



***Société d'énergie  
explosive du Québec***



**2<sup>e</sup> séance de formation de la SEEQ**

**Mise à jour des connaissances en forage et sautage**

---



Le 29 octobre 2025, Université Laval  
Pavillon Adrien-Pouliot, salle PLT-1112  
13h à 17h



## Programme de la 2<sup>e</sup> séance de formation



### 1. Le suivi des vibrations (1 heure)

• *Formateur : Francis Trépanier, ing.*

### 2. Les bonnes pratiques du chargement des explosifs de type émulsion (30-45 min)

• *Formateur : Paul Kuznik, ing.*

### 3. Revue des calculs de chargement des explosifs (1 heure)

• *Formateur : Éric Simon*

### 4. La santé et sécurité (30 min)

• *Formateurs : Simon Pelletier et Fatim Diallo, ing. M.Sc.*

### 5. Dynamitage en souterrain (30-45 min)

• *Formateur : David Sibille*

**Note : Une pause de 15 à 20 min est prévue**



# SÉANCE 1 : Le suivi des vibrations



## Formateur : Francis Trépanier, ing.

- 30 ans d'expérience dans le domaine du dynamitage et des vibrations
- Chargé de projets impliquant le contrôle et la gestion de la qualité des activités de dynamitage en carrière, mine et chantier de construction
- Suivi et établissement de recommandations techniques sur les effets environnementaux des sautages (vibrations, surpressions d'air, projections, etc.)
- Suivi et recommandations pour la gestion de plaintes



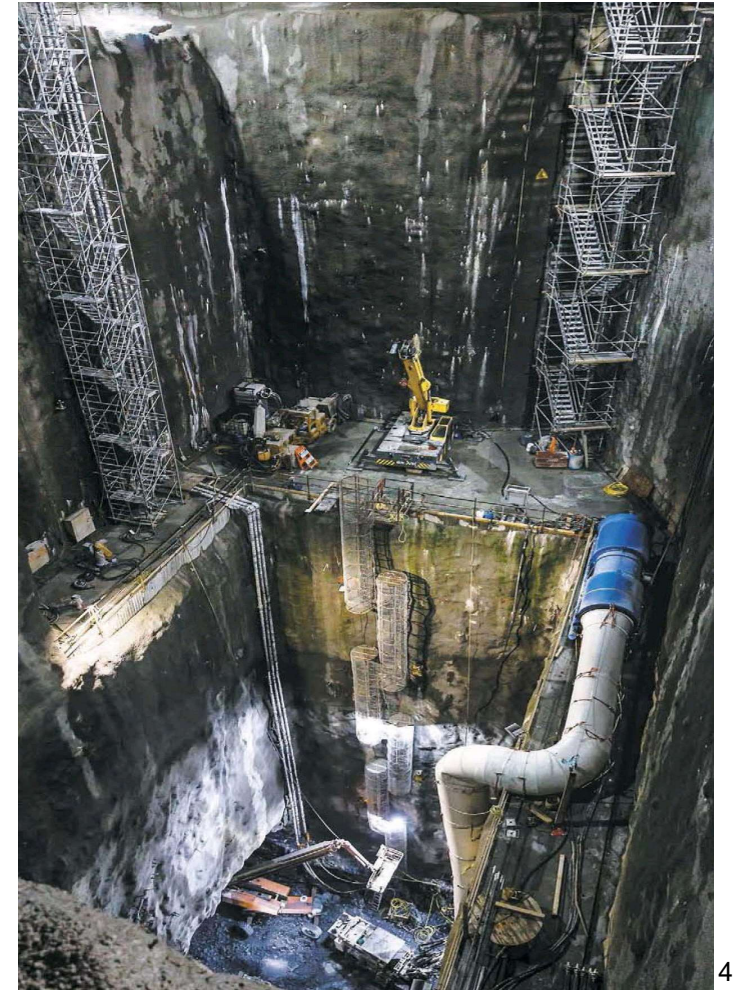




## Table des matières



1. Sismographes : Fonctionnement et installation
2. Analyse des vibrations et surpressions d'air de dynamitage (survol)
3. Exemples d'enregistrements de sismographes
4. Critères de dommages, sensibilité des gens et suivi de plaintes







# **1. Sismographes : Fonctionnement et installation**



## Géophone standard



### Géophones standards

- Mesure la Vitesse des vibrations (déplacement)
- Plage d'amplitude limitée (~jusqu'à 254 mm/s)
- Plage de fréquences limitée (~2- 250 Hz)



#### ISEE Geophone

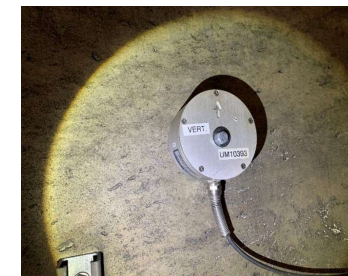
Measures ground motion in three orthogonal directions. The sensor includes three ground spikes for soft surfaces or the geophone can be bolted to hard surfaces. Choose between 2 m (6.5 ft) or 5 m (16.4 ft) cable length.

PART NUMBER	721A2901
RESPONSE STANDARD	ISEE SPECIFICATION 2011 EDITION
FREQUENCY RANGE	2 TO 250 Hz
VELOCITY RANGE	UP TO 254 mm/s (10 in/s)
RESOLUTION	0.00788 mm/s (0.00031 in/s)
SENSOR DENSITY	2.2 g/cc (137 lbs/ft <sup>3</sup> )
CABLE LENGTH	2 m (6.5 ft)
MAXIMUM CABLE LENGTH	1000 m (3250 ft)
REQUIRED SOFTWARE	THOR/BLASTWARE COMPLIANCE

PART NUMBER	721A2902
RESPONSE STANDARD	ISEE SPECIFICATION 2011 EDITION
FREQUENCY RANGE	2 TO 250 Hz
VELOCITY RANGE	UP TO 254 mm/s (10 in/s)
RESOLUTION	0.00788 mm/s (0.00031 in/s)
SENSOR DENSITY	2.2 g/cc (137 lbs/ft <sup>3</sup> )
CABLE LENGTH	5 m (16.4 ft)
MAXIMUM CABLE LENGTH	1000 m (3250 ft)
REQUIRED SOFTWARE	THOR/BLASTWARE COMPLIANCE



Sismographe avec boîtier télémetrie



Géophone mural ancré



Géophone standard ancré au mur avec base aluminium

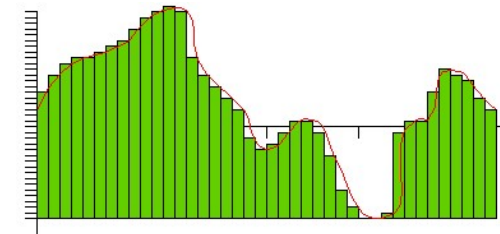
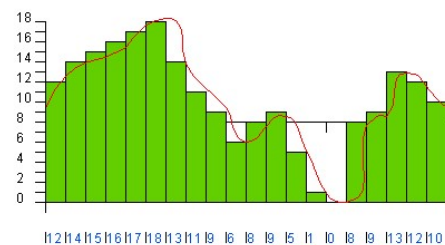
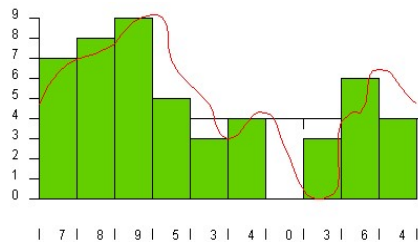
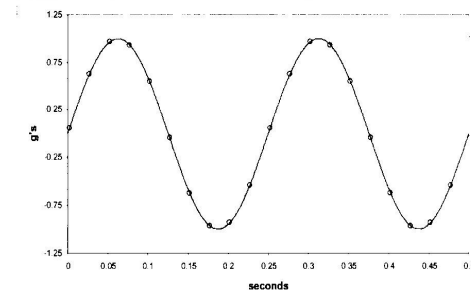
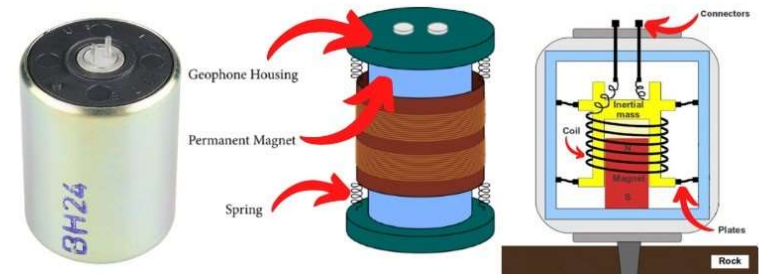


## Géophone et signal numérique



### Taux d'échantillonnage

- ✓ Les enregistrements analogiques sont définis en tous points dans le temps
- ✓ Les enregistrements numériques sont définis seulement en certains points dans le temps
- ✓ Les ordinateurs n'utilisent que des signaux digitaux
- ✓ Signal analogique du géophone échantillonné pour obtenir un signal digital dans le temps
- ✓ Plus le taux d'échantillonnage est élevé, plus le signal digital correspondra au signal analogue





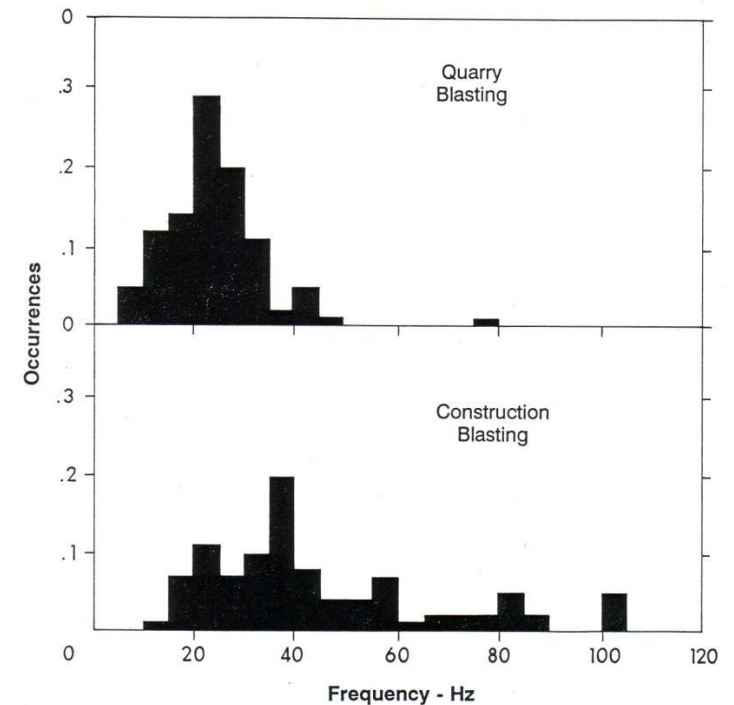


# Géophone et signal numérique



## Taux d'échantillonnage

- Peu d'effet pour les sautages à ciel ouvert (fréquences  $\leq 100$  Hz en général), donc 1024 échant./sec adéquat.
- Peut avoir des effets sur les sautages en construction et mines (plage de fréquences plus grande), surtout à courte distance lorsque les fréquences sont plus élevées (souvent plus de 100 Hz).



PREDOMINANT FREQUENCY HISTOGRAMS  
OF QUARRY AND CONSTRUCTION BLASTS  
(SOURCE FROM USBM, RI 8507, 1980)



# Installation des sismographes

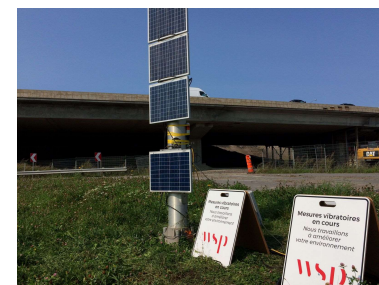


- ❑ **ISEE** : Guide pour l'installation des sismographes lors de dynamitages (Édition 2020)

Ce guide définit une bonne approche générale pour l'installation des sismographes lors de dynamitages. C'est pourquoi je le présente en détail.

Un des objectifs du Comité de normalisation de l'ISEE est de développer des normes uniformes et techniquement appropriées pour les sismographes utilisés lors de dynamitage. Le but est d'améliorer la précision et la cohérence dans les mesures de vibrations et de surpressions d'air. La performance des résultats sismographiques est affectée par la façon dont le sismographe est construit et comment il est installé.

- ❑ **ISEE Seismograph Section** : Nouveau programme de certification d'opérateur de sismographes (formation de 3 heures donnée à la conférence annuelle de la ISEE depuis 2025).



**ISEE FIELD PRACTICE  
GUIDELINES FOR BLASTING  
SEISMOGRAPHS 2020**

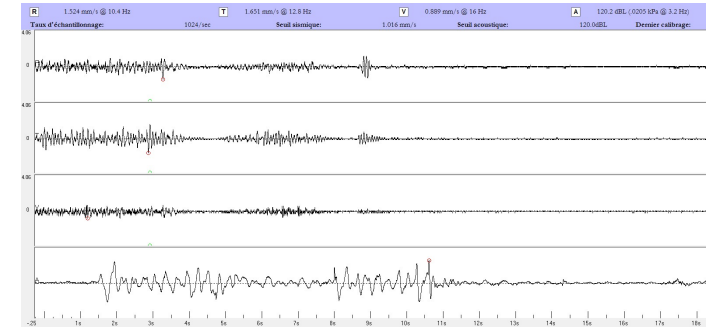


# Installation des sismographes



## Partie I : Généralités – ISEE

- Lire le manuel d'instructions
- Calibration annuelle recommandée
- Rapport d'installation et de résultats complets
- Enregistrement complet de l'onde sismique (ne pas utiliser seulement le mode continu pour les dynamitages)
- Connaître la distance du dynamitage (GPS)
- Connaître le temps d'enregistrement du sismographe (durée du sautage, distance versus surpression d'air)
- Ajuster le taux d'échantillonnage pour enregistrer le signal avec le plus de détails et afin de reproduire le signal sismique réel (en général, un taux d'échantillonnage de 1024 éch./sec. sera suffisant)
- Allouer suffisamment de temps pour l'installation
- S'adapter aux conditions environnementales (pluie, froid, poussière, vent, etc.)
- Connaître la capacité de la mémoire lors de l'installation (s'assurer qu'il y a suffisamment d'espace mémoire)





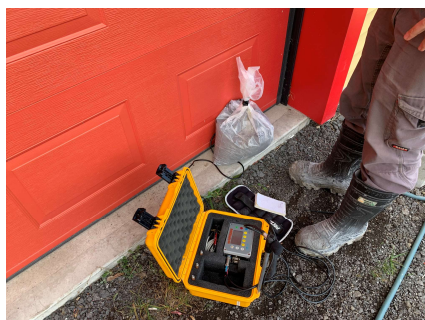


# Installation des sismographes



## Partie II : Contrôle de vibration – ISEE

- L'emplacement et le contact surface/capteur sont les facteurs les plus importants pour assurer une consistance et une précision des mesures de vibrations;
- Le capteur devrait être localisé sur le sol de façon à enregistrer adéquatement les niveaux de vibrations reçus par la structure. Le capteur devrait être placé à l'intérieur de 3,05 m (10 pi) de la structure;
- Le sol devrait être non remanié. Les matériaux de remblai lâches, les plates-bandes de fleurs et les matériaux non usuels peuvent avoir un impact important sur la précision des mesures;
- Autant que possible, les mesures sur les entrées en asphalté, les allées piétonnières, les dalles de patio et le gazon devraient être évitées;
- Lorsqu'il n'est pas possible d'installer le capteur au sol (enterré, sac de sable ou piqué), le capteur peut-être attaché à la fondation de la structure à l'intérieur de 0,305 m (1 pi) du niveau du sol (RI 8969).





