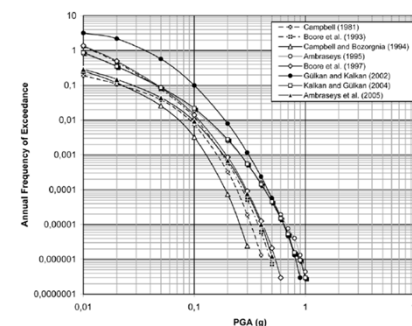
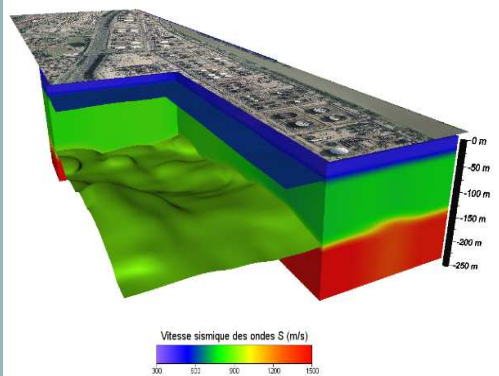


JOURNÉE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU CMFS

PRISE EN COMPTE DU JUSTE ALÉA SISMIQUE

LE 07 AVRIL 2022

Alexandre Tourette, Sébastien Reynaud



SOMMAIRE

- 01. NATURE DE L'ALÉA SISMIQUE ET EFFET DE SITE**
- 02. MESURES GÉOPHYSIQUES**
- 03. MODÉLISATION DE LA COLONNE DE SOL**
- 04. LES APPLICATIONS**

NATURE DE L'ALÉA SISMIQUE

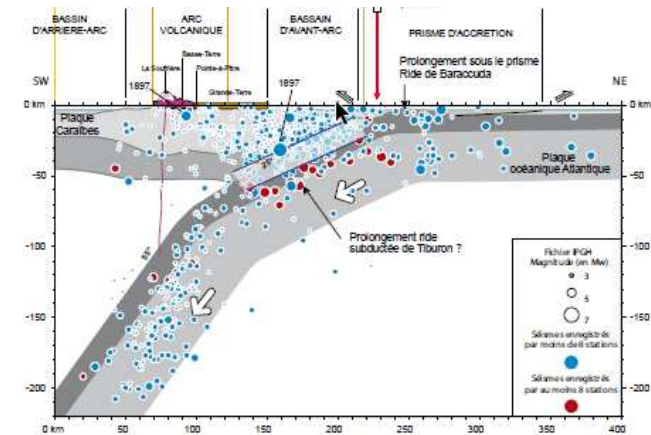
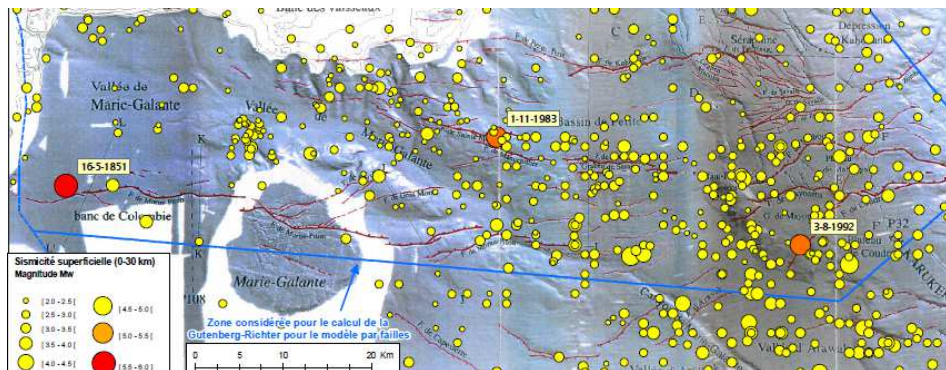
Deux approches

- **Approche déterministe** : le mouvement du sol est estimé à partir d'un **séisme de référence**, de caractéristiques connues. Définition de zones sismotectoniques homogènes et sélection des séismes les plus forts (les épicentres des séismes les plus importants de chaque zone sont déplacés à la position la plus pénalisante pour le site) -> aléa enveloppe
- **Analyse probabiliste de type PSHA** (Probabilistic Seismic Hazard Analysis) : évaluation de la probabilité de dépasser différents niveaux d'accélération du mouvement du sol sur une durée déterminée. L'ensemble des données permettant l'estimation de l'aléa est examinée dans un cadre statistique. L'aléa est alors exprimé comme **une probabilité de dépassement fixée sur une certaine période de temps**. L'approche probabiliste consiste à calculer en un point donné le niveau d'accélération du sol susceptible d'être atteint ou dépassé pour une période de temps donnée, en tenant compte de l'ensemble des données disponibles, historiques ou instrumentale, en y associant des lois de récurrence -> carte du zonage sismique révisée en 2010 applicable aux ouvrages à « risque normal » et aux ouvrages « à risque spécial » + SND

NATURE DE L'ALÉA SISMIQUE

Analyse probabiliste de type PSHA

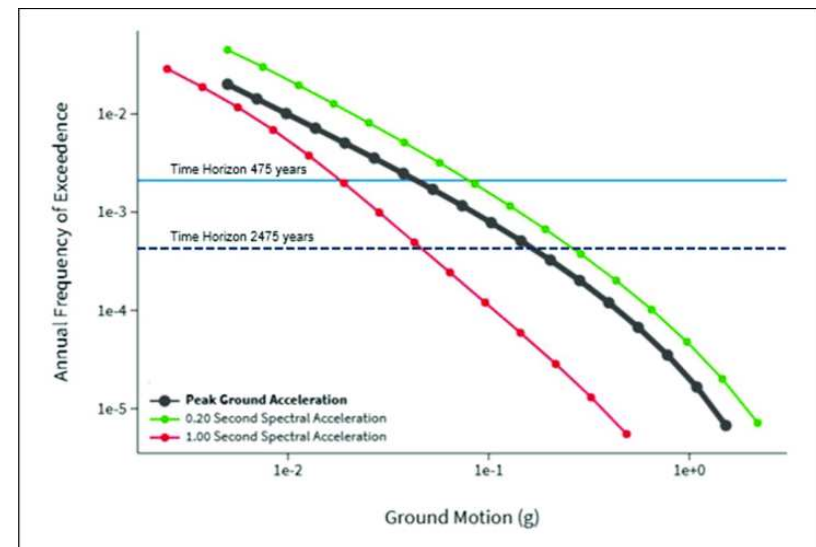
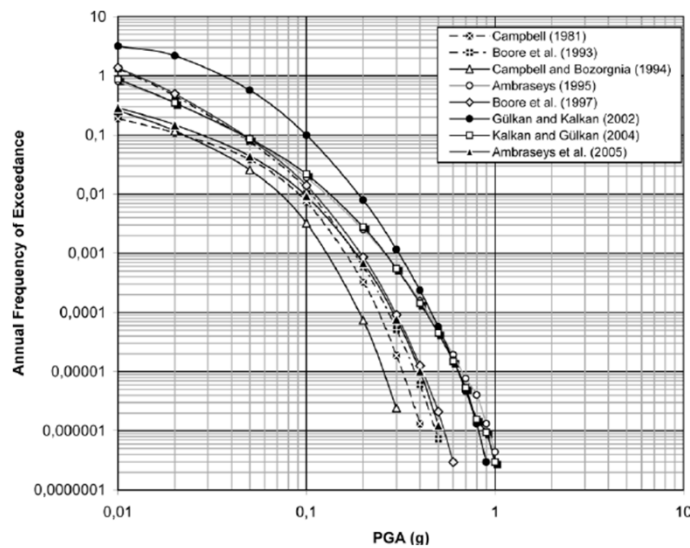
- Prise en compte des sources sismiques
- Prise en compte de la structure géologique au niveau régional (faille, zone à forte sismicité,...) -> zonages sismotectoniques



