MAITRISER LES VIBRATIONS ENVIRONNEMENTALES (VIBREN, 2014-2017)

Luca Lenti, Jean-Jacques Leblond

Plan

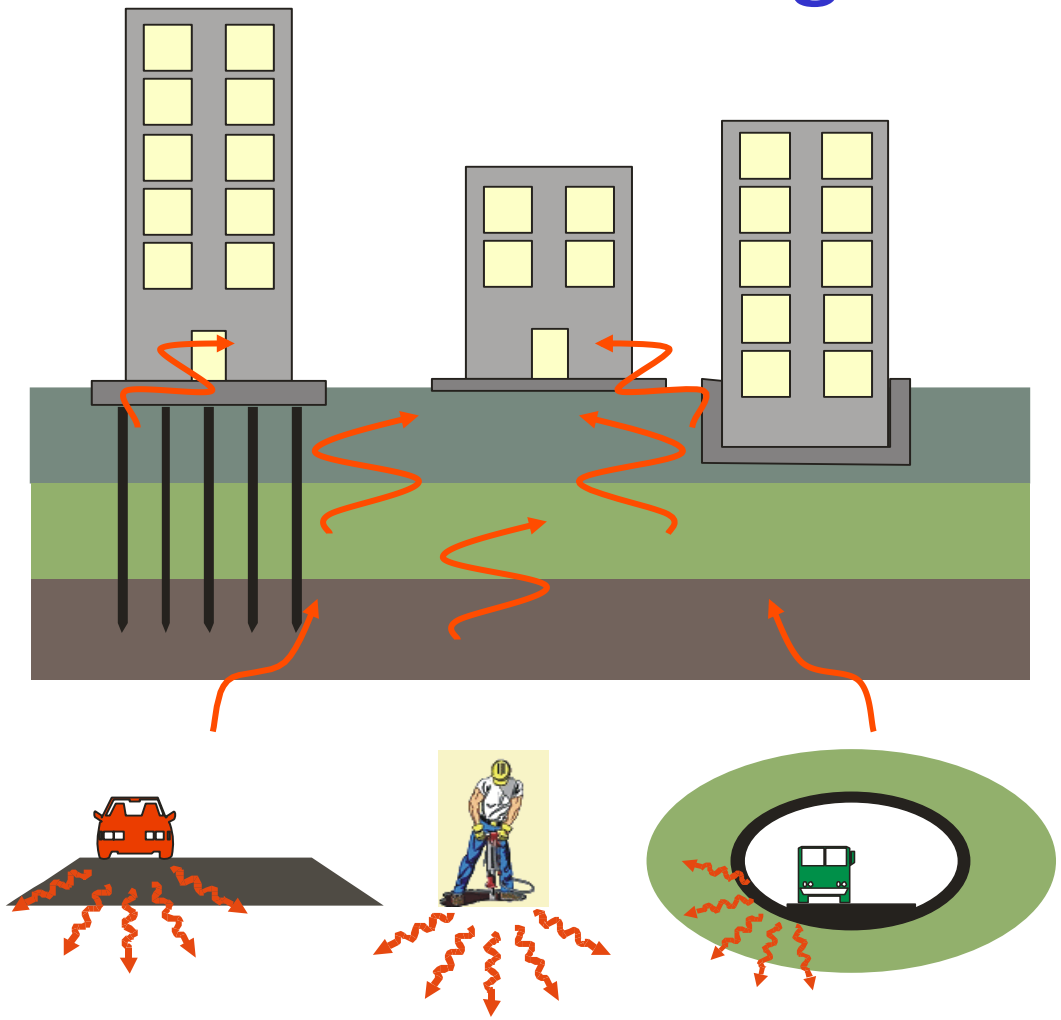
- Contexte
  - La problématique
  - les sources
  - les effets, les enjeux
  - les perspectives
- Thèmes de recherche et qques expériences
- « Maitriser les vibrations environnementales»
  - **Axe A : Connaissance des sources**
  - **Axe B : Méthodes de mesure et traitement de données**
  - **Axe C : Modélisation numérique et physique**
  - **Axe D : Méthodes d'atténuation**
  - **Axe E : Effets des vibrations sur les structures et le vivant**

De la source à la gêne

Vibrations des bâtiments

Propagation dans le sol

Caractérisation des sources



gêne, dommages, transmission, isolation…

amplification, atténuation, ondes surface, mesure…

amplitude, fréquence, directivité…

Contexte : sources

- Des activités à l'origine de vibrations…
  - Transports terrestres (fer et route)
  - Chantiers: démolition, construction, rénovation (engins, travaux…)
  - Activités industrielles
  - Activités humaines et équipements de bâtiment

Contexte : effets

…qui engendrent 3 types d'effets

Effets sur les personnes et/ou la productivité	Effets sur les matériels sensibles	Effets sur les bâtiments
• Gêne • Inconfort • Effets sur la santé (sommeil, stress…) • Effets sur les animaux et la procuctivité	• Des vibrations de faible amplitude peuvent altérer le fonctionnement de : → appareils de mesure → équipements médicaux…	• Dommages aux structures • Dégradation du second oeuvre, fissuration • Fatigue

Contexte : les enjeux

- Création de LGV
- Développement du fret ferroviaire (variabilité des signaux, atténuation)
- Création d'autoroutes ferroviaires (réponse des sols aux sources linéaires, onde de Rayleigh et grandes vitesses)
- Développement des transports urbains (tram, métro, gêne des riverains)
- Chantiers de la rénovation des bâtiments (prédiction d'impact, de risque)

Contexte : les perspectives

- Quels critères d'évaluation ? Quelles conditions de mesures ? Quels matériels utiliser ?
- Développer les connaissances et des outils et lancer les bases d'une réglementation plus homogène
- Capitaliser les savoirs et les expériences pou une amélioration du cadre normatif et la pondération des ses limites
- Acceptabilité des vibrations et définition des indicateurs

Contexte : produits

- Publications : articles, actes…
- Module MCCI (loi de sol pour le comportement cyclique)
- Code éléments de frontière rapide (COFFEE)
- Test comparatifs isolation vibratoire (RATP, CSTB)
- Rapports de recherche
- Code non-linéaire « 1D-3C » (SWAP-3C)