# Installation des sismographes



## Partie II : Contrôle de vibration – ISEE

- Le canal « L » devrait pointer vers le dynamitage ou la source de vibrations lorsque le capteur est sur le sol, et selon un des axes d'une structure lorsqu'il est installé sur celle-ci.
- Niveau de déclenchement (ajusté pour enregistrer le dynamitage ou les travaux de construction; 1 mm/s est souvent un bon départ).
- L'emplacement et le contact surface/capteur (couplage) sont les facteurs les plus importants
- Si l'accélération excède 0,2g, le glissement du capteur peut poser problème:
  - > < 0,2g (ex: 7,8 mm/s à 40 Hz) : enterrement ou ancrage non nécessaire (mais je recommande de toujours mettre une poche de sable)
  - > Entre 0,2 et 1,0g : enterrement ou ancrage préférable. Piquer le capteur et/ou poche de sable peut être acceptable
  - > > 1,0g (ex: 39 mm/s à 40 Hz) : enterrement ou ancrage requis



Frequency, Hz	4	10	15	20	25	30	40	50	100	200
Particle Velocity mm/s (in/s) at 1.96 m/s <sup>2</sup> (0.2 g)	78.0 (3.07)	31.2 (1.23)	20.8 (0.82)	15.6 (0.61)	12.5 (0.49)	10.4 (0.41)	7.8 (0.31)	6.2 (0.25)	3.1 (0.12)	1.6 (0.06)
Particle Velocity mm/s (in/s) at 9.81 m/s <sup>2</sup> (1.0 g)	390 (15.4)	156 (6.14)	104 (4.10)	78.0 (3.07)	62.4 (2.46)	52.0 (2.05)	39.0 (1.54)	31.2 (1.23)	15.6 (0.61)	7.8 (0.31)



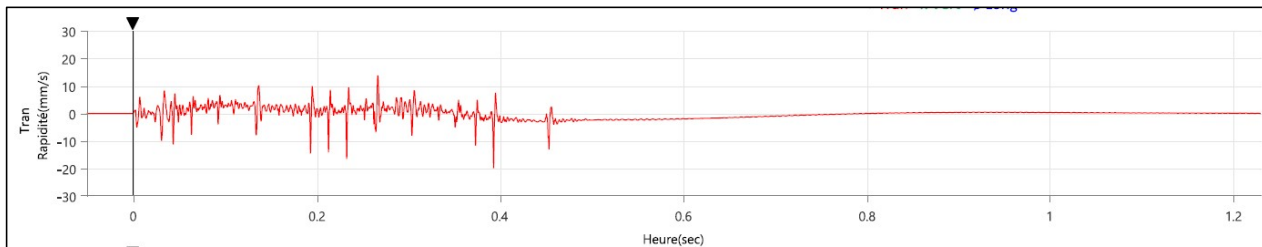


# Installation des sismographes

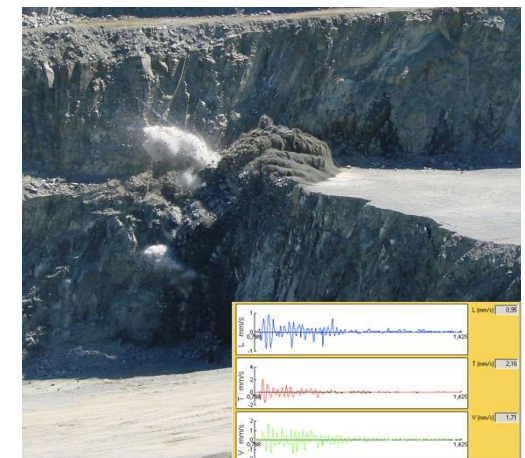
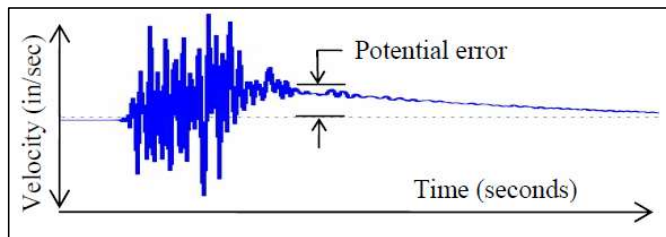


## Partie II : Contrôle de vibration – ISEE

Le glissement du capteur peut poser problème : Induction en basse fréquence



Ce type d'induction en basse fréquence est souvent causé par une mauvaise installation du capteur par rapport au niveau de vibration mesurée (capteur non ancré, ancrage insuffisamment serré, etc.).





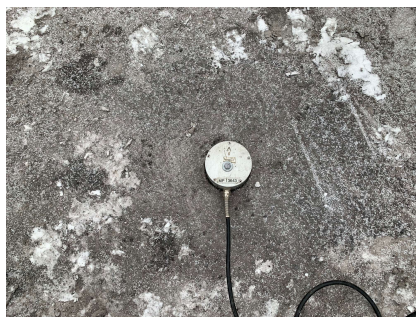


# Installation des sismographes



## Partie II : Méthodes d'enterrement et d'ancrage – ISEE

- La méthode d'enterrement privilégiée est l'excavation d'un trou qui n'est pas moins de 3 fois la hauteur du capteur (ANSI S2.47), piquer le capteur dans le fond du trou et compacter fermement le sol autour et au-dessus du capteur.
- L'attachement au roc se fait en ancrant, ou en collant le capteur à la surface du roc.
- Piquer signifie l'enlèvement de la terre avec un minimum de dérangement du sol, pour ensuite presser fermement le capteur et ses pics dans le sol.





# Installation des sismographes



## Partie II : Méthodes d'enterrement et d'ancrage – ISEE

- L'utilisation de sacs de sable signifie l'enlèvement de la terre avec un minimum de dérangement du sol, pour ensuite placer le capteur à l'endroit découvert avec un sac de sable au-dessus. Les sacs de sable devraient être de grande taille et remplis moyennement de 10 livres de sable. Lorsque placé sur le capteur, le sac de sable devrait être aussi large et bas que possible en ayant un contact maximum avec le sol.
- La combinaison du piquage et du sac de sable donne une assurance accrue d'un bon couplage.





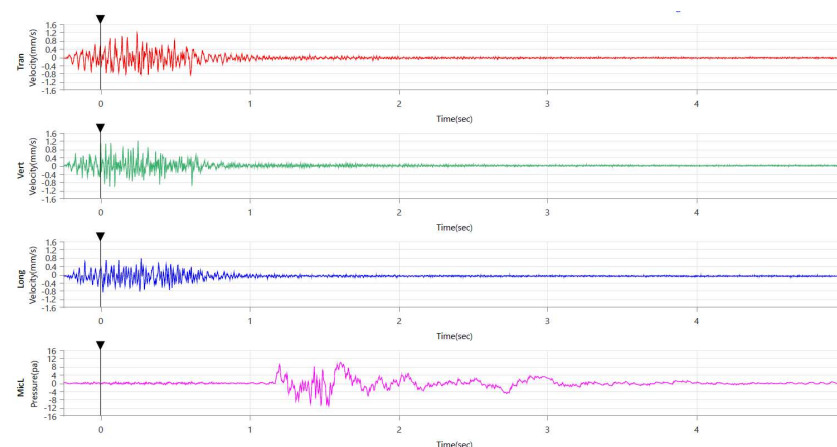
# Installation des sismographes



## Partie III : Contrôle des suppressions d'air – ISEE

- Le microphone doit être placé à proximité du géophone avec la boule anti-vent.
- Le microphone peut être installé à n'importe quelle hauteur au-dessus du sol (ISEE 2005).
- Autant que possible, le microphone ne doit pas être caché par des bâtiments à proximité, véhicules ou autres barrières importantes. Si ce n'est pas possible, la distance horizontale entre le microphone et l'objet doit être supérieure à la hauteur de l'objet.
- La réflexion peut être minimisée en plaçant le microphone près d'un coin de la structure.
- Seuil de déclenchement (ajusté pour enregistrer le dynamitage, en général, 120 dB est un bon seuil).
- Durée d'enregistrement: régler le temps à 2 secondes de plus que la séquence du dynamitage, plus une seconde pour chaque 340 m du sautage.

(vitesse du son dans l'air  $\approx 340$  m/s)







# Installation des sismographes



## Quelques avantages à réaliser des mesures de vibration sur les structures également

- Permet un meilleur diagnostic de l'impact des vibrations sur les structures et les humains.
- Éliminer les situations problématiques dans une zones urbaines densément peuplées, où l'installation de capteurs au sol naturel peut être difficile étant donné la variété des situations (sols perturbés, l'asphalte, l'herbe, les petits espaces, terrains privés).
- Atteindre l'objectif de consistance et de précision dans les mesures.
- Enregistrement de la réponse réelle de la structure et les effets sur l'humain à l'intérieur de la structure.
- Enregistrement de l'impact de la surpression de l'air sur la structure (vibrations de la structure qui ne serait pas mesurée si le capteur est sur le sol).
- Considérer le phénomène d'amplification de la structure qui peut se produire dans certaines conditions.



## **2. Analyse des vibrations et surpressions d'air de dynamitage (survol)**

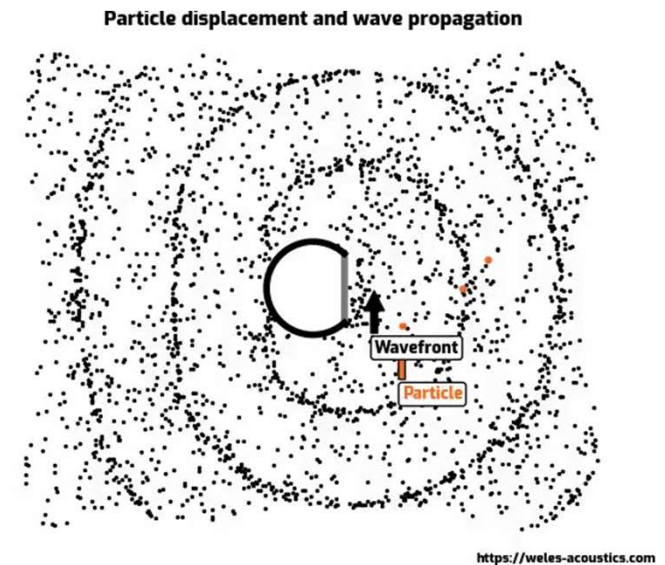


# Analyse des vibrations



## Vitesse sismique et vitesse de particules

- Vitesse sismique (exprimée en m/s) :  
Correspond à la vitesse de propagation de l'onde dans un matériau. Deux matériaux différents transportent les ondes à des vitesses différentes
- Vitesse de particules (exprimée en mm/s) :  
Décrit le mouvement en un point donné et représente le déplacement par unité de temps. Elle tient compte de l'intensité de la vibration et de la fréquence. On peut aussi utiliser le déplacement (mm) ou l'accélération de particules ( $\text{mm/s}^2$ )





# Analyse des vibrations

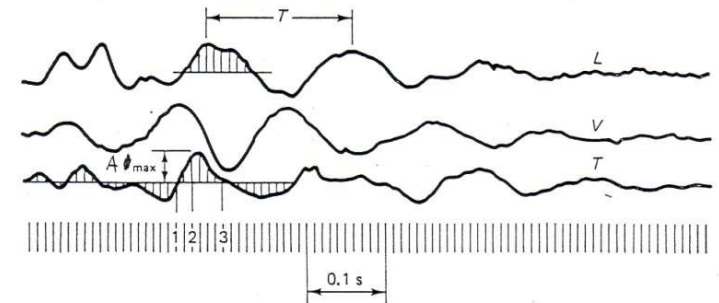


C'est l'enregistrement de la vitesse de particules dans le domaine du temps. Ce signal qui représente un dynamitage n'est pas parfaitement sinusoïdale.

Cependant, la méthode simplifiée « approximation sinusoïdale » donne une bonne approximation de la vraie évaluation (calcul dérivée et intégrale).

Les appareils de vibrations utilisent cette méthode pour le sommaire des résultats.

## APPROXIMATION SINUSOÏDALE (PSEUDO VELOCITY)



$$V_{particule} = \frac{dA}{dt} = 2 \pi A f$$

$$a_{particule} = \frac{dV}{dt} = 4 \pi^2 f^2 A$$

où: A: Amplitude (mm)  
V: Vitesse de particules (mm/sec)  
a: Accélération (mm/sec<sup>2</sup>)  
f: Fréquence (Hz)

$$V_{résultante} = \sqrt{L^2 + T^2 + V^2}$$

ISEE Triaxial Geophone	Tran	Vert	Long
Le pic de vitesse des particules	2.317 mm/s	6.384 mm/s	5.919 mm/s
Fréquence de passage à zéro	60.2 Hz	56.9 Hz	60.2 Hz
Heure (par rapport au déclenchement)	0.497 sec	0.487 sec	0.489 sec
Pic accélération	0.095 g	0.234 g	0.227 g
Pic déplacement	0.023 mm	0.017 mm	0.021 mm
Vérification du capteur	✓ Réussi	✓ Réussi	✓ Réussi
Fréquence	7.5 Hz	7.5 Hz	7.4 Hz
Ratio suroscillation	3.6	3.6	4.0
Pic somme vectorielle	8.528 mm/s à 0.488 sec		

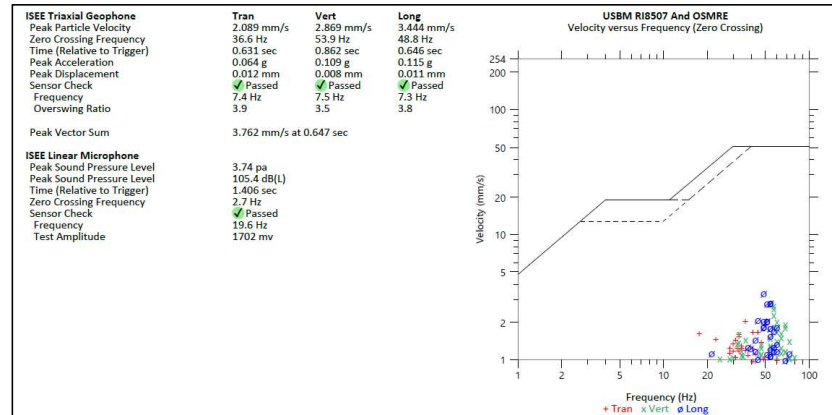
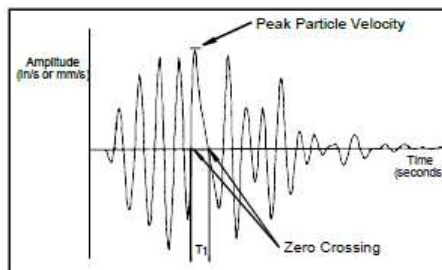




## Fréquence de passage à zéro (Zero Crossing Frequency)



- ❑ Méthode simplifiée pour déterminer la fréquence associée aux valeurs maximales de vitesse de particules (T, V et L).



