Journée technique CFMS/AGAP du 22 novembre 2019

« Regards croisés sur les méthodes de reconnaissance géotechnique et géophysique »

Méthodes de bruit de fond: avancées récentes pour la caractérisation des sites et le suivi temporel

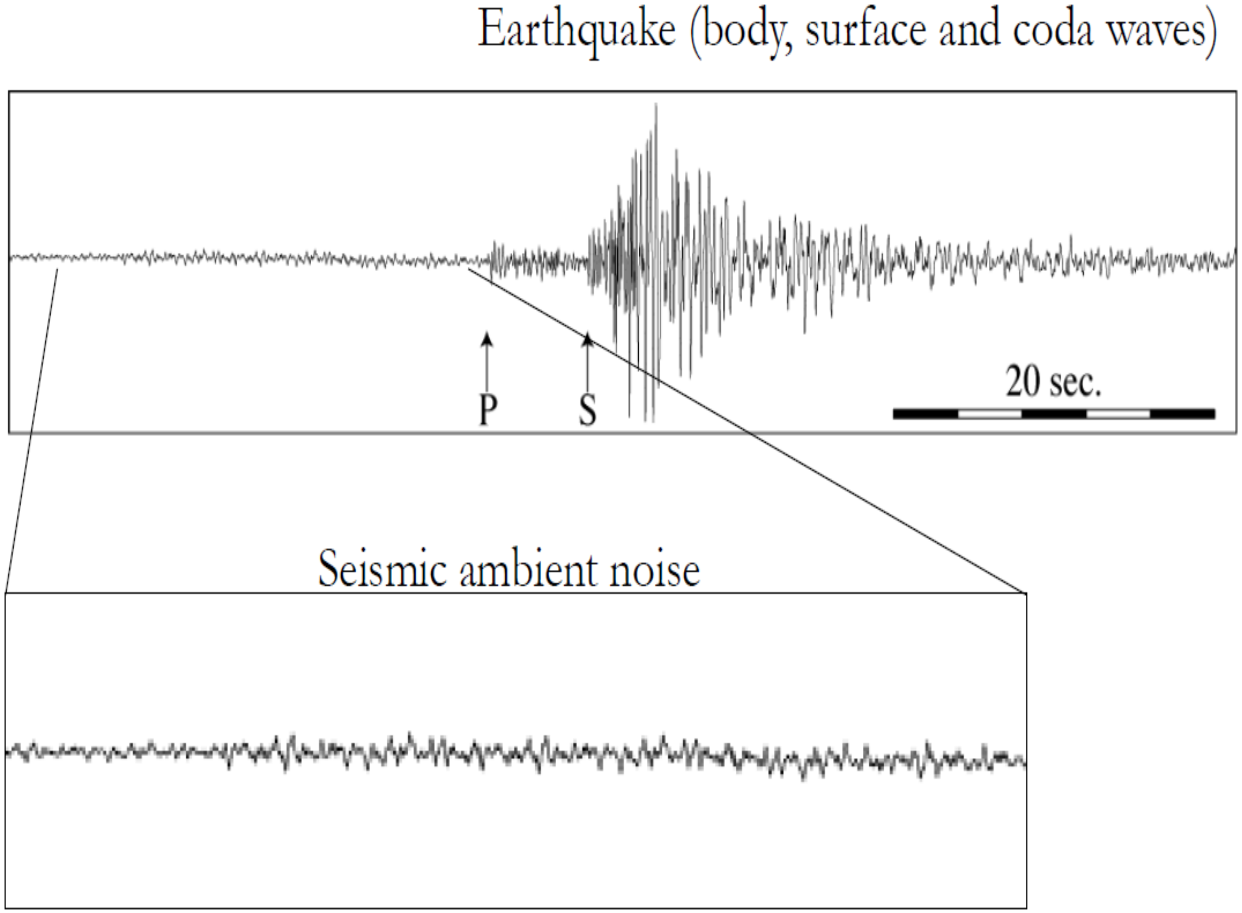
Nom de l'intervenant : Cécile Cornou (IRD/ISTerre)

Contenu

- Méthodes de caractérisation des sites : principe, performance, efforts récents de standardisation
- Développements méthodologiques récents
- Suivi temporel : exemples

Méthodes de caractérisation basées sur le bruit de fond sismique

Le bruit de fond sismique

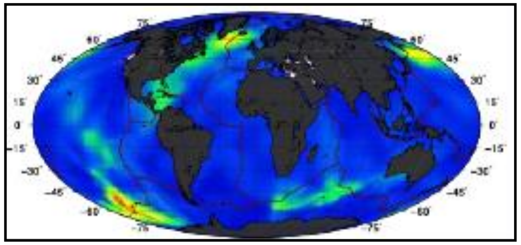


Le bruit de fond sismique

20 s

Activité océanique
Ondes de surface
Ondes de Rayleigh
Mode fondamental

0.2 Hz

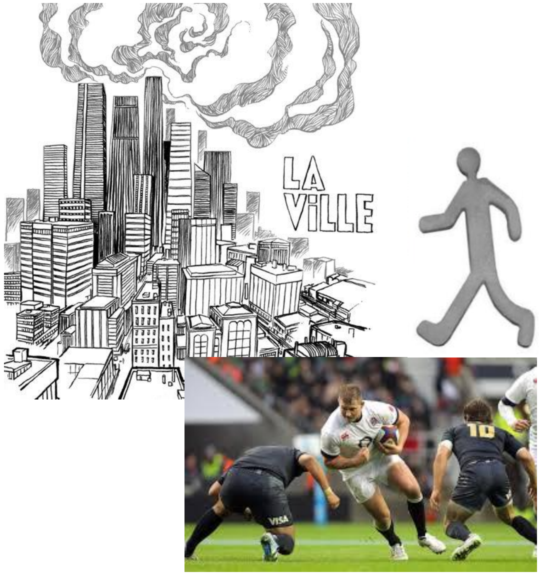


Landes et al. (2010)

2 Hz

Sources locales
Ondes de volume et de surface
Ondes de Rayleigh et de Love
Modes fondamental et supérieurs

20 Hz



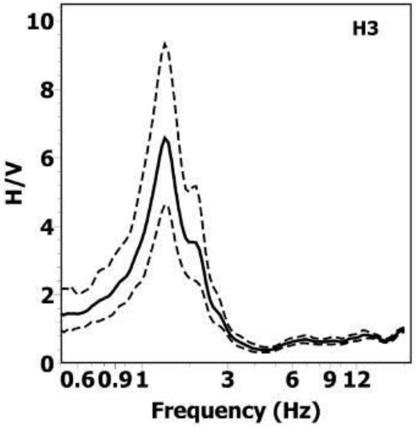
Structure Vs

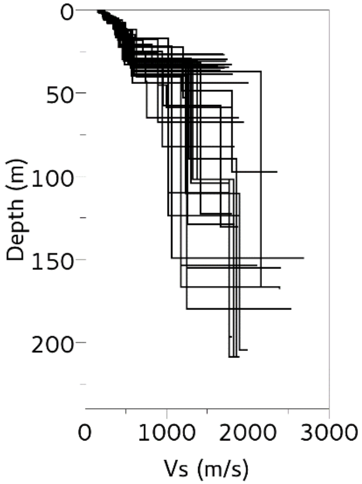
Atténuation

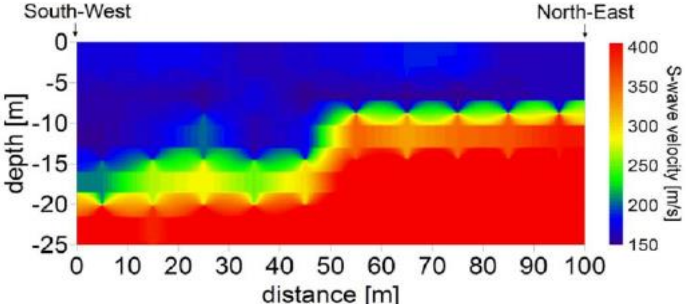
Localisation des sources et type d'excitation

Méthodes de caractérisation

Méthode H/V	**Méthode de réseau *(MAM, AVA, seismic noise array, …)***	**Méthode de corrélation *(noise interferometry, NCC, ….)***
1 capteur 3C	Plusieurs capteurs 1C/3C	Plusieurs capteurs 1C/3C
Fréquence de résonance	Profils de vitesse Vs	Tomographie Vs



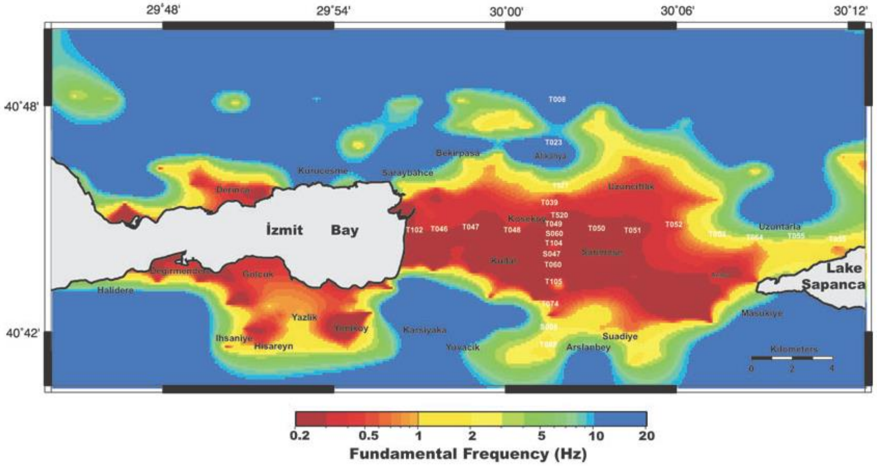




Picozzi et al. 2008

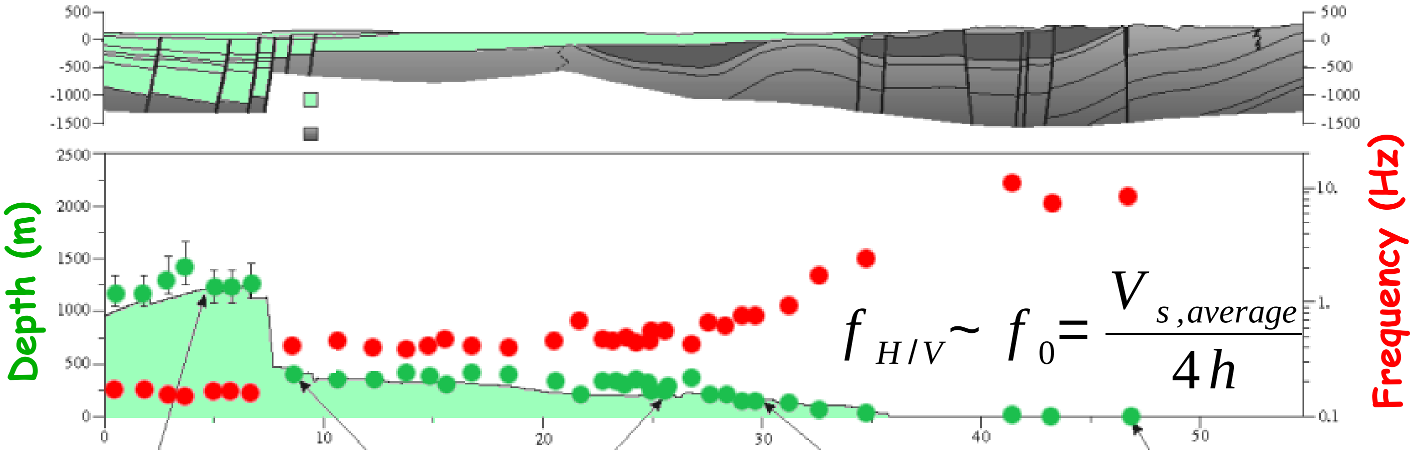
Exemples d'application

Cartographie des fréquences de résonance


29°48'
29°54'
30°00'
30°06'
30°12'
40°48'
40°42'
İzmit
Bay
Lake
Sapanca
Kurucesme
Saraybahce
Bekirpasa
Alikahya
Derince
Uzunciftlik
Kosekoy
Uzuntarla
Halidere
Degirmendere
Golcuk
Kullar
Sapanca
Yazlik
Ihsaniye
Hisareyn
Yenikoy
Karsiyaka
Yuvacik
Arslanbey
Suadiye
Masukiye
Kilometers
0
2
4
0.2
0.5
1
2
5
10
20
Fundamental Frequency (Hz)