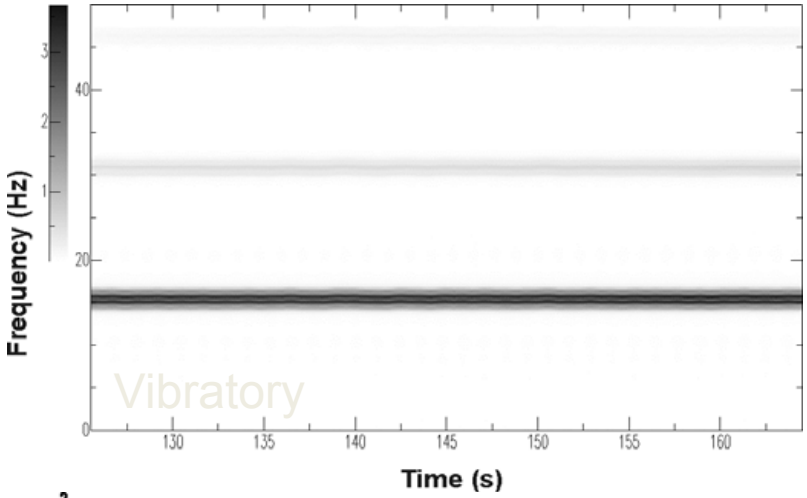
Contexte : thèmes de recherche

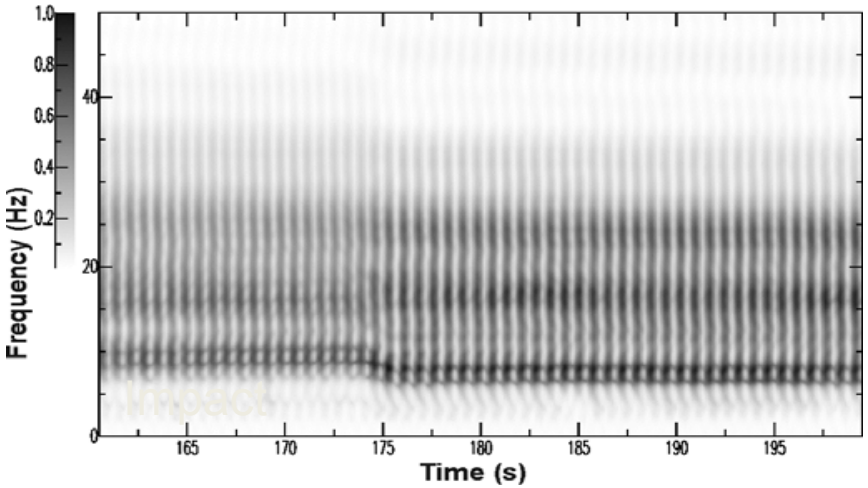
- **Sources** :
  - Sources vibrationnelles réelles (impulsives, continues, TGV, battage, etc.)
  - Paramètres pertinents des sources réelles (temporaires et fréquentielles)
  - Représentabilité des sources de substitution (compacteurs, chute de blocs, portancemètres, etc.), champs proche et loin
  - Comparaison entre différentes mesures (prises avec différentes instruments)
- **Propagation et atténuation** :
  - Définition de catégories de référence pour les sols
  - Choix de lois de comportement pour les sols
  - Détermination des fonctions d'atténuation (vitesse, déplacement ou accélération)
- **Transfert aux bâtiments :**
  - Amplification fondation/étages selon typologie de bâtiment et/ou structure
  - Interaction sol structure
- **Définitions des valeurs limites/indicateurs :**
  - Base des données plus importante relative aux dommages ou à la gêne (corrélations significatives entre les dégâts/gêne et valeurs vibrat. >> valeurs limites.

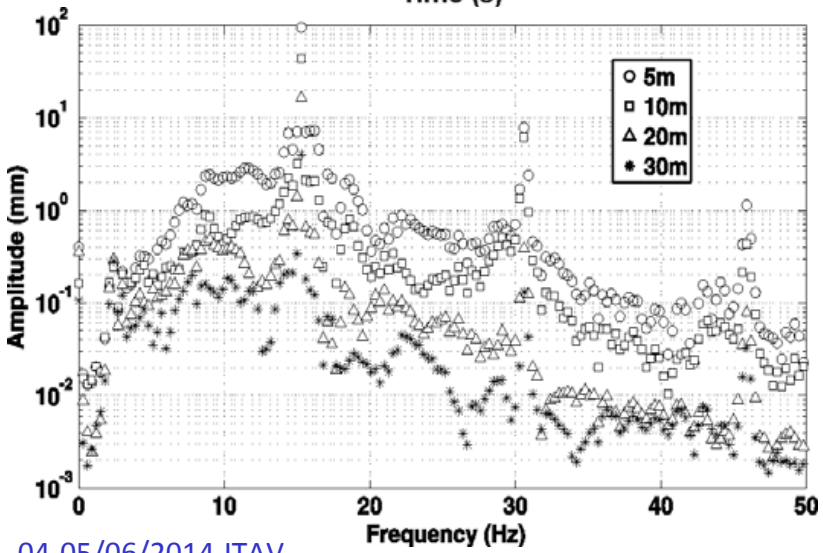
Ex 1: les sources

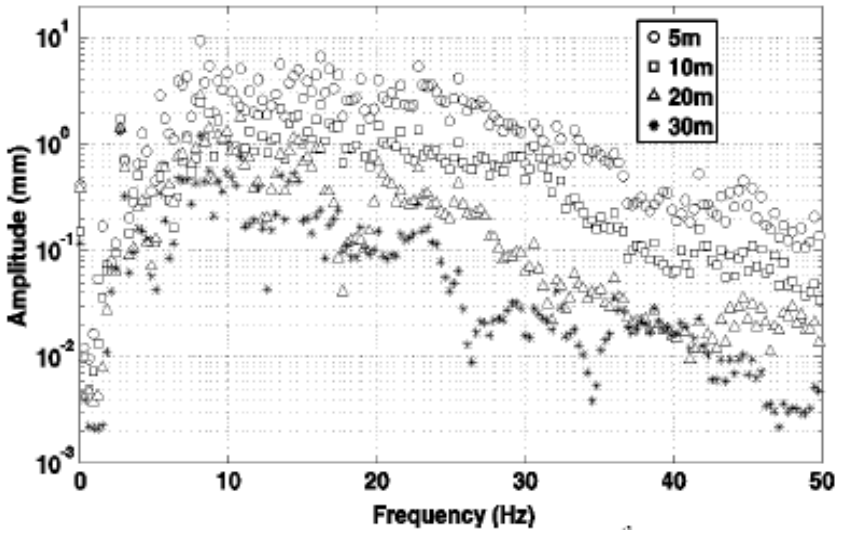
Catalogues des enregistrements en formation: mesures disponibles dans le reseau nationale + mesures en projet pour son alimentation future.
Variété des mesures, hétérogénéité des informations et des formats des données.