NATURE DE L'ALÉA SISMIQUE

Analyse probabiliste de type PSHA

- Etablissement de courbes d'aléas (gamme de PGA, pour une magnitude et pour une source)

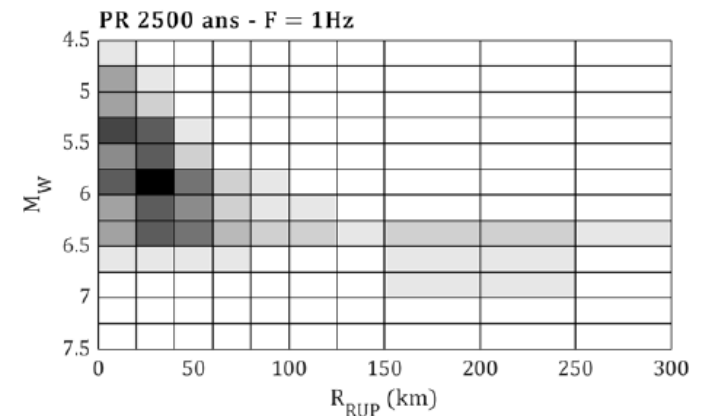
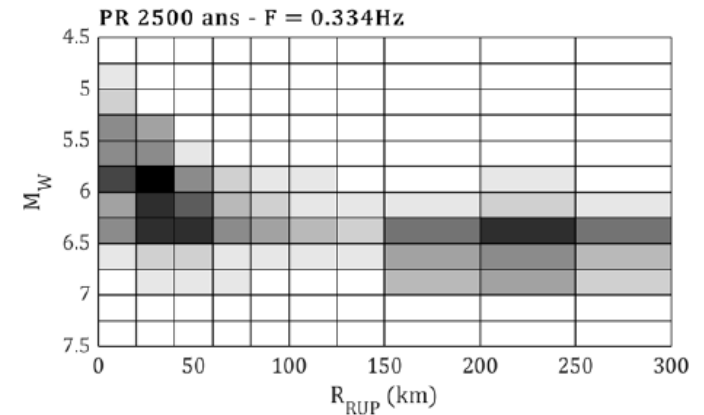


NATURE DE L'ALÉA SISMIQUE

Analyse probabiliste de type PSHA

- Traitement des incertitudes (positions des failles, mvts sismiques, etc.)
- Etude de désagrégation (cartes de Magnitude-Distance à différentes fréquences)

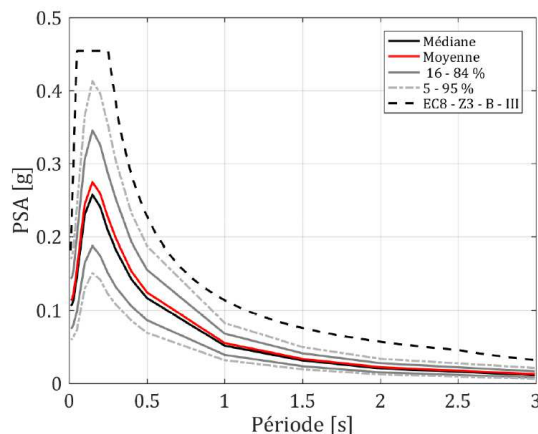
Les Guides méthodologiques : AIEA (No.SSG-9, Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations), MEDD (Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques), Guide AFPS n°44 (ICPE)



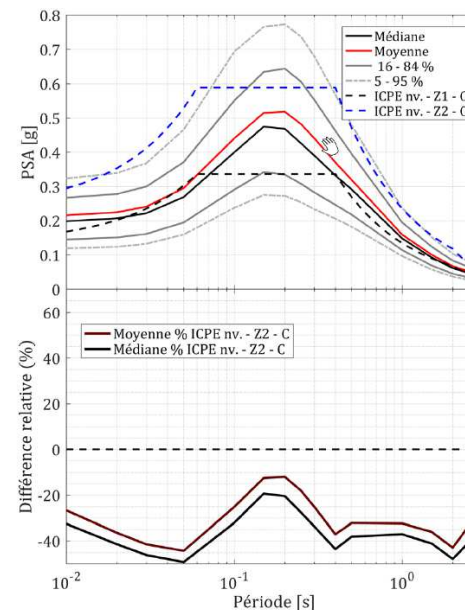
NATURE DE L'ALÉA SISMIQUE

Analyse probabiliste de type PSHA

L'étude probabiliste **conduit généralement à réduire l'aléa** par rapport à l'aléa forfaitaire (on peut atteindre des réductions du pga pouvant atteindre 25 à 40%), ce qui est une piste d'optimisation, mais cette démarche doit faire l'objet de l'accord du Maître d'ouvrage et de son instance de contrôle.



Haut-Rhin : -35% au PGA et -40% au plateau



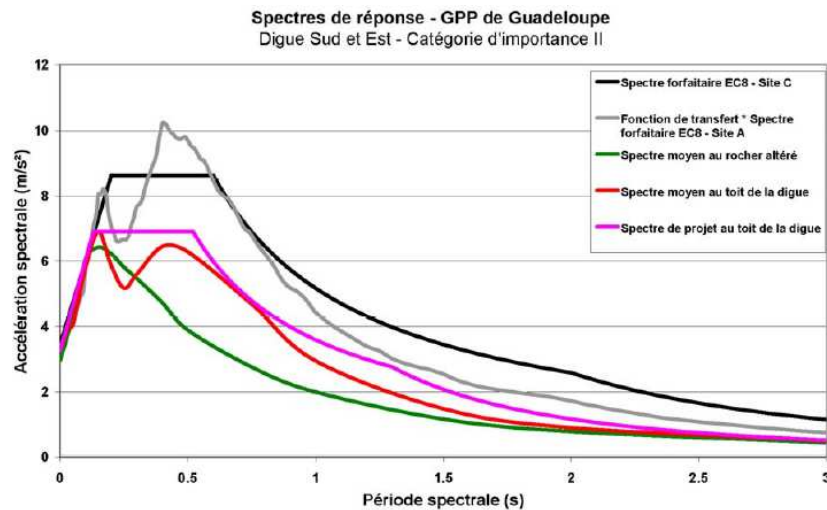
Port La Nouvelle :

