

Apport de la modélisation numérique dans l'analyse des risques sismiques liés à la liquéfaction

Fernando Lopez-Caballero
Arezou Modaressi



Laboratoire MSS-Mat
École Centrale Paris

Journée technique au CFMS: Éléments finis en géotechnique

15 mars 2011

Objectifs

- ➊ Améliorer la compréhension globale du problème de la liquéfaction,
 - rôle des différents facteurs,
 - leurs incertitudes associées,
- ➋ Analyse des risques liés à la liquéfaction,
 - aléa,
 - vulnérabilité,
- ➌ Examiner différentes techniques d'amélioration des fondations liquéfiables,
 - nouvelles,
 - existantes.

Conséquences de la liquéfaction

Perte de portance du sol (rupture) sous une fondation



Niigata, Japon, 1964

<http://www.ce.washington.edu/liquefaction/html/main.html>



Kocaeli, Turquie, 1999

<http://gees.usc.edu/GEES/>

Conséquences de la liquéfaction

Tassements post-sismiques et/ou Fissures en surface



Niigata-Chuetsu, Japon, 2007



Sanriku-Harukaoki, Japon, 1994

<http://geot.civil.metro-u.ac.jp/archives/eq/>

Conséquences de la liquéfaction

Glissements horizontaux le long de surfaces peu inclinées ou non confinées (étalement ou “*lateral spread*”)



The Bhuj, Inde, 2001

<http://gees.usc.edu/GEES/>

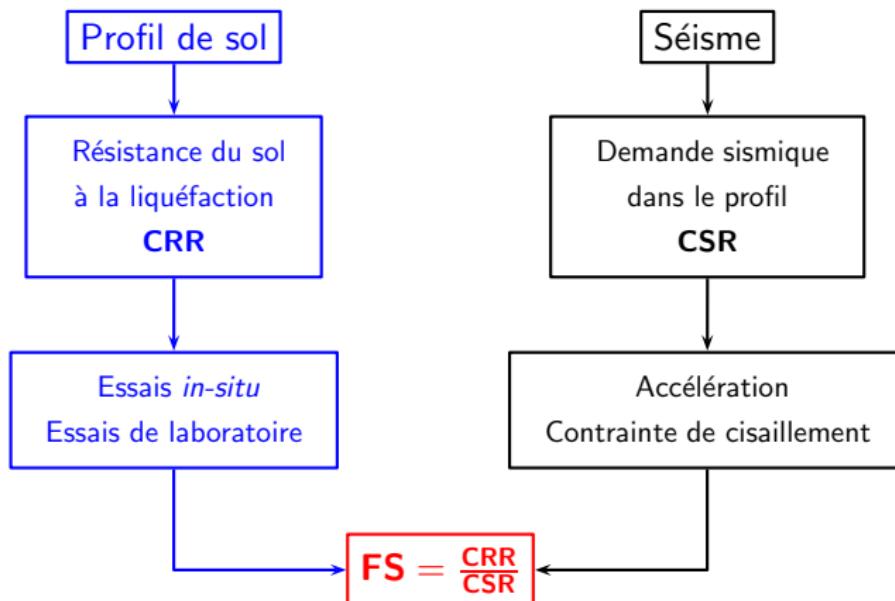


Pisco, Pérou, 2007

<http://mceer.buffalo.edu/publications/bulletin/07/21-03/05peru.asp>

Évaluation du risque de liquéfaction d'un site

Méthode simplifiée de Seed et Idriss



[Seed and Idriss, 1971]

Évaluation du risque de liquéfaction d'un site

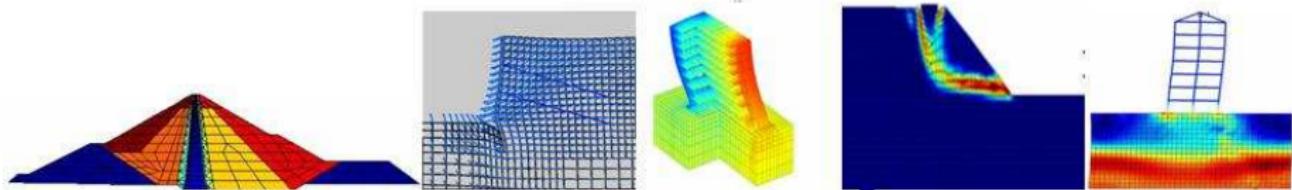
- Généralement limitée au cas du champ libre,
- Problème à traiter généralement unidimensionnel,
- Demande sismique dans le profil (CSR) :

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \frac{a_{max}}{g} \frac{r_d(z)}{MSF}$$

- Détermination de l'accélération maximale de surface a_{max} [Youd et al., 2001] :
 - Relations empiriques avec la magnitude du séisme,
 - Estimation à partir des analyses locales du site (e.g. Méthode linéaire équivalent),
 - Estimation à partir des rapports d'amplification,
 - ...

Une approche de modélisation intégrée

- Modèles physiques et mécaniques appropriés,
- Modèles probabilistes,
- Logiciel de calcul aux éléments finis : (*GFDyn*) [Aubry et al., 1986]
 - Analyse dynamique multiphasique non-linéaire temporelle couplée,
 - Couplage entre la génération de pression interstitielle et la déformation du sol,
 - Comportement non-linéaire élastoplastique et cyclique des matériaux,
 - Sol : contraintes effectives-déformations [Aubry et al., 1982, Hujeux, 1985] ;
 - Structures : rotules plastiques, maçonneries [Saez, 2009, Lopez-Caballero and Modaressi-Farahmand-Razavi, 2010b] ;
 - Interfaces : rugueuses, lisses, [Aubry et al., 1990]
 - Interaction sol-structure
 - Frontières absorbantes [Modaressi and Benzenati, 1994]



Modèle de comportement du sol

- Écrit en contraintes effectives,
- Élastoplasticité avec écrouissages isotrope et cinématique,
- Paramètres :
 - Rigidité : V_s , V_p ,
 - État critique : ϕ_{pp} ,
 - État initial : D_r , σ'_0 ,
 - Écrouissage : $\gamma_{0.7}$
- Corrélations établies entre paramètres naturels du sol (e.g. d_{60}/d_{10} , D_r , I_p) et paramètres du modèle [Lopez-Caballero et al., 2007]

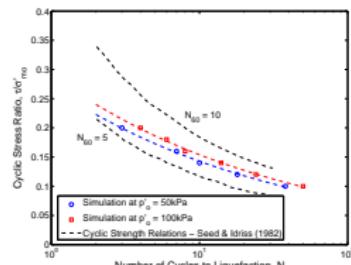
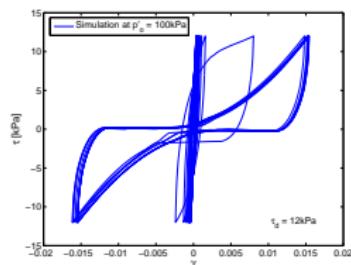
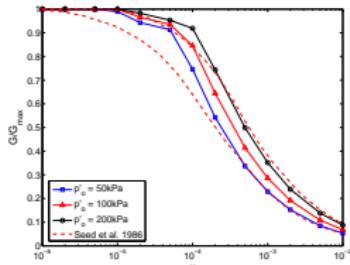


