Journée technique CFMS du 27/01/2015

Sols et fondations sous sollicitations statiques, cycliques et dynamiques

Réseaux verticaux et comportement non-linéaire des sols sous séisme

P-Y Bard
ISTerre / IFSTTAR Grenoble

ISTerre
Institut des Sciences de la Terre

IFSTTAR

Plan

- Introduction : Le "cas grenoblois"

- Travaux menés par et avec Pierre
  - Grenoble
  - Belle-plaine

- Actions en cours
  - Le projet Argonet
  - Vérification / validation codes NL

Le cas de Grenoble

Zone de sismicité moyenne

M=5.5 - 6 voire +

Vallée glaciaire encaissée

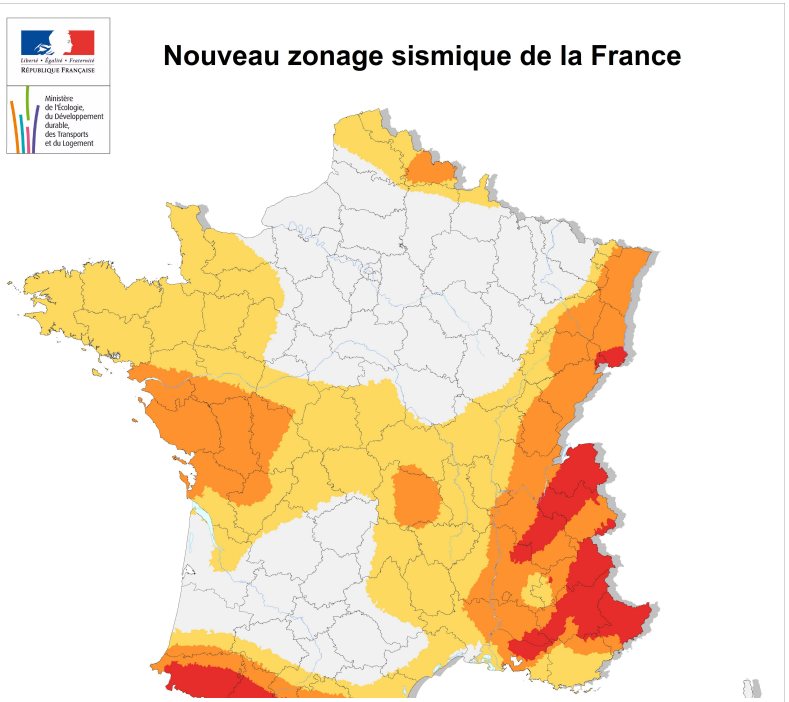
H> 900 m, W = 4-5 km

Fort contraste

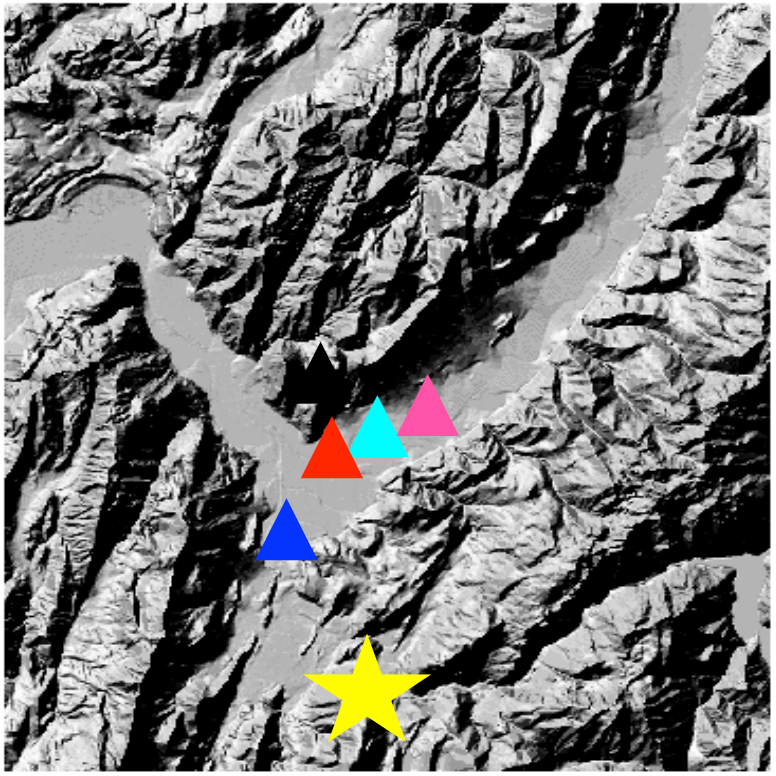
Exposition significative

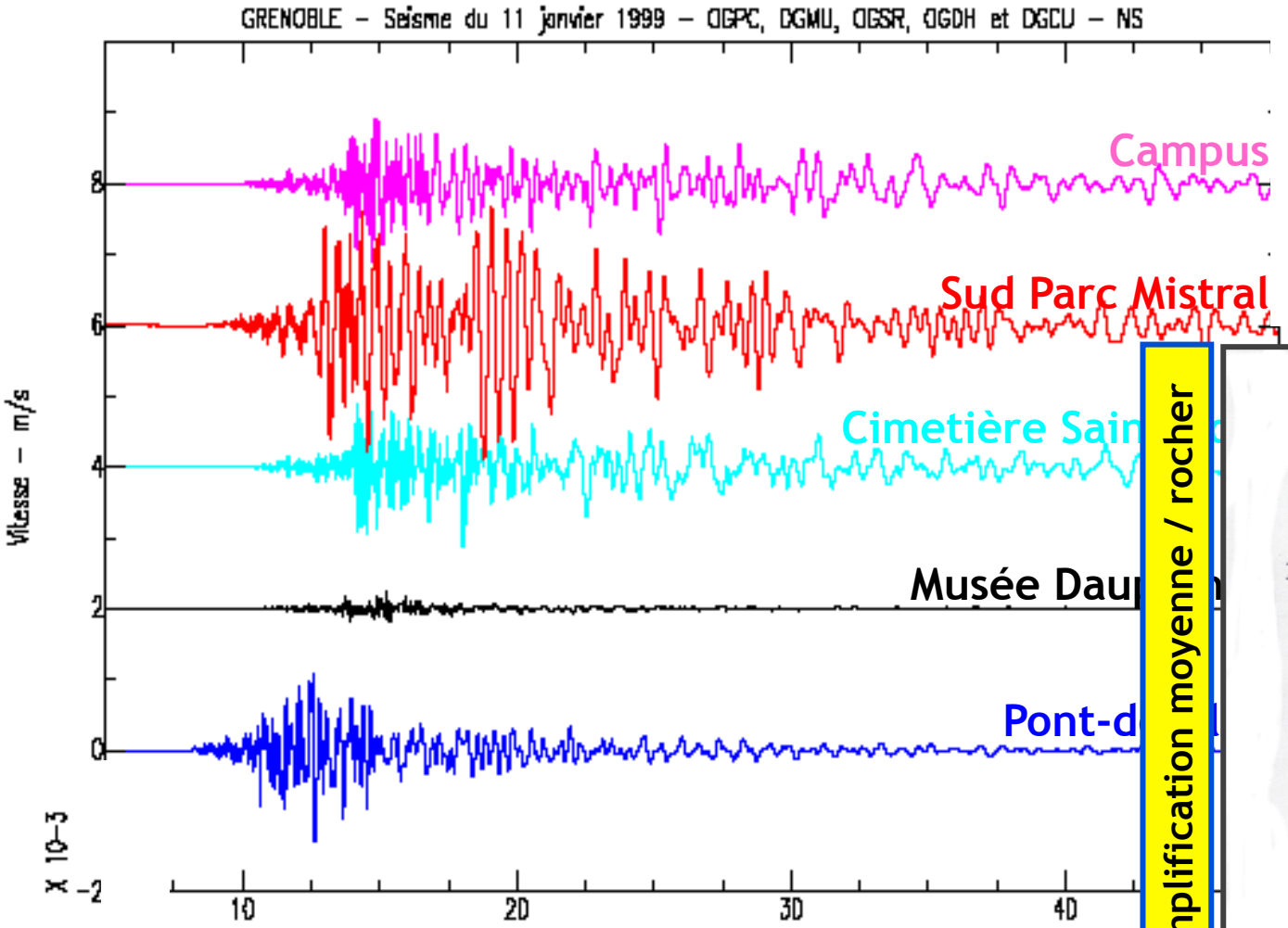
Bassin de population

Bassin industriel (Seveso 2, Nucléaire)

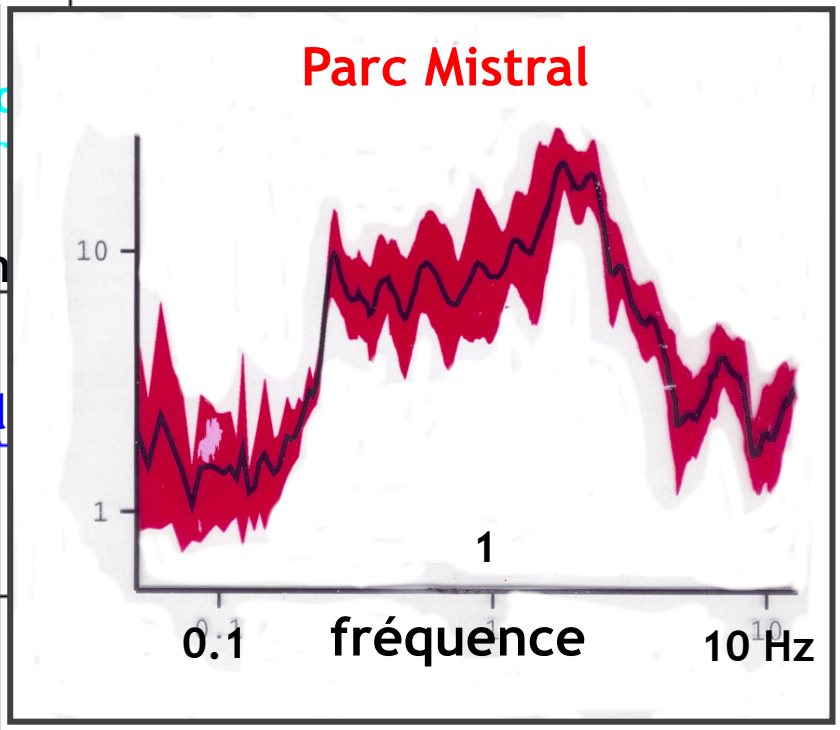


Grenoble : enregistrements du séisme de Laffrey (M4, 11/01/1999)

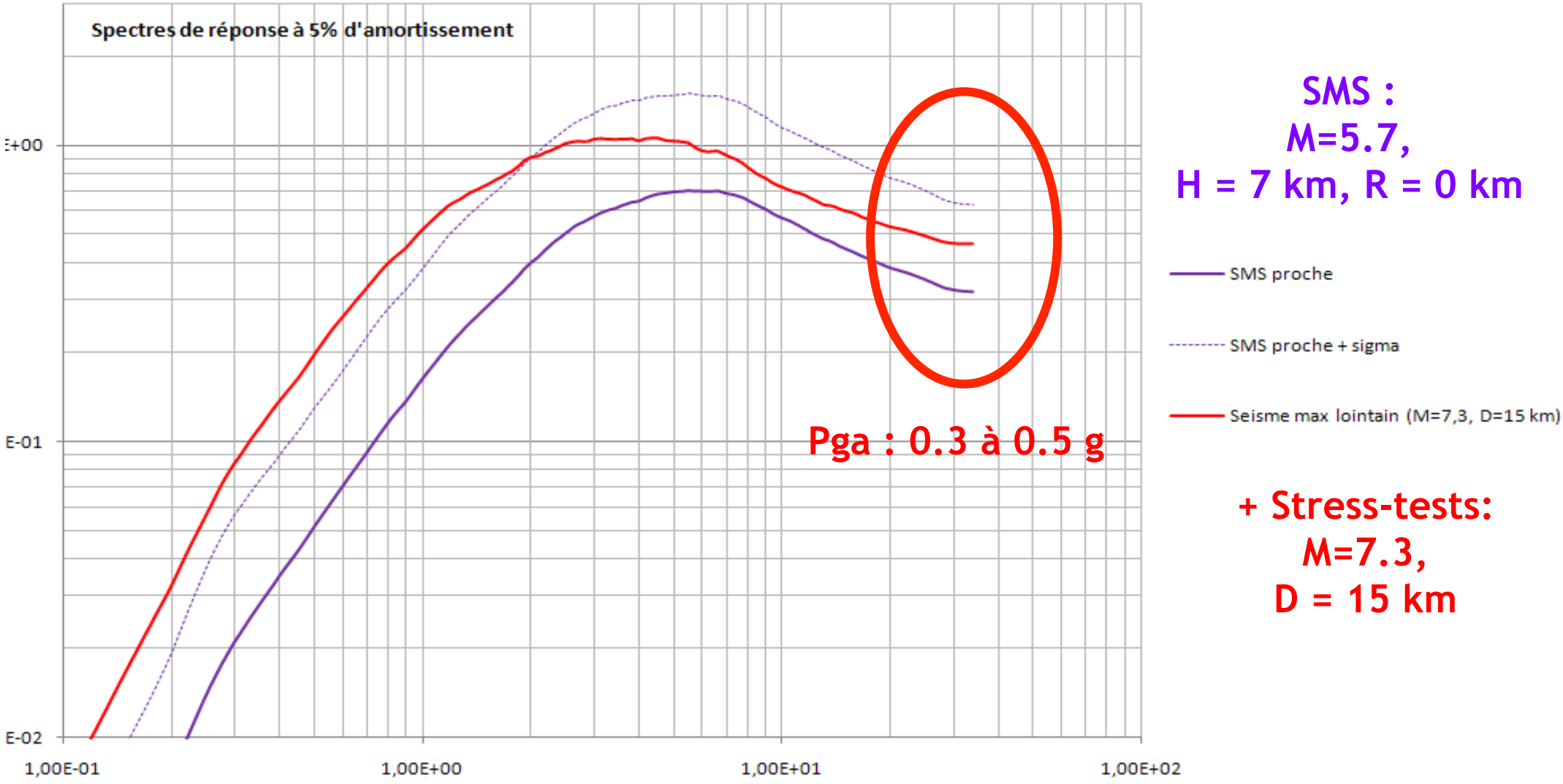




Amplification moyenne / rocher



Spectres typiques pour événements de référence

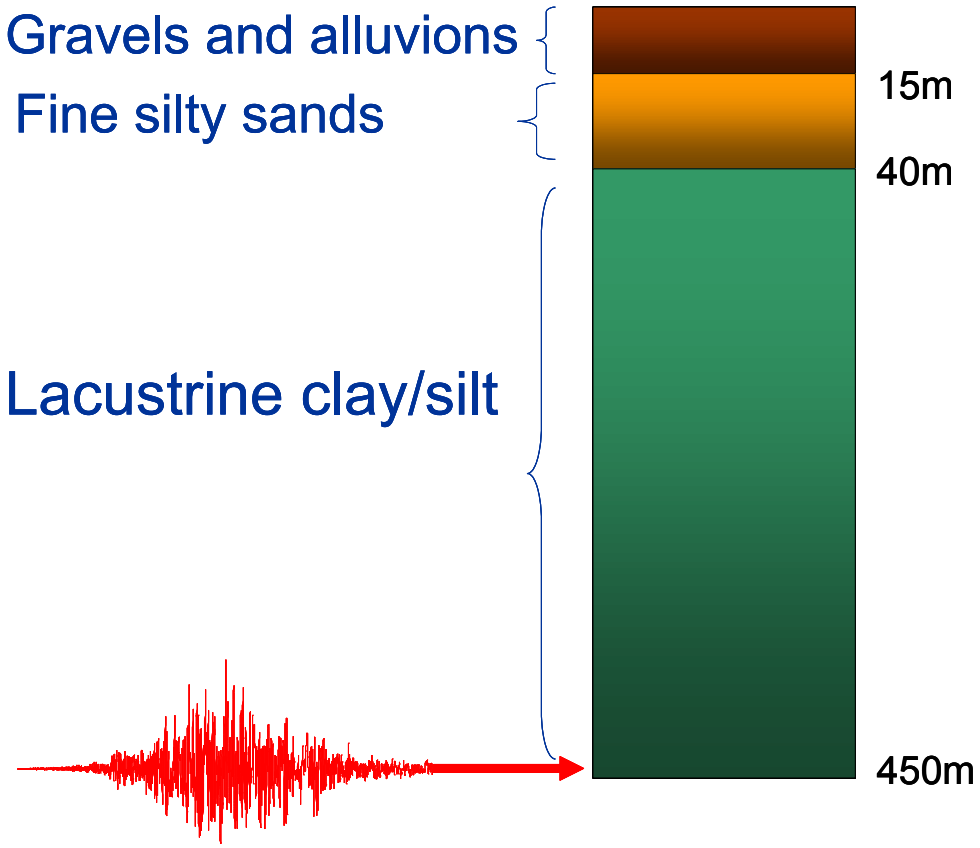


? Evolution sous forte sollicitation ?

