

SEEQ 2022

Les VIBRATIONS!

Rien de Sorcier

Richard REID, ing. géo (option géophys.)



Les vibrations! Rien de Sorcier

Le professeur



Les vibrations! Rien de Sorcier

Table des matières

Vibration 101 (Lexique)

- La dynamite
- Vitesse de Particule vs Vitesse Sismique
- Déplacement vs Vitesse de Particule vs Accélération
- Formule de Propagation des Ondes

Vibration 201 (Atténuation d'ondes)

- Atténuation d'une Onde
- Addition / Soustraction d' Ondes
- Avantage des Détonateurs Électroniques

▪ Vibration 301 (Contrôle des Vibrations)

- Établissement des Facteurs 'K' et 'n'
- Droite de Régression
- Facteur 'n'
- Facteur influençant la Valeur 'K'
- Mesures à 30m vs à 4m

Les vibrations! Rien de Sorcier

Table des matières (suite)

Vibration 401 (*Côtés Pratiques*)

- Le Contrôle
- Critères concernant les Vibrations
- Limitations des Devis
- Philosophie des Vibrations vs Dommages
- Différentes façons d'atténuer les Ondes

Conclusions

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 101 (LEXIQUE)

- La Dynamite :

2 grandes qualités :

- Très intelligente, (*elle s'oriente toujours dans la direction la plus facile et y met toutes ses énergies*);
- Très forte, (*plus elle est accotée, plus elle pousse fort*).

Quand on se sert d'explosif, la dynamite, c'est comme la poudre à fusil, la roche, c'est comme les plombs, et à moins de faire coup canon, on tire dans toutes les directions, d'où l'importance de contrôler les énergies.

*

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 101 (*LEXIQUE*)

- **Vitesse de Particules** vs **Vitesse Sismique**

La Vitesse de Particules correspond à la vitesse qu'un grain de sable bouge par rapport à son voisin; et s'il bouge trop vite, la colle (ciment) entre les deux grains de sable se brisera.

La Vitesse Sismique correspond à la vitesse que l'onde se déplace au travers un matériau;

$$V_r \text{ roc sain } \approx 5000 \text{m/s}$$

$$V_r \text{ roc fissuré } \approx 3500 \text{m/s}$$

Il faut aussi différencier Atténuation de Particules vs Atténuation dans le Roc

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 101 (*LEXIQUE*)

- Déplacement vs Vitesse de Particule vs Accélération

- Déplacement de la particule (d)

Ce critère est surtout utilisé pour les Basses Fréquences ($\leq 10\text{Hz}$), en Génie Civil, où il est question de structure/séisme.

- Vitesse de particule (V)

Ce critère est le plus représentatif pour les Fréquences Moyennes (40@100Hz) en Génie Dynamitage.

- Accélération de la particule (a)

Ce critère est surtout utilisé pour les Hautes Fréquences ($\geq 1000\text{Hz}$), en Génie Mécanique.

Ces 3 critères sont reliés par les relations suivantes :

$$V = 2 \pi f d$$

et

$$a = 2 \pi f V$$

En dynamitage, on ne devrait parler que de Vitesse de Particule.

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 101 (LEXIQUE)

- Formule de propagation des ondes

Un peu d'histoire sur la formule qui régit la propagation des ondes dans les sols causés par les dynamitages :

- La formule générale est $V=K \cdot W^m/D^n$ où :
 - V est la vitesse de particule; elle est proportionnelle à la charge/délai (W) et inversement proportionnelle à la distance (D)
 - ‘m’ et ‘n’ sont des constantes de site (roc et géologie); avec des valeurs de $0.4 \leq m \leq 0.65$ et $0.85 \leq n \leq 1.25$
 - K est défini comme une constante pour un tir donné ; c'est la constante la plus variable que vous n'aurez jamais vu : elle dépend du type de sautage , du confinement, de la séquence de tir, de l'angle de tir, du fardeau et de l'espacement, des explosifs, de la présence d'eau... et de la réussite du sautage.

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 101 (*LEXIQUE*)

- **Par la suite, la formule devint** $V=K \frac{\sqrt{W}}{D}$
ce que plusieurs appelaient la formule de Comeau; Wilfrid, qui travaillait pour HQ a simplement considéré $m = \frac{1}{2}$ et $n=1$; ce qui était valable à distance moyenne pour la plupart des chantiers au Québec.
- **Aujourd'hui, on se sert de la formule suivante :**
$$V=K \left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^n$$
 où 'n' est négatif.