Schéma du modèle

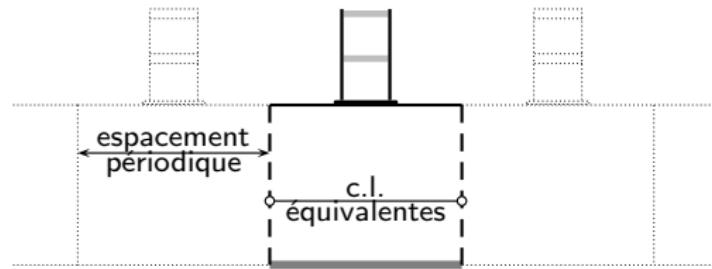
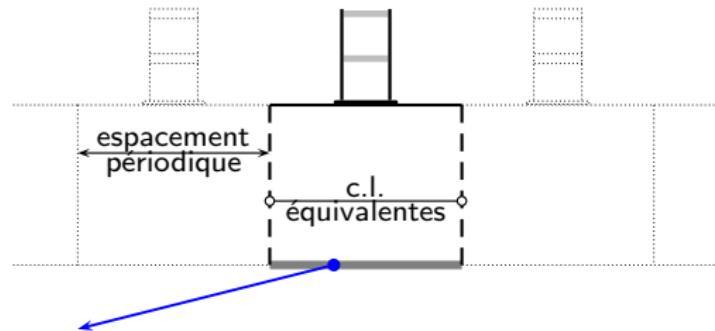
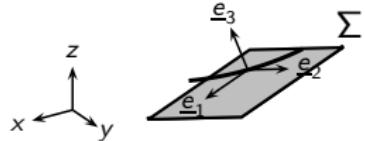


Schéma du modèle

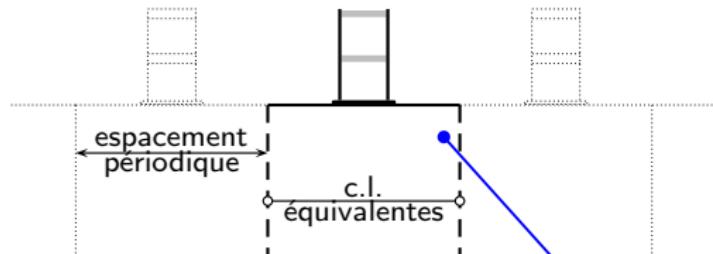


Approximation paraxiale :
champ incident et
frontière absorbante



$$\underline{u}_{\Sigma} = u^{PSV} \underline{e}_k + u^{SH} (\underline{e}_3 \wedge \underline{e}_k)$$

Schéma du modèle



Modèle multimécanisme de l'ECP (Hujeux) :

Approximation paraxiale :
champ incident et
frontière absorbante

A diagram showing a plane wave incident on a boundary Σ . The incident wave is represented by a shaded plane with normal vector \underline{e}_3 and tangential vectors \underline{e}_1 and \underline{e}_2 . The incident wave function is given by:

$$\underline{u}_{\Sigma} = u^{PSV} \underline{e}_k + u^{SH} (\underline{e}_3 \wedge \underline{e}_k)$$

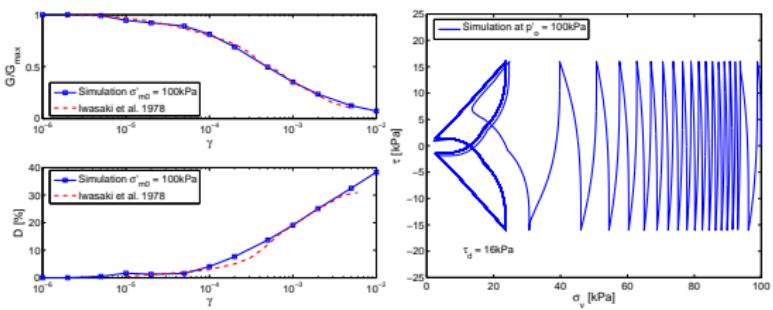
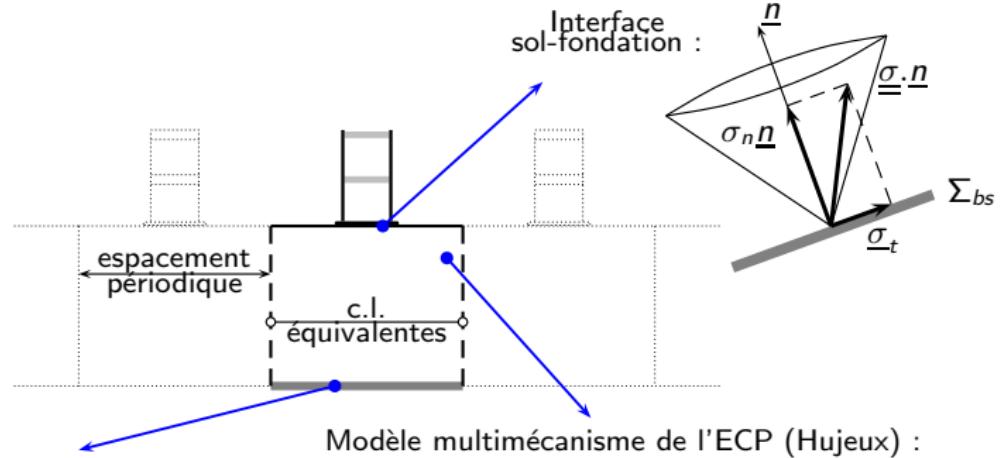


Schéma du modèle



Approximation paraxiale :
champ incident et
frontière absorbante

A diagram shows a plane wave incident on a boundary Σ defined by unit vectors e_1, e_2, e_3 relative to a coordinate system (x, y, z) . The wave function is given by:

$$\underline{u}_\Sigma = u^{PSV} \underline{e}_k + u^{SH} (\underline{e}_3 \wedge \underline{e}_k)$$