- Comportement NL du remplissage

- Travaux de P. Foray avec J. Jerram
  - Caractérisation géotechnique des formations lacustres
  - Mesures triaxial cyclique

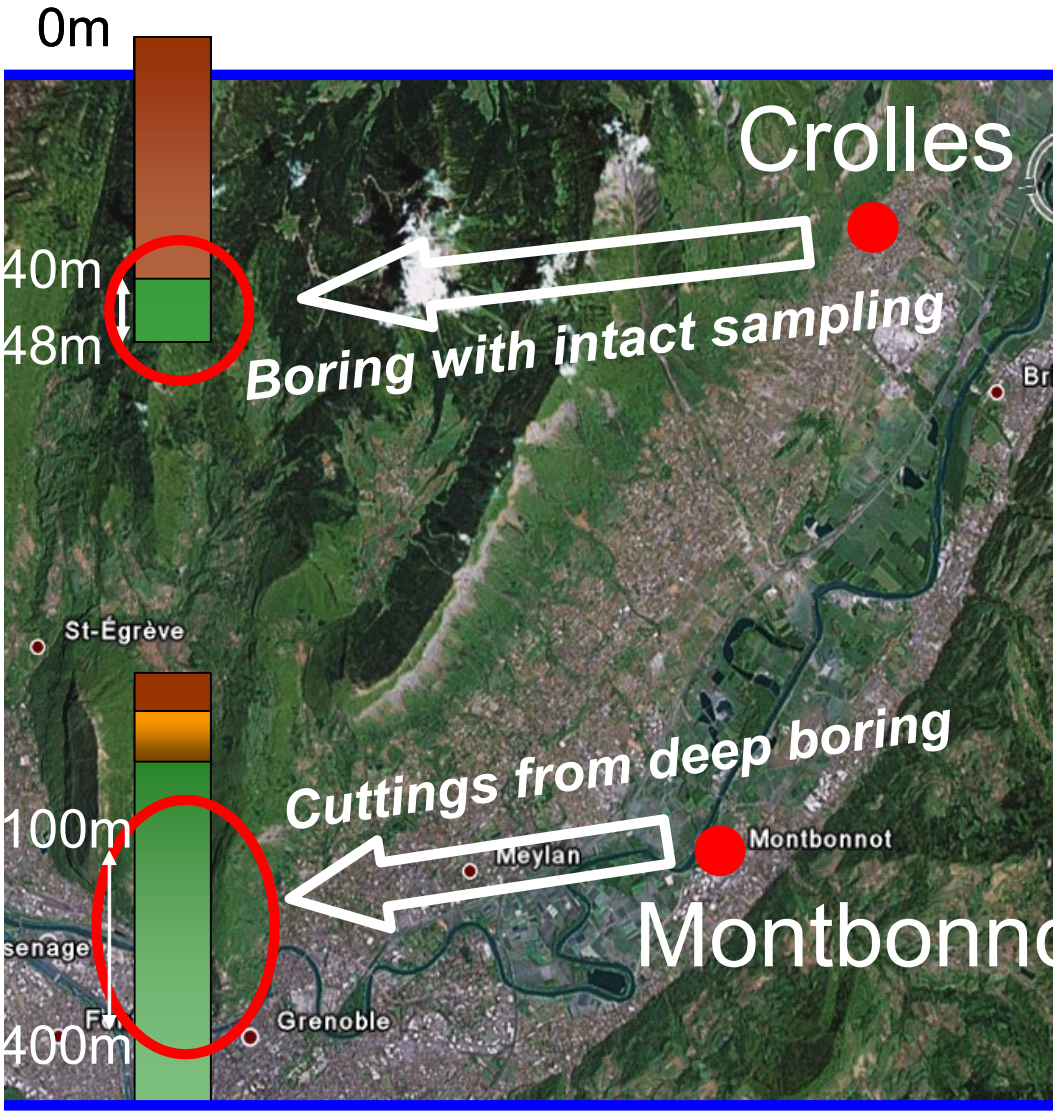
Typical Grenoble basin soil profile:



Typical Grenoble earthquake (M_w max ~ 5.5)

(Jerram et al., 2006)

Sites d'étude



- Etude géotechnique des formations lacustres
  - ➢ Homogénéité
    - Index de plasticité
    - Granulométrie
    - Minéralogue

    } Toutes profondeurs
  - ➢ Comportement NL
    - Test au triaxial cyclique sur échantillons intacts
      - Courbes de dégradataion
      - Une proiondeur (Crolles)

(Jerram et al., 2006)

Classification des limons lacustres: Limites d'Atterberg

Site	Profon-deur(m)	PI (%)
Montbonnot	100 - 120	14.5
Montbonnot	120 – 160	12.4
Montbonnot	160 – 200	16.4
Montbonnot	240+	13.1
Crolles	44	9.8
Crolles	47	14.6

Sols à plasticité faible à modérée

(Jerram et al., 2006)

Classification des limons lacustres : Granulométrie

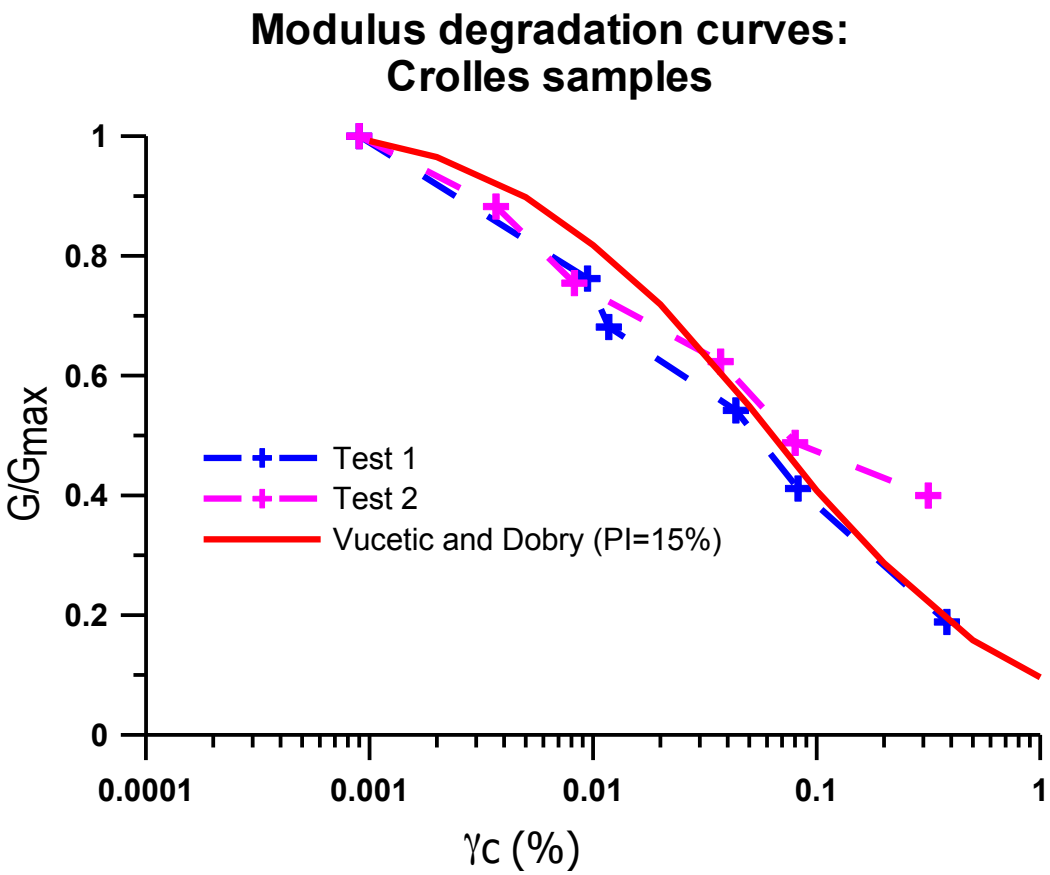
- Echantillons de 14 niveaux différentes à Montbonnot et 2 niveaux à Crolles : granulométrie laser
- Résultats très similaires à toutes les profondeurs

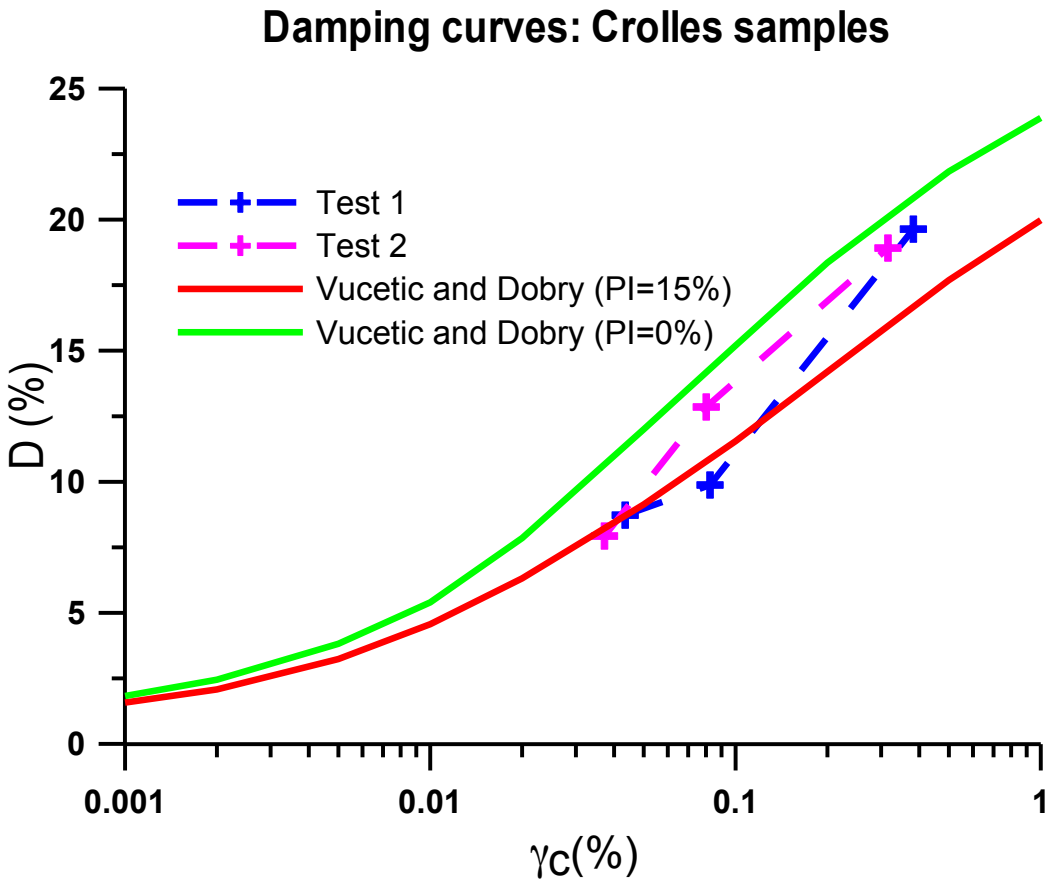
	Montbonnot (103; 121-181; 430)	Montbonnot (109; 198-326)	Crolles (44, 47)
% argile	6.3	3.6	7.8
% limons	86.0	71.4	90.0
% sable	7.7	25.0	2.2

(Jerram et al., 2006)

Essais triaxial cyclique : résultats en courbes de dégradation G-D-γ

- 2 essais non-drainés à σ'_0 = 450 kPa (z = 47 m)
  - 5 séries of cycles : ε=±2E-4 à ε=±5E-3





Accord satisfaisant avec la littérature (Vucetic-Dobry) : comportement assez fortement NL à 47 m

(Jerram et al., 2006)

Conclusions Jerram - Foray 2006: comportement NL des limons lacustres

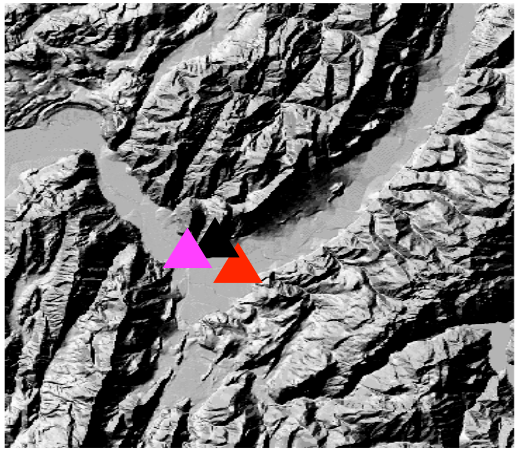
- Classification :
  - Remplissage profond = formation lacustre limoneuse homogène sur tout le Grésivaudan (IP, granulo, minéralogie)
- Triaxial cyclique : assez fortement NL, conforme à IP15
  - ? Évolution à grande profondeur ?
  - Nécessité d'essais à plus grande pression de confinement ($\sigma'_0 \approx$ 1- 4 Mpa)
- Si comportement quasi linéaire à grande profondeur (près de l'interface remplissage / substratum) (fort σ'_0)
  - ? La forte amplification ets-elle susceptible de se manifester aussi sous sollicitation plus forte ?

