

2^e Session d'étude virtuelle sur les techniques de sautage

Particularités du suivi des vibrations de dynamitage à courte distance

Par

Francis Trépanier, ing.

Transports
Québec



WSP

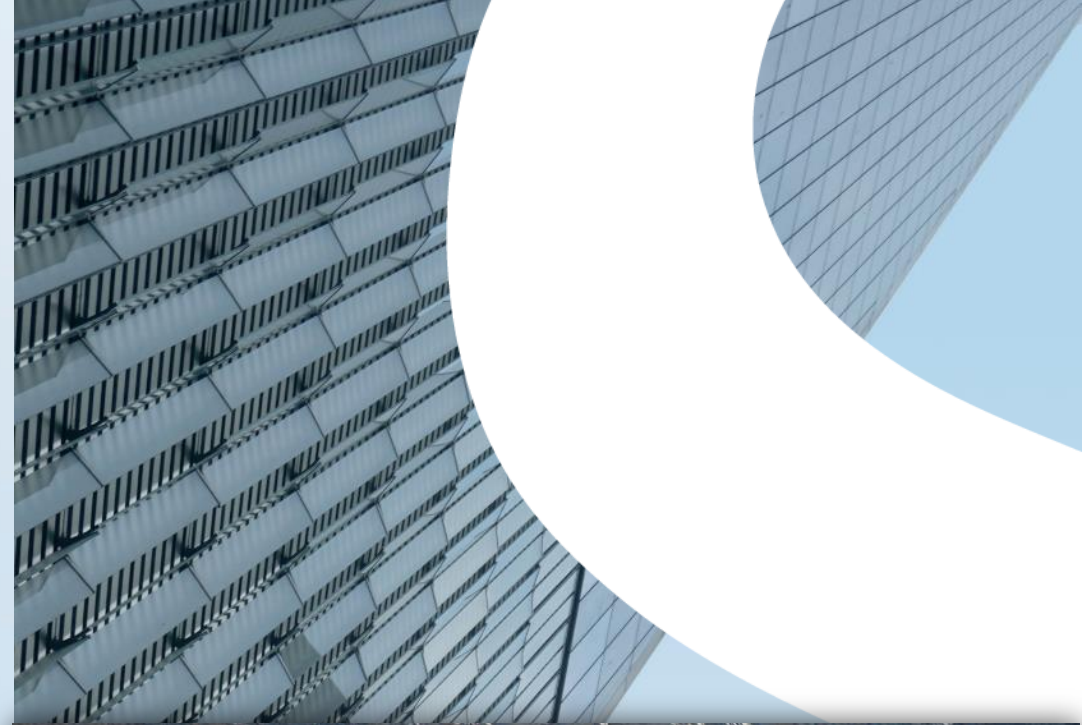


Table des matières

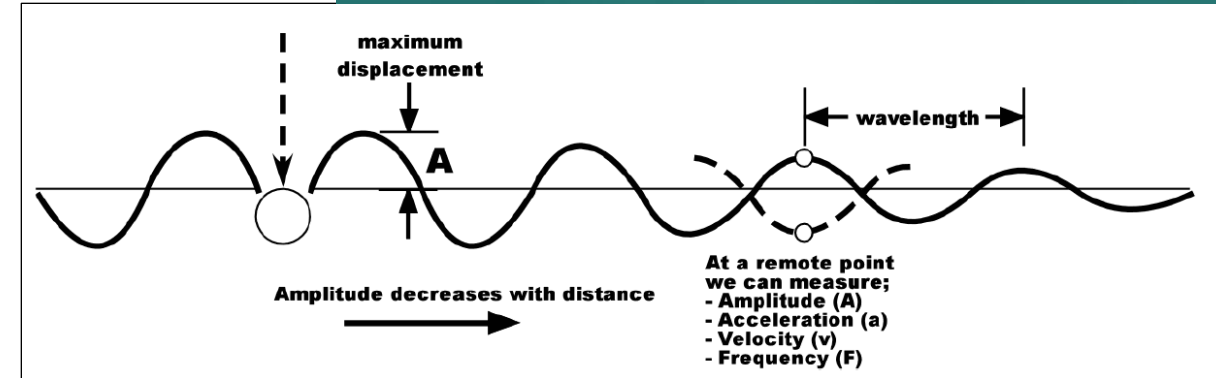
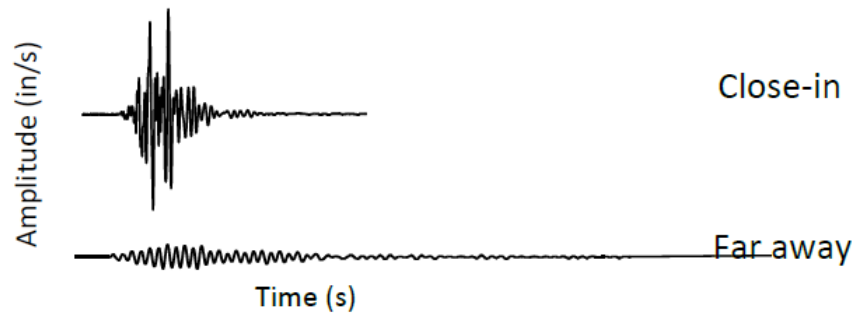
1. Vibration en champ proche, moyen et éloigné
2. Choix des capteurs de mesure
3. Installation des capteurs
4. Analyse des données
5. Conclusion



1. Vibration en champ proche, moyen et éloigné

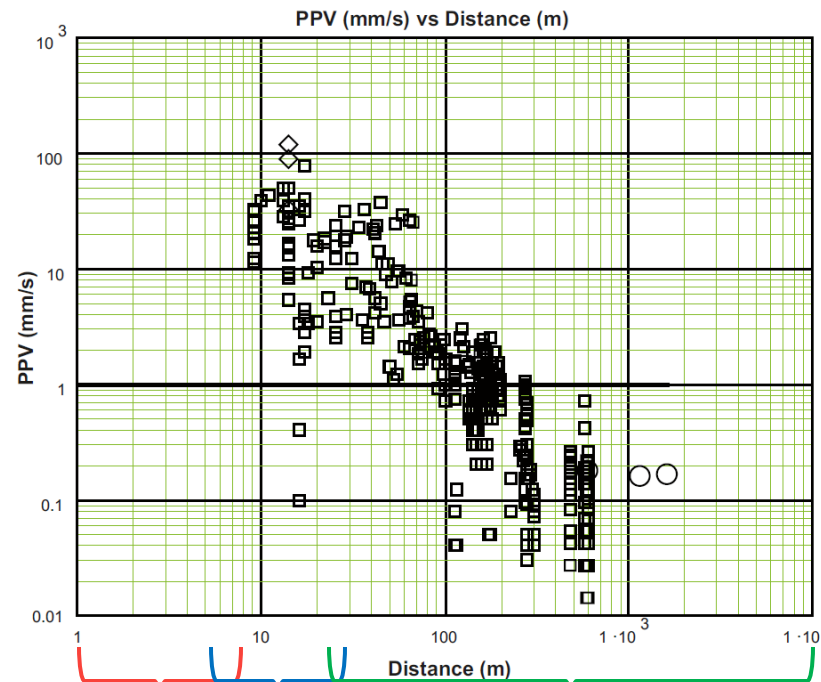
Vibration en champ proche, moyen et éloigné