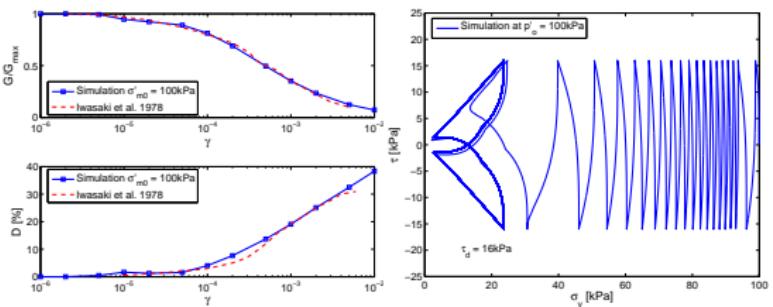
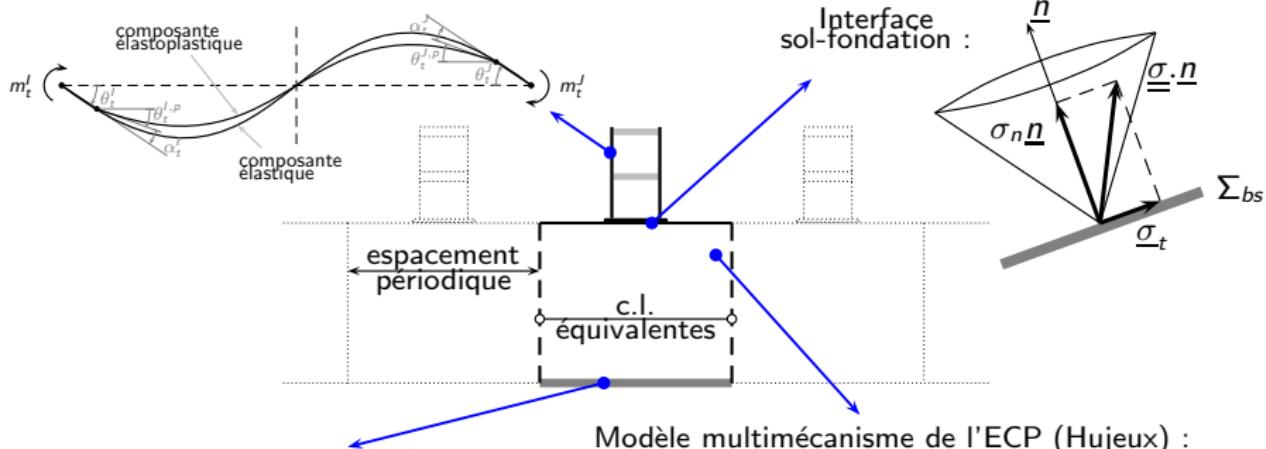


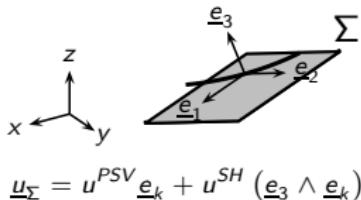
Schéma du modèle

Poutre-poteau à rotules plastiques :



Modèle multimécanisme de l'ECP (Hujeux) :

Approximation paraxiale :
champ incident et
frontière absorbante



Points à développer

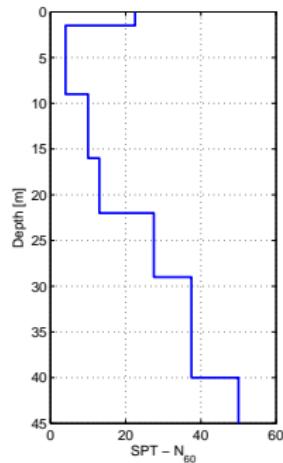
- 1 Modélisation de la liquéfaction
- 2 Analyse des risques liés à la liquéfaction
- 3 Techniques d'amélioration du sol

Points à développer

- 1 Modélisation de la liquéfaction
- 2 Analyse des risques liés à la liquéfaction
- 3 Techniques d'amélioration du sol

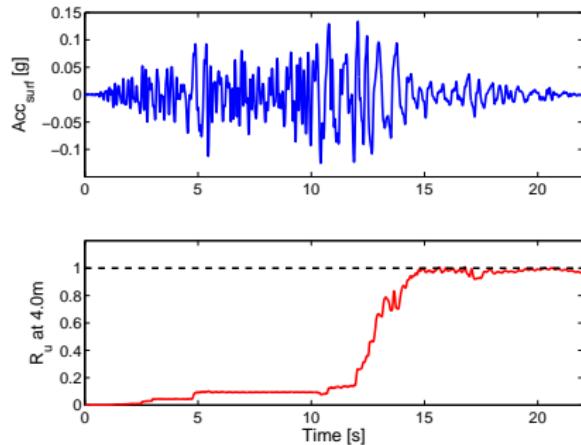
Site étudié

Projet NEMISREF (UE) et projet ANR-Belleplaine :



V_s et profil SPT

[Lopez-Caballero and Modaressi-Farahmand-Razavi, 2008]



Réponse pour un séisme donné

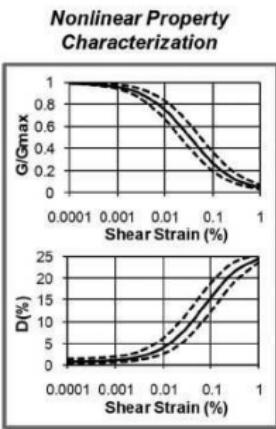
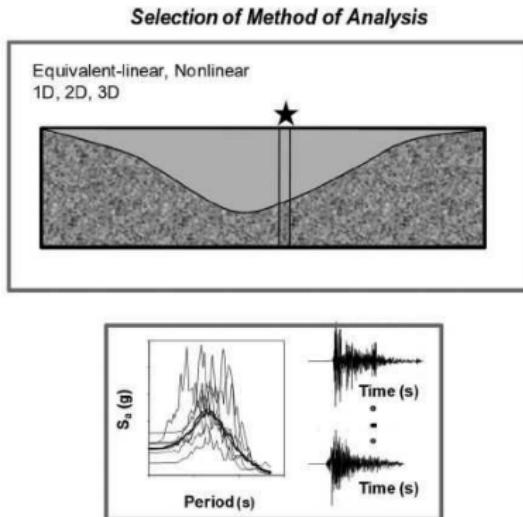
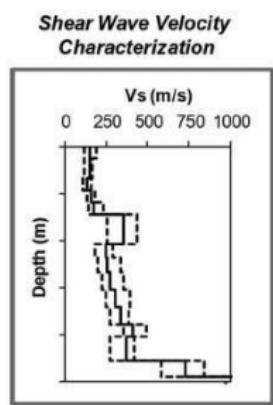
Évaluation du risque de liquéfaction d'un site

Questions essentielles auxquelles il faut répondre :

- Le sol est-il susceptible de se liquéfier ?
- Si oui, la liquéfaction peut-elle s'initier ?
 - ⇒ Pour quel aléa ?
- Si oui, des dommages peuvent-ils survenir ?
 - ⇒ Quel type de dommages ?
- Les dommages sont-ils acceptables ?
 - ⇒ Si non, comment réduire ces dommages ?

