



GKM Consultants

Atelier de formation | Suivi et contrôle des vibrations

Vincent Le Borgne Ph. D ing

Survol

- Les vibrations
 - Théorie
 - Indicateurs
 - Standards
- Comment mesurer les vibrations
 - Le géophone
 - Les stations de mesure

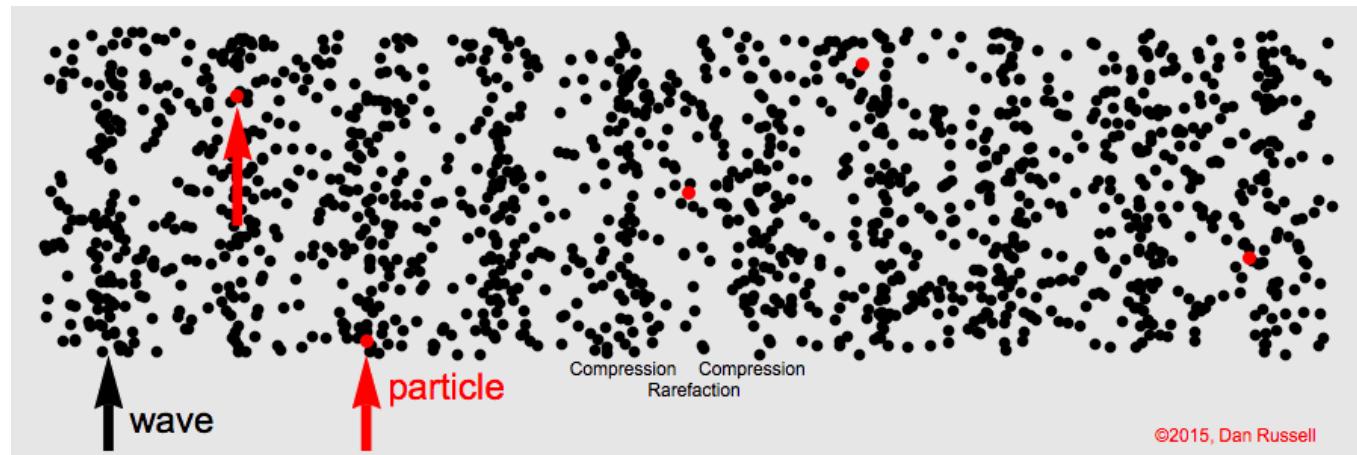
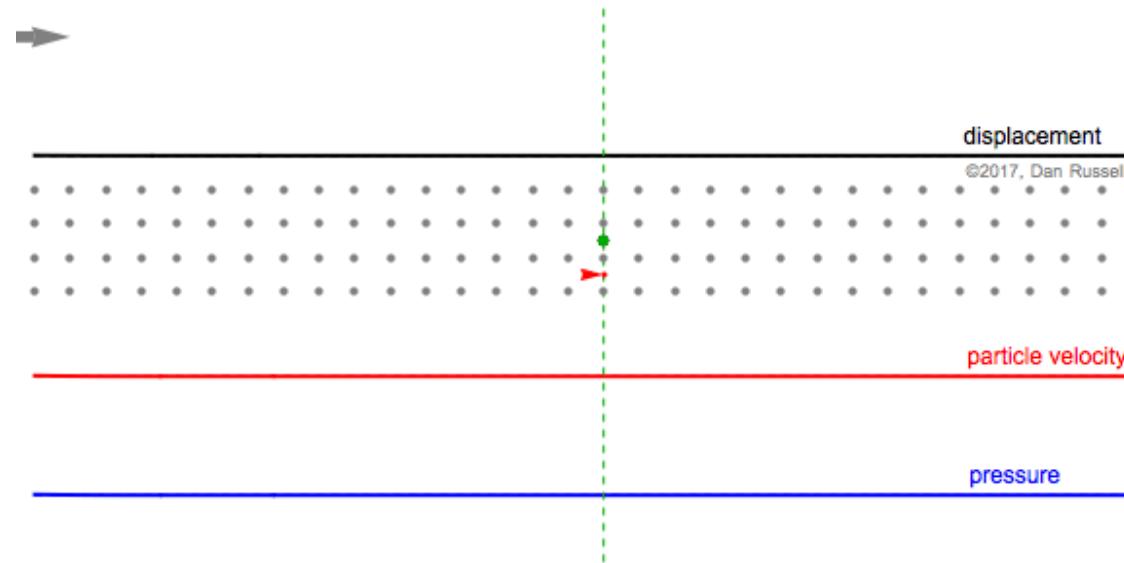
Vibrations

Qu'est-ce qu'une vibration?

Suivi des vibrations du sol

- Pourquoi y a-t-il une augmentation des demandes de suivi des vibrations?
 - Chantiers complexes en milieu urbain employant de la machinerie lourde
 - Protection d'infrastructures vieillissantes
 - Meilleure connaissance des sols faibles ou liquéfiables
 - Des mesures exactes permettent de mieux doser la force des dynamitages.
 - Protection d'équipements sensibles

Qu'est-ce qu'une onde?



Qu'est-ce qu'une onde?