Il s'agit de la même formule de Comeau où le facteur $n = -1$; et dans la formule générale où le facteur 'n' remplace les 2 constantes de site 'm' et 'n'.

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 101 (*LEXIQUE*)

Bref, il ne s'agit que d'une équation à 2 inconnues (**K** et **n**); puisqu'on connaît **W** (charge/délai), et qu'on enregistre la vibration **V** (Vitesse de Particule) à un endroit donné et qu'on mesure la distance **D** qui sépare le géophone du sautage.

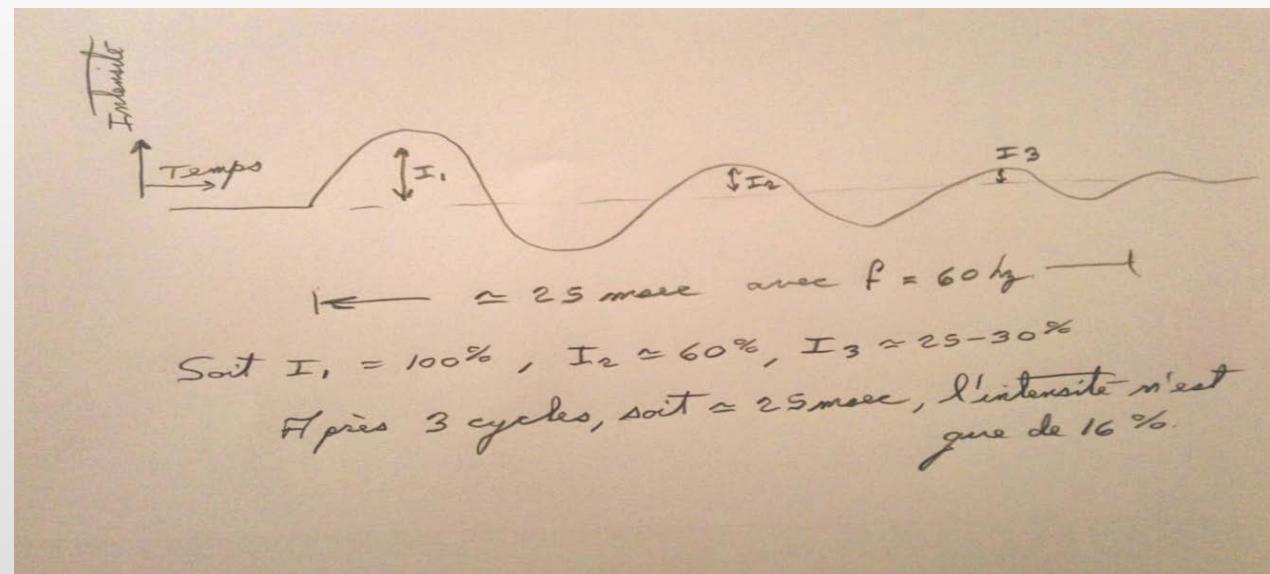
En théorie, avec 2 appareils de vibrations et un sautage, on est capable de calculer 'K' et 'n'; on obtient 2 équations à 2 inconnus, ce qui donne une solution unique. En pratique, il en est tout autre.

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 201 (ATTÉNUATION D'ONDES)

La particule oscille comme une sinusoïde et l'oscillation s'atténue en fonction du temps. L'atténuation de la particule est un concept complètement différent de l'atténuation dû à la propagation: dans les milieux incompressibles, l'atténuation est faible (Ex, vague sur l'eau), alors que dans du roc fissuré/fracturé, l'atténuation est forte, En général, après 3 oscillations, le signal est grandement atténué.

On peut expliquer ainsi l'origine du 25msec entre délais : considérant une fréquence de 100Hz, soit 10ms/cycle, on voit qu'après 25msec, l'addition d'onde, est minime.



Note: Les basses fréquences se propagent plus loin et transportent plus d'énergie