Sources d'incertitudes

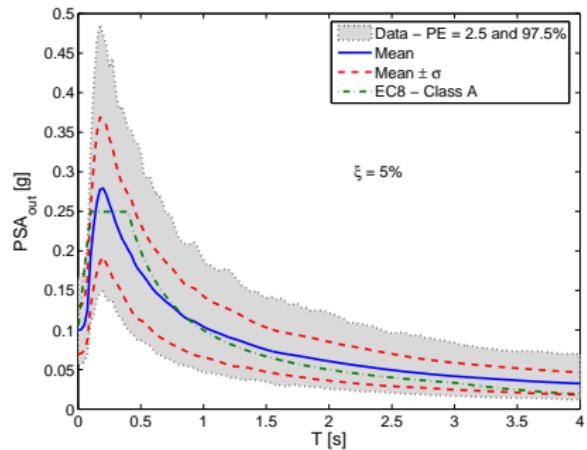
Sources d'incertitudes dans les analyses sismiques



Specification of Input Motions

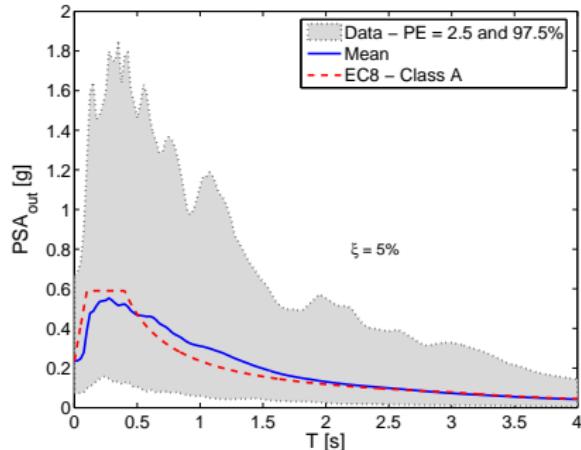
[Rathje et al., 2010]

Choix du signal sismique selon l'aléa du site



Signaux synthétiques

[Pousse et al., 2006]

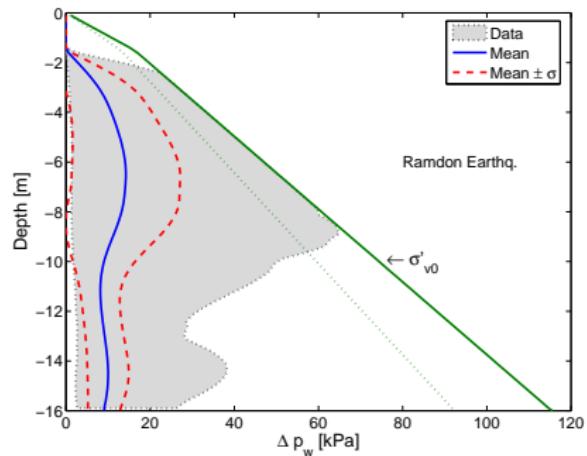


Séismes réels

[Iervolino and Cornell, 2005]

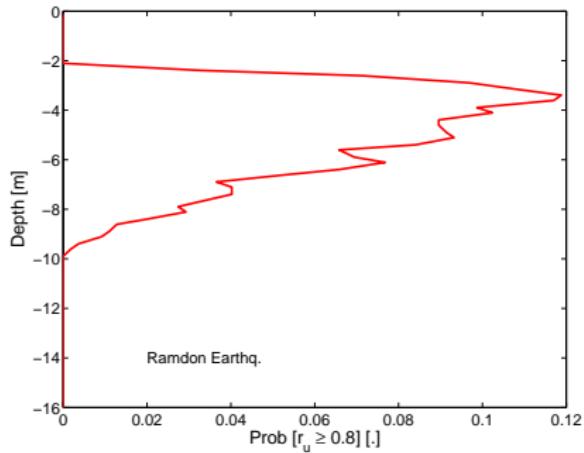
Réponse du modèle

Potentiel de liquéfaction



Profil de Δp_w

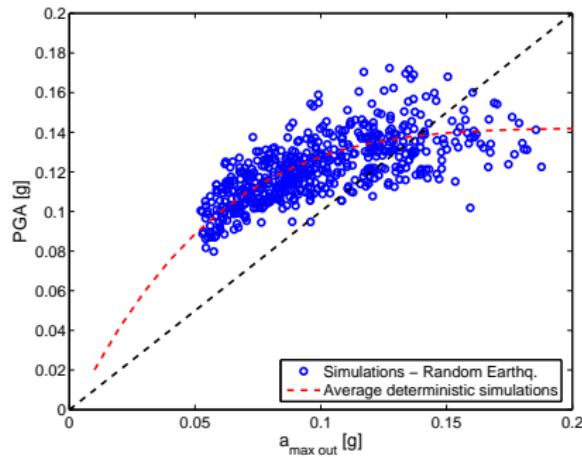
[Lopez-Caballero and Modaressi-Farahmand-Razavi, 2010a]



Profil de probabilité de liquéfaction

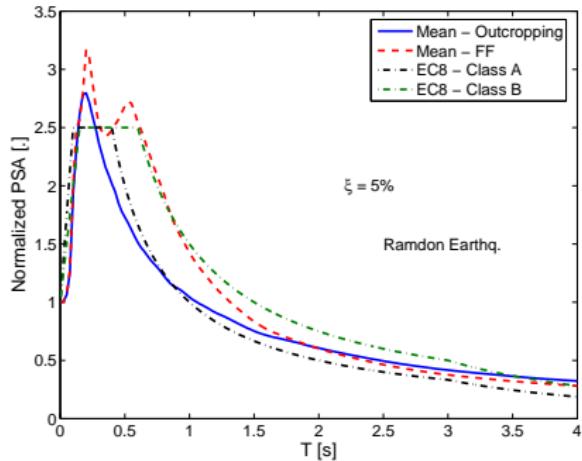
Réponse du modèle

Mouvement du sol à la surface



$$pga - a_{max\ out}$$

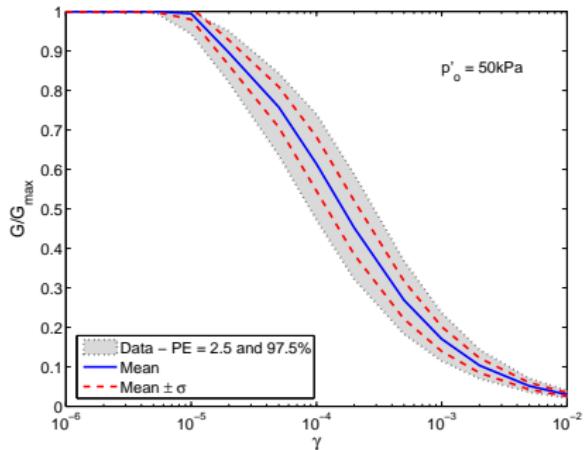
[Lopez-Caballero and Modaressi-Farahmand-Razavi, 2010a]