Ex 1: les sources, caractérisation…









Ex 2: lois de décroissance

- Lois empiriques de décroissance d'amplitude par famille de sols de la forme générique :

$$V = KD^{-a}$$

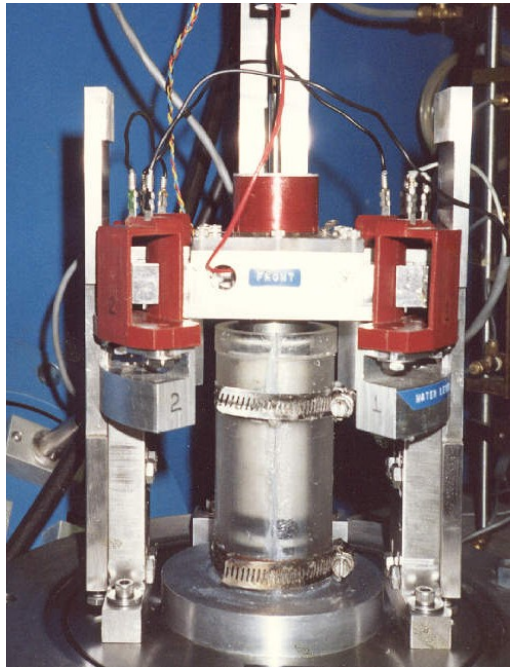
- Les familles de sol sont définies à partir d'études géotechniques et de mesures de vibration in situ à l'aide de diverses sources.

- Pas de familles/catégories prédéfinies utilisables systématiquement

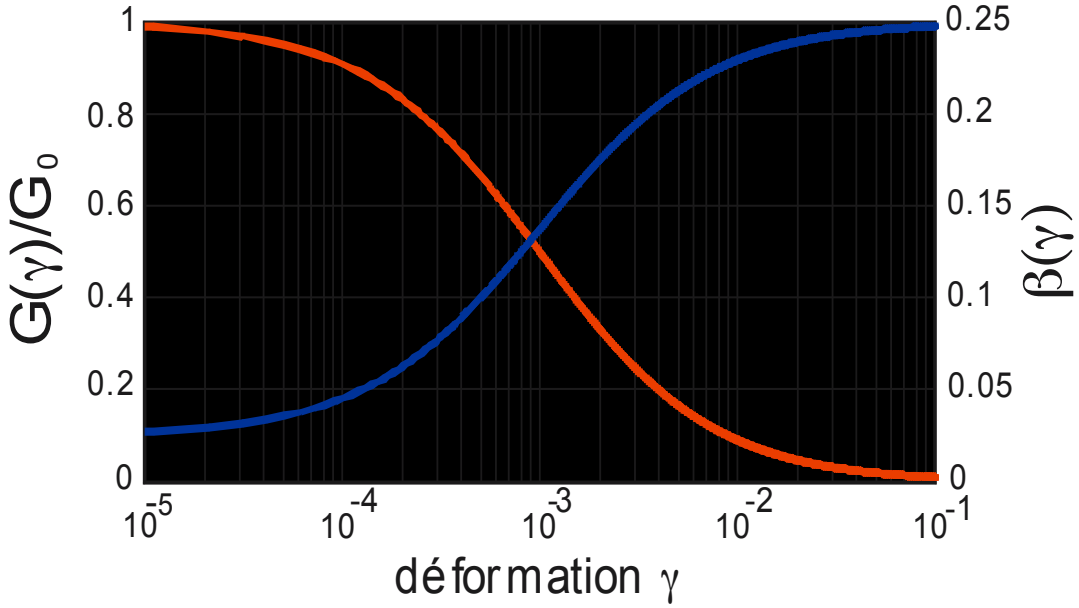
Ex 2: lois de décroissance et sols

La Colonne Résonante (propriétés dynamiques)

Dispositif expérimental



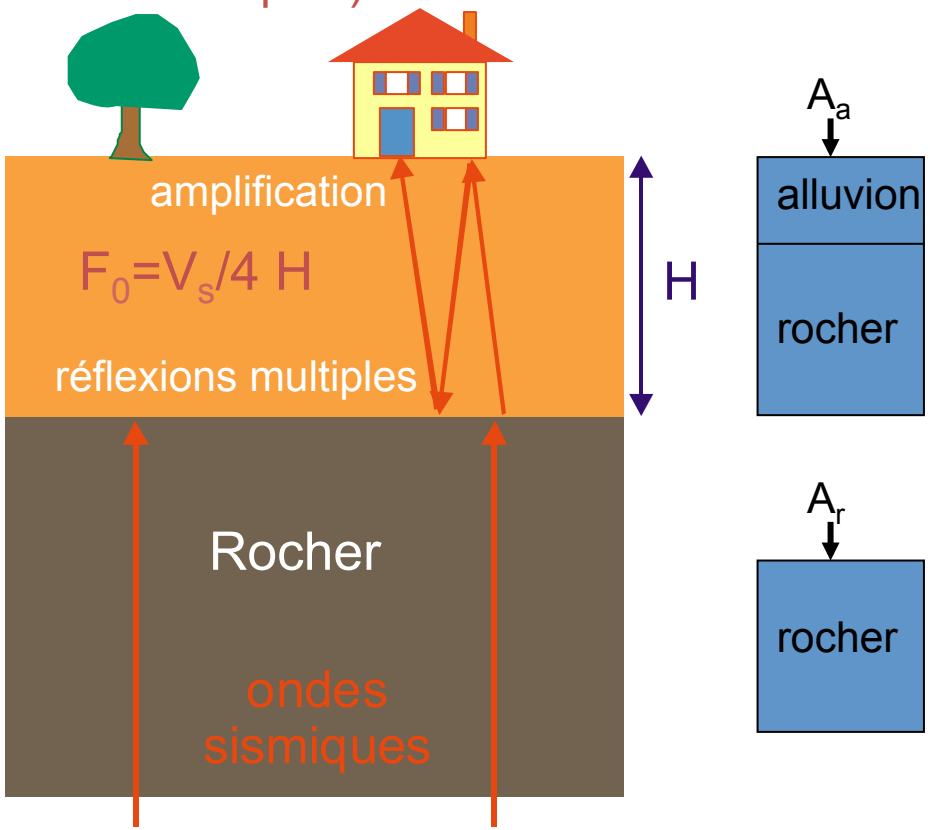
Amortissement et rigidité



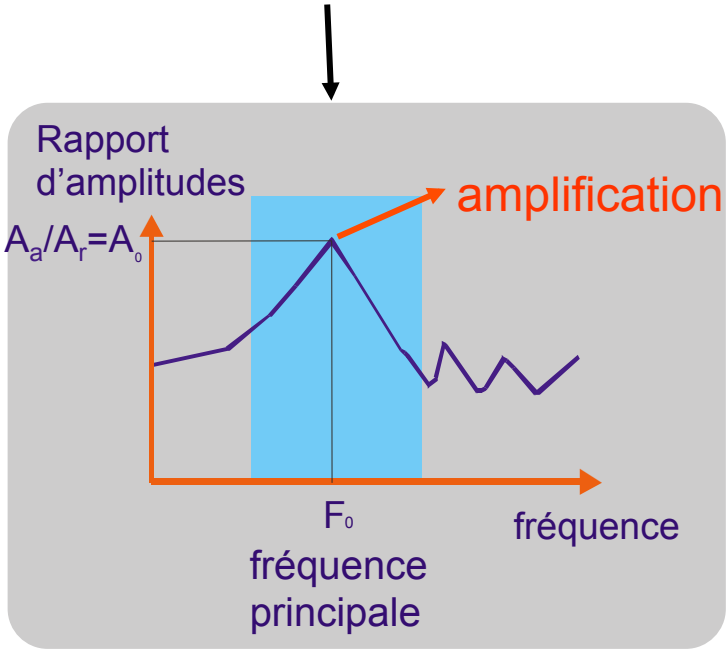
Questions à considérer : représentativité des échantillons et incertitudes des observations

