

# Respect des limites vibratoires – mesures versus normes

Patrick Andrieux

40<sup>ième</sup> Session d'étude sur les techniques de sautage  
Québec, 16-17 novembre 2017



ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

## Introduction

- Des normes vibratoires ont été établies à des fins environnementales
  - Pour éviter des dommages structuraux superficiels aux structures avoisinantes
  - Pour minimiser les nuisances associées aux sautages
- Ces normes sont sous la forme d'amplitudes maximales permises pour diverses fréquences. Pour être en conformité, il faut que les amplitudes vibratoires générées au point d'intérêt demeurent inférieures aux limites fixées.
- Les limites à respecter sont largement basées sur des travaux du USBM dans les années '70 et '80
- Il existe un grand nombre de normes : nationales, provinciales, municipales, état, comté, régionales, cantonales ... La norme locale à respecter est la plus restrictive.
- L'entité (contracteur, mineur) qui conduit les opérations de sautage est responsable de respecter ces normes. Ce respect est vérifié par des enregistrements sismiques effectués aux alentours du site.

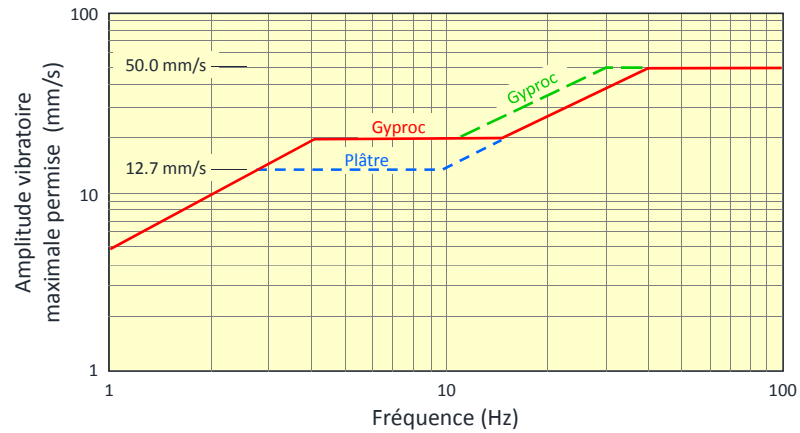


ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

2

## Norme la plus courante

### Standard USBM<sup>1</sup> RI8507 / OSMRE<sup>2</sup>



<sup>1</sup> United States Bureau of Mines (É.-U.)

<sup>2</sup> Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement (É.-U.)