Ozalaybey et al., 2011

Imagerie du substratum sismique



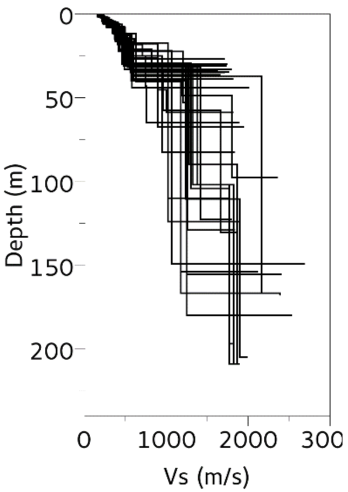
$$f_{H/V} \sim f_0 = \frac{V_{s,average}}{4h}$$

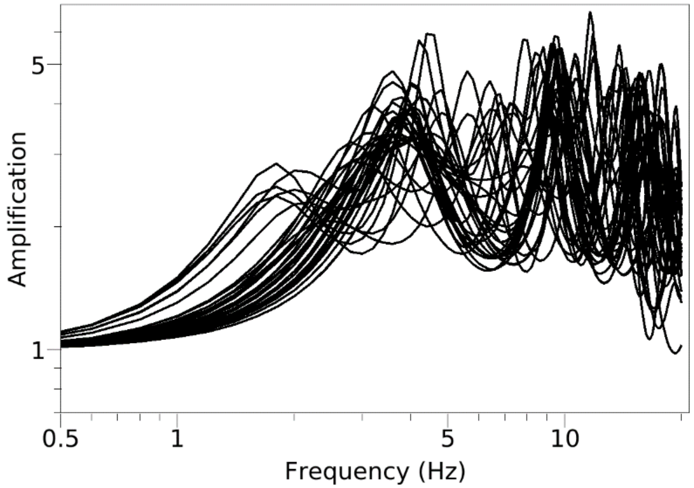
Hinzen et al. 2004

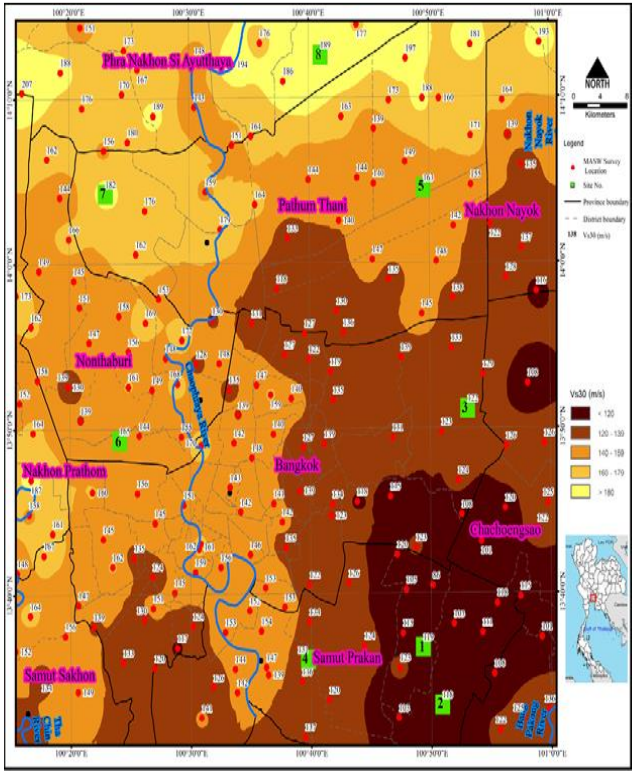
Exemples d'application

Cartographie Vs30

Amplification 1D du mouvement sismique







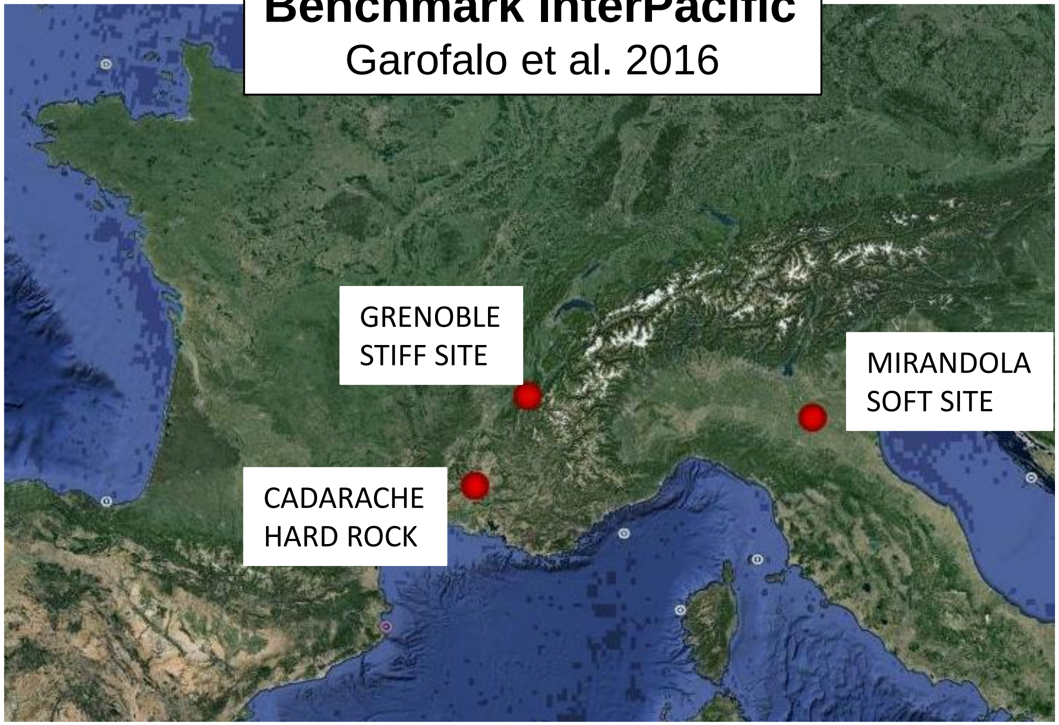
Phra Nakhon Si Ayutthaya
Pathum Thani
Nakhon Nayok
Nonthaburi
Nakhon Prathom
Bangkok
Chachoengsao
Samut Prakan
Samut Sakhon
NORTH
Kilometers
Legend
Vs30 (m/s)
< 120
120 - 139
140 - 159
160 - 179
> 180

Naksawee et al. 2016

Performance des méthodes

Benchmarks : Asten and Boore, 2005; Cornou et al., 2006; Cox et al., 2014 ; Garofalo et al., 2016; Molnar et al., 2020

Benchmark InterPacific
Garofalo et al. 2016


GRENOBLE
STIFF SITE
MIRANDOLA
SOFT SITE
CADARACHE
HARD ROCK

Essais invasifs

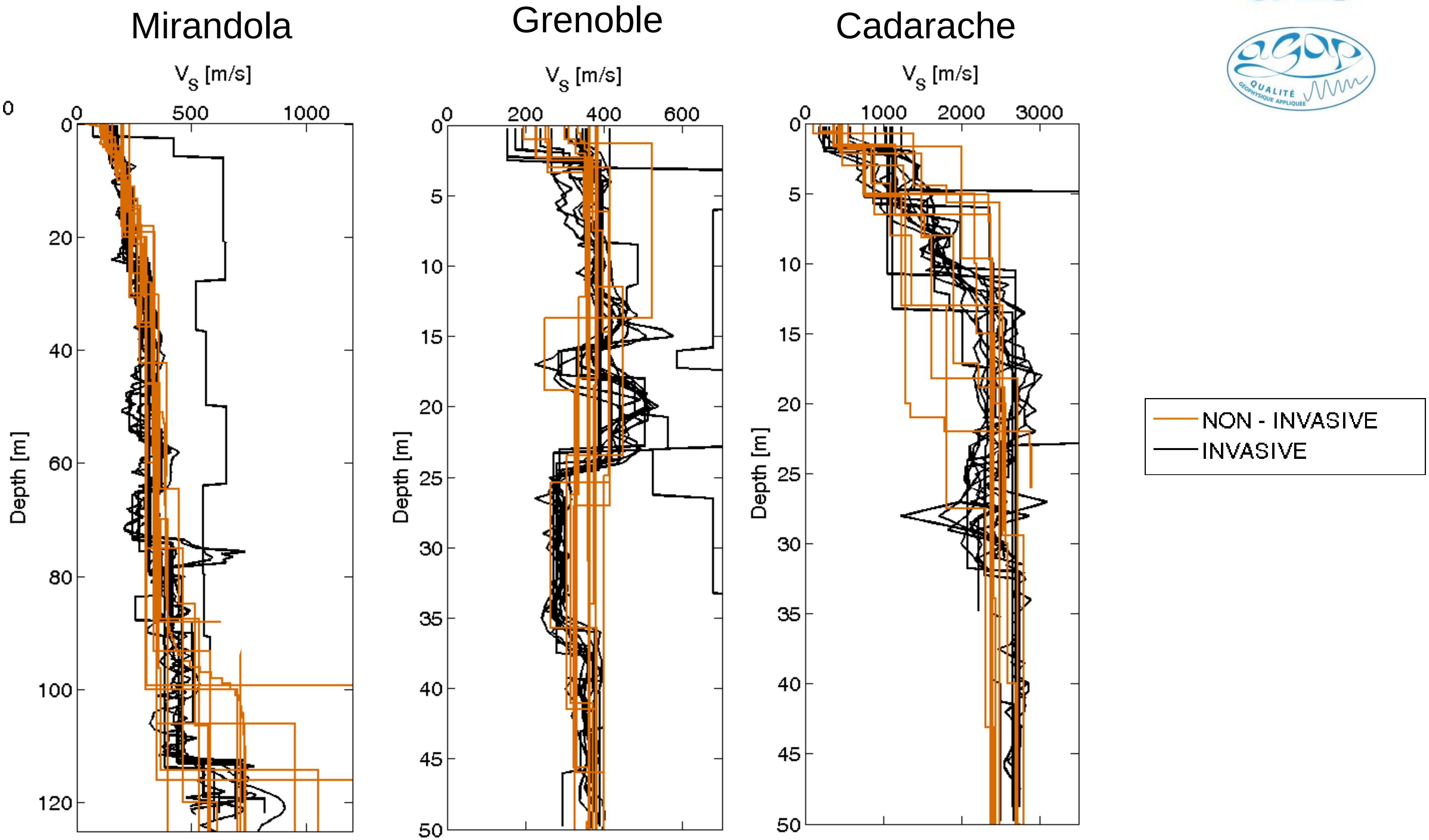
- Forages de 50 à130 m de profondeur
- Cross-hole
- Down-hole
- PS-Logging

Essais non-invasifs

- Actif (MASW)
- Passif (réseaux circulaires/triangulaires/forme en L)

