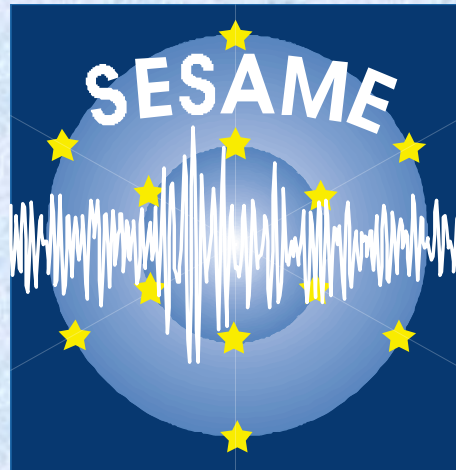


Caractérisation du comportement dynamique des sols par mesures de vibrations ambiantes

Développements récents, questions en suspens:
projet SESAME



P.-Y. Bard ^{1,2} + participants *SESAME*

1 : Laboratoire de Géophysique Interne et de Tectonophysique, Grenoble, France.

2 : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France

Site Effects assessment using Ambient Excitations

Projet CE / EDD (01/05/2001 - 31/10/2004)



Université Bergen
Institut de Géophysique Bratislava
Résonance Genève
LGIT/LCPC Grenoble
Université Liège / LIRIGM Grenoble
Université Lisbonne
CNR Milan
CETE Nice
Université Potsdam
INGV Rome
ITSAK Thessalonique
ETH Zürich

<http://SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>

Participants SESAME

C. Acerra, G. Alguacil, A. Anastasiadis, K. Atakan, R. Azzara, R. Basili, F. Blarel, S. Bonnefoy-Claudet, P. Bordoni, A. Borges, L. Bourjot, M. Böttger, F. Cara, J.-L. Chatelain, C. Cornou, F. Cotton, G. Cultrera, R. Daminelli, P. Dimitriu, F. Dunand, A.-M. Duval, D. Fähr, L. Fojtikova, R. de Franco, G. di Giulio, M. Grandison, P. Guéguen, B. Guillier, J. Havskov, E. Haghshenas, D. Jongmans, F. Kind, J. Kirsch, M. Koller, A. Koehler, J. Kristek, M. Kristekova, C. Lacave, M. La Rocca, A. Marcellini, R. Maresca, B. Margaritis, P. Moczo, B. Moreno, A. Morrone, J.A. Ojeda, M. Ohrnberger, I. Oprsal, M. Pagani, A. Panou, C. Paz, E. Querendez, S. Rao, G. Richter, J. Ripperger, P. Roquette, D. Roten, A. Rovelli, G. Saccoroti, A. Savvaidis, F. Scherbaum, E. Schisselé, M.B. Sørensen, E. Spühler-Lanz, A. Ténto, P. Teves-Costa, N. Theodulidis, E. Tvedt, T. Utheim, S. Vidal, J.-F. Vassiliadès, D. Vollmer, M. Wathelet, J. Woessner, K. Wolff, S. Zacharopoulos.

Contexte

Risque sismique croissant

- Urbanisation croissante
- Tous pays (\forall niveau de développement)

Budgets de prévention et de reconnaissance

- Particulièrement limités
 - dans les PVD
 - dans les pays à sismicité modérée

Besoin de techniques "économiquement acceptables"

- Conditions de site
- (Aide au diagnostic des constructions existantes)

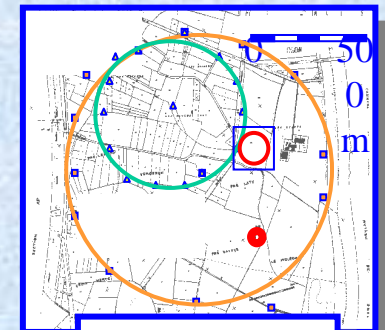
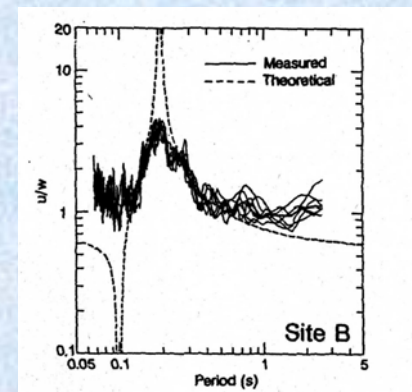
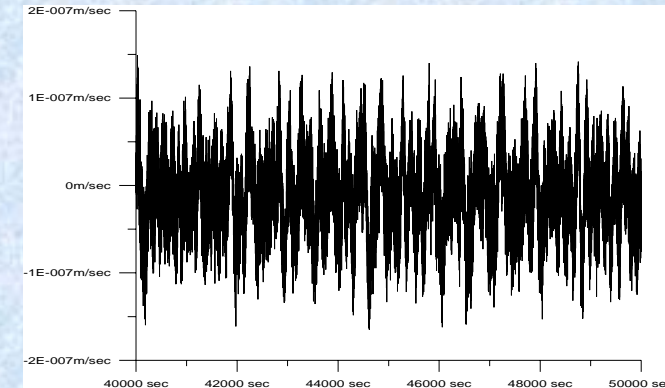
Effets de site et mesures de bruit ambiant au sol