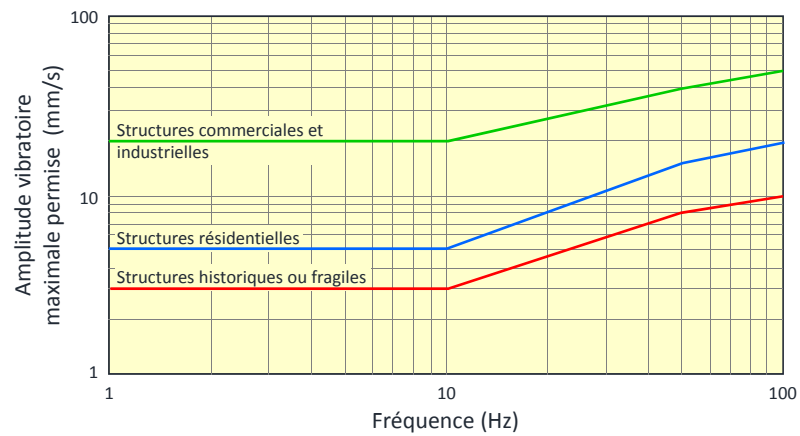


ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

3

## Exemple d'une autre norme

### Standard allemand DIN 4150

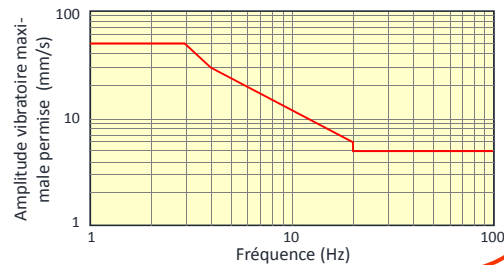


ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

4

## Philosophie générale

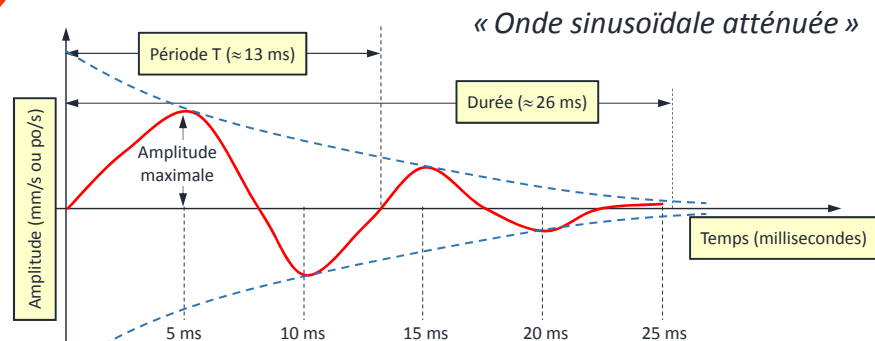
- Les normes vibratoires reconnaissent que le potentiel d'endommagement des vibrations augmente avec les basses fréquences. (Ces basses fréquences transportent plus d'énergie et sont associées avec de plus grandes longueurs d'ondes.)
- Donc, l'**amplitude** acceptable augmente à mesure que la **fréquence** augmente
- Une exception est la norme néo-zélandaise NZS 4403 :



ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

5

## Quelques rappels ...



$$\text{Fréquence} = 1 / \text{Période} = 1 / 0.013 \text{ seconde} = 77 \text{ cycles / seconde} = 77 \text{ Hertz (Hz)}$$

Longueur d'onde = Distance occupée par une période = Vitesse de propagation des ondes « P » / fréquence  
(La longueur d'onde est exprimée en mètres)

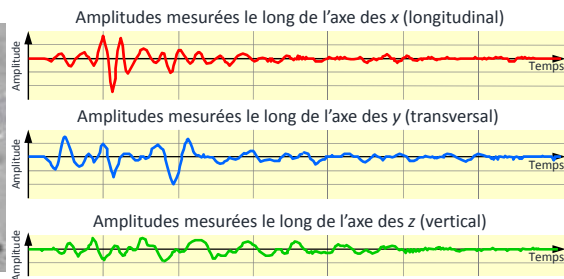
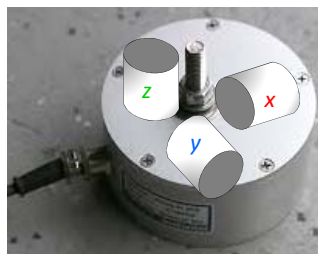


ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

6

## Les amplitudes mesurées

- On s'intéresse donc aux amplitudes et aux fréquences
- Lors d'une mesure de vibrations, trois (3) enregistrements distincts (« séismogrammes ») sont effectués simultanément, par trois (3) géophones indépendants montés orthogonalement dans un boîtier commun