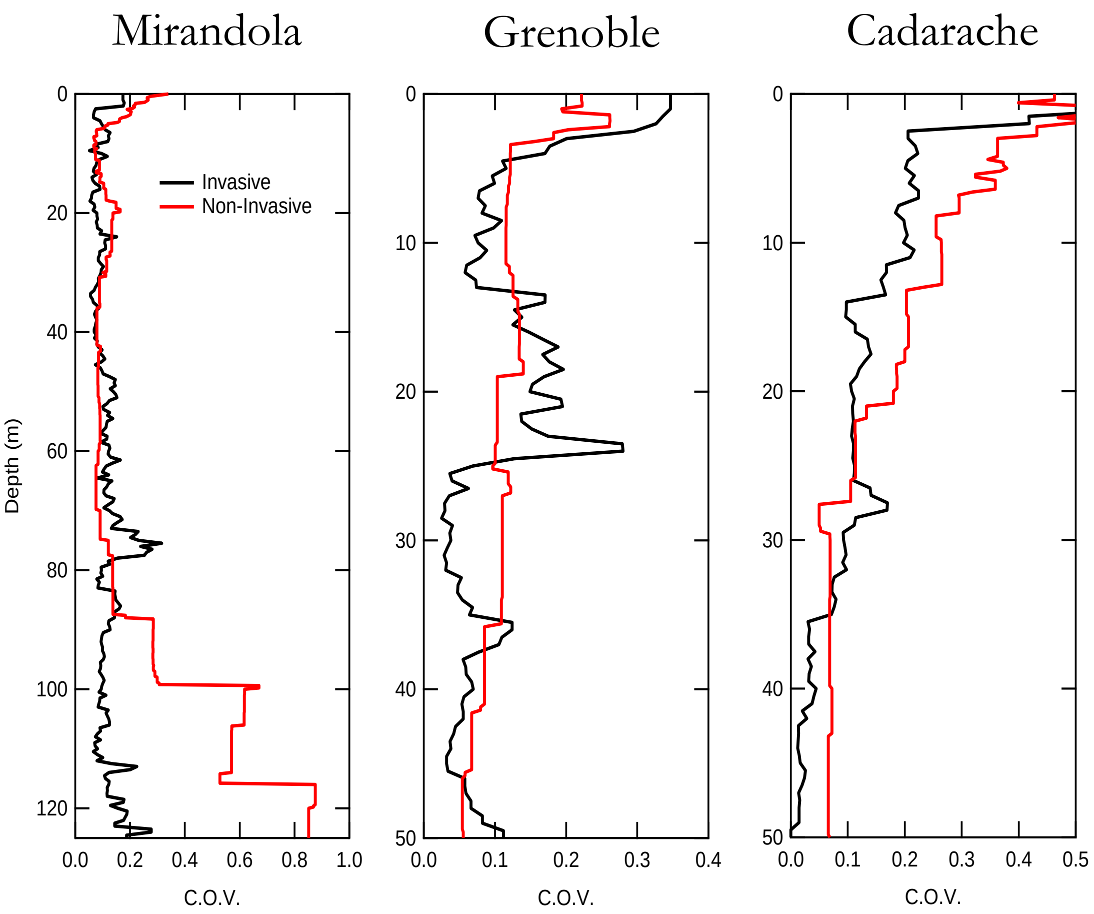
❖ Données des essais non invasifs distribués à 14 équipes expérimentées
❖ Données des essais invasifs traitées par les opérateurs eux-mêmes

Performance des méthodes



Garofalo et al., 2016

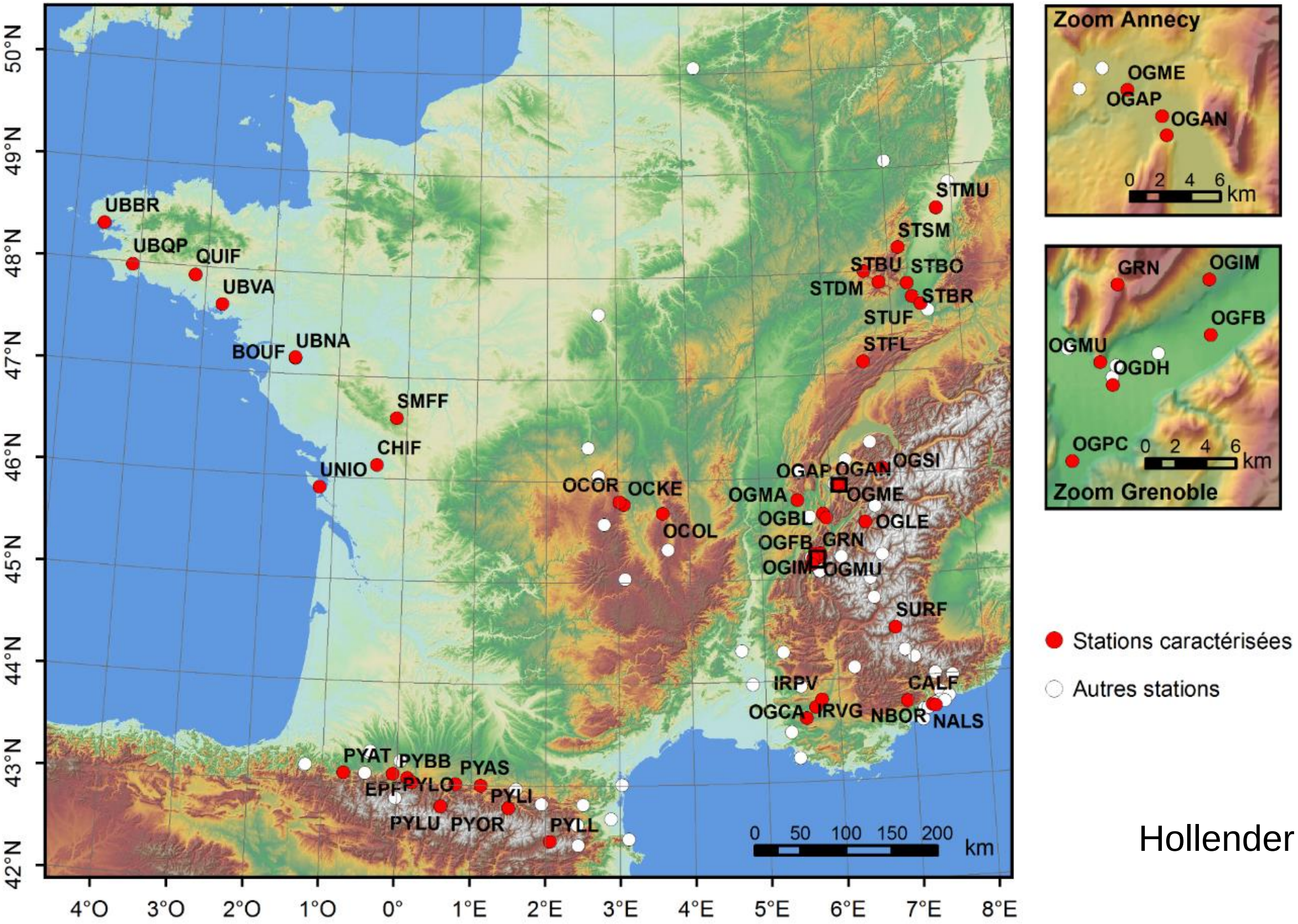
Performance des méthodes



- Variabilité sismilaire sur les estimations de Vs quelle que soit la méthode
- Variabilité plus forte en proche surface quelle que soit la méthode
- Variabilité plus forte des méthodes non-invasives en profondeur (profondeur de pénétration/résolution)

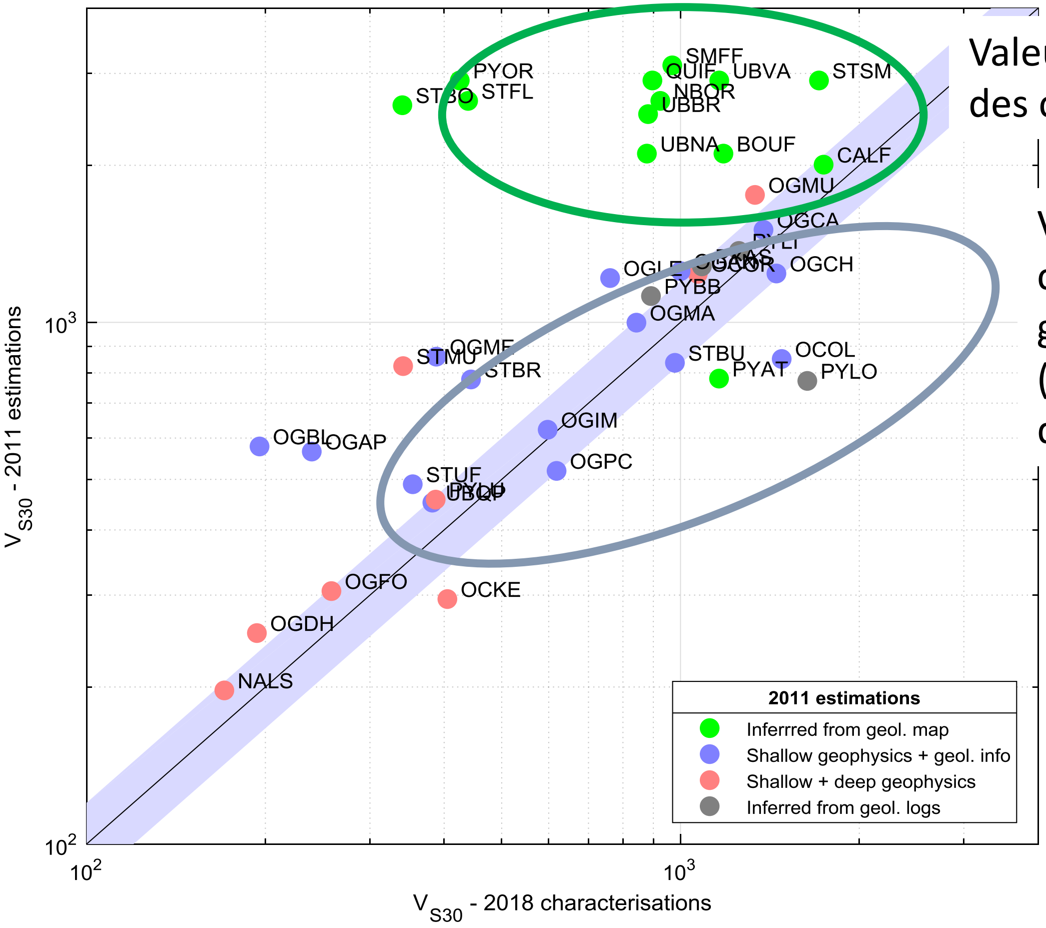
Garofalo et al., 2016

Application en France


UBBR
UBQP
QUIF
UBVA
BOUF
UBNA
SMFF
CHIF
UNIO
OCOR
OCKE
OCOL
STMU
STSM
STBU
STBO
STDM
STBR
STUF
STFL
OGAP
OGAN
OGSI
OGMA
OGME
OGBL
OGLE
OGFB
GRN
OGIM
OGMU
SURF
IRPV
CALF
OGCA
IRVG
NBOR
NALS
PYAT
PYBB
PYAS
EPF
PYLO
PYLI
PYLU
PYOR
PYLL
0 50 100 150 200 km
50°N
49°N
48°N
47°N
46°N
45°N
44°N
43°N
42°N
4°O
3°O
2°O
1°O
0°
1°E
2°E
3°E
4°E
5°E
6°E
7°E
8°E
Zoom Annecy
OGME
OGAP
OGAN
0 2 4 6 km
GRN
OGIM
OGFB
OGMU
OGDH
OGPC
0 2 4 6 km
Zoom Grenoble
● Stations caractérisées
○ Autres stations