- ❑ La fréquence de passage à zéro est limitée car elle suppose une seule fréquence dominante, généralement représentée par des formes d'onde sinusoïdales. Technique simplifiée qui peut être beaucoup moins précise pour des formes d'onde plus complexes.

## Transformation de Fourier rapide (TFR)

- ❑ Affiche le spectre de fréquence complet de la vibration.





# Analyse des vibrations

- Ondes sismiques : Effet de la fréquence (Hz) sur la vitesse (mm/s), le déplacement (mm/s) et l'accélération (mm/s<sup>2</sup>)

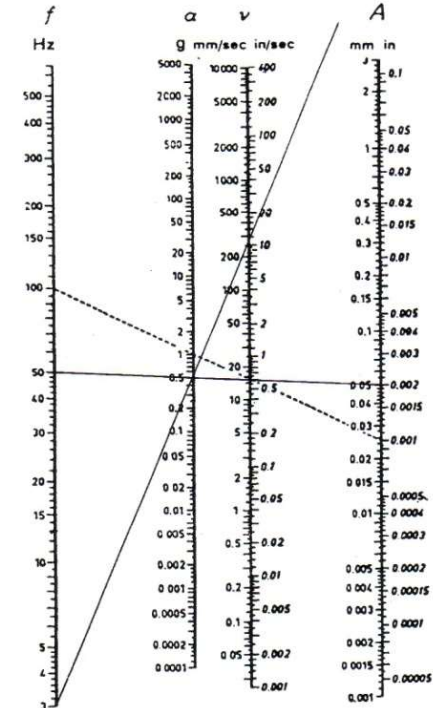
Ce nomogramme montre la relation entre la fréquence (Hz), ainsi que la vitesse (mm/s), le déplacement (mm) et l'accélération (mm/s<sup>2</sup>) de particules.

Si vous avez deux d'entre elles, vous trouverez tout simplement les autres.

Vous pouvez voir aussi la différence d'amplitude entre un dynamitage et un tremblement de terre pour une même accélération.



## Exemple avec un nomogramme



- 1 Dynamitage: 0,5 g à 50 Hz  
- V = 15 mm/s et A = 0,05 mm
- 2 Séisme: 0,5 g à 3 Hz  
- V = 220 mm/s et A = 12 mm



# Vibration dynamitage en carrière



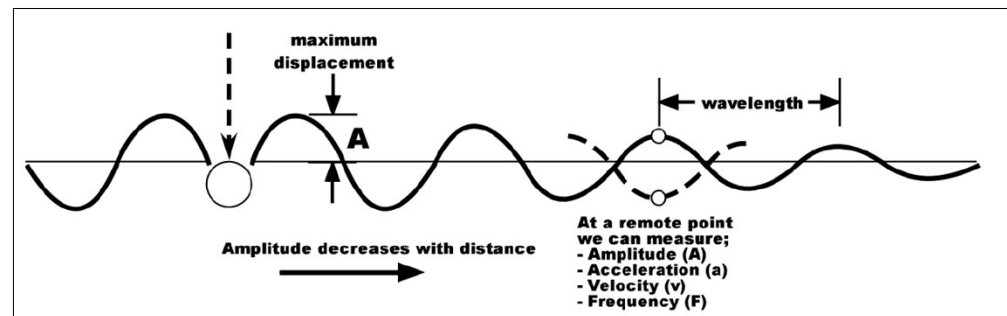
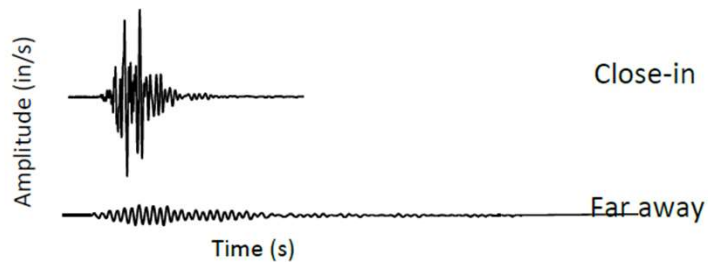
- ❑ Les vibrations de dynamitage s'atténuent avec la distance comme une pierre lancée à l'eau

- ❑ **Près du sautage:**

- Amplitude élevée
- Fréquences élevées à très élevées

- ❑ **Loin du sautage:**

- Amplitude et fréquences diminuent au fur et à mesure que la distance augmente
- Durée du mouvement du sol, telle que mesurée par l'historique temporel, peut augmenter jusqu'à 2 à 3 secondes ou plus lorsque l'onde de surface s'éloigne du site de dynamitage





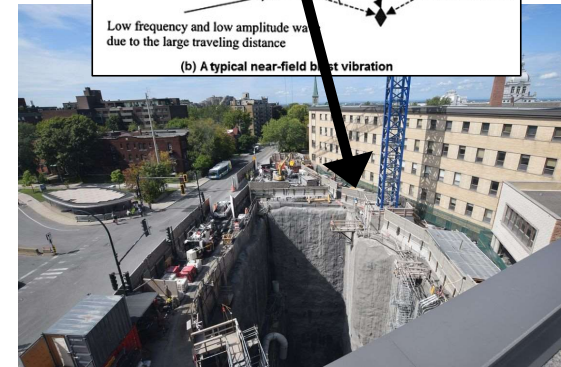
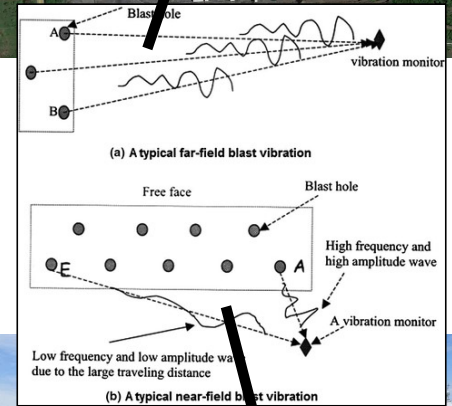
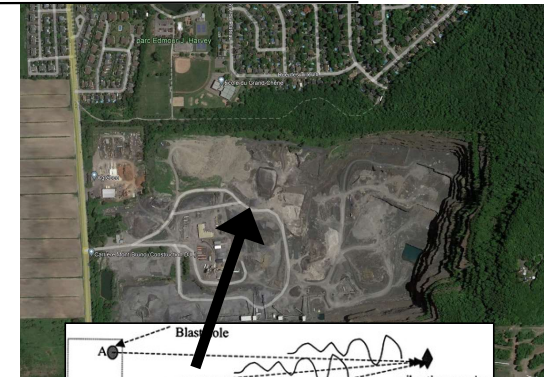
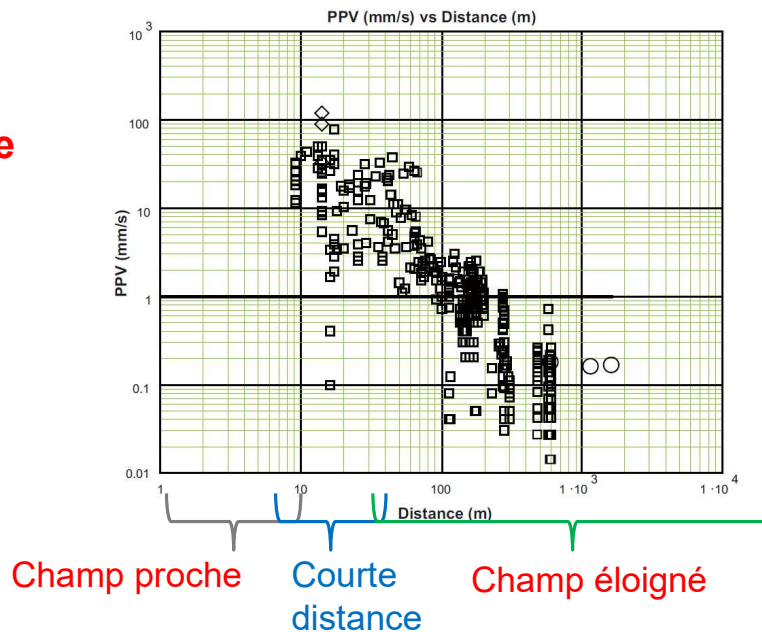


# Vibration dynamitage en carrière



- ❑ **Champ proche:** Souvent référé à une distance d'environ 1 à 1½ fois la longueur de la charge
- ❑ **Champ éloigné:** Correspond généralement à la zone où la distance entre les différents trous du sautage n'est pas significativement différente par rapport à la distance entre le centre du dynamitage et le point de mesure
- ❑ **Courte distance (ou champ moyen):** Correspond à la fin de la zone en champ proche et le début de la zone en champ éloigné

Dynamitage en carrière





# Analyse des données – Courbes d'atténuation



- ❑ Il existe plusieurs modèles pour l'estimation des vibrations de dynamitage
- ❑ Le modèle de Holmberg-Persson s'applique pour le champ proche
- ❑ **Le modèle du USBM** est largement utilisé dans le contexte de mesures en champ éloigné et également en champ moyen
- ❑ L'estimation des vibrations est beaucoup plus critique en début de chantier compte tenu du peu de données de disponible et de la faible marge de manœuvre
- ❑ Outils de calculs, d'analyse, de simulation et de suivi
- ❑ Chaque projet peut avoir un ou plusieurs modèles d'atténuation selon différents facteurs, tels que :
  - Distance
  - Point de mesure
  - Type de sautage
  - Type d'explosifs
  - Type de détonateurs
  - Séquence de mise à feu
  - Confinement du sautage
  - Localisation du sautage par rapport au point de mesure
  - Géologie (type de roche, dyke, joint fractures, etc.)
  - Mesures de mitigation mise en place (forage aligné simple et double, etc.)

TABLE I: SOME OF THE GROUND VIBRATION PREDICTOR MODELS DEVELOPED

Sl. No.	Predictor Model Name	Equation
1	USBM (Duvall and Fogelson, [7])	$v = k \left( \frac{D}{\sqrt{Q_{max}}} \right)^{-\beta}$
2	Ambraseys-Hendron [1]	$v = k \left( \frac{D}{\sqrt[3]{Q_{max}}} \right)^{-\beta}$
3	Indian Standard [4]	$v = k \left( \frac{Q_{max}}{D^{2/3}} \right)^{\beta}$
4	Langefors-Kihlstrom[11]	$v = k \left( \frac{Q_{max}}{D^{2/3}} \right)^{\beta}$
5	Holmberg-Persson [9]	$v = k \times Q_{max}^a \times D^b$
6	Ghosh- Daemen[8]	$v = k \left( \frac{D}{\sqrt{Q_{max}}} \right)^{-\beta} e^{-\alpha D}$
	Ghosh-Daemen[8]	$v = k \left( \frac{D}{\sqrt[3]{Q_{max}}} \right)^{-\beta} e^{-\alpha D}$
7	CMRI [12]	$v = n + k \left( \frac{D}{Q_{max}} \right)^{-1}$
8	Chakraborty, Murthy & Jethwa[5]	$v = \frac{K Q^{\alpha}}{D^{n \beta}}$



## Courbe d'atténuation des vibrations



### ❑ Atténuation des vibrations (formule empirique) :

$$V = K [d/w^{1/2}]^{\beta}$$

- V: Vitesse de particules (mm/s)
- W: Charge maximale par délai (kg)
- d: Distance (m)
- K: Constante de transfert d'énergie (ou de dynamitage)
- $\beta$  (ou  $\eta$ ): Constante de l'atténuation de l'onde (ou de site)

### ❑ La constante K (de dynamitage):

- Type de sautage (masse, tranchée, tunnel, etc.)
- Paramètres de forage et sautage (maille de forage, diamètre de forage, sous-forage, collet, type d'explosifs, hauteur du banc, etc.)
- Confinement du sautage (nombre de rangée, nombre de face libre, dégagement des faces libres, etc.)
- Orientation du tir
- Qualité du sautage





## Courbe d'atténuation des vibrations



### ❑ La constante $\beta$ (de site)

- Valeur négative (pente de la droite; atténuation)
- Type de roc au site du sautage et géologie entre le sautage et le point de mesure
- Compte tenu que la géologie n'est pas homogène, la constante  $\beta$  peut varier selon la direction de propagation des ondes
- Varie en fonction également de la présence d'eau dans les sols et le massif rocheux
- Par conséquent, la qualité du roc (fracturation, failles, joints) et le type de géologie entre le point de mesure et le tir auront une influence sur l'atténuation des ondes, donc de la constante  $\beta$
- Plus la valeur de  $\beta$  est faible (proche de -1.0), moins l'atténuation est rapide (roche dure et saine par exemple)



# Courbe d'atténuation des vibrations



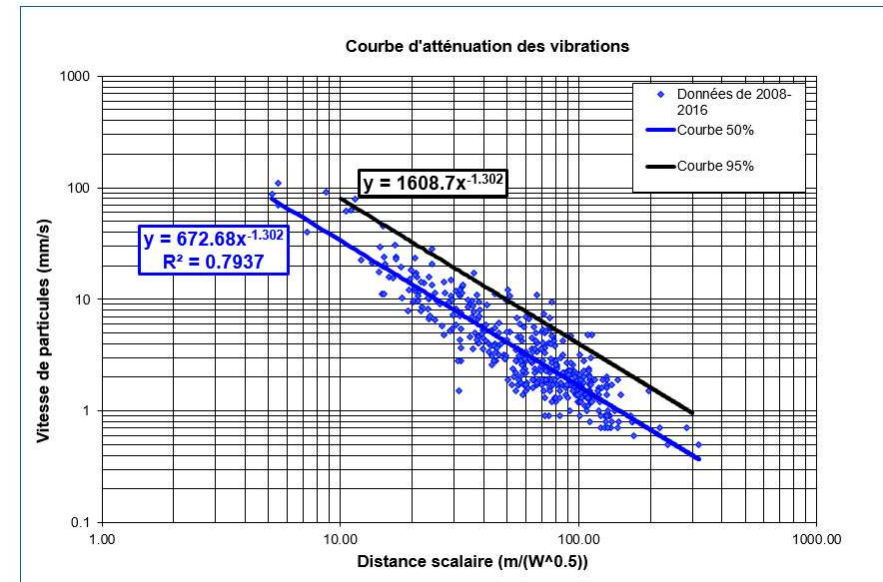
## □ Valeurs de base pour K et $\beta$

- Selon ISEE
  - $\beta = -1.6$  en moyenne mais rarement inférieure à  $-1.0$  et rarement supérieure à  $-2.0$
  - $K = 1140$  (médiane)
  - $K = 1725$  (90 % de confiance)
  - $K = 4316$  (tir très confiné)