Ex 3: Amplification dans le sol

Physique de l'amplification
(ondes sismiques)

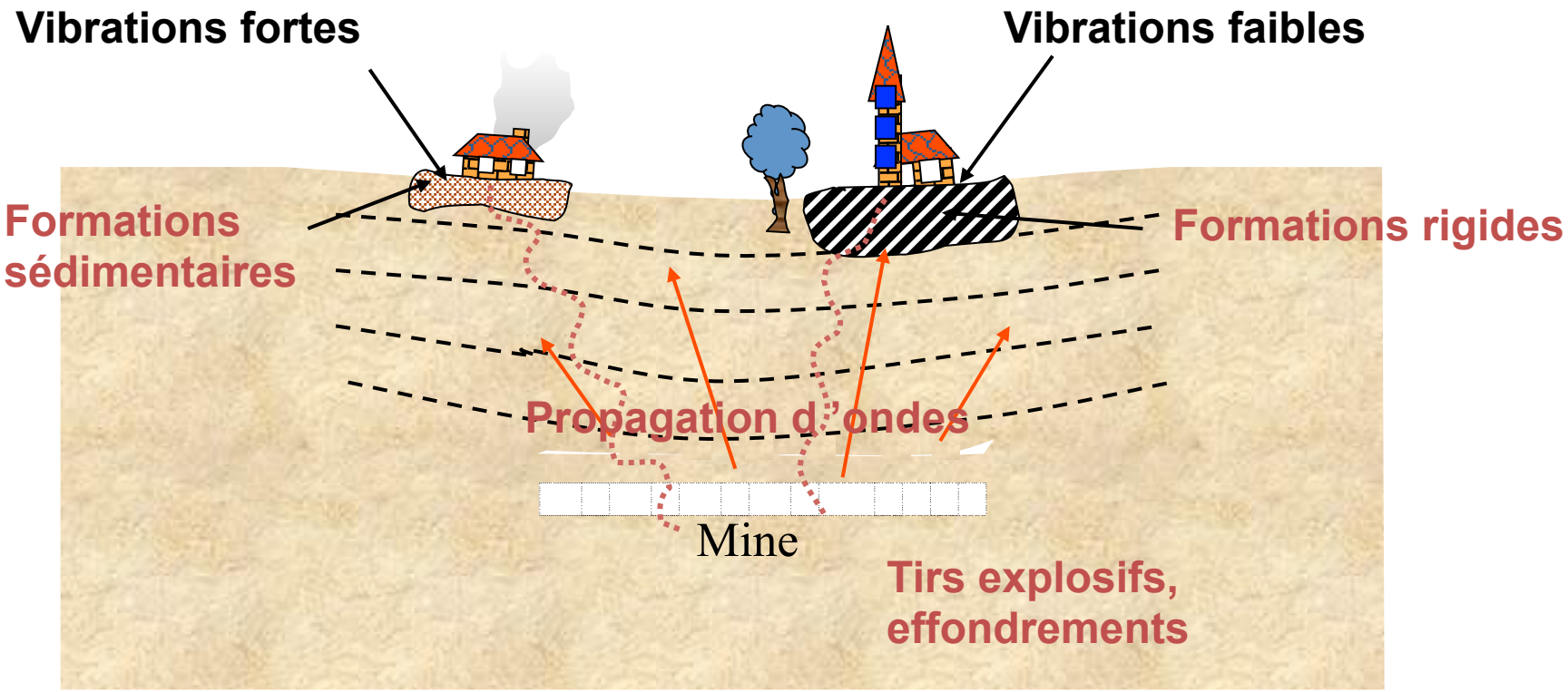


Cas réels : mesures



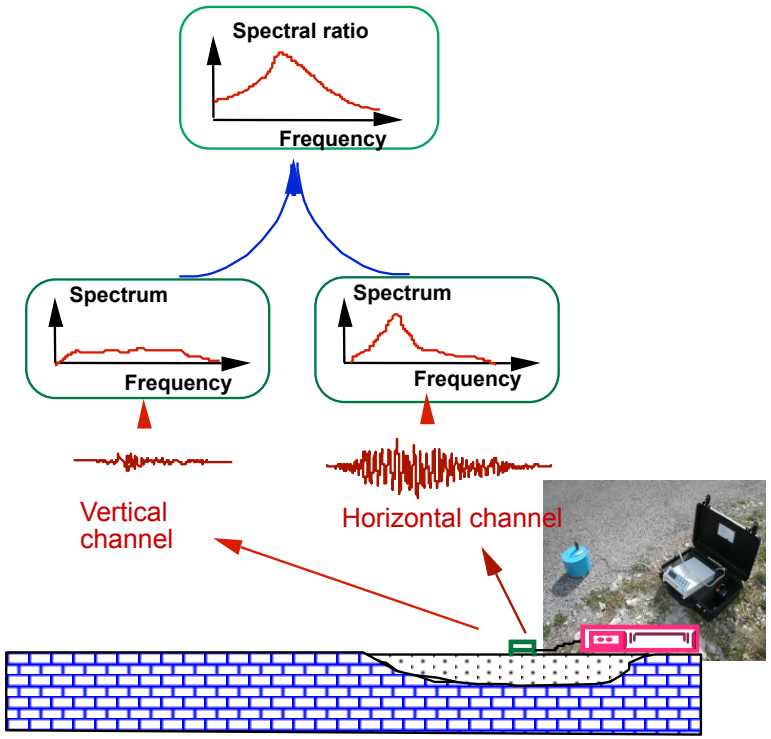
Ratio des Spectres de Fourier de mouvements mesurés