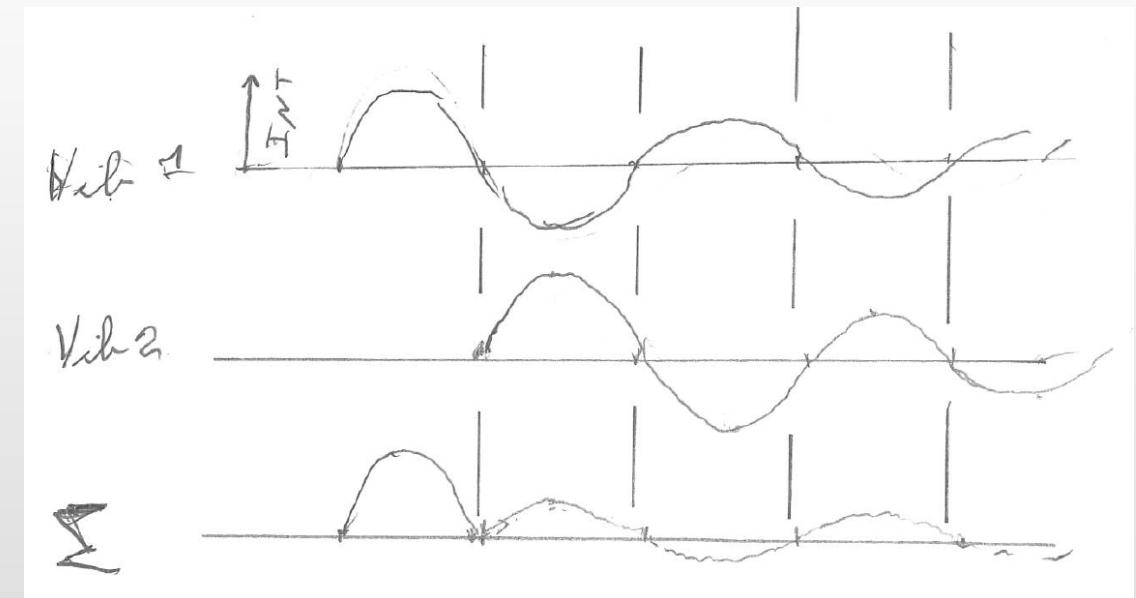
Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 201 (ATTÉNUATION D'ONDES)

- Addition/Soustraction d'Onde

Puisqu'on peut parler d'addition d'onde, on peut parler de soustraction d'onde.

En additionnant la vibration engendrée par 2 détonateurs en déphasage, on obtient une diminution de signal.



Une fréquence de 60 Hz signifie une oscillation complète à toutes les 16msec; si bien que la soustraction maximale se produit à une 1/2 longueur d'onde, soit à 8msec (inversion de phase).

D'où l'introduction des microretards #9, 17, 33, 42, 67, etc... Bref le #9 se produit 9msec après le ZÉRO, le #17 se produit 8msec avant le 25ms, etc... Les microretards ont donc été introduits pour permettre plus de flexibilité et de minimiser les vibrations.

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 201 (ATTÉNUATION D'ONDES)

- Avantage des Détonateurs Électroniques

Les détonateurs électroniques étant programmable au 1msec et précis, ils permettent d'éviter que 2 délais sautent en même temps et de bénéficier de la soustraction d'ondes.

Pratiquement, on peut faire un choix de Séquence où :

- Un sautage de **Pré-D** ne produit pas plus de vibration qu'un sautage de Masse conventionnel. Il suffit d'initier la fissuration avec 2-3 trous avec des tirs subséquents rapprochés pour ensuite 'dé-zipper' la ligne de Pré-D.
- Un sautage de **Bouchon** ne produit pas plus de vibration qu'un sautage d'abattage. Il suffit de choisir une séquence à un délai/trou qui initiera le mouvement suivi avec les délais subséquents pour entretenir le mouvement. Trop de temps peut signifier des projections et/ou le ralentissement du mouvement de la masse, alors que pas assez de temps empêche le dégagement optimal et augmente le confinement.
- Tous les sautages délicats ou en Ville devraient être réalisés avec des Dets Électroniques.