Principe des techniques fondées sur le bruit de fond

- Nature du bruit de fond
- Technique H/V
- Mesures en réseau

Questions en suspens et projet SESAME

- Résultats H/V
- Résultats réseau



Estimation des effets de site

Cas idéal

- Connaissance de la structure géologique et des caractéristiques mécaniques
 - Nature et Géométrie des différentes formations i : h_i , $z_i(x, \gamma)$
 - $V_s(i)$, $Q_s(i)$ - $\zeta_s(i)$; $G(\gamma)$ - $\zeta(\gamma)$
- Détermination de la catégorie de site réglementaire
- Ou : Calcul direct de la réponse
 - Calculs "simples" 1D (colonne de sol locale)
 - Linéaire / Linéaire équivalent $G(\gamma)$ - $\zeta(\gamma)$ / Non linéaire
 - Calculs 2D ou 3D
 - Linéaire / Non-linéaire

Cas courant : on ne connaît quasiment rien !

- Coût jugé trop élevé
- Difficultés techniques (ζ , non-linéarités en fonction de γ)

? Peut-on extraire de l'information utile du bruit de fond sismique ?

Origine et nature des vibrations ambiantes

Fréquence < 0.5 Hz :	Houle océanique et conditions météorologiques régionales (3 000 km)
Fréquence ~ 1 Hz :	Vent, conditions météorologiques locales
Fréquence > 1 Hz :	Activités humaines (trafic, machines, ...)

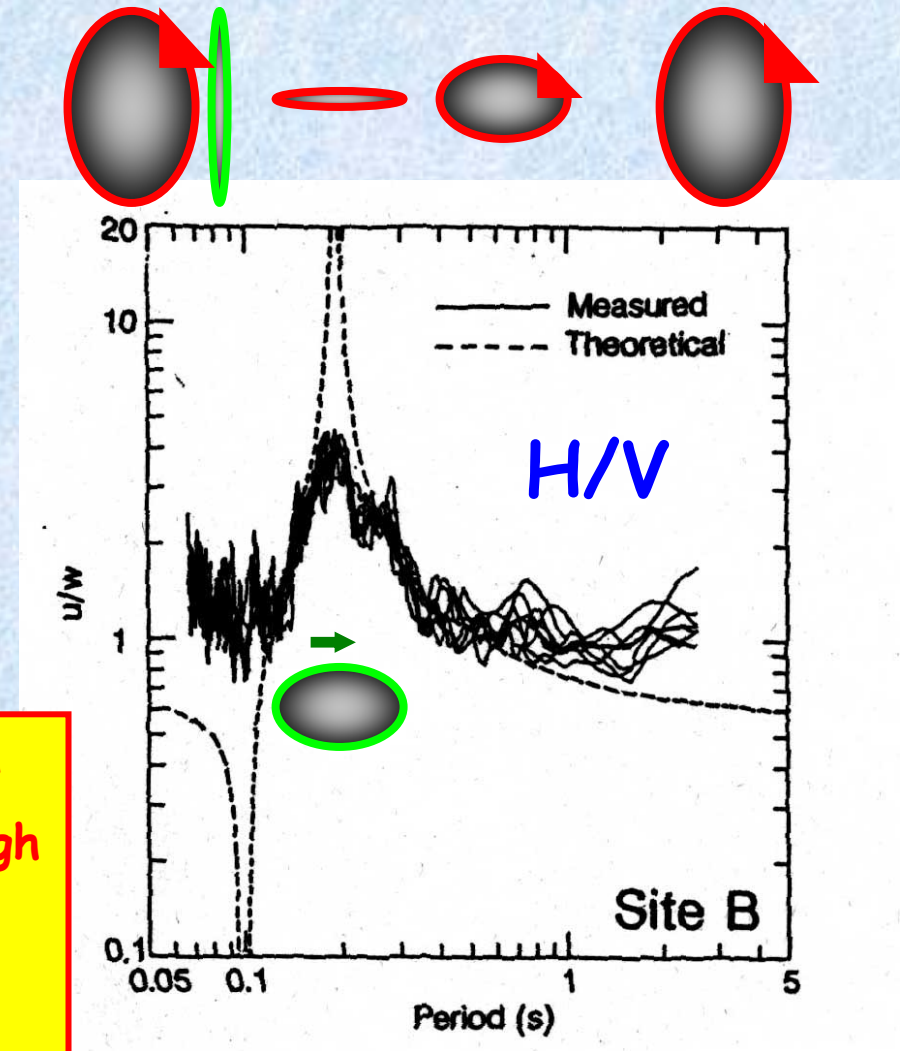
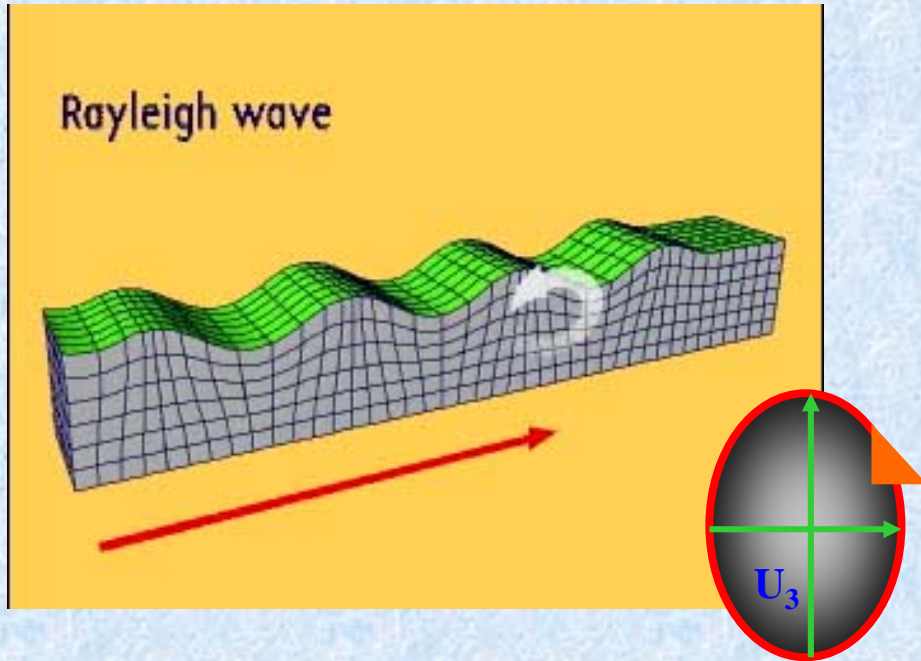
Limite de 1 Hz variable d'un site à l'autre