## □ Formule de Comeau; $\beta = -1$

- $V = K [w^{1/2} / d]$
- Valeurs typiques pour K (en métrique)
  - $K = 230$  (tir de faible profondeur, roc fracturé)
  - $K = 350$  (Tir de banc)
  - $K = 450$  (Volée de tunnel, tranchée)
  - $K = 575$  (Foncée initiale)

## Exemple d'une carrière sur la rive-sud





# Courbe d'atténuation des surpressions d'air



## Atténuation des surpressions d'air (formule empirique) :

- $P = K [d/w^{1/3}]^\beta$ 
  - P: Surpression d'air (Pa)
  - W: Charge maximale par délai (kg)
  - d: Distance (m)
  - K: Constante de transfert d'énergie
  - $\beta$  (ou  $\eta$ ): Constante de l'atténuation de l'onde

## Valeurs typiques médianes selon ISEE

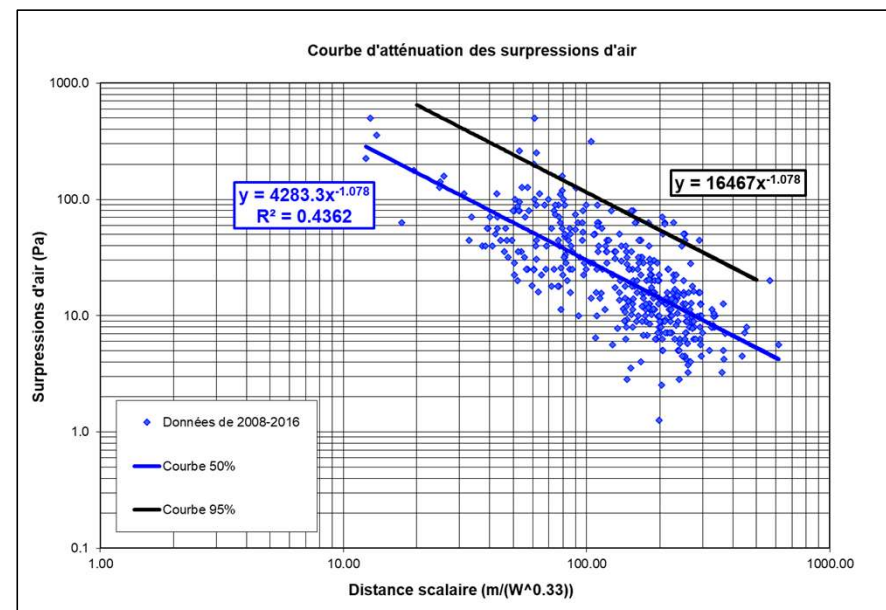
- $\beta = -1.1$
- $K = 2480$

Note :  $dB = 20 \log[P / P_0]$  où  $P_0 = 2 \times 10^{-5} Pa$

Ordre de grandeur de la pression acoustique :  
1 pascal (1 Pa = 1/100 000 de la pression atmosphérique).

Pression en Pa	Niveau sonore en dB
20	120
2	100
0,2	80
0,02	60
0,002	40
0,0002	20
0,00002	0

## Exemple d'une carrière sur la rive-sud





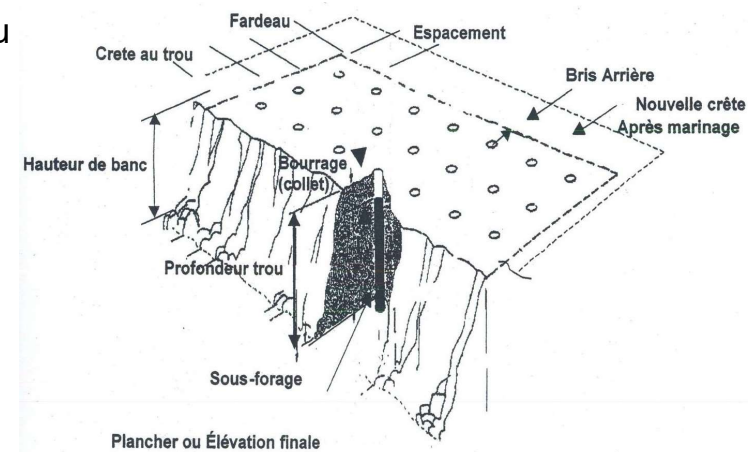


# Atténuation des vibrations et surpressions d'air



## ❑ Facteurs qui influencent l'atténuation

- Hauteur et type de matériel de bourrage des collets
- Précision des détonateurs
- Limitation de la charge d'explosifs maximale par délai de mise à feu
- Conception des tirs en fonction de la géologie (fractures et cavités dans les faces libres, etc.)
- Orientation de l'axe de dégagement du sautage
- Pré-cisaillement des limites d'excavation de la fosse
- Degré de confinement du sautage
- Contrôle des profondeurs de forage
- Régularité de la maille de forage
- Déviation des forages
- Direction des vents (surpressions d'air seulement)
- Phénomènes d'inversion de température (surpressions d'air seulement)



**Note:** Approprié à ce que la carrière, lorsque possible, procède à la mise à feu des sautages en présence de conditions météorologiques favorables (ciel dégagé, vent non directionnel vers les points sensibles)

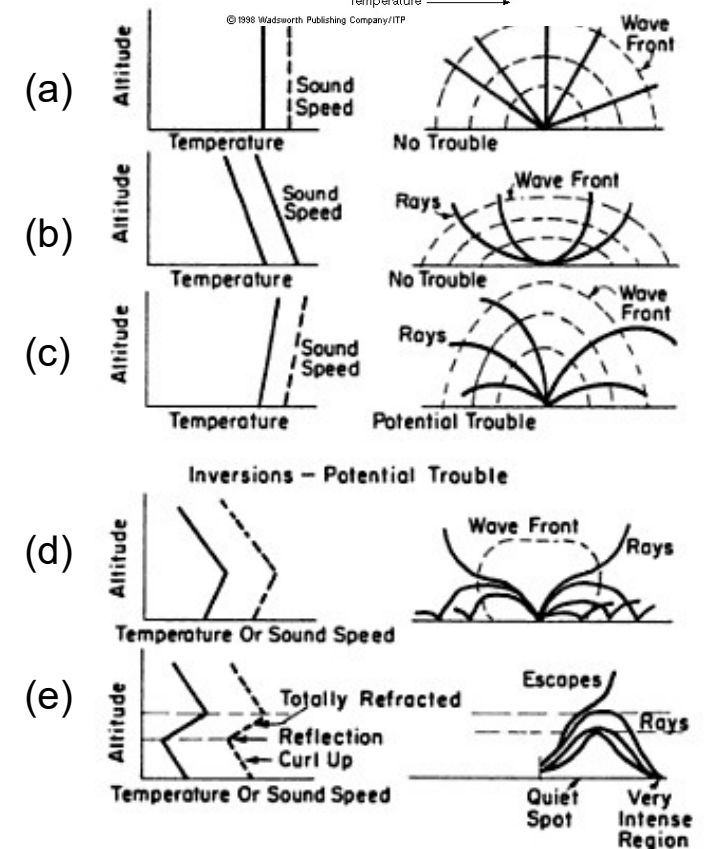
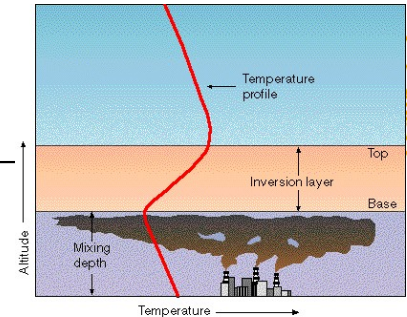


# Atténuation des surpressions d'air



## Effets du vent et de la température

- a) Montre le cas lorsque la température est constante avec l'altitude, ce qui implique une vitesse sonore constant avec l'altitude. Pour cette situation, l'onde sonore se propagent vers le haut (**conditions favorables pour opération de dynamitage**).
- b) Montre le cas lorsque l'air se refroidi en altitude. Pour cette situation également, l'onde sonore est réfractée vers le haut (**conditions favorables pour opération de dynamitage**).
- c), d) and e) montrent les conditions d'une inversion de température (la température augmente avec l'altitude), les ondes sonores vont être réfractées vers le bas. Dans cette situation, l'onde sonore se propagent sur de grandes distances car elle est réfractée vers le bas. Cela peut généralement arriver tôt le matin et tard dans l'après-midi et aussi surtout en hiver (**conditions défavorables pour opération de dynamitage**).





# Atténuation des vibrations et surpressions d'air

## Sommaire

- Vibrations maximales vers l'arrière du tir
- Surpressions d'air maximales à l'avant du tir (en général)
- Courbes d'atténuation variables selon direction de propagation
- Localisation des sismographes selon l'emplacement du tir
- Orientation du tir (1 ou 2 faces libres)
- Conditions météo







### **3. Exemples d'enregistrements de sismographes**



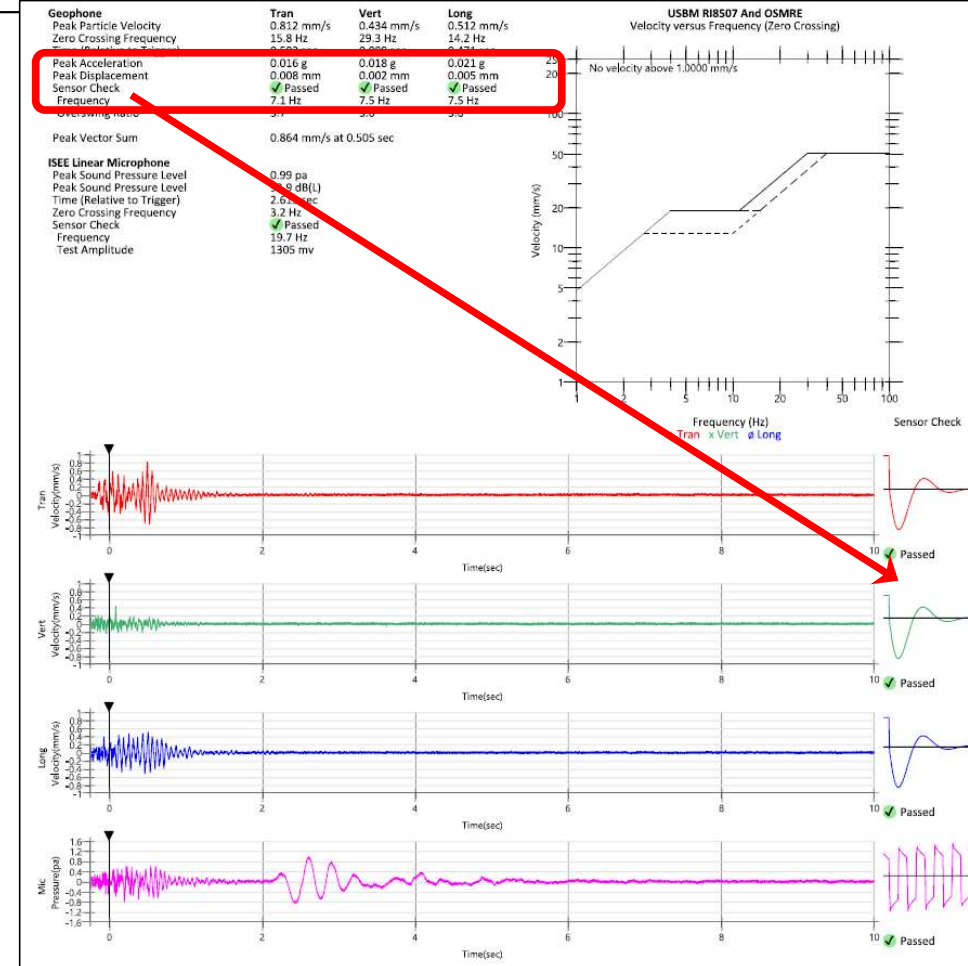
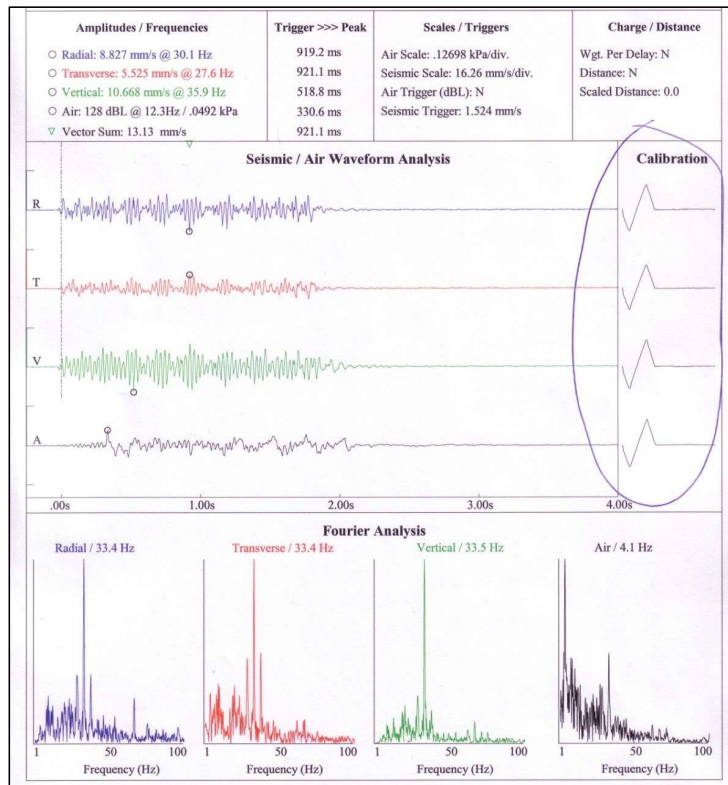