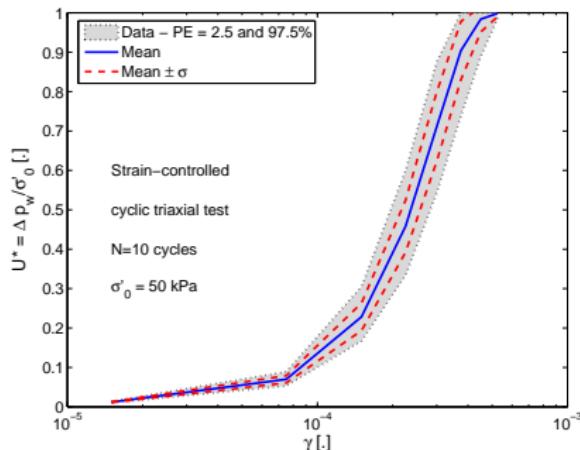
Spectre de réponse à la surface

Site étudié

Incertitudes sur des propriétés mécaniques



Courbes $G / G_{max} - \gamma$

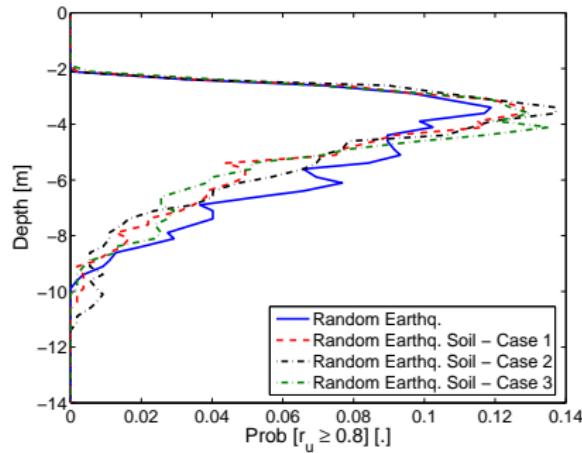


Courbes $\Delta U_w - \gamma$

[Lopez-Caballero and Modaressi-Farahmand-Razavi, 2010a]

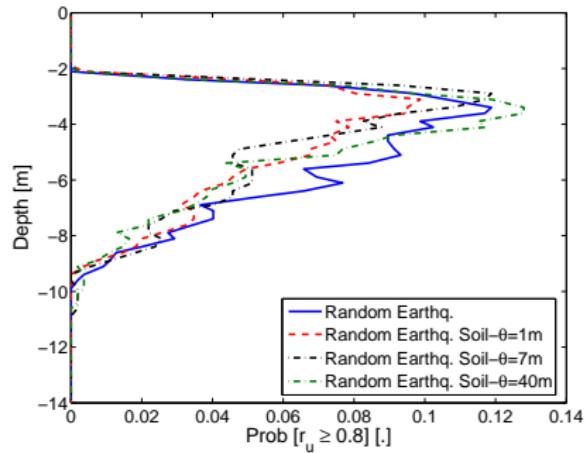
Incertitudes sur des propriétés mécaniques

Profil de probabilité de liquéfaction



Variance des propriétés mécaniques

[Lopez-Caballero and Modaressi-Farahmand-Razavi, 2010a]



Variabilité spatiale

Points à développer

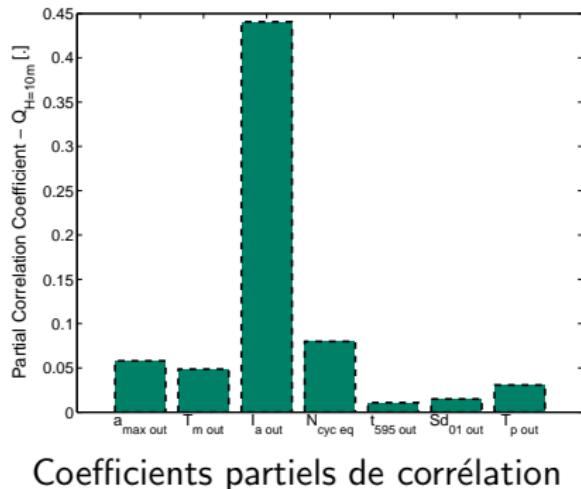
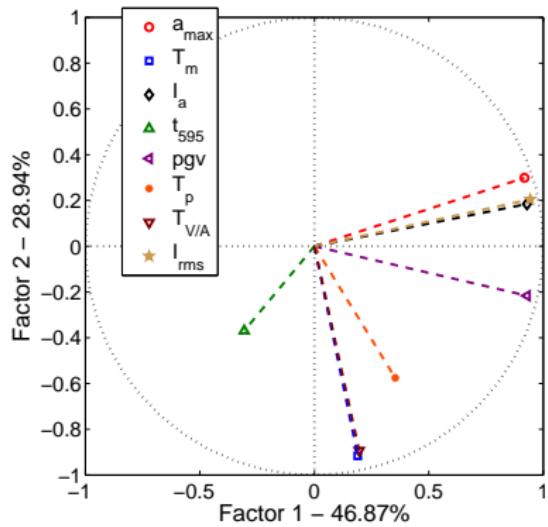
- 1 Modélisation de la liquéfaction
- 2 Analyse des risques liés à la liquéfaction
- 3 Techniques d'amélioration du sol

Dommages liés à la liquéfaction

- ➊ Perte de résistance dans le sol : $f(r_u) - r_u = \frac{\Delta p_w(t,z)}{\sigma'_{vo}(z)},$
- ➋ Épaisseur de la zone liquéfiée : $f(Q_H) - Q_H = \frac{1}{H} \int_0^H \frac{\Delta p_w(t,z)}{\sigma'_{vo}(z)} dz,$
- ➌ Tassements,
- ➍ Rupture de fondation,
- ➎ Endommagement des structures
- ➏ ...

