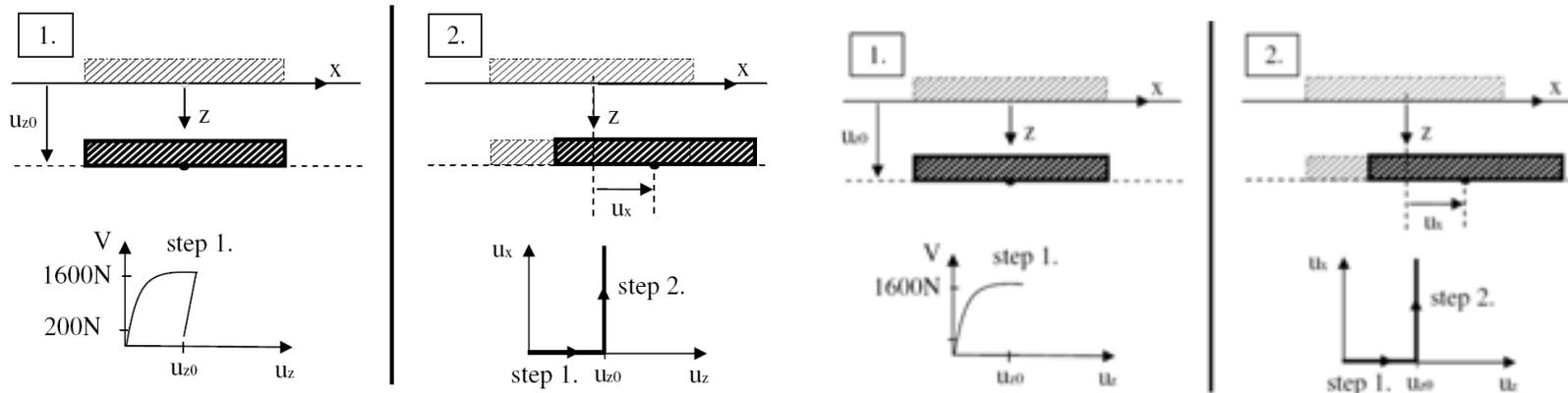
1. *Introduction au problème d'Interaction Sol-Structure (ISS) et au concept de macro-élément*
2. *Description des mécanismes non-linéaires*
  - mécanisme de plasticité*
  - mécanisme de décollement*
  - prise en compte de l'amortissement radiatif*
3. *Mise en œuvre numérique du macro-élément*
4. *Résultats numériques/ expérimentaux*
5. *Conclusion et développements futurs*

# 4.1. Résultats: Essais statiques, Swipe Tests

- Comportement statique sur sable: Swipe test

Essais réalisés sur des fondations circulaires reposant sur du sable [Gottardy, Houlsby, Butterfield 1999]

Swipe test = essais en déplacements imposés → la réponse en effort épouse le critère de rupture



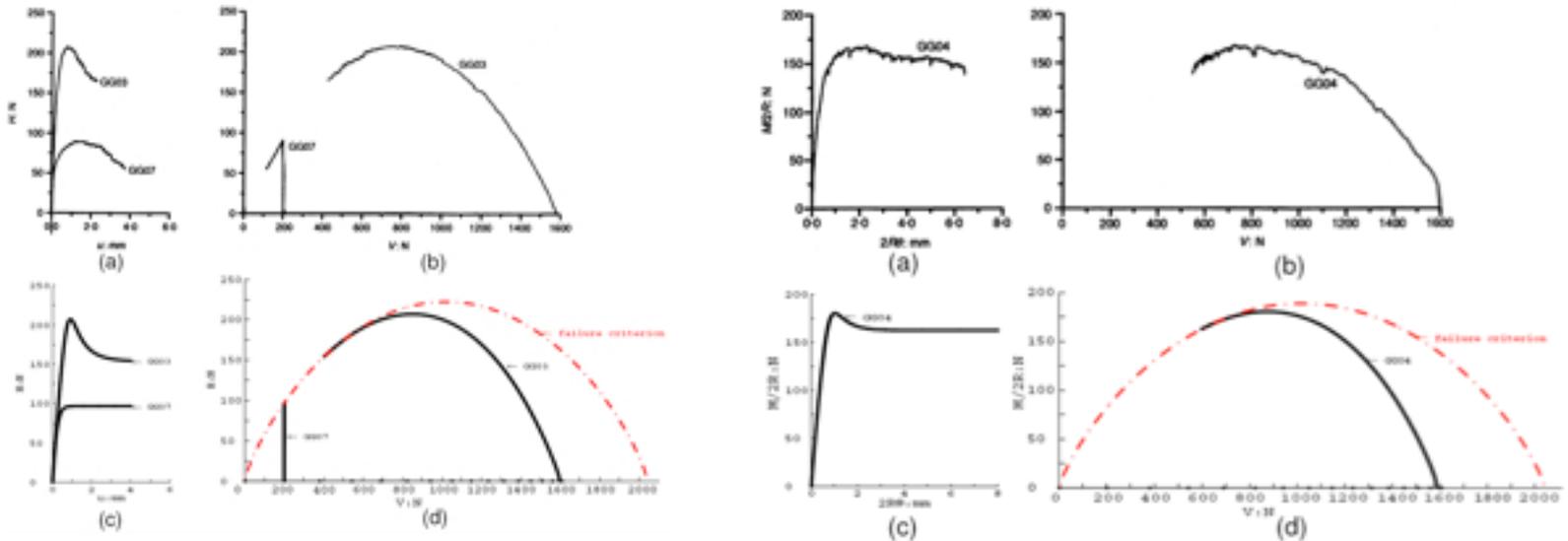


# 4.1 Résultats: Essais statiques, Swipe Tests

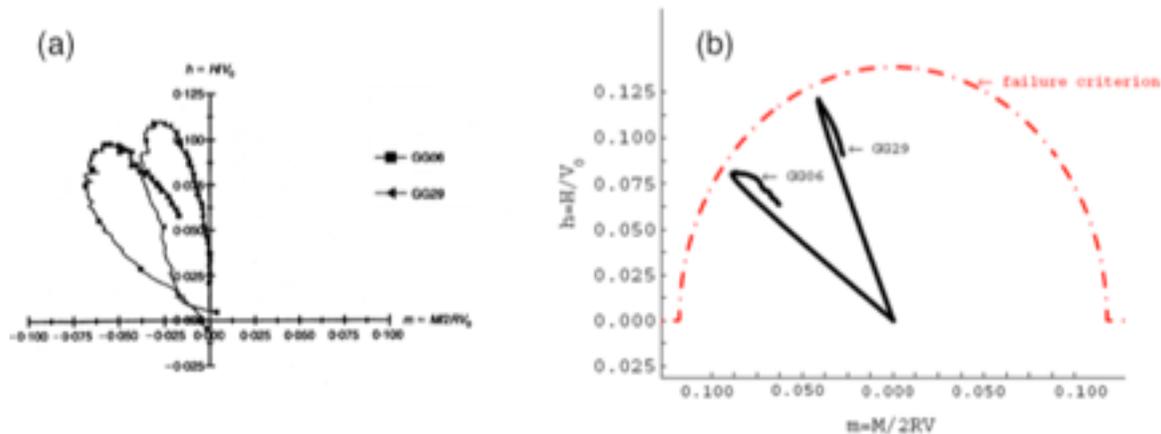
## • Comportement statique sur sable: Swipe test

