

BELLE-PLAINE

Etude des sols liquéfiables dans des conditions
réelles : site pilote et modèles prédictifs
(Guadeloupe)

Evelyne Foerster
e.foerster@brgm.fr



Plan

- > Contexte
- > Objectifs du projet BELLE-PLAINE
- > Présentation du site pilote
 - Sondages carottés
 - Instrumentation
 - Reconnaissance in situ
 - Essais en laboratoire
- > Résultats expérimentaux vis-à-vis de la liquéfaction
- > Analyses de la réponse sismique du site (linéaire/non linéaire)
- > Conclusions et perspectives

Contexte

- > 2004 : création d'un GT Liquéfaction (coord. BRGM) au sein du GIS-RAP pour accompagner l'installation d'un couple de stations accélérométriques surface/profondeur en Guadeloupe (financement MEDD)
 - Focalisation aux **Antilles françaises** : existence d'un important réseau de stations accélérométriques implanté en contexte tectonique fort (nombreux enregistrements de séismes modérés, mouvements forts plausibles)
- > 2006 : Proposition à l'ANR CATELL d'un programme de recherche coordonné pour la mise en œuvre d'un site pilote instrumenté venant en complément de l'objectif initial du RAP

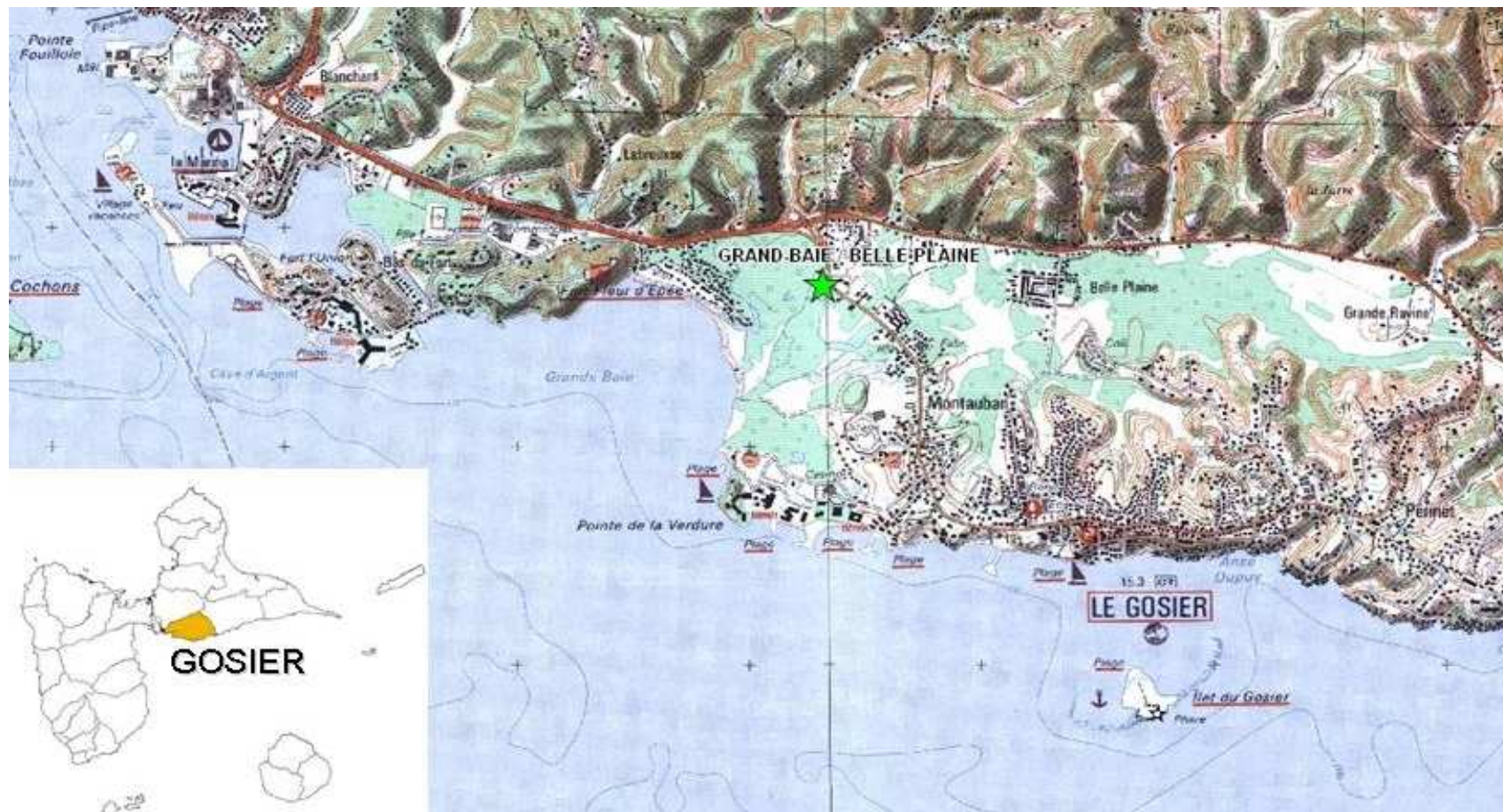
⇒ Projet BELLE-PLAINE (janvier 2007 - 30 juin 2010)



Objectifs du projet BELLE-PLAINE

- > Mise en œuvre d'un site pilote instrumenté dans une zone potentiellement liquéfiable :
 - ⇒ Appréhender le **comportement des sols naturels sous séisme** pour améliorer les connaissances vis-à-vis de la liquéfaction
 - ⇒ **Tester et valider diverses techniques** pour obtenir des méthodologies et outils prédictifs permettant d'étudier le comportement non linéaire et post-liquéfaction des sols :
 - Reconnaissances / Instrumentations (géophysiques, géotechniques)
 - Modélisations s'appuyant sur les données du site (expérimentales/in-situ)

Présentation du site pilote

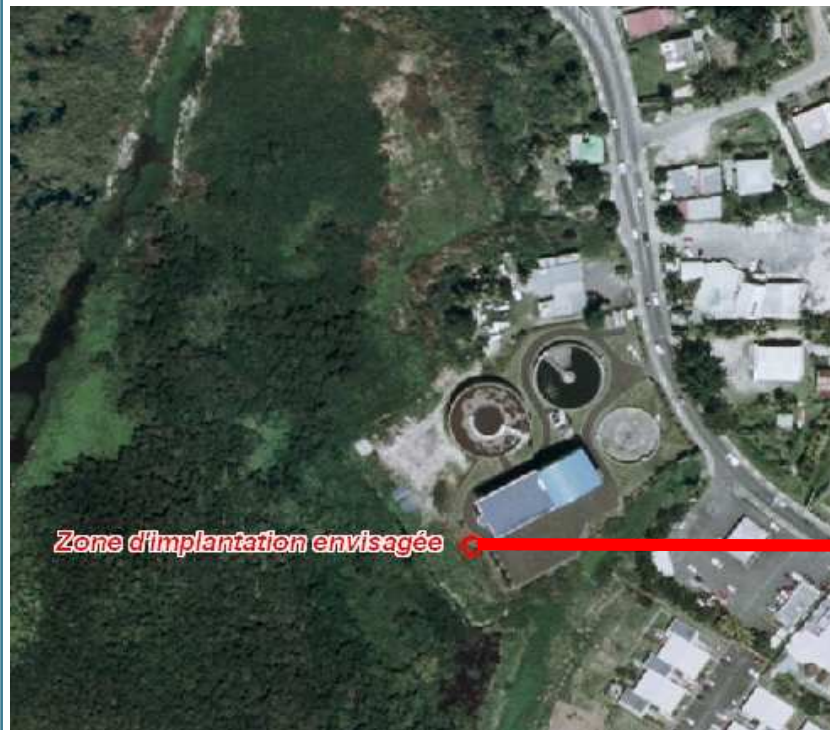


- Terrain de la station d'épuration de la commune du Gosier, au sud de Pointe-à-Pitre (Guadeloupe)

(Coordonnées : 61.5044 W, 16.2157N)

Présentation du site pilote

- > Zone reconnue comme potentiellement liquéfiable sur les 15 premiers mètres (données géotechniques existantes)
- > Zone sécurisée (station d'épuration)
- > Existence d'une alimentation électrique + liaison ADSL



Réalisation de 2 sondages carottés (mai 2007)

Sondage SC1	
Profondeur (m)	Lithologie
0 – 1.9	terre végétale + remblais
1.9 – 3.1  SC1-1 2.2-3.1	Tourbe
3.1 – 4	Sable argileux gris
4 – 7  SC1-2 5.2-6	Sable gris avec coquillages
7 – 10  SC1-3 9-10	Sable gris fin
10 – 12  SC1-4 10-11	Sable argileux
12 – 14.6  SC1-5 14-14.8	Argile grise
14.6 – 15.4	Sable grossier
15.4 – 16	Tourbe
16.5 – 24.3	Argile gris-bleu
24.30 – 29.6	marno- calcaire argileux
29.6 – 35.5	Marno-calcaire
35.5 – 38.8	calcaire