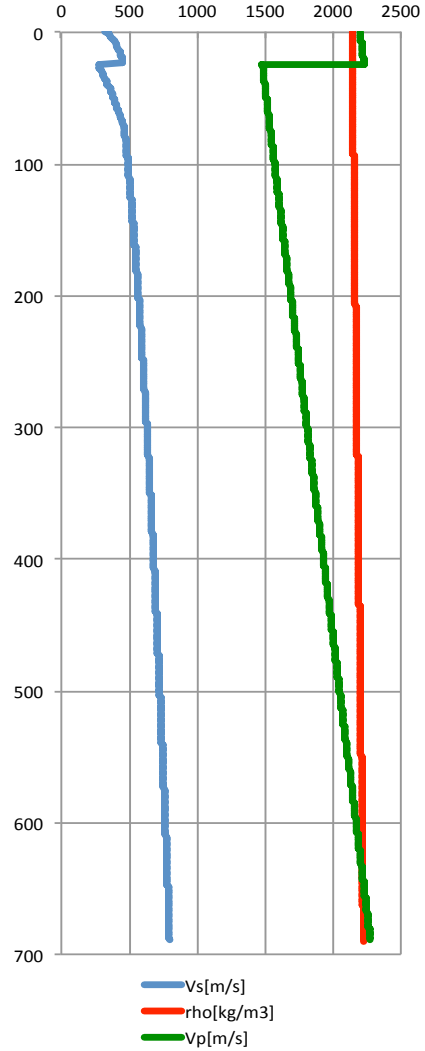
(fort contraste d'impédance en profondeur)

(Jerram et al., 2006)

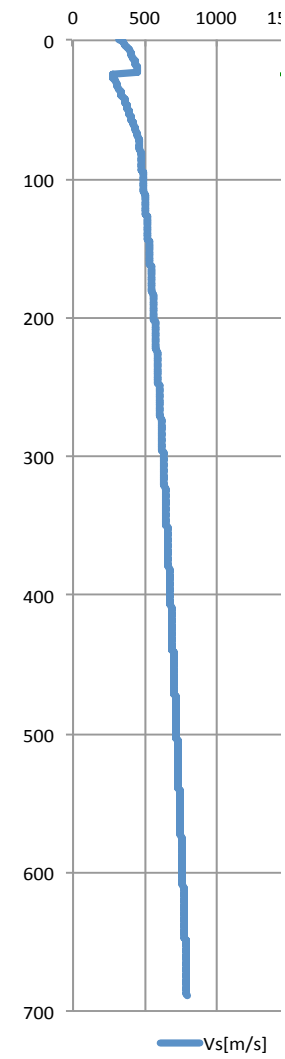
Travaux récents sur Grenoble

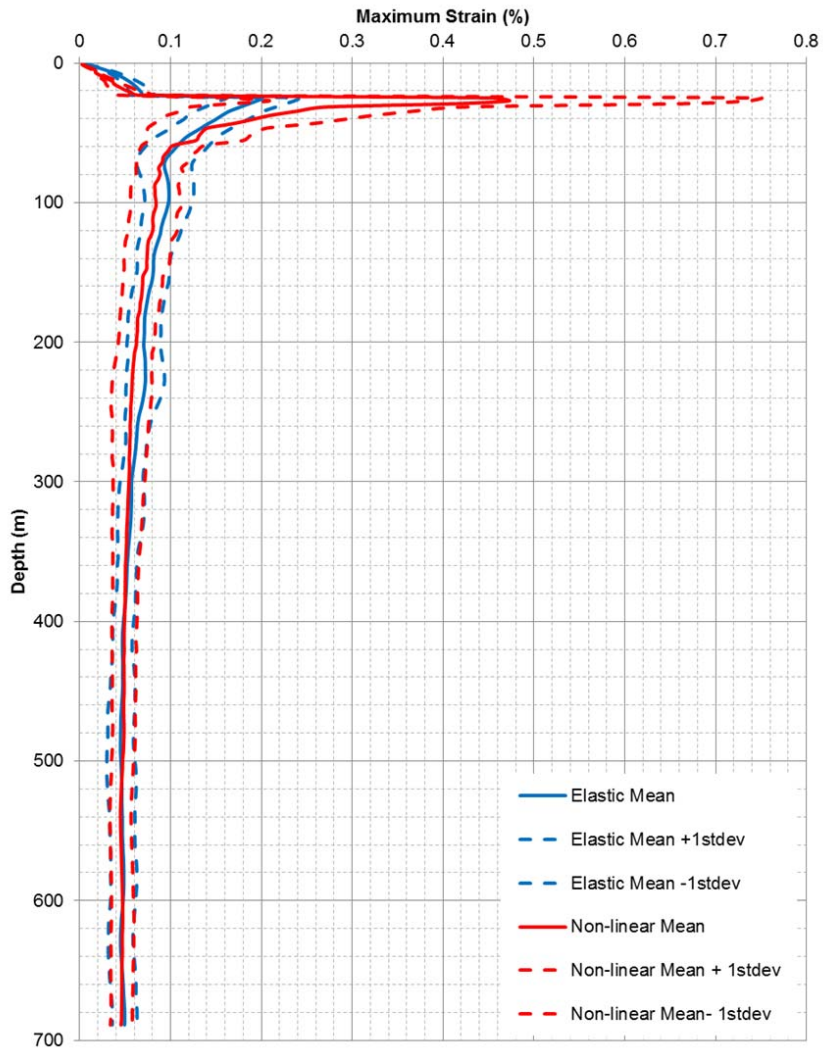
- Projet SIGMA / CASHIMA (2011/15)
- Site = ILL
  - Graviers sur argiles
- Prise en compte des mesures P. Foray / J. Jerram
  - Menq 2003 + Darendeli 2001, IP15
- Modélisation
  - 2D/3D L (FD : CU Bratislava)
  - 1D NL (DEEPSOIL: Fugro/Geoter)
  - Hybride



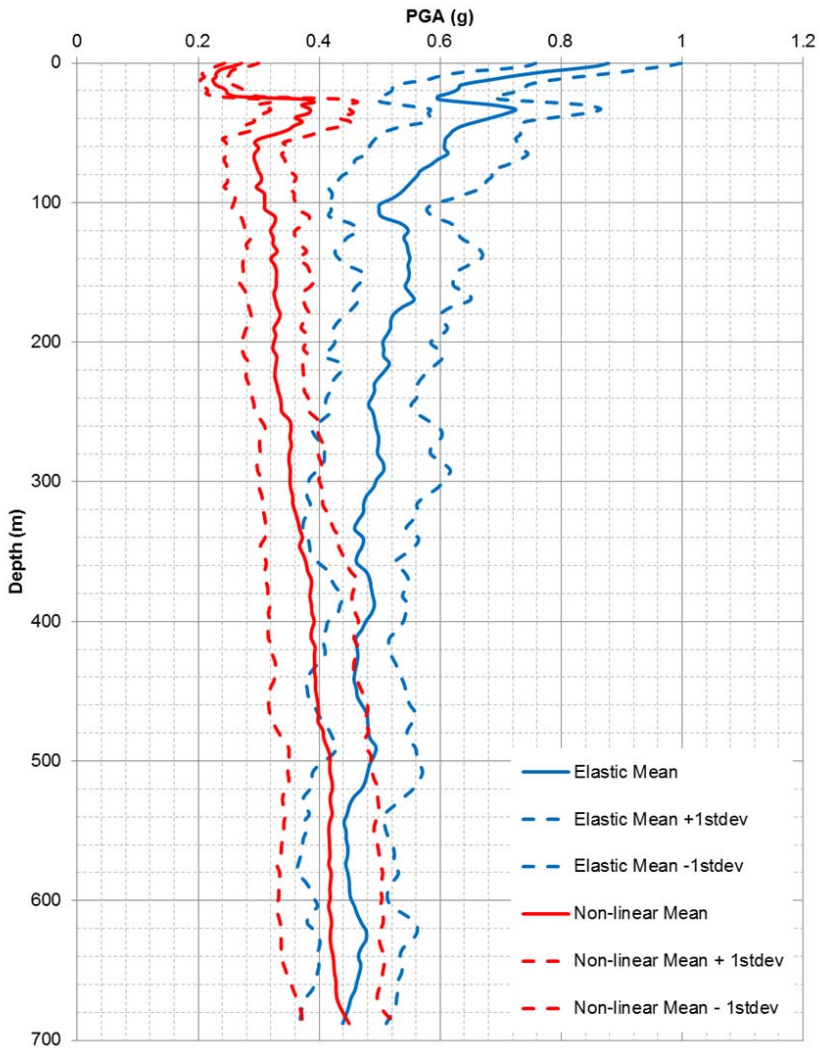


Comparaison 1D L / NL





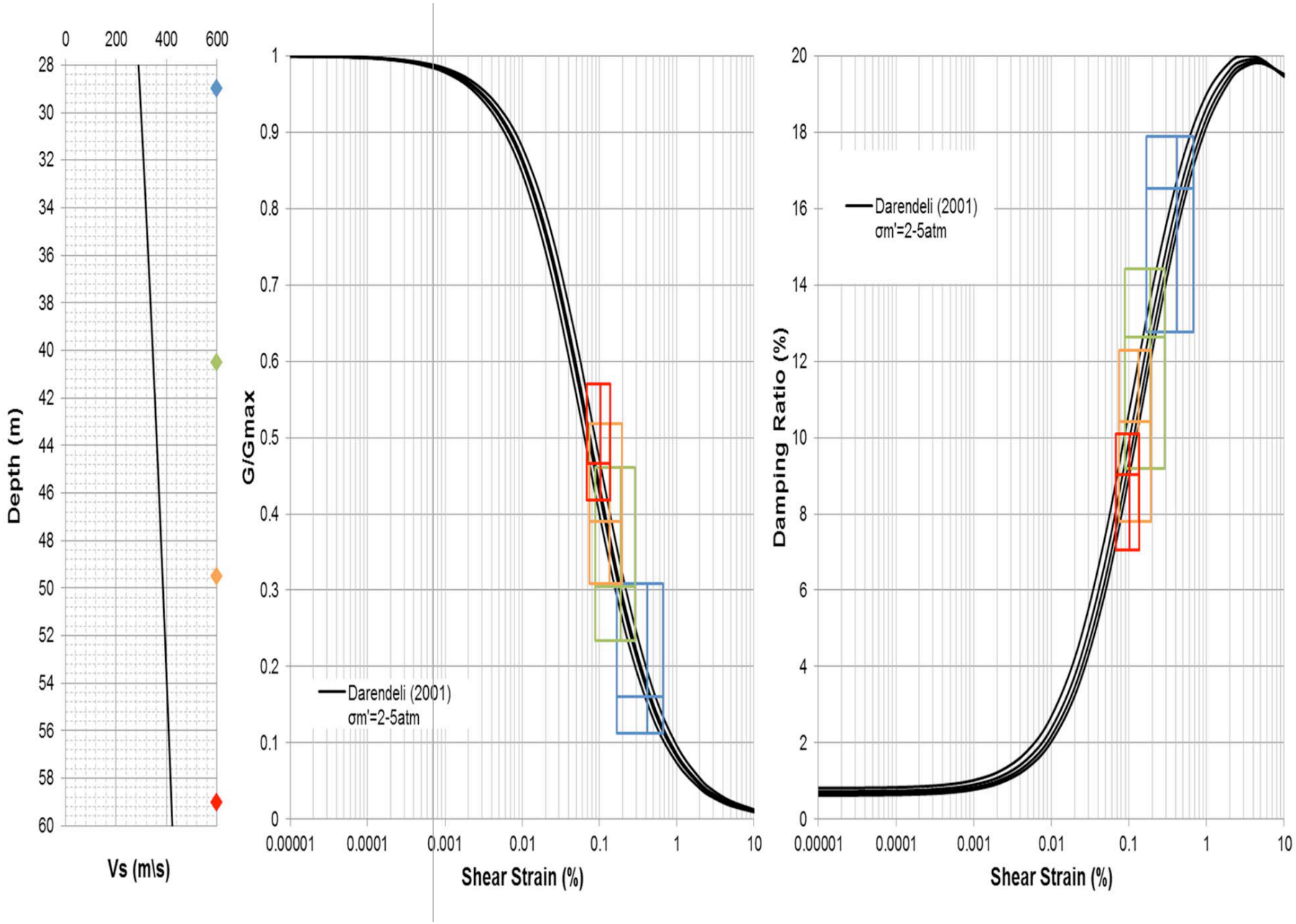
Maximum strain



Peak Ground Acceleration

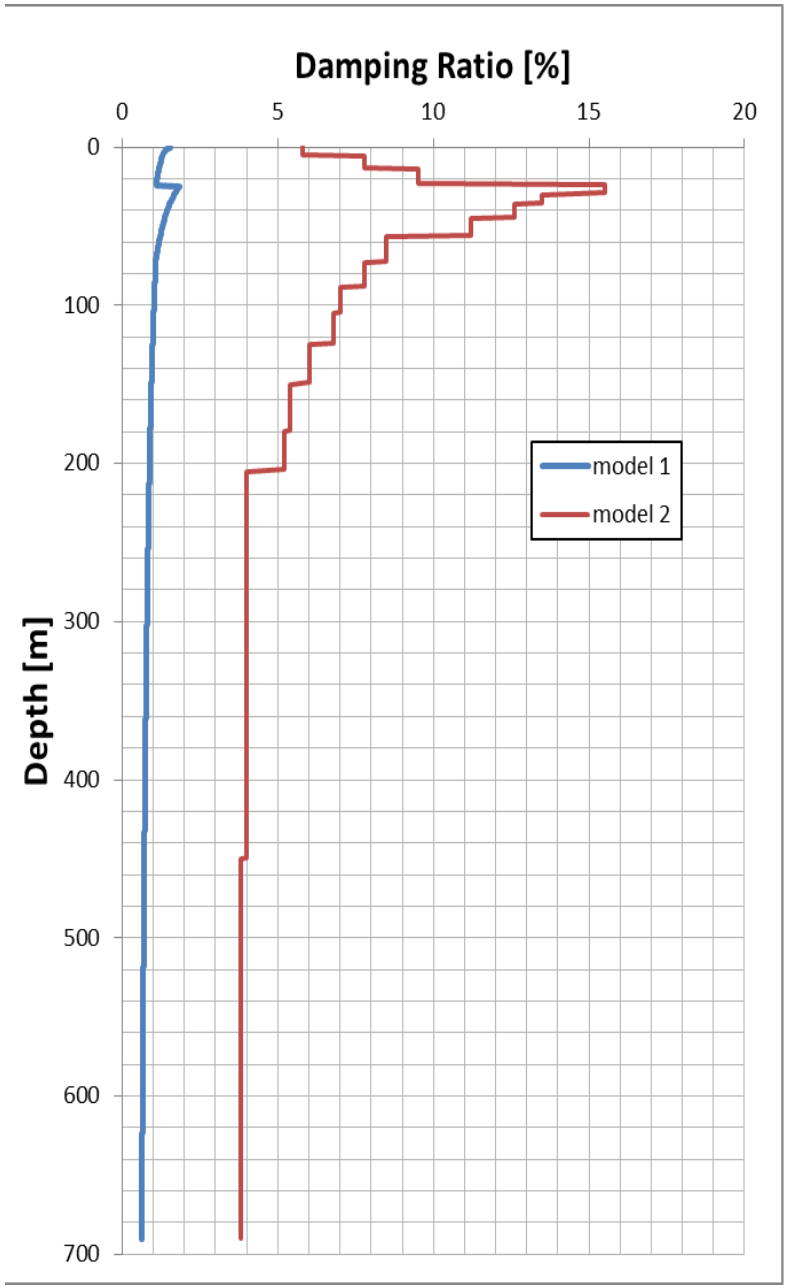
Ameri-Giannakou, 2014

Déformation et amortissement



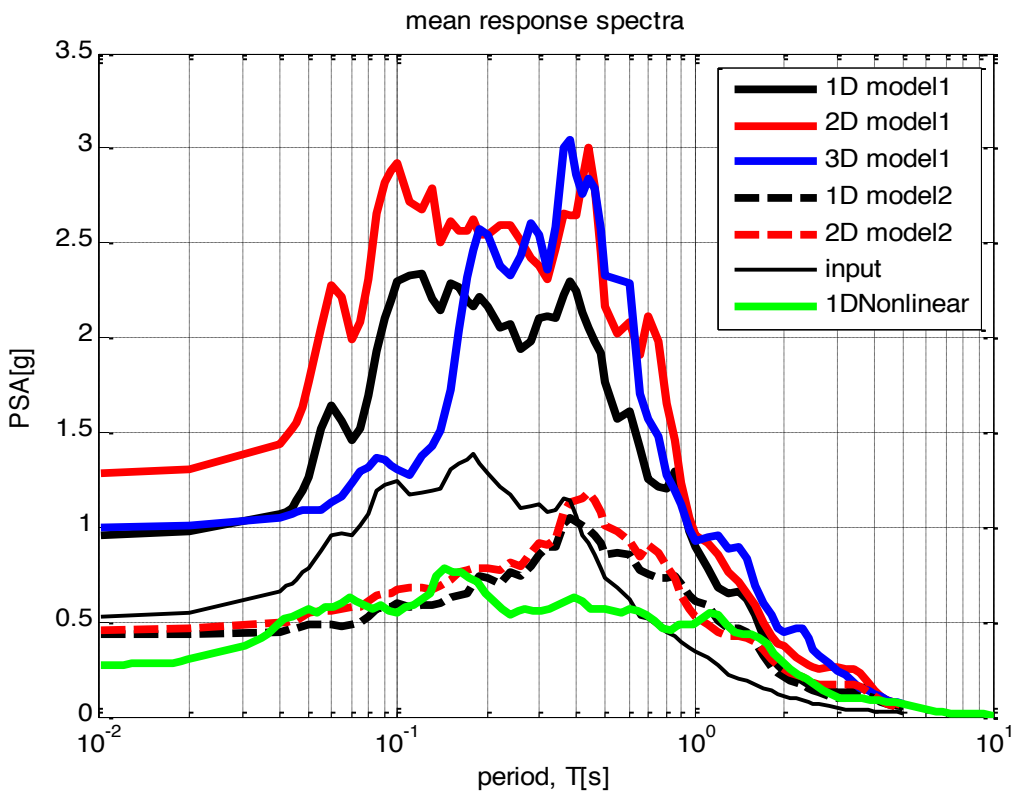
Modèle "hybride" 2 : Profil d'amortissement déduit du profil de déformations