Hollender et al. 2018

Application en France



Valeurs précédentes déduites des cartes géologiques

Valeurs précédentes déduites de cartes géologiques + de mesures géophysiques « superficielles » (~10 m de profondeur d'investigation)

Hollender et al. 2019

Efforts actuels de standardisation pour la caractérisation des sites

Guidelines sur les méthodes non-invasives:
SESAME 2004, Guidelines Interpacific (Foti et al. 2018); Guidelines COSMOS/USGS en cours, …

SERA
Seismology and Earthquake Engineering
Research Infrastructure Alliance for Europe

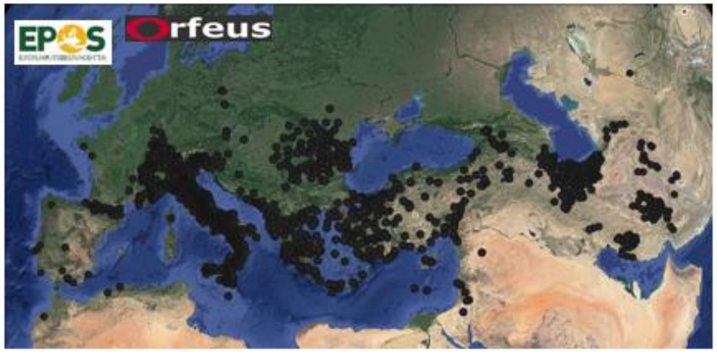
2017-2020

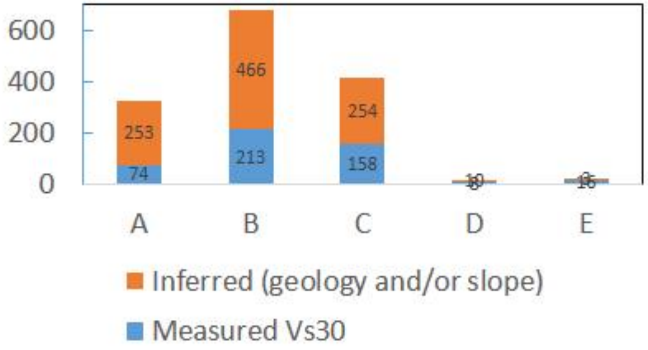
WP7. Networking databases of site and station characterization

7.2 Common Best Practice Procedures for Site and Seismic Station Characterization : An European Initiative

What site characterization information do we have today in Europe?

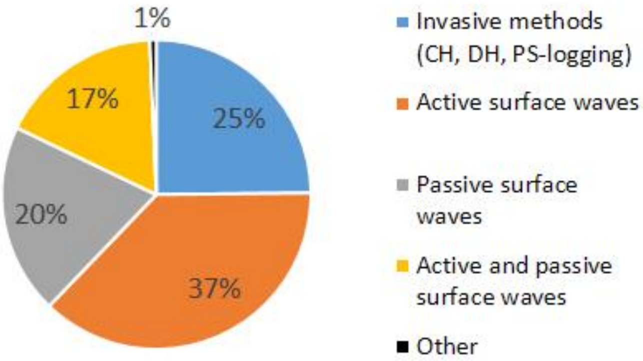
Engineering Strong Motion database (ESM; http://esm.mi.ingv.it/)





From ESM 2018 Flat-file:

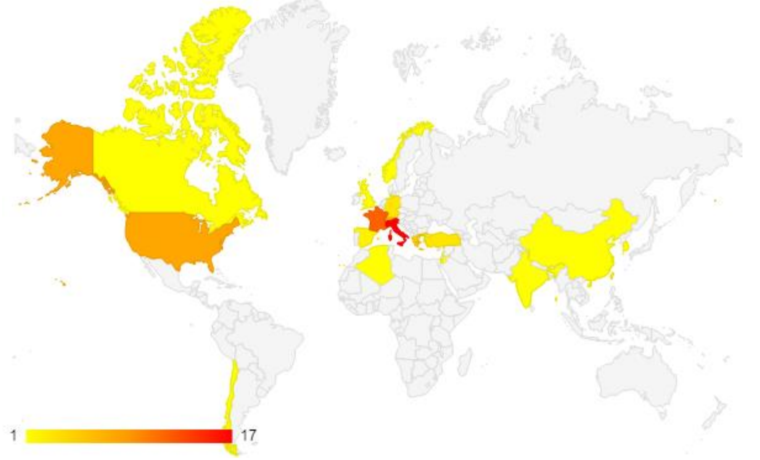
- 2071 permanent stations
- 1455 stations with EC8 class (70%)
- 469 stations with Vs30 (22%)



Quels sont les indicateurs de caractérisation des sites les plus importants (et consensuels) pour la réponse sismique des terrains de couverture ?

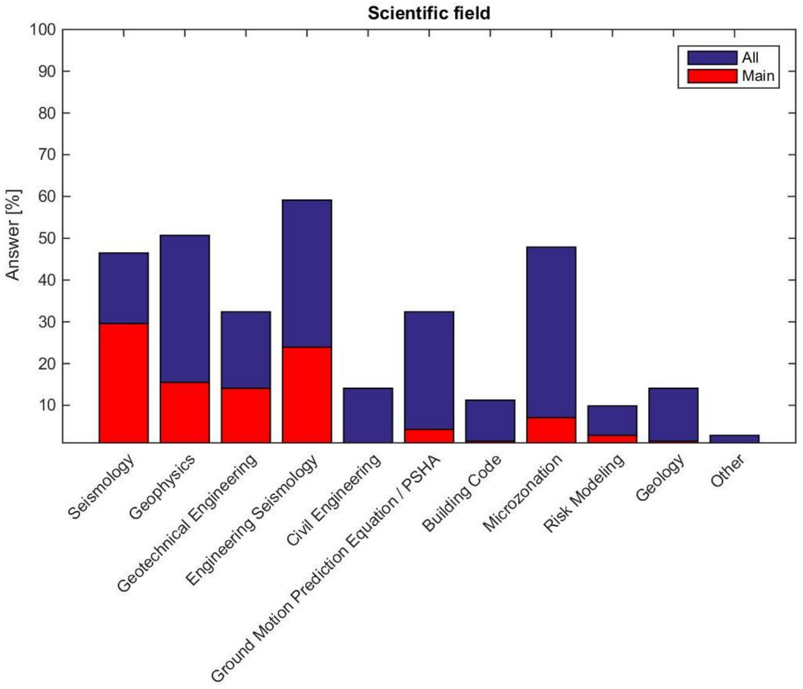
Indicateurs pour la caractérisation des sites
Aléa sismique …. Vs30, Kappa0
Aléa site-spécifique …. Vs(z)
Geotechnical engineering … SCPT

Questionnaire
Phase 1 : liste des indicateurs pertinents
Phase 2: vote international
Phase 3: workshop (mars 2019)



230 sollicitations
71 réponses

66% Europe
17% USA
17% autre

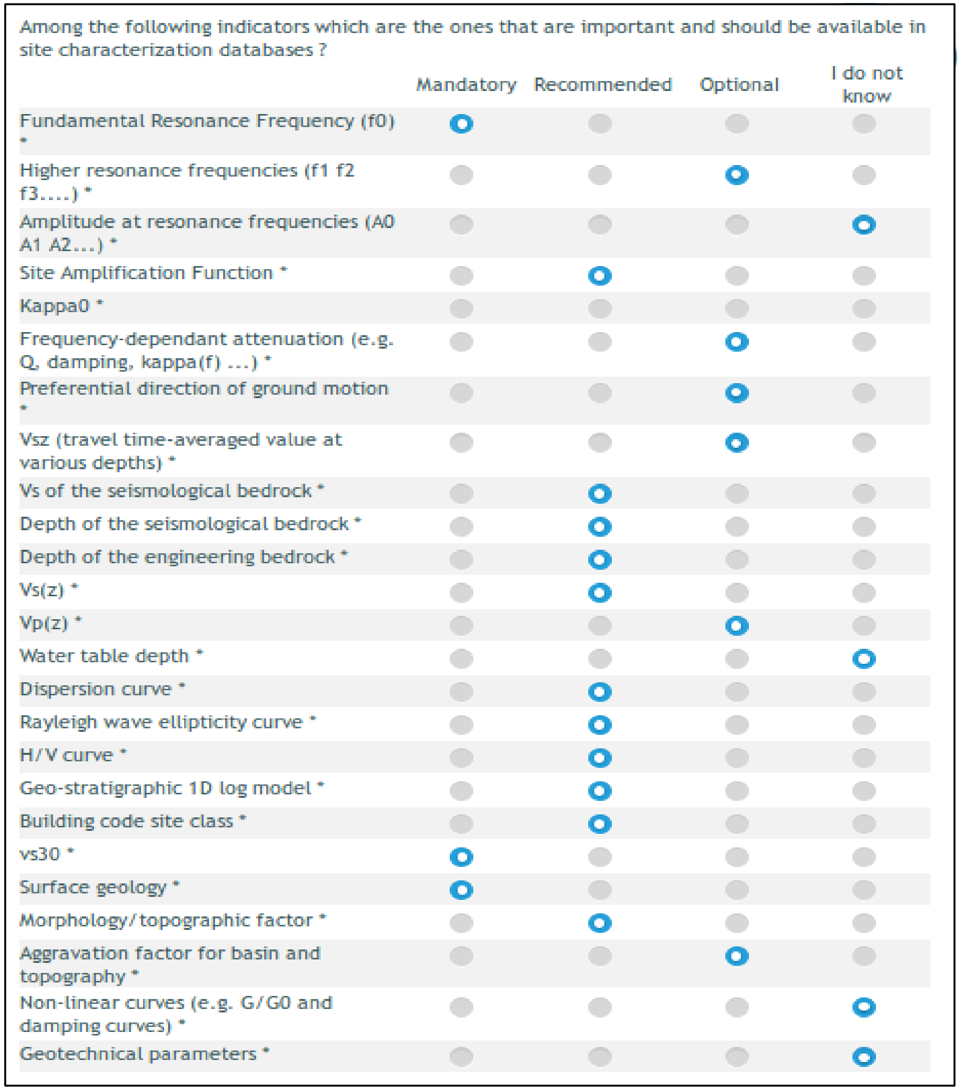


Di Giulio et al., 2019 SERA Deliverable D7.2

Questionnaire international SERA

Vote sur les indicateurs les plus important à introduire dans les bases de données:

- ✓ Obligatoire
- ✓ Recommendé
- ✓ Optionel
- ✓ Je ne sais pas

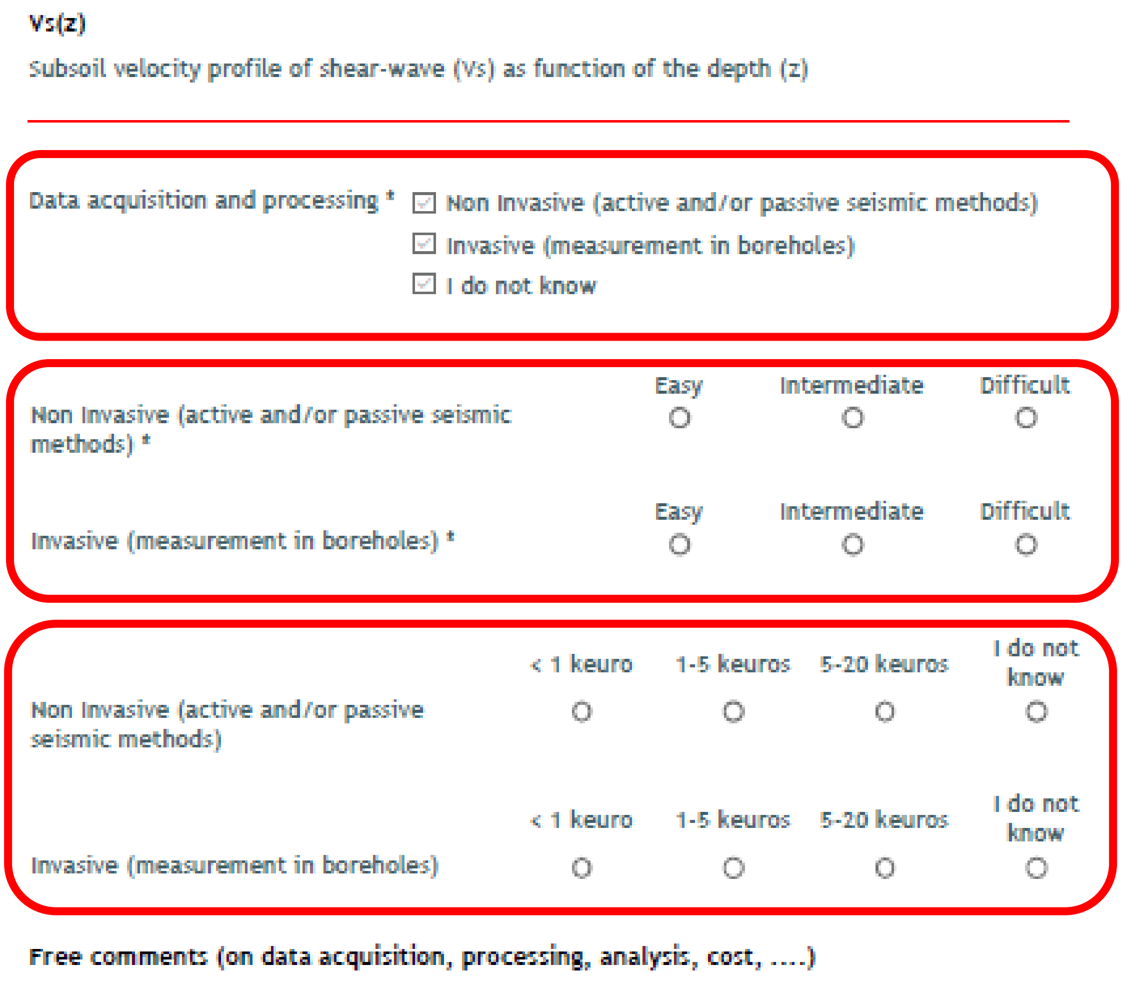


Among the following indicators which are the ones that are important and should be available in site characterization databases ?

	Mandatory	Recommended	Optional	I do not know
Fundamental Resonance Frequency (f0) *	●	○	○	○
Higher resonance frequencies (f1 f2 f3....) *	○	○	●	○
Amplitude at resonance frequencies (A0 A1 A2...) *	○	○	○	●
Site Amplification Function *	○	●	○	○
Kappa0 *	○	○	○	○
Frequency-dependant attenuation (e.g. Q, damping, kappa(f) ...) *	○	○	●	○
Preferential direction of ground motion *	○	○	●	○
Vsz (travel time-averaged value at various depths) *	○	○	●	○
Vs of the seismological bedrock *	○	●	○	○
Depth of the seismological bedrock *	○	●	○	○
Depth of the engineering bedrock *	○	●	○	○
Vs(z) *	○	●	○	○
Vp(z) *	○	○	●	○
Water table depth *	○	○	○	●
Dispersion curve *	○	●	○	○
Rayleigh wave ellipticity curve *	○	●	○	○
H/V curve *	○	●	○	○
Geo-stratigraphic 1D log model *	○	●	○	○
Building code site class *	○	●	○	○
vs30 *	●	○	○	○
Surface geology *	●	○	○	○
Morphology/topographic factor *	○	●	○	○
Aggravation factor for basin and topography *	○	○	●	○
Non-linear curves (e.g. G/G0 and damping curves) *	○	○	○	●
Geotechnical parameters *	○	○	○	●

Questionnaire international SERA

Méthode, faisabilité et coût relatif à chaque indicateur



Vs(z)

Subsoil velocity profile of shear-wave (Vs) as function of the depth (z)

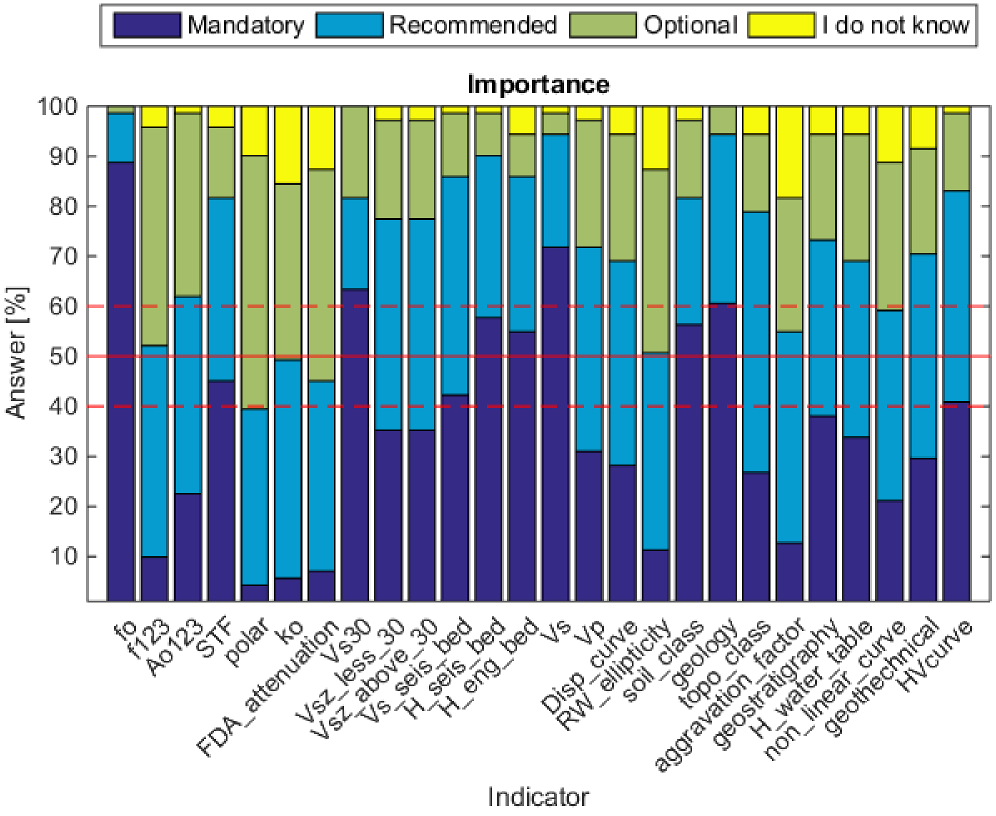
Data acquisition and processing *
☐ Non Invasive (active and/or passive seismic methods)
☐ Invasive (measurement in boreholes)
☐ I do not know

	Easy	Intermediate	Difficult
Non Invasive (active and/or passive seismic methods) *	○	○	○
Invasive (measurement in boreholes) *	○	○	○

	< 1 keuro	1-5 keuros	5-20 keuros	I do not know
Non Invasive (active and/or passive seismic methods)	○	○	○	○
Invasive (measurement in boreholes)	○	○	○	○

Free comments (on data acquisition, processing, analysis, cost, ...)

Questionnaire international SERA



Di Giulio et al., 2019 SERA Deliverable D7.2

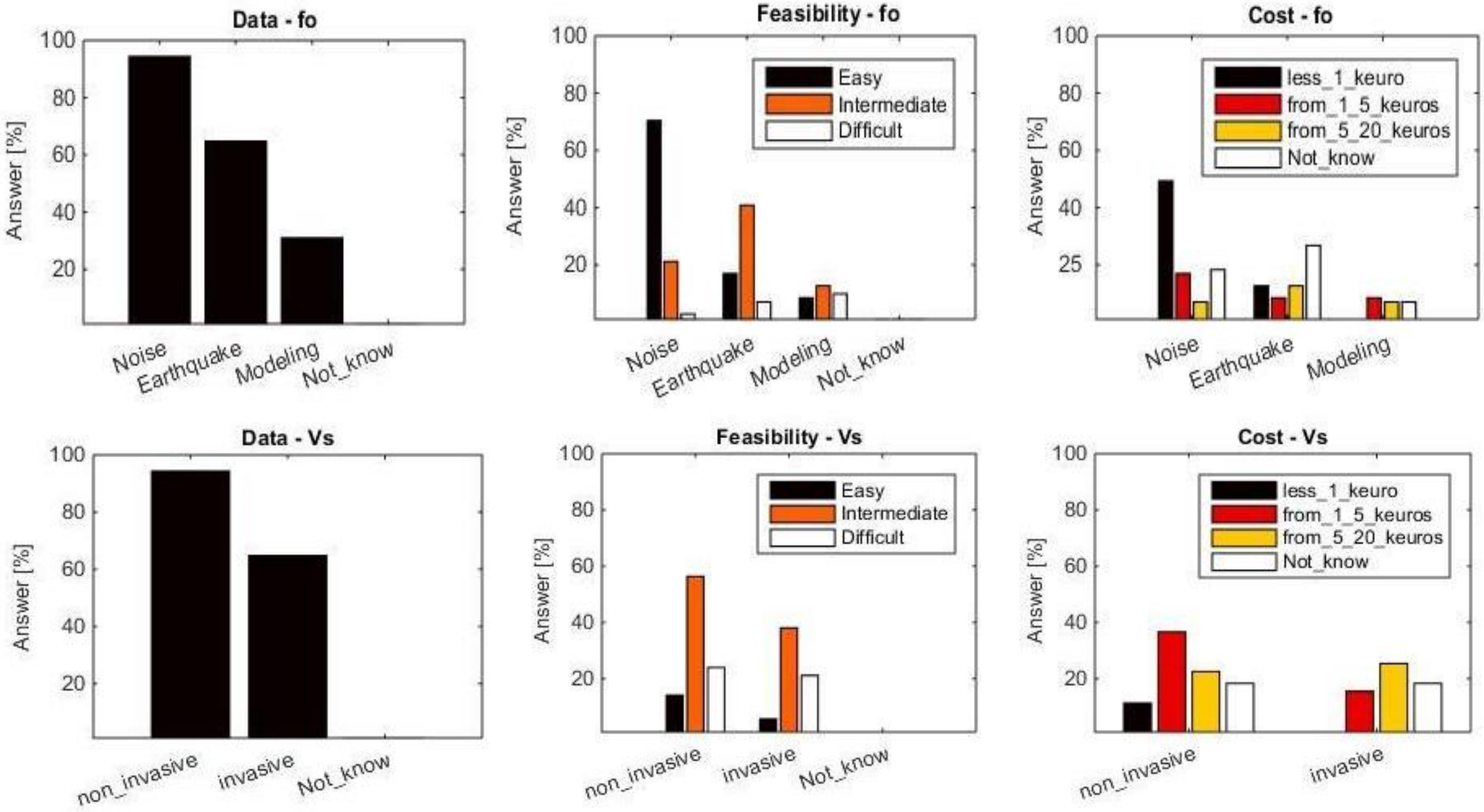
Indicateur	%
Fo	89
Vs(z)	71
Vs30	63
Géologie de surface	60
Profondeur du rocher sismique (Hs)	57
Classe de sol	56
Profondeur du rocher de l'ingénieur (H_{800})	54
Fonction d'amplification	46
Vs du rocher sismique	41
Courbe H/V	40
Géostratigraphie	39
Vs_5, Vs_{10}, Vs_{20}, …, Vs_{30}	34
…	