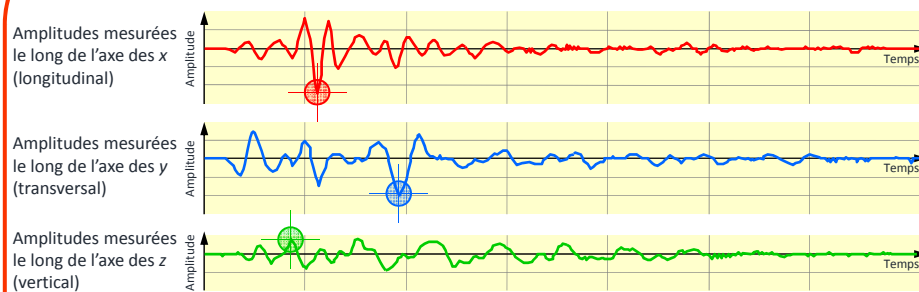


ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

7

## Amplitudes maximales

- Ces trois enregistrements ont chacun leur maximum



- Chacun de ces maxima est référé comme étant le « PPV » (le « *Peak Particle Velocity* », ou l'amplitude vibratoire maximale) de cet axe
- Chacun de ces maxima s'est produit à un instant spécifique le long de l'enregistrement (référé au zéro du déclenchement)



ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

8

## Localisation sur la page de conformité

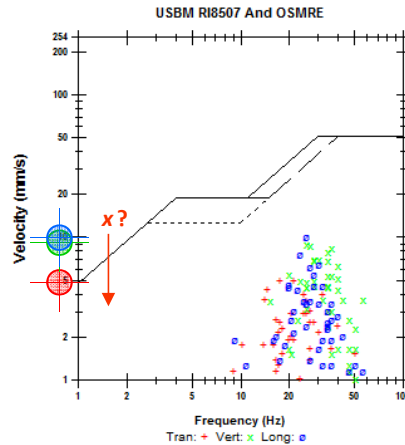
Date/Time Vert at 11:48:05 October 29, 2011  
 Trigger Source Geo: 2.000 mm/s  
 Range Geo: 254.0 mm/s  
 Record Time 5.0 sec at 1024 sps  
 Job Number: 4

Serial Number  
 Battery Level 7.0 Volts  
 Unit Calibration June 9, 2010 by InstanTel  
 File Name L927DZL450  
 Scaled Distance 13.7 (125.0 m, 83.0 kg)

### Notes

Microphone Linear Weighting  
 PSPL 0.500 pa (L) at 0.012 sec  
 ZC Freq >100 Hz  
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

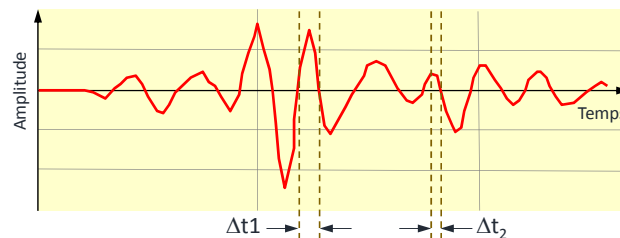
	Tran	Vert	Long	
PPV	4.953	9.017	10.16	mm/s
ZC Freq	21	26	26	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.299	0.249	0.251	sec
Peak Acceleration	0.093	0.186	0.159	g
Peak Displacement	0.046	0.051	0.061	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.2	7.4	7.5	Hz
Overswing Ratio	4.1	4.0	4.0	
Peak Vector Sum	13.42 mm/s at 0.251 sec			



ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
 Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

9

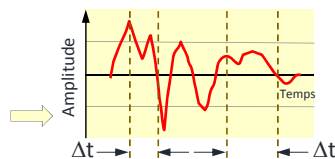
## La « Zero Crossing Frequency »



On a que:  $\Delta t$  = durée entre 2 croisements de l'axe des x; ou,  
 $\Delta t$  = durée entre 2 « Zero Crossings » successifs  
 Période  $T = 2 \times \Delta t$  (durée assumée d'un cycle complet)  
 Fréquence pour le cycle considéré =  $1/T = 1/2 \Delta t$

Cette approche a des limites :