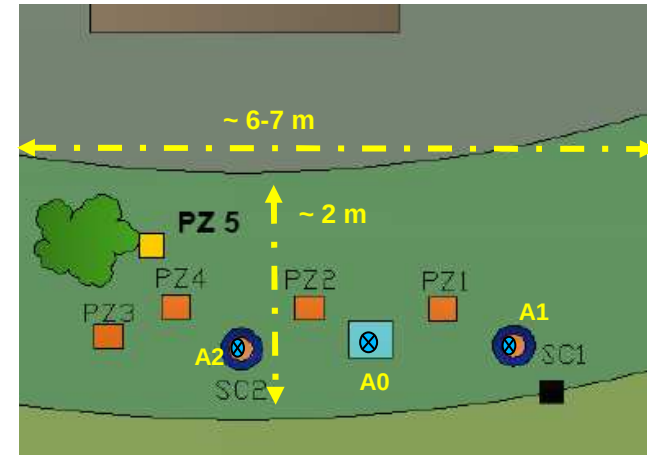
Sondage SC2	
Profondeur (m)	Lithologie
0 – 1.9	terre végétale + remblai
1.9 – 3	tourbe
3 – 4.5	sable fin gris
4.5 – 7.5  SC2-1 4.5-5.5	sable fin gris avec coquillage
 SC2-2 6-7	
 SC2-3 8-9	
7.5 – 10	sable fin
10 – 11  SC2-4 10.5-11.5	sable argileux
11 – 14.9  SC2-5 12-13	argile grise
14.9 – 15	Argile grise + sable + coquillage

Instrumentation : schéma d'implantation

PZ : 5 capteurs de pression interstitielle

A : 3 capteurs accélérométriques à 3 composantes (H1, H2, V)

Capteur	Prof. (m)
PZ1	3.8
PZ2	5.2
PZ3	6.3
PZ4	7.73
PZ5	10.5
A0	0
A1	38
A2	15



Atouts de l'instrumentation

> Mesures :

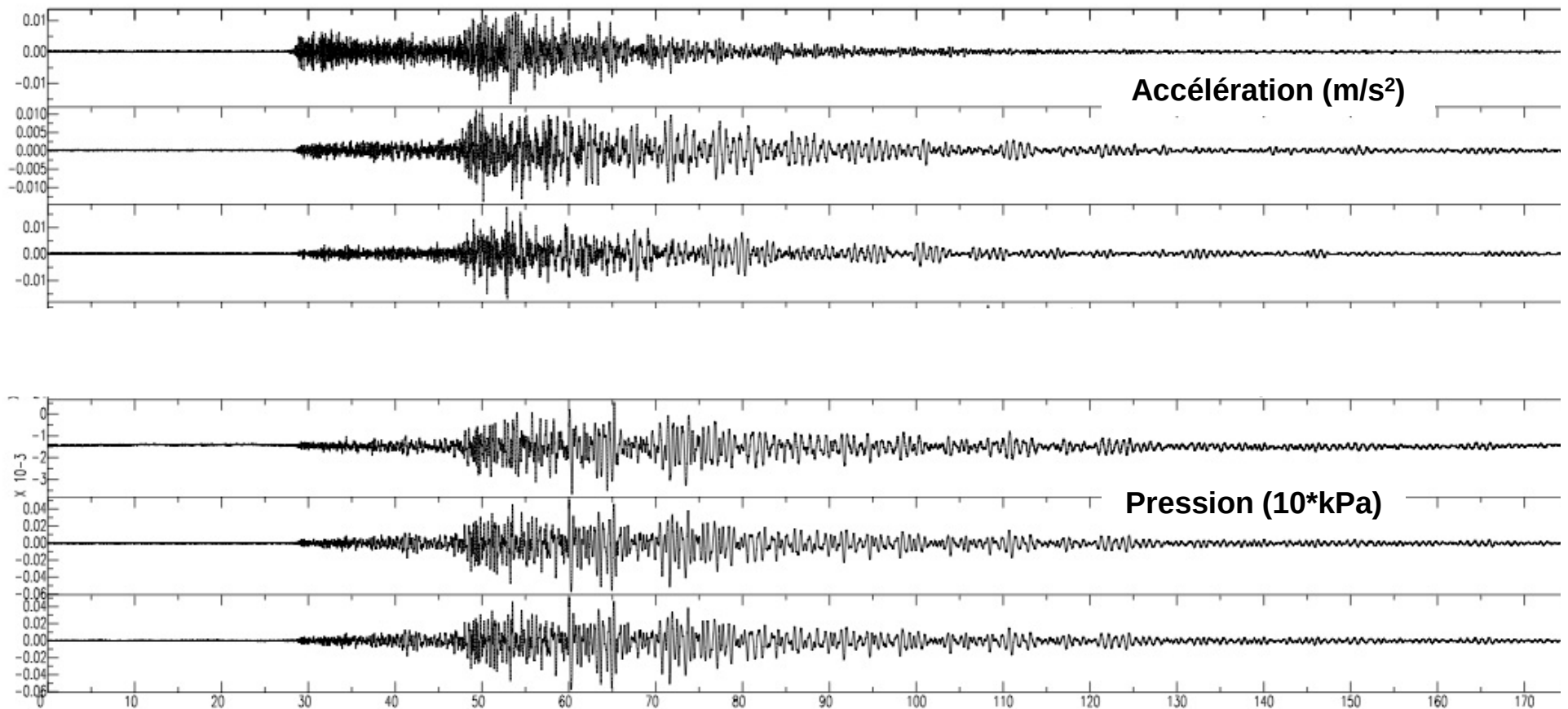
- diverses profondeurs (mesures de déformation possibles)
- déclenchement simultané de l'acquisition en pressions interstitielles et accélérations