- ❑ 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

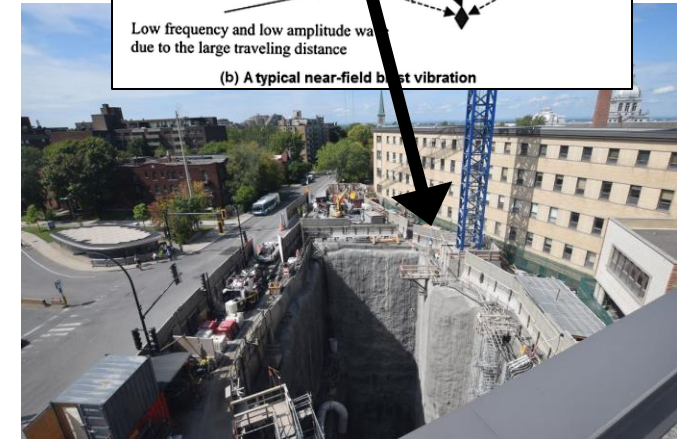
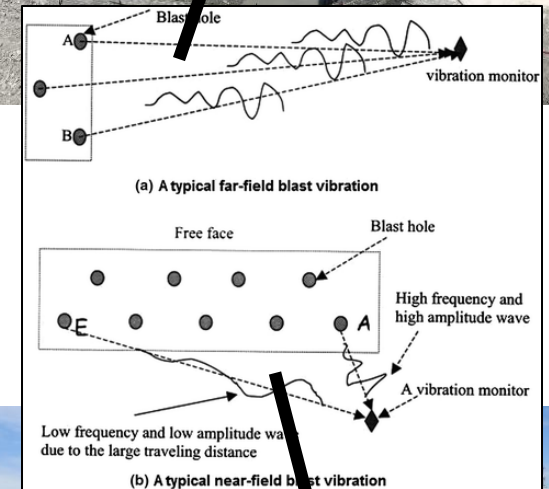
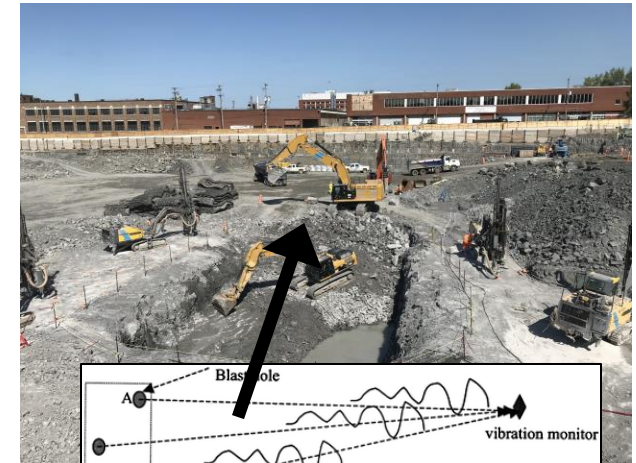


Vibration en champ proche, moyen et éloigné

- ❑ **Champ proche:** Souvent référé à une distance d'environ 1 à $1\frac{1}{2}$ 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 (**zone d'intérêt de cette présentation**)