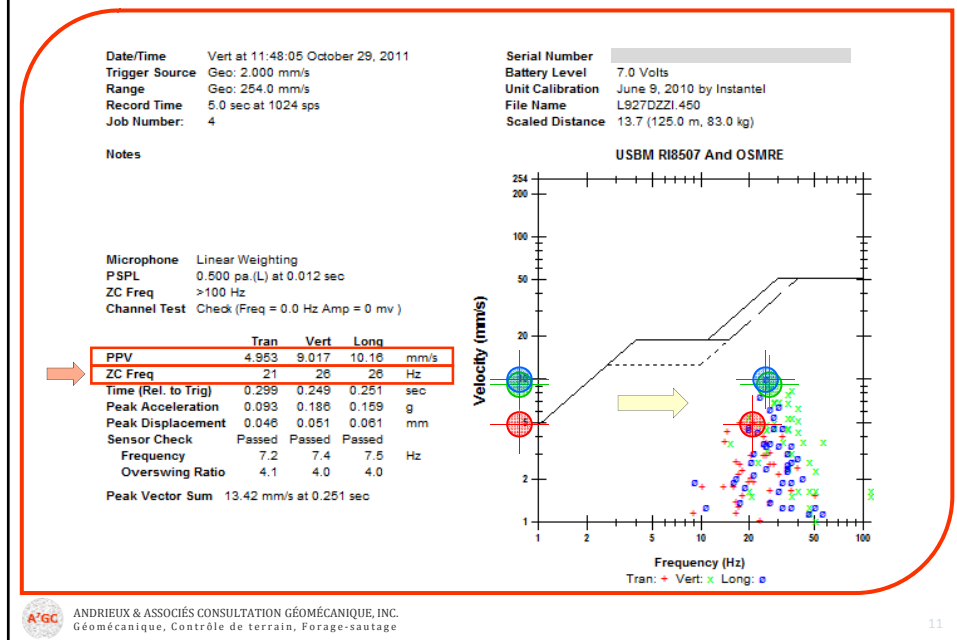
- Elle ne remplace pas une FFT, qui donne le vrai contenu en fréquence du signal
- Il peut y avoir plusieurs pics successifs sans croisement de l'axe des x



ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
 Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

10

## Localisation sur la page de conformité



## Amplitudes maximales vs Maximum absolu

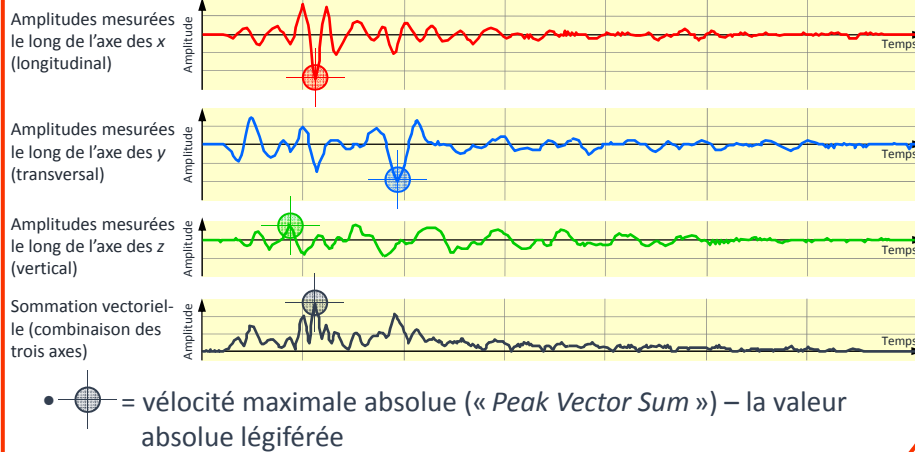
- Toutefois, ces trois enregistrements doivent être combinés pour obtenir l'amplitude maximale absolue associée au sautage
- Cette combinaison se fait par une opération de sommation vectorielle, qui donne l'amplitude instantanée absolue de la vibration à chaque instant :

$$\text{Sommation vectorielle } (t) = \sqrt{[V_x(t)]^2 + [V_y(t)]^2 + [V_z(t)]^2}$$

- La vitesse maximale absolue est le **maximum de cette fonction** de sommation vectorielle. C'est un point unique.
- La sommation vectorielle ne renferme aucune information sur le contenu en fréquence du signal. Tous les points étant positifs, elle n'est plus une fonction sinusoïdale périodique oscillant de part et d'autre d'une valeur d'équilibre.