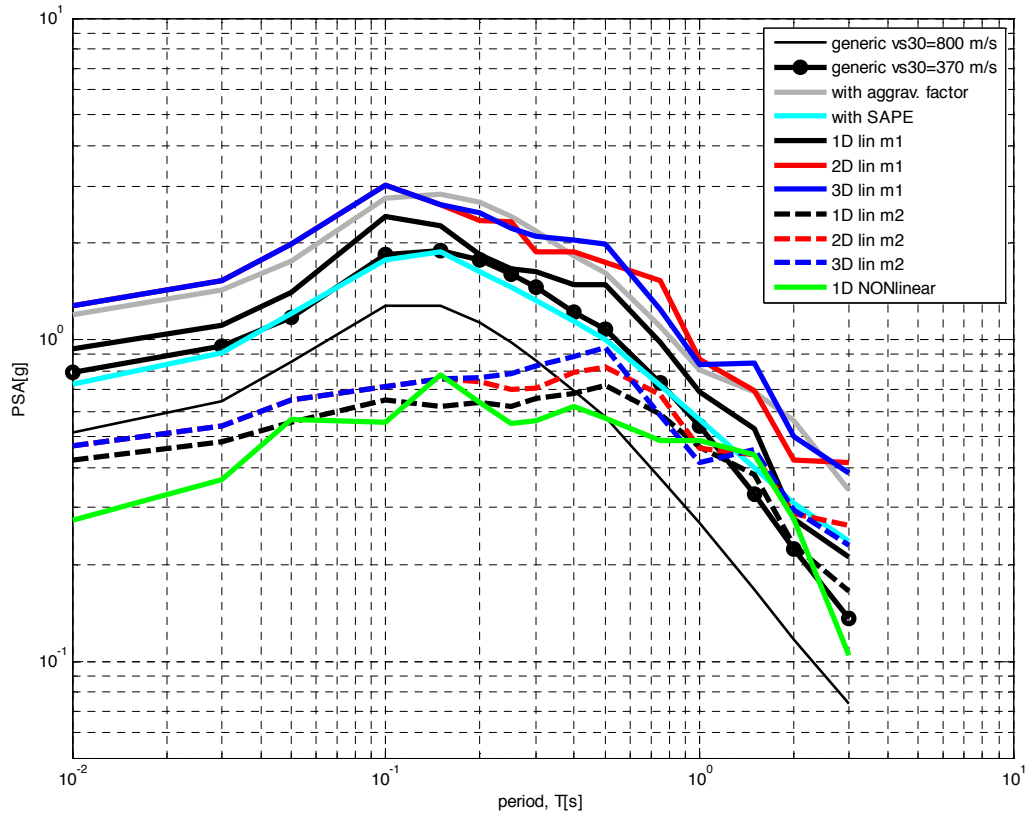
Depth	Maximum Strain (%)	Damping curve	Damping Ratio (%)
0-6m	0.008	0.25atm Menq (2003)	5.8
6-14m	0.022	1atm Menq (2003)	7.8
14-24m	0.04	1.5atm Menq (2003)	9.5
24-30m	0.3	2atm Darendelli (2001)	15.5
30-36m	0.22	3atm Darendelli (2001)	13.5
36-45m	0.18	3atm Darendelli (2001)	12.6
45-57m	0.15	4atm Darendelli (2001)	11.2
57-73m	0.09	5atm Darendelli (2001)	8.5
73-89m	0.085	6atm Darendelli (2001)	7.8
89-105m	0.075	7atm Darendelli (2001)	7
105-125m	0.075	8atm Darendelli (2001)	6.8
125-150m	0.065	10atm Darendelli (2001)	6
150-180m	0.06	12atm Darendelli (2001)	5.4
180-205m	0.06	14atm Darendelli (2001)	5.2
205-450m	0.045	16atm Darendelli (2001)	4
450-690m	0.04	16atm Darendelli (2001)	3.8



Ameri-Giannakou, 2014

Synthèse des résultats (et questions…)





Principaux effets NL = effets d'amortissement à grande profondeur

? Validité des modèles utilisés (Darendeli)

! Nécessité de mesures à forte pression de confinement (comme identifié par P. Foray / J. Jerram en 2006)

Ameri-Giannakou, 2014

Enseignements : étapes suivantes

- Non-linéarités à grande profondeur
  - Pas encore résolu

- Intérêt / nécessité
  - De réseaux de mesures en forage
    - Montbonnot / Grenoble (z=0, 40, 550 m)
    - Belle-plaine, Guadeloupe (z = 0, 15, 39 m)
    - Argostoli, Cephalonie, Grèce (z=0, 20, 40, 60 m)
  - De comparaisons données / calculs
    - Benchmark "Prenolin" (projets SIGMA / SINAPS@)
      - Vérification: comparaison entre codes
      - Validation : comparaison calculs / observations

Projet "Belle-plaine" (ANR, 2007-2010)

- Objectifs :
  - Instrumentation d'un site à fort risque de liquéfaction en Guadeloupe
  - Réponse sismique d'un site typique du littoral antillais
  - Validation des méthodes utiliées en ingénierie pour la prédiction de la liquéfaction sur la base d'essais in-situ
  - Données libres pour la communauté scientifique

- Partenariat
  - BRGM, ANTEA, CERMES, ECP, LGIT, 3S-R

Instrumentation permanente Belle-Plaine

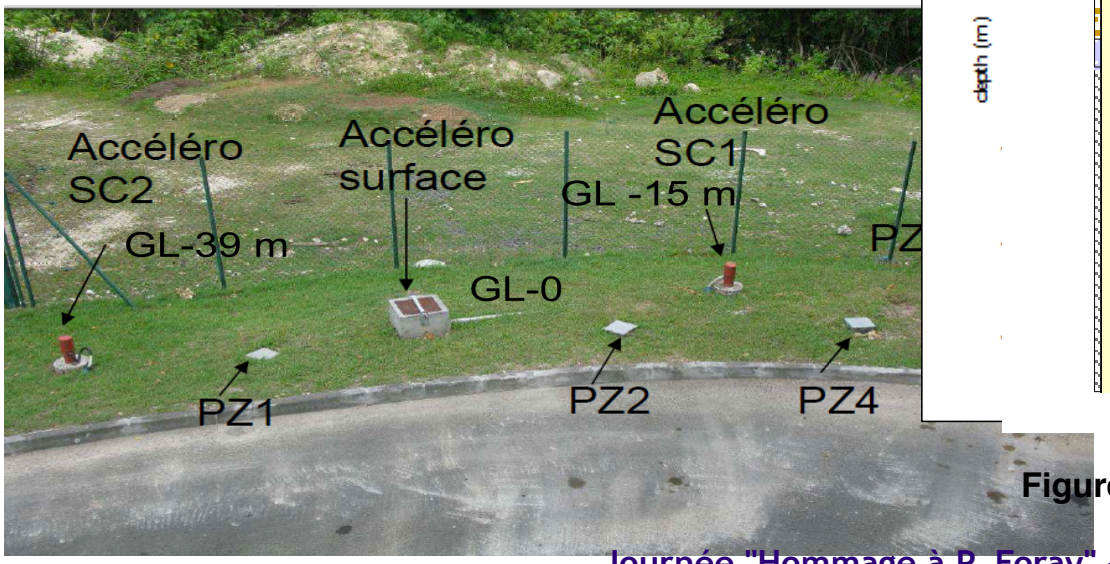
2 capteurs accélérométriques en puits à -15m (mangrove) et -39m (substratum)

1 capteur accélérométrique en surface

5 capteurs piézométriques à 2, 5, 6, 8 et 11 m de profondeur

1 acquisition multivoie (14) 24 bits A/D ACC
cps)

Enregistrement continu et transmission ver
NDC



Cross-section

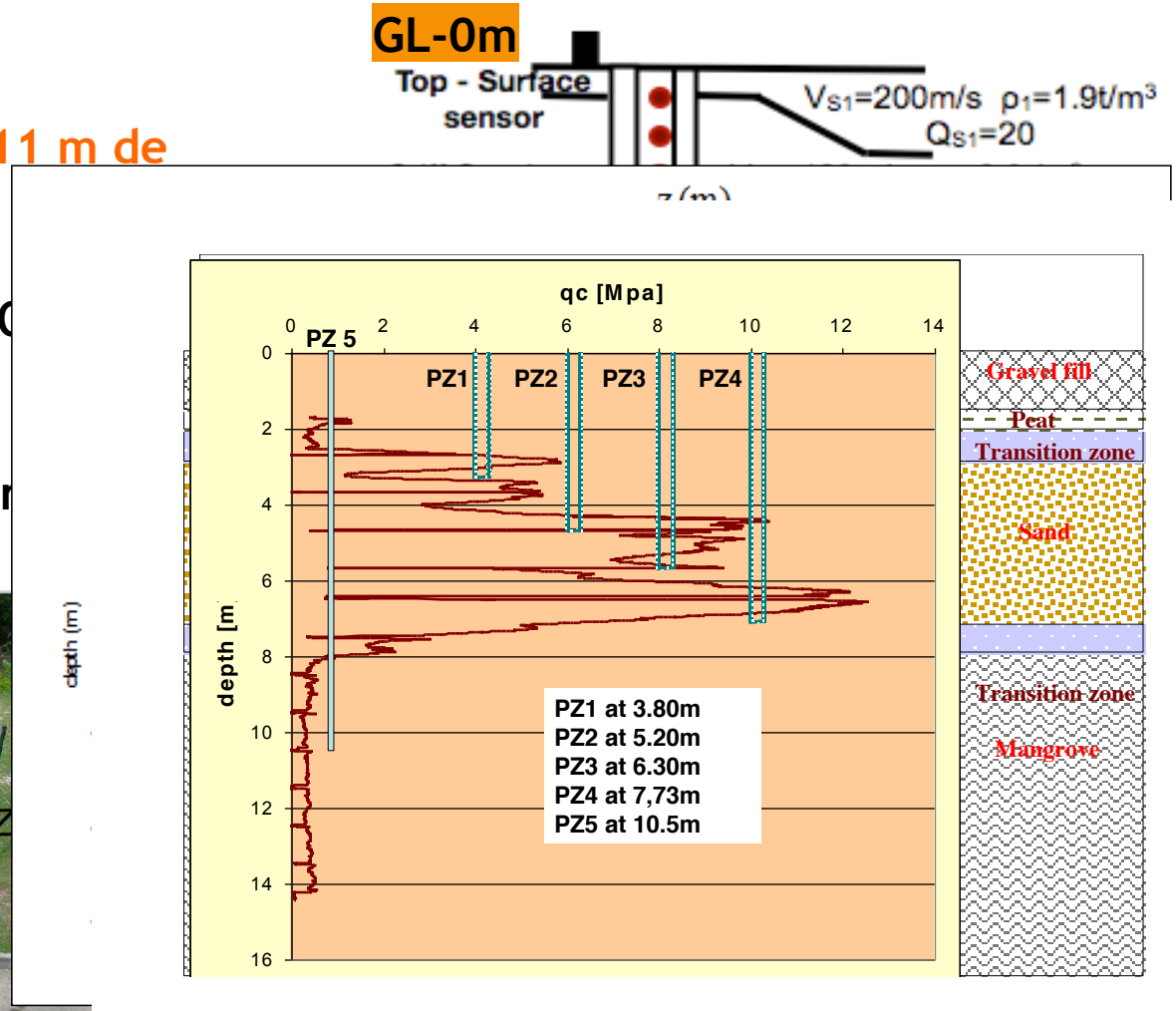
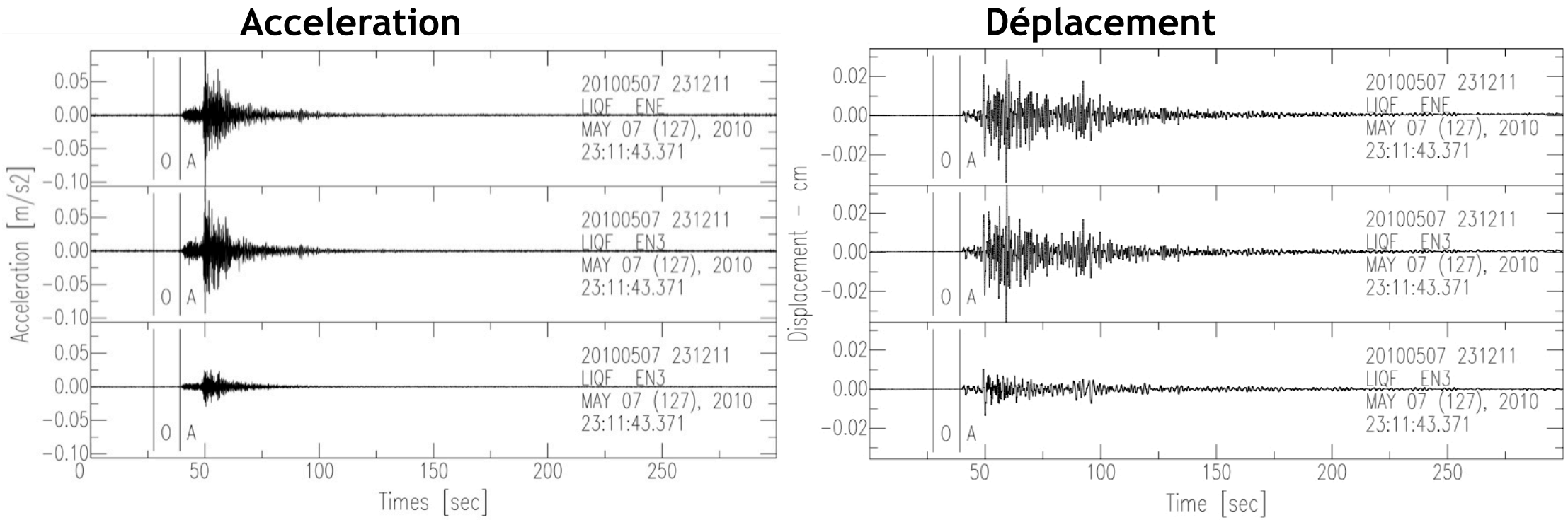