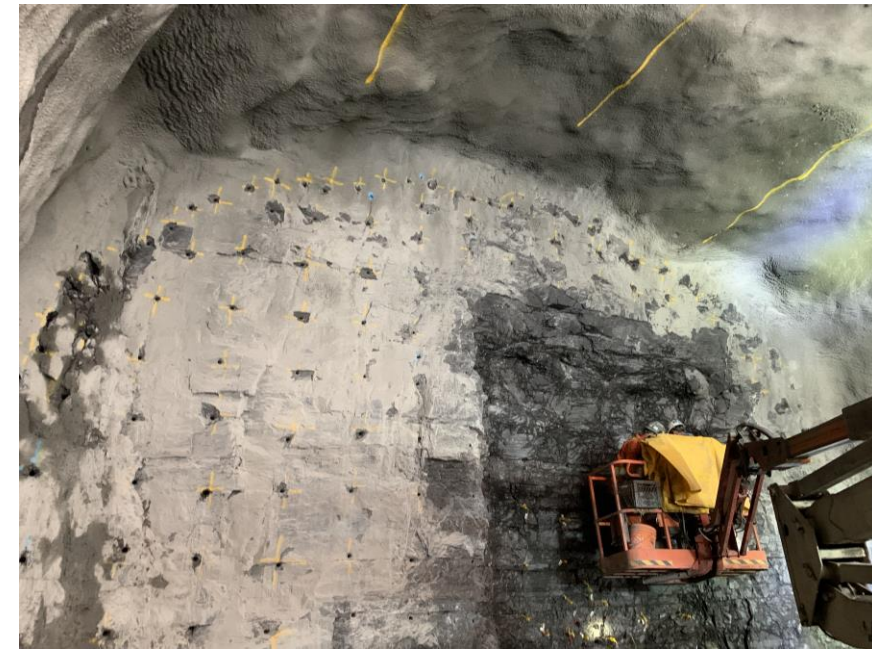


Champ proche Courte distance Champ éloigné

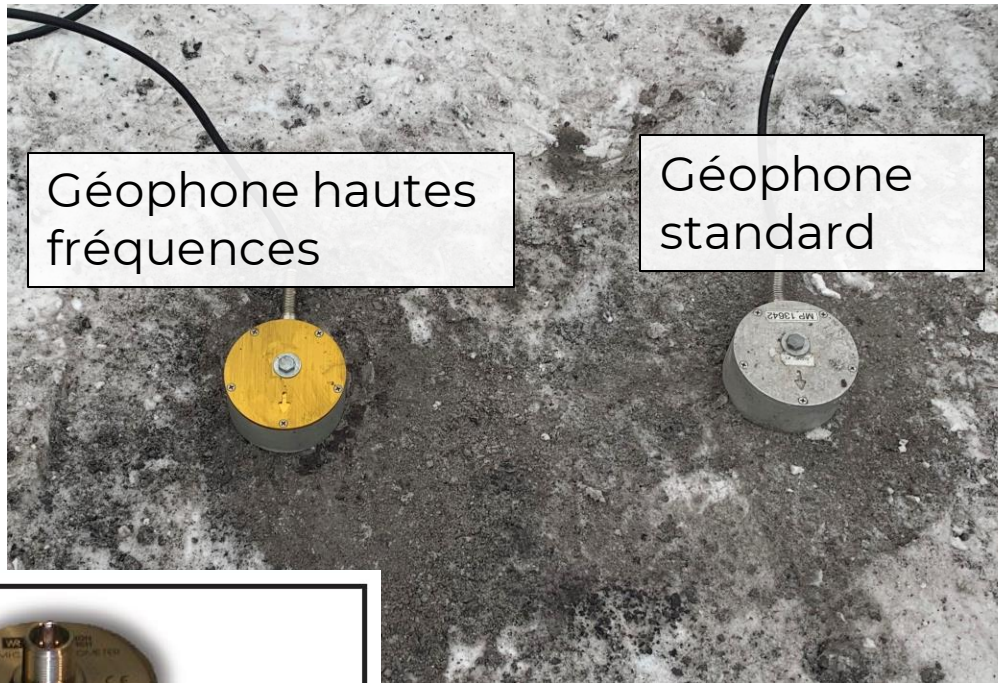


Particularités des sautages dans la zone champ moyen (courte distance)

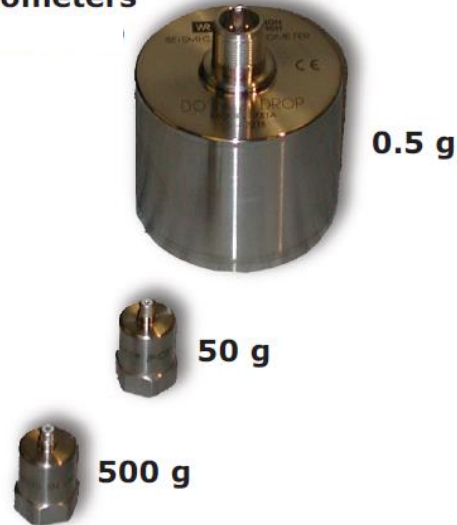
- ❑ La plage de distances de la zone à courte dépendra du type de sautage, des conditions du site et de la géologie.
- ❑ En travaux de dynamitage pour la construction, cette plage peut varier environ entre 7 et 30 m
- ❑ Zone avec généralement des patrons de sautage réduits afin de respecter les limites de vibrations des structures limitrophes (petit diamètre de forage et de cartouches d'explosifs, faibles hauteurs de banquette ou avancées en tunnel)
- ❑ Zone dans laquelle existe peu de marge de manoeuvre au niveau des vibrations (le dynamitage est une science mais également un art)
- ❑ Programme de suivi des vibrations adapté pour ce type de sautage (type de capteur, type d'installation, quantité, localisation, analyse)
- ❑ En situation de sautage à courte distance, il est commun d'obtenir des fréquences supérieures à 100 Hz. Ce qui généralement correspond à de faible déplacement de particules (en mm) et donc un faible potentiel de dommage
- ❑ Les normes de vibrations actuelles sont applicables généralement pour des fréquences inférieures à 100 Hz



2. Choix des capteurs de mesure



Accelerometers



Principaux types de capteur de mesure

1. Accéléromètres

- *Mesure accélération*
- *Large plage d'amplitude (basse et forte)*
- *Large plage de fréquences*

2. Géophones standards

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

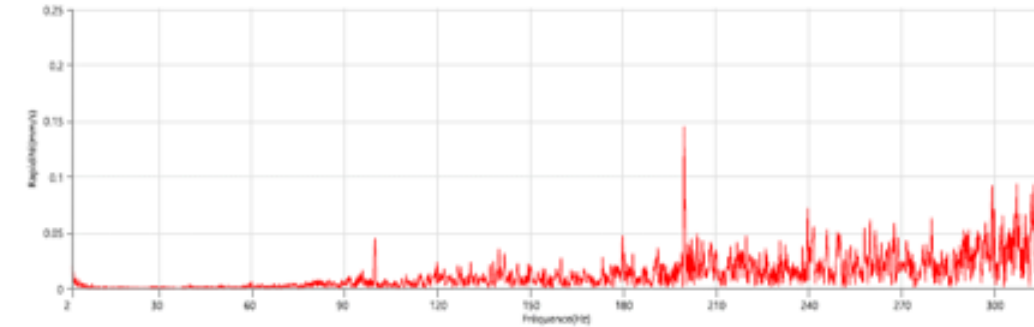
3. Géophones hautes fréquences

- *Mesure la Vitesse des vibrations (déplacement)*
- *Plage d'amplitude (~jusqu'à 2540 mm/s)*
- *Plage de fréquences limitée en basses fréquences (~30- 1 000 Hz)*

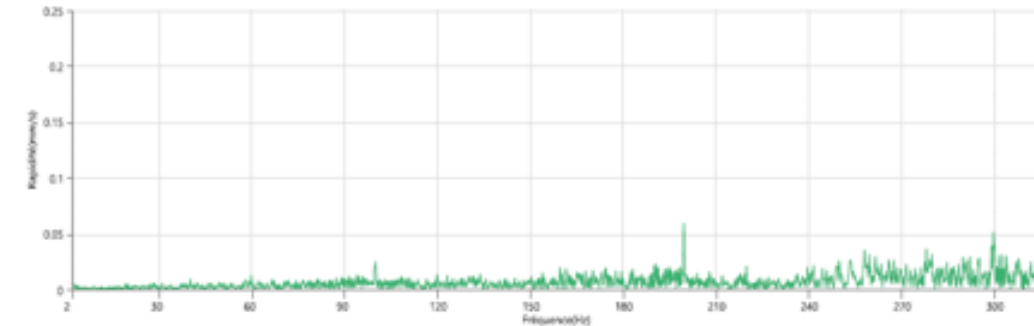
Choix des capteurs

- **Contenu en fréquence et plage d'amplitude prévus**
 - **Dépendra donc de:**
 - ✓ *distance des sautages*
 - ✓ *type de roc*
 - ✓ *type de sautage*
1. **Accéléromètre** généralement utilisé en champ proche où les fréquences et les amplitudes sont extrêmes
 2. Les **géophones hautes fréquences** sont utilisés généralement en champ proche et en champ moyen (courte distance)
 3. Les **géophones standards** sont généralement employés lors de mesures en champ moyen (courte distance) et en champ éloigné