- 27% au PGA

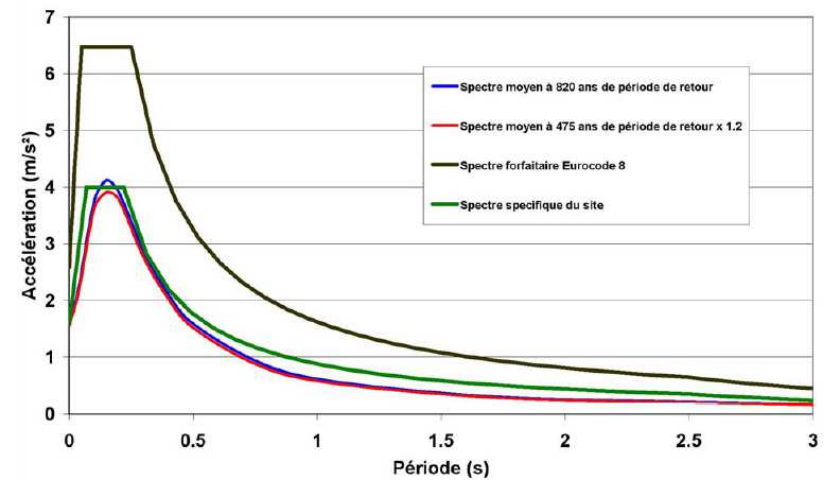
-20% au plateau

NATURE DE L'ALÉA SISMIQUE

Analyse probabiliste de type PSHA



Port de Guadeloupe (zone 5, site C, cat.II) :
-1% au PGA et -32% au plateau



Nice (zone 4, site B, cat.III) :
-40% au PGA et -38% au plateau

EVALUATION DE L'EFFET DE SITE

Deux méthodes

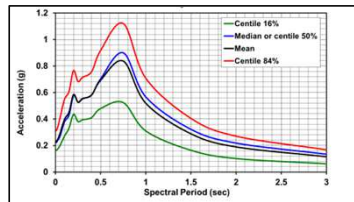
■ Pour la méthode forfaitaire/déterministe :

- Choix du paramètre de sol S selon EC8 et les arrêtés : $V_{s,30}$ et $V_{s,800}$ à venir avec la maj de l'EC8
- Modéliser la colonne de sol à partir du spectre forfaitaire au rocher site A

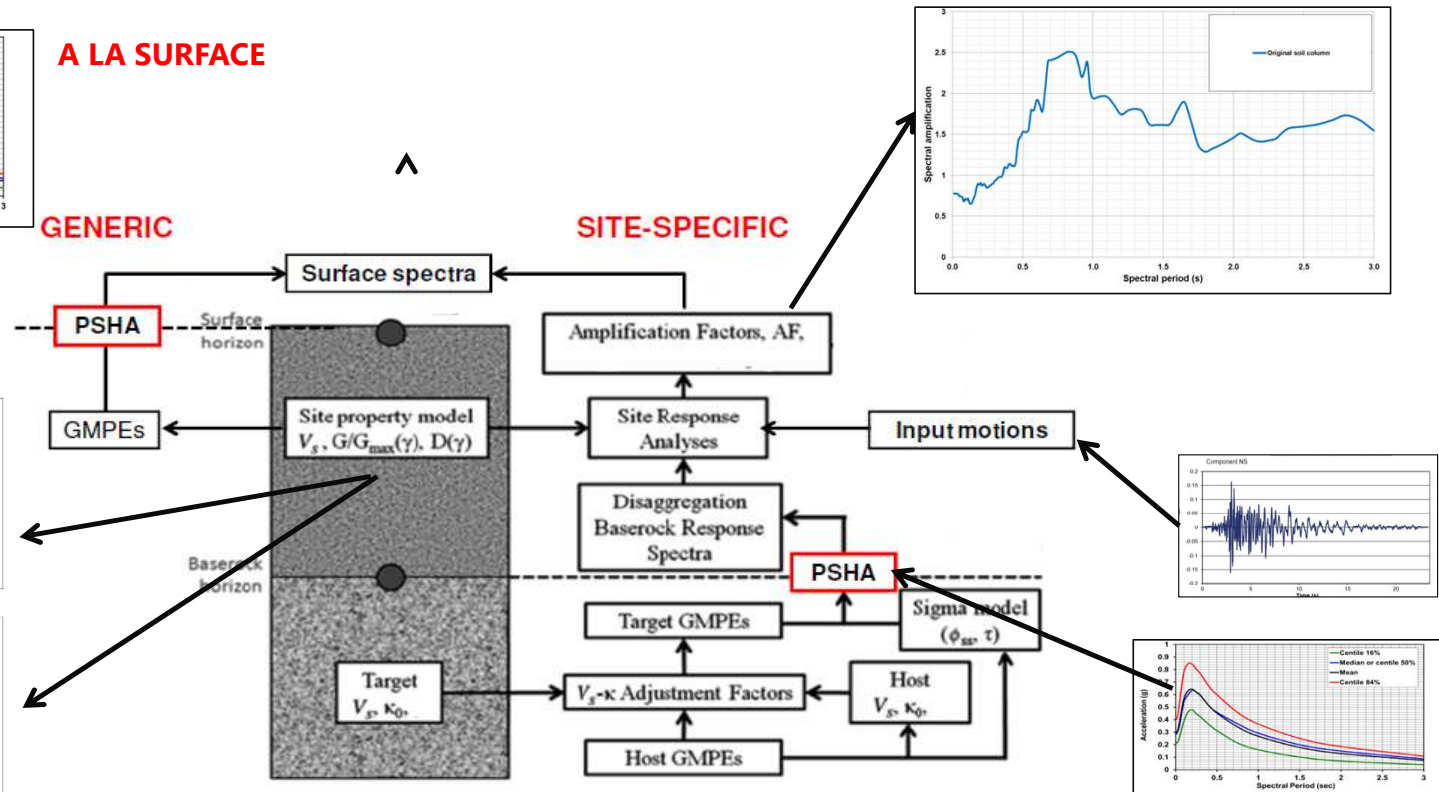
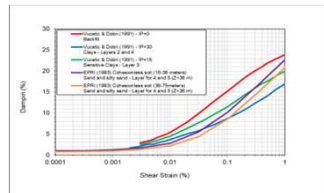
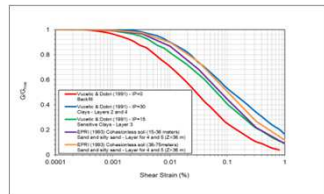
■ Pour la méthode probabiliste :

- prise en compte de l'effet de site au travers d'une loi d'atténuation si $V_s > 250-300$ m/s
- Dans le cas contraire, modélisation de la colonne de sol à partir de l'aléa au rocher en surface

EVALUATION DE L'EFFET DE SITE



A LA SURFACE

**AU ROCHER**

MODÉLISATION DE LA COLONNE DE SOL

Le Modèle Géomécanique

- **Une lithologie précise** (par des essais mécaniques et géophysiques)
- **Le profil des ondes de cisaillement Vs** (profil de $G_{\max}$) :
 - Faire ressortir les forts contrastes de rigidité (rôle important dans le comportement dynamique du sol)
 - Des investigations suffisamment profondes
 - Caractérisation des couches rocheuses ou semi-rocheuses et leur état d'altération (peuvent présenter de faible contraste par rapport aux couches superficielles)
 - Recherche du niveau Vs > 800 m/s (futur maj des EC8)
- **Choix des lois de comportement du sol** (données bibliographiques, base de données ou essais en laboratoire) : Seed, Rollins, Vucetic&Dobry, Menq,...