## Amplitudes maximales vs Maximum absolu

- Combinaison des trois enregistrements pour obtenir le maximum absolu :



A'GG ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

13

## Localisation sur la page de conformité

Date/Time Vert at 11:48:05 October 29, 2011  
Trigger Source Geo: 2.000 mm/s  
Range Geo: 254.0 mm/s  
Record Time 5.0 sec at 1024 sps  
Job Number: 4

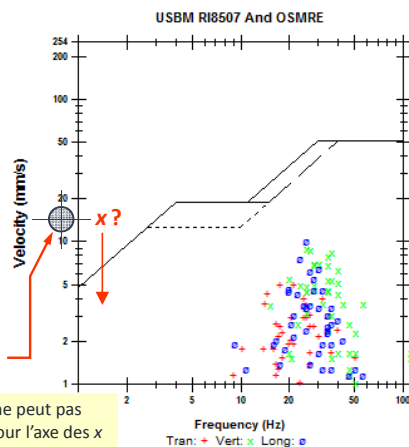
Serial Number  
Battery Level 7.0 Volts  
Unit Calibration June 9, 2010 by Instanetel  
File Name L927DZZI.450  
Scaled Distance 13.7 (125.0 m, 83.0 kg)

### Notes

Microphone Linear Weighting  
PSPL 0.500 pa (L) at 0.012 sec  
ZC Freq >100 Hz  
Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	4.953	9.017	10.16	mm/s
ZC Freq	21	26	26	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.299	0.249	0.251	sec
Peak Acceleration	0.093	0.188	0.159	g
Peak Displacement	0.048	0.051	0.061	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.2	7.4	7.5	Hz
Overswing Ratio	4.1	4.0	4.0	

➔ **Peak Vector Sum 13.42 mm/s at 0.251 sec**



Cette valeur n'étant associée à aucune fréquence, elle ne peut pas être représentée sur le graphe – il n'y a pas de valeur pour l'axe des x

A'GG ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

14

## Possibilités de localisation

Date/Time Vert at 11:48:05 October 29, 2011  
 Trigger Source Geo: 2.000 mm/s  
 Range Geo: 254.0 mm/s  
 Record Time 5.0 sec at 1024 sps  
 Job Number: 4

Serial Number [REDACTED]  
 Battery Level 7.0 Volts  
 Unit Calibration June 9, 2010 by InstanTel  
 File Name L927DZL450  
 Scaled Distance 13.7 (125.0 m, 83.0 kg)

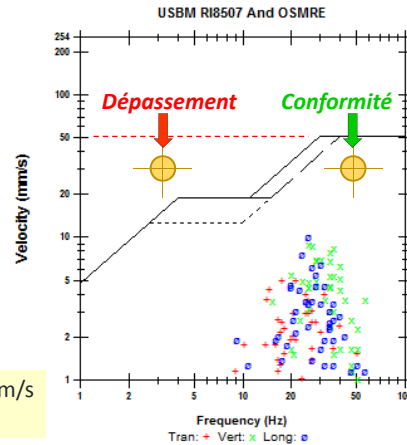
### Notes

Microphone Linear Weighting  
 PSPL 0.500 pa.(L) at 0.012 sec  
 ZC Freq >100 Hz  
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	4.953	9.017	10.16	mm/s
ZC Freq	21	26	26	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.299	0.249	0.251	sec
Peak Acceleration	0.093	0.186	0.159	g
Peak Displacement	0.046	0.051	0.061	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.2	7.4	7.5	Hz
Overswing Ratio	4.1	4.0	4.0	