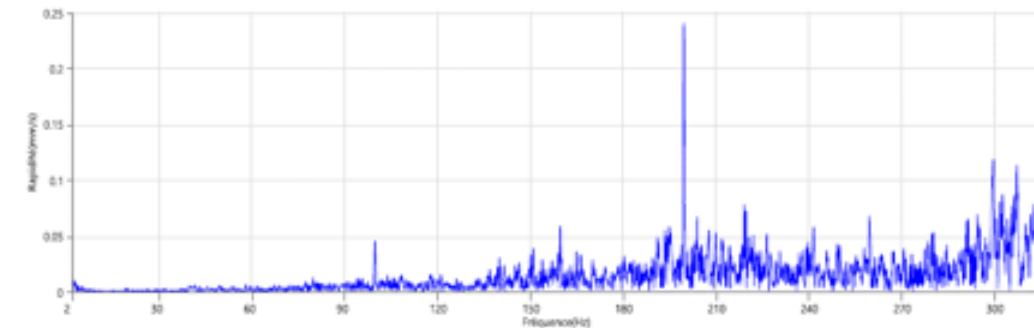
Tran - Fréquence dominante : 199.9 Hz, Amplitude : 0.145 mm/s (Le pic de vitesse des particules: 11.878 mm/s)



Vert - Fréquence dominante : 199.8 Hz, Amplitude : 0.060 mm/s (Le pic de vitesse des particules: 6.558 mm/s)



Long - Fréquence dominante : 199.8 Hz, Amplitude : 0.240 mm/s (Le pic de vitesse des particules: 18.782 mm/s)



Créé par la version 1.2.0.38.

Format © 2019 Ximark Corporation

Page 2 / 2

3. Installation des capteurs

Installation des capteurs - Généralités

- ❑ **ISEE, Western Canada Chapter**: Best Practice Guide for Close Proximity Blasting Operations” - 2nd Edition, 2019
 - Pour l'installation, ce document réfère au guide de l'ISEE
- ❑ **ISEE**: Guide pour l'installation des sismographes lors de dynamitages (Édition 2020)
 - 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

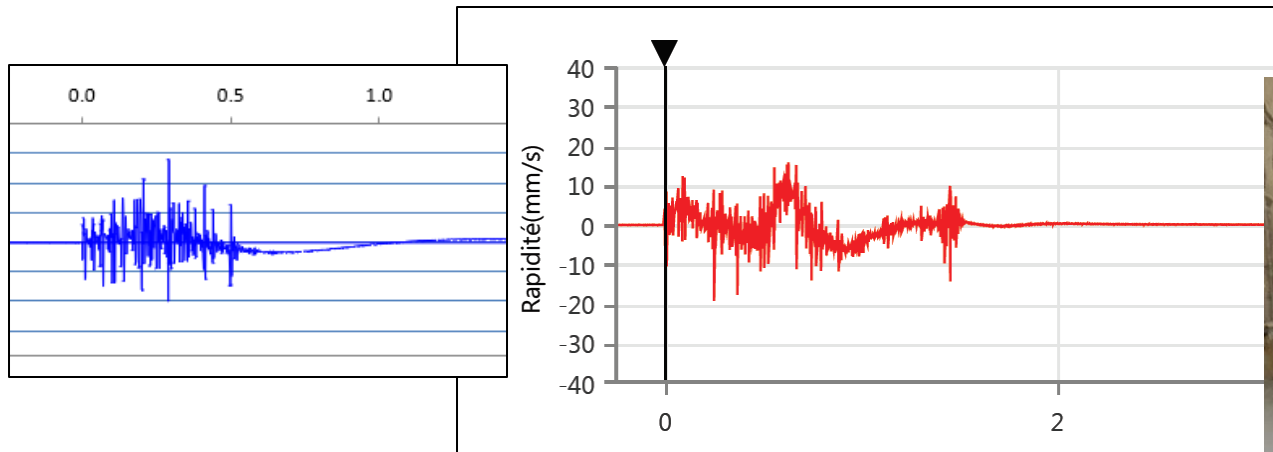


11

Frequency, Hz	4	10	15	20	25	30	40	50	100	200
Particle Velocity mm/s (in/s) at 1.96 m/s ² (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 ² (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 capteurs – Champ moyen (courte distance)

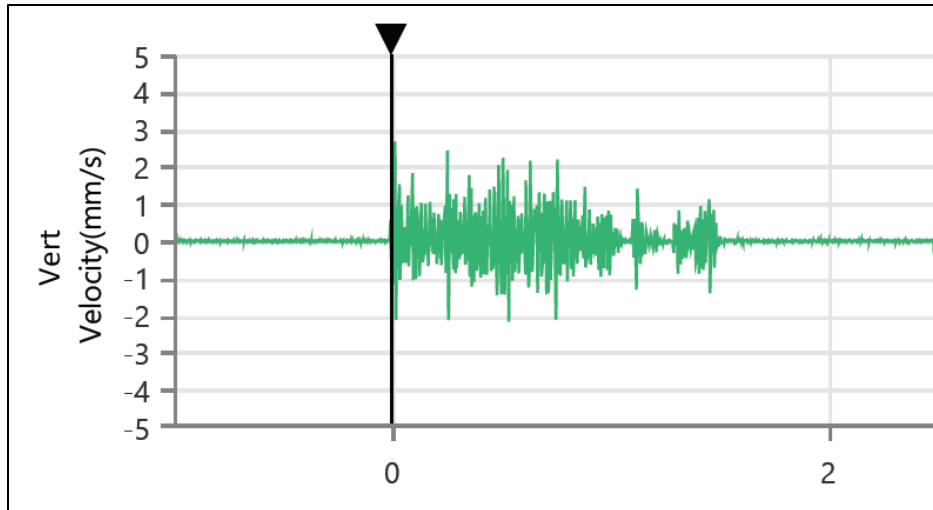
- ❑ Pour les mesures au sol : La méthode d'enterrement est privilégiée, soit l'excavation d'un trou qui n'est pas moins de 3 fois la hauteur du capteur (ANSI S2.47), piquer le capteur dans le fond du trou et compacter fermement le sol autour et au-dessus du capteur l'installation des sismographes lors de dynamitages (Édition 2020)
- ❑ Pour les mesures sur les surfaces rigides (roc et béton) et dans le contexte de hautes fréquences et de fortes accélérations : La méthode privilégiée, autant que possible, est l'ancrage du capteur directement sur la surface sans utilisation de base de métal, afin d'éliminer tout phénomène de résonance