MODÉLISATION DE LA COLONNE DE SOL

Le Modèle Géomécanique

Il existe plusieurs moyens d'investigations :

- Méthodes intrusives :
 - Sondages mécaniques (carottés, essais in situ)
 - Essais cross-hole et down-hole
- Méthodes non intrusives : méthodes géophysiques des ondes de surface
 - Méthode active : MASW
 - Méthode H/V (méthode passive analyse des vibrations sur un seul capteur)
 - Méthode passive : Sismique passive
- Essais en laboratoire : essai triaxial cyclique (ASTM D5311) ; essai à la colonne résonnante
- Expertise/contrôle du module $G_{\max}$ à partir de corrélations (à partir des essais in situ, $\sigma_{moyenne}$)

CARACTÉRISATION DES VITESSES V_s PAR MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Cross-hole

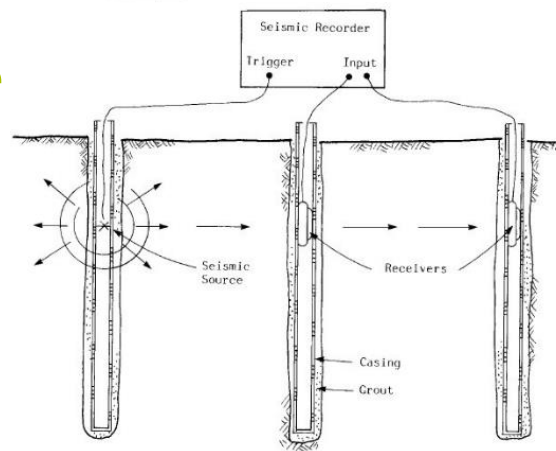
Mesures directes en forage

Difficulté : identification des ondes P et S

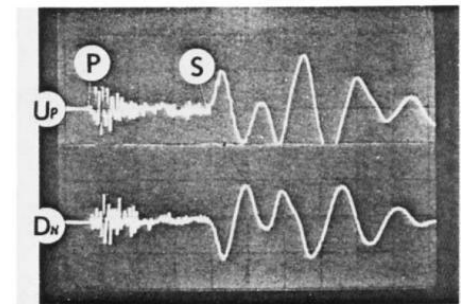
- Polarisation de l'onde S
- Utilisation des 3 forages

Limitation :

- Réalisation de forages
- Investigation limitée à la profondeur des forages



Principe du Cross-hole (Norme ASTM 4428)