Ondes sinusoïdales

Parameter	Expression	Unit	Definition
A		m	Amplitude – displacement amplitude from the mean position
T	$2\pi/\omega$	s	Period – time for repetition, time for a full cycle
ω	$2\pi/T$	rad/s	Angular frequency
f	$1/T, \omega/2\pi$	s ⁻¹ or Hz	Frequency
c	$f\lambda$	m/s	Wave propagation velocity
v	$2\pi f A$	m/s	Particle velocity
λ	c/f	m	Wavelength – distance between successive crests or troughs of a wave
φ		rad	Phase angle

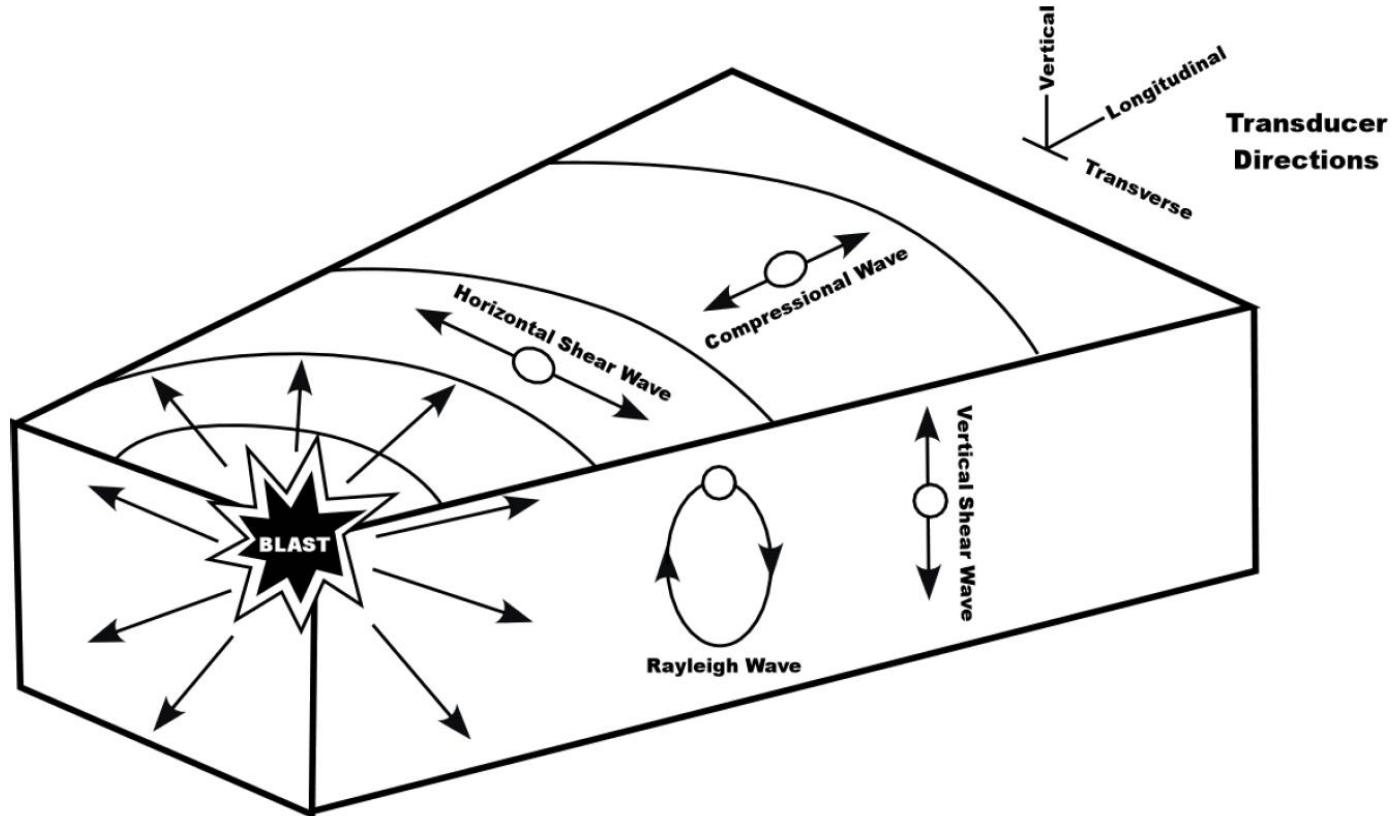
$$p(\omega, t, r) = Ae^{i(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}r)}$$

$$p(t) = A\sin(\omega t) + A_i\cos(\omega t)$$

Termes importants aux mesures de vibration du sol

- Vitesse de propagation
 - Vitesse de déplacement de l'onde (typiquement en m/s)
- Vitesse particulière
 - Vitesse à laquelle une particule se déplace autour de son point d'équilibre
- Déplacement particulaire
 - Distance de déplacement d'un point lors du passage de l'onde (typiquement en mm)
- Accélération
 - Accélération subie par un point (typiquement en g [9.8 m/s²])

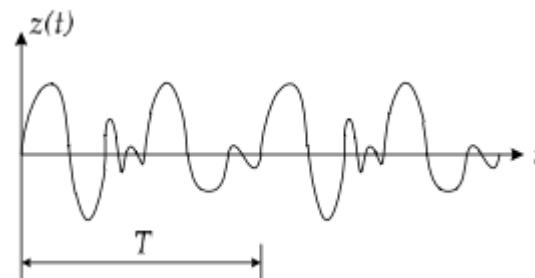
Types d'onde



Mouvement des particules associé à différents types d'ondes

Trains d'onde

- Les variations dans le temps peuvent aussi avoir un effet

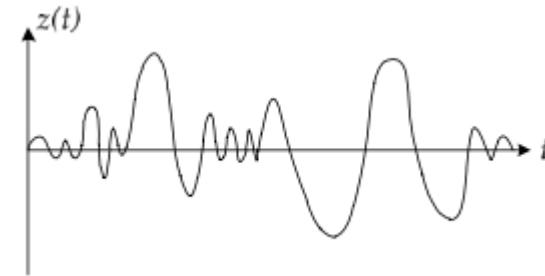


Continu (périodique)

Ex: Fonçage de pieux

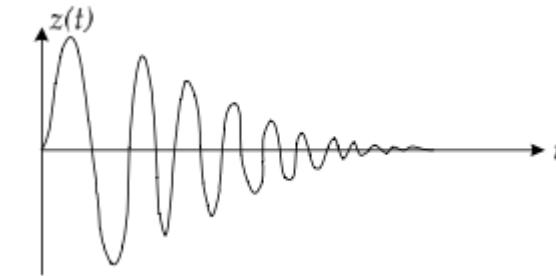
Plus dérangeant, plus dommageable

Seuils de dommage moins élevés



Aléatoire (continu)