→ Augmentation du déplacement horizontal

Augmentation de la rotation



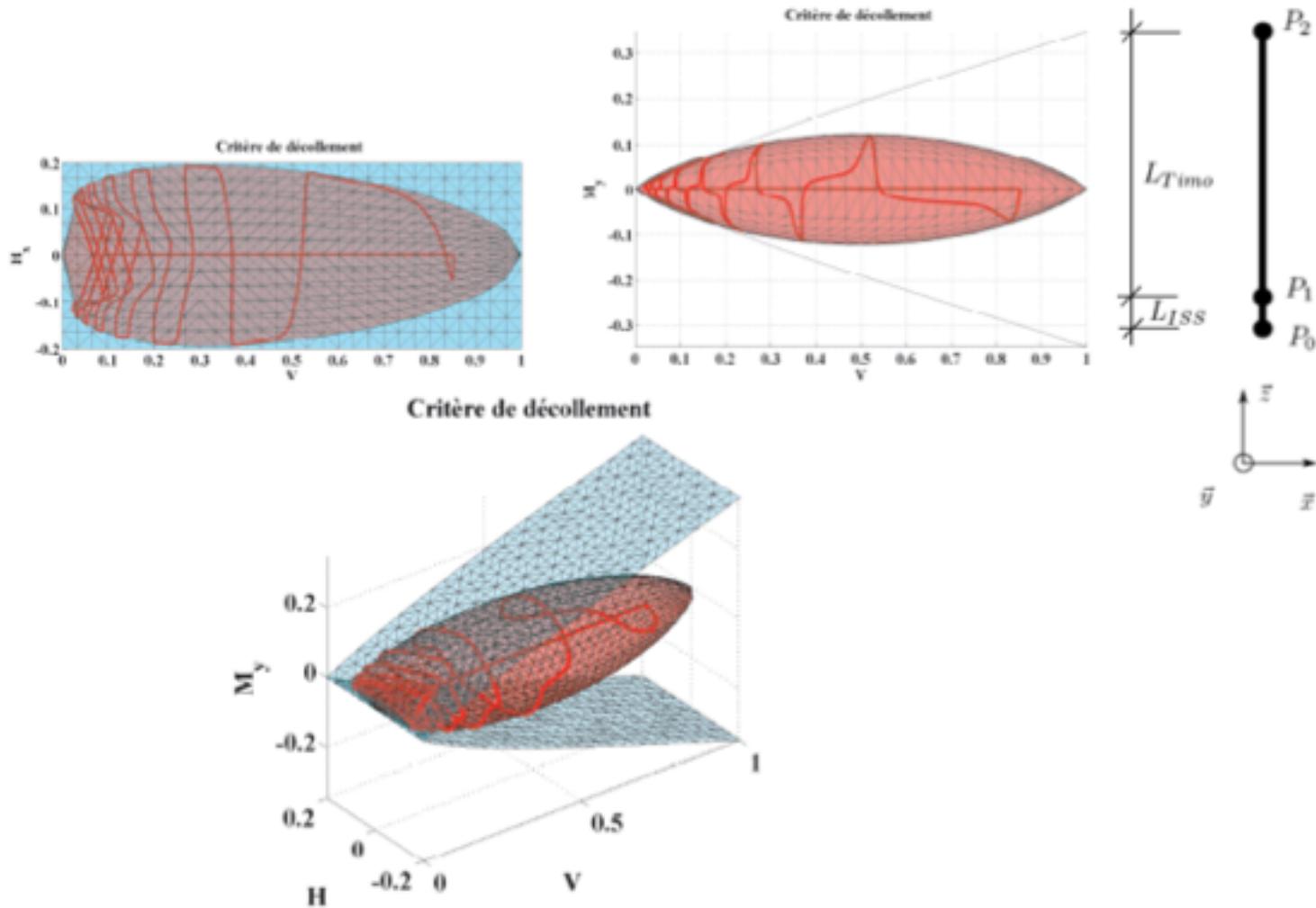
→ Combinaison déplacement horizontal+rotation