Peak Vector Sum 13.42 mm/s at 0.251 sec

Toutefois, excéder le seuil des 50 mm/s constitue toujours un dépassement



A\*GG ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
 Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

15

## Possibilités de localisation

Date/Time Long at 11:50:18 February 2, 2012  
 Trigger Source Geo: 3.000 mm/s  
 Range Geo: 254.0 mm/s  
 Record Time 3.0 sec at 1024 sps  
 Job Number: 7

Serial Number [REDACTED]  
 Battery Level 6.3 Volts  
 Unit Calibration November 10, 2011 by InstanTel  
 File Name S834E4XA.7U0  
 Scaled Distance 2.4 (42.0 m, 300.0 kg)

### Notes

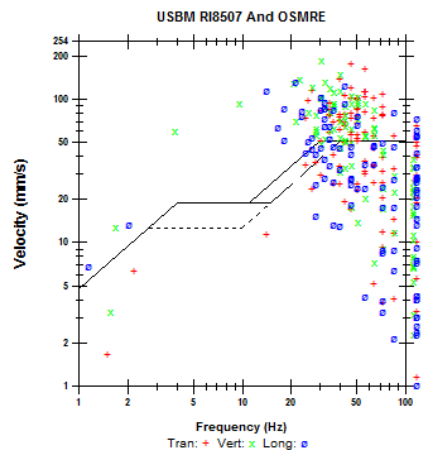
Location: [REDACTED]  
 Client: [REDACTED]  
 User Name: [REDACTED]  
 General: [REDACTED]

### Extended Notes

Microphone Linear Weighting  
 PSPL 4.500 pa.(L) at 0.796 sec  
 ZC Freq 32 Hz  
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	175.5	187.5	132.6	mm/s
ZC Freq	47	30	21	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.789	0.498	0.390	sec
Peak Acceleration	6.960	7.941	6.390	g
Peak Displacement	0.535	1.394	1.018	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.3	7.2	Hz
Overswing Ratio	4.0	4.4	4.4	

Peak Vector Sum 198.5 mm/s at 0.499 sec



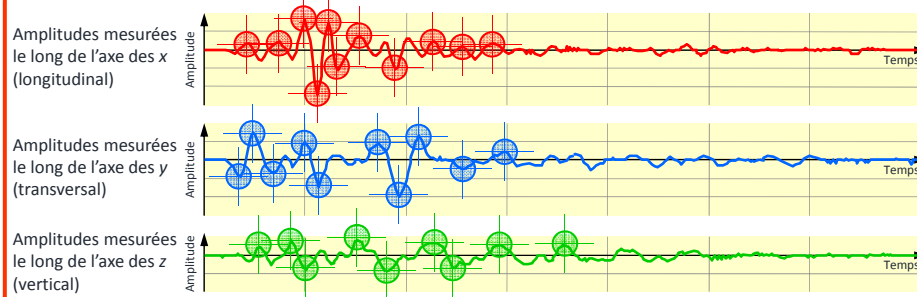
A\*GG ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
 Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

16



## Autres amplitudes « maximales »

- Les trois enregistrements de base ont chacun de nombreux autres pics :



- Pour chacun de ces maxima, la fréquence associée est calculée avec la méthode du ZC afin de s'assurer qu'aucune de ces amplitudes n'est jumelée à des fréquences qui les placeraient en haut des normes

## Autres amplitudes « maximales »

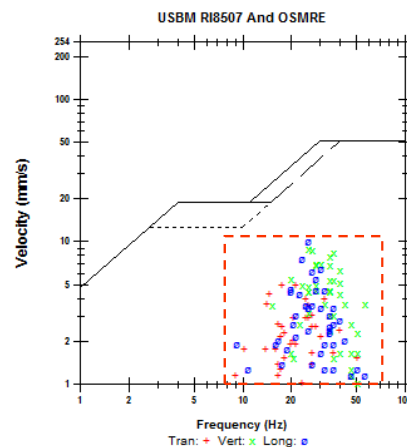
Date/Time Vert at 11:48:05 October 29, 2011  
Trigger Source Geo: 2.000 mm/s  
Range Geo: 254.0 mm/s  
Record Time 5.0 sec at 1024 sps  
Job Number: 4