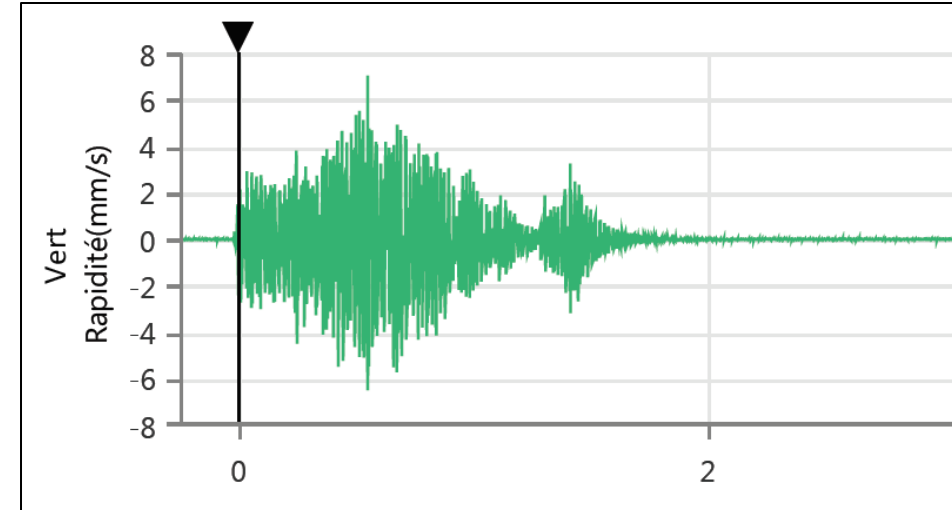
Installation des capteurs – Champ moyen (courte distance)

- Exemple d'un tir à une distance de 30 m avec un géophone mural ancré directement sur la fondation de béton et un géophone standard dans le même secteur sur une base de métal non adaptée, où on observe un phénomène de résonance (augmentation considérable de la constante K)

Géophone mural

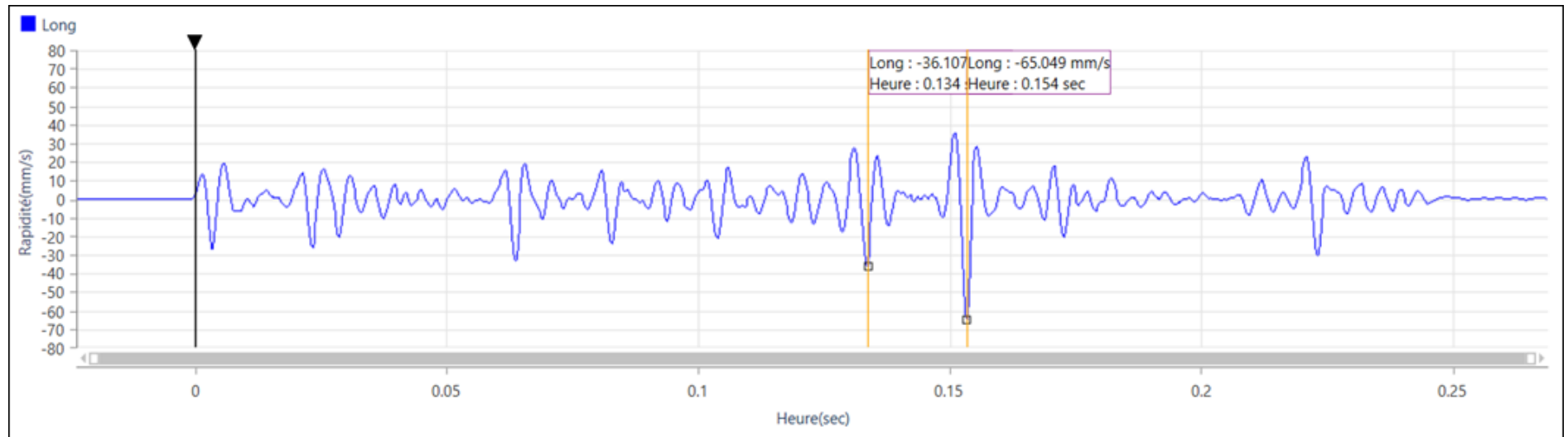


Géophone sur base de
métal non adaptée



Installation des capteurs – Champ moyen (courte distance)

- ❑ Taux d'échantillonnage : Dans le contexte de mesures à courte distance, il est recommandé d'avoir un taux d'échantillonnage de 4096 éch./sec. et plus selon les fréquences anticipées et mesurées ainsi que selon le type de capteur utilisé
- ❑ Un taux d'échantillonnage adéquat permet de s'assurer de bien mesurer l'onde sismique et permet également une analyse détaillée des délais de la séquence de mise à feu utilisée en fonction de la localisation du capteur par rapport aux trous du sautage



Installation des capteurs – Champ moyen (courte distance)

- ❑ Dans certaines situations, l'utilisation d'une base de métal d'ancrage peut s'avérer adéquate selon les mesures in-situ ($\sim d > 20$ m). Dans ce contexte, il est préférable d'utiliser les bases fournies par les fabricants