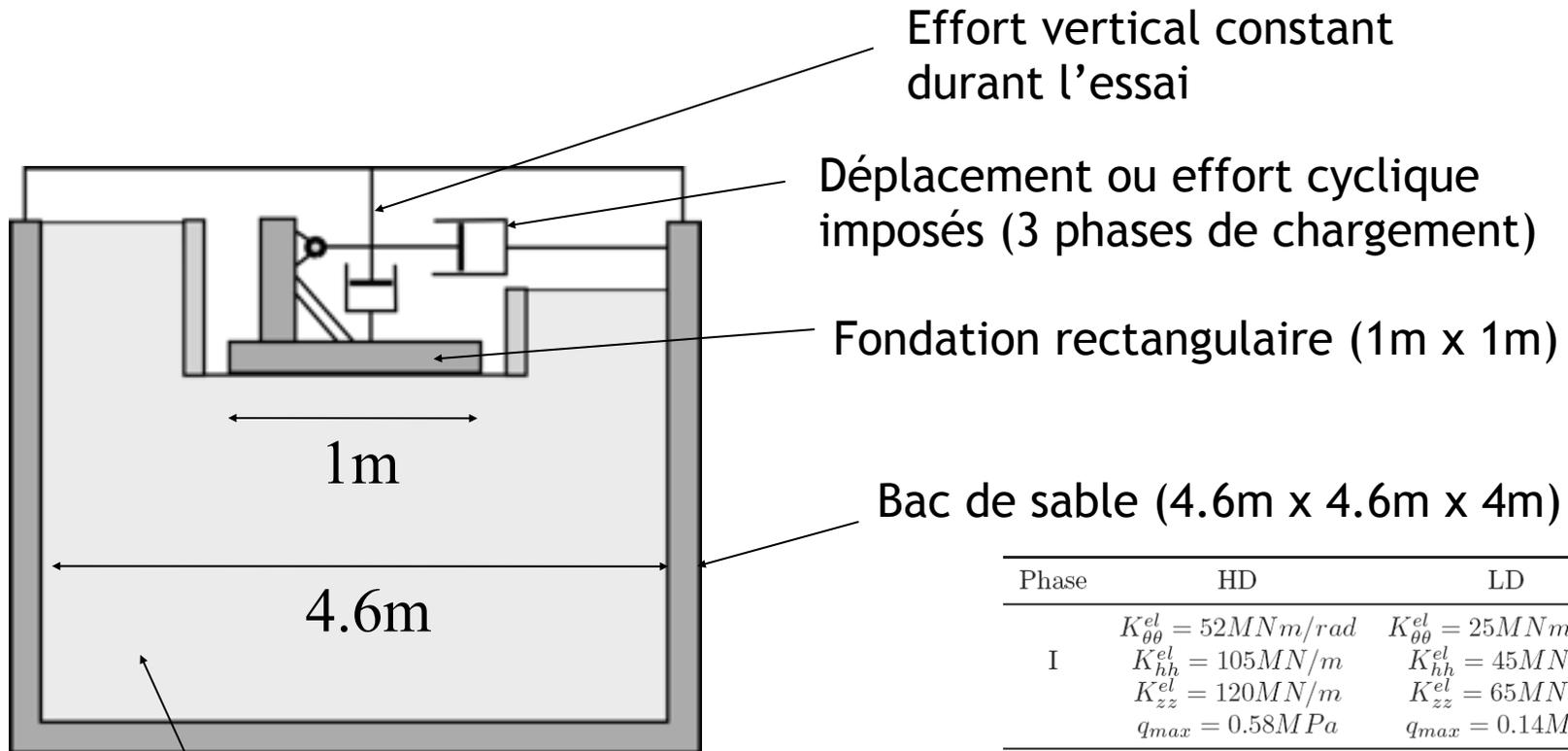


# 4.1 Résultats: Essais statiques, Swipe Tests

→ une combinaison de déplacements cyclique sous Cast3m (caractère 3D)



- Comportement cyclique sur sable: Essais TRISEE



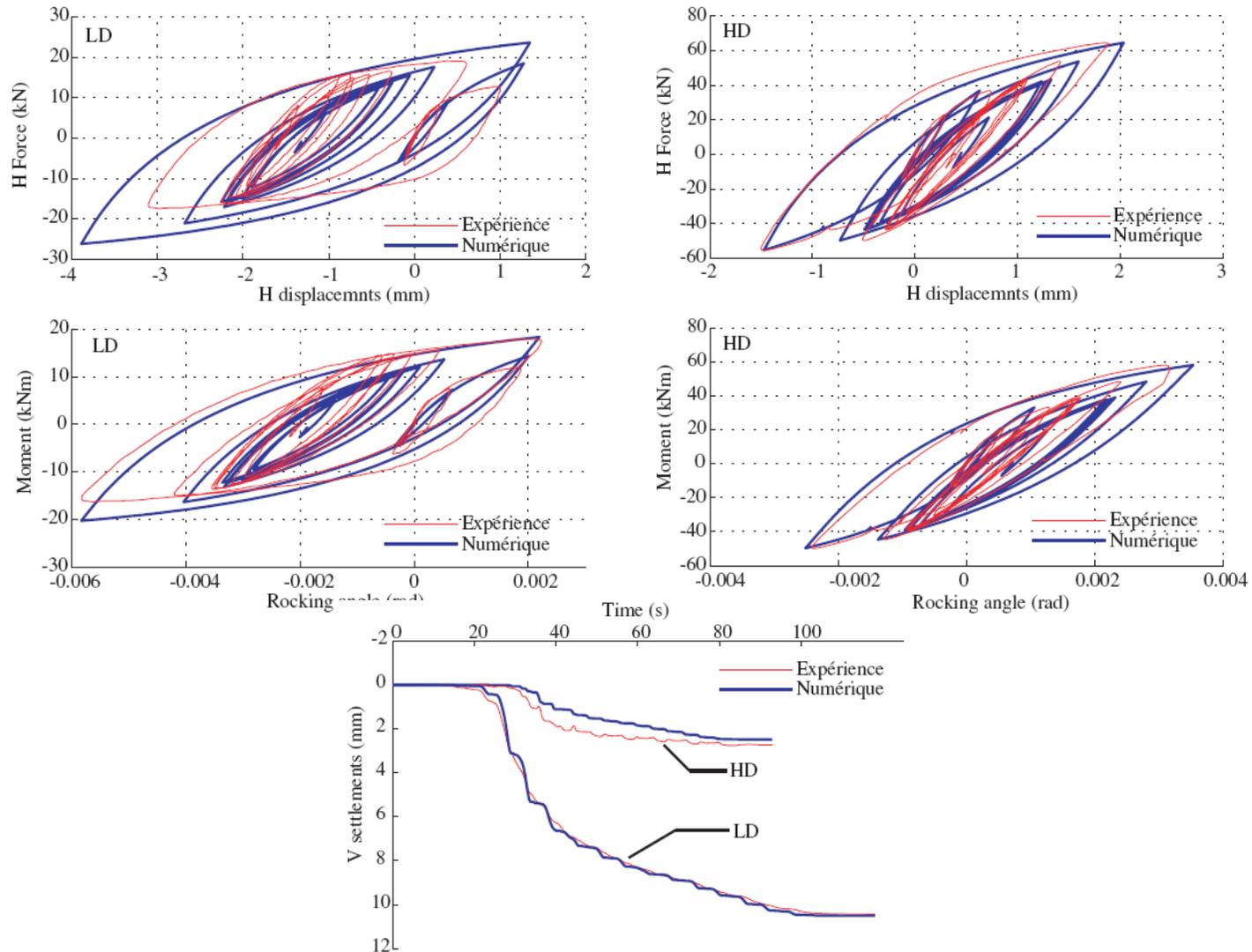
2 sables différents (haute densité HD,  $D_r=85\%$  et faible densité LD,  $D_r=45\%$ )

Phase	HD	LD
I	$K_{\theta\theta}^{el} = 52MNm/rad$	$K_{\theta\theta}^{el} = 25MNm/rad$
	$K_{hh}^{el} = 105MN/m$	$K_{hh}^{el} = 45MN/m$
	$K_{zz}^{el} = 120MN/m$	$K_{zz}^{el} = 65MN/m$
	$q_{max} = 0.58MPa$	$q_{max} = 0.14MPa$
II	$K_{\theta\theta}^{el} = 52MNm/rad$	$K_{\theta\theta}^{el} = 15MNm/rad$
	$K_{hh}^{el} = 105MN/m$	$K_{hh}^{el} = 35MN/m$
	$K_{zz}^{el} = 120MN/m$	$K_{zz}^{el} = 40MN/m$
	$q_{max} = 0.58MPa$	$q_{max} = 0.14MPa$
III	$K_{\theta\theta}^{el} = 35MNm/rad$	$K_{\theta\theta}^{el} = 5MNm/rad$
	$K_{hh}^{el} = 75MN/m$	$K_{hh}^{el} = 14MN/m$
	$K_{zz}^{el} = 80MN/m$	$K_{zz}^{el} = 26.6MN/m$
	$q_{max} = 1.5MPa$	$q_{max} = 0.185MPa$