Autres méthodes à partir d'un seul forage

- carottage sismique : Down-hole, up-hole

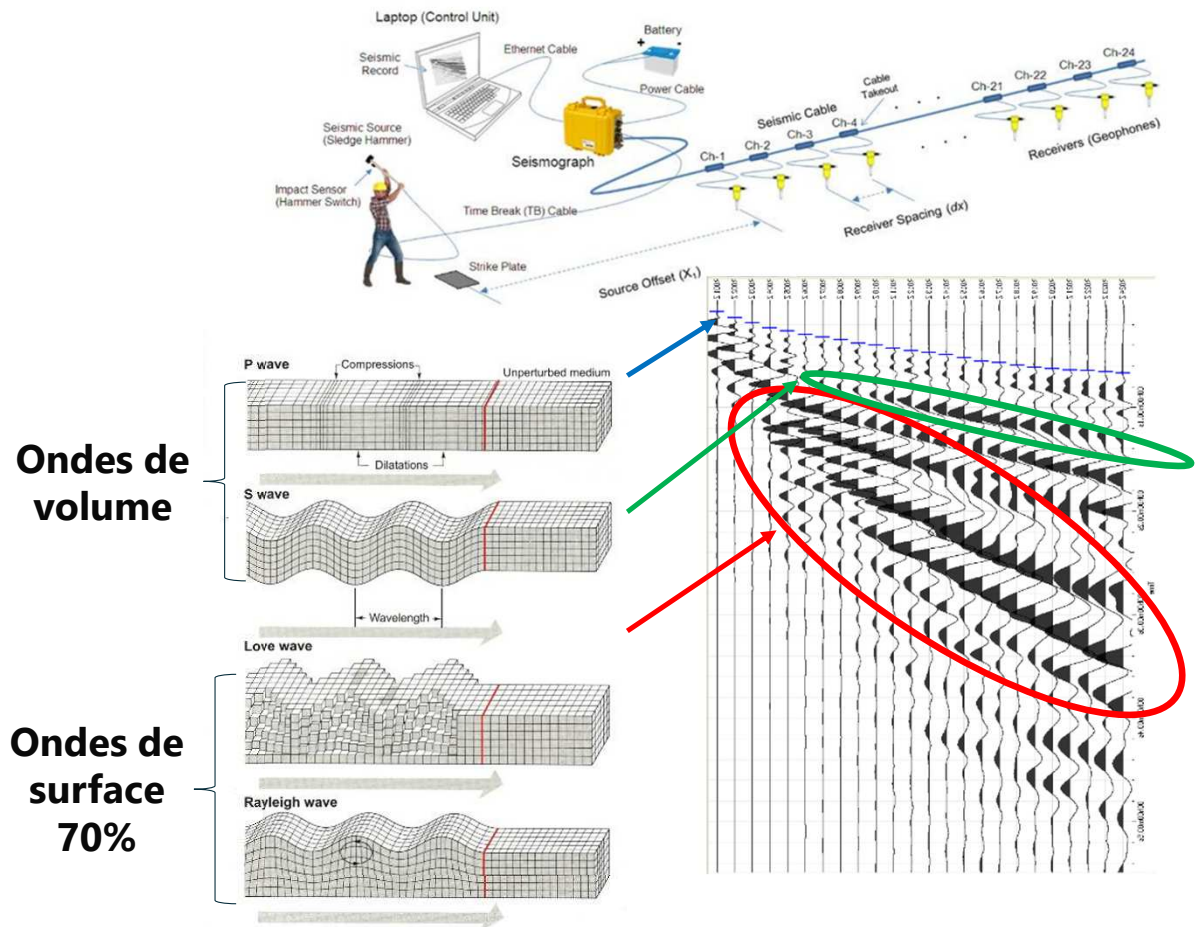
Evolution

CARACTÉRISATION DES VS PAR MÉTHODES GÉOPHYSIQUES



Mesures indirectes depuis la surface

Exploitation des ondes de surface

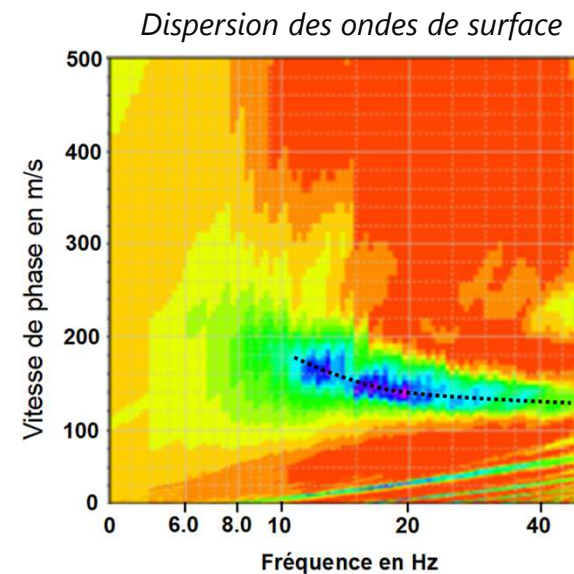
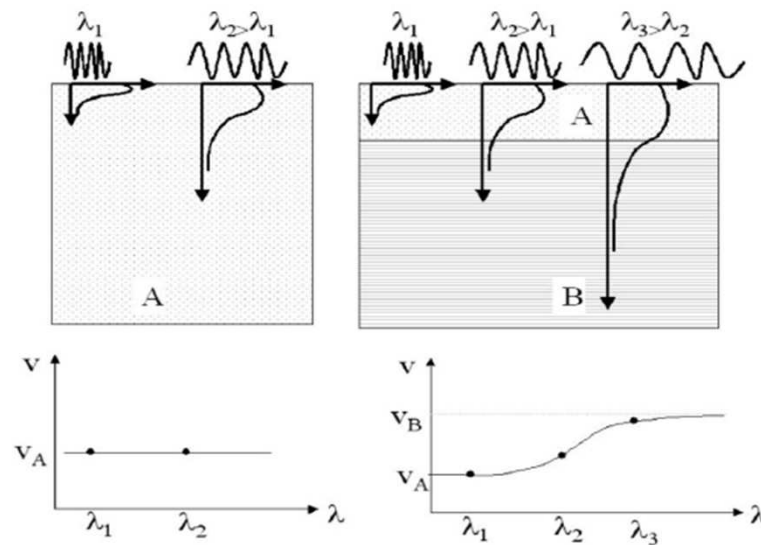


CARACTÉRISATION DES VS PAR MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Exploitation d'ondes de surface

Profondeur de pénétration fonction de la longueur d'onde ($\lambda = V/f$)

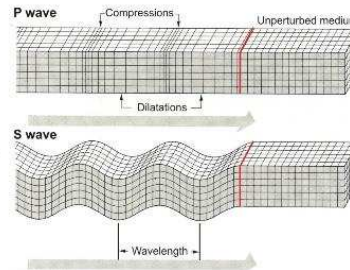
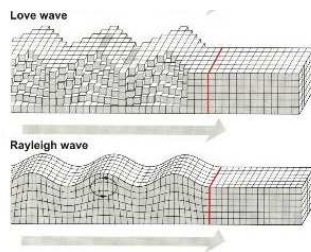
- Petites longueurs d'onde (hautes fréquences) → zones superficielles
- Grandes longueurs d'onde (basses fréquences) → zones plus profondes



Evolution

CARACTÉRISATION DES VS PAR MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

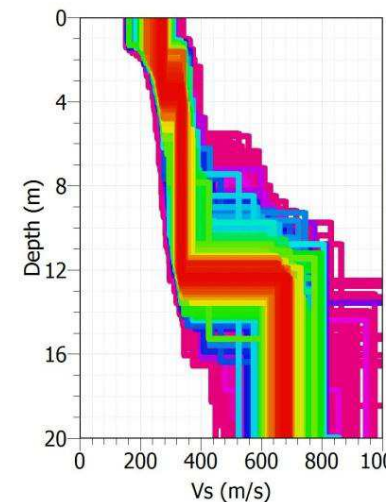
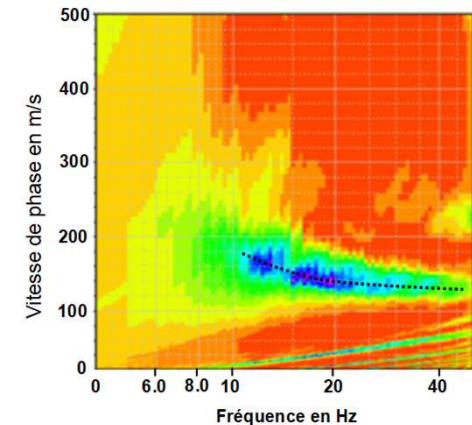
Exploitation d'ondes de surface



- Processus d'inversion numérique qui consiste à chercher un modèle de Vs qui explique les courbes de dispersion des ondes de surface
- Algorithme de Monte-Carlo qui consiste à balayer un ensemble de modèle et ainsi limite le risque d'une solution vers un minimum local