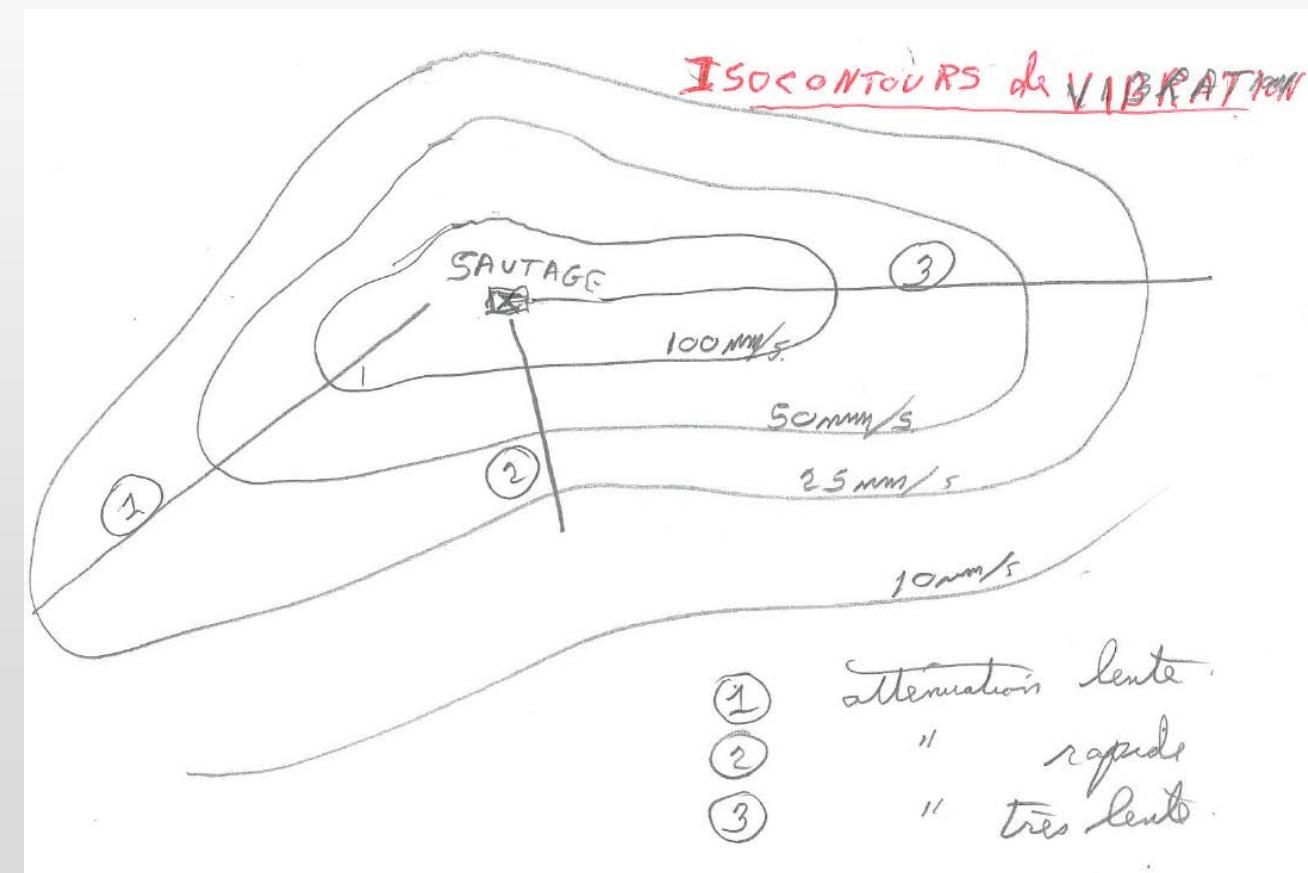
Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 301 (CONTROLE DES VIBRATIONS)

- Établissement des Facteurs 'K' et 'n'

Une équation à 2 inconnues;

Idéalement, on devrait avoir un sautage avec 100 géophones répartis sur le site; ainsi le seul paramètre en jeu serait la géologie et donc l'atténuation; Des courbes d'iso-contours de vibrations permettraient d'identifier l'atténuation dans toutes les directions.