## 4.2 Résultats: Essais cycliques TRISEE

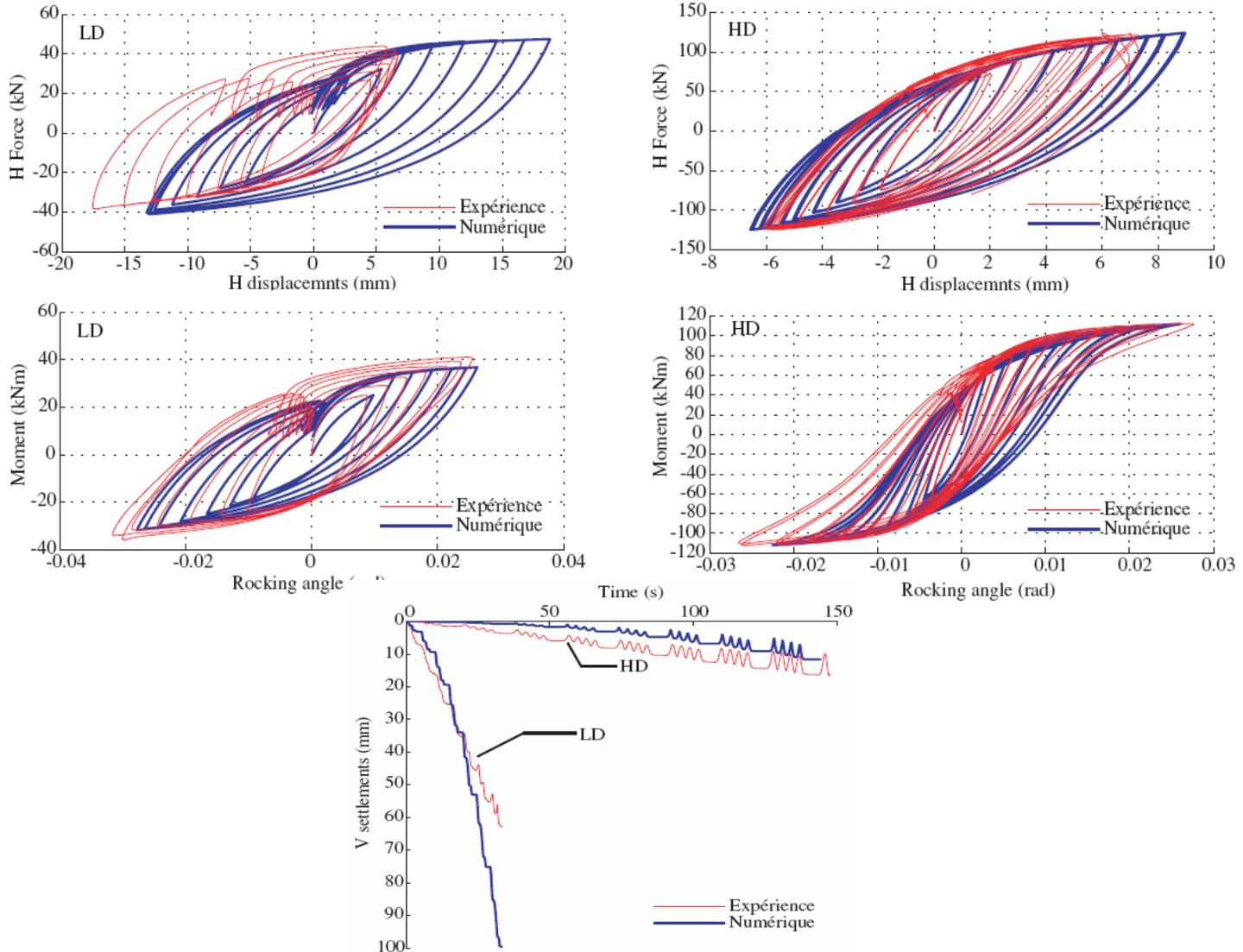
### Phase II: efforts horizontaux imposés