Ex: Tremblement de terre



Transitoire

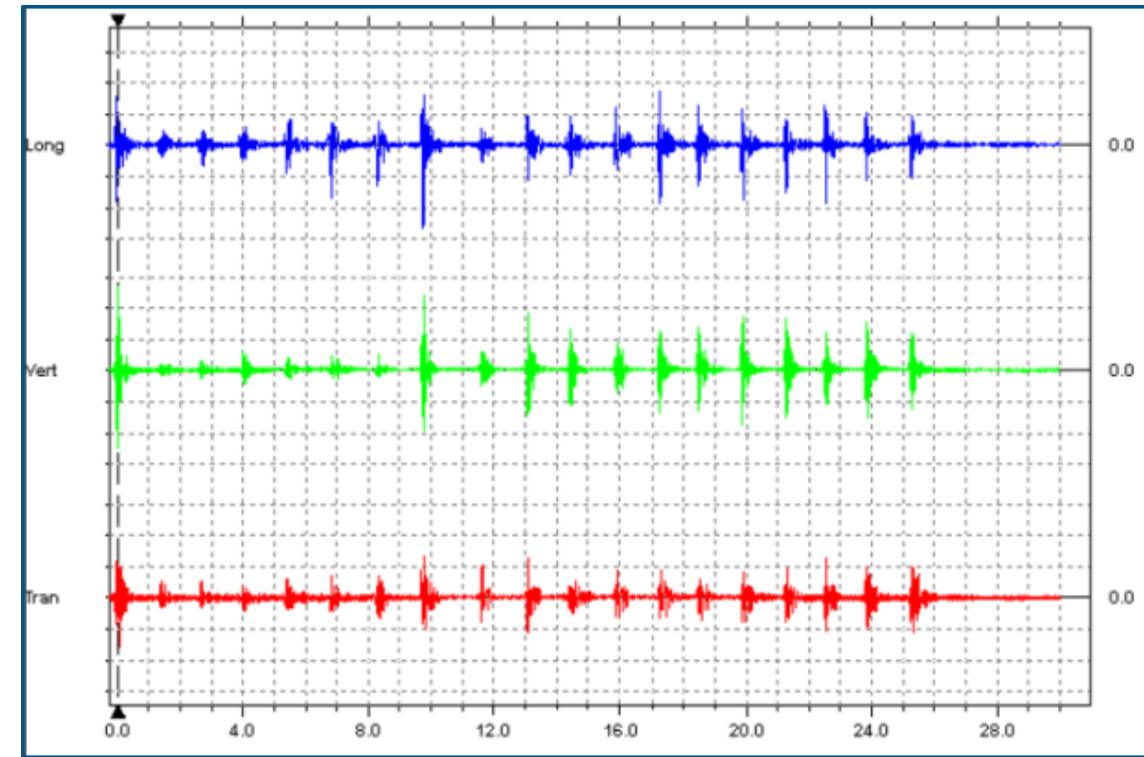
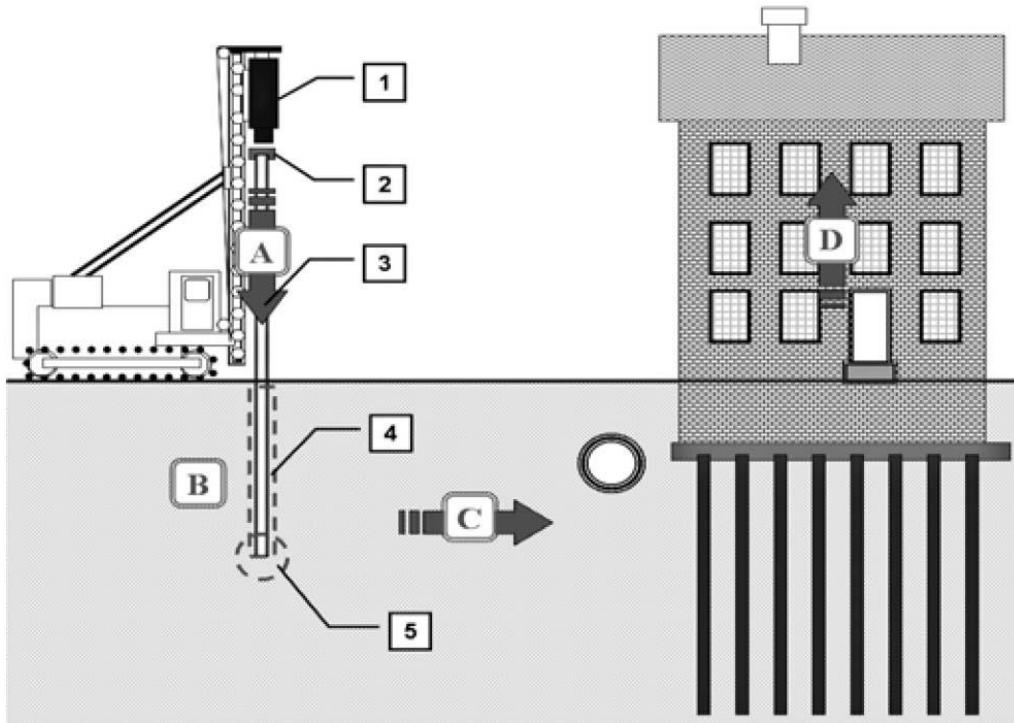
Sautage