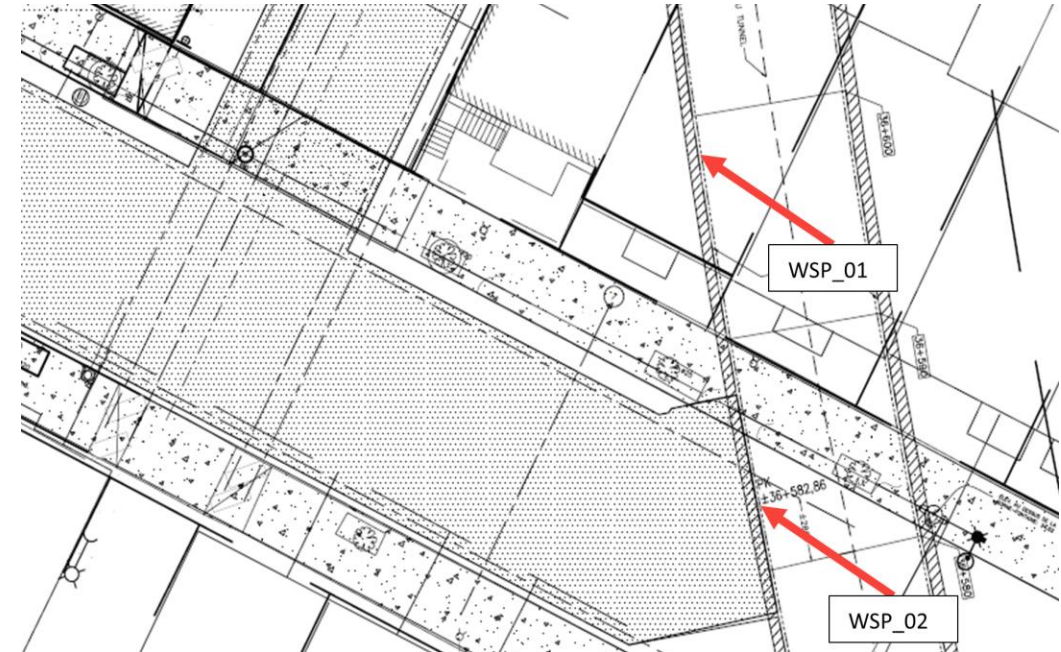
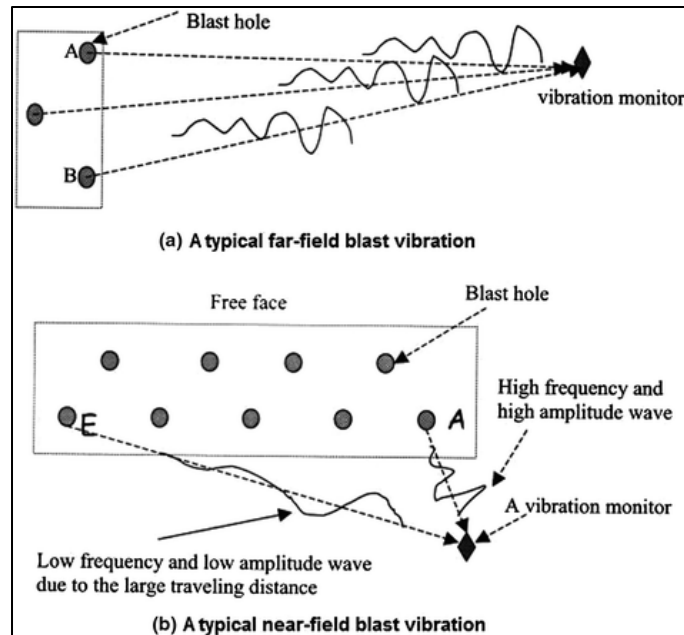


- ❑ Éviter les ancrages et les bases de métal non adaptés pour ces mesures



Localisation des capteurs – Champ moyen (courte distance)

- Dans le contexte de mesures de vibration à courte distance, une attention très particulière doit être portée sur la position et le nombre de capteurs afin d'assurer un suivi adéquat et une compréhension de l'atténuation des vibrations vers les points sensibles limitrophes



4. Analyse des données

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
- ❑ 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.)

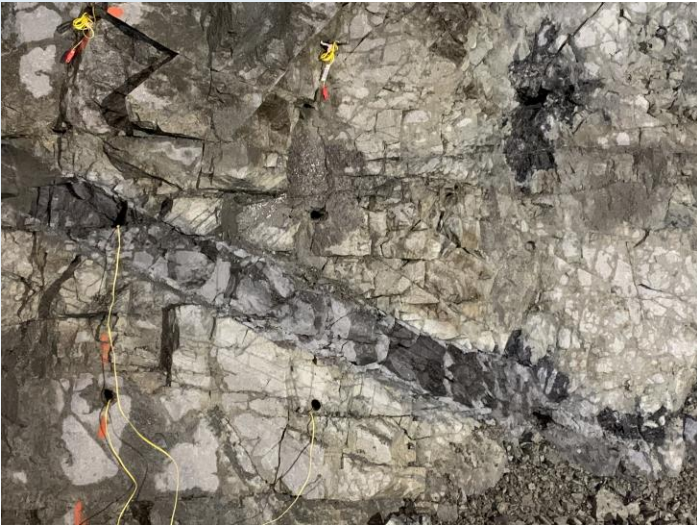
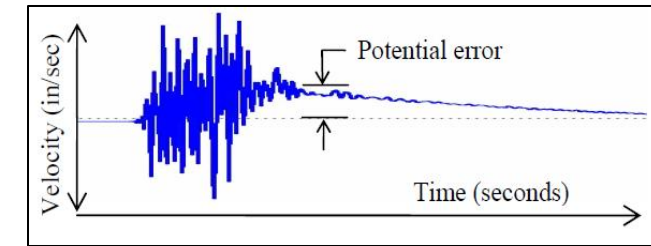
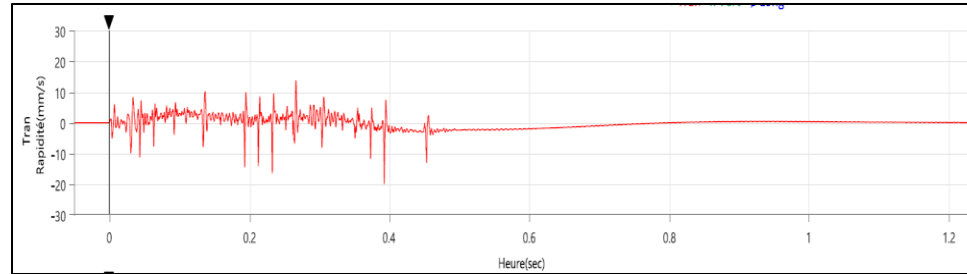


TABLE I: SOME OF THE GROUND VIBRATION PREDICTOR MODELS DEVELOPED

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]	$v = k \left(\sqrt{\frac{Q_{max}}{D^{2/3}}} \right)^{\beta}$
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]	$v = \frac{KQ^{\alpha}}{D^{nQ^{\beta}}}$