## 4.2 Résultats: Essais cycliques TRISEE

### Phase III: déplacements horizontaux imposés



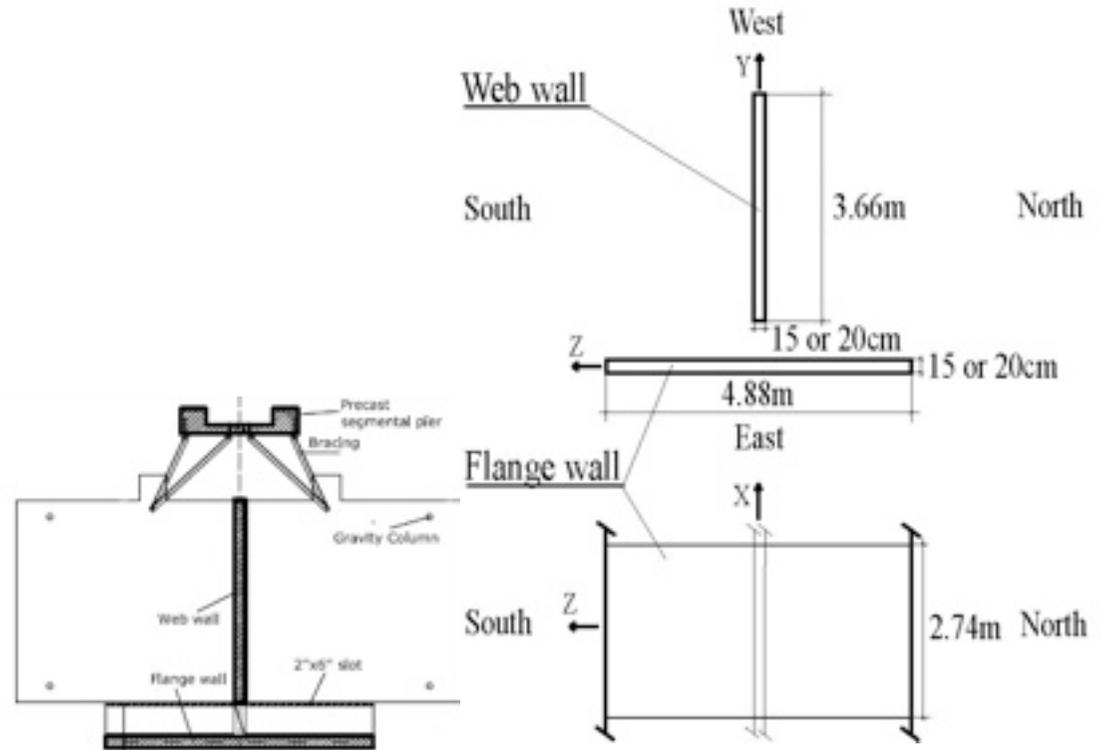


## 4.5 Etudes paramétriques, structure NEES

- Etude paramétrique de l'ISS sur un bât. de 7 étages



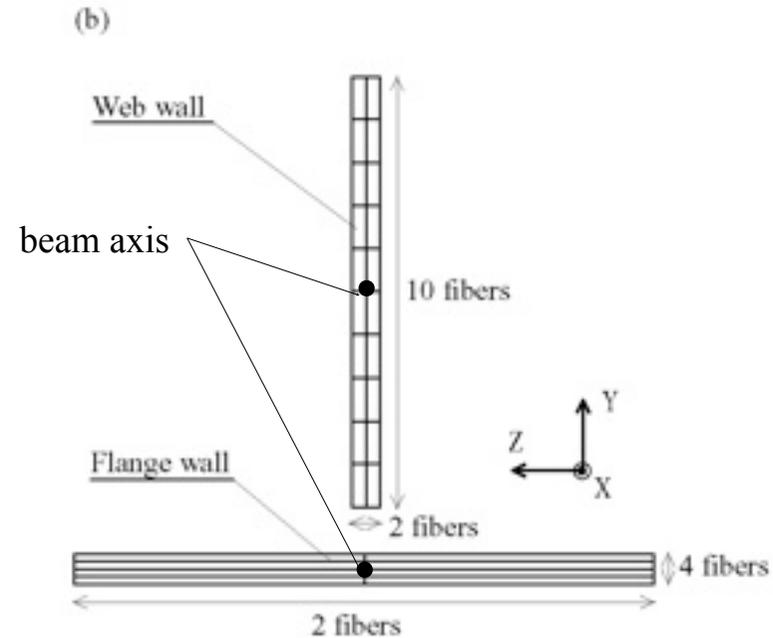
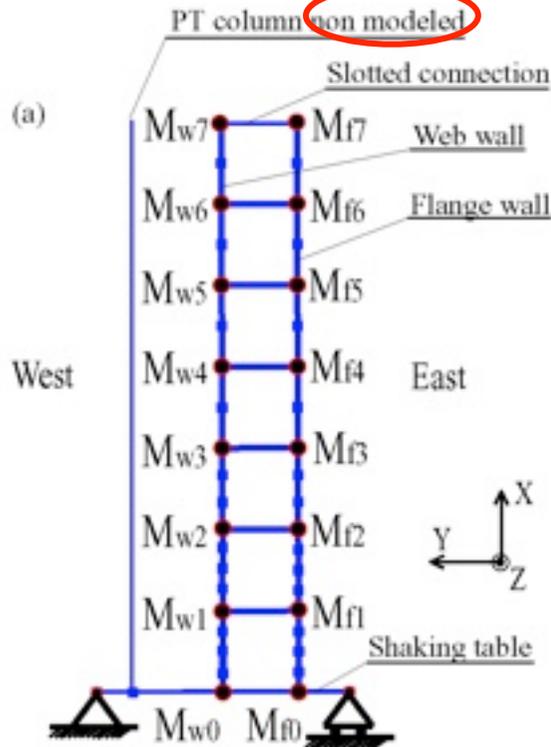
Vue Nord Ouest de la  
Maquette



Données géométriques

# 4.5: Etudes paramétriques, structure NEES

Poutres multifibres Timoshenko implantés par 3S-R dans FedeesLab (toolbox Matlab)



Node	Masses $M_w$ (kg)	Rotational inertia $I_{wz}$ ( $kg.m^2$ )
$w_0$	11780	20080
$w_1$	18470	23100
$w_2$	17910	22000
$w_3$	17910	22000
$w_4$	17910	22000
$w_5$	17910	22000
$w_6$	17910	22000
$w_7$	16200	22000

Table 1: Masses and rotational inertia for nodes in the web wall

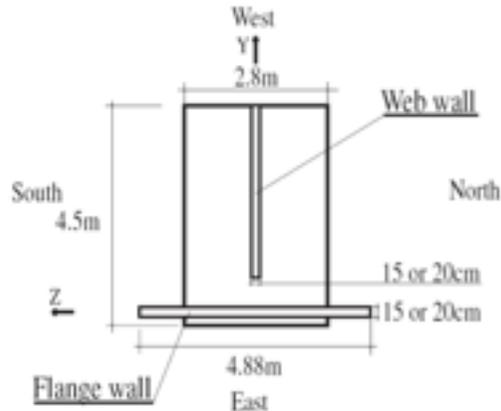
Node	Masses $M_f$ (kg)	Rotational inertia $I_{fz}$ ( $kg.m^2$ )
$f_0$	15500	5499
$f_1$	5376	3582
$f_2$	4576	3071
$f_3$	4576	3071
$f_4$	4576	3071
$f_5$	4576	3071
$f_6$	4576	3071
$f_7$	2126	1535

Table 2: Masses and rotational inertia for nodes in the flange wall

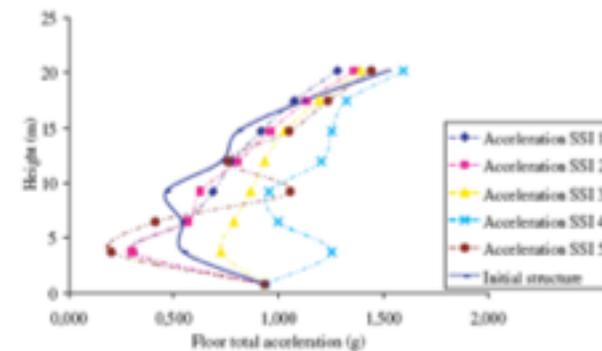
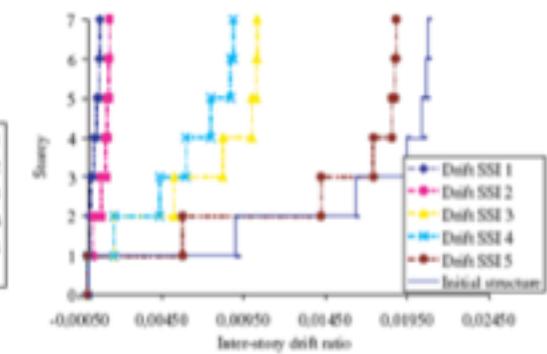
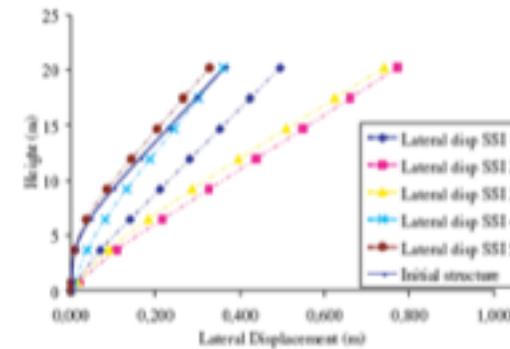
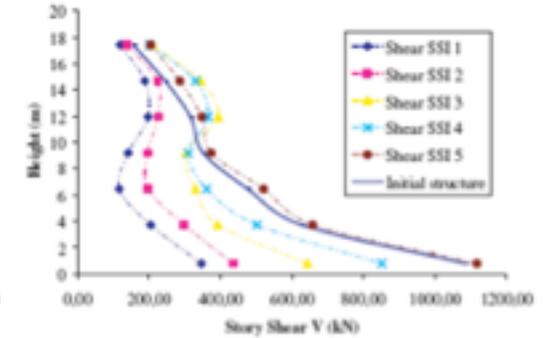
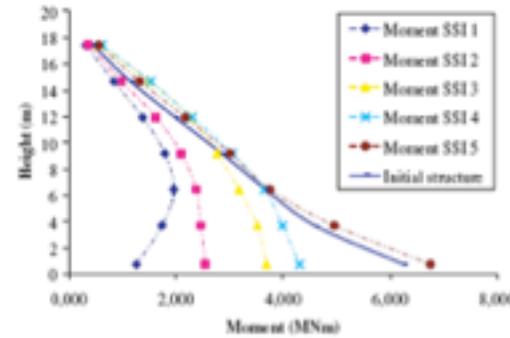