Moins dérangeant, moins dommageable

Seuils de dommage + élevés

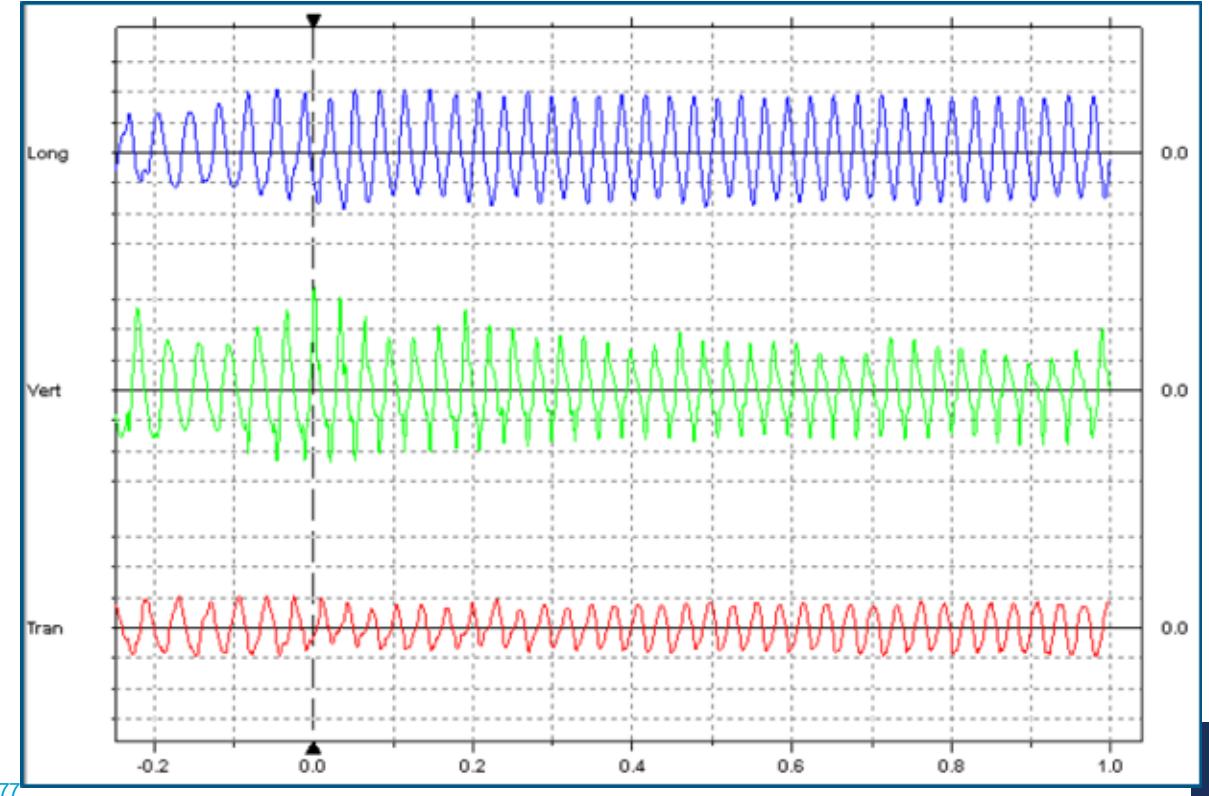
Caractéristiques des sources de vibration

- Battage de pieux



Caractéristiques des sources de vibration

- Fonçage de pieux par vibration/compaction par vibration
 - Source de vibration sinusoïdale et continue



Caractéristiques des sources de vibration

- Dynamitage
 - Évènements courts
 - Vitesse particulière maximale peut être très élevée