Les vibrations! Rien de Sorcier

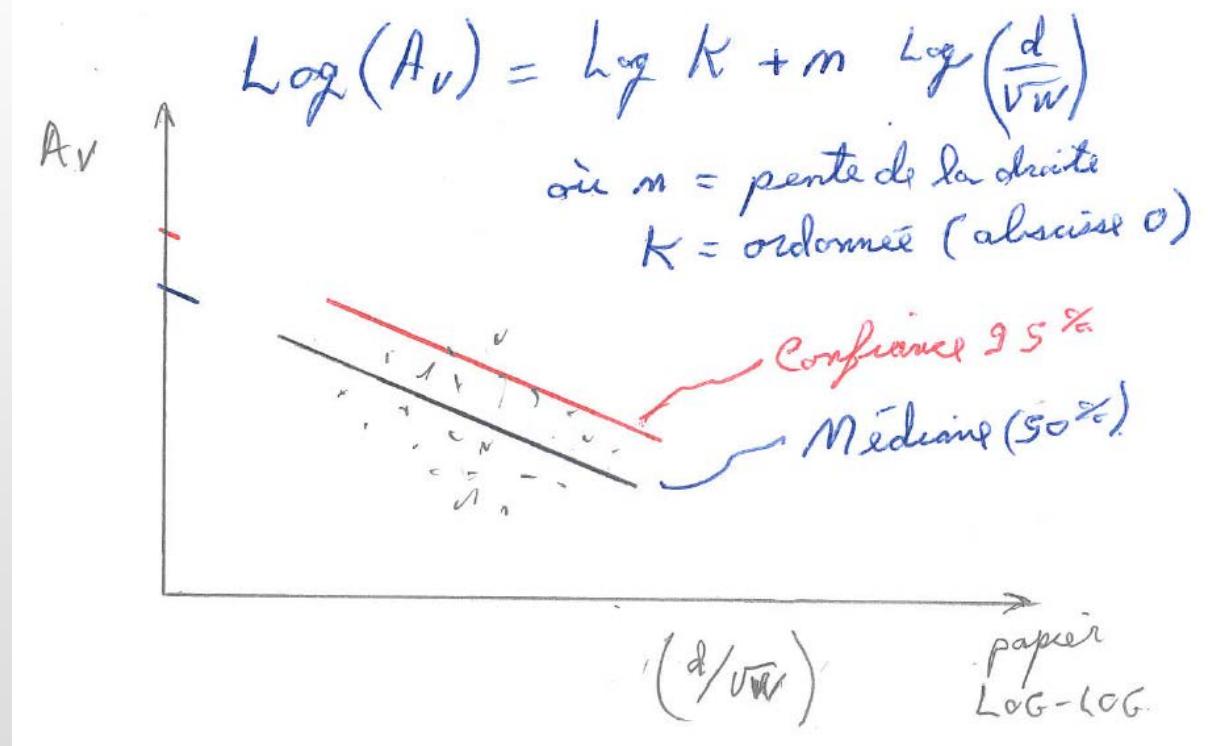
Vibration 301 (CONTROLE DES VIBRATIONS)

- Droite de Régression

Pratiquement, on compile sur site les sautages dans un tableau/graphique pour définir ces paramètres. Cette méthode qui tient compte de tous les sautages réajustent ces valeurs en accumulant les sautages.

Établissement de la droite de régression :

VOIR Notes 1@6



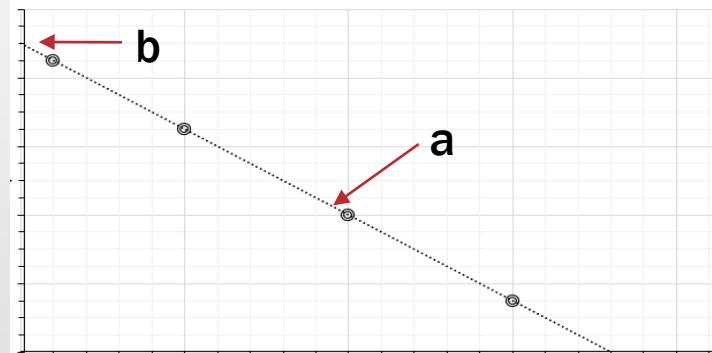
Sur cette représentation, on comprendra que la pente signifie l'atténuation et que l'ordonnée à l'origine correspond à la valeur 'K'.

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 301 (CONTROLE DES VIBRATIONS)

Mathématiquement, et pour ceux qui se rappellent de leurs cours du Secondaire, on voit que :

En géométrie,



$$Y = ax + b$$

où a = pente

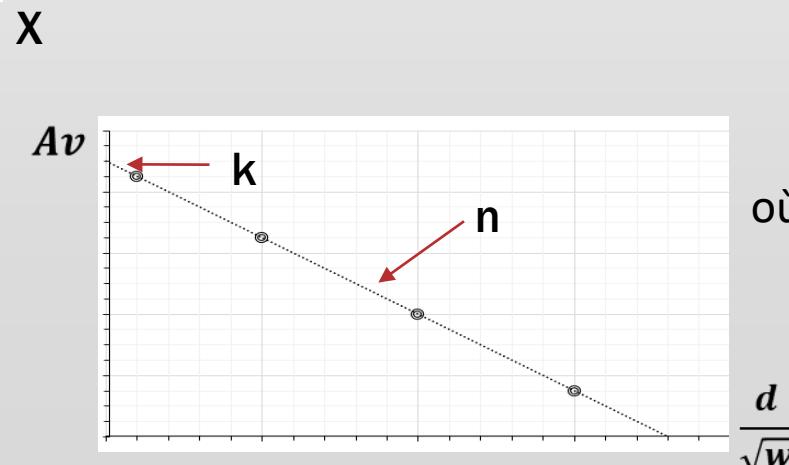
b = ordonnée à l'origine

Dans notre cas,

$$Av = K \left(\frac{d}{\sqrt{w}} \right)^n$$

Mis en log $\rightarrow \log Av = \log K + n \log \left(\frac{d}{\sqrt{w}} \right)$

En graphique sur un papier log-log:



où n = pente
 k = ordonnée à l'origine

$$\frac{d}{\sqrt{w}}$$

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 301 (*CONTROLE DES VIBRATIONS*)

- Facteur 'n' (Détermination rapide et fiable)

Ce qu'il faut retenir, c'est que le facteur 'n' correspond à l'atténuation dans le roc; que les ondes s'atténuent d'autant plus rapidement que le degré de fissuration augmente; et que cette atténuation est différente dépendamment de la direction de propagation.