7 indicateurs considérés comme obligatoires à renseigner dans les bases de données

Criticalités:

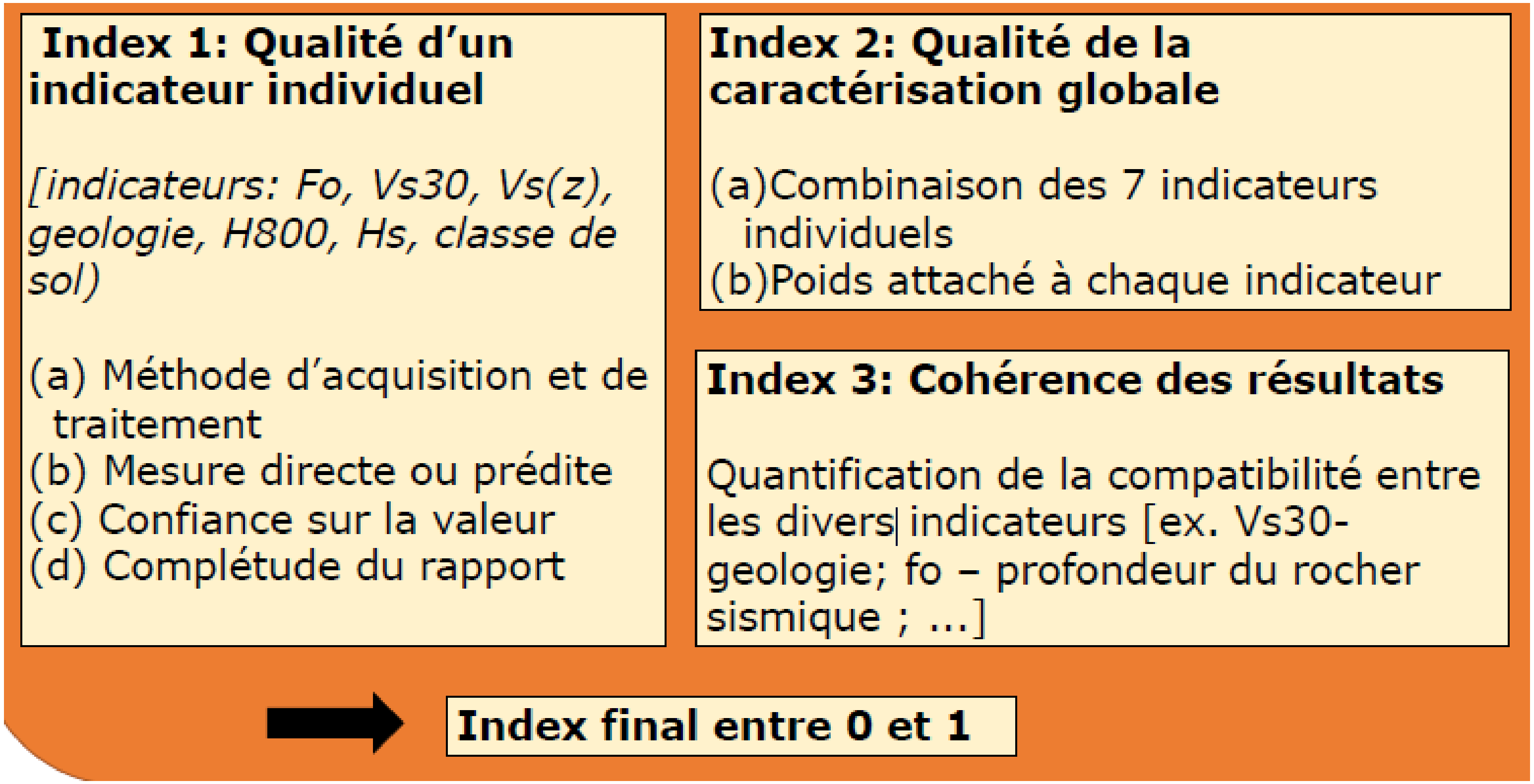
- Définition du rocher
- Incertitudes

Questionnaire international SERA



Di Giulio et al., 2019 SERA Deliverable D7.2

Indice de qualité global



Index 1: Qualité d'un indicateur individuel

[indicateurs: Fo, Vs30, Vs(z), geologie, H800, Hs, classe de sol)

(a) Méthode d'acquisition et de traitement
(b) Mesure directe ou prédite
(c) Confiance sur la valeur
(d) Complétude du rapport

Index 2: Qualité de la caractérisation globale

(a)Combinaison des 7 indicateurs individuels
(b)Poids attaché à chaque indicateur

Index 3: Cohérence des résultats

Quantification de la compatibilité entre les divers indicateurs [ex. Vs30-geologie; fo – profondeur du rocher sismique ; …]

Index final entre 0 et 1

Indice de qualité global

Index 1: Qualité d'un indicateur individuel

[indicateurs: Fo, Vs30, Vs(z), geologie, H800, Hs, classe de sol)

(a) Méthode d'acquisition et de traitement
(b) Mesure directe ou prédite
(c) Confiance sur la valeur
(d) Complétude du rapport

Index 2: Qualité de la caractérisation globale

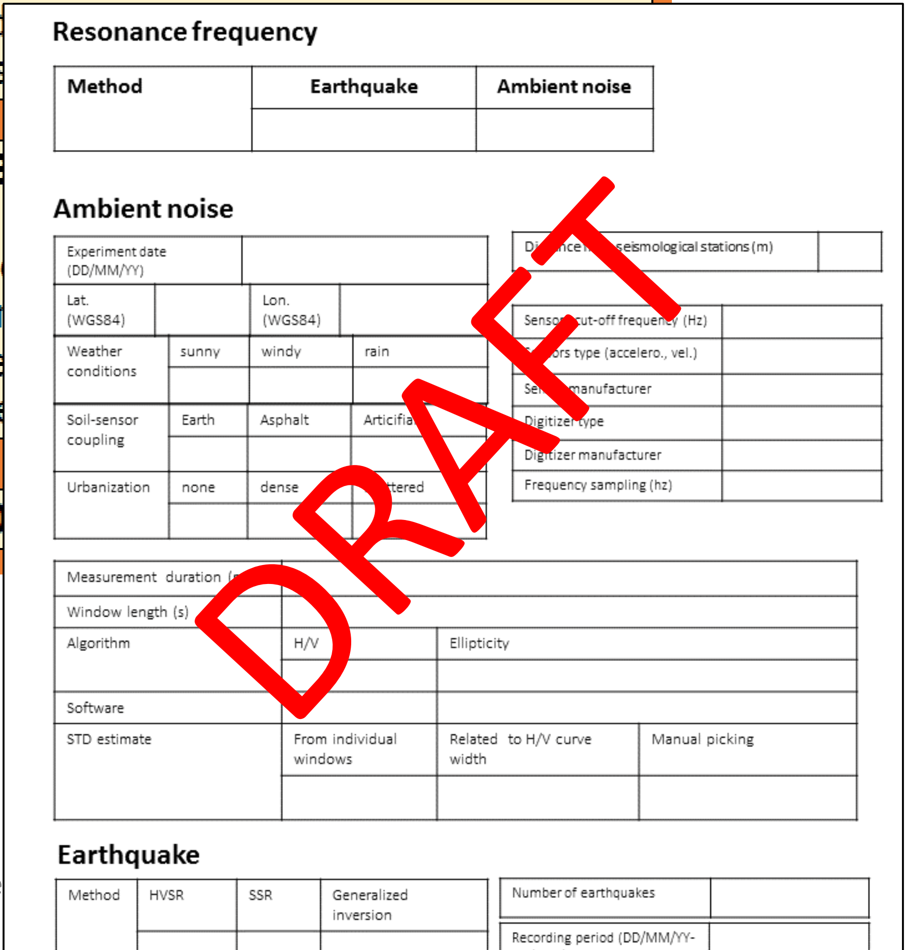
(a)Combinaison des 7 indicateurs individ
(b)Poids

Index 3

Quantifi
les diver
geologie
sismique

Index final entre 0

Rapport de synthèse des informations importantes nécessaires à l'évaluation de l'indice de qualité



Resonance frequency

Method	Earthquake	Ambient noise

Ambient noise

Experiment date (DD/MM/YY)			
Lat. (WGS84)		Lon. (WGS84)	
Weather conditions	sunny	windy	rain
Soil-sensor coupling	Earth	Asphalt	Articifia[illegible]
Urbanization	none	dense	[illegible]ttered

Di[illegible]nce [illegible] seismological stations (m)	
Senso[illegible]cut-off frequen[illegible]y (Hz)	
[illegible]ors type (accelero., vel.)	
Se[illegible] manufacturer	
Digitizer type	
Digitizer manufacturer	
Frequency sampling (hz)	

Measurement duration ([illegible]			
Window length (s)			
Algorithm	H/V	Ellipticity	
Software			
STD estimate	From individual windows	Related to H/V curve width	Manual picking

Earthquake

Method	HVSR	SSR	Generalized inversion

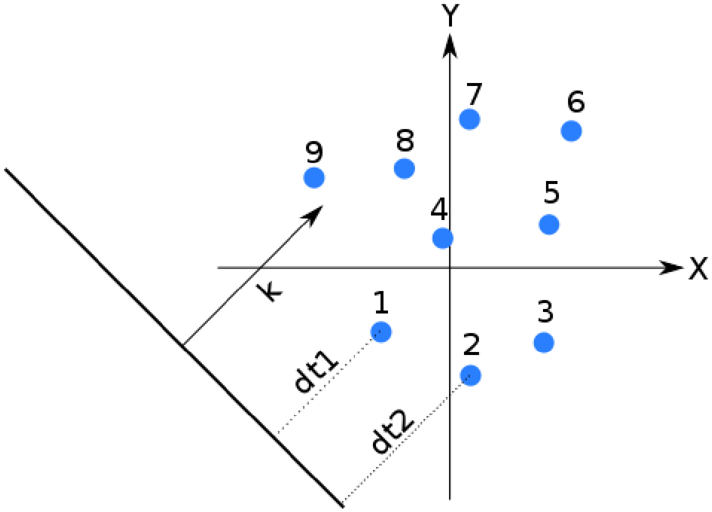
Number of earthquakes	
Recording period (DD/MM/YY-	

DRAFT

Développements méthodologiques récents

Evolution des méthodes de bruit de fond réseau

Rayleigh Three component BeamForming - RTBF (Wathelet et al. 2018)