## Influence de l'interaction sol-structure

5 sols différents

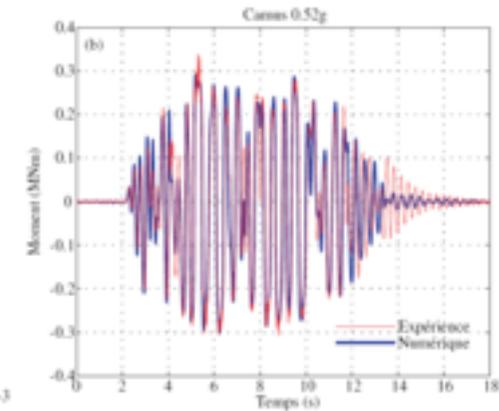
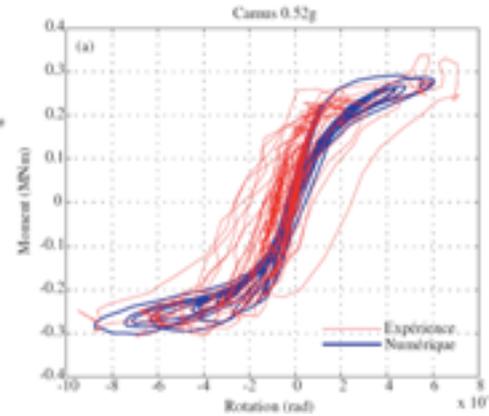
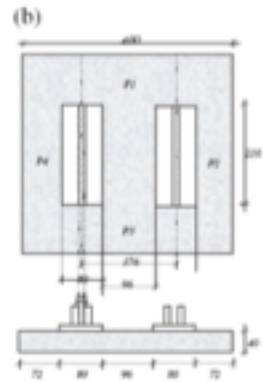


N° du sol	cisaillement module $G_0$ et angle de vitesse $V_s$	cohésion $c$ et angle de frottement $\phi$	Rigidité et amortissement [Gazetas, 1991]	contrainte ultime de compression $q_{max}$
Sol 1 (classe S1)	$V_s = 70m/s$ $G_0 = 9.31MPa$	$c_u = 20kPa$ $\phi_u = 0$	$K_{00} = 295.19MNm/rad$ $K_{11} = 101.22MN/m$ $K_{33} = 82.35MN/m$ $C_{00} = 7.49MNm/rad$ $C_{11} = 2.57MN/m$ $C_{33} = 2.09MN/m$	$q_{max} = 0.20MPa$
Sol 2 (classe D)	$V_s = 100m/s$ $G_0 = 193MPa$	$c_u = 70kPa$ $\phi_u = 0$	$K_{00} = 601.5MNm/rad$ $K_{11} = 206.15MN/m$ $K_{33} = 167.8MN/m$ $C_{00} = 10.70MNm/rad$ $C_{11} = 3.67MN/m$ $C_{33} = 2.98MN/m$	$q_{max} = 0.40MPa$
Sol 3 (classe C)	$V_s = 180m/s$ $G_0 = 61.53MPa$	$c_u = 250kPa$ $\phi_u = 0$	$K_{00} = 1951.4MNm/rad$ $K_{11} = 668.9MN/m$ $K_{33} = 544.43MN/m$ $C_{00} = 19.50MNm/rad$ $C_{11} = 6.60MN/m$ $C_{33} = 5.403MN/m$	$q_{max} = 1.43MPa$
Sol 4 (classe B)	$V_s = 565m/s$ $G_0 = 606.5MPa$		$K_{00} = 7805.1MNm/rad$ $K_{11} = 2675.6MN/m$ $K_{33} = 2177.7MN/m$ $C_{00} = 38.24MNm/rad$ $C_{11} = 13.20MN/m$ $C_{33} = 10.67MN/m$	$q_{max} = 4.013MPa$
Sol 5 (classe A)	$V_s > 800m/s$		$K_{00} = 18302MNm/rad$ $K_{11} = infinity$ $K_{33} = infinity$ $C_{00} = 0MNm/rad$ $C_{11} = 0MN/m$ $C_{33} = 0MN/m$	$q_{max} = infinity$

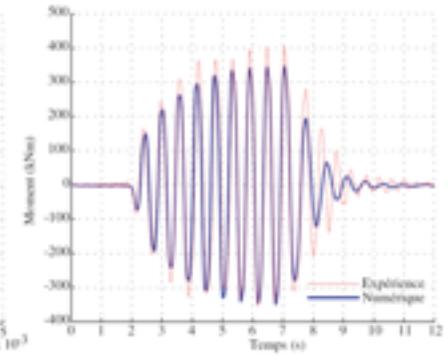
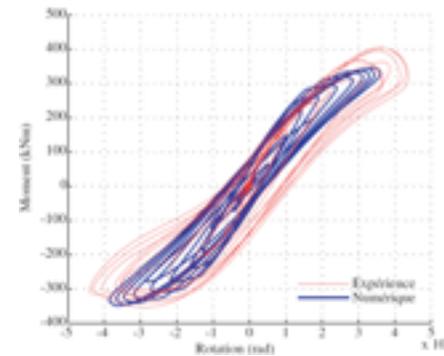
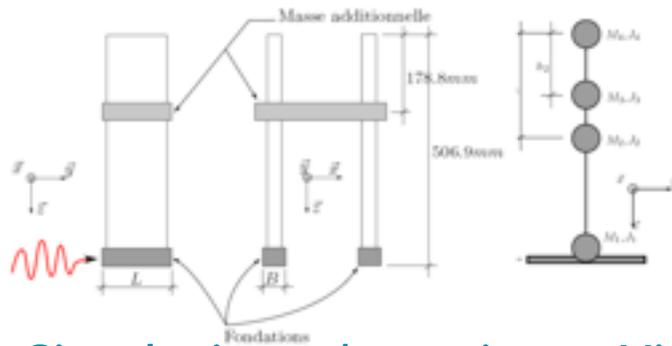