Sources superficielles : Génération d'ondes de surface (Rayleigh, Love)

Ondes très sensibles aux propriétés des formations superficielles:

- Ellipticité variable avec la fréquence (Rayleigh) : H/V
- Vitesse de phase dépendant de la fréquence : Réseau

Méthode H/V et ellipticité des ondes de Rayleigh



D'après Tokimatsu (1997)

- a) V: fortement contrôlé par ondes de Rayleigh
- b) Ellipticité / Polarisation des ondes de Rayleigh
- c) Dépend de la fréquence en milieu stratifié
- d) Si fort contraste (>3), V(Rayleigh) s'annule au voisinage de la fréquence fondamentale $f_0(S)$ [inversion du sens de rotation]

METHODE H/V

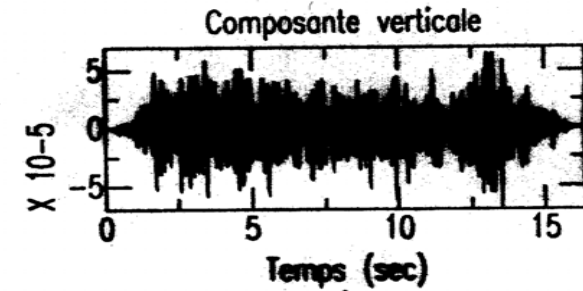
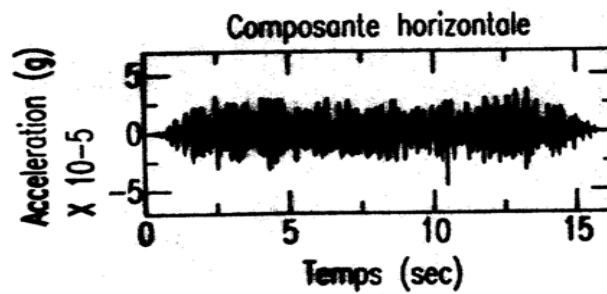
OU

"méthode de Nakamura"