Analyse de sensibilité pour la liquéfaction

Épaisseur de la zone liquéfiée - $Q_{H=10m}$

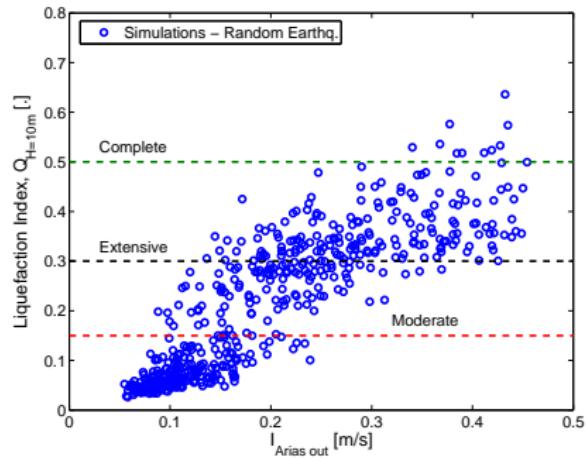


Coefficients de corrélation - ACP

[Lopez-Caballero and Modaressi-Farahmand-Razavi, 2010a]

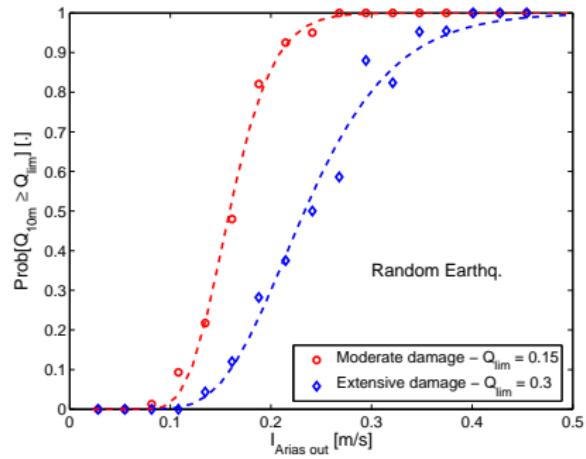
Vulnérabilité

Épaisseur de la zone liquéfiée - $Q_{H=10m}$



$$Q_{H=10m} - I_{Arias}$$

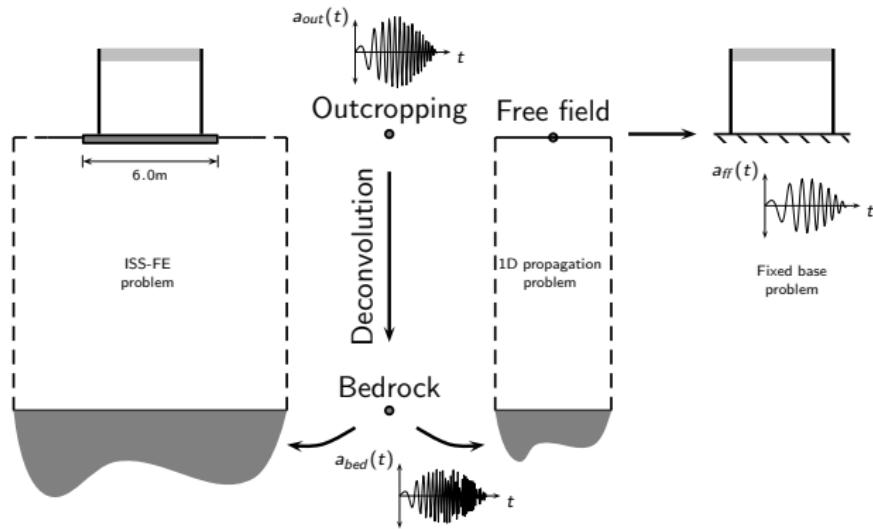
[Lopez-Caballero and Modaressi-Farahmand-Razavi, 2010a]



Courbes de fragilité

Inclusion des effets de l'ISS

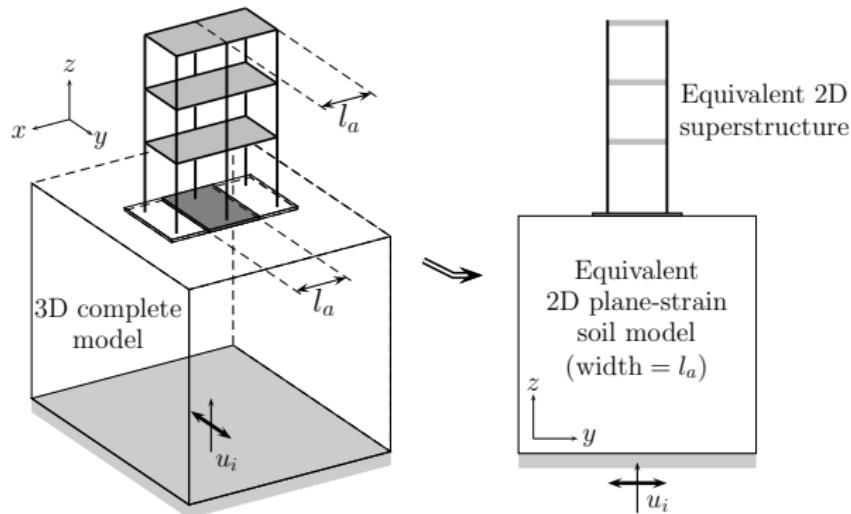
Deux approches de modélisation :



[Saez, 2009]

Inclusion des effets de l'ISS

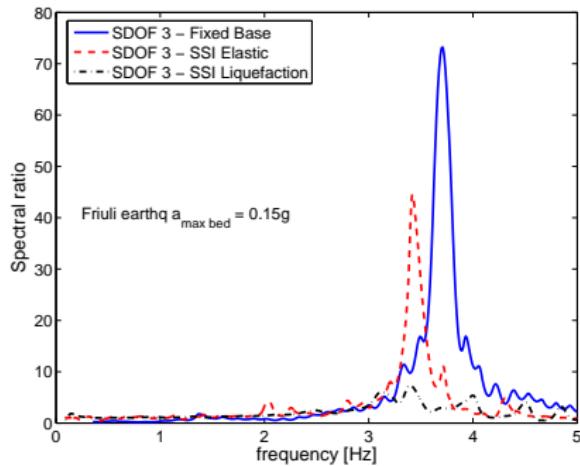
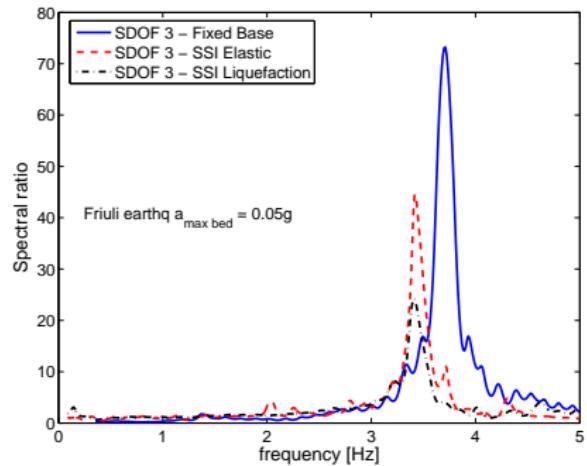
Approche 2D déformation plane modifiée



[Saez, 2009]