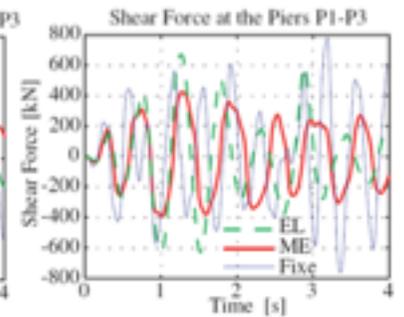
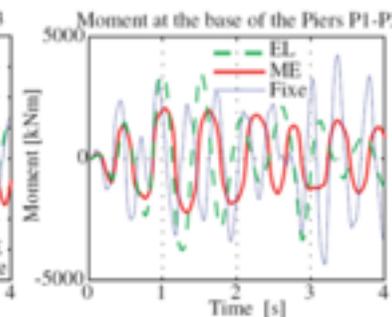
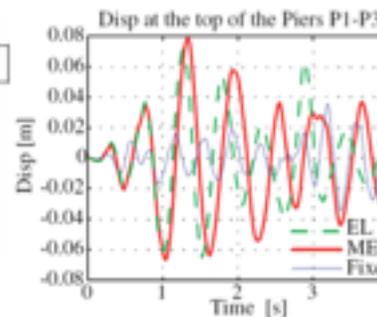
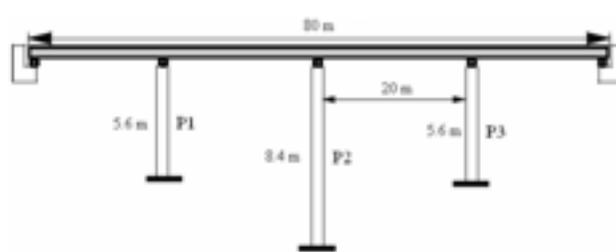
## Simulations dynamiques Camus IV



## Simulations dynamiques DAVIS



## Simulations dynamiques Viaduc Ispra





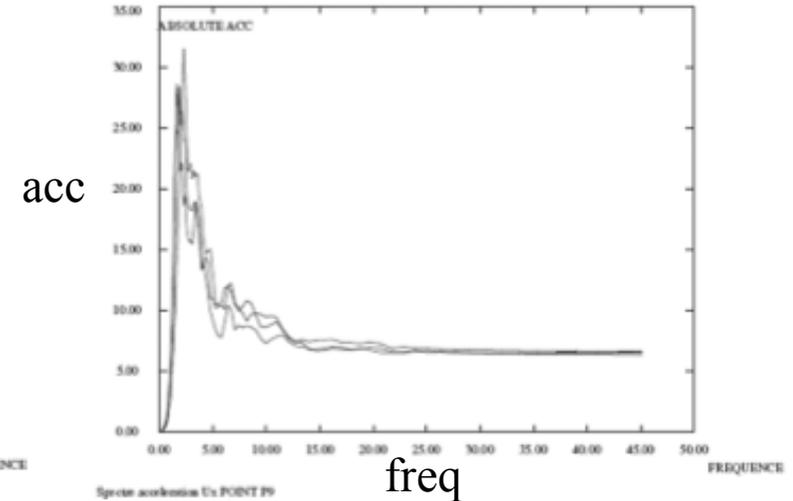
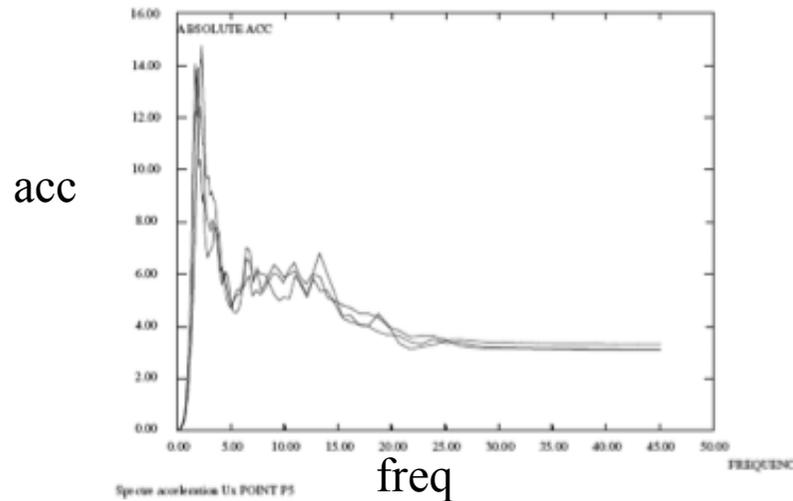
# 4.7 Résultats: Analyse d'un BR

## Reprise du modèle brochette EDF

Analyse modale:

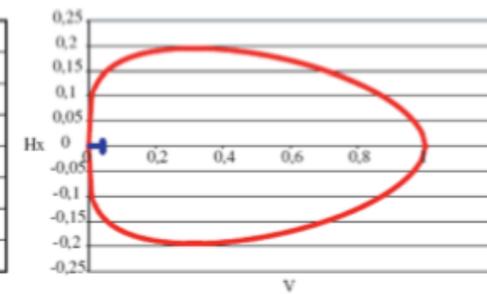
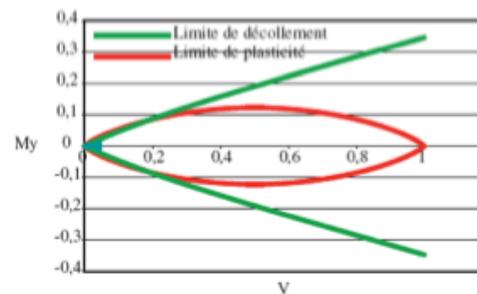
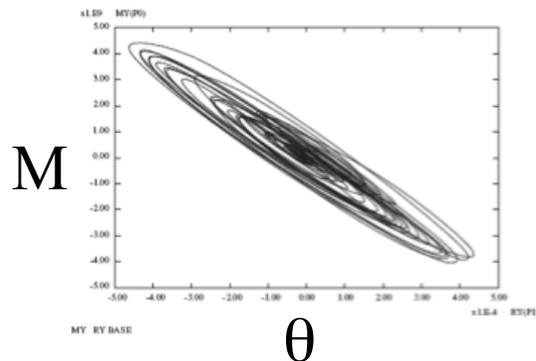
Analyse spectrale:

	EQE	Macro-élément		
		LB	BE	UB
flexion	$f_1$ entre 1.5Hz et 2.2Hz	$f_1 = 1.59Hz$	$f_1 = 1.89Hz$	$f_1 = 2.21Hz$
pompage	$f_2$ proche de 5Hz	$f_2 = 4.37Hz$	$f_2 = 4.58Hz$	$f_2 = 4.69Hz$



Courbe Moment-Rotation, courbes moments efforts horizontal, vertical

accélération max ( $m/s^2$ )	EQE	Macro-élément		
	fourchette	LB	BE	UB
$h = +20m$	environ 17.5	14.03	14.08	14.8
$h = +40m$	entre 27.5 et 30.5	28.62	28.71	31.76

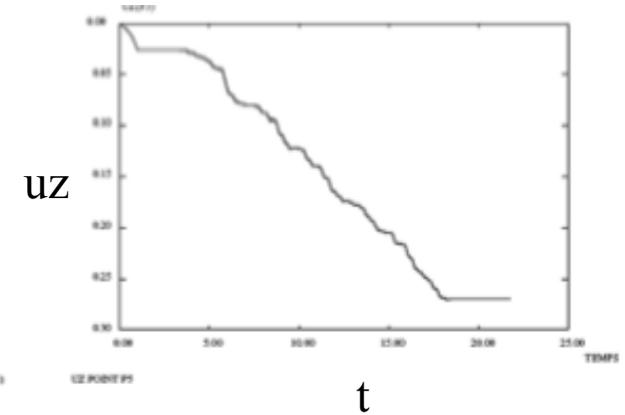
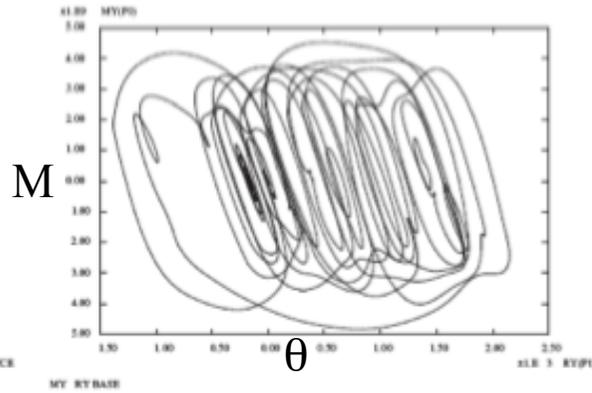
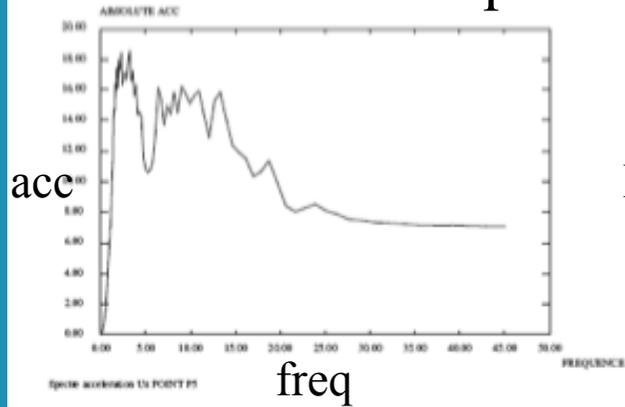




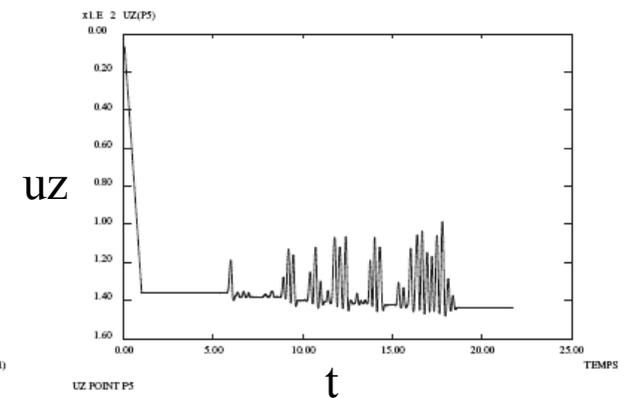
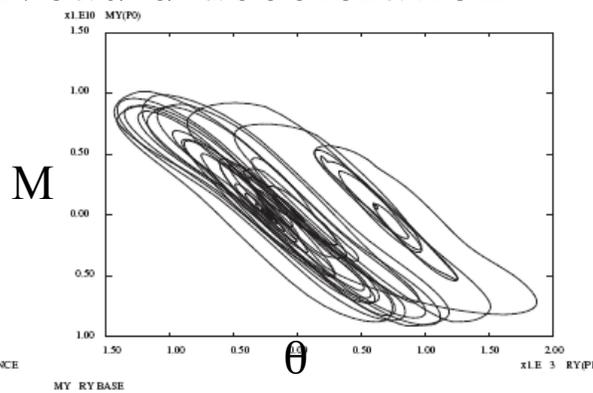
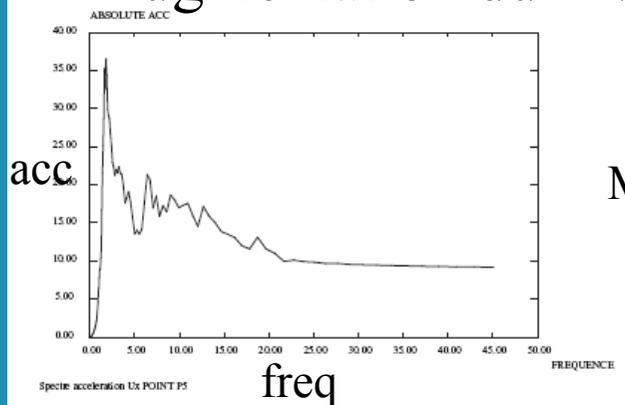
## Etude paramétrique:

- ↘ des caractéristiques du sol
- ↗ du niveau du séisme

### Diminution de qmax



### Augmentation du niveau d'accélération





- **macro-élément d'ISS:**

- Mécanisme de plasticité
- Mécanisme de décollement
- Prise en compte de l'amortissement radiatif
- Sollicitations statiques, cycliques et dynamiques
- Fondations superficielles circulaire, rectangulaire ou filante

- **Etudes paramétriques possibles** en tenant compte de l'ISS et de différents sols -  
**Temps de calculs très réduit**

La prise en compte de l'ISS montre:

- que la structure est isolée (efforts internes et endommagement réduits)
- les déplacements sont beaucoup plus grands

- **Perspectives:**

- Calage des paramètres (impédances, paramètres des surfaces...)
- Etude plus fine de l'amortissement radiatif
- extension à des modèles prenant en compte le comportement de fondations superficielles reposant sur des sols renforcés à l'aide d'inclusions rigides et de matelas granulaires.



**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

***Merci de votre attention***