Figure 6 : Profil de Vs obtenu lors des essais au sismocône

Gueguen et al., 2011

Exemple d'enregistrements 07/05/2010, M_w = 4.8, PGA=1%g



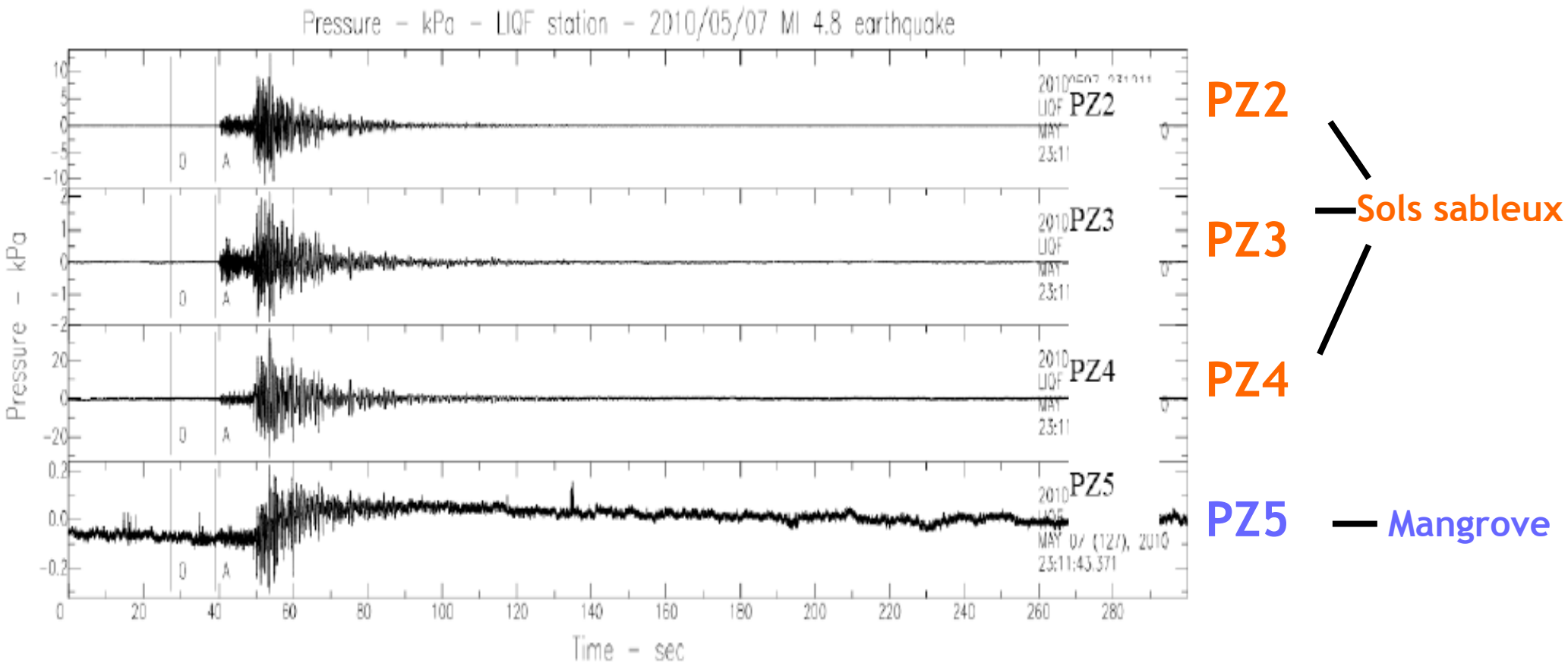
Amplification entre GL-39m et GL-0m

Pas d'amplification entre GL-15m et GL-0m

Pas de (forte) déformation entre la surface et la profondeur intérmédiaire

Gueguen et al., 2011

Enregistrements piézométriques associés

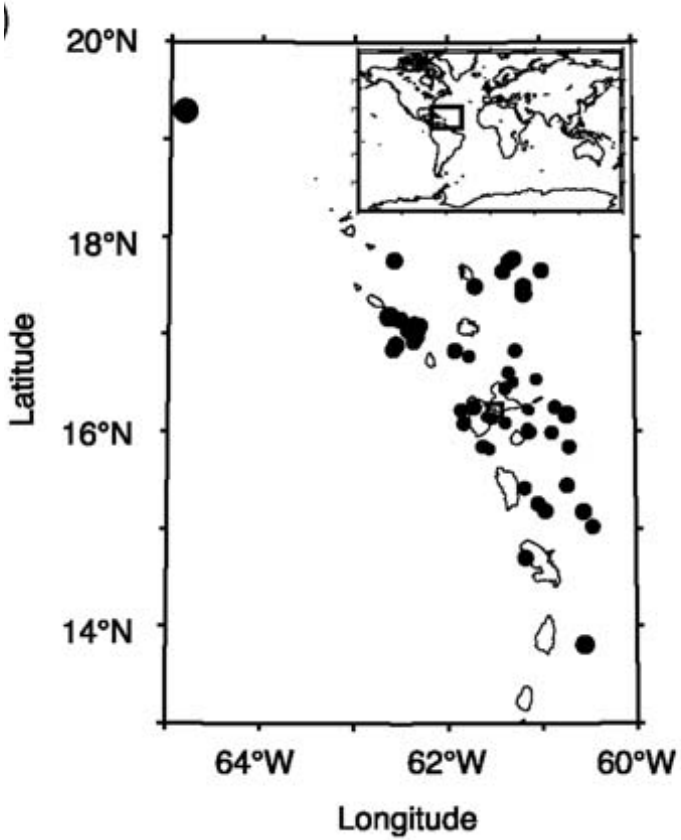


Augmentation et dissipation rapide court-terme de la surpression interstitielle dans les sables

Surpression moindre mais dissipation plus lente dans la mangrove

Gueguen et al., 2011

Enregistrements obtenus : pas encore assez forts pour exciter vraiment la NL



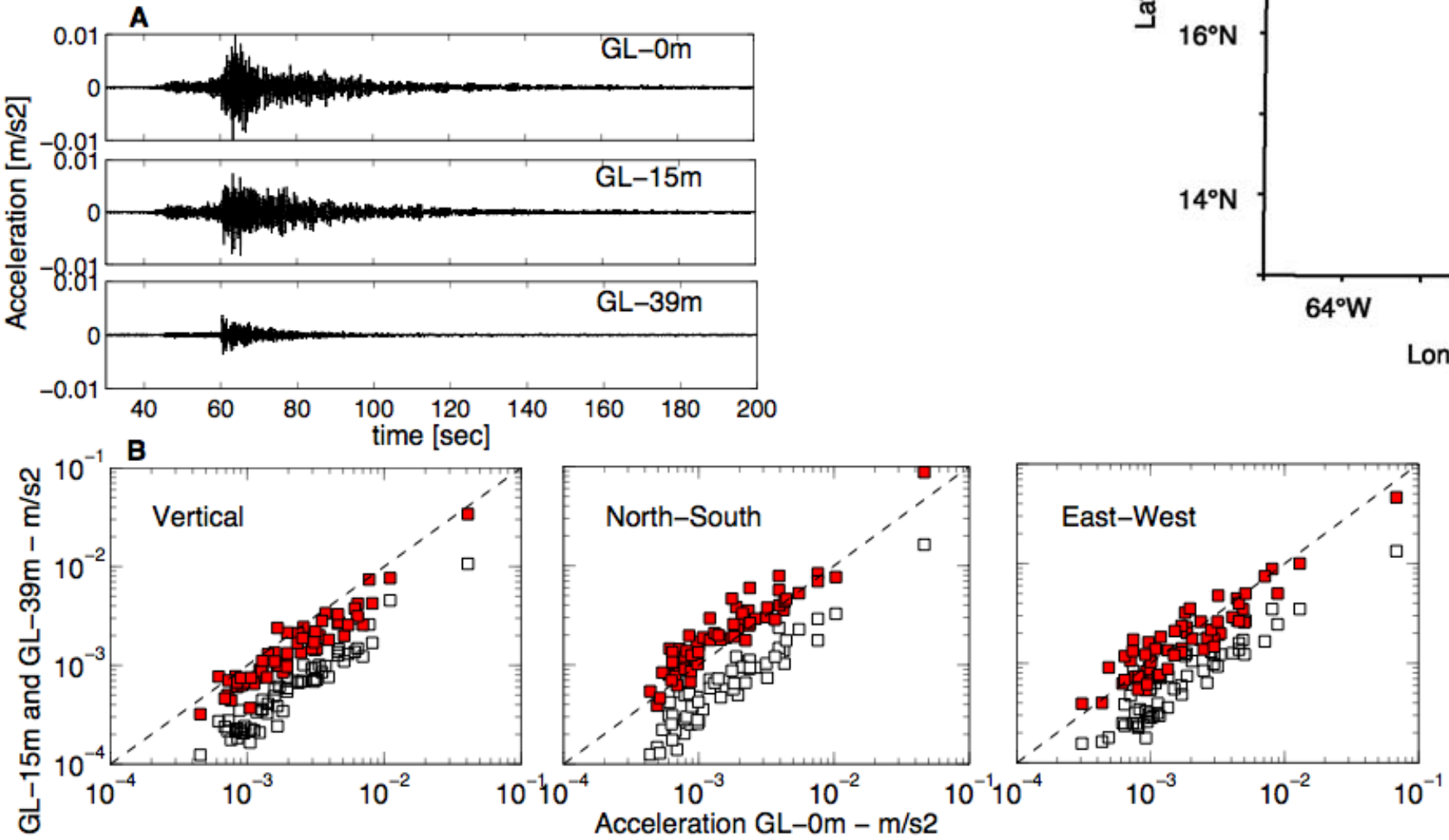


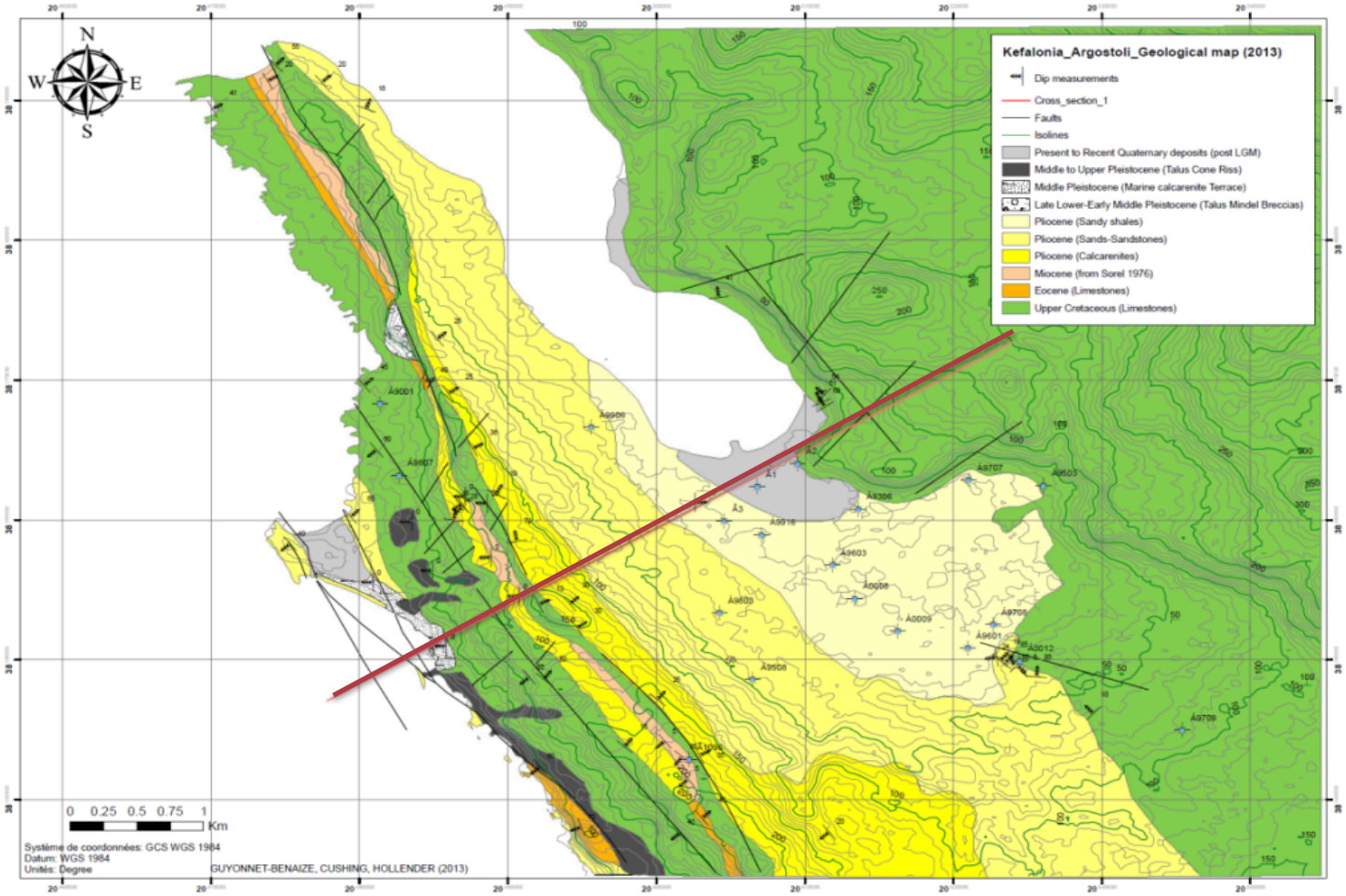
Figure 2: (A) Exemple d'un enregsitrements sur les trois capteurs et (B) comparasion des PGA enregsitrés au trois profondeurs du site de Belleplaine.

Gueguen et al., 2011

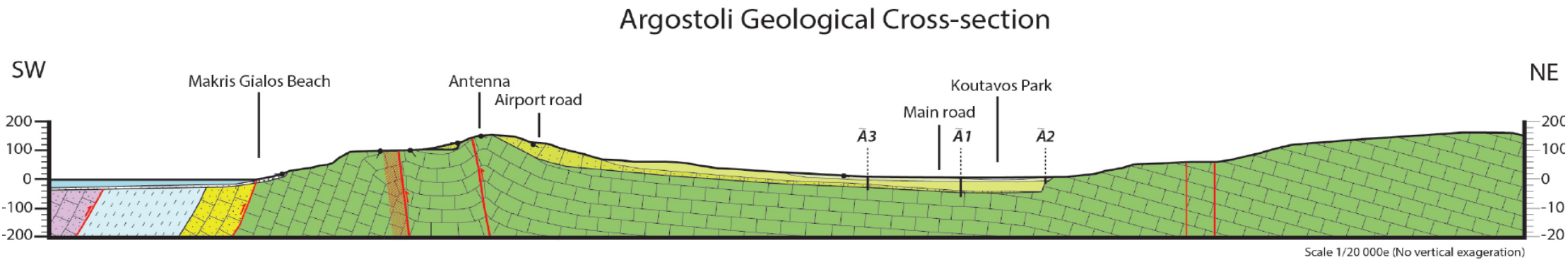
Argostoli (Céphalonie) & Sinaps@

- Site test prévu pour l'installation d'une instrumentation permanente, notamment pour la mesure des mouvements forts (zone très sismique à la frontière de 3 plaques tectoniques, site test complémentaire des autres sites existants, etc.).