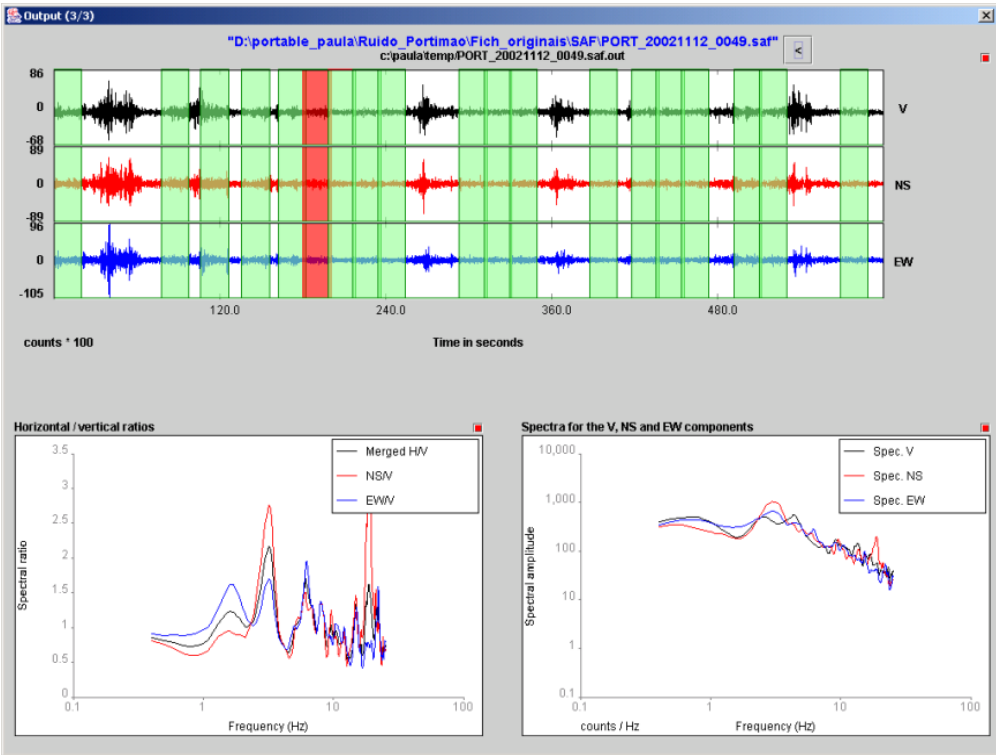
Ex 3: Amplification dans le sol, tires de mines



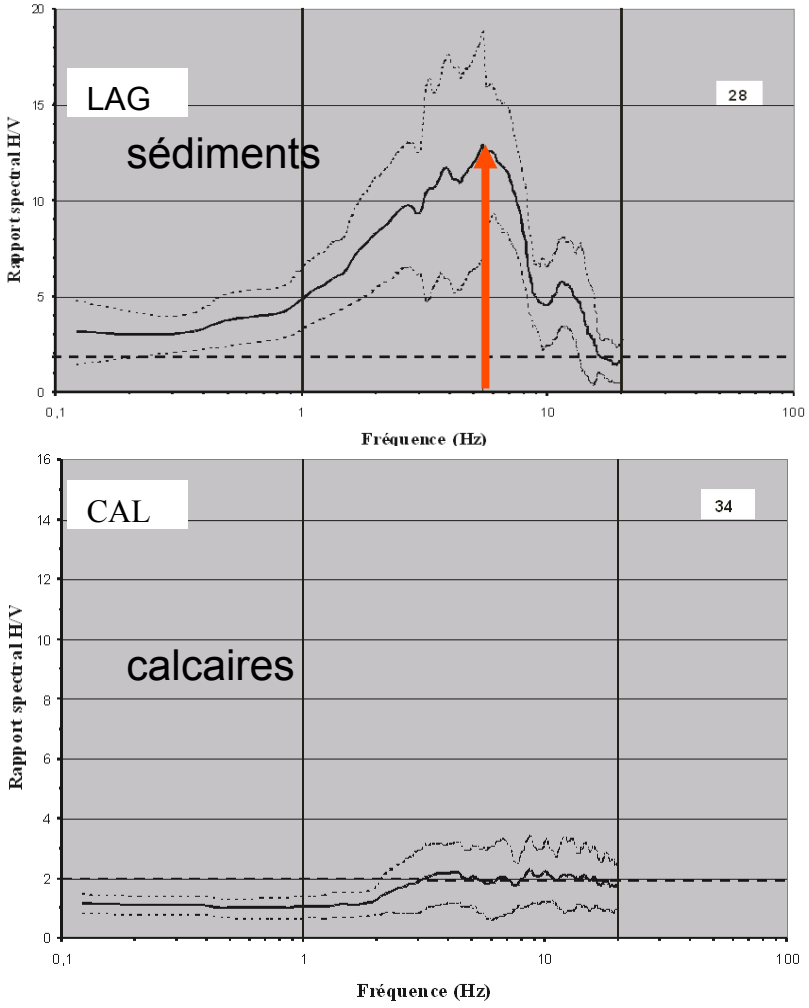
Ex 3: Ampl. et suivi par bruit de fond (H/V)

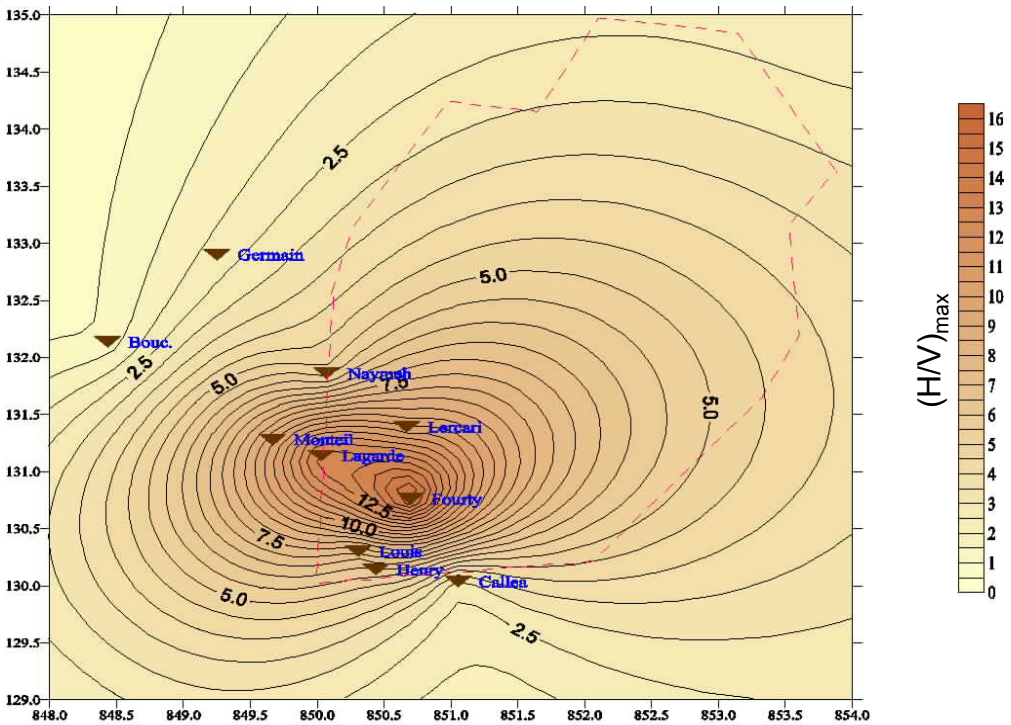
Accessibilité au profil de sol (célérités) et monitorage des structures (variations dans le temps de la fréquence fondamentale)