> Transfert des données en continu et en temps réel au site central du RAP

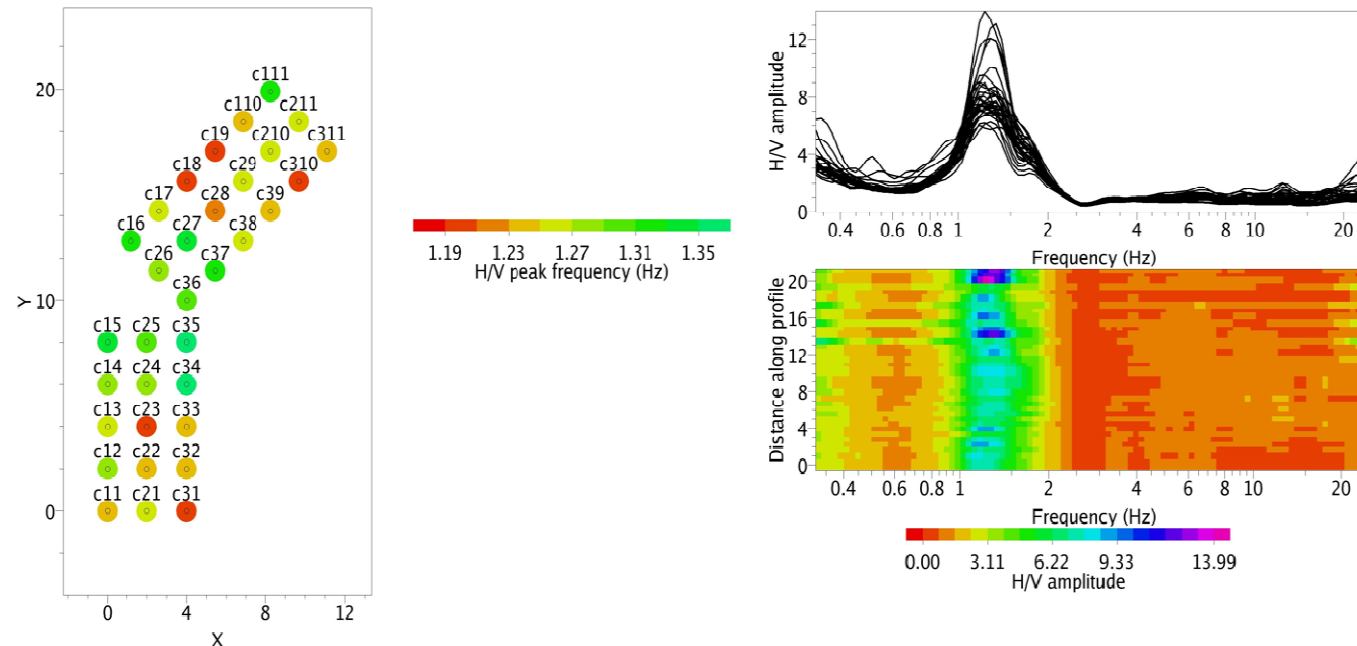


Les premières données accélérométriques et de pression

Dominique-M4.8-2008.02.06-18.36.58



Reconnaissance in situ : mesures H/V bruit de fond

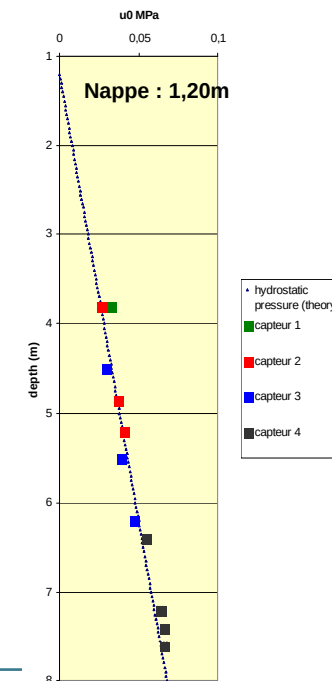
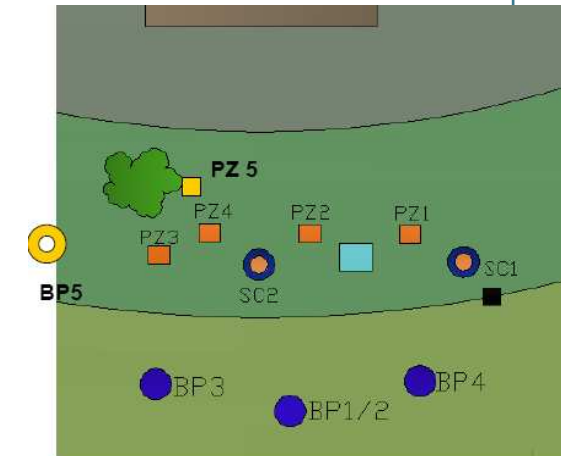
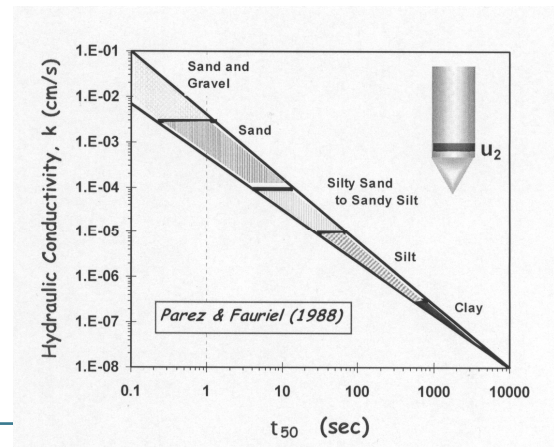
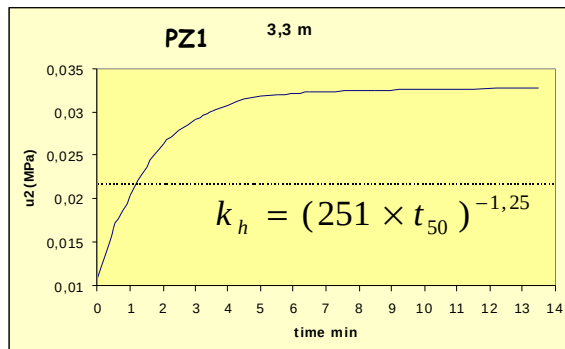


Fréquence de résonance : 1.2-1.3 Hz
Stabilité des mesures : site 1D.

Reconnaissance in situ : pénétration au sismopiezocône

> 2 campagnes (déc. 2007, déc. 2008) :

- Réalisation de 4 essais de pénétration au sismopiezocône (**BP**) jusqu'à une profondeur d'environ 15 mètres (nappe rencontrée à 1,20m).
- Mesures de vitesse de propagation d'ondes tous les mètres en utilisant les trois géophones situés dans la pointe.
- Installation des capteurs de pression interstitielle (PZ) :
 - Valeurs de p.i mesurées directement sur les capteurs : pressions finales identiques aux valeurs de la pression hydrostatique
 - mesures de dissipation



Reconnaissance in situ : essais pressiométriques (février 2010)

> **Objectif :**

- Valider une méthode d'évaluation du potentiel de liquéfaction des sols basée sur l'utilisation du pressiomètre cyclique (collaboration ENPC et LCPC/MSRGI, équipe de P. Reiffsteck)

> **Méthodologie :**

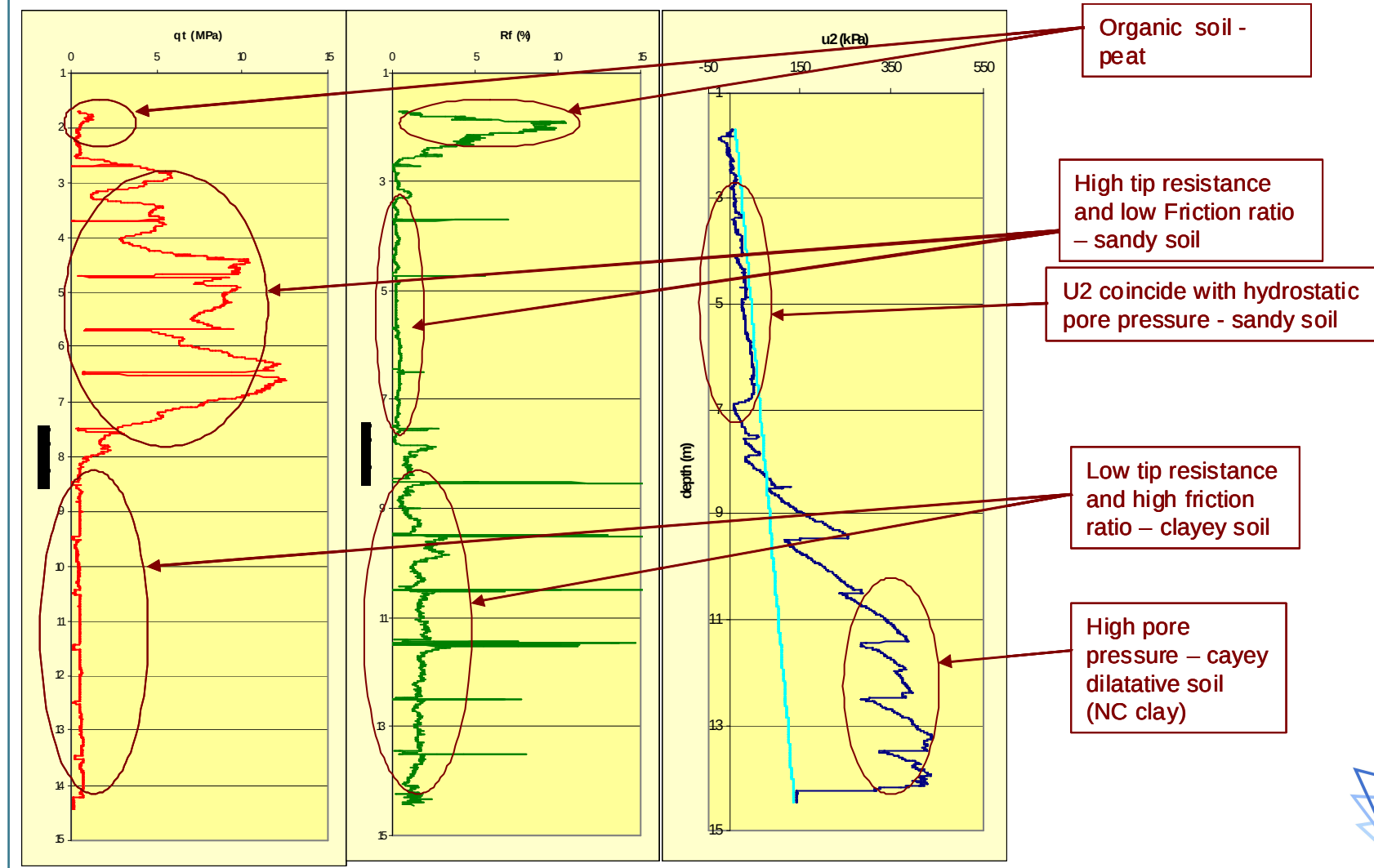
- Établir des corrélations fines entre l'accroissement du volume de la sonde pressiométrique, mesuré sous chargement cyclique à pression contrôlée (in situ) et le nombre de cycles nécessaires pour atteindre la liquéfaction dans un essai triaxial non drainé
 - méthode développée et validée uniquement à partir d'essais de laboratoire (essais au pressiomètre en chambre d'étalonnage)
 - comparaison avec les courbes de résistance à la liquéfaction obtenues en laboratoire sur les matériaux du site pilote (essais triaxiaux)

> **Campagne in situ : 2 séries d'essais comprenant 1 essai monotone (référence) et 2 essais cycliques**

- Pressiomètre Ménard (ENPC)
- Pressiomètre autoforeur (LCPC)



Interprétation générale des profils pénétrométriques



Essais en laboratoire

> Identification des matériaux du site :

- granulométrie-sédimentométrie, limites d'Atterberg, densités sèches, teneurs en eau initiales
- perméabilité (mangrove) : essais réalisés en régime permanent à l'intérieur d'une cellule triaxiale après saturation et consolidation de l'échantillon