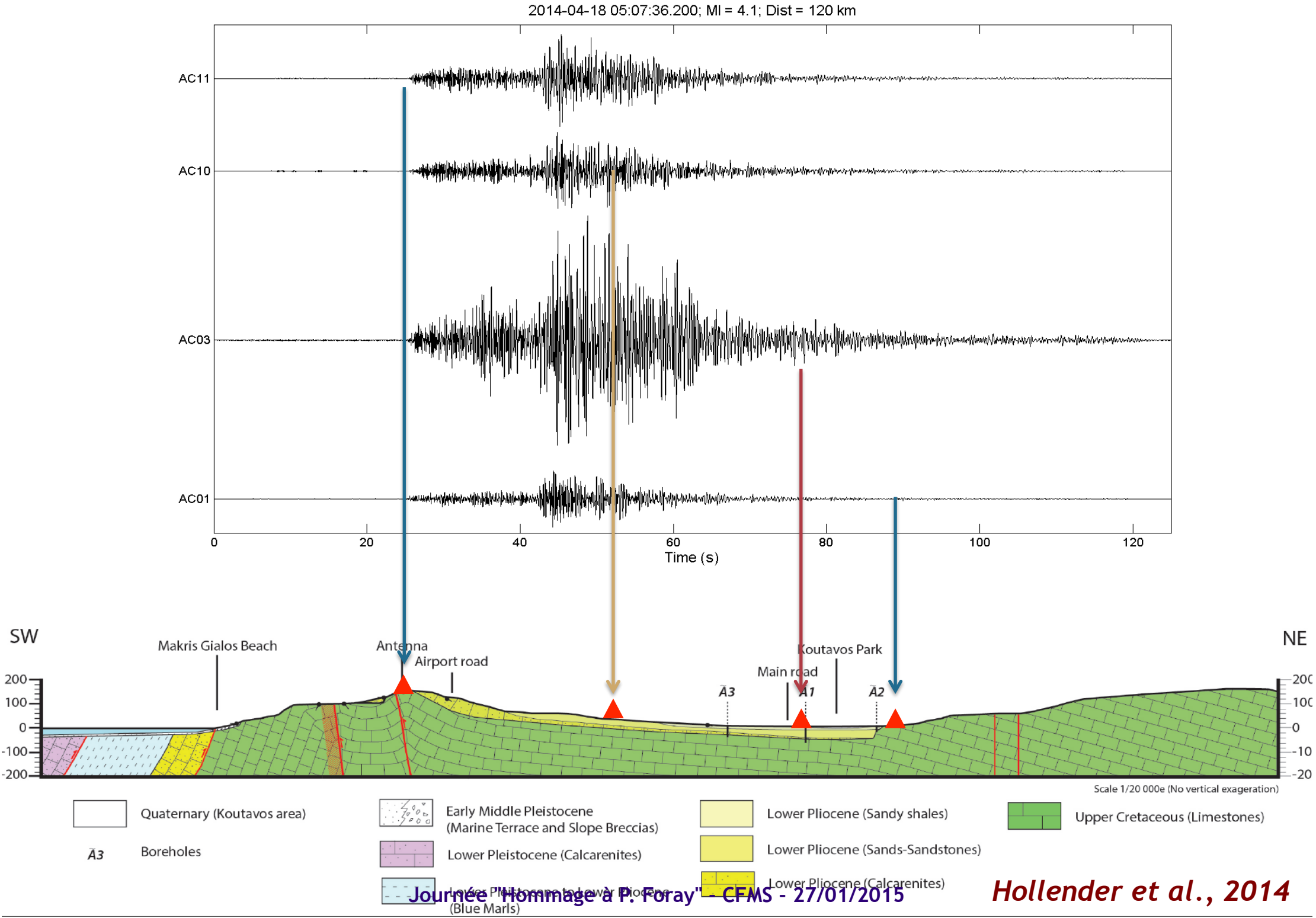
Hollender et al., 2014



Carte et coupe géologiques (M. Cushing et C. Guyonnet-Benaize)

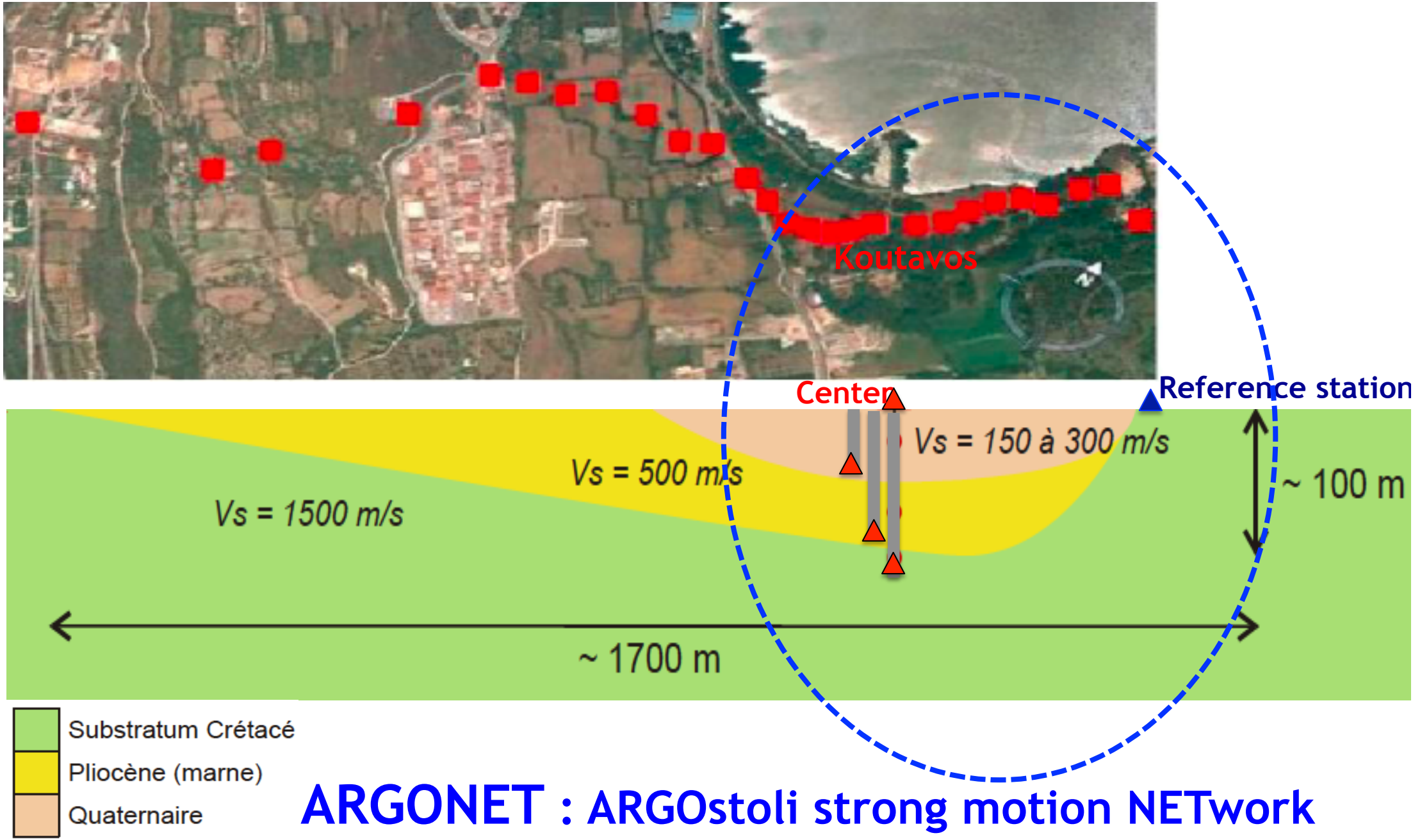


Hollender et al., 2014



Hollender et al., 2014

Infrastructure & Work Scheduled in Early 2015 → ARGONET

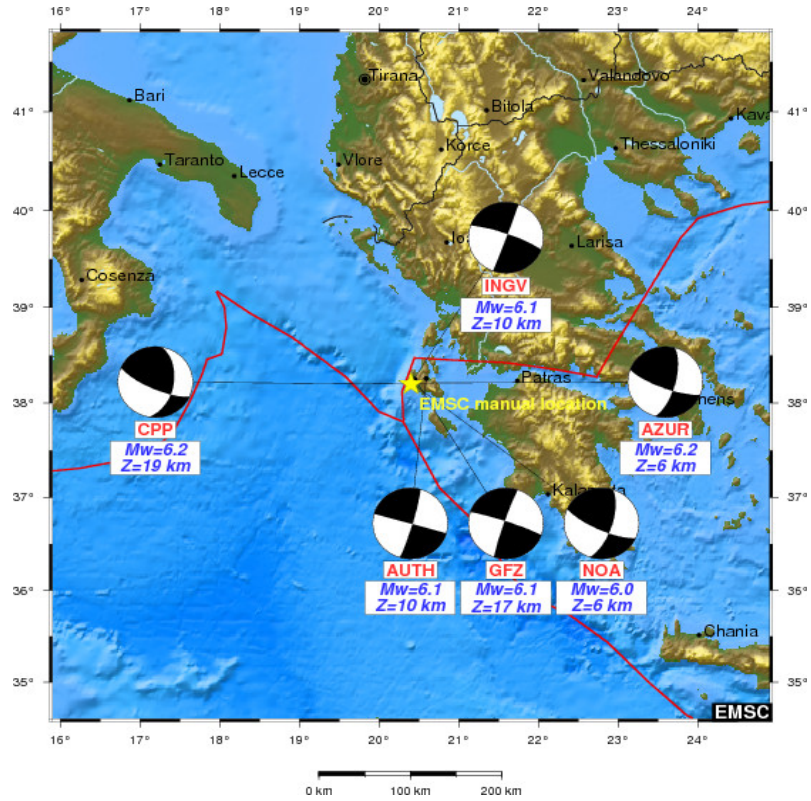


ARGONET : ARGOstoli strong motion NETwork

 Theodoulididis et al., 2014

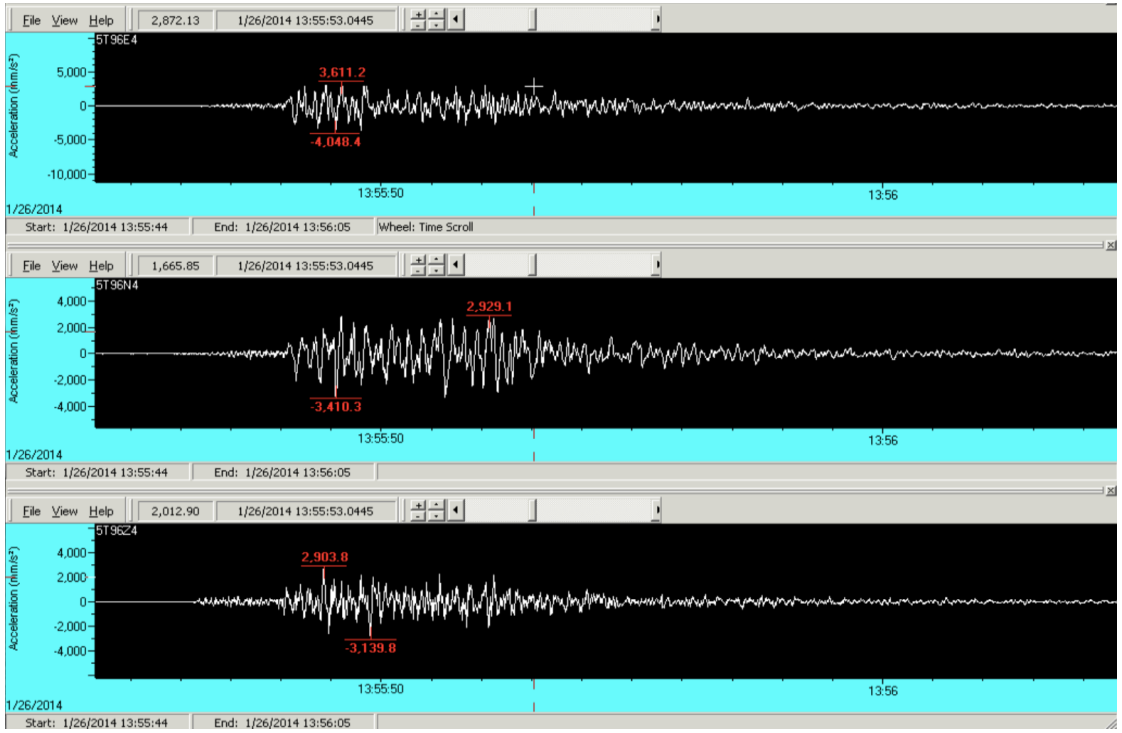
Zone très active : séquence récente de 2 événements

(Mw de 6.0 à 6.2, janvier-février 2014)



Accélérations atteintes à Argostoli

Choc 1 : 0,4 g; choc 2 : 0.27 g
(+ Novembre 2014 : Mw5 : 0.2 / 0.5 g)



Hollender et al., 2014

PRENOLIN Project: a benchmark on numerical simulation of 1-D non-linear site effect.

Preliminary results from the verification phase on idealistic cases.

J. Régnier[1], P.Y Bard[3,4], E. Bertrand[1], L.F. Bonilla[4], F.Hollender[5], H. Kawase[2], D. Sicilia[6] & all the participants

[1] CEREMA Dter Méditerranée, laboratoire de Nice
[2] Kyoto University
[3] ISTerre, Grenoble
[4] IFSTTAR, Marne-la-Vallée
[5] CEA, Cadarache
[6] EDF, Aix-en-Provence

* D.Assimaki (Gorgia tech), D. Boldini (Univ. Bologna), S.Iai (DPRI), S.Kramer (Univ. Washington), E.Foerster (CEA), C.Gélis (IRSN), G.Gazetas (NTUA), J.Gingery (Kleinfelder/UCSD), Y.Hashash (Univ. of Illinois), P.Moczo (CUB), S.Foti (Politecnico di Torino), G.Lanzo (Univ. Rome), F.Lopez-Caballero (ECP), D.Roten (ETHZ), K.Pitilakis (AUTH), F.DeMartin (BRGM), B.Jeremic (UCD), A.Nieto-Ferro (EDF), M.P.Santisi (Univ. Nice), D.Mercerat (CEREMA).

Principes généraux

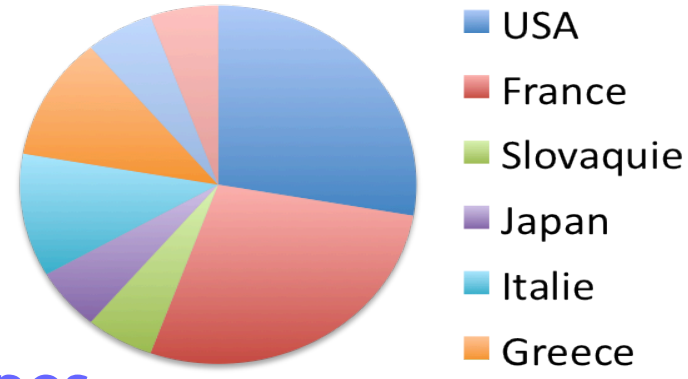
Cas simples

- 1D
- NL uniquement (sans effet liquéfaction) pour commencer

Deux phases

- Vérification
  - Cas "canoniques" simples (mono/bicouche)
- Validation sur cas réels
  - Avec enregistrements en forage
  - Et mesures in-situ et en laboratoire de qualité
  - Choix de 3 sites japonais

Equipes et codes NL



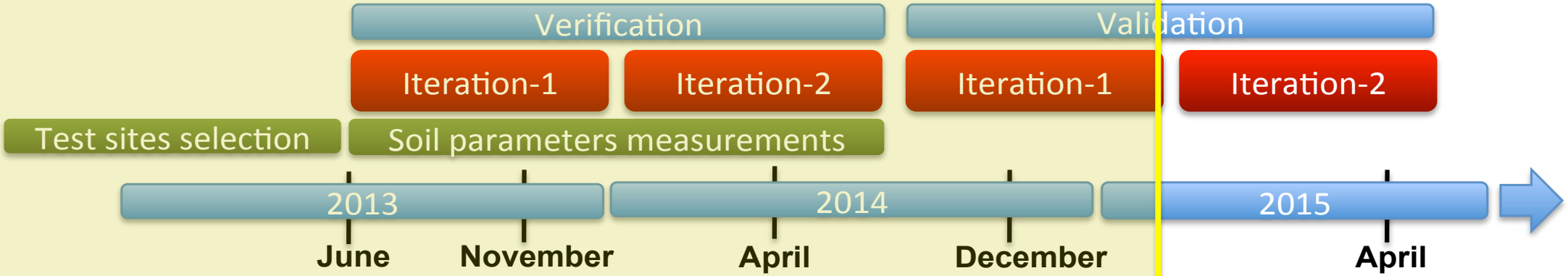
21 Equipes / 26 codes

- Code identique utilisé par différentes équipes
- Différents codes implémentant le même modèle rhéologique