C'est pourquoi, je préconise d'établir l'atténuation des ondes (la constante 'n') in-situ avant ou lors des premiers dynamitages.

Il suffit par exemple de mesurer dans 4 directions, (N-S, NE-SO, E-O et SE-NO), à l'aide de 6 géophones, et idéalement de façon répétitive avec trois (3) mini-sautages.

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 301 (*CONTROLE DES VIBRATIONS*)

- Facteurs influençant la Valeur ‘K’

Autrefois, on considérait que la Valeur ‘K’ était surtout influencée par le type de sautage (confinement). Dans le système SAE, on considérait un ‘K’ de 50-60 pour les tirs de Bouchon, un ‘K’ de 40-50 pour les Pré-clivages, un ‘K’ de 30-40 pour les percées en Tunnel, et un ‘K’ de 10-20 pour les tirs de Masse, dépendamment de son confinement.

Note: C’était vrai avec les anciens détonateurs; avec les Détonateurs Électroniques, on peut réduire de beaucoup les vibrations causées par les pré-clivages, les bouchons et les percées en Tunnel.

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 301 (*CONTROLE DES VIBRATIONS*)

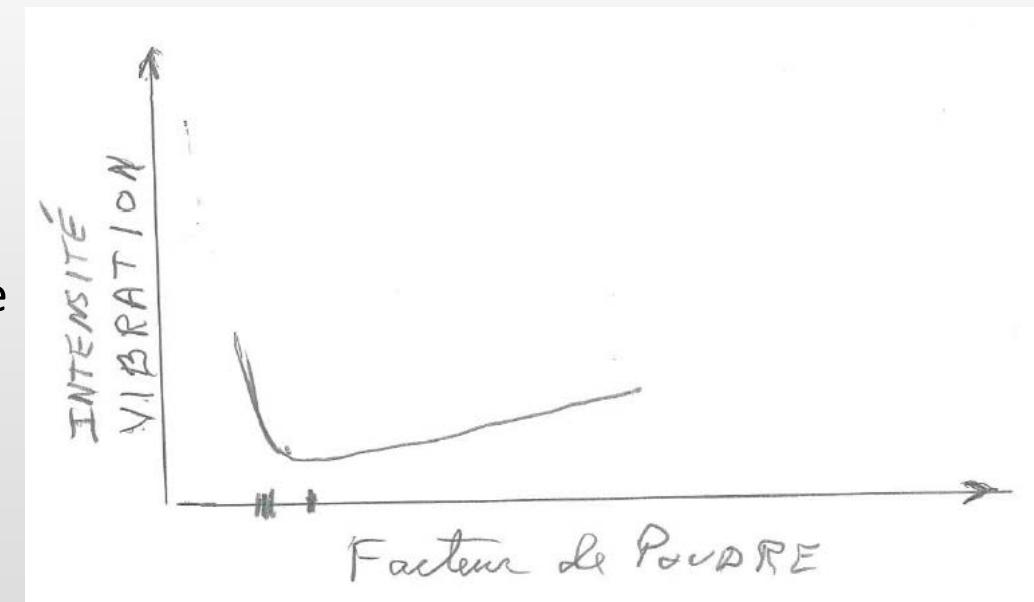
Généralement, on considérera aussi l'influence des différents facteurs suivants :

- Confinement : Facteur 2-3
- Séquence de tir : Facteur 2; en plus de vibrations plus fortes, une mauvaise séquence cause souvent du 'backbreak', de l'overbreak et davantage de blocs
- Angle de tir : De l'ordre de 40% plus fort à l'arrière qu'à l'avant, et 20 % par rapport aux côtés,

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 301 (*CONTROLE DES VIBRATIONS*)

- Facteur de poudre : Un facteur de poudre trop bas cause beaucoup plus de vibration, alors qu'un facteur de poudre trop haut cause un peu plus de vibrations. Par exemple, un facteur de poudre 2 fois trop élevé causera une vibration de l'ordre de 45-50% plus élevée; par contre, les projections, s'il y a lieu iront beaucoup plus loin.
- Type d'explosifs & Présence d'eau : De l'ordre de 10%
- Réussite du sautage vs sautage manqué : Jusqu'à 500%



Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 301 (*CONTROLE DES VIBRATIONS*)

- Mesures à 30m et à 4m

L'onde vibratoire se forme suite au sautage et se propage.