Carotte	Profondeur (m)	Teneur en eau w (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	S_r (%)	e	w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)	Classification des sols
SC1 -2 (B)	5.2 - 6	26.1	2.83	2.05	1.62	99.4	0.744	-	-	-	SL/SA-Lp/Lt/Ap/At
SC1 -3 (B)	9 - 10	37.6	2.78	1.87	1.36	99.8	1.049	31	23	8	Limon sableux peu plastique
SC1 -4 (B)	10 - 11	47.2	2.79	1.79	1.22	100	1.295	36	31	5	Limon peu plastique
SC2 -1 (B)	4.5 - 5.5	28.9	2.83	1.98	1.53	96.8	0.844	-	-	-	SL/SA-Lp/Lt/Ap/At
SC2 -2 (B)	6 - 7	21.1	2.84	2.05	1.69	88.5	0.68	-	-	-	SL/SA-Lp/Lt/Ap/At
SC2 -3 (B)	8 - 9	24.5	2.79	-	-	-	-	-	-	-	SL/SA



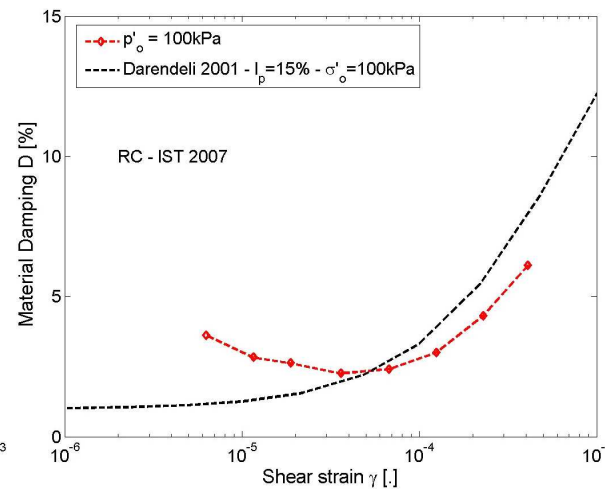
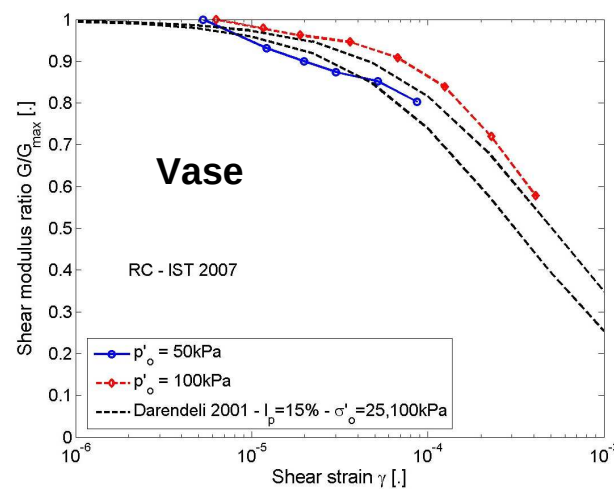
Essais en laboratoire

> Mesure des caractéristiques élastiques :

- colonne résonante (mangrove)
- essais triaxiaux monotones/cycliques en très petites déformations

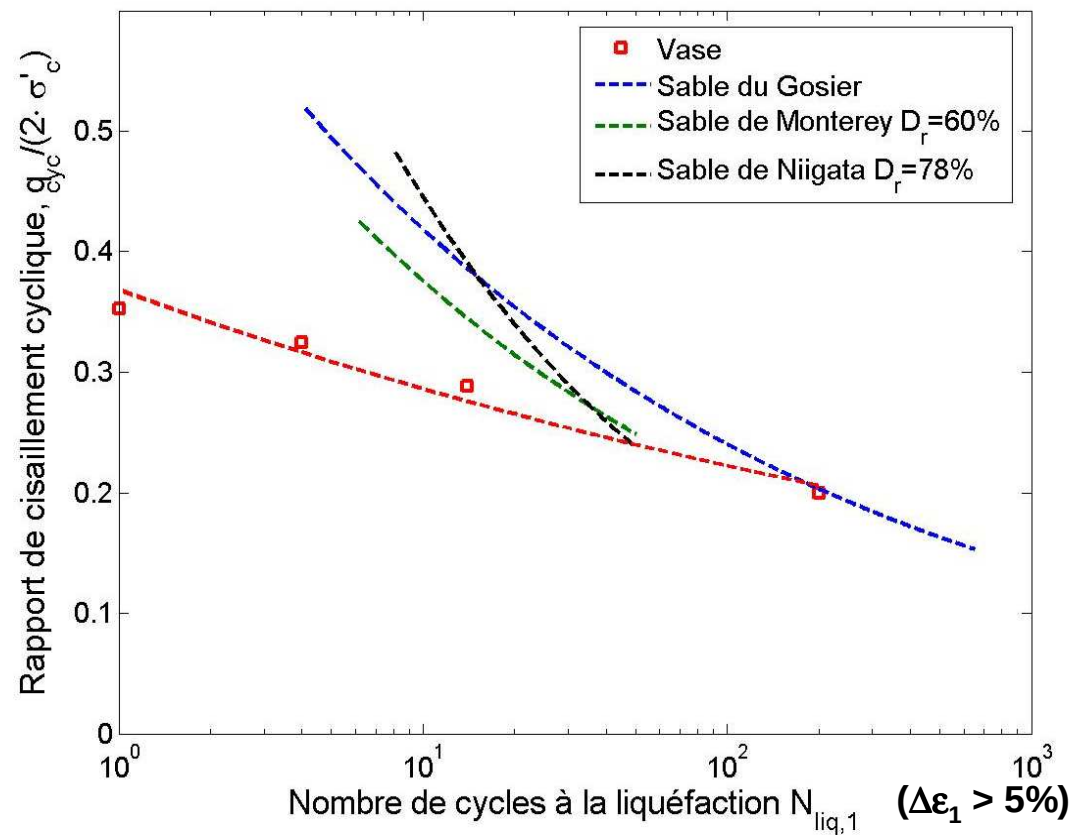
> Analyse de comportement :

- Essais œdométriques (tourbes, mangrove)
- Essais triaxiaux cycliques non drainés (liquéfaction)
- Essais de compression-extension sur échantillons liquéfiés (mangrove)



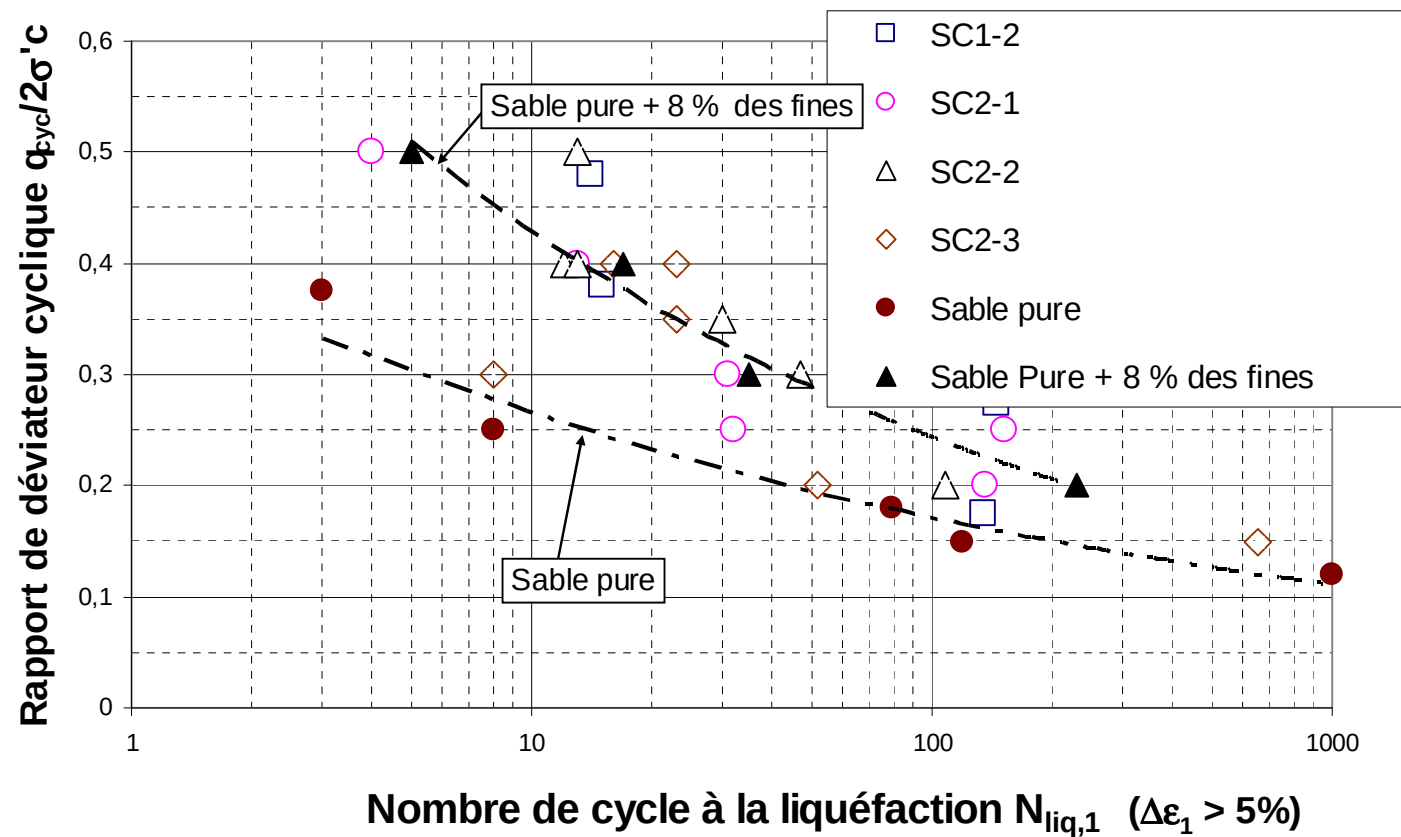
Résultats expérimentaux vis-à-vis de la liquéfaction