Inclusion des effets de l'ISS

Atténuation du mouvement sous la structure

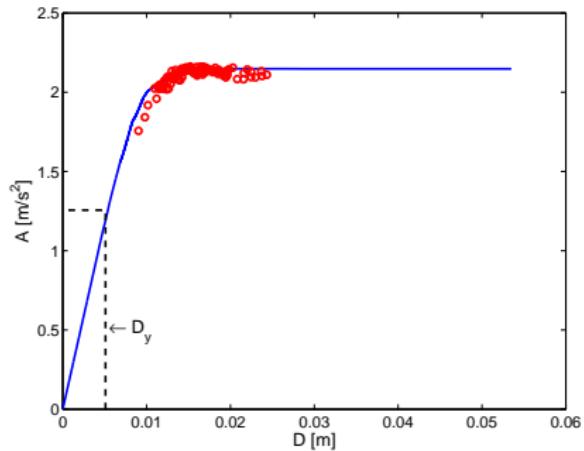


Fonctions de transfert d'ISS - Sol nonlinéaire

[Lopez-Caballero and Modaressi-Farahmand-Razavi, 2008]

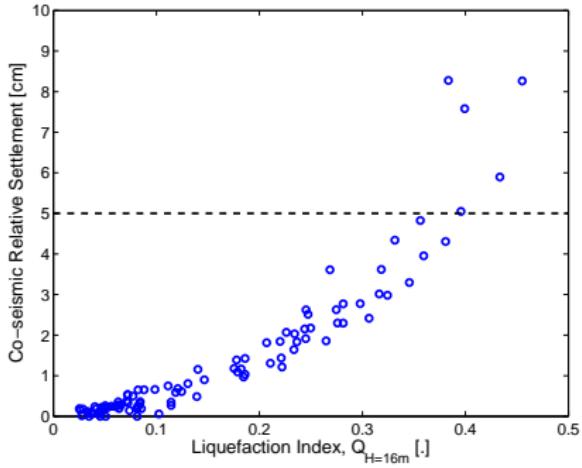
Inclusion des effets de l'ISS

Réponse de la structure



Déplacement au sommet

[Lopez-Caballero et al., 2009]



Tassement à la fondation

Points à développer

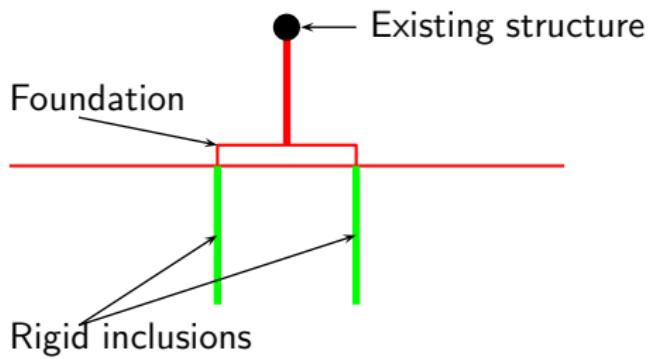
1 Modélisation de la liquéfaction

2 Analyse des risques liés à la liquéfaction

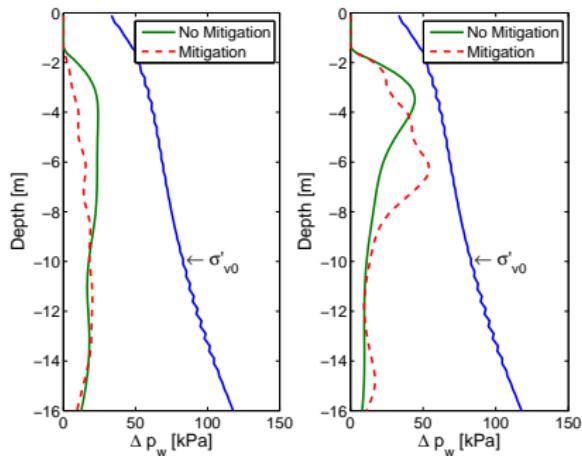
3 Techniques d'amélioration du sol

Techniques d'amélioration

Inclusions rigides



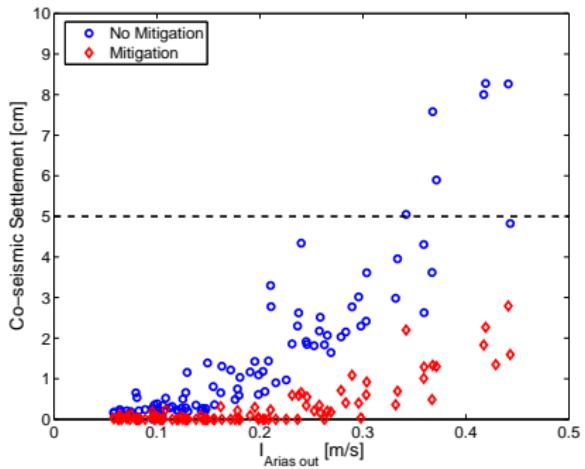
[Lopez-Caballero et al., 2009]



Profils de Δp_w pour 2 séismes

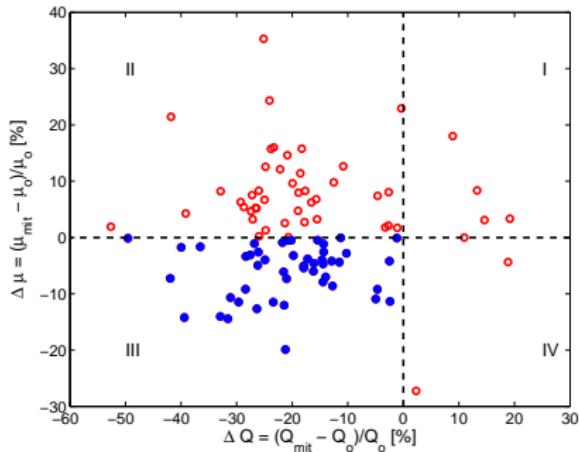
Techniques d'amélioration

Inclusions rigides



Tassement à la fondation

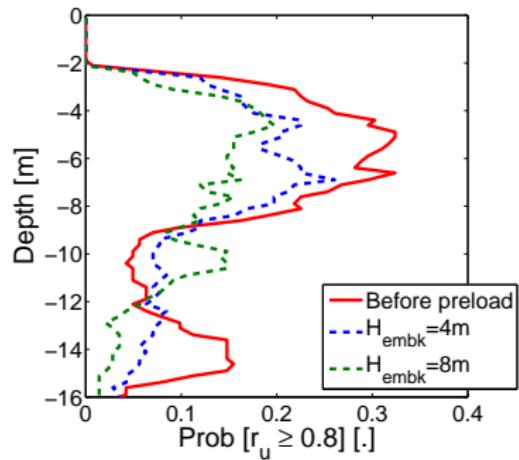
[Lopez-Caballero et al., 2009]



Réponse globale de la structure

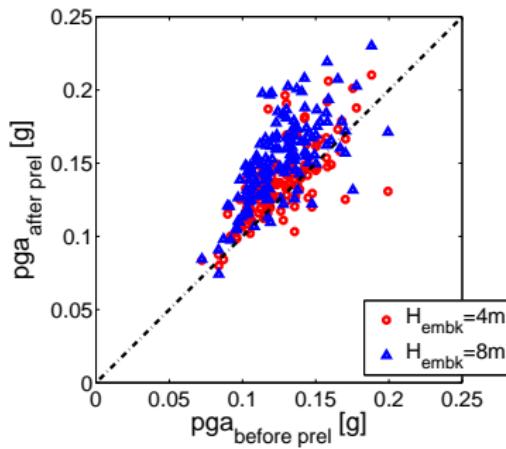
Techniques d'amélioration

Préchargement



Probabilité de liquéfaction

[Lopez-Caballero and Modaressi-Farahmand-Razavi, 2011]



pga avant et après précharge

Conclusions

- ➊ Outils de modélisation,
 - Possibilité d'effectuer des calculs paramétriques, probabilistes et des études de sensibilité,
 - Possibilité de prendre en compte les incertitudes,
 - Prise en compte de l'ISS.
- ➋ Site instrumenté en France : Belle Plaine (Guadeloupe).