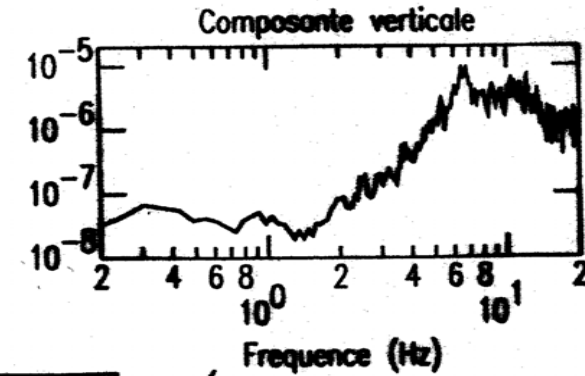
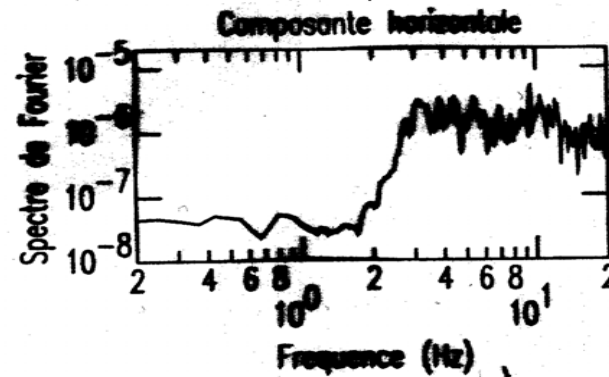
Simplicité

Stabilité temporelle

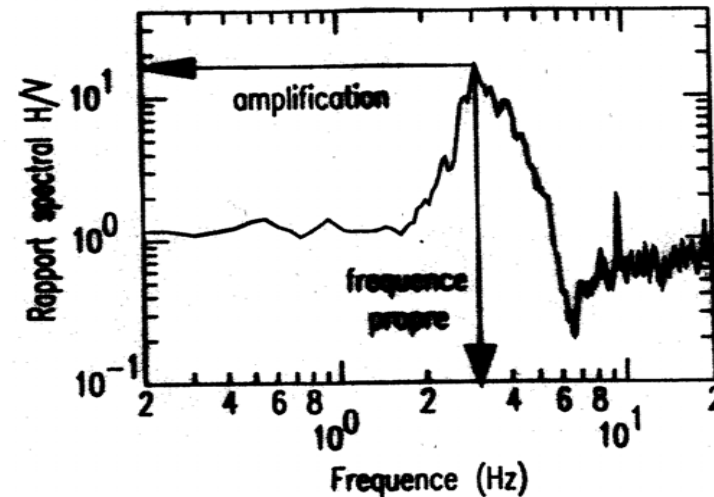
Liens avec les conditions de site



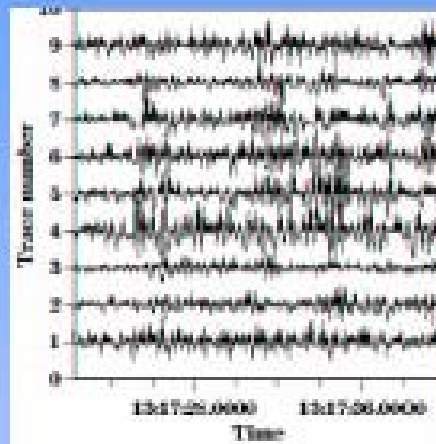
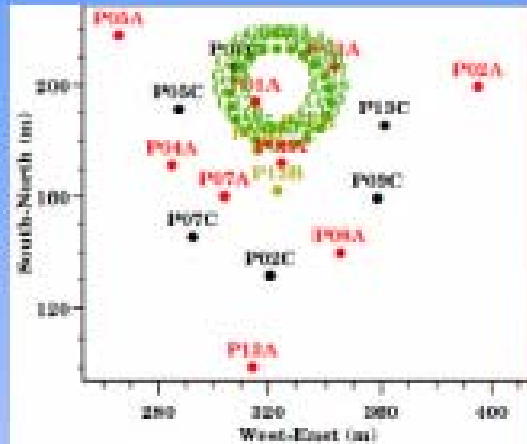
FFT + lissage