- Élaboration des courbes de résistance au cisaillement cyclique (R.C.C.) sur matériaux « intacts »



Résultats expérimentaux vis-à-vis de la liquéfaction

- Élaboration des courbes de résistance au cisaillement cyclique (R.C.C.) sur matériaux reconstitués (triaxiaux cycliques non drainés)



Résultats expérimentaux vis-à-vis de la liquéfaction

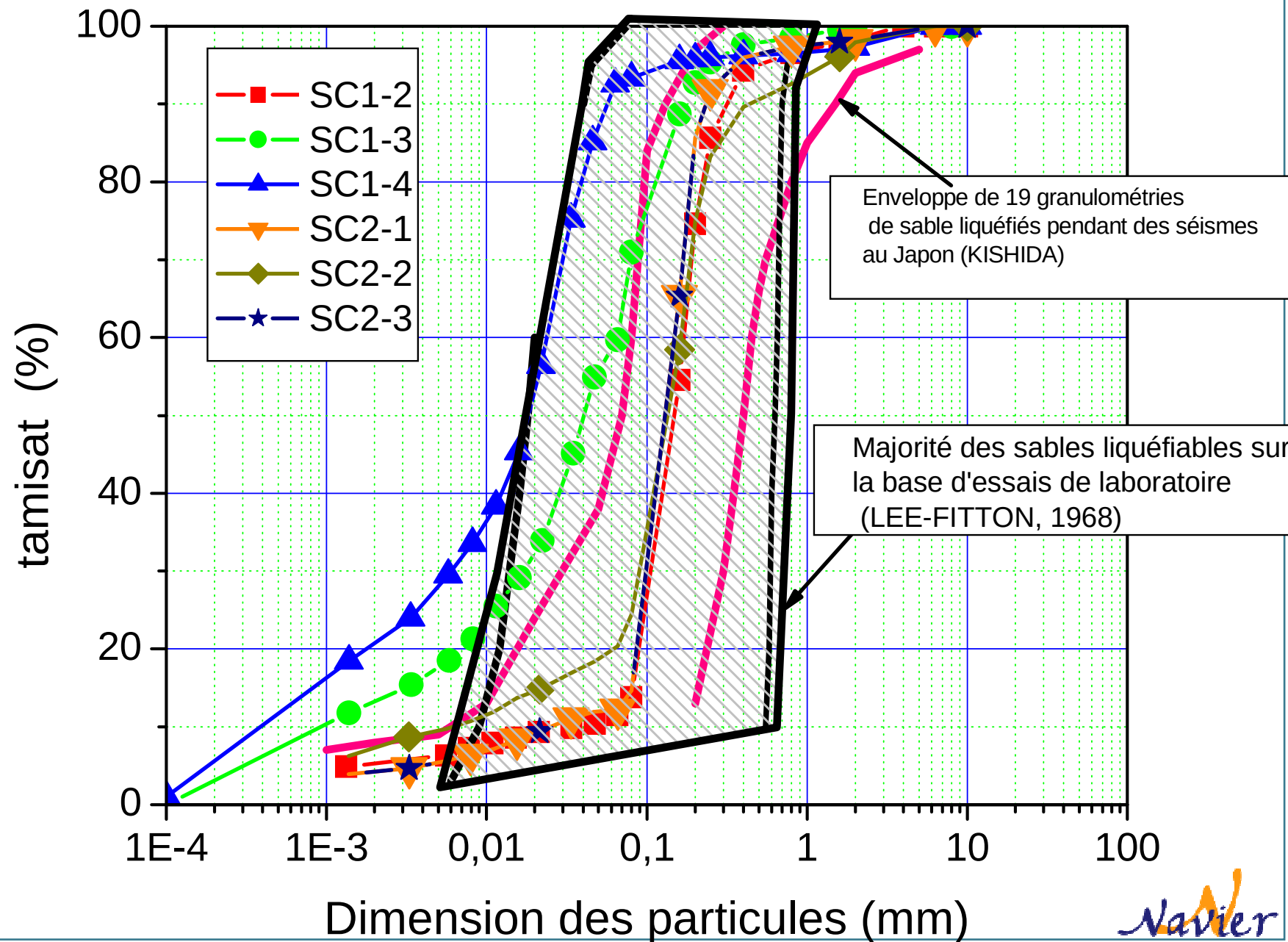
Critères PS92 (guide 1995)

Carotte	Prof. (m)	S_r (%)	D_{60}/d_{10}	D_{50} (mm)	σ'_v (MPa)	Liquéfiabilité
SC1-2	5.2-6	99,4~100	7,2 < 15	0,05 < 0,16 < 1.5	0,08	Pot. liquéfiable
SC1-3	9-10	99,8~100	72,2	0,050 < 0,05 < 1.5	0,12	Pot. non liquéfiable
SC1-4	10-11	100	60,0	0,019 < 0,050	0,13	Pot. non liquéfiable
SC 2-1	4.5-5.5	96,8~100	6,2 < 15	0,05 < 0,135 < 1.5	0,07	Pot. liquéfiable
SC 2-2	6-7	88,5~100	28,3	0,05 < 0,14 < 1.5	0,09	Pot. non liquéfiable
SC 2-3	8-9	-	2.8	0,05 < 0,20 < 1.5	0,11	Pot. liquéfiable

Sables vasards, silts : $S_r = 100\%$; $C_u = d_{60}/d_{10} < 15$; $0.05 \text{ mm} < d_{50} < 1.5 \text{ mm}$

Argiles : $d_{15} > 0.005 \text{ mm}$, $w_L < 35$; $w/w_L > 0.9$; point situé au-dessus de la droite A du diagramme de plasticité





Résultats expérimentaux vis-à-vis de la liquéfaction (mangrove)

> Estimation de la validité des critères de liquéfaction proposés dans la littérature pour les matériaux « intermédiaires » (entre sables et argiles) :

- test de 10 critères existants avec les paramètres d'identification mesurés sur la vase (mangrove) de Belle-Plaine :

$$d_{15} = 0.002-0.007 \text{ mm} ; Cu = d_{60}/d_{10} > 10-15 ; w_L = 37-42.2 ; w/w_L = 1-1.4$$

- confrontation avec les mesures directes de liquéfaction déduites des triaxiaux cycliques



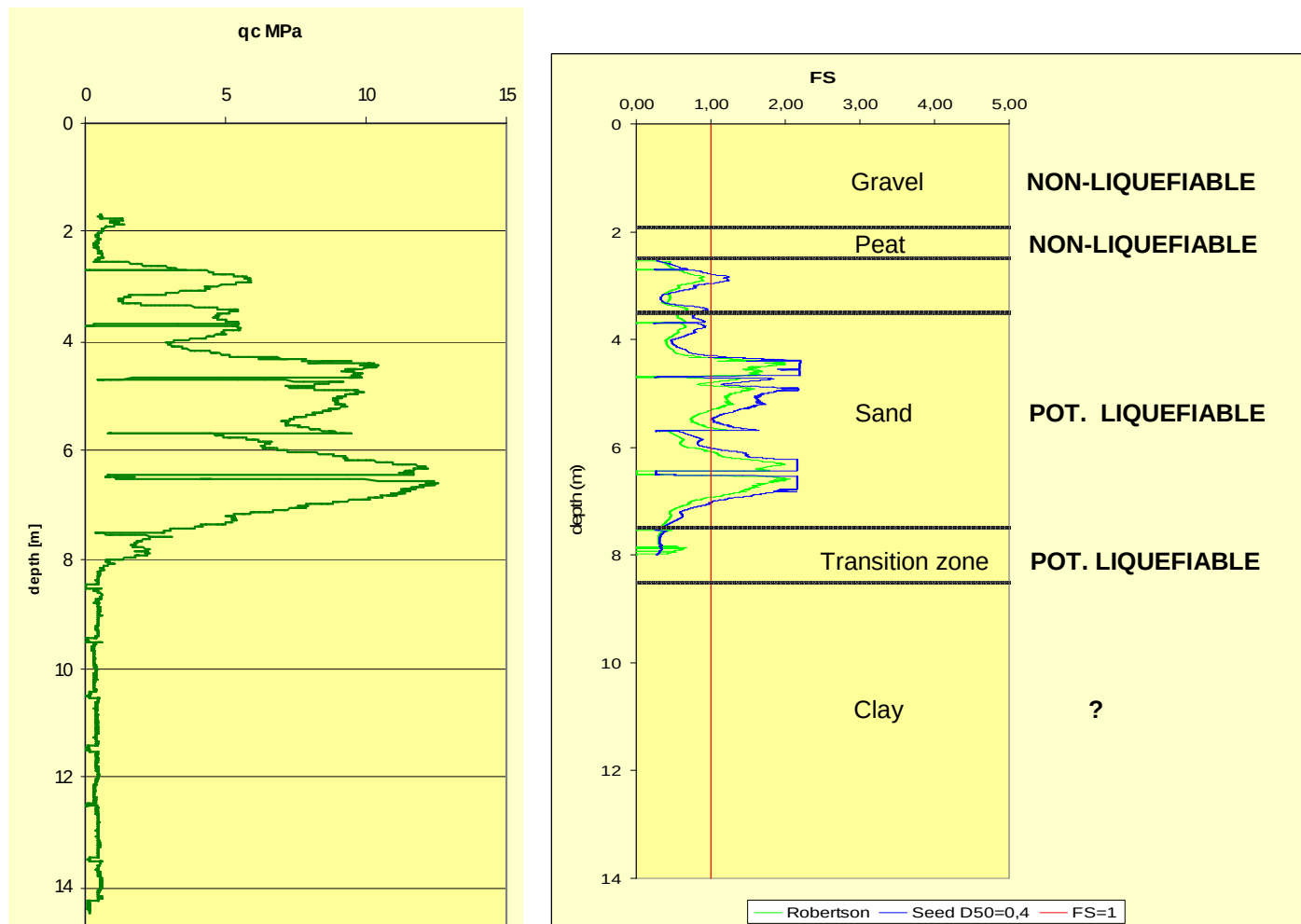
Résultats expérimentaux vis-à-vis de la liquéfaction (mangrove)