# Exemples d'enregistrements de sismographes



## Tir en carrière

- Signaux et courbes calibration normale

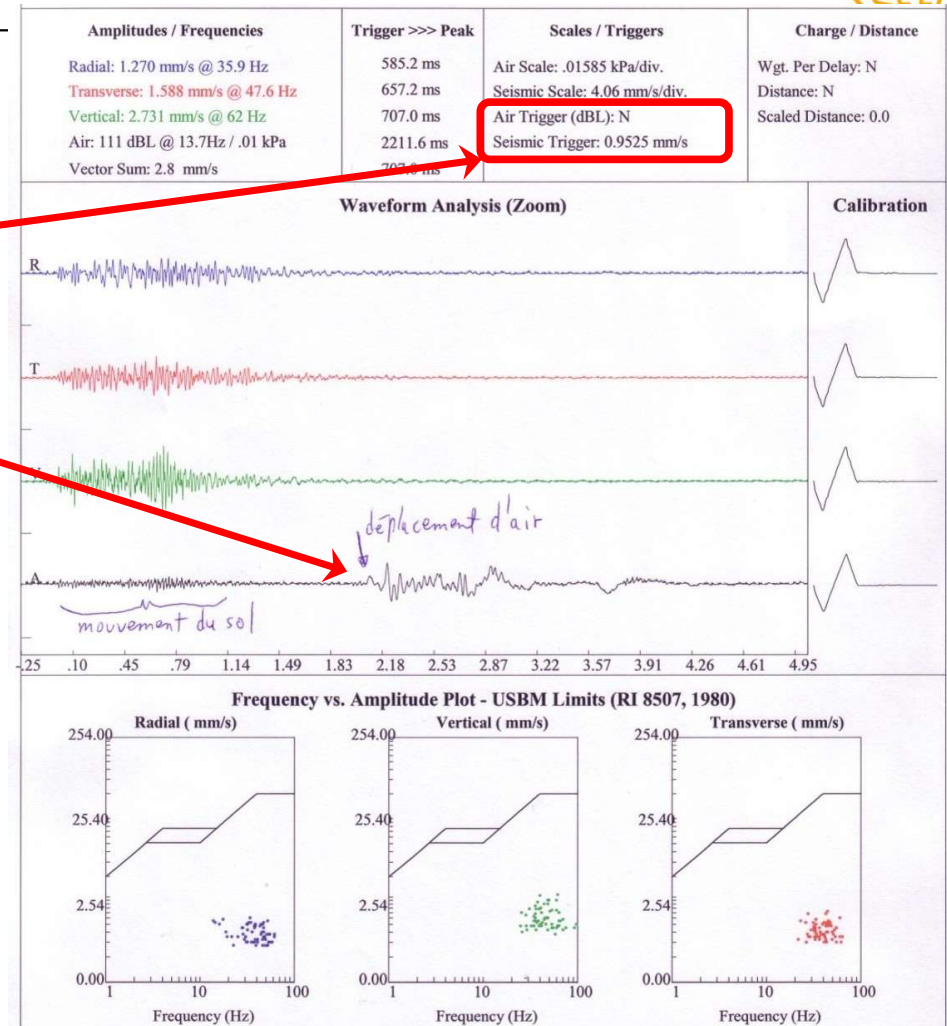




## Exemples d'enregistrements de sismographes



- Tir carrière à 765 m
- Seuil déclenchement vibration à 0,95 mm/s
- Aucun seuil de déclenchement pour le son (N)
- Suppression d'air du sautage vs distance (son dans l'air = 340 m/s)
- Suppression d'air enregistrée seulement parce que le sismographe a déclenché par la vibration
- Légère suppression d'air causées par le mouvement du sol

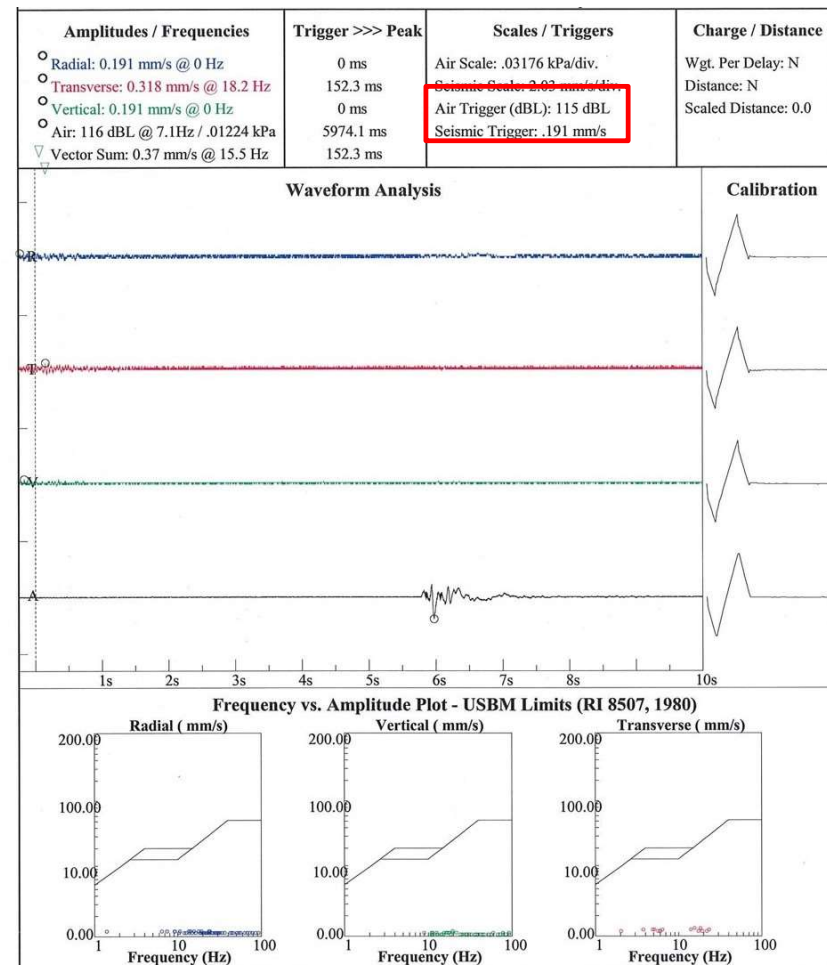




## Exemples d'enregistrements de sismographes



- Tir carrière à 2400 m
- Seuil déclenchement vibration à 0,19 mm/s pour suivi de plainte
- Seuil déclenchement du son à 115 dB
- Sismographe déclenché par la vibration
- Surpressions d'air vs distance (son dans l'air = 340 m/s)
- **Plainte = surpressions d'air**





## Exemples d'enregistrements de sismographes



- Tir carrière à 2100 m (suivi de plainte)
- Seuil déclenchement vibration à 0,25 mm/s
- Seuil déclenchement du son à 110 dB
- **Vibrations = <0.25 mm/s**
- Sismographe déclenché par le son (111 dB)
- Surpressions d'air vs distance (son dans l'air = 340 m/s)
- Plainte = surpressions d'air

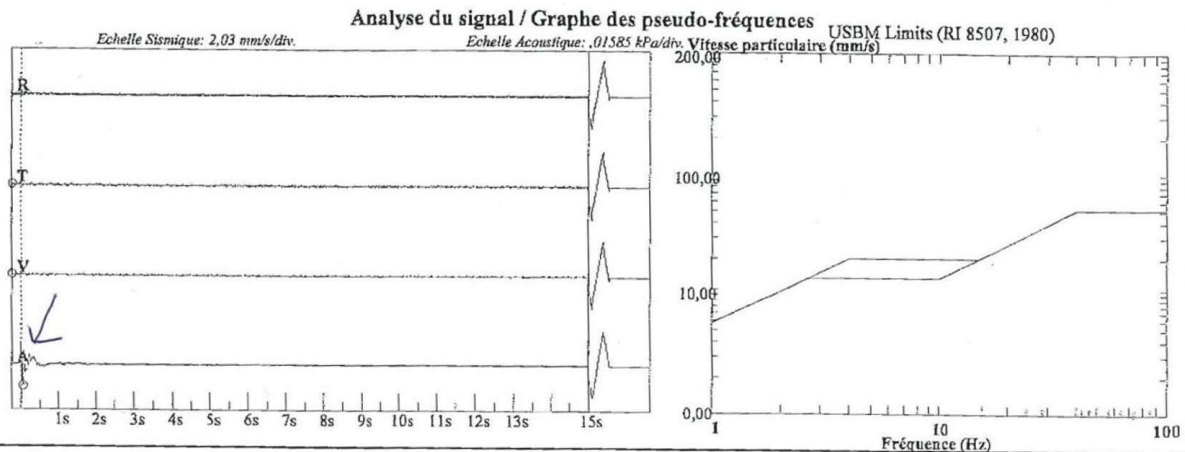
Gain: 2

Voie	Seuil: 254 mm/s	Transversal	Vertical
○ Vitesse particulière (mm/s)	0,127	0,064	0,064
Pseudo-Fréquence (Hz)	0,00	0,00	0,00
Smax/Trigger	37,1	0	0

Résultante: 0,14 mm/s @ 15,5 Hz

Gain: 1

Mesure	Valeur	Seuil: 110 dBL
kPa	,00749	58,6
dBL	111	
Hz	3,1	



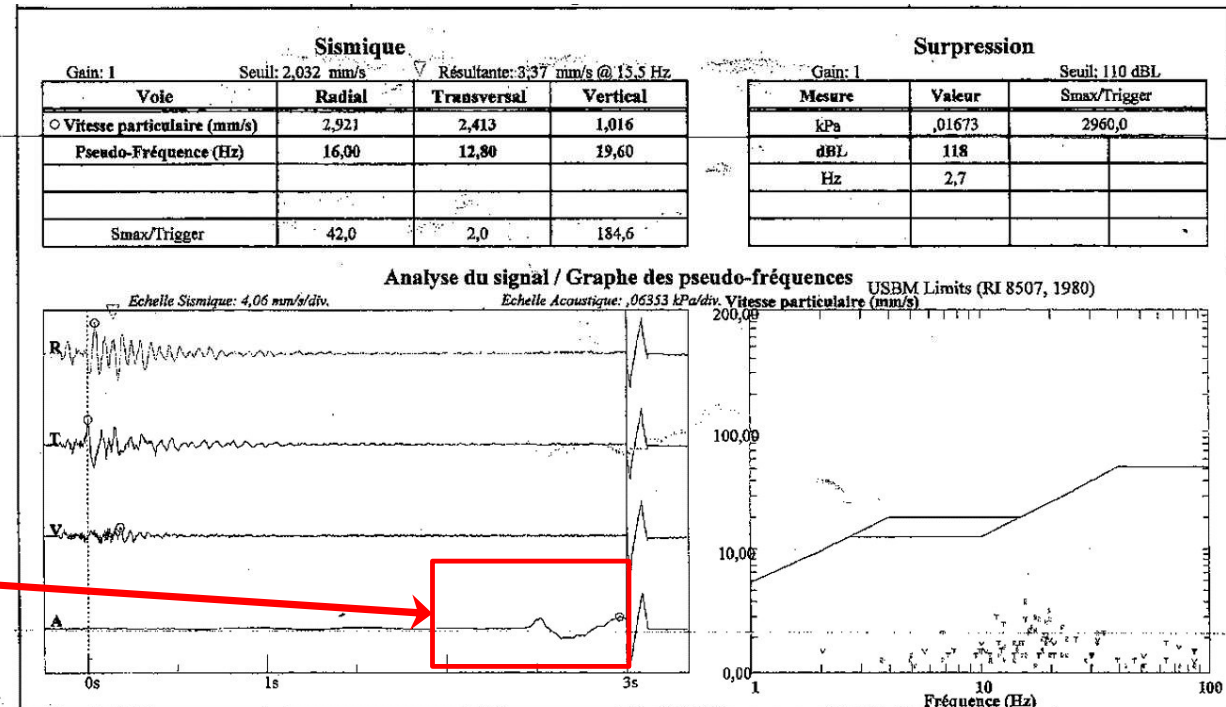




# Exemples d'enregistrements de sismographes



- Tir carrière
- Seuils à 2 mm/s et 110 dB
- Surpressions d'air vs distance (son dans l'air = 340 m/s)
- Durée d'enregistrement de 3 secondes = trop court

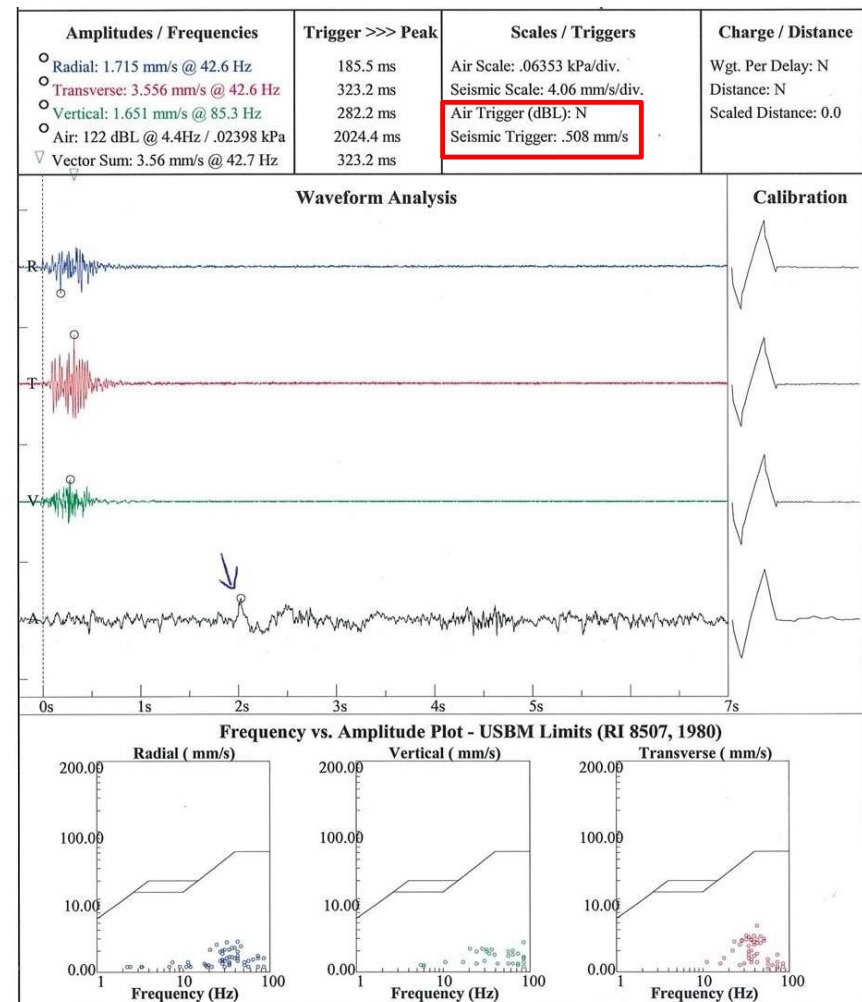




# Exemples d'enregistrements de sismographes



- Tir carrière à 700 m
- Seuil déclenchement vibration à 0,5 mm/s
- Aucun seuil de déclenchement pour le son (N)
- Surpressions d'air vs vent
- Surpressions d'air du dynamitage avec surpressions d'air causées pas le vent