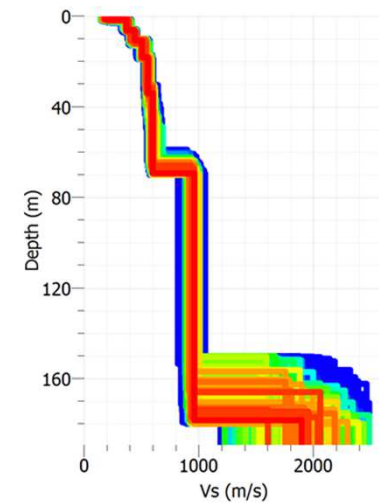
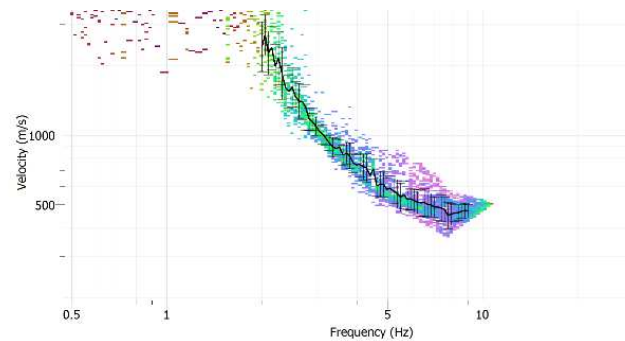
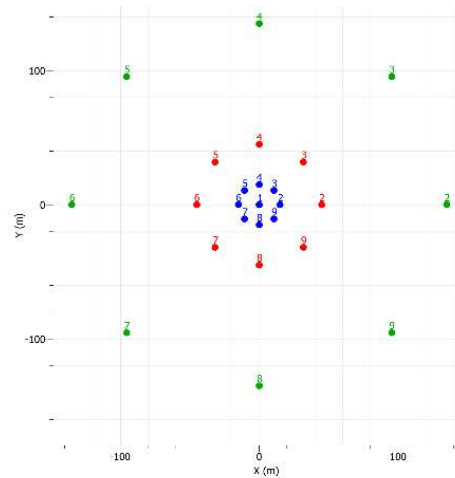
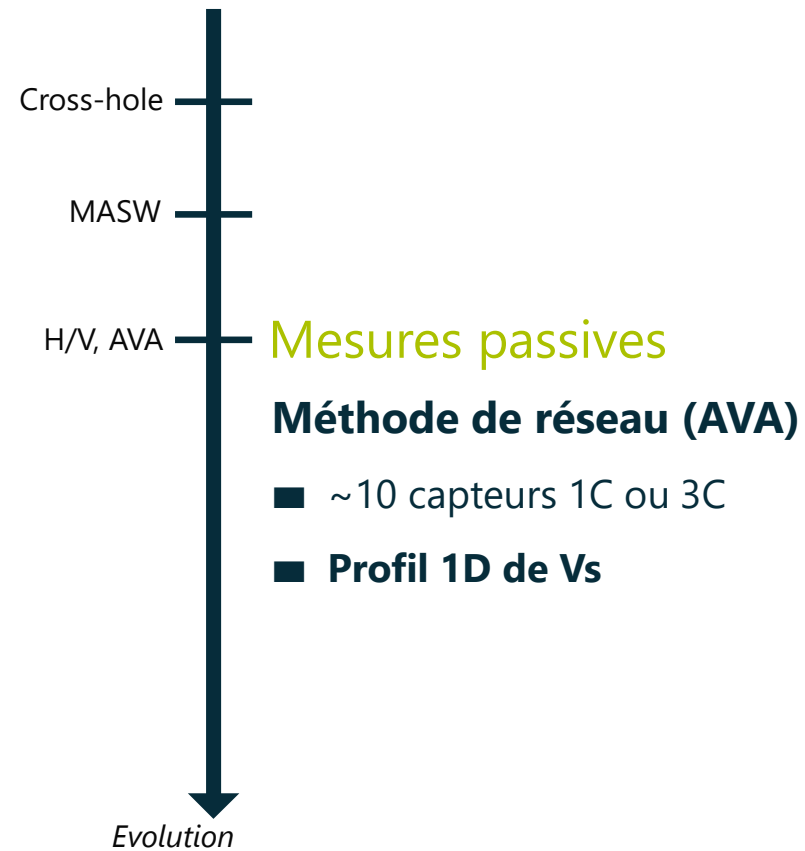
Limitation

- Profondeur d'investigation limitée à 20-30 mètres

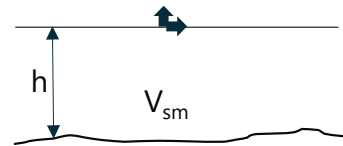
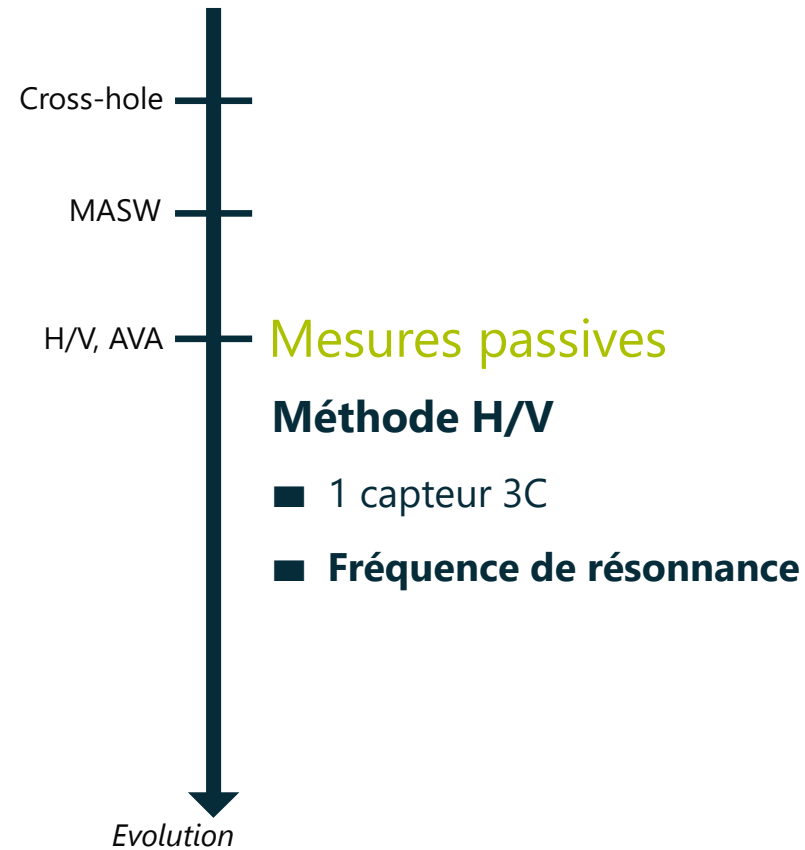


Evolution

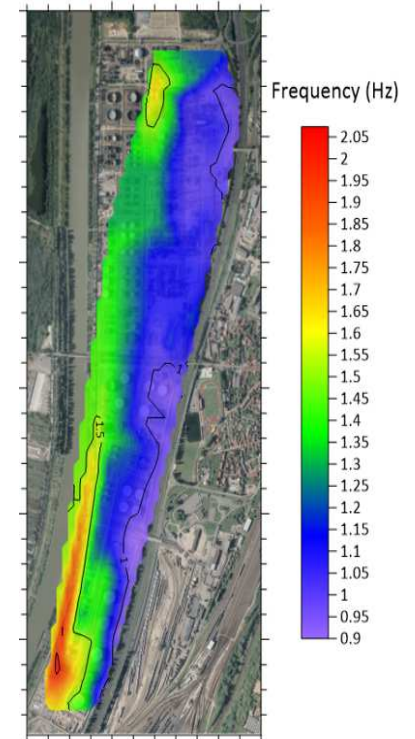
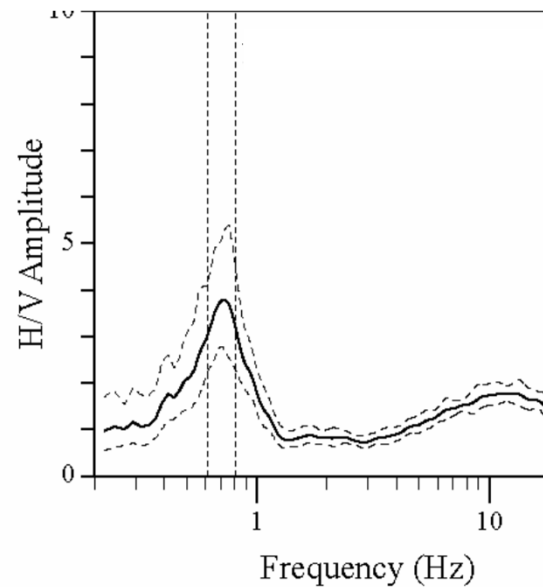
CARACTÉRISATION DES VS PAR MÉTHODES GÉOPHYSIQUES