Reference	Criteria for soils susceptible to liquefaction according to the literature	Values measured for the soil of the present study
"Chinese criteria" Wang, 1979	soils with less than 15-20% fines < 5 μm ; $w/w_L > 0.9$	15-25% < 5 μm $w/w_L = 1.1-1.2$ 🤔
Seed and Idriss, 1982	soils with less than 15-20% fines < 5 μm ; $w_L < 35\%$; $w/w_L > 0.9$	15-25% < 5 μm $w_L = 37-42\%$; $w/w_L = 1.1-1.2$ 🤔
PS 92 guide, 1995	for silty sands and silts: $S_r = 100\%$; $C_u = d_{60}/d_{10} < 15$; 0.05 mm < d_{50} < 1.5 mm	$S_r = 100\%$; $C_u = 10-15$; $d_{50}=0.012-0.020$ mm 🤔
	for clays: $d_{15} > 0.005$ mm; $w_L < 35$; $w/w_L > 0.9$; point situated to the right of the A-line of the plasticity diagram	$d_{15} = 0.001-0.006$ mm $w_L = 37-42\%$; $w/w_L = 1.1-1.2$ point situated on the A-line of the plasticity diagram 🤔
Youd, 1998	point situated to the right of the A-line of the plasticity diagram; $PI < 7$; soils with L in USCS classification	point situated on the A-line of the plasticity diagram; CL-ML 🤔
Andrews and Martin, 2000	soils with less than 10% < 2 μm ; $w_L < 32\%$	8-16% < 2 μm ; $w_L = 37-42\%$ 🤔
Polito, 2001	$w_L < 25\%$; $PI < 7$ medium susceptibility: $25\% < w_L < 35\%$; $7 < PI < 10$	$w_L = 37-42\%$; $PI = 11-18$ 🤔
Seed et al., 2003	$PI < 12$; $w_L < 37\%$; $w/w_L > 0.8$ medium susceptibility: $12 < PI < 20$; $37\% < w_L < 47\%$; $w/w_L > 0.85$	$w_L = 37-42\%$; $PI = 11-18$ $w/w_L = 1.1-1.2$ 🤔
Boulanger and Idriss, 2004, 2006	"sand-like" behavior: $PI < 7$	$PI = 11-18$ 🤔
Bray and Sancio, 2006	$PI < 12$; $w/w_L > 0.85$ medium susceptibility: $12 < PI < 20$; $w/w_L > 0.8$	$PI = 11-18$; $w/w_L = 1.1-1.2$ 🤔
Chang and Hong, 2008	"sand-like" behavior: soils with less than 20-25% < 2 μm	8-16% < 2 μm 🤔

Résultats expérimentaux vis-à-vis de la liquéfaction (mangrove)

- ⇒ assez bon accord entre les critères de liquéfaction usuels des matériaux argileux et les résultats des essais triaxiaux cycliques :
- matériau n'obéissant pas strictement aux critères des argiles même s'il en est très proche (pas réellement liquéfiable)
 - résultat confirmé par les essais triaxiaux cycliques :
 - liquéfaction pour un niveau relativement important de déviateur cyclique
 - liquéfaction pour un nombre de cycles important

Résultats in situ vis-à-vis de la liquéfaction : FS calculé à partir des profils pénétrométriques



Analyse de la réponse sismique linéaire du site

> Méthode des rapports spectraux pour déterminer l'amplification du sol et ses fréquences de résonance :

- Calcul de la réponse sismique sur l'ensemble des données accélérométriques acquises entre juillet et décembre 2008, en tenant compte du rapport signal/bruit :

62 séismes situés en majorité à moins de 200km :

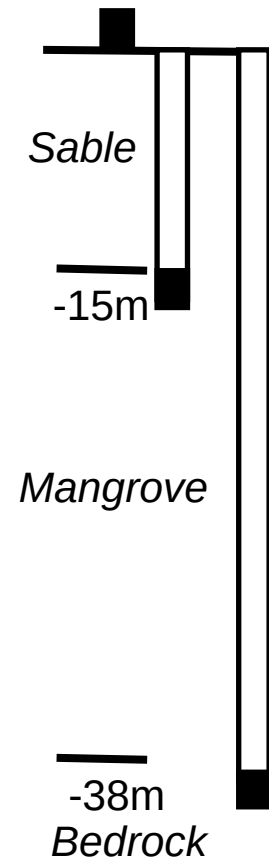
1 séisme de magnitude supérieure à 5

37 de magnitude supérieure à 3

18 $\text{PGA} > 0.0035 \text{ m/s}^2$

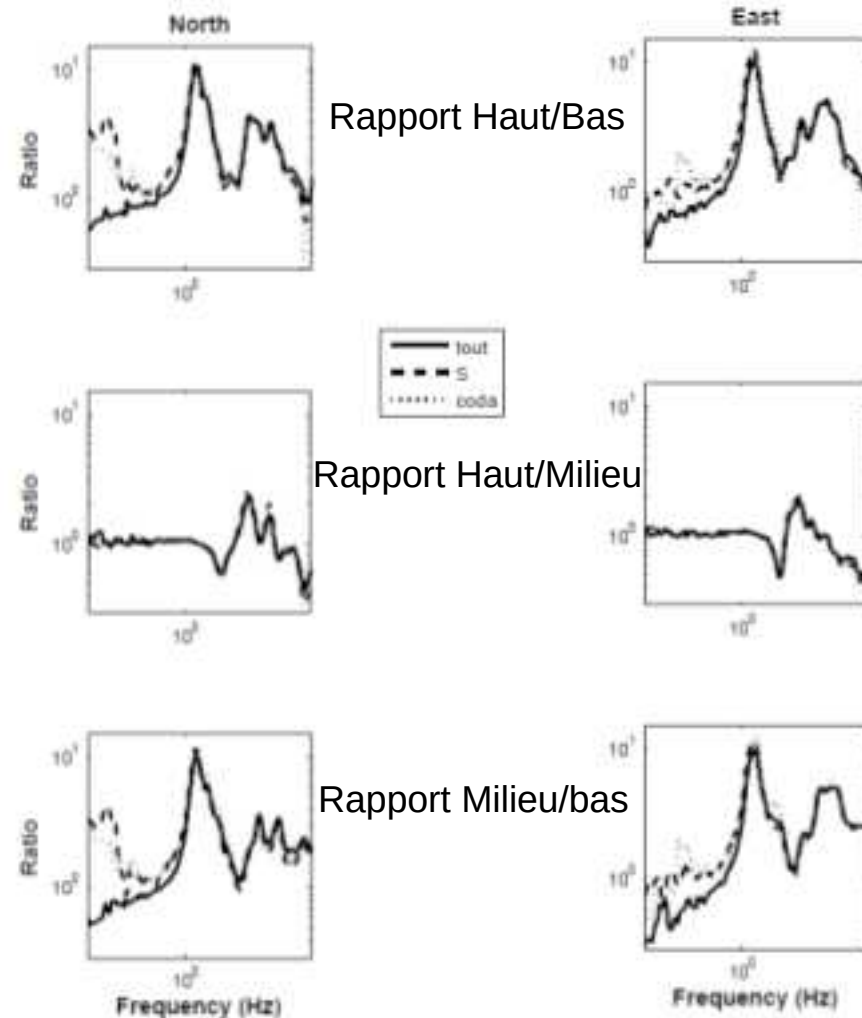
21 $0.0015 < \text{PGA} < 0.0035 \text{ m/s}^2$