rapport

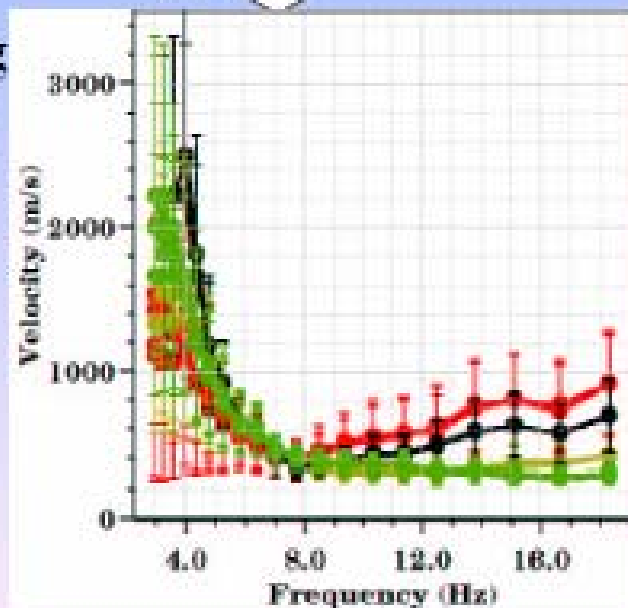


Méthodes en réseau : principe

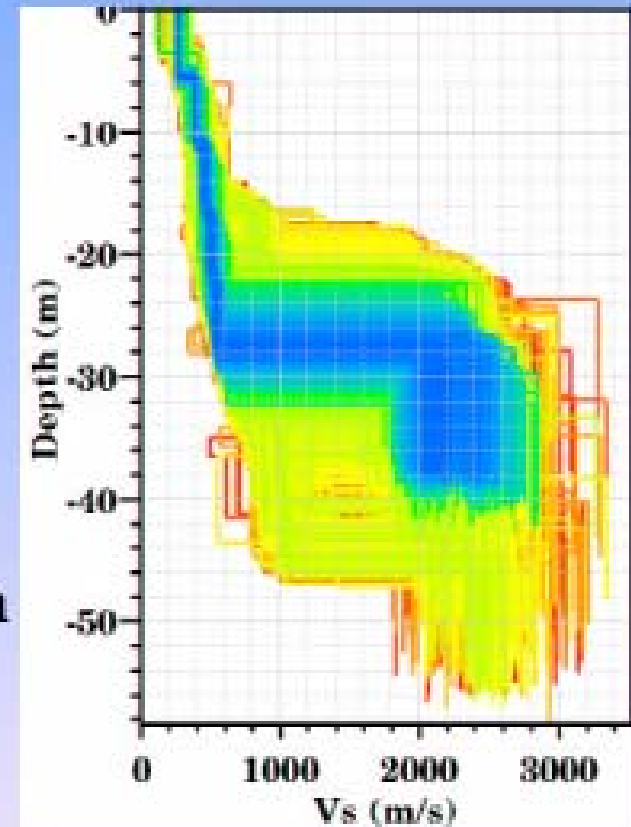


(d'après Wathelet, 2003)

Array
processing
methods

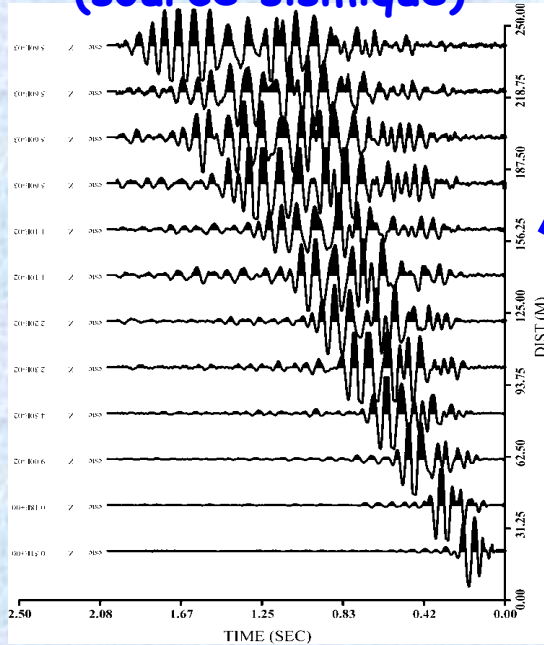


Inversion
(NA)



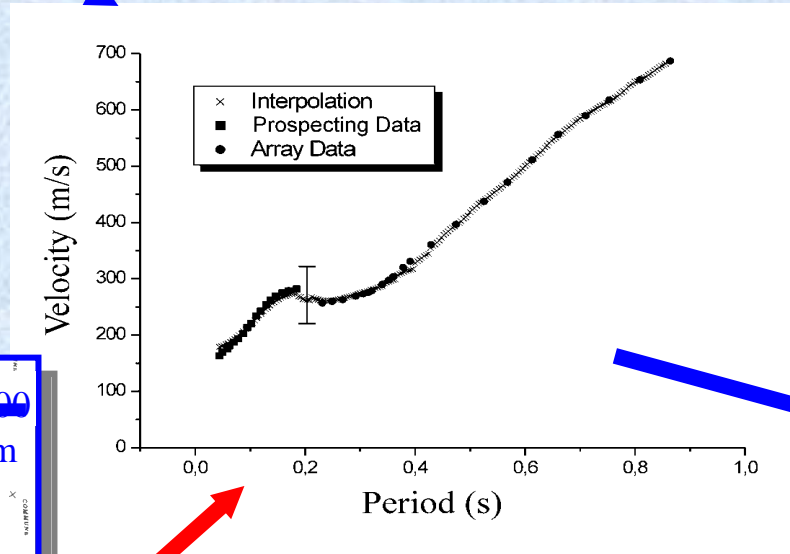
S-Wave velocity profile

Manip active SASW (source sismique)