Serial Number [redacted]  
Battery Level 7.0 Volts  
Unit Calibration June 9, 2010 by Instanetel  
File Name L927DZZI.450  
Scaled Distance 13.7 (125.0 m, 83.0 kg)

### Notes

Microphone Linear Weighting  
PSPL 0.500 pa (L) at 0.012 sec  
ZC Freq >100 Hz  
Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv )

	Tran	Vert	Long	
PPV	4.953	9.017	10.16	mm/s
ZC Freq	21	26	26	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.299	0.249	0.251	sec
Peak Acceleration	0.093	0.188	0.159	g
Peak Displacement	0.048	0.051	0.061	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.2	7.4	7.5	Hz
Overswing Ratio	4.1	4.0	4.0	
Peak Vector Sum	13.42 mm/s at 0.251 sec			



## Accélération et déplacement

Date/Time Vert at 11:48:05 October 29, 2011  
 Trigger Source Geo: 2.000 mm/s  
 Range Geo: 254.0 mm/s  
 Record Time 5.0 sec at 1024 sps  
 Job Number: 4

Serial Number BE10927 V 10.06-8.17 MiniMate Plus  
 Battery Level 7.0 Volts  
 Unit Calibration June 9, 2010 by InstanTel  
 File Name L927DZL450  
 Scaled Distance 13.7 (125.0 m, 83.0 kg)

### Notes

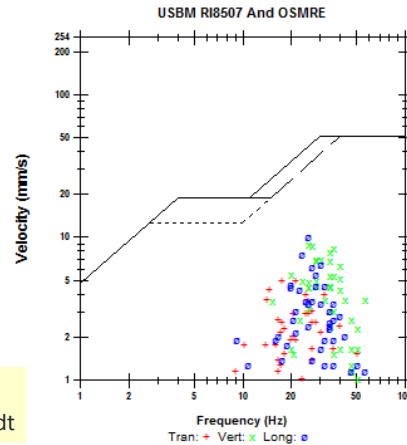
Microphone Linear Weighting  
 PSPL 0.500 pa.(L) at 0.012 sec  
 ZC Freq >100 Hz  
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	4.953	9.017	10.16	mm/s
ZC Freq	21	26	26	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.299	0.249	0.251	sec
Peak Acceleration	0.093	0.186	0.159	g
Peak Displacement	0.046	0.051	0.061	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.2	7.4	7.5	Hz
Overswing Ratio	4.1	4.0	4.0	

Peak Vector Sum 13.42 mm/s at 0.251 sec

Accélération par dérivation  $dV/dt$

Déplacement par intégration  $\int v(t) dt$



ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
 Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

19

## Conclusions

- Des normes vibratoires ont été établies à des fins environnementales, qui doivent être respectées par l'entité qui conduit les opérations de sautage
- Ces normes reconnaissent que l'amplitude acceptable augmente à mesure que la fréquence augmente
- Toutefois, LA valeur limite (par exemple, 50 mm/s) est le maximum de la sommation vectorielle des séismogrammes des trois axes orthogonaux. Cette valeur n'est associée à aucune fréquence.
- Le compromis consiste à considérer les amplitudes maximales de chacun des trois séismogrammes. Ces valeurs d'amplitude peuvent être associées à une fréquence (approximative).
- Les amplitudes maximales de cycles individuels sont également examinés, pour s'assurer qu'aucune de ces amplitudes n'est associée à des fréquences qui les placeraient en haut des normes



ANDRIEUX & ASSOCIÉS CONSULTATION GÉOMÉCANIQUE, INC.  
 Géomécanique, Contrôle de terrain, Forage-sautage

20