22 $\text{PGA} < 0.0015 \text{ m/s}^2$



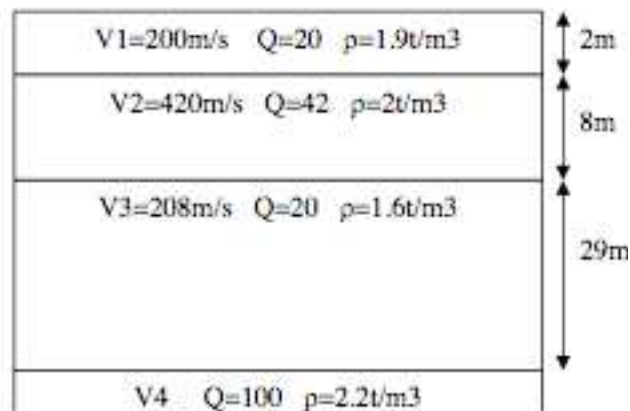
Analyse de la réponse sismique linéaire du site

- peu d'anisotropie : rapports des composantes Nord et Est très similaires
- pic net autour de 1.3 Hz pour les rapports entre capteurs haut/bas et milieu/bas : le pic est essentiellement dû à la réponse de la couche de mangrove située en profondeur

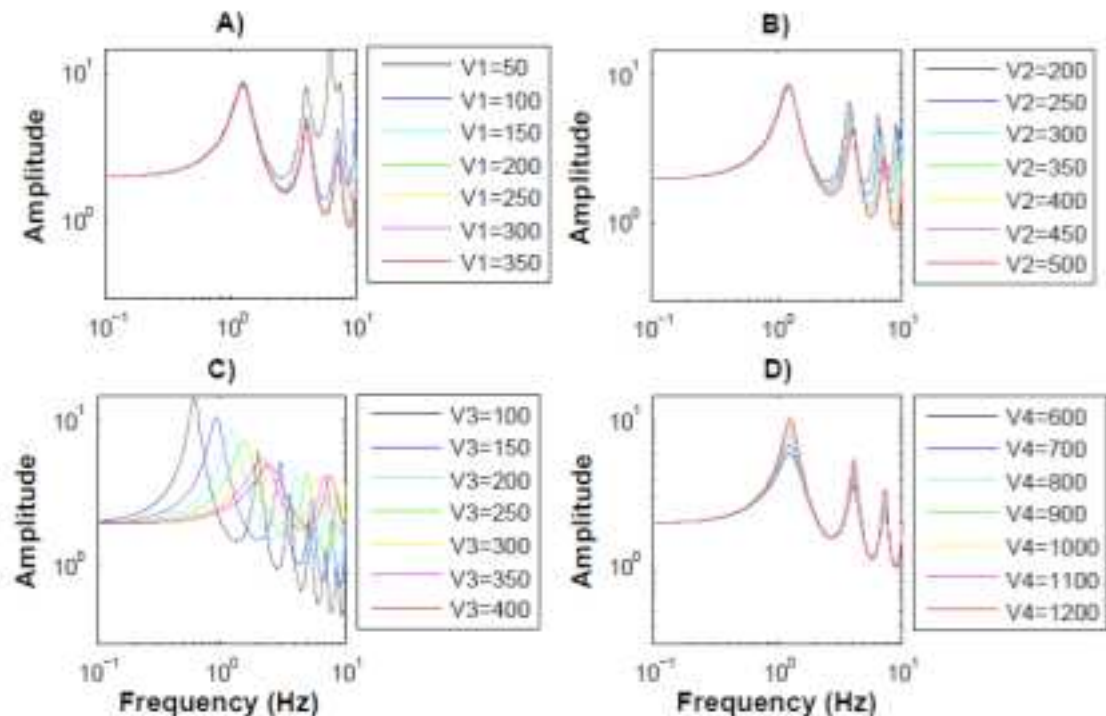


Analyse de la réponse sismique linéaire du site : estimation des vitesses de cisaillement

- Utilisation des mesures au sismocône interprétées par L3S-R
- Comparaison de la réponse directe (simulation 1D, Kennett) et des résultats de la méthode des rapports spectraux

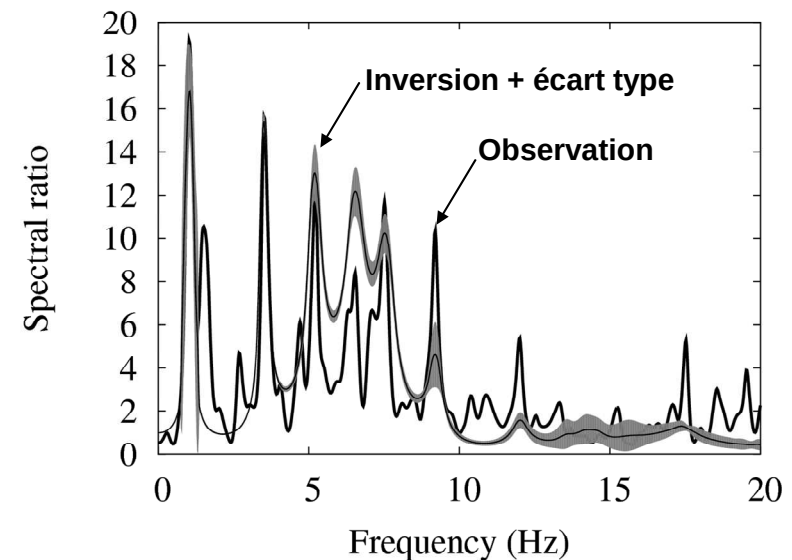
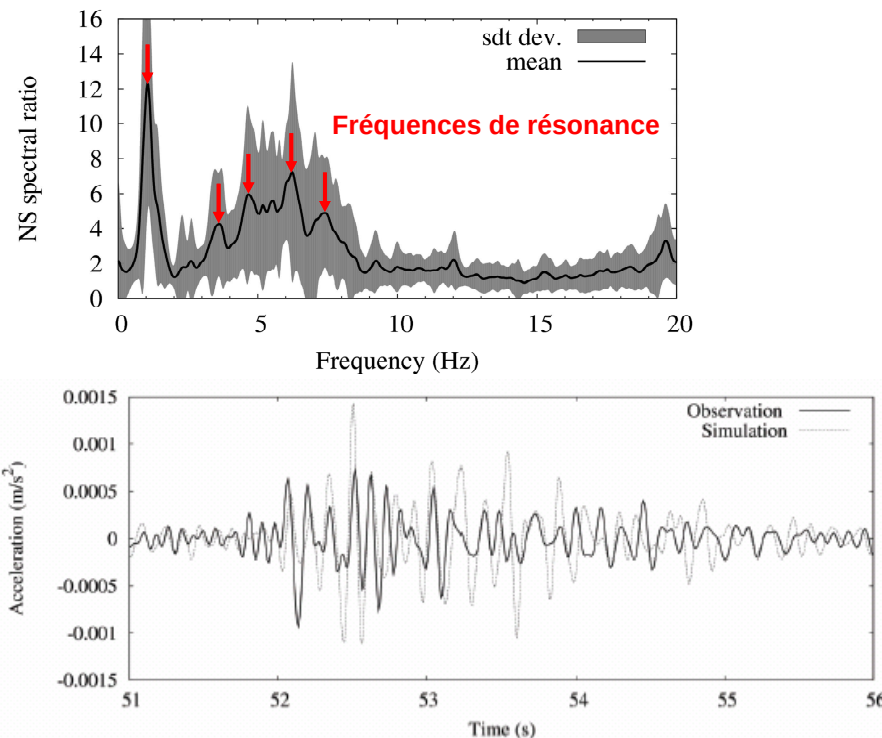


$Q_s = V_s/10$ (Olsen et al., 2005)