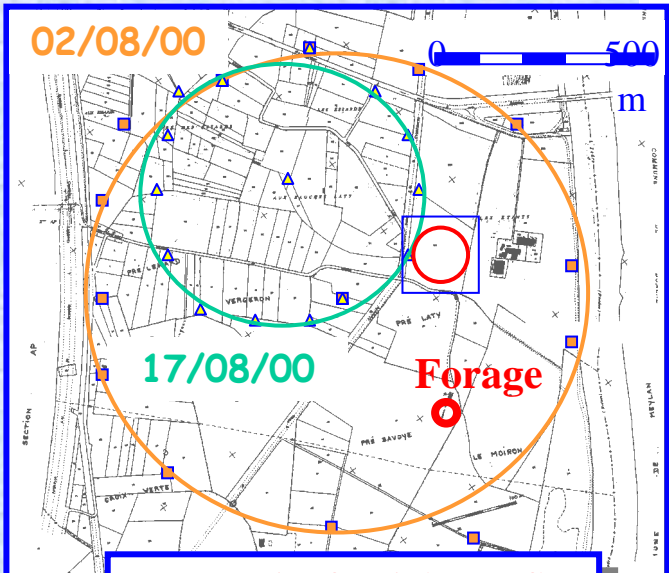
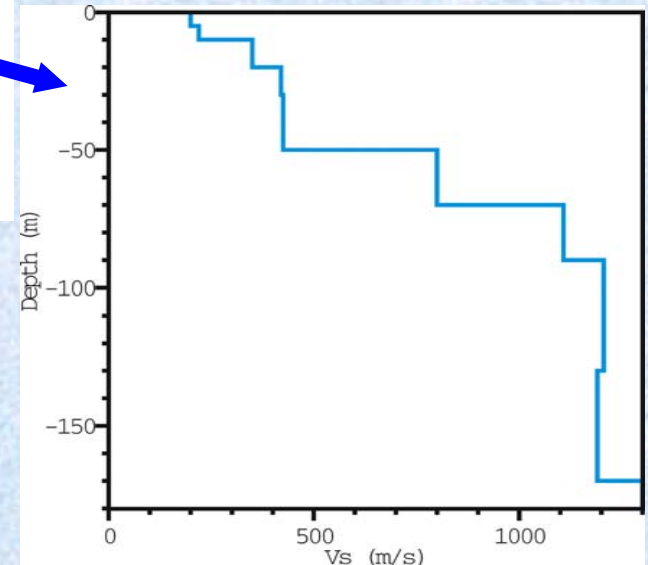


Principe similaire à la méthode SASW, avec sources différentes : **passives et inconnues**

Courbes de dispersion



Profil de vitesse



Bruit de fond (passif)

Mesures en réseau: commentaires

Intérêts majeurs

- Pas de source : utilisation possible en milieu urbain
- Profondeur de pénétration importante

Travaux en cours

- Standardisation / optimisation
 - Protocole expérimental
 - Traitement
 - Analyse
 - Couplage avec d'autres informations
 - Interprétations en profil de vitesse
 - Interprétations en fonction d'amplification
- Validation
 - Milieux non 1D (avec variations latérales)
 - Très basses fréquences

Questions en suspens

H/V

- ? H/V = Fonction de transfert du site (Nakamura)
- ? Robustesse des estimations de fréquence f_0
- ? L'amplitude A_0 a-t-elle une signification
- ? Cas des milieux 2D ou 3D
- ? Instrumentation requise
- ? Conditions expérimentales
- ? Standardisation du traitement

Réseau

- ? Capacités réelles
- ? Instrumentation optimale (géométrie)
- ? Logiciels d'inversion