Ex.3 : Amplification, traitement des données





Amplifications fortes
dans zone sédimentaire,
qualification et quantifications
des ondes de surface

Ex 4: modéliser la propagation

Éléments finis (FEM)

- comportements complexes
- fortes hétérogénéités
- dispersion numérique
- réflexions parasites

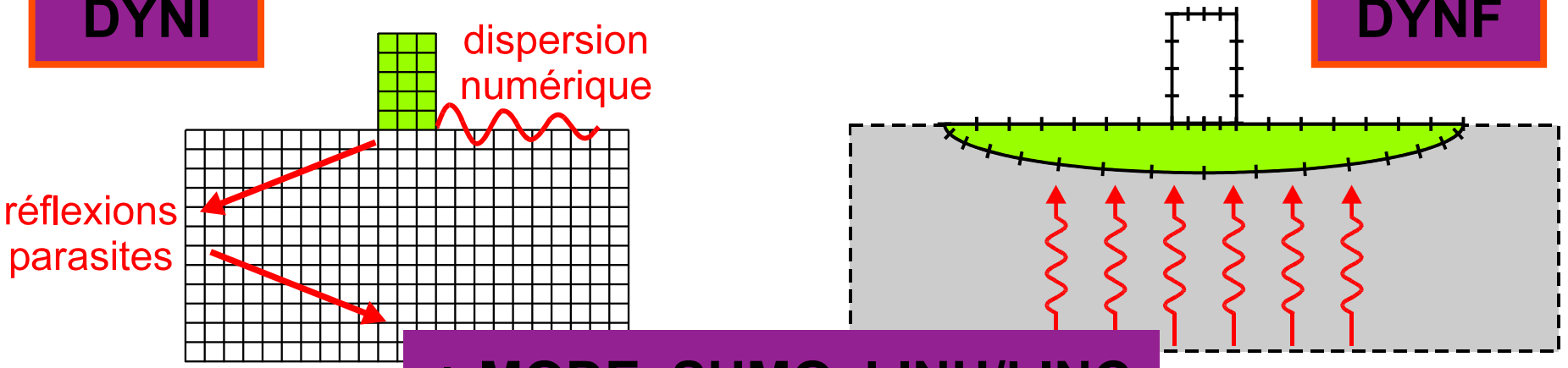
Élts de frontière (BEM)

- comportements simples
- faibles hétérogénéités
- milieux (semi-) infinis
- modélisation des sollicitations sismiques

grand nombre de DDL

Module DYNI

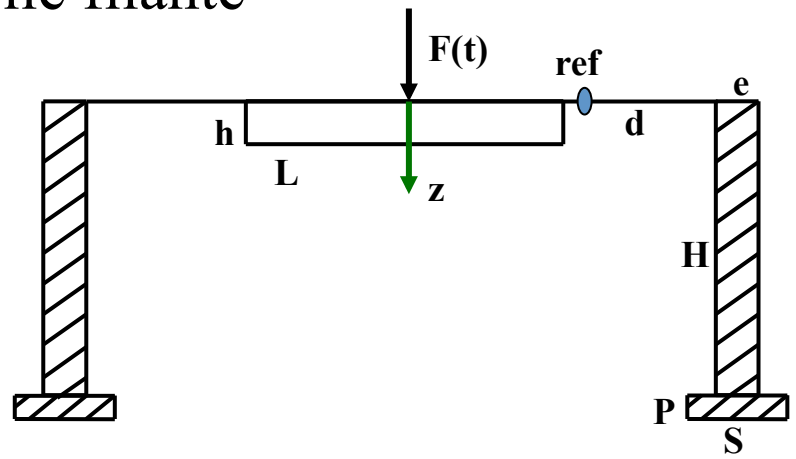
Module DYNF



+ MODE, SUMO, LINH/LINC

Ex 4: modéliser la propagation, simulations 2D

- **Configurations possibles**: champ libre, fondation simple, fondation semelle filante



Dimensions
L = 6 m
h = 0.5 m
d = 3.0 m
e = 0.4 m
H = 5 m
S = 0.5 m
P = 0.6 m

Béton et sol

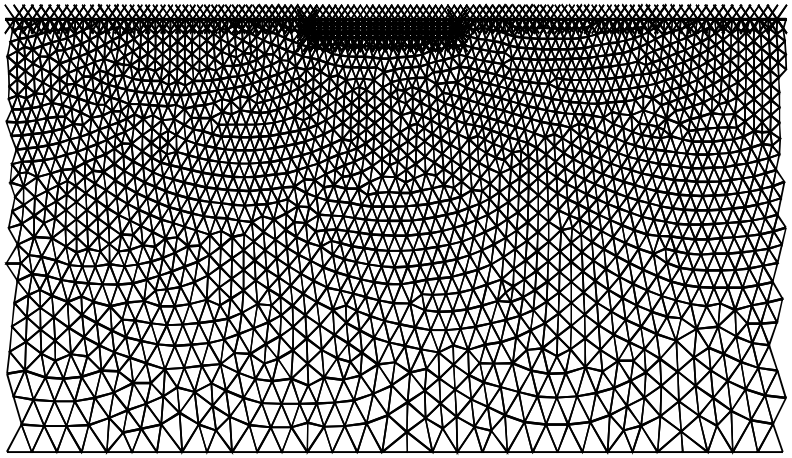
E = 28000 MPa
rho = 2400 Kg/m^3
ν = 0.15
Qp = 100

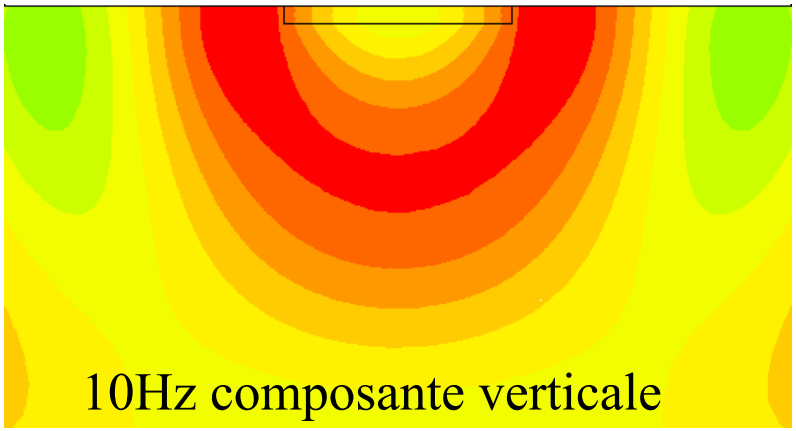
E = 50 MPa
rho = 1500 Kg/m^3
ν = 0.15
Qp = 16