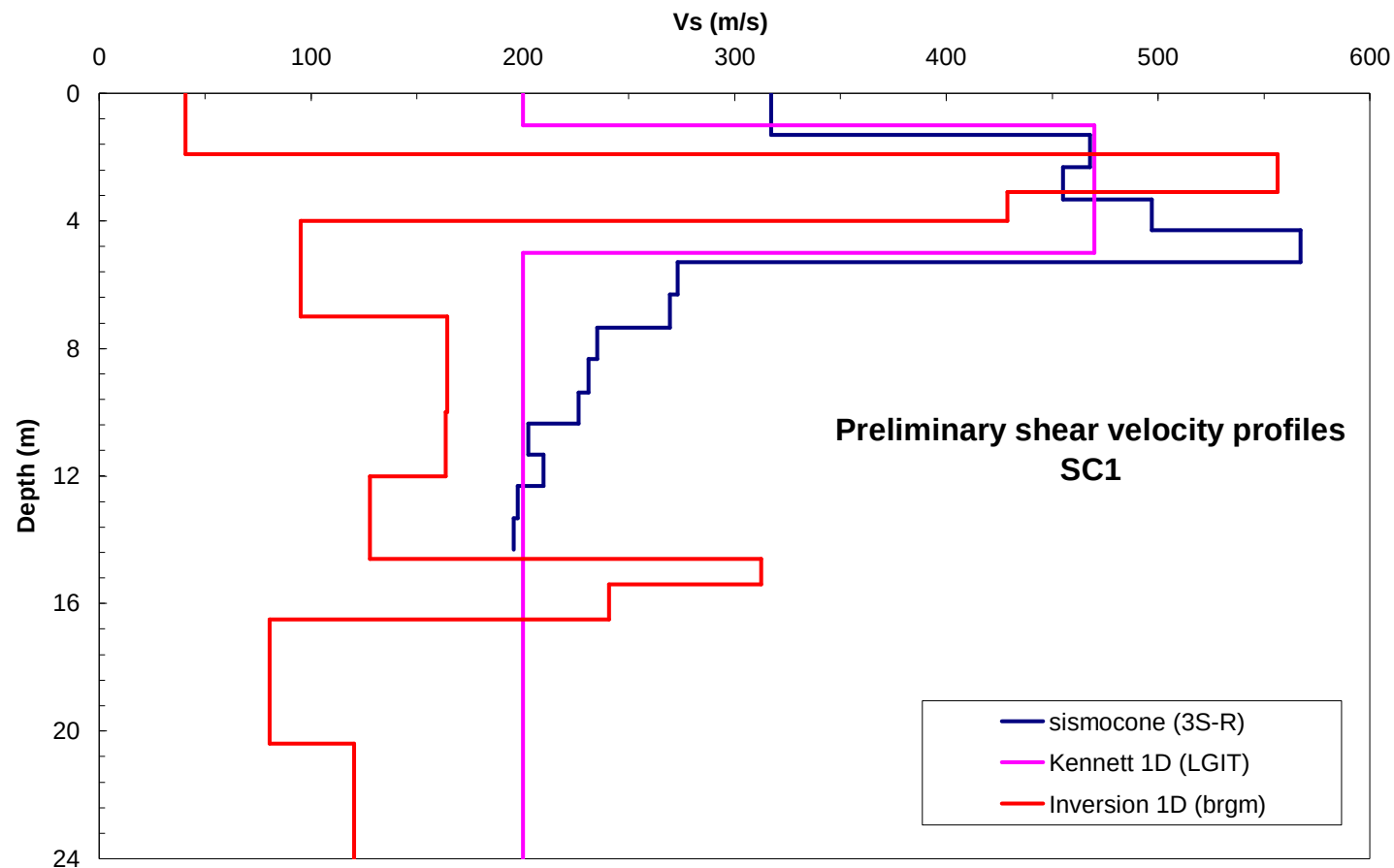


Analyse de la réponse sismique linéaire du site : estimation des vitesses de cisaillement

- Utilisation des mesures au sismocône interprétées par L3S-R
- Inversion des ratios spectraux observés entre juillet et décembre 2008, par un algorithme génétique dans le domaine fréquentiel, basé sur la théorie de propagation des ondes en milieu stratifié (Thomson-Haskell)



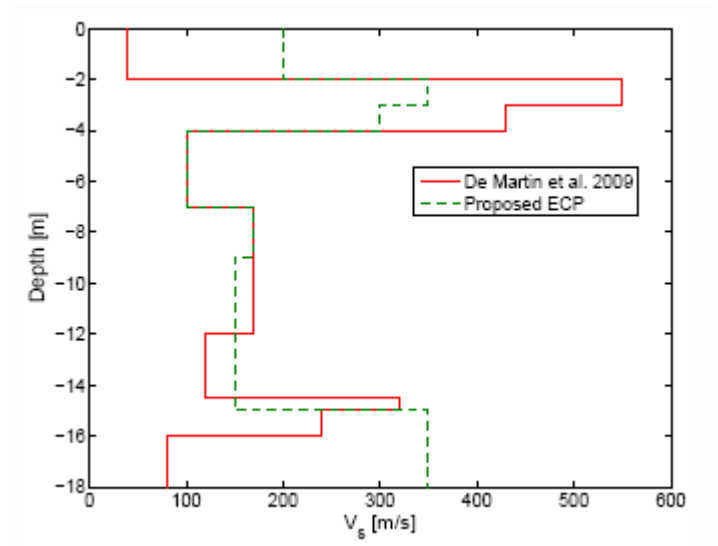
Analyse de la réponse sismique linéaire du site : estimation des vitesses de cisaillement



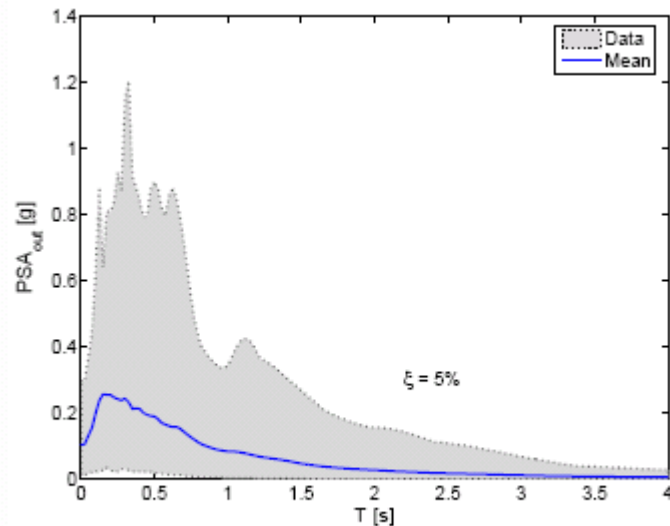
Analyse de la réponse sismique non linéaire du site

> Simulations numériques 1D (*CyberQuake*) :

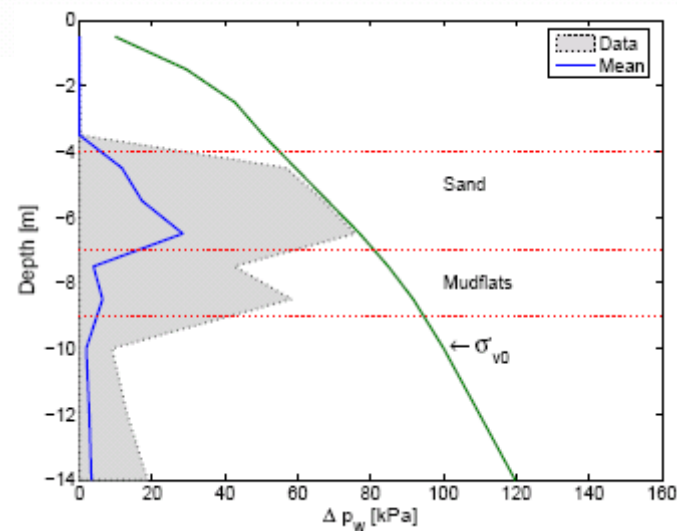
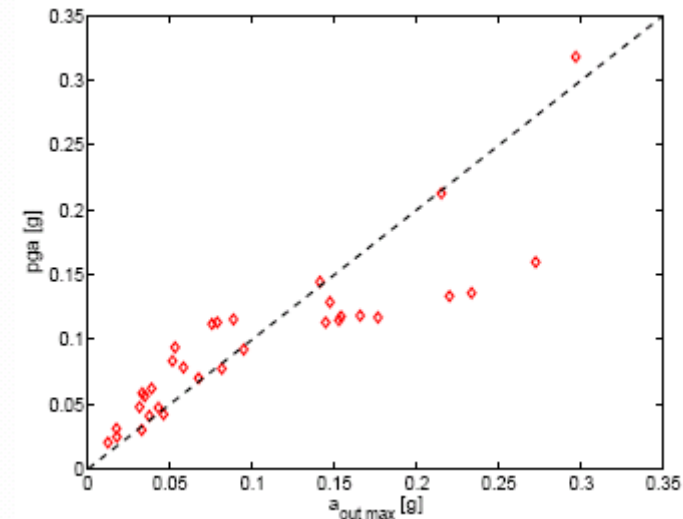
- études de sensibilité sur les différents paramètres du modèle préliminaire du site (simulations 1D transitoires non linéaires et analyses de type Monte-Carlo), afin de déterminer leur influence dans la réponse du profile de sol sous séisme



Analyse de la réponse sismique non linéaire du site



32 earthquake motions (Douglas, 2006)



Conclusions et perspectives

> Quelques difficultés rencontrées :

- Retard sur la réalisation des 2 sondages carottés et donc du programme d'essais en laboratoire
 - Difficultés au niveau de l'instrumentation :
 - capteurs accélérométriques en profondeur (un an de SAV)
 - capteur de pression interstitielle
 - station d'acquisition : pannes récurrentes
- ⇒ Peu d'enregistrements de séismes

> Des résultats intéressants : comparaisons in situ/labo

- caractéristiques mécaniques des matériaux
- prévisions de liquéfaction : notamment confrontation des critères existants et des résultats des essais

Conclusions et perspectives

- > Analyse des r_u en liaison avec l'estimation des niveaux de déformation mesurés : approche de la liquéfaction en termes de déformation.
- > Confrontation des paramètres mécaniques des différentes couches obtenus par corrélations avec q_c et ceux mesurés sur échantillons intacts.
- > Simulations numériques :
 - > convergence vers un même profil de vitesses sismiques
 - > amélioration des modèles pour simuler la réponse non linéaire du site
 - > analyses de sensibilité