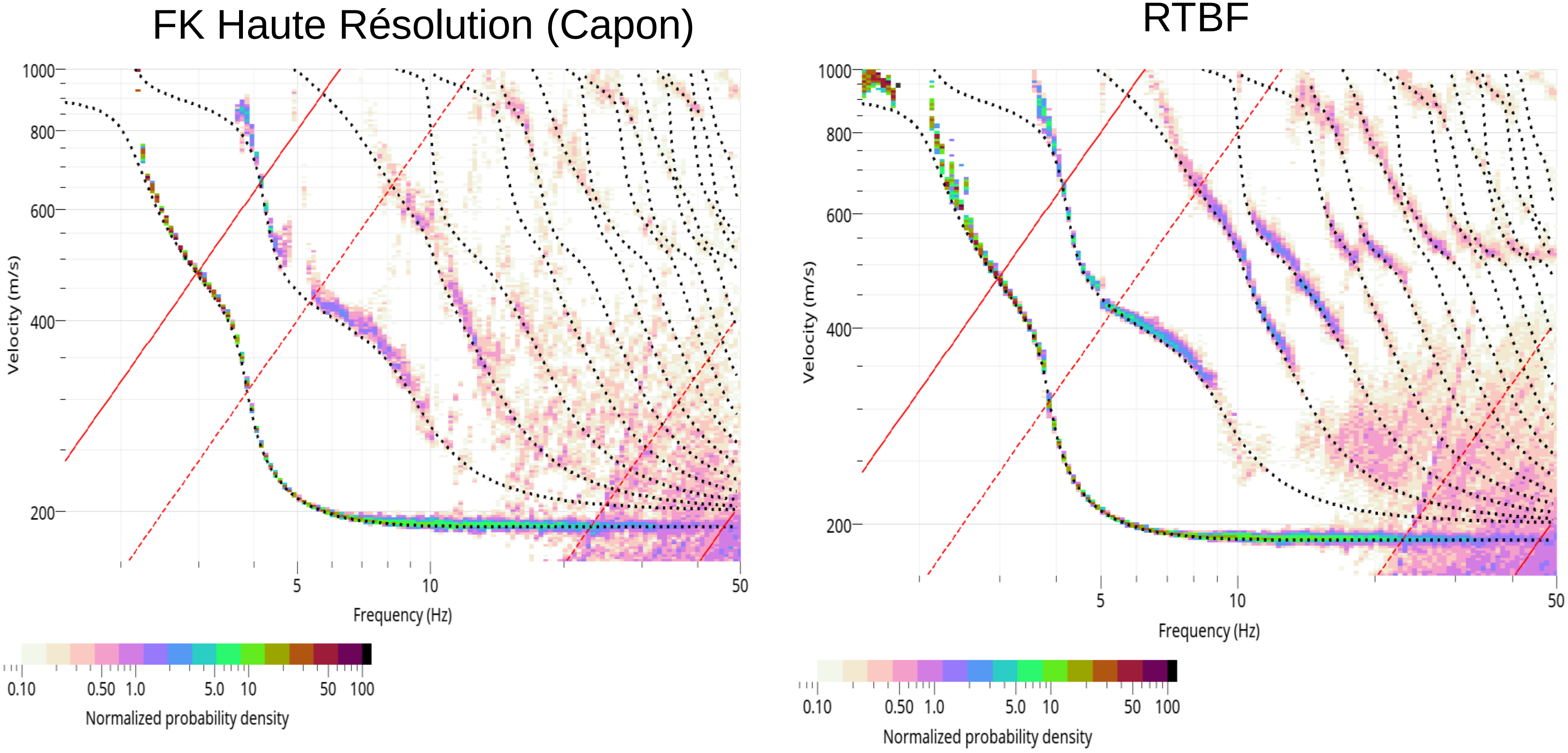


For a Rayleigh wave, the same delays are observed on the vertical and on the radial components, but shifted by the imaginary ellipticity je0.

Courbes de dispersion:

- ondes de Rayleigh
- Ellipticité signée
- ondes de Love

Evolution des méthodes de bruit de fond réseau

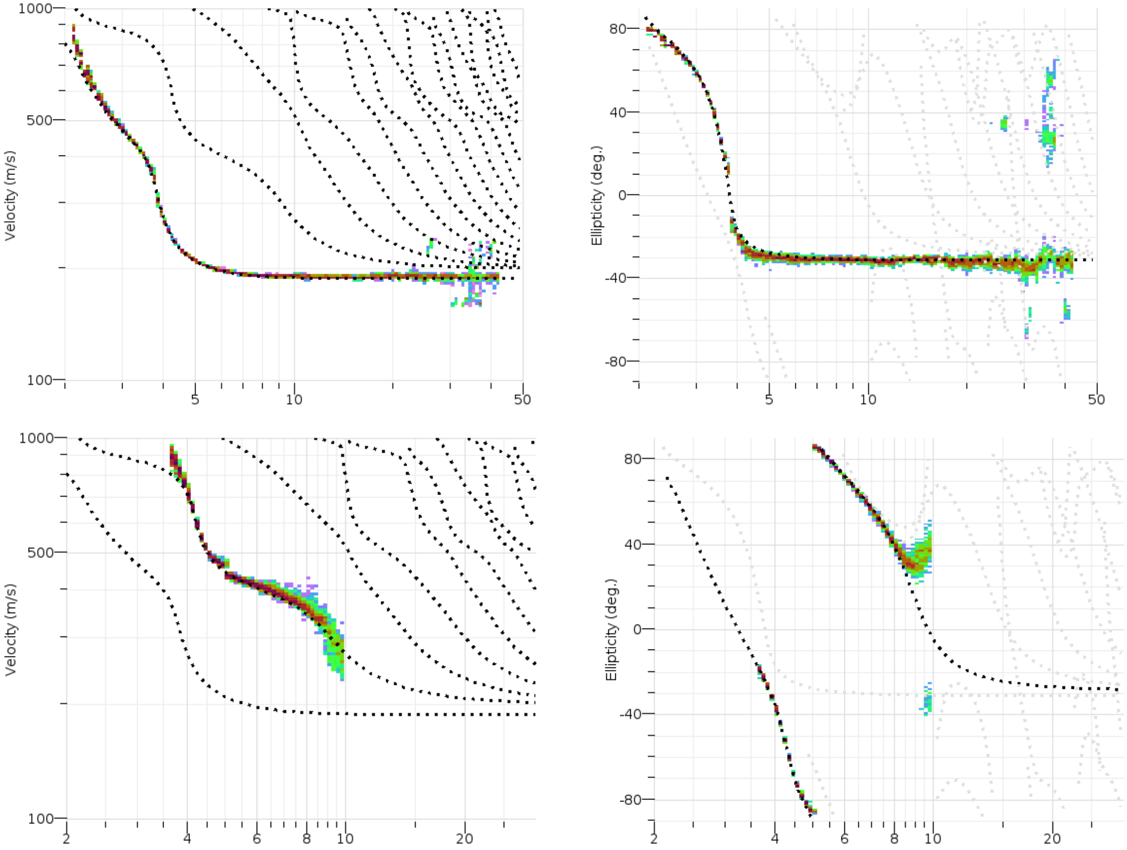


Bruit synthétique, Courtesy M. Wathelet

Evolution des méthodes de bruit de fond réseau

Vitesse de phase

Ellipticité



Mode 0

Mode 1

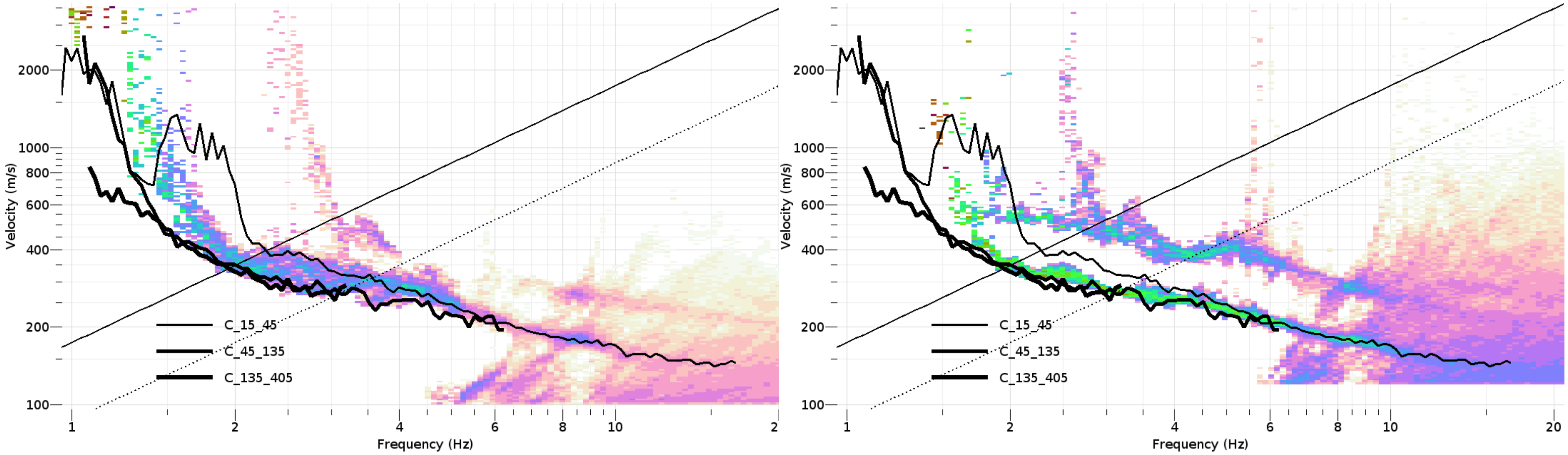
Bruit synthétique, Courtesy M. Wathelet

Evolution des méthodes de bruit de fond réseau

Application à un cas réel (Mirandola, InterPacific data)

FK Haute Résolution (Capon)

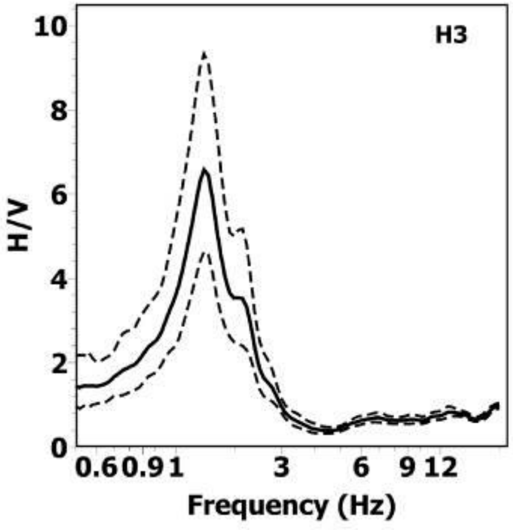
RTBF

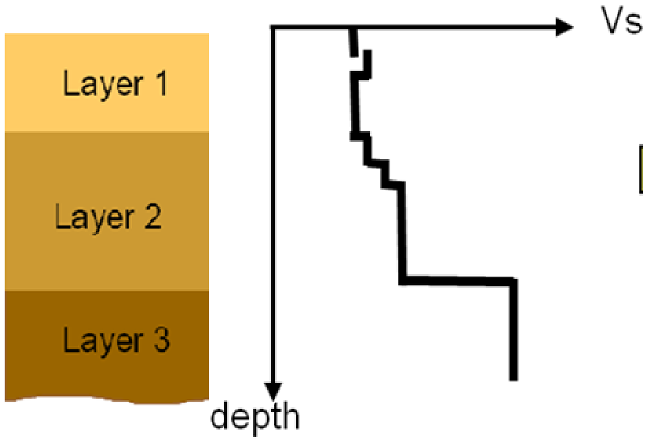


Courtesy M. Wathelet

Evolution des méthodes H/V

Peut-on inverser le H/V pour extraire le profil de vitesse en ondes S ?




Vs
Layer 1
Layer 2
Layer 3
depth

Peut-on inverser le H/V pour extraire Le profil de vitesse en ondes S ?