CARACTÉRISATION DES VS PAR MÉTHODES GÉOPHYSIQUES



$$f_{H/V} \approx f_0 = \frac{V_{sm}}{4h}$$



CARACTÉRISATION DES VS PAR MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Grâce au bond technologique des 10 dernières années

- au développement de nouveau capteur autonome
- à l'augmentation de la puissance de calcul



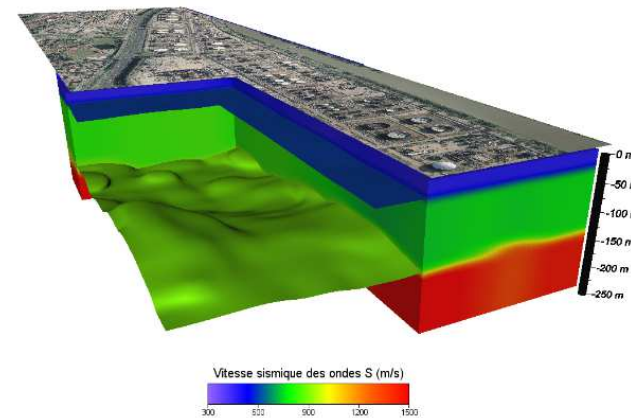
Capteur 3 composantes autonome avec enregistreur intégré

- Autonomie de 50 j
- GPS intégré
- Grande sensibilité
- Large bande
- Poids : 1 kg

Mesures passives

Méthode par corrélation (ANSWT)

- +100 capteurs 1C ou 3C
- Modèle 3D de Vs

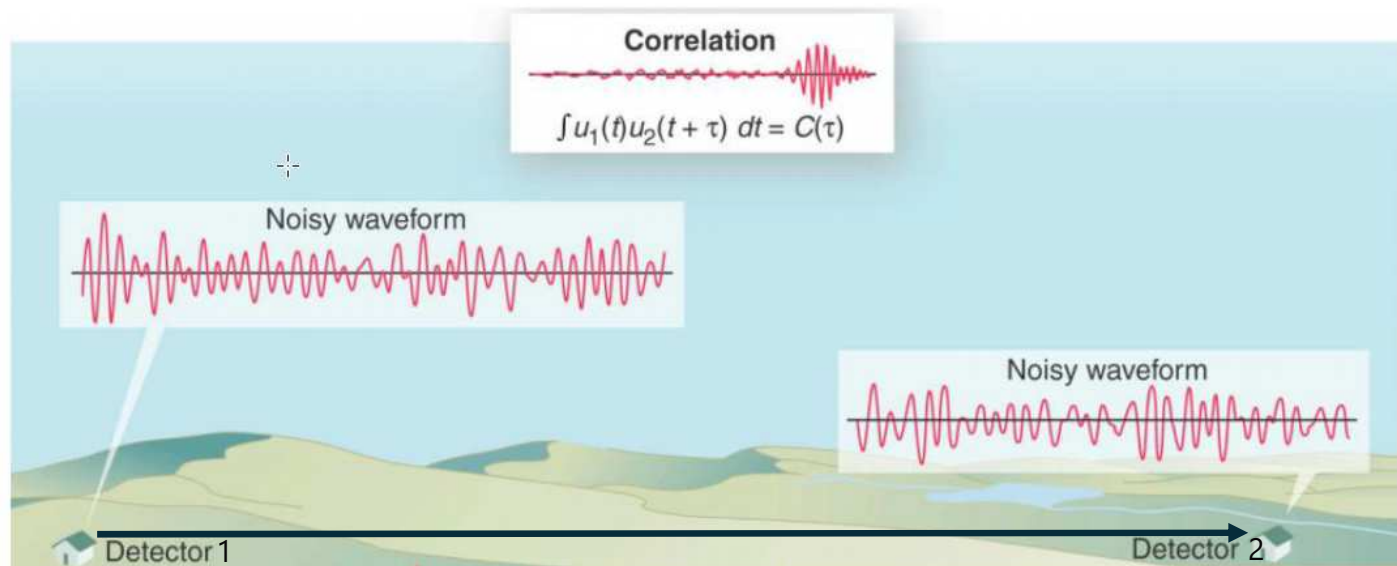


Evolution



CARACTÉRISATION DES VS PAR MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Comment ça marche ?



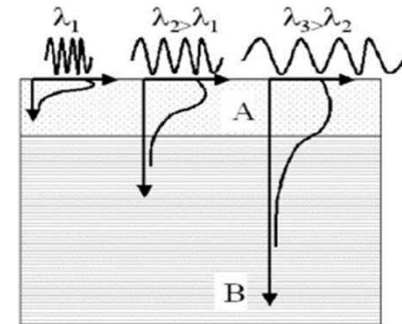
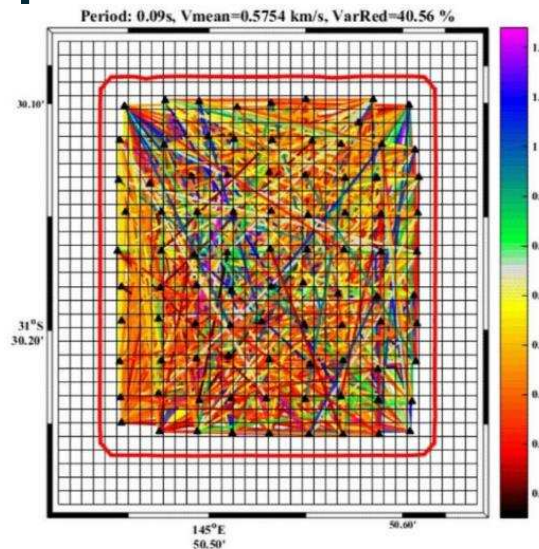
- On mesure le temps que met le le bruit sismique pour aller d'un capteur à l'autre
- L'opération de corrélation permet de déterminer ce temps avec une grande précision
- L'opération de corrélation par paire de capteurs permet de transformer chaque capteur en source virtuelle

Evolution

CARACTÉRISATION DES VS PAR MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Réseau de capteurs :

Chaque capteur devient une source pour tous les autres
($N.(N-1))/2$ couples de capteurs



- 100 capteurs = 4950 couples
- 200 capteurs = 19900 couples
- Traitement par fréquence,
- Traitement par type d'onde (Rayleigh / Love)
- Modèle de vitesse 3D des ondes de surface
- Modèle de vitesse 3D des ondes de cisaillement (Vs)