Projet SESAME, 01/05/ 2001 - 31/10/2004

Site EffectS assessment using AMbient Excitations

<http://SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>

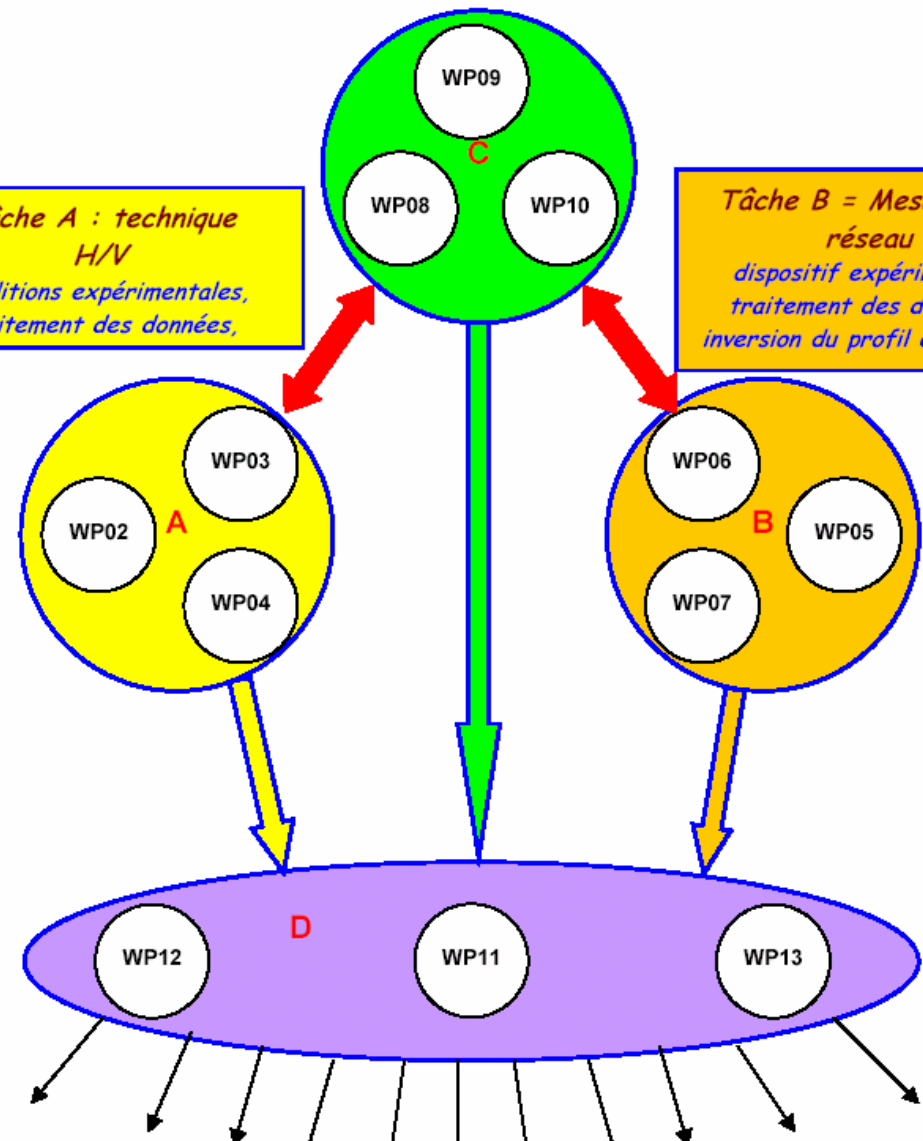


Schéma général

Tâche C: Physique du bruit et modélisation numérique

Tâche A : technique H/V
conditions expérimentales,
traitement des données,

Tâche B = Mesures en réseau
dispositif expérimental,
traitement des données,
inversion du profil de vitesse



Tâche D : Mise en oeuvre pratique et dissemination des résultats:
WP11 [Résultats scientifiques],
WP12 [Mode d'emploi de la technique H/V] ,
WP13 [Recommandations pour l'utilisation pratique des méthodes en réseau]

Technique H/V : points analysés

Aspects expérimentaux

Instruments et capteurs

Velocimètres, accéléromètres

Protocole expérimental

Couplage Sol-capteur

Météo...

Evaluation empirique

Comparaison systématique avec
fonctions de transfert
expérimentales

[Plus de 150 sites]

Comparaison directe avec
dommages

Aspects traitement de données

Algorithme de traitement

Choix des fenêtres, lissage, ...

Logiciel multi-plateforme

Module de traitement / interface
graphique / navigation

Evaluation numérique

Simulation numérique sur structures 2D
et 3D

Mesures en réseau synchrone

Problème 1 :

Obtention des courbes de dispersion des ondes de surface

Méthodes :

slant-stack (SL), F-k (FK), f-k haute résolution (HRFK), AutoCorrélation spatiale (SPAC), ...

Prise en compte des composantes Hz

Dispositif instrumental optimal

Problème 2 :

Inversion du profil de vitesse

Algorithme d'inversion

Classique, Génétique, Voisinage,

...