Modélisation des ondes de surfaces ou du champ d'ondes complet (Arai et Tokimatsu, 2000; Picozzi et al., 2005; Albarello and Lunedei, 2009, …)

- Hypothèse: structure 1D , milieu élastique(/anélastique), position des sources, proportion Rayleigh/Love = cte ou proportion excitation forces verticales/horizontales = cte

Théorie du champ d'ondes diffus (Sanchez-Sesma et al., 2011; Garcia-Jerez et al., 2016)

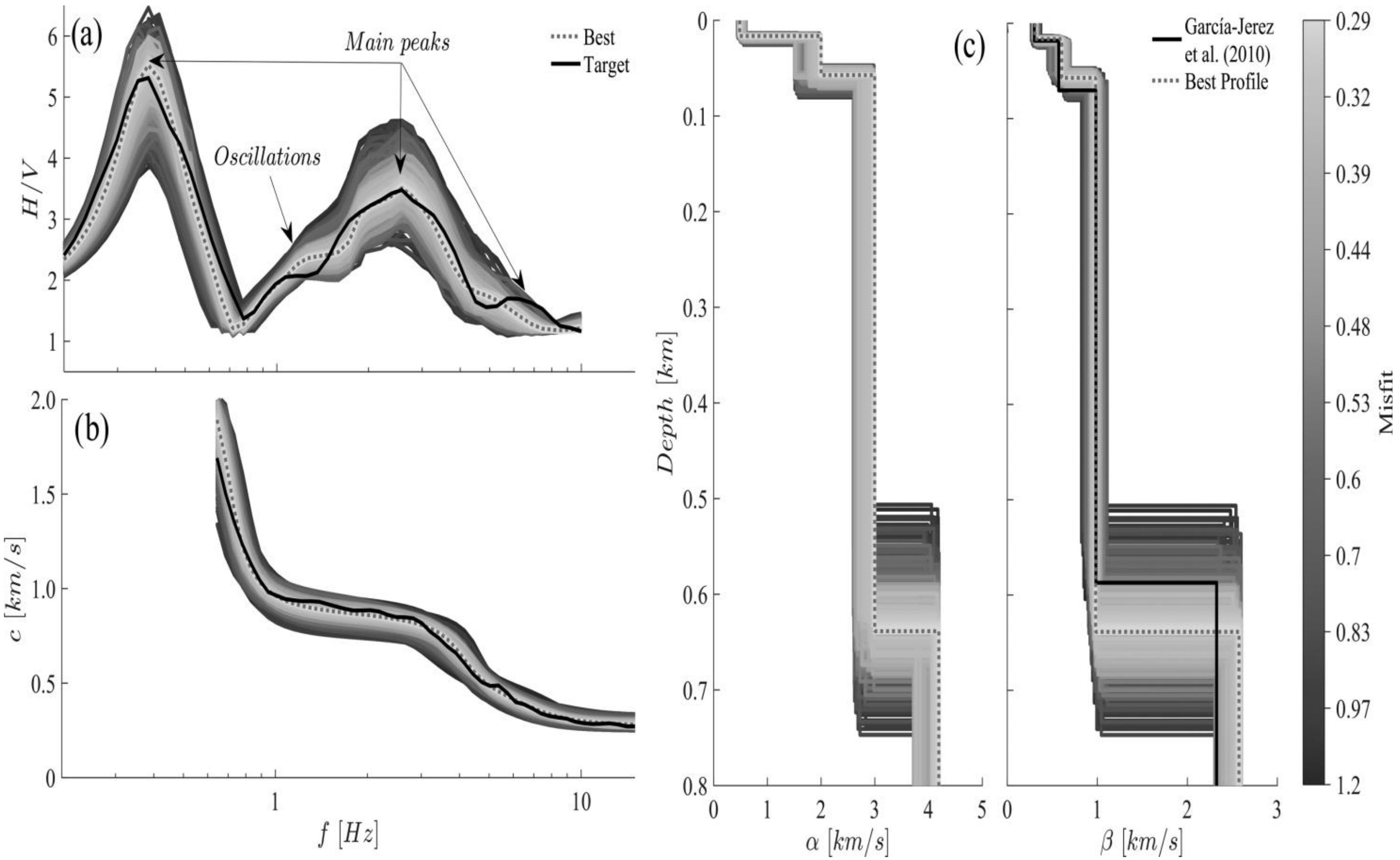
- Hypothèse : équipartition, stucture 1D

Extraction de l'ellipticity des ondes de Rayleigh (Poggi et al., 2012 ; Hobiger et al., 2013; Wathelet et al., 2018)

- Hypothesis: structure 1D, milieu élastique

! Pour l'inversion, nécessité d'information a priori sur la structure en vitesse (MASW, forage, …)

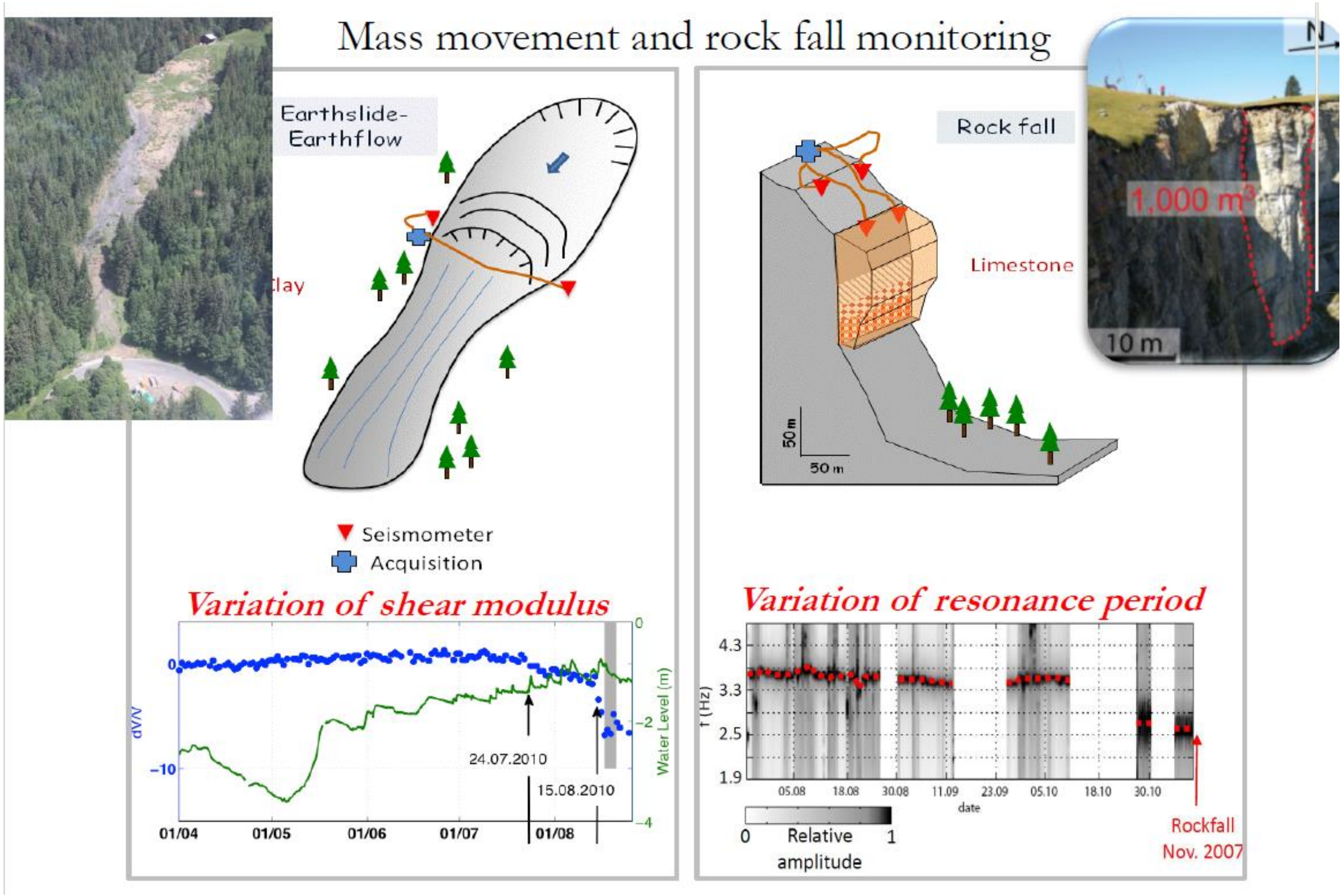
Peut-on inverser le H/V pour extraire le profil de vitesse en ondes S ?



Théorie du champ d'ondes diffus, Pina-Flores et al. 2017

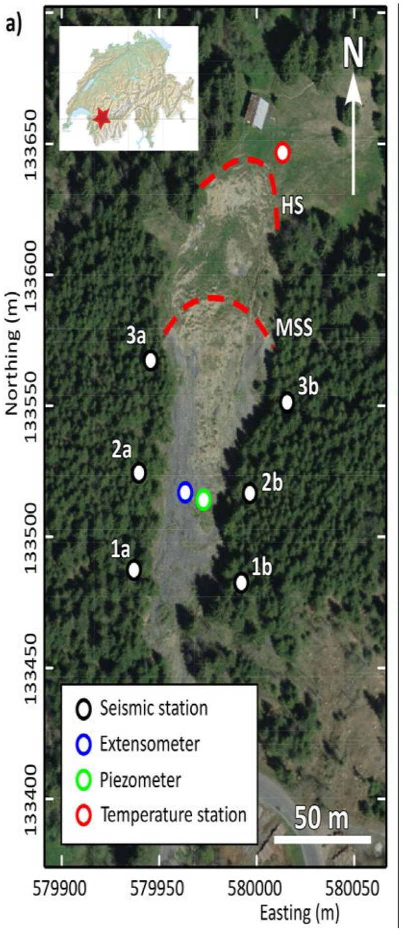
Suivi temporel: examples

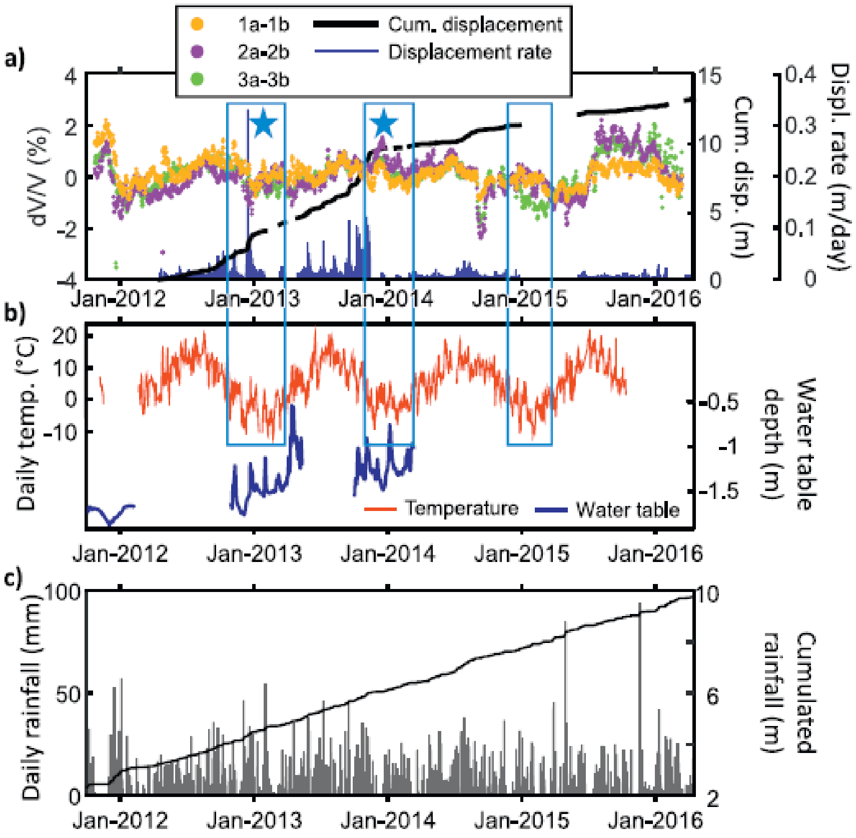
Suivi temporel : exemple de premières observations



Mainsant et al. 2012

Suivi temporel: vers des suivis multi-paramètres


a)
N
HS
MSS
3a
3b
2a
2b
1a
1b
Seismic station
Extensometer
Piezometer
Temperature station
50 m
Northing (m)
133650
133600
133550
133500
133450
133400
579900
579950
580000
580050
Easting (m)



Bièvre et al. 2018

Merci pour votre attention