Evolution

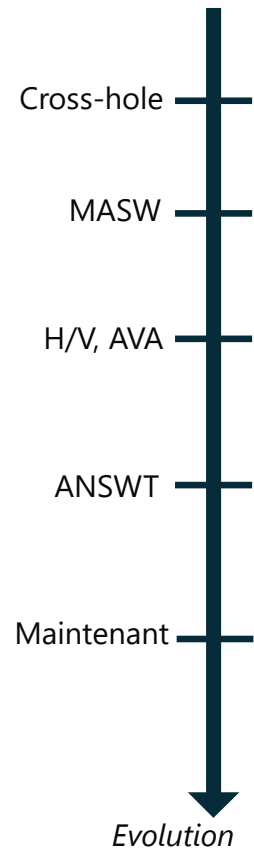
CARACTÉRISATION DES VS PAR MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Conclusion – Perspectives

- Le cross-hole reste incontournable si l'on souhaite avoir une bonne résolution des Vs dans les 30 premiers mètres.
- Pour un calcul de Vs30, la méthode MASW couplée à un down-hole peut être suffisant.
- Pour une caractérisation plus profonde, les méthodes passives sont indispensables, possibilité de coupler MASW et AVA.
- Pour obtenir un modèle 3D jusqu'à grande profondeur, les méthodes passives par corrélation (ANSWT) sont les plus adaptées.
- Pour les méthodes reposant sur l'exploitation des ondes de surface, il est important de travailler en 3 composantes pour analyser la dispersion des ondes de Rayleigh et de Love conjointement pour un résultat plus précis.

**Méthode
forfaitaire
Vs30**

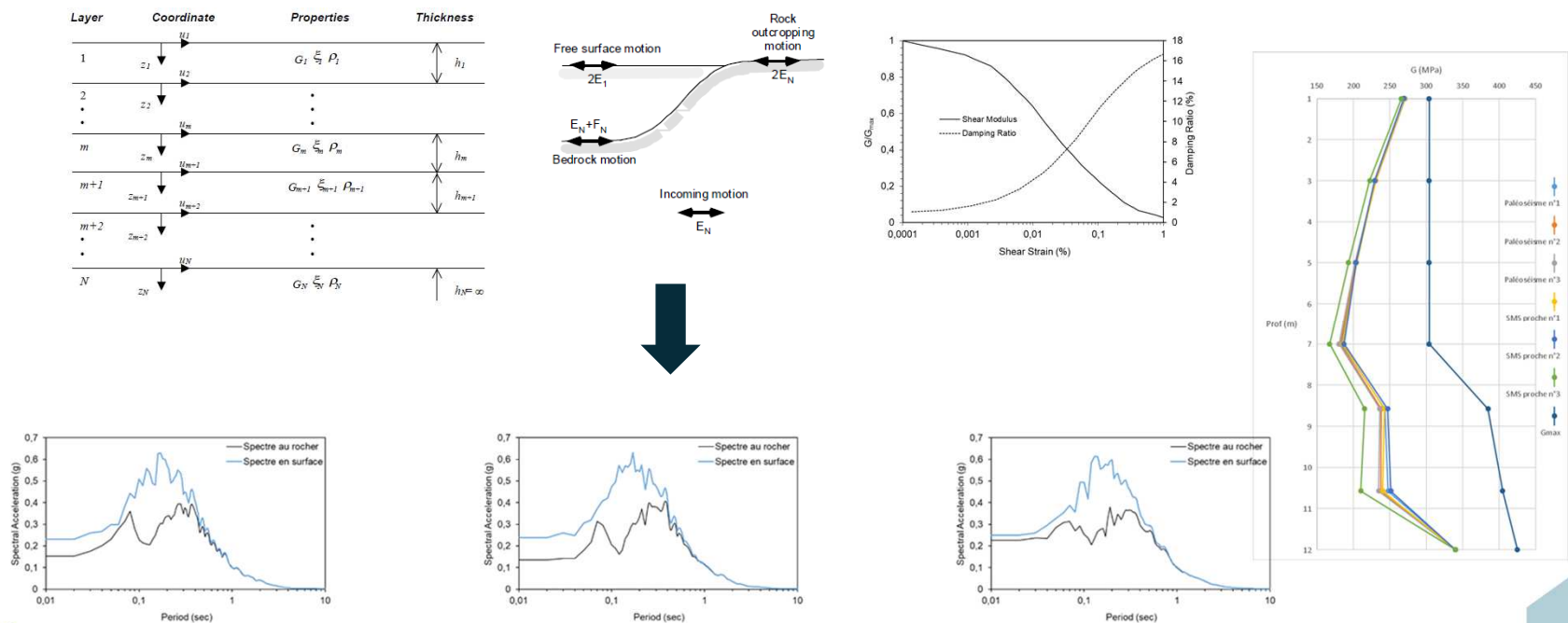
**Méthode
probabiliste
+ Vs800**



MODÉLISATION DE LA COLONNE DE SOL

Evaluation du signal en surface à partir d'un signal au rocher

- **Les Outils** : Modélisation 1D (EERA, SHAKE 2000,...) ou 2D (modèle numérique, ASTER, FLAC, ZSoil,...)



MODÉLISATION DE LA COLONNE DE SOL

Choix des accélérogrammes

- Il est important de sélectionner des accélérogrammes pour des **conditions sismologiques** (sources sismiques, Mw-Distance) et **géotechniques similaires** (Vs30, ép.sédiments,...)
- Les autres paramètres (« **critères de nocivité** » selon guide ASN) sont :
 - La vitesse maximale, Cumulative Absolute Velocity (mesure de l'intensité du mouvement du sol lié aux dommages potentiels : $CAV = \int_0^{t_{max}} |a(t)| dt$)
 - l'Intensité d'Arias et durée de la phase de forte (5-75% ou 5-95%) $I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} a(t)^2 dt \text{ (m/s)}$
 - La forme spectrale, etc.
- On privilégie les **accélérogrammes naturels** issus de BDD Européennes (RAP, RESORCE, ESM) et Mondiales (PEER) surtout pour des modélisations couplées temporelles non-linéaires : les accélérogrammes artificiels génèrent trop de cycles de mouvement fort et des déplacements pas toujours réalistes.

MODÉLISATION DE LA COLONNE DE SOL

Evaluation du signal en surface à partir d'un signal au rocher

- Effet de la **non-linéarité du sol** avec un spectre forfaitaire, notamment dans le cas des mouvements forts (guides ASN et RCC-CW) :
 - Nécessité de contrôler un certain nombre de critères : taux de distorsion maximale, acceptabilité du spectre en profondeur après déconvolution et en surface après reconvolution,
 - Ajustement possible par réduction du signal sismique à la déconvolution, usage d'une fréquence de coupure.
 - En cas de non-linéarité avérée, pénalisation des distorsions (ce qui conduit à une colonne de sol spécifique) et contrôle par des calculs non-linéaires

Modélisation non-linéaire couplée temporelle



REMERCIEMENTS



CONTACTS

www.egis.fr



Alexandre Tourette

EGIS – alexandre.tourette@egis.fr

Sébastien REYNAUD

EGIS – sebastien.reynaud@egis.fr