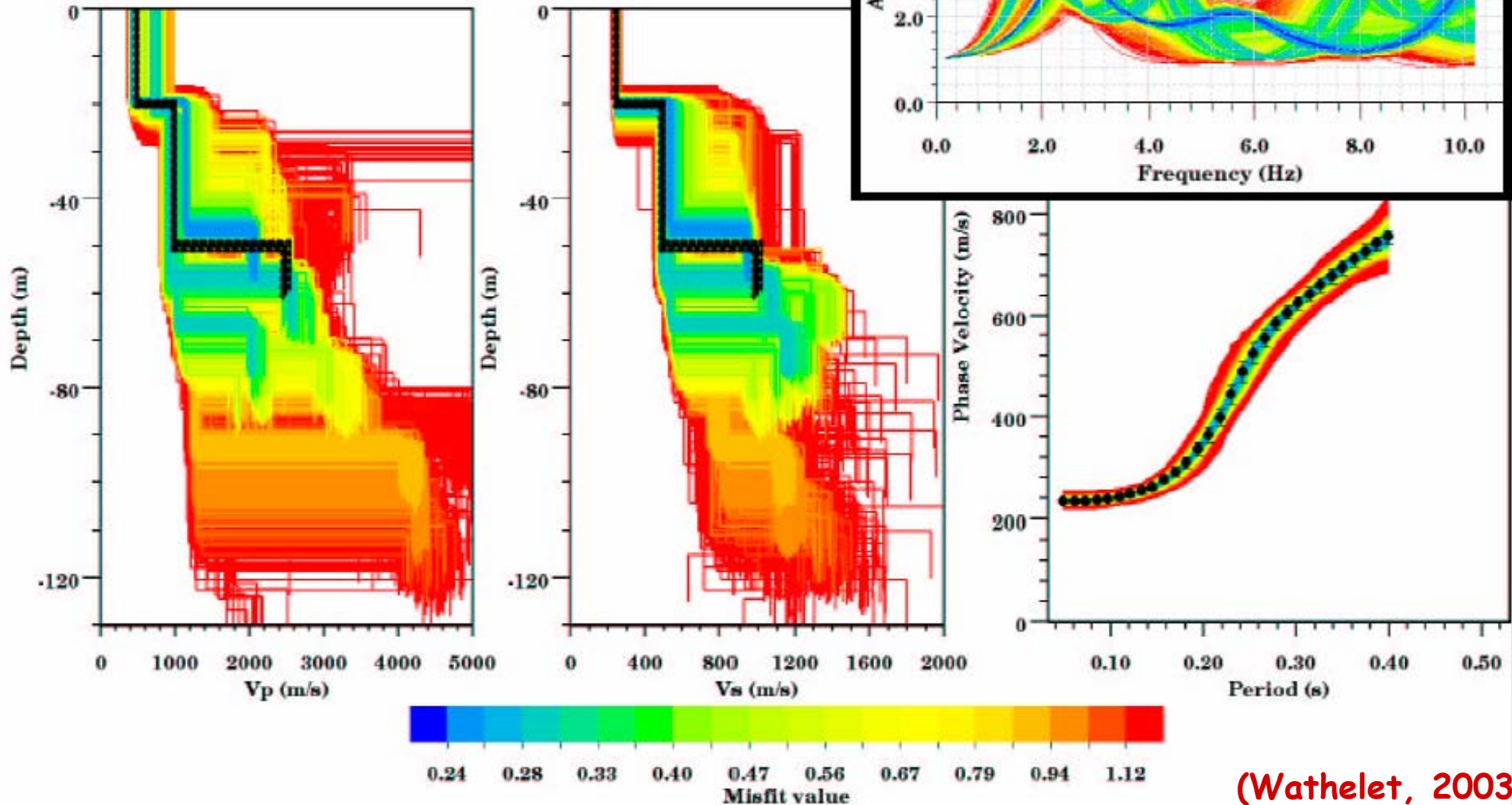
? Modes multiples ?

Prise en compte d'information a priori

Forage, Epaisseur, Géotechnique de surface, ...

Synthetic 3 layers

Results of the inversion for the sy



(Wathelet, 2003)

Tâche C : Physique du bruit et modélisation numérique

Aspects théoriques

Champ d'ondes

Proportion volume / surface

Proportion Love/ Rayleigh

Proportion fondamentale / modes supérieurs

Pic H/V : fréquence / amplitude

Simulation numérique du bruit de fond

Code 3D Différences Finies

Modèles "canoniques"

Sites réels

Tests numériques sur signaux synthétiques (simulés)

Sites réels : comparaison synthétiques / observations et inversion de al structure

Modèles canoniques : tests de H/V + techniques en réseau pour des structures 2D/3D

SESAME: Principaux résultats après 2.5 ans

H/V

Conseils sur l'instrumentation (pas d'accéléromètres !)

Recommandations sur le protocole expérimental

Logiciel multiplateforme gratuit (version finale été 2004)

Evaluation expérimentale

- Comparaison avec autres mesures "reconnues" : f_0 , A_0
- Comparaison avec dommages : OK lorsque séismes lointains et $f = 1-2$ Hz

Evaluation numérique

- Bonne mesure de f_0 si fort contraste, même en milieu 2D ou 3D
- Indications sur la nature du bruit

Réseaux

Logiciel "Ses_array"

- Multi méthodes f-k + SPAC
- inversion : algorithme de voisinage + améliorations conceptuelles

Résultats prometteurs sur

Sites réels (Grenoble, Liège, Bâle, Colfiorito, Volvi/Thessalonique, + Nice, Uccle)

Simulations numériques (1D - 3D)

Tous les livrables sur <http://SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>

+ 2 sessions spéciales : 13WCEE Vancouver / ESC Potsdam