À 30m, on mesurera des fréquences inférieures à 100 Hz, alors qu'à 4m, on mesurera des fréquences de l'ordre de 300 Hz.

Par exemple, dans du roc de 5000 m/s à 40 Hz, la longueur d'onde serait de 125m pour un 'peak' ($\frac{1}{4}\lambda$) à +/- 30m alors que pour un 'peak' à 5m, la longueur d'onde étant de 20m, signifierait une fréquence de 250 Hz.

Pour des mesures à proximité, il est indispensable d'utiliser des géophones hautes fréquences.

Les hautes fréquences ne sont pas dommageables pour les structures. C'est comme de la fibrillation ou un frisson.

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 401 (*CÔTÉS PRATIQUES*)

- Il faut arrêter d'avoir peur des explosifs et de leurs effets.
- La peur *
- Il faut arrêter d'imposer des limites trop restrictives et/ou non réalistes.
- Il faut arrêter de dynamiter “*à la va comme je te dynamite*”.
- Et, il faudrait, comme autrefois, construire dans les coûts et dans les délais.

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 401 (CÔTÉS PRATIQUES)

Applications de la Formule

À partir de la formule de base $V = K \left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^n$, on peut :

- Évaluer (extrapoler / interpoler) la vibration d'un endroit à un autre.

$$V_2 = V_1 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^n$$

- Évaluer la qualité (réussite) d'un tir, en faisant le suivi de la Valeur 'K'

$$K = V \left(\frac{\sqrt{W}}{D}\right)^n$$

En effet, un 'K' moins élevé signifie que le roc était peu confiné. Un suivi au jour le jour permet de voir instantanément les bonnes ou les mauvaises pratiques.

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 401 (CÔTÉS PRATIQUES)

Critères concernant les vibrations

Plusieurs critères existants sont déjà bien documentés; et on sait que :

- Une vibration de 50mm/sec à des fréquences supérieures à 40hz n'endommage pas le plâtre résidentiel;
- Une vibration de 10mm/sec est sécuritaire pour ne pas endommager des ruines;
- La sensibilité des gens est sollicitée pour des vibrations même inférieures à 10mm/sec, alors que 25mm/sec constitue un seuil préoccupant; ANECDOTE
- La majorité des animaux sont beaucoup plus sensibles que les humains;
- Le béton adulte peut supporter des vibrations de plus de mille (1000) mm/sec (Réf. Bible de ISEE).

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 401 (*CÔTÉS PRATIQUES*)

Limitations des Devis

J'ai vu des devis où on demandait de ne pas dépasser 10mm/sec pour le béton.

J'ai vu des tableaux qui stipulait que zéro (0)mm/sec est le seuil idéal pour ne pas déranger.

Impose-t-on dans les devis des normes pour ne pas déranger les gens ou pour ne pas endommager les structures?

Je ne dis pas qu'on ne doive pas respecter la sensibilité des gens (en autant se peut-il), mais on se doit d'admettre qu'il s'agit d'un handicap coûteux pour le Contracteur et/ou les Contribuables, le fait de trop les respecter.

Il y aura toujours des plaintes, quoiqu'on fasse; il faut savoir différencier les plaignants des plaignards. Les plaintes doivent être minimisées par une campagne d'informations et un suivi serré. En tant que citoyen, j'aimerais mieux me faire vibrer un peu plus pendant six (6) mois au lieu d'un peu moins pendant (1) an.

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 401 (*CÔTÉS PRATIQUES*)

Seuil

Un seuil établi trop bas fait augmenter les coûts et les délais inutilement.

Question pratique: L'ingénieur qui impose une limite de 10 mm/s au lieu de 50 mm/s signifie grosso-modo qu'il demande d'utiliser 1 kg/délai plutôt que 25 kg/délai. Alors si le sautage demande d'utiliser 5 kg par trou, l'ingénieur oblige le contracteur à utiliser 5 délais par trou alors qu'il aurait pu opérer à 5 trous par délai.

D'un autre côté, si le contracteur utilise 2 fois la charge par délai, on devrait mesurer une vibration de l'ordre de 40% seulement plus forte.