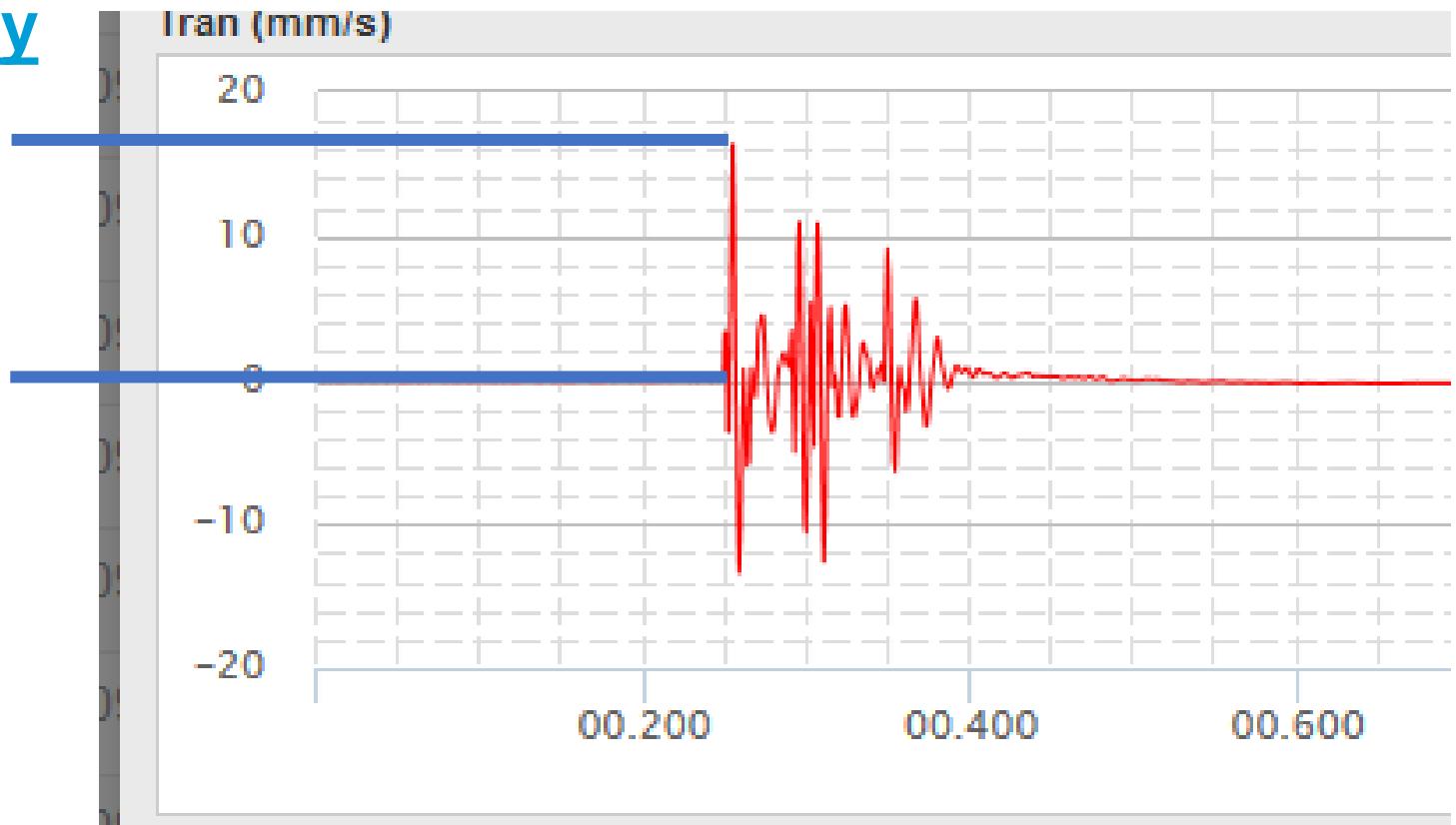


Indicateurs

- Les mesures sont généralement triaxiales où les trois axes sont orthogonaux :
 - Longitudinal (Long)
 - Vertical (Vert)
 - Transverse (Tran)
- Typiquement, le capteur nommé longitudinal est pointé vers la source de vibration

Indicateurs

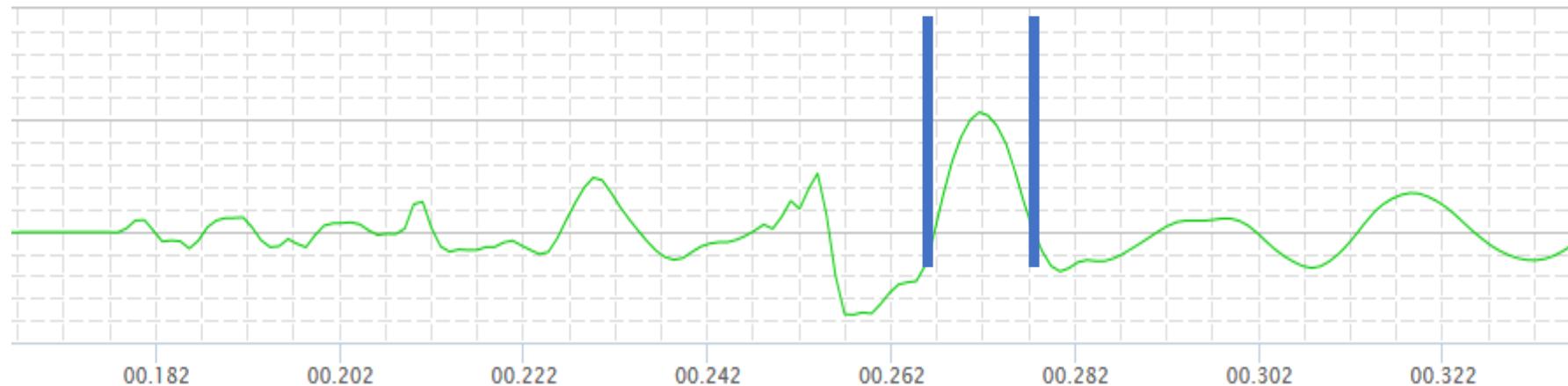
- **Peak particle velocity (PPV) (mm/s)**
 - Vitesse particulière maximale (VPM)
- Est l'indicateur utilisé dans la plupart des normes.
- Le standard suppose que l'instrument est orienté vers la source de vibration.



Indicateurs

- Fréquence (Hz)
- La plupart des standards décrits ci-dessous sont conçus pour des ondes transitoires.