Possibilité d'analyser

- La variabilité d'un modèle NL à l'autre
- Variabilité intra-modèle
- Variabilité entre utilisateurs d'un même code

Feuille de route



Organisation et participation

USA:
- UCSD, California,
- UW, Washington,
- UCDavis, California,
- GATECH, Georgia,
- CEEI, Illinois

Switzerland :
- ETHZ, Zürich

Japan:
- DPRI, Kyoto
- DPRI, Kyoto

Slovakia:
- UNIBA, Bratislava

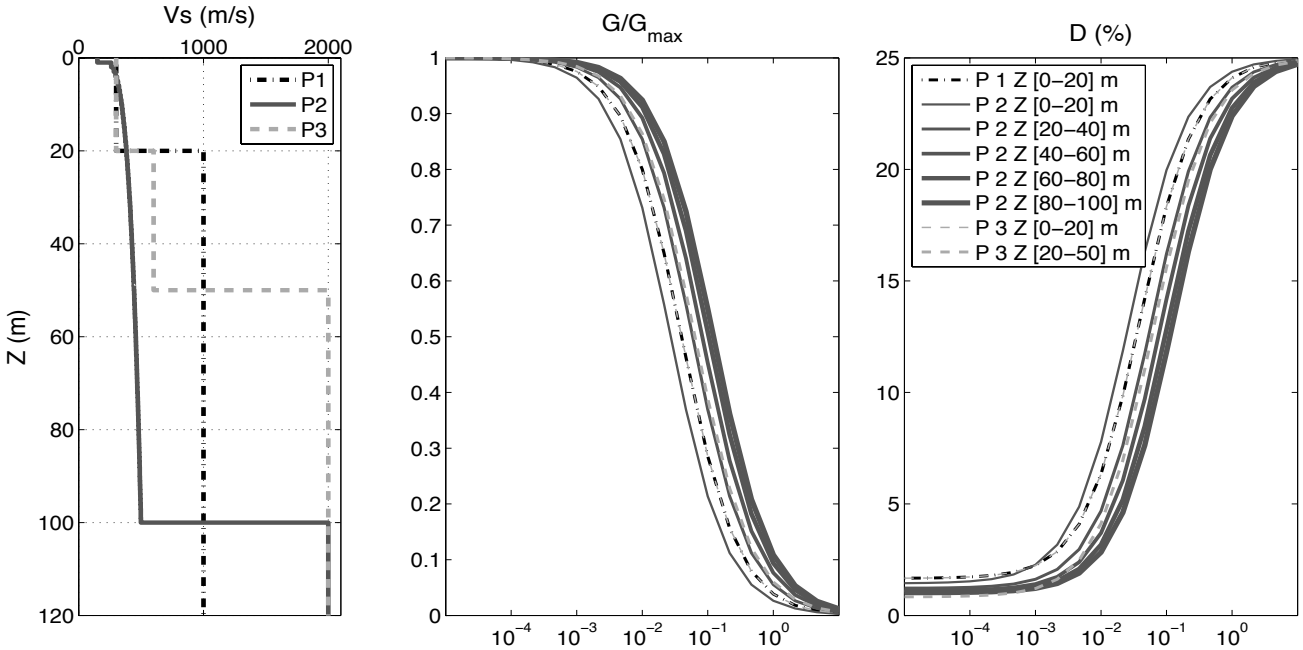
France:
- ISTerre, Grenoble
- IFSTTAR, Marne la Vallée
- CETE, Nice
- CEA, Cadarache
- EdF, Aix en Provence
- BRGM, Orléans
- CETE, Nice
- IRSN, Fontenay aux Roses
- EdF, Clamart
- ECP, Paris

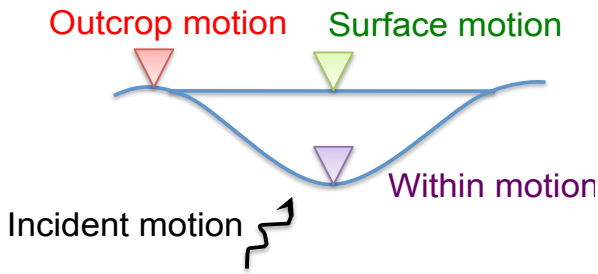
Italy:
- Univ. Bologna
- Univ. Roma
- Polito, Torino

Greece:
- AUTH, Thessaloniki
- NTUA, Athens

Equipes de modélisation
Co-organisateurs

Vérification : cas "canoniques"





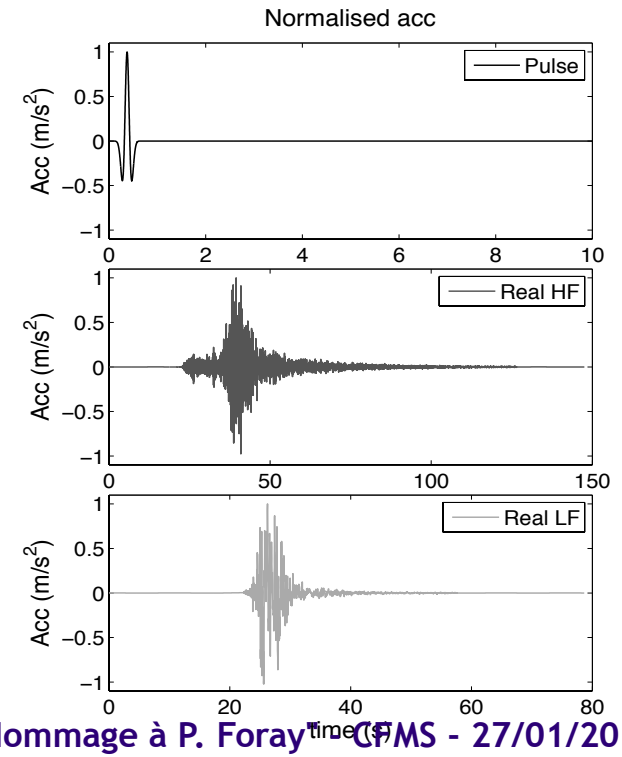
3 profils

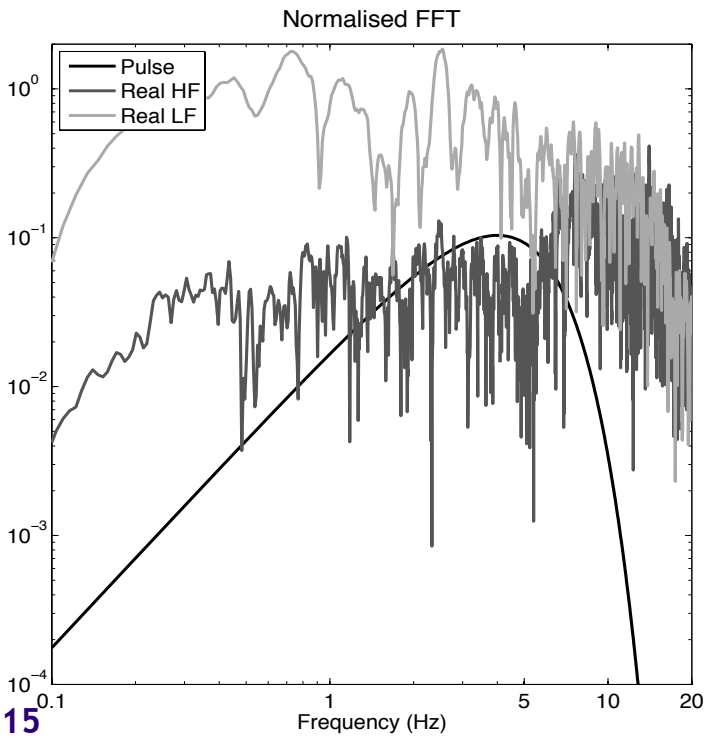
Modèle hyperbolique

- Modulation avec la profondeur si formations épaisses

Plusieurs signaux d'entrée

- Pulse simple
- 2 accéléros réels calés à 0.5, 1 et 5 m/s2
- HF et BF



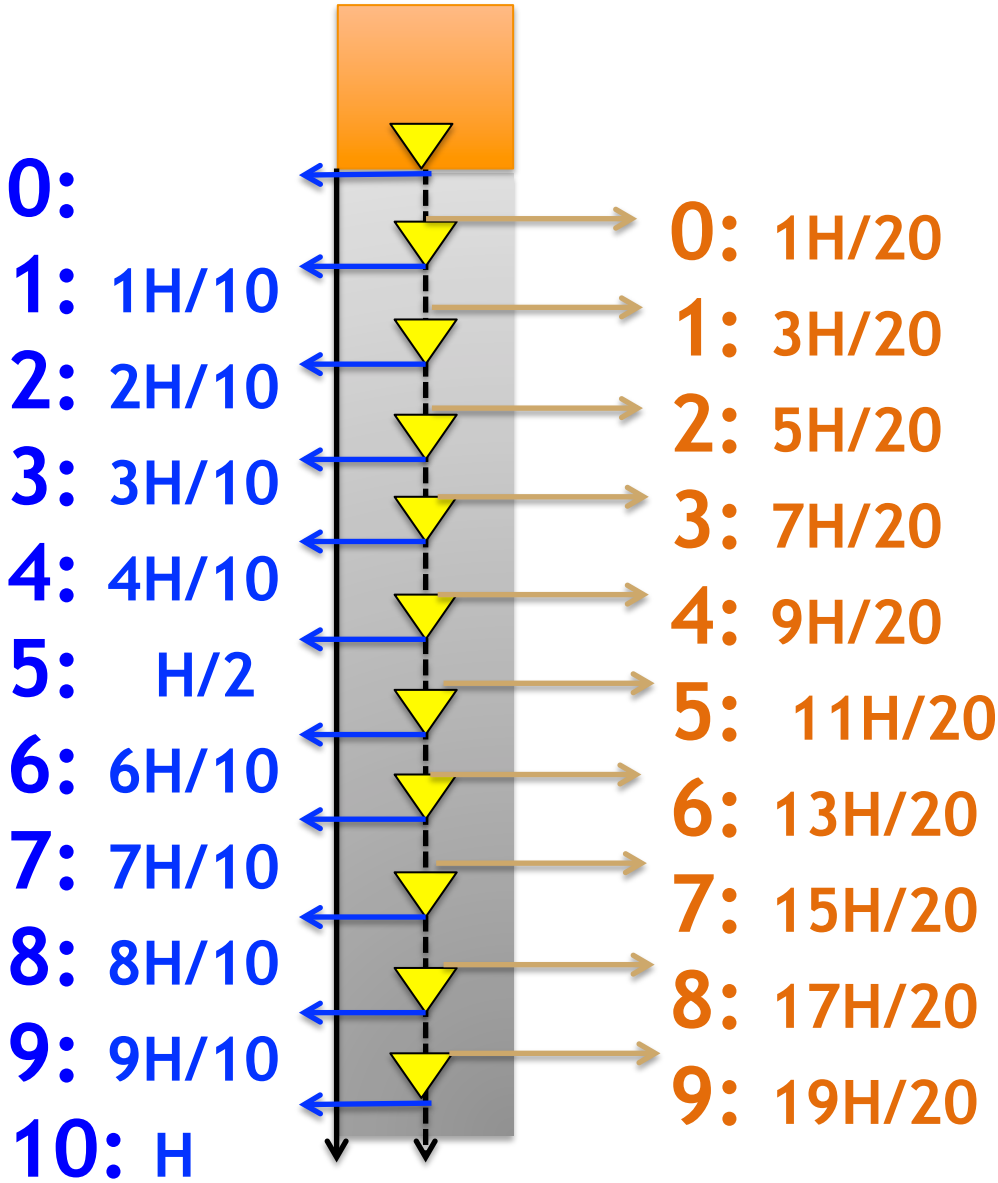


Calculs demandés

- Acceleration $a(t, z_i)$, $\Delta t = 0.01s$
  - ✓ $Z_1 = 0$
  - ✓ $Zn = H$
  - ✓ Delta z = H/10

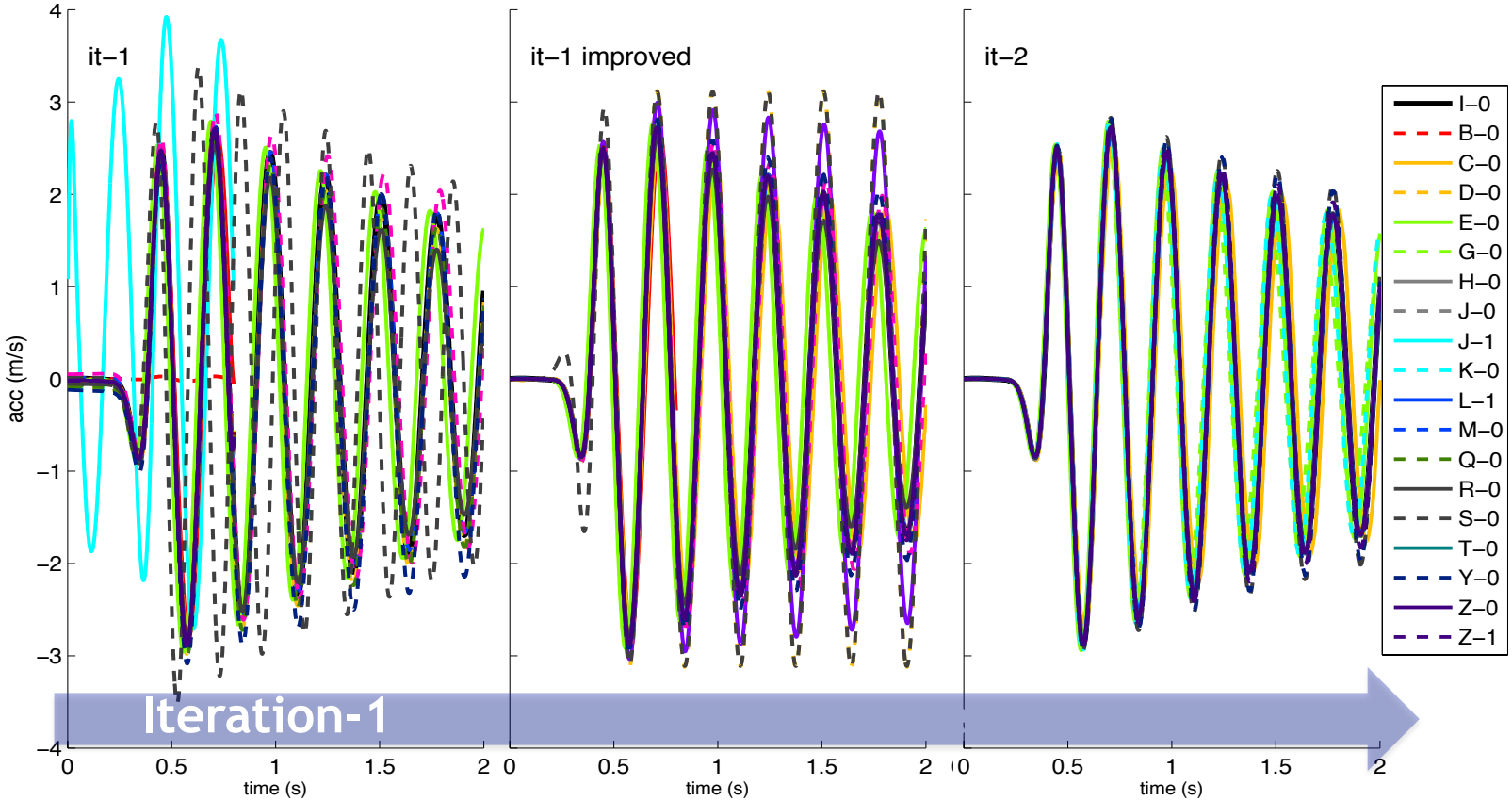
- Déformations $\gamma(t, z_i)$
- Contraintes $\tau(t, z_i)$
  - ✓ $Z_1 = H/20$
  - ✓ $Zn = 19H/20$
  - ✓ Delta z = H/10