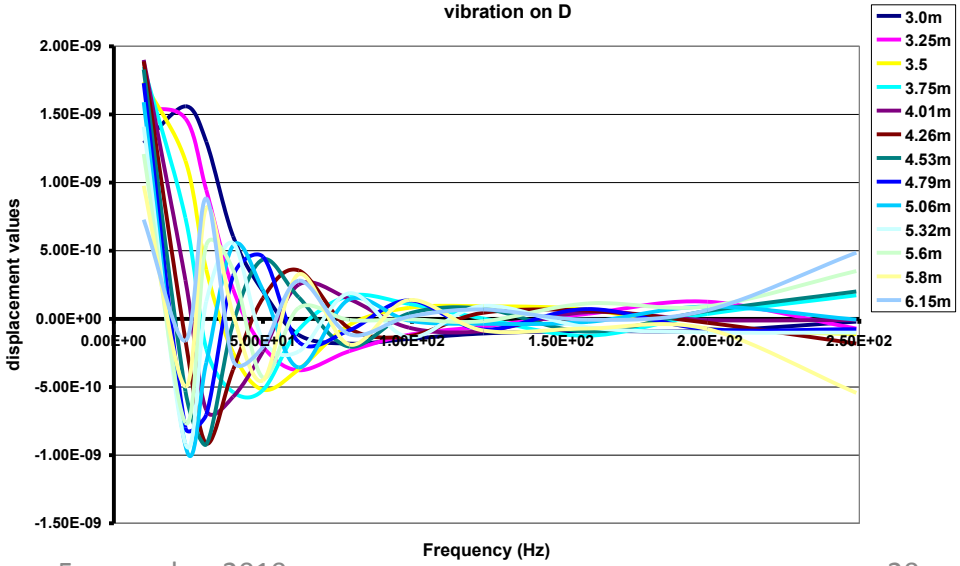
- **Etude de l'évolution spatiale de la vitesse** pour fréquences centrales des bandes de tiers d'octave de 24Hz à 250Hz.
- **Spectre en bande fines** de la vitesse moyenne sur un segment (de 24 à 280 Hz avec pas 1Hz).

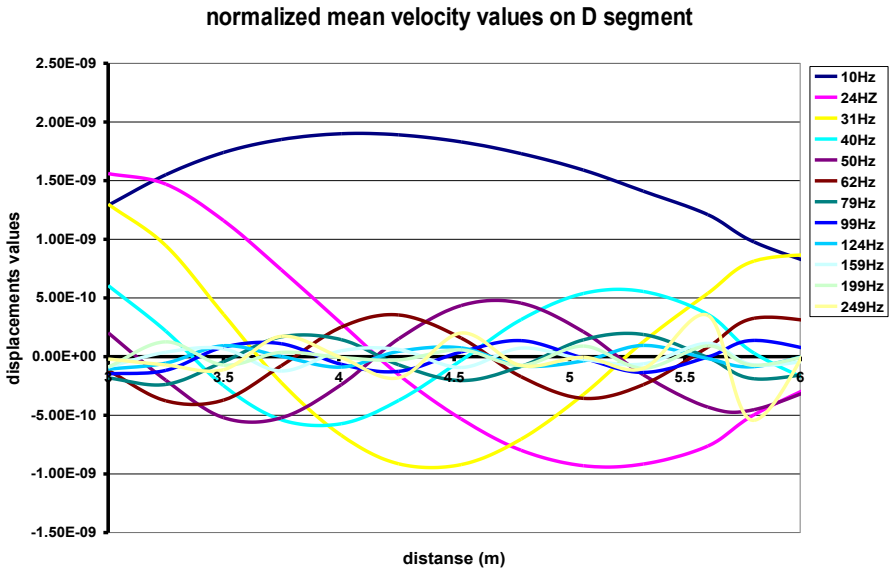
Ex 4: modéliser la propagation, résultats

BEM- Equat. Intég. et élém. de frontière









Maîtriser les *VIBR*ations *EN*vironnementales

5 Axes de recherche

- **Axe A *Connaissance des propagations de la source au récepteur***
- **Axe B *Méthodes de mesure et traitement de donnée***
- **Axe C *Modélisation numérique***
- **Axe D *Méthodes d'atténuation***
- **Axe E *Effets des vibrations sur les structures et le vivant***

Axe A (1)

- **Connaissance des propagations de la source au récepteur**

…parmi les sujets de recherche:

- **caractériser les différentes sources** réelles et les sources de substitution (fréqs, temps, indicateurs).
- **comparaison des résultats** obtenues par différentes instruments
- **pertinence/robustesse** des paramètres utilisés dans les normes

Axe A (2)

les produits envisagés sont :

- un catalogue (ou base) de données documenté *en formation* de vibrations dans divers contextes (sources, transmission, etc.) …

- une synthèse (rapport) sur les typologies des sources en fonction de leurs caractéristiques (fréquence, durée, variabilité, etc..) en lien avec un type de source de substitution (sp. réponse?, ...) et le contexte

- un cahier/rapport/réflexion destiné à sonder la faisabilité et/ou la conception de prototypes de sources de substitution (analytiques et/ ou matériels).

Outputs : données d'entrée pour les axes concernés par le cas d'étude, les analyses numériques et statistiques sur la base de données.

Axe B (1)

- **Méthodes de mesure et traitement de données**

<u>…parmi les sujets de recherche:</u>

– **incertitudes systématiques, causales et variabilité spatiale** des données

– établir **procédures de traitement de données** (filtrage, interpolation, etc.) selon le type

– **lois d'atténuation pour les sources de sub.** (catégories de sols et sources…)

Axe B (2)

…encore parmi les sujets de recherche:

- la **normalisation et les indicateurs** à considérer, le choix de la mesure et ses contraintes pragmatiques (volume et poids des capteurs, mode de fixation, gamme fréquentielle de mesure…..)

- **variété des récepteurs** (gêne aux personnes, faune….) et des cibles des dégâts causés (perte de production d'activités industrielles, commerciales ou agricoles)

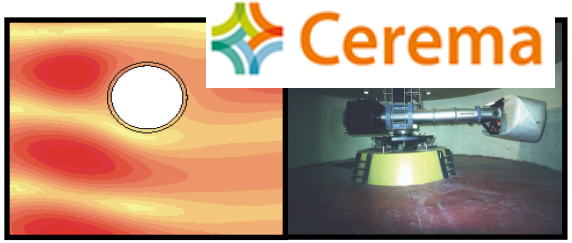
- **etc**…

Axe B (3)

les produits envisagés sont :

- acquisition de données vitesse/accélération (alimentation des catalogues)
- définition de procédures de traitement de données (équivalence entre mesures par bandes de fréquence)
- rapport sur la robustesse du paramètre d'analyse (vitesse, accélération, autres indicateurs)
- méthodologie théorique de prévision des seuils selon source/récepteur et indicateur de référence (…recombinaison fréquentielle/spéctle).