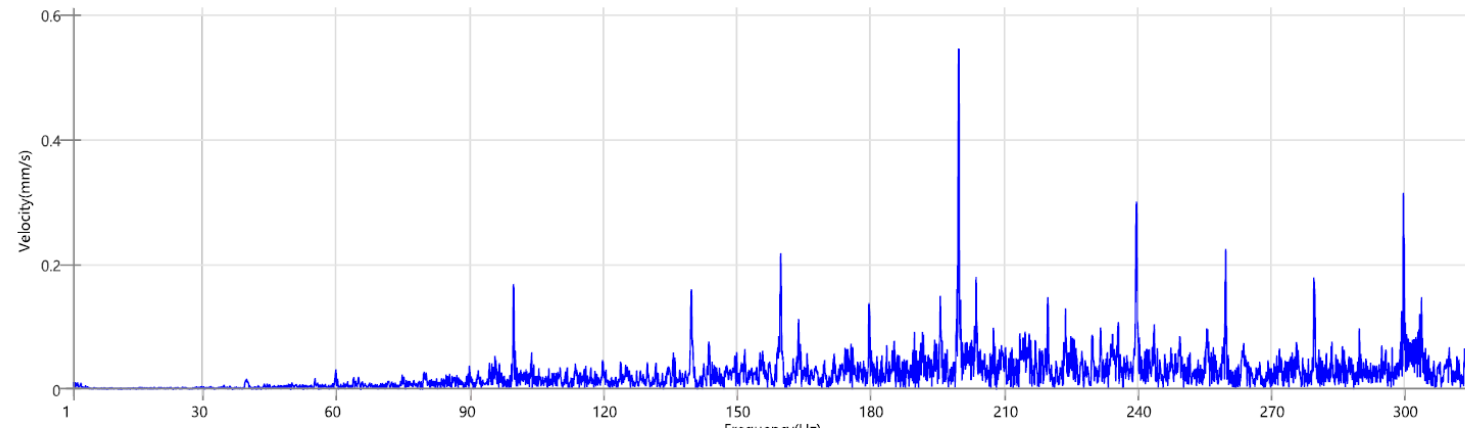
Analyse des données – Fréquences

- Induction en basse fréquence dans le signal sismique pour un capteur de type géophone standard et ancré directement au béton pourrait être causée par la limitation du capteur en haute fréquence



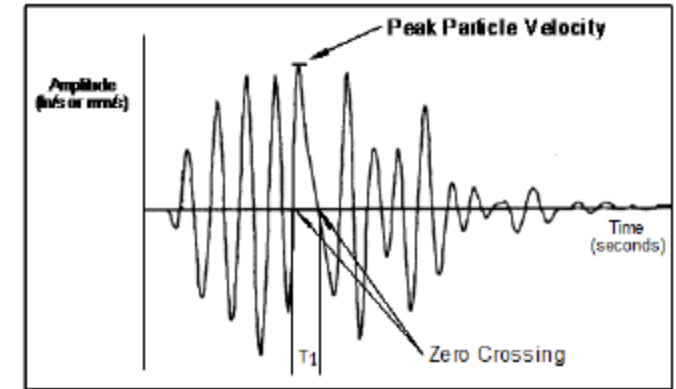
- Les deux techniques les plus utilisées pour déterminer les fréquences associées aux valeurs maximales de vitesses de particules sont le passage à zéro ("zero crossing") et la TFR (transformation de Fourier rapide) :

- *TFR*

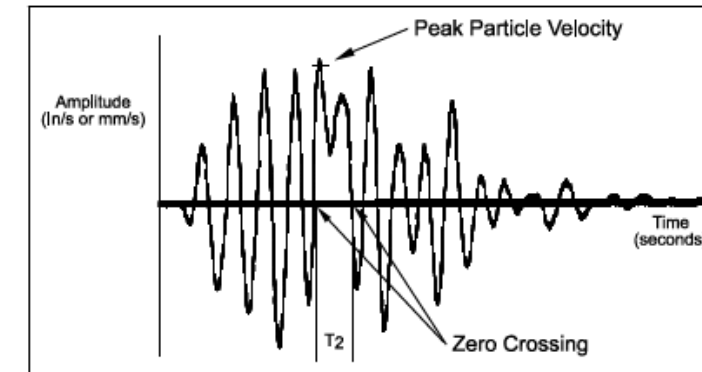


Analyse des données – Fréquences (suite)

- ❑ Passage à zéro (“zero crossing”) :
 - Les sismographes utilisent la technique du passage à zéro pour la fréquence associée aux valeurs maximales de vitesse de particules que l'on retrouve dans le sommaire des résultats selon les trois axes
 - Le calcul de la fréquence de passage à zéro est limité car il suppose une seule fréquence dominante, généralement représentée par des formes d'onde sinusoïdales
 - La fréquence de passage par zéro nécessite la période d'une longueur d'onde avant de pouvoir calculer la fréquence de la longueur d'onde en utilisant la formule $1/\text{période}$
 - Une erreur d'échantillonnage se produit pour les hautes fréquences lorsque les périodes de longueur d'onde deviennent relativement petites et que la fréquence d'échantillonnage commence à manquer de point de passage à zéro



Calculating the Zero Crossing Frequency



Zero Crossing Frequency Calculation Limitation

Analyse des données – Fréquences (suite)