- Courbes de dégradation G/Gmax et amortissement pour chaque formation



Résultats: Cas linéaires (E, VE)

Acceleration: Ricker Pulse GL-0



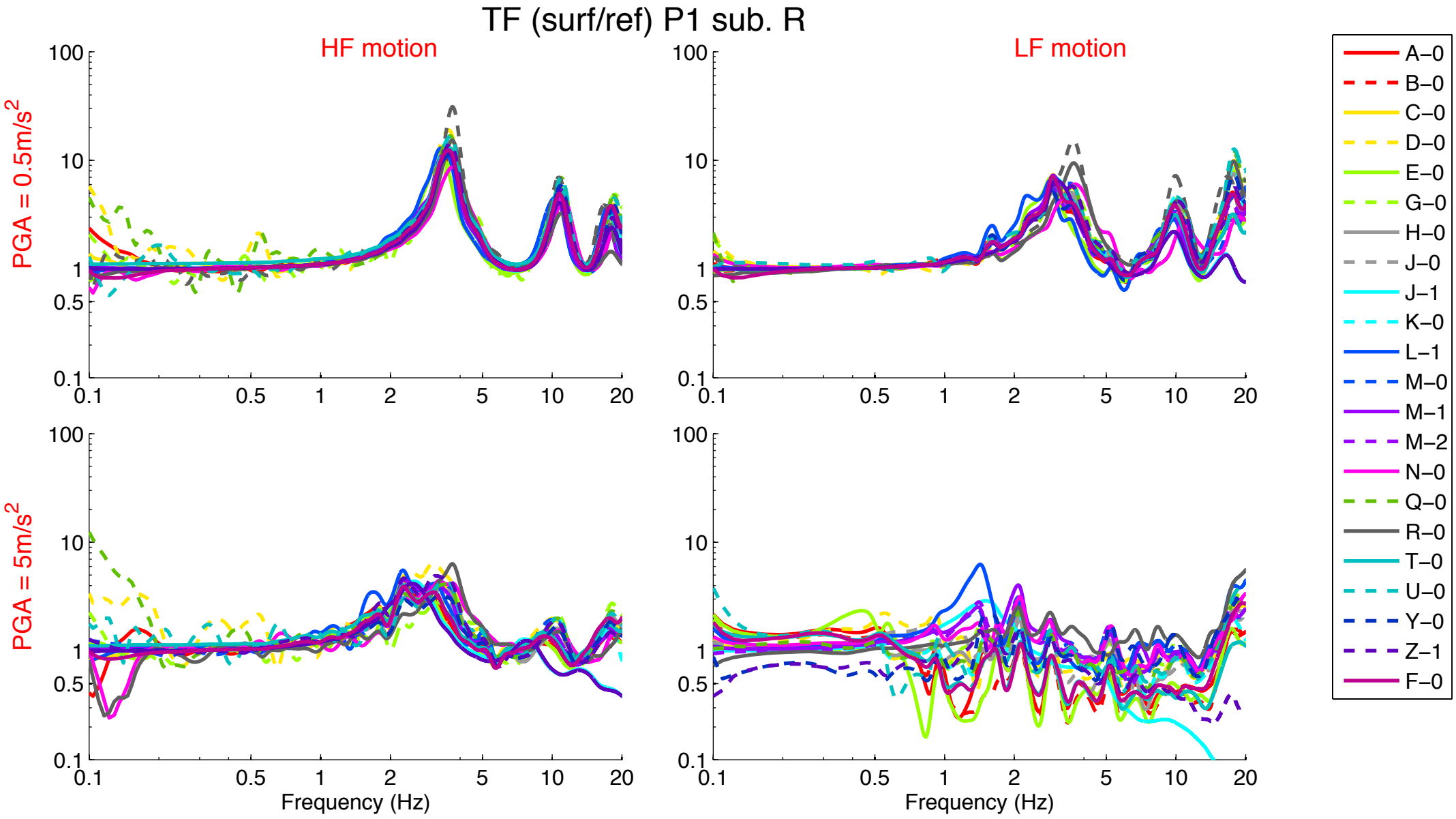
Profil P1

Computation: VE

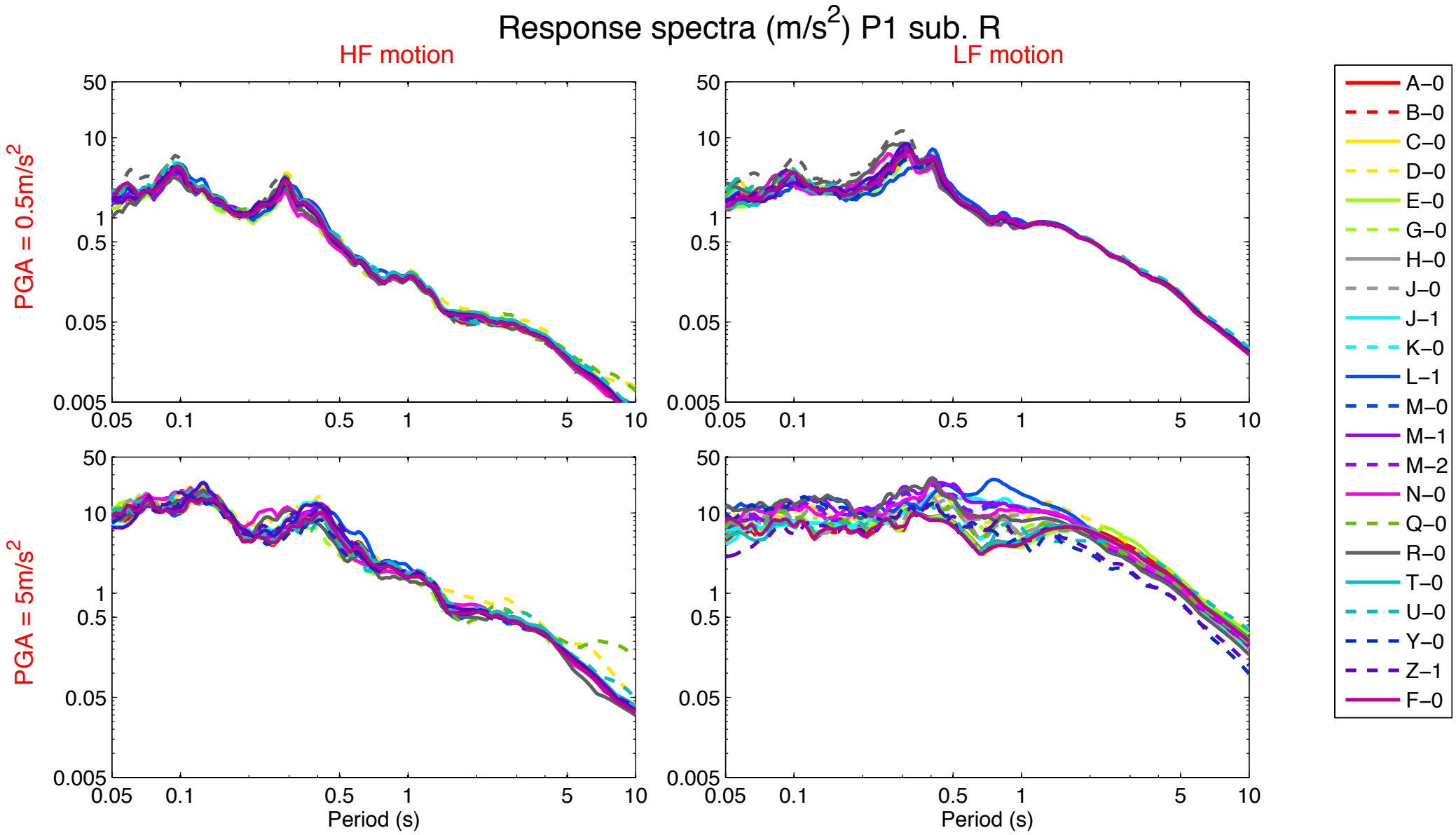
Condition substratum: Rigide

- Après itérations 1 et 2 : convergence (quasi) parfaite
- Origine des divergences initiales
  - Unités
  - Dispersion numérique (dt / maille)
  - Implémentation et claibation de l'amortissement (à améliorer!)
  - Définition du "signal de référence" (pratiques différentes d'un code à l'autre…)

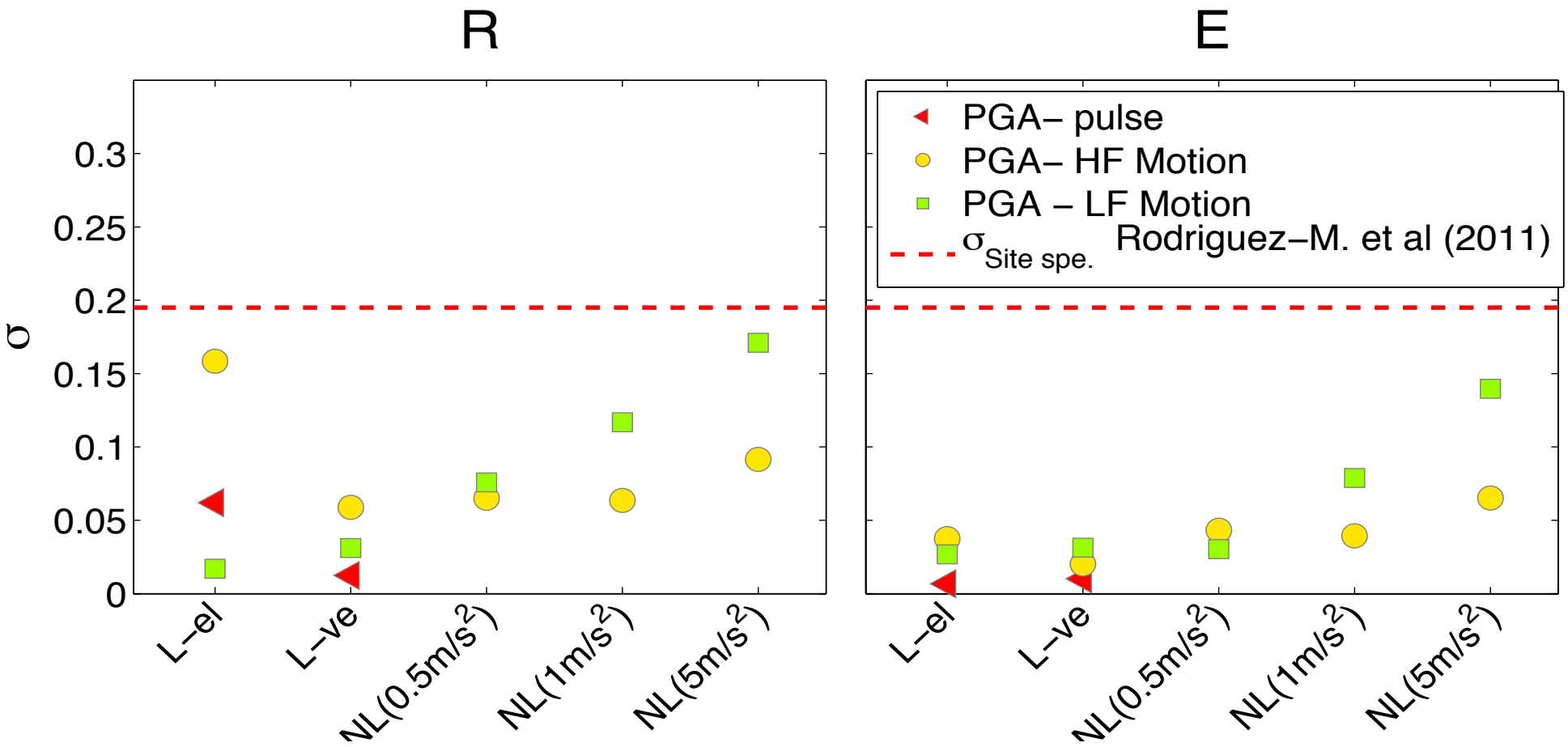
Variabilité entre résultats NL
(fonctions de transfert)



Variabilité entre résultats NL
(spectres de réponse en surface)



Evolution de la variabilité avec le PGA (P1, PGA)



Variabilité plus forte pour signal "basse fréquence"

(déformations plus fortes)

Variabilité croissant avec le PGA

(avec la déformation)

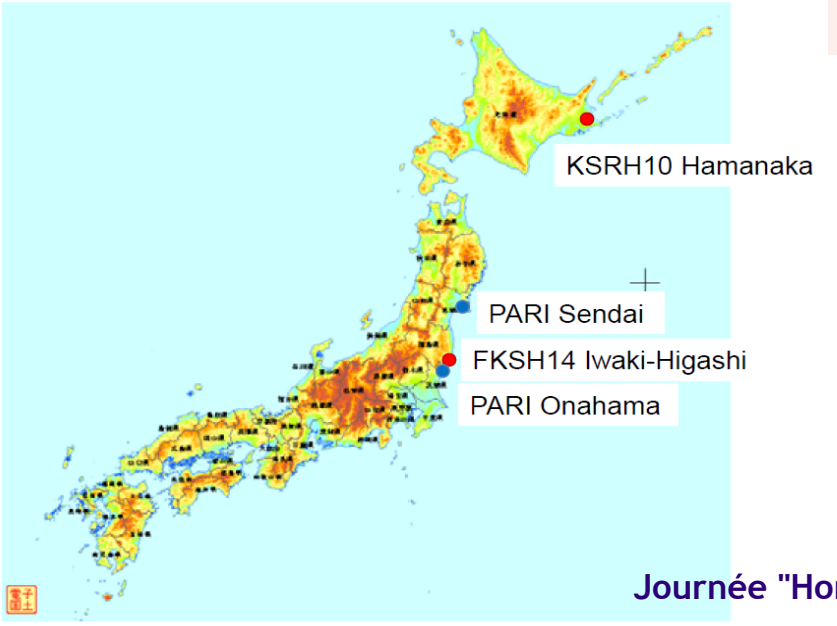
Varabilité plus forte pour conditions d'interface "rigides"

(déformation plus forte)

Phase validation : en cours

	FKSH14	KSRH10	Onahama	Sendaï
Bedrock depth	50 m (1200 m/s)	40 m (2000 m/s)	7 m (800 m/s)	7 m (800 m/s)
Surface Geology	Sand	Clay	Sand, silts	Sand
Sensor location	0 - 100 m	0 - 250 m	0 - 11 m	0 - 8 m
Cyclic mobility liquefaction	Yes ?	No No	Yes ?	No No
Remarks			Not « intermediate » motion	
Available Vs profile reliability	Seems to be OK (maybe adjusted)	Seems to be OK (maybe adjusted)	Seems to be OK (maybe adjusted)	Totally wrong

Cyclic mobility maybe liquefaction



- Mesures in-situ et en labo
- Calculs de réponse: en cours
  - Modèle imposé : nouvelle itération après premier workshop de comparaison
  - Modèle "préféré" par chaque équipe sur la base des données brutes
    - Incertitude effective sur une étude a priori

Merci Pierre

- Collaborations inter-labo / inter-disciplines en géotechnique sismique
  - ∀ difficultés administratives / réticences hiérarchiques…
- Identification précoce des verrous
  - Pas encore tous résolus
- Qualités pédagogiques
  - Importance accordée à l'enseignement
  - + Attention / affection envers ses étudiants

Remerciements / Collaborateurs

F. Hollender, E. Chaljub,
C. Cornou, F. Cotton,
P. Guéguen, M. Langlais,
J. Régnier, E. Bertrand,
L.F. Bonilla, H. Kawase,
D. Sicilia, A. Pecker,
G. Senfaute, N. Theodoulidis,
P. Moczo, J. Kristek,
G. Ameri, A. Giannakou,
E. Flavigny, …