De même, si le contracteur ne veut jamais dépasser le seuil de 25 mm/s, il doit se restreindre lui-même en concevant ses patrons de sautages en visant 15 mm/s.

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 401 (*CÔTÉS PRATIQUES*)

Tolérance

Et qu'en est-il d'aucune tolérance? Pourquoi ne pas intégrer ce qui se fait de bien ailleurs?

- En Ontario, le devis stipule de respecter 50 mm/s. Toutefois, si la vibration dépasse 70 mm/s, les travaux doivent s'arrêter jusqu'à ce que des modifications soient proposées et acceptées; et si la vibration se situe entre 50 et 70 mm/s pour 2 sautages consécutifs, la même procédure s'applique.
- Au Québec, lorsqu'on impose une limite de 25 mm/s, on considère qu'à 24.9 mm/s, tout est parfait, alors qu'à 25.1 mm/s, l'épée de Damoclès risque de tomber. Pourquoi ne pas accepter une tolérance de 35 mm/s sans déclencher l'alarme et le branle-bas de combat.

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 401 (*CÔTÉS PRATIQUES*)

Philosophie des Vibrations *(Contracteur vs Devis)*

Supposons que le Devis stipule 25mm/sec à respecter; la philosophie est simple :

- “ Si le Contracteur vibre **≥ 25mm/sec, et cause des dommages**, il est responsable.”
- “ Si le Contracteur vibre **≥ 25mm/sec, et ne cause pas de dommage**, il ne doit compenser personne.”
- “ Et si le Contracteur vibre **≤ 25mm/sec, et cause des dommages**, le Client est responsable du dédommagement.”

Les vibrations! Rien de Sorcier

Vibration 401 (CÔTÉS PRATIQUES)

Différentes façons d'atténuer les ondes

Je connais une cie qui a effectué des tests sur différentes méthodes d'atténuation; il n'y a pas eu d'article sur le sujet, mais je crois l'étude d'intérêt national. En voilà un ordre de grandeur:

- FAGD (Forage Aligné Grand Diamètre) 20%
- Pré-D conventionnel (300-600 mm) 35%
- FAGD cisaillé 50%
- Tranchée de vide (FAGD double) 55%
- Tranchée hybride (FAGD avec Pré-D) 65%

Bref, créer une zone de cisaillement, un mur de vide, etc... est une bonne façon de couper les vibrations que ce soit par FAGD, micro-sautage, 'rock splitter', scie-à-chaine à roc ou autres.

Mais la meilleure façon pour minimiser les vibrations est de toujours les contrôler. *

Les vibrations! Rien de Sorcier

Conclusions

La dynamite est très puissante, si on la comprend et la contrôle bien, on est assez efficace pour excaver le roc.

*

Avec une meilleure compréhension du phénomène de propagation des ondes et de leurs effets sur les structures, j'espère que :

- Les Ingénieurs définiront des seuils de vibrations à respecter plus réalistes avec une marge de tolérance.
- Quant au Contracteur, comment peut-il améliorer ses performances?
 - o En engageant un Consultant qui comprend les Vibrations et les expliquent; un ‘coach’ de vibration;
 - o En faisant l’autopsie du dynamitage de la façon suivante :
 - Utilisation de vidéo(s) pour visualiser la non-projection de roc;
 - Utilisation d’Appareils de Mesures de Vibration intelligents qui permettent de décortiquer l’influence de chacun des délais; de comparer le maximum de vibration par rapport à la moyenne des vibrations;
 - En visualisant la qualité de la ‘muck’ (grosseur, distribution, étalement...).
 - o En apportant les correctifs; résultat de travail conjoint avec le surintendant et le dynamiteur en mettant l’accent sur les liens.

Les vibrations! Rien de Sorcier

Conclusions (suite)

Quand le Contracteur sait ce qu'il fait, il y a lieu de 'challenger' et même de s'imposer face à l'ingénierie.

Le travail conjoint des Ingénieurs/Contracteur/Client permet d'aplanir la majeure partie des difficultés de mise-en-œuvre, et de mener à bien et à terme les projets.

Finalement, j'espère que la dynamite ne disparaîtra pas au Québec au profit du 'Rock Breaker'.

Si j'ai été clair, la plupart d'entre vous ont compris que les Vibrations, ce n'est pas sorcier, mais plutôt simple et logique.

Tout est simple, quelquefois complexe, mais jamais compliqué.

Que la relève se lève, je me retire dans 2 ans.

MERCI
&
QUESTIONS ?