Zero-Crossing $\rightarrow T = 1/f$



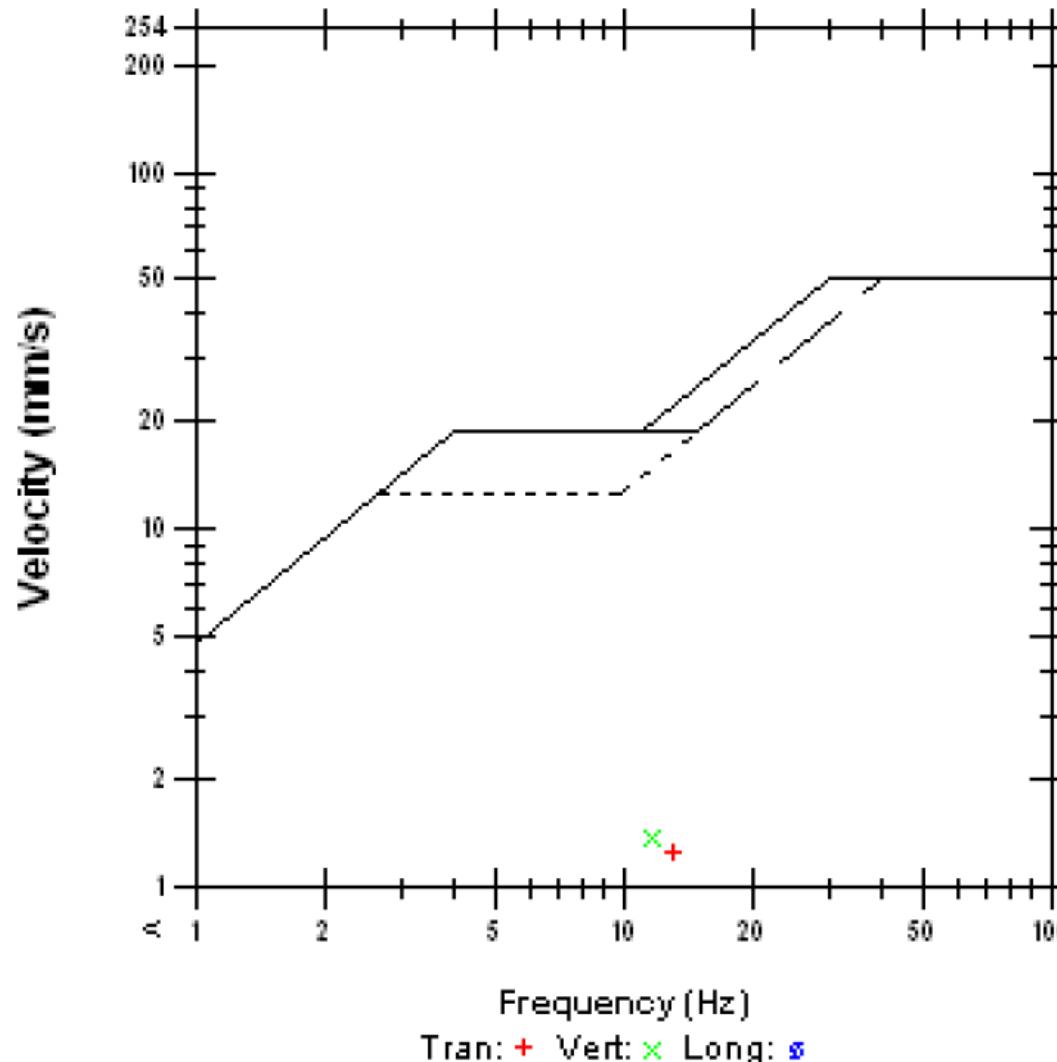
Indicateurs

- **Somme vectorielle**

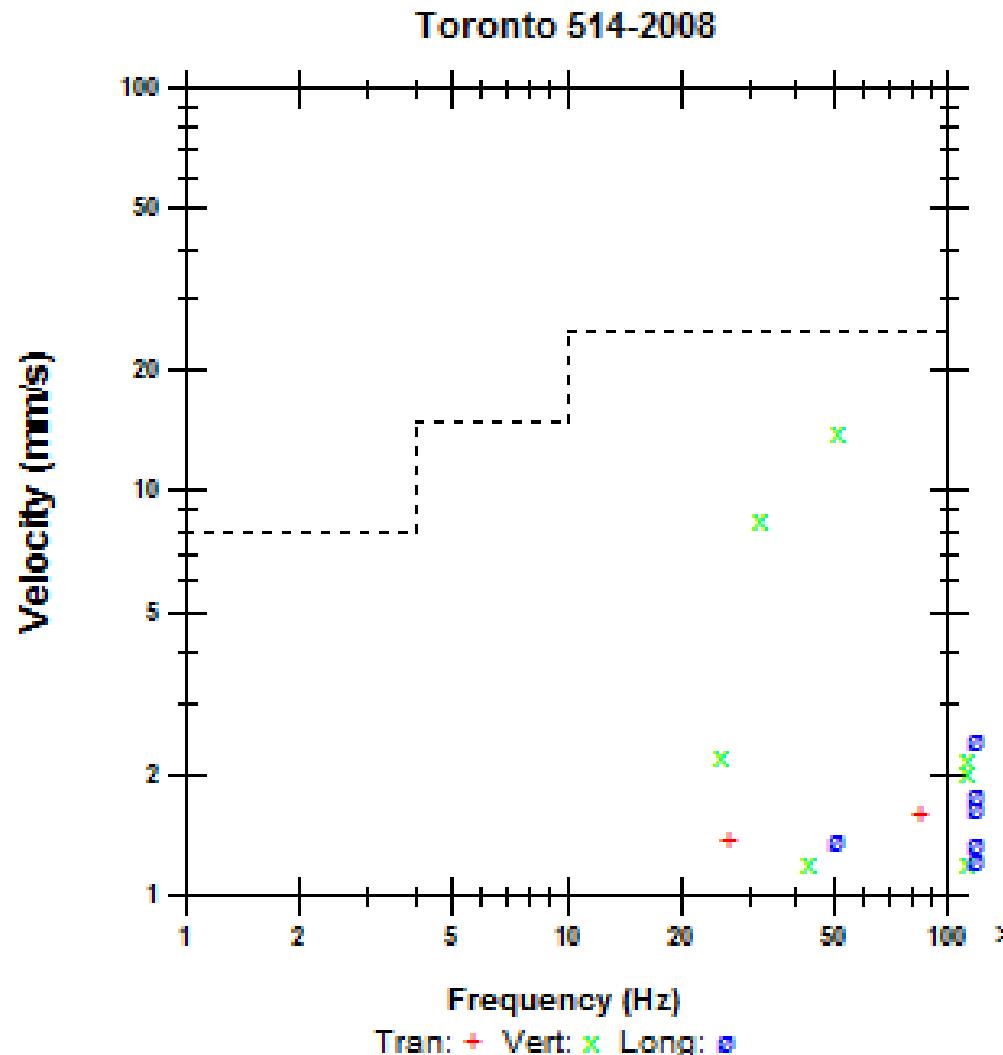
$$PVS = \sqrt{Tran^2 + Long^2 + Vert^2}$$

- Pourquoi voudrait-on utiliser le PVS lorsque les standards sont en PPV?
- Employé de façon conservatrice lorsqu'on ne sait pas de quelle direction provient la vibration.