Axe C (1)



Modélisation numérique

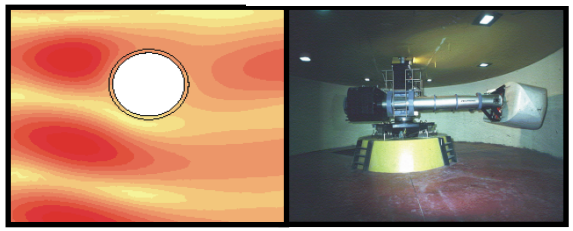
…parmi les sujets de recherche:

- **caractériser** les différentes sources réelles et de sub. **de manière numérique** et/ou physique (sources ponctuelles ou étendues en 2 ou 3 dimensions, sources réelles ou de substitution, statiques ou dynamiques, sources pour possible expérimentation à l'échelle réduite)

- représentation des différentes **typologies simplifiées de sols** et validation des modèles via comparaison entre données (*in situ* et estimation de la variabilité, procédure de recombinaison)

- représentation des différentes **typologies simplifiées des bâtiments** et/ou structures (modes propres, géométries, structures réticulaires complexe de grande hauteur par la méthode d'homogénéisation, ISS)

Axe C (2)



les produits envisagés sont :

- Évaluer le potentiel effet de l'interaction sol-structure (sources ponctuelles ou étendues en 2 ou 3 dimensions, sources réelles ou de substitution, statiques ou dynamiques, sources pour possible expérimentation à l'échelle réduite)

- Étude paramétrique et définition des abaques des niveaux vibrationnelles (sources, catégories simplifiées de sols et bâtiments)

- Rapport de synthèse (guide) sur la prise en compte des vibrations dans le dimensionnement des infrastructures.

Axe D (1)

Méthodes d'atténuation

<u>…parmi les sujets de recherche:</u>

- **l'efficacité de l'isolation** aux ondes selon leur contenu en fréquence
- l'isolation active (à la source) et/ou passive (au récepteur) – **configurations varies** (tranchées, semelles résilientes, tapis, dalles flottantes, masses, etc)
- une approche par modélisation de **dispositifs d'atténuation** type dans un but de **dimensionnement**.

Axe D (2)

les produits envisagés sont :

- un inventaire des méthodes utilisables par type de source (analyse des données dans le domaine fréquentiel existantes dans les laboratoires régionaux ou de mesures sur sites opérationnels comme le doublement des voies ferrées dans l'agglomération bordelaise ou expérimentaux (CER à Rouen).

- une étude comparative des méthodes d'atténuation envisageables en terme d'efficacité, d'effets associés et de coût (par type de sources: travaux, circulation routière et ferroviaire)

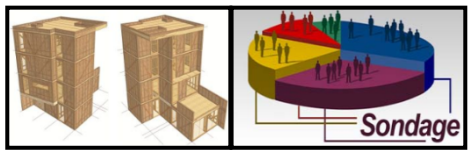
- rapport de recherche par modélisation de dispositifs d'atténuation type dans un but de dimensionnement.

Axe E (1)

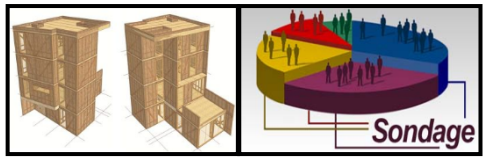
Effets des vibrations sur les structures et le vivant

<u>…parmi les sujets de recherche:</u>

- les **mesures** sur structures et endommagement (suivi H/V dans le temps…)
- **révision des niveaux maximales** et effets d'amplification des structures (et des sites)
- revue de la littérature internationale concernant la question de la **perception des vibrations** à l'intérieur des bâtiments
- **sensibilité aux vibrations** et seuils justifiés ou conservatoires, en fonction des cycles de vie (période d'hibernation, de nidification…..)



Axe E (2)



les produits envisagés sont :

- choix des sites et mise au point de la grille d'entretiens ou l'espace de compétence (en rapport à la base de données)
- réalisation et analyse des entretiens et/ou des observations (paramètres pertinents, statistiques, etc.)
- rédaction du rapport final
- spécificités dans les modes de propagation (milieu aquatique, matériaux de construction)
- méthodes de surveillance, de prévention des risques vibratoires (systèmes d'alerte)

Produits attendus

L'opération qui doit se dérouler sur 4 ans a pour objectif principal de fournir des documents méthodologiques à l'usage des bureaux d'études et des maîtres d'œuvre confrontés à la prédiction et à la maîtrise des vibrations générées par des infrastructures.

Les principaux documents, publiés sous forme de rapport ou de guide, attendus sont décrits dans le tableau en annexe au présent document et rappelé ci-après :

- une doctrine de caractérisation des sites et des sols au regard de la propagation des vibrations
- une note de synthèse sur la recherche d'une procédure de recombinaison pour transférer les lois d'atténuation issues de l'utilisation des sources de substitution au cas des sources réelles
- une note de synthèse sur la recherche d'une procédure d'équivalence entre mesures en vitesse et accélération dans une bande de fréquences limitée
- l'animation d'un réseau de correspondants pendant la durée de l'opération, permettant de clarifier les pratiques en matière d'étalonnage des capteurs et de mesure. Ce réseau pourra être élargi aux personnes extérieures associées à l'opération (RATP, SNCF, CETU) voire à certains bureaux d'études
- une méthode de prévision sur la propagation des vibrations dans le sol, incluant
  - un catalogue des différentes sources de vibrations,
  - un catalogue des différentes structures précisant les atténuations ou les amplifications prévisibles, ainsi que les gênes et désordres prévisibles
  - des abaques de transfert des vibrations dans le sol
- une méthode de définition des seuils de vibrations à fixer en fonction des enjeux et des modes de contrôles associés
- un rapport de recherche sur la notion de gêne, en relation avec le bruit solidien, les vibrations ou tous phénomènes associés au comportement de la structure réceptrice et du vivant.
- une synthèse de la recherche menée sur la réduction des vibrations dans le sol et des dispositifs envisageables
- des documents normatifs (dans le domaine de la mesure, du traitement du signal et de la définition de la gêne).

Selon l'importance des documents, l'IDDRIM sera plus ou moins fortement sollicitée afin de bénéficier de l'apport de la profession dans ce domaine et faire valider les travaux menés.