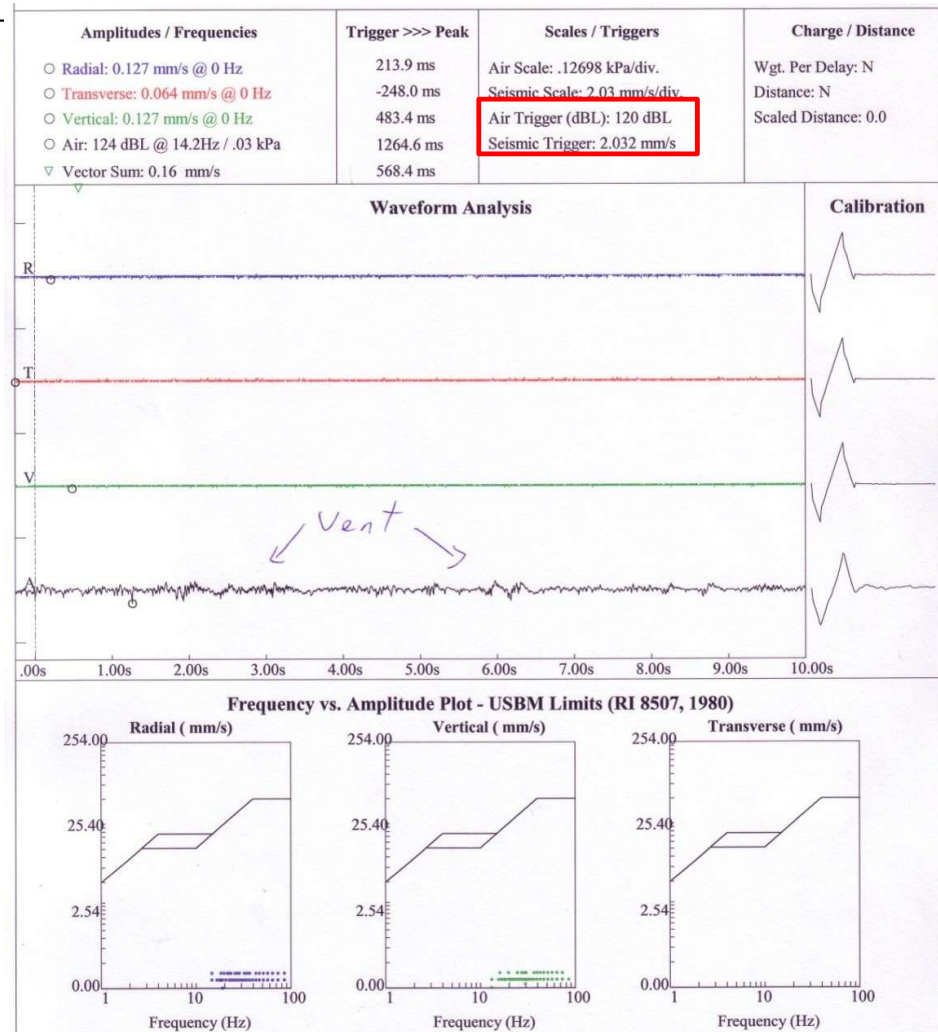




# Exemples d'enregistrements de sismographes



- Seuils de déclenchement à 2 mm/s et 120 dB
- Enregistrement du vent (124 dB)

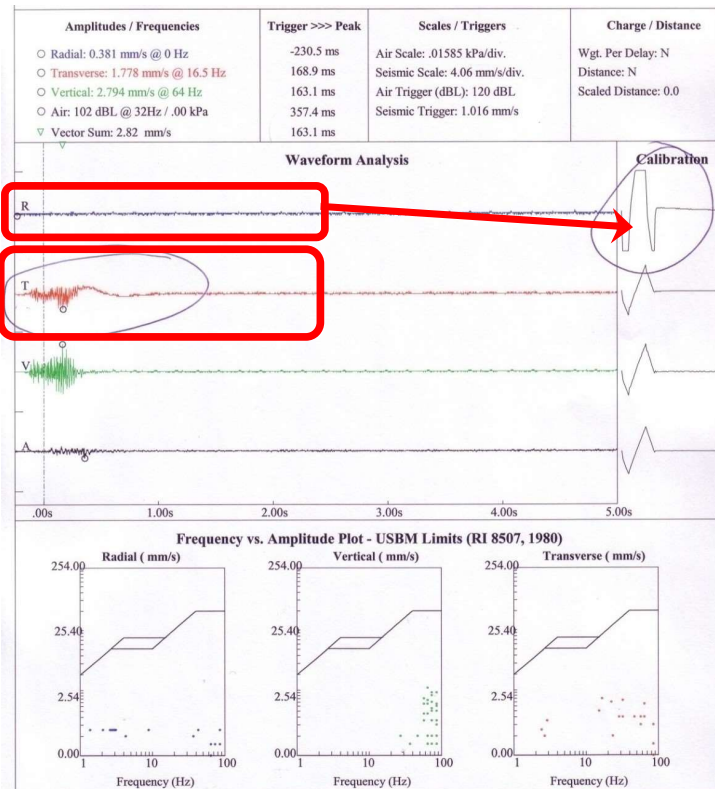




# Exemples d'enregistrements de sismographes



- Problème avec un des axes
- Glissement du géophone (induction basse fréquence sur le transversal) – Mauvaise installation

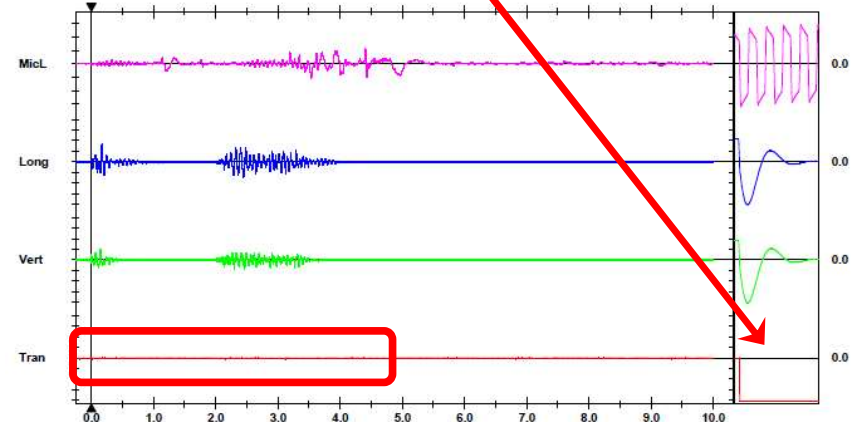
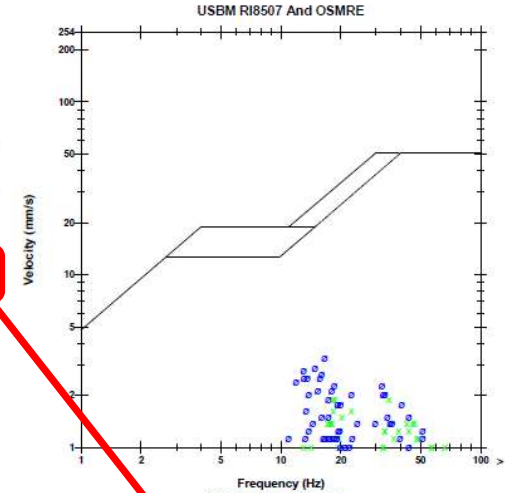


Date/Time Vert at 12:18:57 November 29, 2021  
 Trigger Source Geo: 1.000 mm/s, Mic: 120.0 dBL  
 Range Geo: 254.0 mm/s  
 Record Time 10.0 sec (Auto=7Sec) at 4096 sps

Serial Number BE15294 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
 Battery Level 5.9 Volts (Battery Low)  
 Unit Calibration February 25, 2021 by Instantel  
 File Name Q294J9HR.JL0

Notes  
 Location:  
 Clients:  
 User Name:  
 General:  
 Microphone Linear Weighting  
 PSPL 114.8 dBL(L) at 4.407 sec  
 ZC Freq 4.0 Hz  
 Channel Test Passed (Freq = 19.7 Hz Amp = 697 mv)

PFV Tran Vert Long mm/s  
 ZC Freq 0.381 1.905 3.302 Hz  
 Time (Rel. to Trig) 0.002 0.146 0.169 sec  
 Peak Acceleration 0.108 0.106 0.106 g  
 Sensor Check Check Passed Passed  
 Frequency 1024.0 7.4 7.5 Hz  
 Overswing Ratio 0.0 4.0 4.0  
 Peak Vector Sum 3.324 mm/s at 0.169 sec



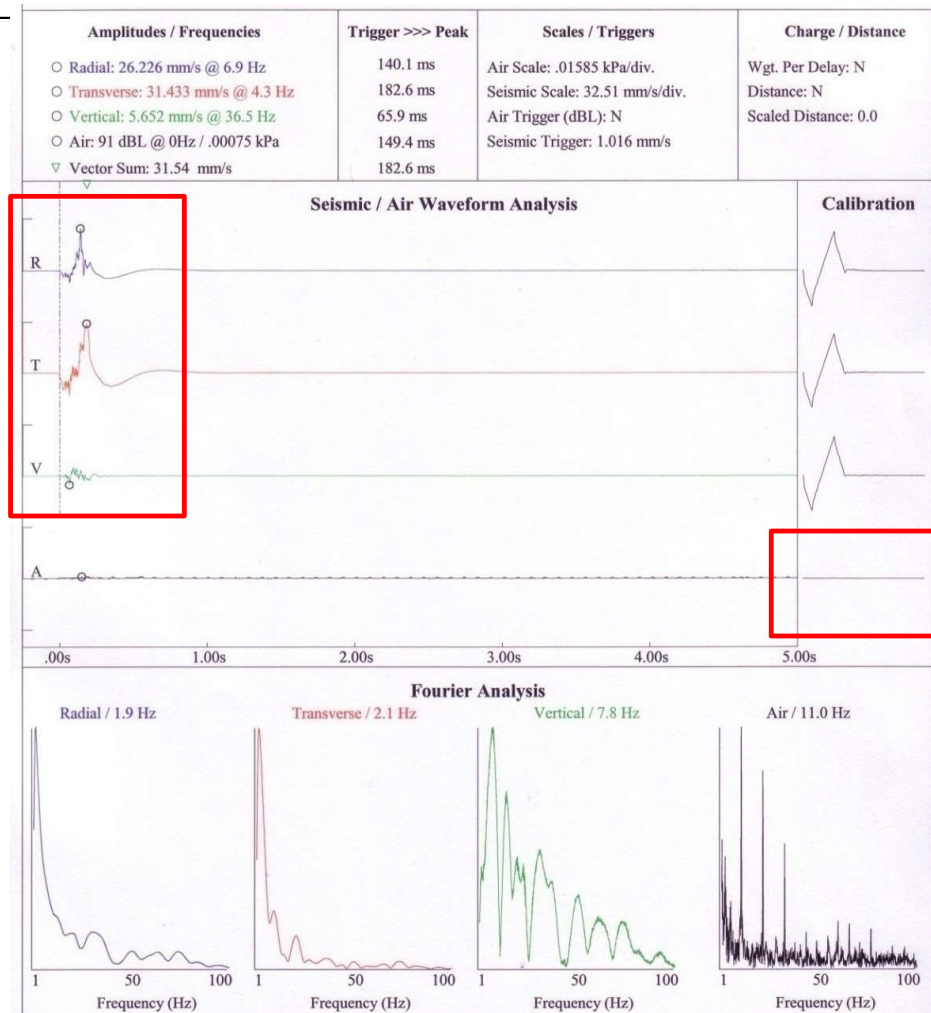




# Exemples d'enregistrements de sismographes



- Géophone accroché
- Microphone pas installé



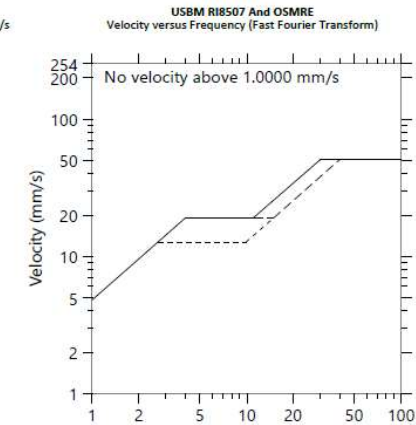


# Exemples d'enregistrements de sismographes

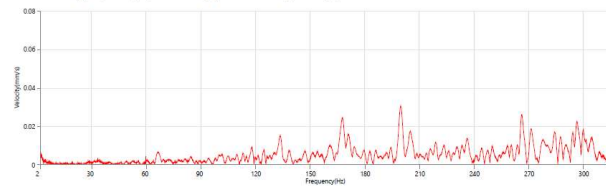


- Sautage en construction
- Fréquences élevées et de courte durée

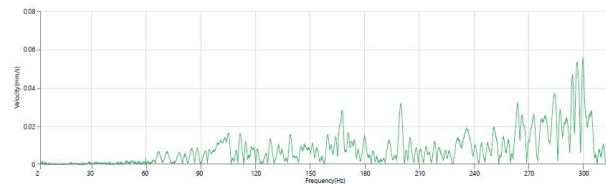
Geophone	Tran	Vert	Long
Peak Particle Velocity	7.007 mm/s	10.396 mm/s	11.768 mm/s
Zero Crossing Frequency	>100 Hz	>100 Hz	>100 Hz
Time (Relative to Trigger)	0.302 sec	0.317 sec	0.152 sec
Peak Acceleration	1.478 g	1.603 g	1.659 g
Peak Displacement	0.004 mm	0.007 mm	0.028 mm
Sensor Check	✓ Passed	✓ Passed	✓ Passed
Frequency	7.3 Hz	7.5 Hz	7.1 Hz
Overswing Ratio	3.3	3.5	3.7
Peak Vector Sum	13.256 mm/s at 0.317 sec		



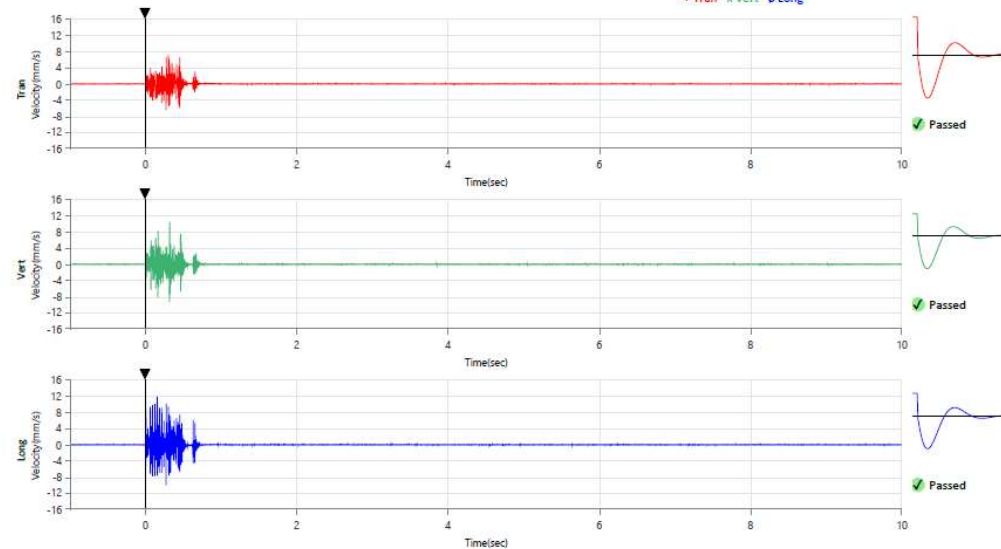
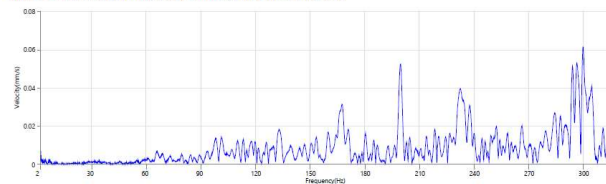
Tran - Dominant Frequency 199.9 Hz, Amplitude 0.031 mm/s (Peak Particle Velocity: 7.007 mm/s)