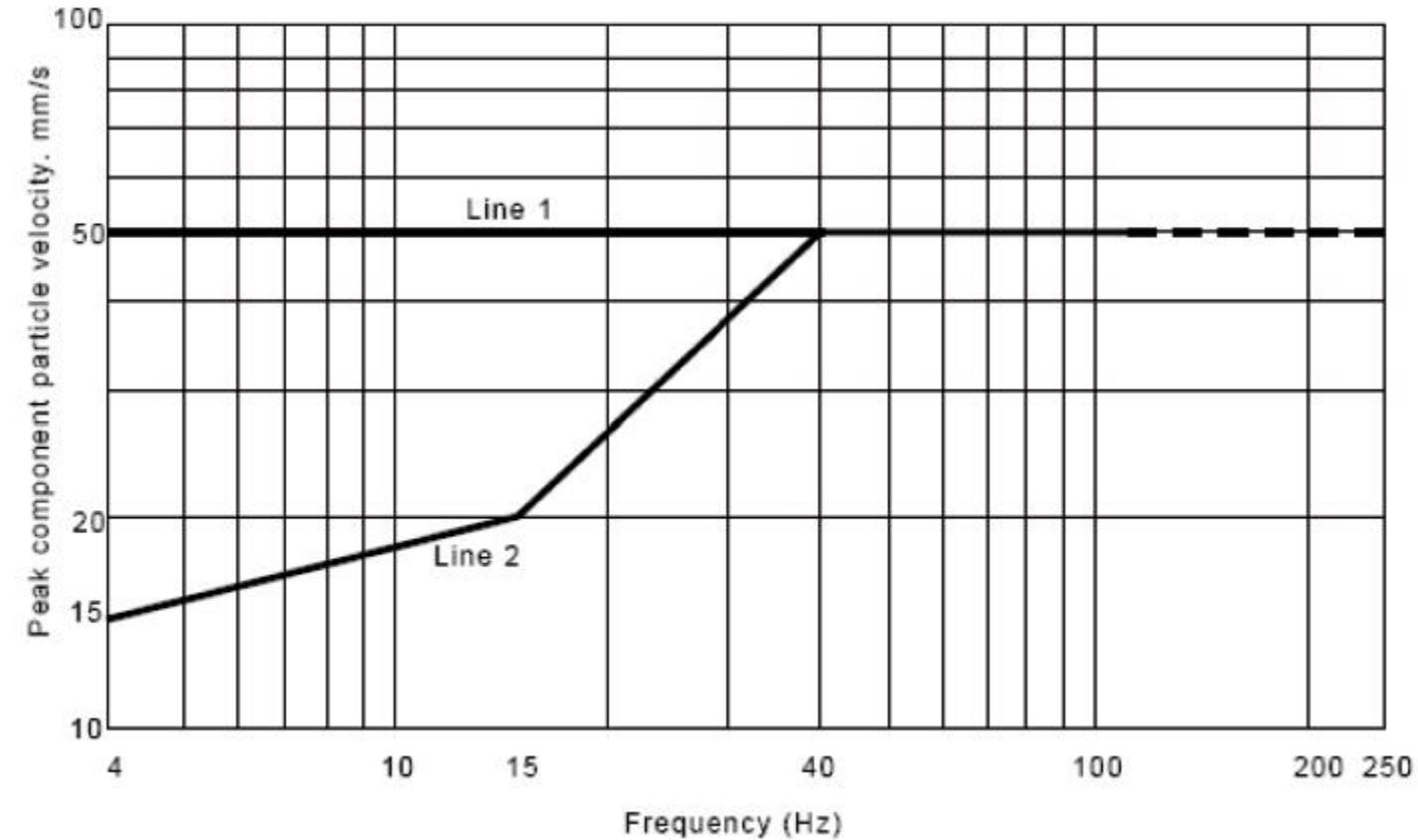
Standard USBM RI8507



Standard Toronto 514-2008



Standard DIN 4150–3:1999–02



Spécifications dans un devis

Tableau 1 : Valeurs limites de références pour la vitesse de vibration en mm/s

Catégorie	Fréquences (Hz)		
	< 10 Hz	10 – 50 Hz	> 50 Hz
1	20	20 - 35	35
2	5	5 -15	15 - 20
3	3	3 - 8	8 - 15

- Pour les vibrations continues autres que provoquées par du dynamitage, la VMP ne doit pas dépasser 5 mm/s le jour et 3 mm/s la nuit.

« Scaled distance »

- Le scaled distance peut être employé dans la conception des devis.
- C'est une estimation de la vitesse particulière en fonction de la charge, du terrain et de la distance.
- En utilisant des valeurs standard, on estime les charges maximales admissibles pour les bâtiments situés autour des travaux.
- Finalement, on fait des mesures in-situ si possible pour valider l'estimé, ajuster les équations qui suivent et ajuster les charges au besoin.

Scaled distance pour dynamitage

$$v = k \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^e$$

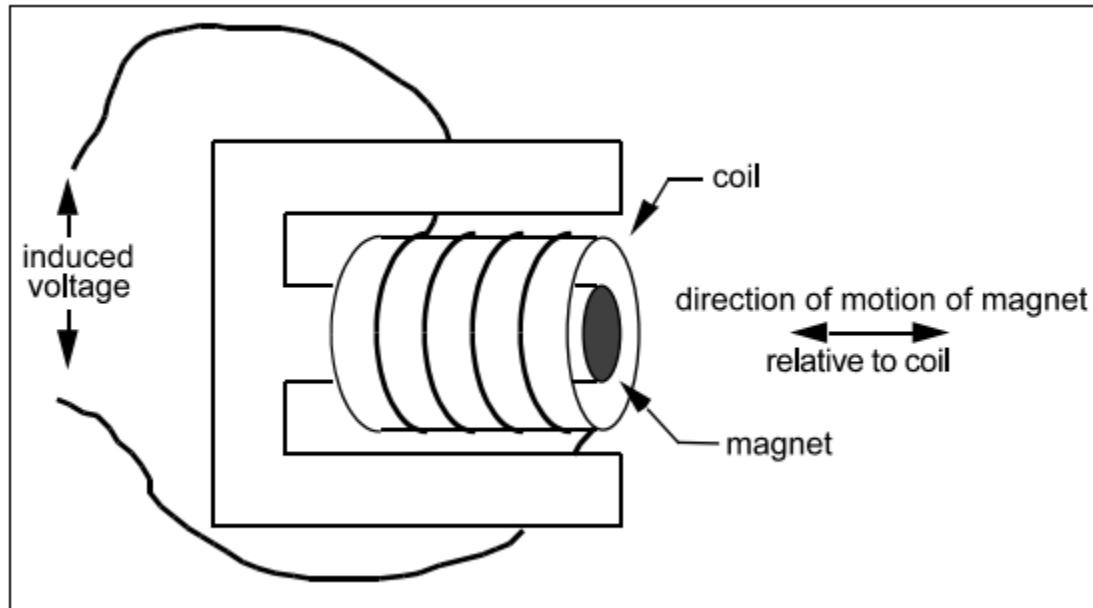
v = peak vibration (mm/s)
Q = instantaneous charge mass (kg)
D = distance (m)
k = site constant
e = site exponent
 $\frac{D}{\sqrt{Q}}$ = scaled distance (square root)

- Valeurs typiques :
 - k= 1000-1400
 - e= 1.5-1.7

La mesure

Mesure des vibration du sol - Instruments

- Capteur de vitesse (Géophone)
 - Déplacement relatif d'un aimant par rapport à une bobine induit un voltage proportionnel à la vitesse.