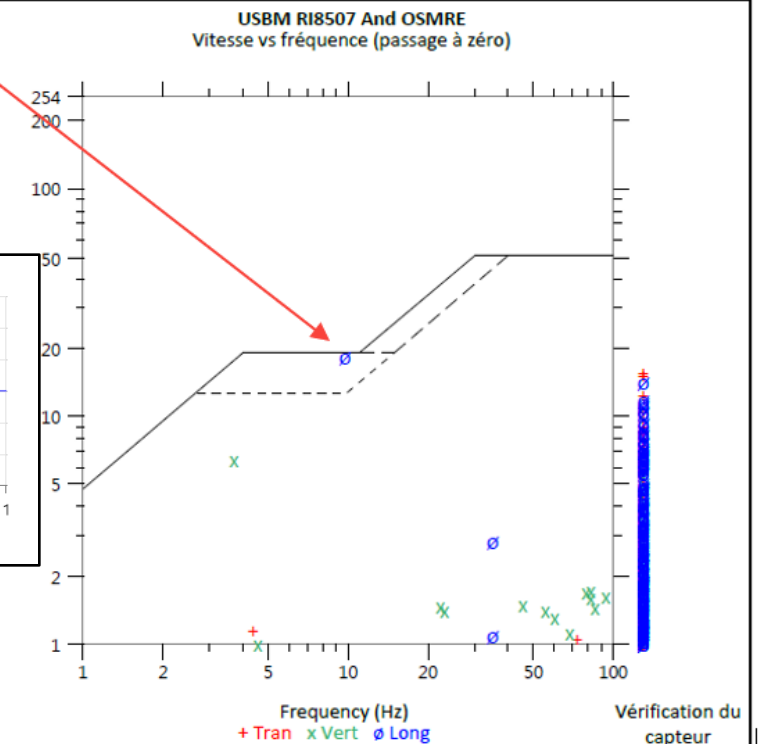
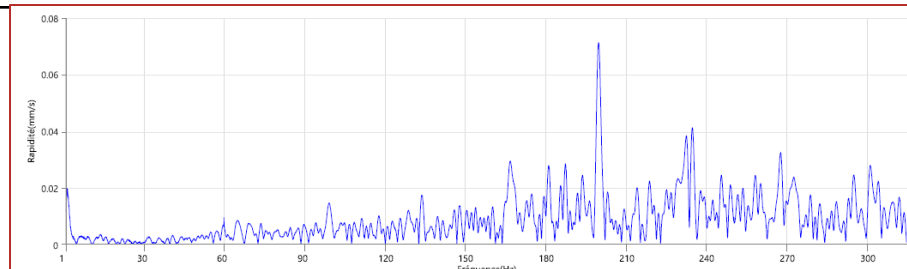
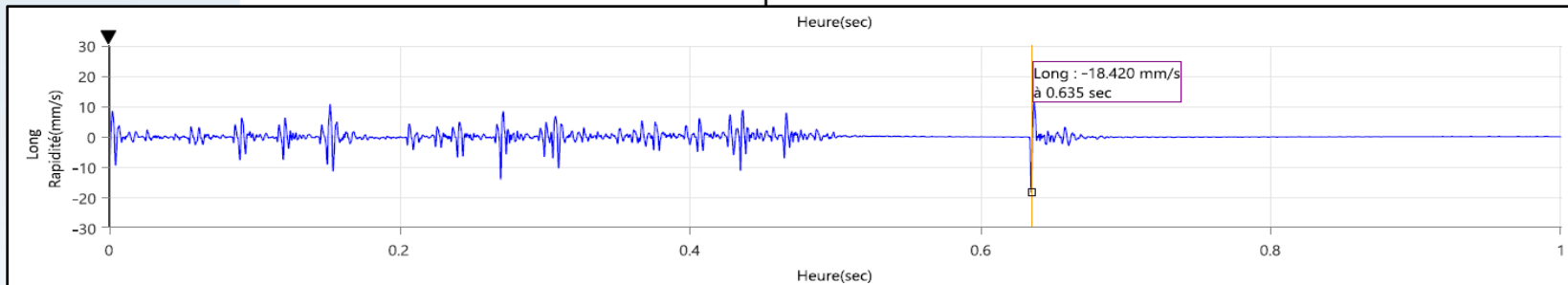
❑ Passage à zéro (“zero crossing”) :

- 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		

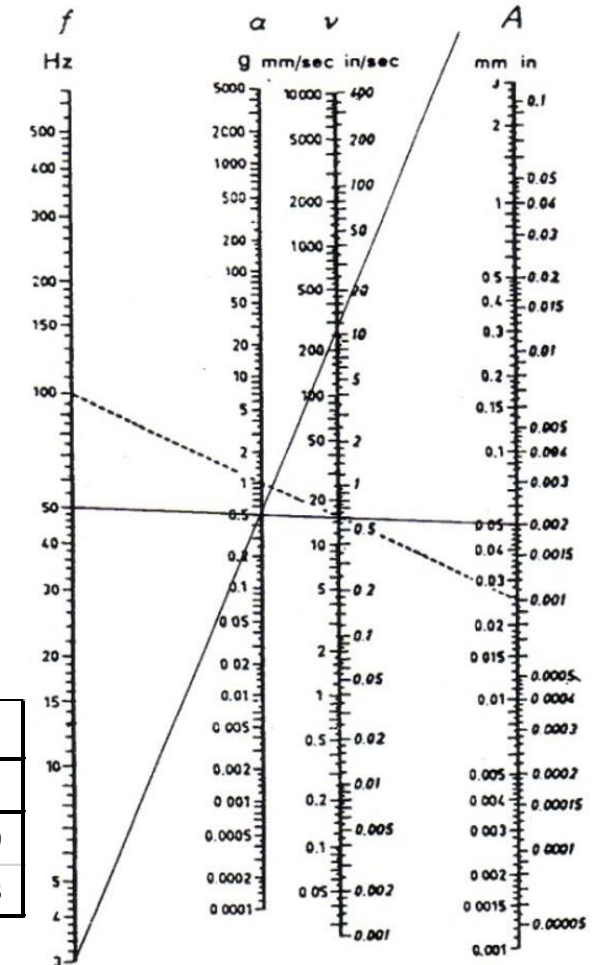


Analyse des données – Fréquences (suite)

- Effet de la fréquence (Hz) sur la vitesse (mm/s), le déplacement (mm/s) et l'accélération (mm/s²)
 - Ce nomogramme montre la relation entre la fréquence (Hz), ainsi que la vitesse (mm/s), le déplacement (mm) et l'accélération (mm/s²) de particules
 - Si vous avez deux d'entre elles, vous trouverez tout simplement les autres
- Vibrations assujetties à de très hautes fréquences, ce qui résulte à de faibles déplacements des particules, donc sécuritaires pour les structures limitrophes

DÉPLACEMENT (mm) SELON LA VITESSE DE PARTICULES (mm/s) ET LA FRÉQUENCE (Hz)											
(mm/s)	(Hz)	(mm)	(mm/s)	(Hz)	(mm)	(mm/s)	(Hz)	(mm)	(mm/s)	(Hz)	(mm)
25	10	0.3979	25	20	0.1989	25	50	0.0796	25	200	0.0199
50	10	0.7958	50	20	0.3979	50	50	0.1592	50	200	0.0398

Exemple avec un nomogramme



4. Conclusion

Conclusion

- ❑ Dans le contexte de sautage à courte distance, les amplitudes et les fréquences sont élevées
- ❑ Mais les déplacements de particules associées sont faibles, donc généralement sécuritaire pour les structures limitrophes
- ❑ Les normes de vibration de dommages sont généralement applicables pour des fréquences inférieures à 100 Hz et ne considèrent pas les hautes fréquences
- ❑ Avantage à développer des normes considérant également les hautes fréquences et ainsi en faire bénéficier en terme de coûts et délais
- ❑ Ne pas considérer uniquement la technique du passage à zéro (« zero crossing ») pour déterminer les fréquences
- ❑ Porter un soin particulier à l'élaboration du programme de suivi des vibrations (type et quantité des capteurs, position, installation, etc.)
- ❑ Bien considérer tous les facteurs pouvant influencer nos analyses de vibrations (modèles d'atténuation in-situ)



Merci!

wsp.com