Vert - Dominant Frequency 299.9 Hz, Amplitude 0.056 mm/s (Peak Particle Velocity: 10.396 mm/s)



Long - Dominant Frequency 300.1 Hz, Amplitude 0.061 mm/s (Peak Particle Velocity: 11.768 mm/s)



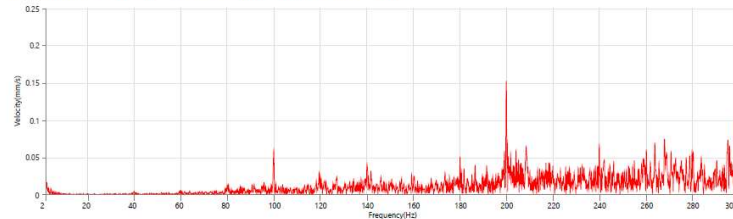


# Exemples d'enregistrements de sismographes

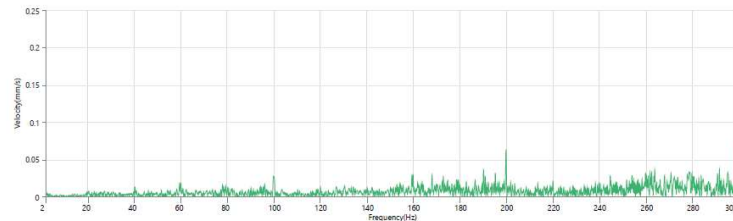


## — Sautage en tunnel (longs délais et fréquences élevées)

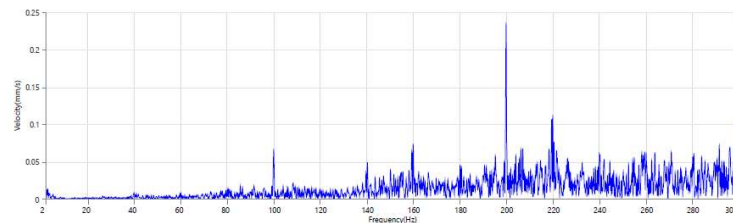
Tran - Dominant Frequency 199.9 Hz, Amplitude 0.152 mm/s (Peak Particle Velocity: 14.108 mm/s)



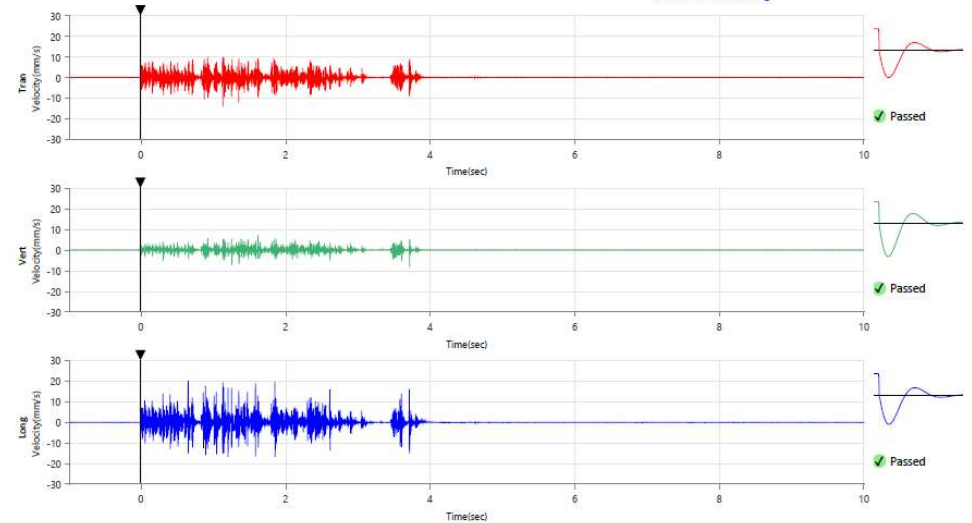
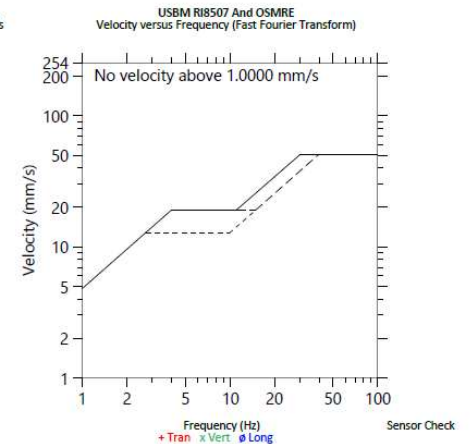
Vert - Dominant Frequency 299.9 Hz, Amplitude 0.073 mm/s (Peak Particle Velocity: 8.323 mm/s)



Long - Dominant Frequency 199.8 Hz, Amplitude 0.234 mm/s (Peak Particle Velocity: 20.099 mm/s)



Geophone	Tran	Vert	Long
Peak Particle Velocity	14.108 mm/s	8.323 mm/s	20.099 mm/s
Zero Crossing Frequency	>100 Hz	>100 Hz	>100 Hz
Time (Relative to Trigger)	1.130 sec	3.714 sec	0.651 sec
Peak Acceleration	2.310 g	1.560 g	3.831 g
Peak Displacement	0.009 mm	0.005 mm	0.013 mm
Sensor Check	✓ Passed	✓ Passed	✓ Passed
Frequency	7.3 Hz	7.5 Hz	7.1 Hz
Overswing Ratio	3.3	3.4	3.7
Peak Vector Sum	21.926 mm/s at 1.131 sec		





# Exemples d'enregistrements de sismographes



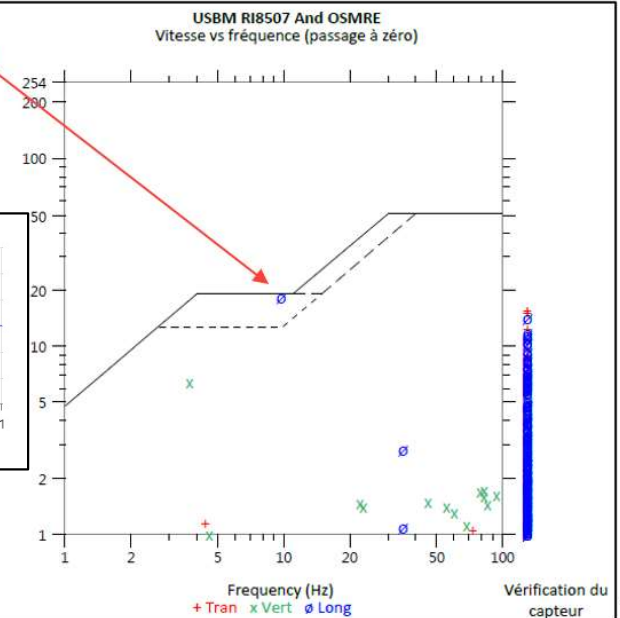
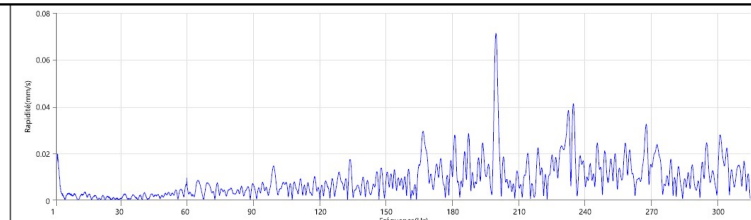
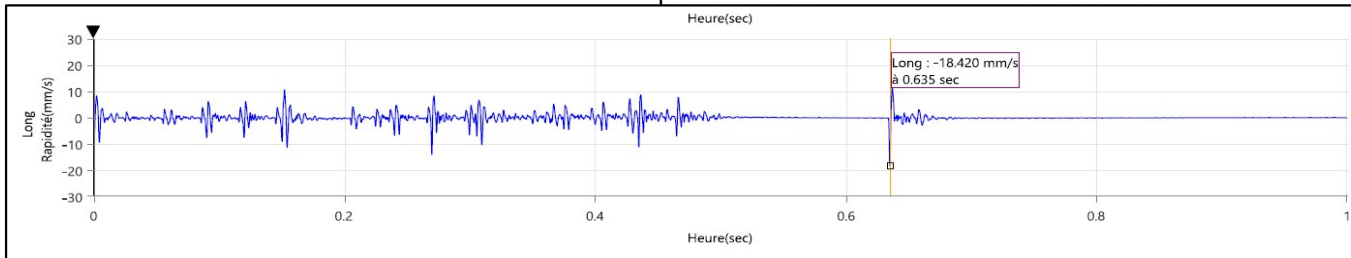
## ❑ Passage à zéro ("zero crossing") :

- Plusieurs auteurs importants, dont Charles Dowding et David Siskind ainsi que plusieurs normes telles que la DIN 4150 et le BS 7385-2, s'entendent sur le fait que l'utilisation de la technique de passage à zéro pour déterminer les fréquences demeure une technique simplifiée qui peut être beaucoup moins précise pour des formes d'onde plus complexes. Tous recommandent d'utiliser également d'autres analyses pour déterminer les fréquences des signaux de vibrations, surtout dans un contexte de formes d'onde complexe

**Aucune basse fréquence:**

- Période de 0,005 sec
- Fréq = 200 Hz
- TFR

Geophone	Tran	Vert	Long
Le pic de vitesse des particules	15.882 mm/s	7.109 mm/s	18.420 mm/s
Fréquence de passage à zéro	>100 Hz	>100 Hz	9.8 Hz
Heure (par rapport au déclenchement)	0.154 sec	0.637 sec	0.635 sec
Pic accélération	2.165 g	1.708 g	3.140 g
Pic déplacement	0.046 mm	0.039 mm	0.011 mm
Vérification du capteur	✓ Réussi	✓ Réussi	✓ Réussi
Fréquence	7.5 Hz	7.3 Hz	7.1 Hz
Ratio suroscillation	3.9	4.5	4.4
Pic somme vectorielle	19.920 mm/s à 0.635 sec		



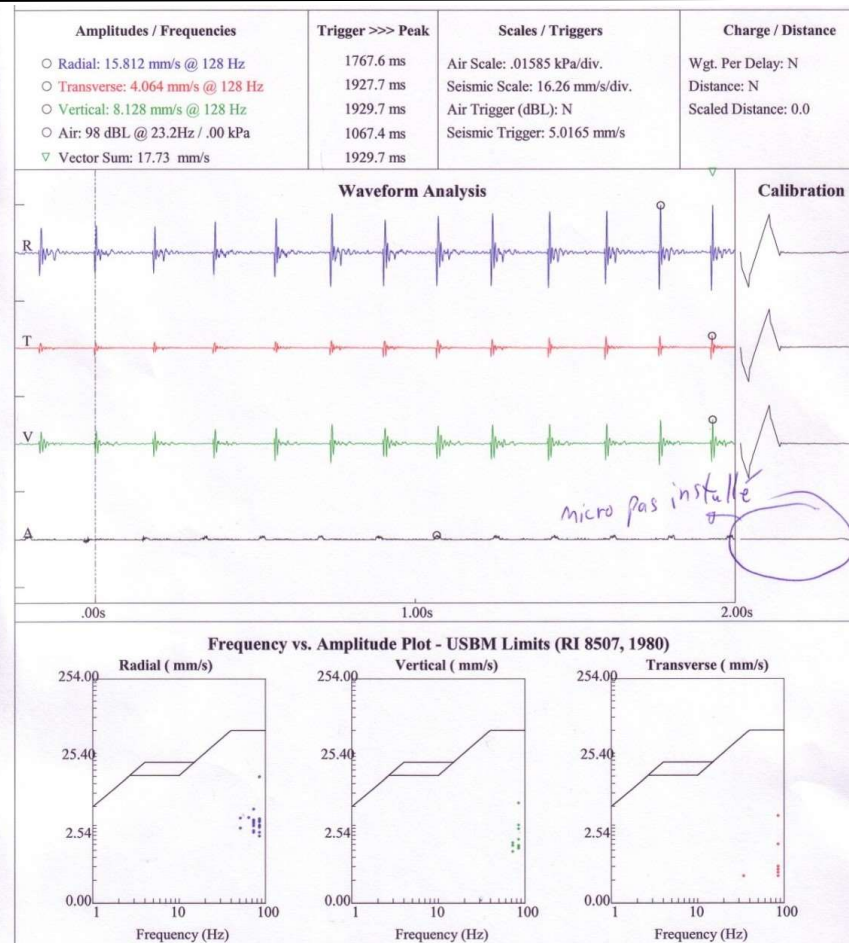




# Exemples d'enregistrements de sismographes



- Marteau hydraulique
- Coups rapprochés
- Fréquences élevées
- Microphone non installé





## **4. Critères de dommages, sensibilité des gens et suivi de plaintes**



## Critères de dommages aux structures



- Vibrations perceptibles par les citoyens et craintes de voir apparaître des dommages sur leur bâtiment (généralement non justifiées)
- Plus de 40 causes de dommages aux structures, autres que les vibrations
- Règlement RCS du Québec
  - 10 mm/s aux structures (10% des sautages à 15 mm/s)
  - 126 dBL (20% des sautages à 130 dBL)
- Critère du USBM (RI-8507, 1980)
  - Couramment utilisé au Canada et en Amérique du Nord
  - Limites de vibrations (mm/s) en fonction des fréquences (Hz) des ondes sismiques
    - ✓ 19 mm/s à 50 mm/s entre 15 et 40 Hz
    - ✓ 50 mm/s pour 40 Hz et plus
  - Limite sécuritaire de 128 dB pour les surpressions d'air
- Directive 019 sur l'industrie minière au Québec (MDDEP, 2005, 2012 et 2025)
  - ✓ 12,7 mm/s
  - ✓ 128 dBL