Mesure des vibration du sol - Instruments

- Capteurs d'accélération
 - Différents types. Les plus communs sont piézoélectriques et MEMS.
 - Le voltage de sortie est proportionnel à la force appliquée et donc à l'accélération

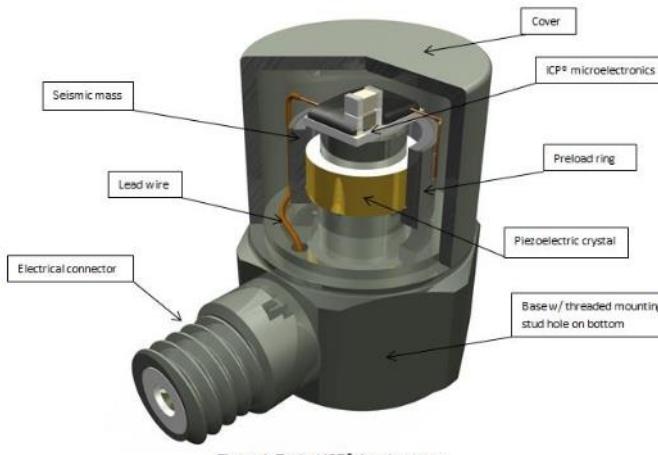


Figure 1: Typical ICP® Accelerometer

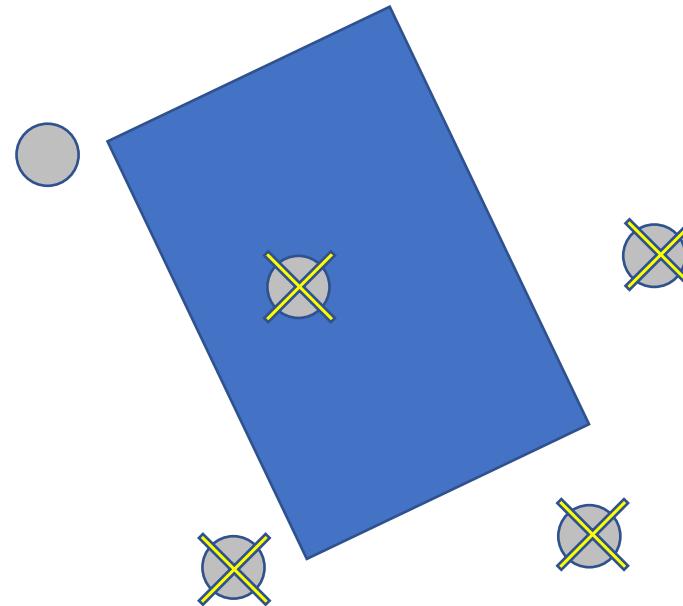
Fiche technique typique d'un géophone

Range	Up to 254 mm/s (10 in/s)
Response Standard	ISEE Seismograph Specification or DIN 45669-1
Resolution	0.00788 mm/s (0.00031 in/s)
Frequency Range (ISEE / DIN)	2 to 250 Hz, within zero to -3 dB of an ideal flat response / 1 to 315 Hz or 1 to 80 Hz
Accuracy (ISEE / DIN)	+/- 5% or 0.5 mm/s (0.02 in/s), whichever is larger, between 4 and 125 Hz / DIN 45669-1 standard
Transducer Density	2.13 g/cc (133 lbs/ft ³)
Maximum Cable Length (ISEE / DIN)	75 m (250 ft) / 1,000 m (3,280 ft)

- Range : Plage de mesure en vitesse particulière.
- Réponse Standard : Le géophone répond aux normes établies pour les mesures de dynamitage
- Frequency range : Plage de mesure en fréquence.

Où installer un géophone

- Idéalement, à moins de 1 m de la fondation d'un bâtiment à protéger, au point le plus près de la source de vibration



Application du *scaled distance*

- Parfois il y a beaucoup de sites à protéger et un nombre limité de géophones
- Parfois on ne peut pas installer de géophone
- On peut estimer les vibrations attendues à un point donné à partir de mesures près du point sautage et de l'équation de *scaled distance*

Comment lire un géophone - Manufacturiers

- **Instantel** : Le plus commun en Amérique du nord. Originalement conçu pour le sautage mais est utilisé dans de nombreuses applications aujourd’hui. Fonctions limitées par rapport aux compétiteurs.



Comment lire un géophone - Manufacturiers

- **Sigicom:** Différentes lignes de produit selon le besoin. Permet les alarmes en temps réel en fonction de la fréquence avec son modem cellulaire intégré.



Comment lire un géophone - Manufacturiers

- **Syscom** : Fonctionnalités avancées qui permettent la lecture de mouvements forts et suivi de vibrations faibles



Comment lire un géophone - Manufacturiers

- **01 dB** : Produit offrant des analyses en direct plus poussées et plus de fonctionnalités que leurs compétiteurs.



Conclusions

- Les mesures de vibration sont importantes pour protéger les gens et les structures.
- Des mesures de vibration faites dans les règles de l'art aident à prévenir les problèmes dans un contexte de gestion des risques
- Il existe de nombreux formats de standards et de devis et il est important de comprendre leur structure
- De nombreux manufacturiers offrent des solutions pour mesurer les vibrations en temps réel.

Merci pour votre attention!

QUESTIONS ?

GKM Consultants

2141 Nobel, Suite 101
Sainte-Julie (QC) J3E 1Z9
Canada

T. 450 441-5444
F. 450 441-0677

info@gkmconsultants.com
gkmconsultants.com