Perspectives

- ➊ Analyse post-sismique,
 - ⇒ Tassements,
 - ⇒ Capacité portante,
- ➋ Modélisation de l'étalement latéral “*lateral spread*”,
- ➌ Variabilité spatiale horizontale
 - ⇒ Solution au problème des frontières latérales non-linéaires

-  Aubry, D., Chouvet, D., Modaressi, A., and Modaressi, H. (1986).
GEFDYN : Logiciel d'Analyse de Comportement Mécanique des Sols par Eléments Finis avec Prise en Compte du Couplage Sol-Eau-Air.
Manuel scientifique, Ecole Centrale Paris, LMSS-Mat.
-  Aubry, D., Hujeux, J.-C., Lassoudière, F., and Meimon, Y. (1982).
A double memory model with multiple mechanisms for cyclic soil behaviour.
In *Int. Symp. Num. Mod. Geomech*, pages 3–13. Balkema.
-  Aubry, D., Modaressi, A., and Modaressi, H. (1990).
A constitutive model for cyclic behaviour of interfaces with variable dilatancy.
Computers and Geotechnics, 9(1/2) :47–58.
-  Hujeux, J.-C. (1985).
Une loi de comportement pour le chargement cyclique des sols.
In *Génie Parasismique*, pages 278–302. V. Davidovici, Presses ENPC, France.
-  Iervolino, I. and Cornell, C. A. (2005).
Record selection for nonlinear seismic analysis of structures.
Earthquake Spectra, 21(3) :685–713.
-  Lopez-Caballero, F. and Modaressi-Farahmand-Razavi, A. (2008).
Numerical simulation of liquefaction effects on seismic SSI.
Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28(2) :85–98.
-  Lopez-Caballero, F. and Modaressi-Farahmand-Razavi, A. (2010a).

Assessment of variability and uncertainties effects on the seismic response of a liquefiable soil profile.

Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(7) :600–613.

 Lopez-Caballero, F. and Modaressi-Farahmand-Razavi, A. (2010b).

Effects of soil foundation on the performance of infilled rc frames structures.

In *International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (ISRERM2010)*, Shanghai, China, page paper 255.

 Lopez-Caballero, F. and Modaressi-Farahmand-Razavi, A. (2011).

Mitigation of liquefaction seismic risk by preloading.

In *3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2011)*, Munich, Germany.

 Lopez-Caballero, F., Modaressi-Farahmand-Razavi, A., and Modaressi, H. (2007).

Nonlinear numerical method for earthquake site response analysis I- elastoplastic cyclic model & parameter identification strategy.

Bulletin of Earthquake Engineering, 5(3) :303–323.

 Lopez-Caballero, F., Saez, E., and Modaressi-Farahmand-Razavi, A. (2009).

Evaluation of liquefaction countermeasure effects on the performance of structures.

In *International Conference on Performance-Based Design - IS-Tokyo2009*, page paper 375.

 Modaressi, H. and Benzenati, I. (1994).

Paraxial approximation for poroelastic media.

Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 13(2) :117–129.



Pousse, G., Bonilla, F., Cotton, F., and Margerin, L. (2006).

Non stationary stochastic simulation of strong ground motion time histories including natural variability : Application to the K-net Japanese database.

Bulletin of the Seismological Society of America, 96(6) :2103–2117.



Rathje, E. M., Kottke, A. R., and Trent, W. L. (2010).

Influence of input motion and site property variabilities on seismic site response analysis.

Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136(4) :607–619.



Saez, E. (2009).

Dynamic non-linear Soil-Structure Interaction.

PhD thesis, École Centrale Paris, France.



Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971).

Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential.

Journal of Soil Mechanics and Foundations Division - ASCE, 97(SM9) :1249–1273.



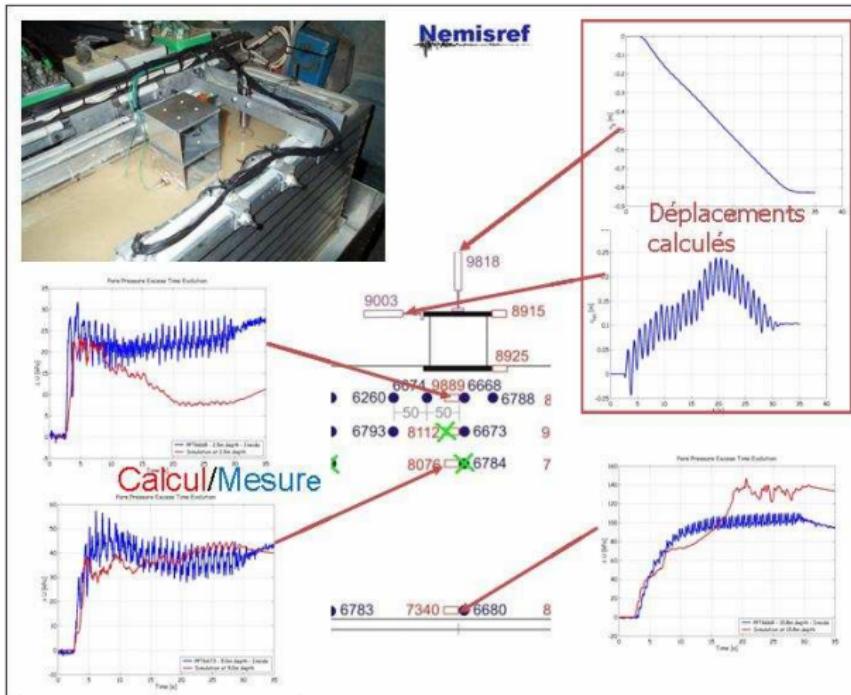
Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F. J., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F. I., Martin, G., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., and Stokoe, K. H. I. (2001).

Liquefaction resistance of soils : Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils.

Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - ASCE, 127(10) :817–833.

Validation du modèle

Essais en centrifugeuse



Essais : Schofield Center Cambridge - Simulations : GEFDyn