# Critères de dommages aux structures



## — Critères de vibrations

- *USBM-OSMRE*
- *128 dB*

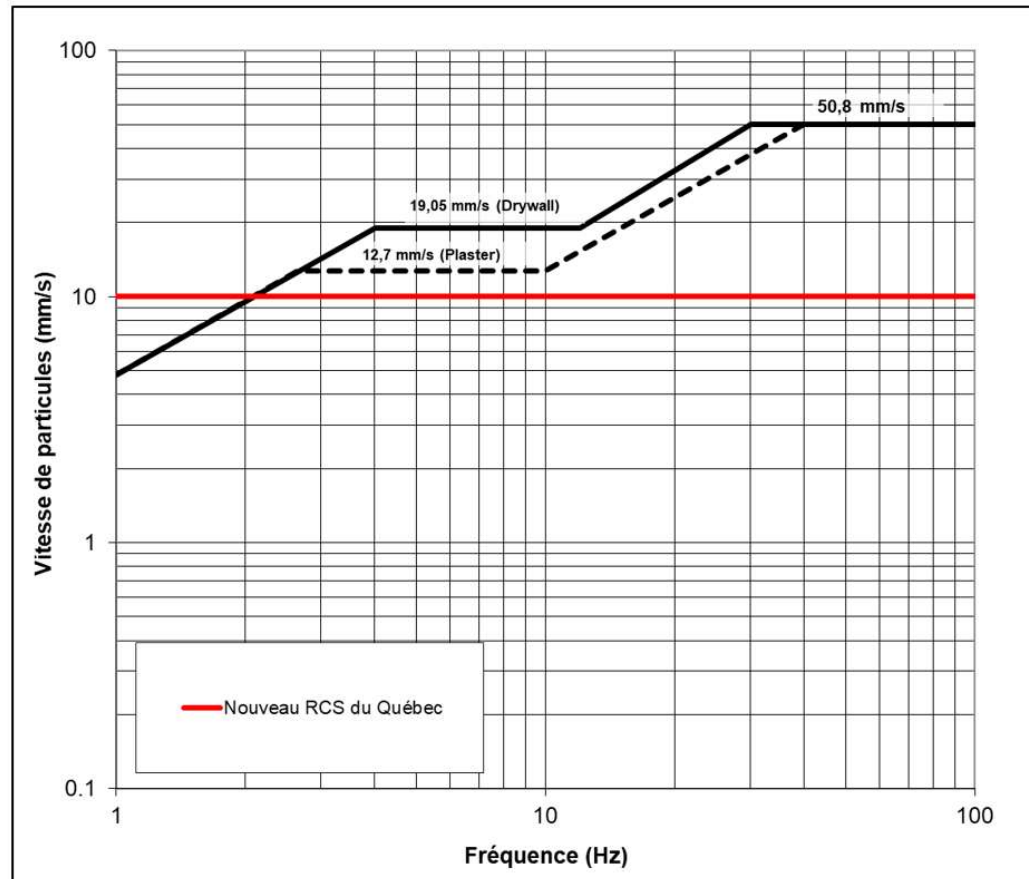


Figure 4-1 - Vitesse de particules maximum admissible en fonction de la fréquence des vibrations des dynamitages (Courbe limite établie par le USBM, RI-8507, 1980 et avec révision de l'OSMRE)

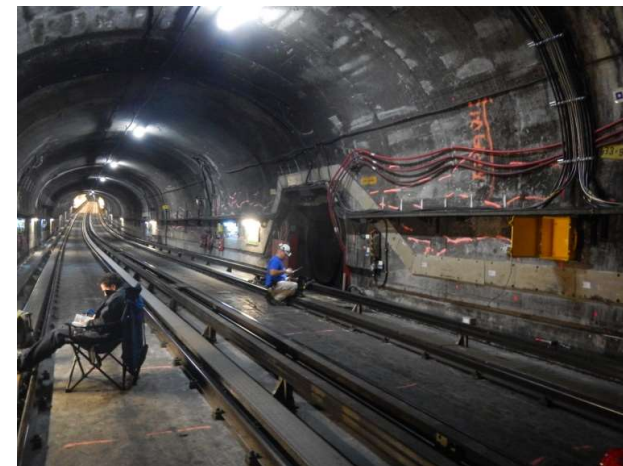




# Critères de dommages aux structures



- Ville de Montréal – Chapitre E6 (Règlement sur les excavations)
  - 25 mm/s
- Énergir – Directives pour les travaux à proximité de nos réseaux (Info-excavation)
  - Demande d'autorisation et limites de 50 mm/s et 0,15 mm
- STM – Normes et critères de conception (en station vs en inter-station)
  - En station : 10 mm/s (jusqu'à 25 mm/s sous certaines conditions)
    - i. Si  $f \leq 4$  Hz,  $v \leq 5$  mm/s;
  - En inter stations
    - ii. Si  $4 \text{ Hz} < f \leq 15 \text{ Hz}$ ,  $v \leq 12,7$  mm/s;
    - iii. Si  $15 \text{ Hz} < f \leq 40 \text{ Hz}$ ,  $v \leq 25$  mm/s;
    - iv. Si  $f > 40 \text{ Hz}$ ,  $v \leq 50$  mm/s.
- MTQ – CCDG
  - Habitations : 25 mm/s
- Ontario
  - NPC-119 (Mines et carrières) : 12,5 mm/s et 128 dBL
  - OPSS-120 (Construction) : 20 mm/s ( $f \leq 40$  Hz) et 50 mm/s ( $f > 40$  Hz)
- Service de l'eau de la ville de Montréal (DÉEU, DRE et DEP) →



Type de conduite	Type d'évènement	Vitesse particulaire crête (PPV) maximale - mm/s
Intercepteur en béton enfoui dans le roc	Intermittent	35
	Continu	18
Collecteur en béton armé	Intermittent	35
	Continu	18
Collecteur en briques ou béton non armé	Toutes	3 ( $f \leq 8$ Hz) 5 ( $8 < f \leq 30$ Hz) 8 ( $f \geq 30$ Hz)
Aqueduc et égout (autre que collecteur et intercepteur) Conduites saines, telles que : ▪ Égout en béton armé. ▪ Aqueduc en fonte ductile.	Toutes	5 ( $f < 10$ Hz) 5 à 15 ( $10 \leq f < 50$ Hz) 15 à 20 ( $50 \leq f < 100$ Hz)
Aqueduc et égout (autre que collecteur et intercepteur) Conduites fragiles, telles que : ▪ Égout en béton, brique, grès, amiante-ciment. ▪ Aqueduc en fonte grise (joint en plomb), amiante-ciment.	Toutes	3 ( $f < 10$ Hz) 5 ( $10 \leq f < 50$ Hz) 8 ( $50 \leq f < 100$ Hz)



## Sensibilité des gens



- Êtres humains beaucoup plus sensibles aux vibrations que les structures (seuil de perception autour de 0,3 mm/s)
- Vibrations moins ressenties quand on est à l'extérieur qu'à l'intérieur, debout plutôt qu'assis, et assis plutôt qu'allongé
- Vibrations accompagnées de bruit paraîtront plus fortes
- Les activités humaines, les changements de température et le vent induiront sur la bâtisse des contraintes souvent supérieures à celles causées par un sautage sécuritaire
- Contrairement aux structures, les études des effets des vibrations sur les humains sont plus subjectives que pour les structures
- La norme ISO 2631-2 (principe directeur pour trouver des amplitudes acceptables à la réponse humaine) ne recommande plus de valeurs au-dessus desquelles des plaintes pourraient être exprimées, car elles s'étendent sur une plage trop large
- L'ISO 2631-2 donne seulement des principes directeurs concernant son application à la réponse humaine aux vibrations



## Sensibilité des gens

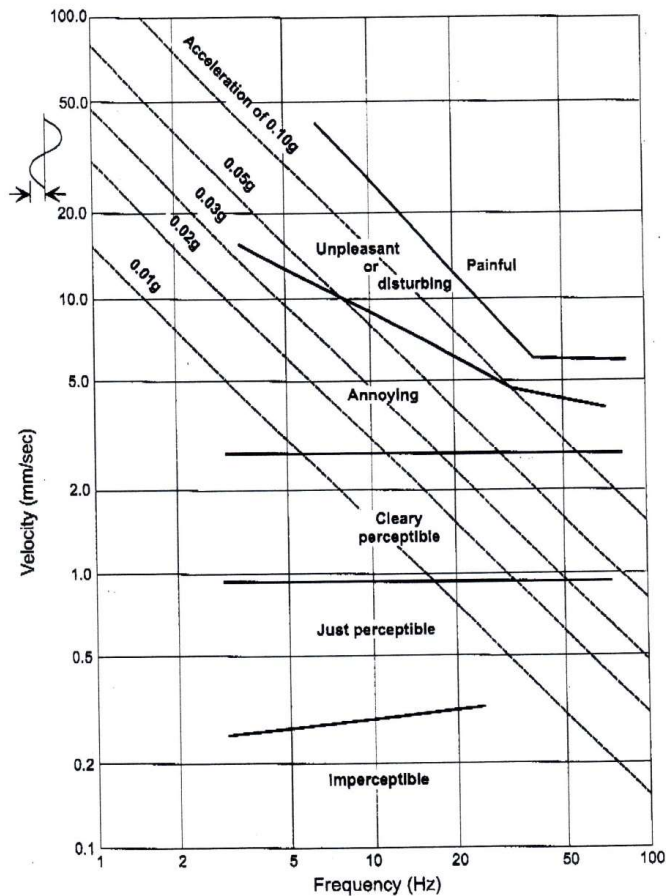


— **Grande variation de la tolérance aux vibrations selon les individus et en fonction des éléments suivants :**

- Type de vibrations;
- Durée de l'évènement (vibration et bruit d'impact moins dérangeants);
- **Effet de surprise;**
- Combinaison de l'effet de bruit à la vibration;
- Vibration d'objet à l'intérieur du bâtiment;
- Conditions météorologiques;
- Période de la journée;
- Fréquence de ce type d'évènement;
- Inquiétude relative au dommage potentiel;
- Durée de vie du projet;
- Acceptabilité sociale du projet;
- Âge de l'individu;
- Occupation de l'individu lors de l'évènement;
- Position de l'individu dans le bâtiment;
- Posture de l'individu lors de l'évènement.



## Sensibilité des gens



"Sensitivity of humans to vertical vibrations according to Reither and Melster."  
Reproduced from: Whiffin & Leonard, 1971

- Effets des vibrations sur les humains





## Sensibilité des gens



### — Valeur de surpression d'air entre 120 et 130 dB

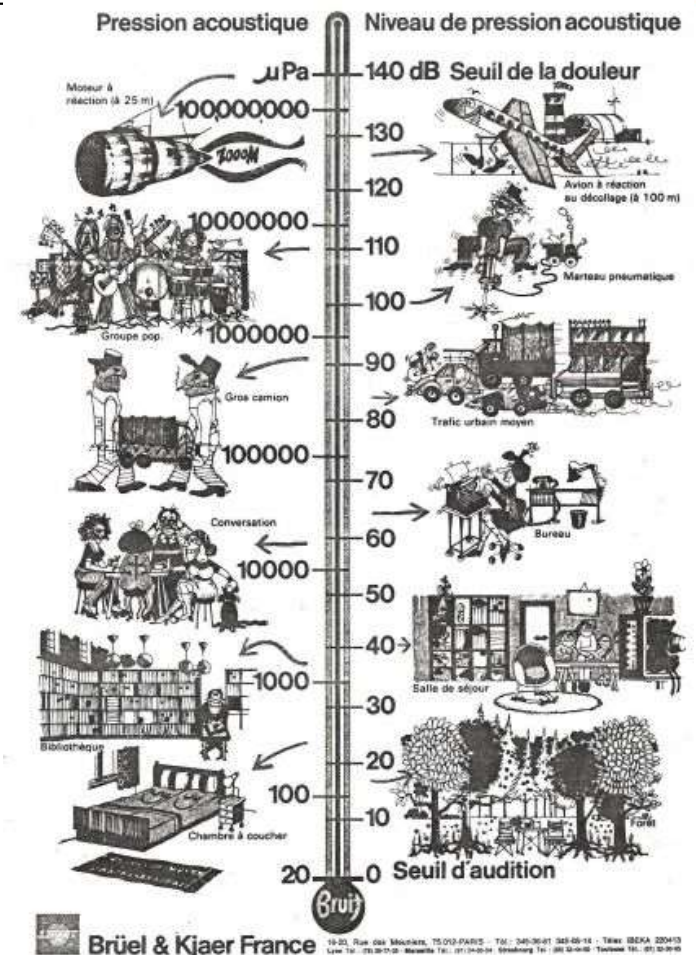
- Inconfortable (effet de surprise)
- Peut être de courte durée
- Sécuritaire pour les structures et les humains
- Vents de 25 km/h ont le même impact que des surpressions d'air de 128 dBL

### — Valeur de l'ordre de 110 à 115 dBL

- Niveau à peine perceptible à perceptible
- Peu de plaintes

### — Comparatif entre dB et différentes activités

- 60 dB \_\_\_\_\_ Conversation
- 80 à 90 dB \_\_\_\_\_ Trafic
- 100 dB \_\_\_\_\_ Marteau piqueur
- 110 dB \_\_\_\_\_ Concert de musique
- 130 à 140 dB \_\_\_\_\_ Feux d'artifice, avion à réaction au décollage
- 150 à 160 dB \_\_\_\_\_ Bris de fenêtre
- 180 dB \_\_\_\_\_ Bris structuraux





## Plaintes reliées au dynamitage



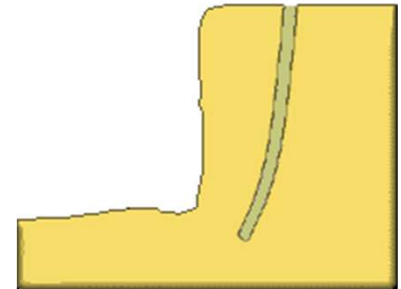
### — Causes potentielles de plaintes :

- Vibrations
- Surpressions d'air
- Projections
- Poussières
- Fumées de tir



### — Éléments contrôlables :

- Diamètre de forage
- Maille de forage et facteur de chargement
- Hauteur de banc
- Charge par délai
- Nombre de rangée par tir
- Orientation du sautage
- Contrôle qualité et bonnes pratiques (chargement, collet, trous façade, etc.)





## Plaintes reliées au dynamitage



- **Vibrations :**
  - Plainte généralement à l'intérieur d'un rayon de 1 km
- **Surpressions d'air :**
  - Généralement une cause probable de plaints pour des distances variant de 1 km à 3 km du sautage
  - Nuisance qui se déplace selon la direction des vents et la hauteur du plafond nuageux
  - Directement affectées selon les conditions météo
- **Poussières :**
  - 95% de la poussière du sautage est conséquente de la fragmentation instantannée du roc
  - Directement fonction des conditions d'eau dans le massif rocheux
  - Directement affectées selon la vitesse et direction des vents
  - Attente d'une accalmie des vents avant la mise à feu
  - Planifier le sautage selon les conditions météo



# Plaintes reliées au dynamitage



## — Suivi de plaintes :

- Être poli, professionnel et diplomate
- Informer les plaignants (et citoyens) sur les sautages de manière positive (sautage, impacts, mesures, etc.)
- Rencontre(s) du plaignant (personnel carrière, expert, sismographe, présences lors de plusieurs sautages)
- Expert
- Suivi vibrations et surpressions d'air
- Inspection du bâtiments (si requis)
- Inspection et suivi des puits d'eau (si requis)
- Suivi fissure existante
- Documentation (détail, tél., discussion, mesures, etc.)
- Bon voisinage

## — Programme de communication (Guide de bonnes pratiques de sautage du nouveau RCS):

- Rencontre(s) de citoyens et municipalités
- Avis de sautage et liste de distribution
- Régularité des horaires de sautage
- Programme de suivi et gestion des plaintes







# Remerciements



**MERCI BEAUCOUP**

**Francis Trépanier**

**Cell.: (514) 246-4572**

