

O. INTRODUCTION

Il y a quelques années, MM. R. Brigode et J. Boxho ont fait état des résultats de leurs études sur les vibrations dues aux tirs de mines dans le gisement microdiorite quartzifère de Quenast (1). Depuis lors, de nouvelles techniques ont vu le jour, notamment l'amorçage pyrotechnique Nonel et le forage en grand diamètre.

Il nous a paru opportun de nous interroger au sujet de l'impact de ces nouvelles technologies sur les vibrations enregistrées au voisinage d'un gisement de roches particulièrement dures comme celui de Quenast.

Après avoir rappelé succinctement diverses notions relatives à :

. l'effet mécanique des explosifs sur le massif rocheux et le milieu extérieur,

. la propagation des vibrations dans les terrains, leurs effets sur les constructions et leur prédiction,

nous aborderons les techniques préconisées pour diminuer et contrôler les vibrations engendrées par les tirs en masse en examinant principalement l'influence du mode d'amorçage et des charges.

I. EFFET MECANIQUE DES EXPLOSIFS SUR LE MASSIF ROCHEUX

1. On sait que la mise à feu des explosifs, plus exactement la détonation, agit sur le milieu extérieur par deux mécanismes distincts : la transmission de l'onde de choc, suivie de la détente du volume des gaz émis.

L'effet mécanique recherché dépend essentiellement du choix de l'explosif. A cet égard, il importe de distinguer :

. les explosifs très brisants, où l'effet de l'onde de choc est prépondérant (les dynamites, par exemple);

. les explosifs moins brisants, appelés lents ou poussants, pour lesquels la détente des gaz est prépondérante (les nitrates-fuel, par exemple).

De plus, quelle que soit la méthode d'abatage utilisée, que l'on fore "sous l'aire" (en surprofondeur), ou que l'on utilise des mines de pied, le travail le plus difficile que doit réaliser l'explosif est le cisaillement du pied du front.

En ce qui nous concerne, la roche de Quenast, de poids spécifique 2,72, présente en moyenne une résistance à la compression de 2.800 bar, une résistance à la traction de 125 bar et une résistance au cisaillement de l'ordre de 250 bar, alors que la plupart des calcaires et même les quartzites et les granites n'offrent habituellement qu'une résistance au cisaillement de 60 à 150 bar dans les cas les plus extrêmes (2).

Or, la découpe correcte du pied du front est d'une importance capitale pour l'exploitant (impact sur les prix du chargement et du transport en extraction). Il s'ensuit

la nécessité absolue d'utiliser un explosif brisant comme charge de pied pour obtenir le cisaillement souhaité.

Pour le reste de la charge, c'est-à-dire pour la colonne du fourneau, le travail mécanique de l'explosif est moindre. Il suffit généralement d'employer un explosif moins brisant, un poussant, pour projeter la roche, afin d'assurer un bon étalement du tas (l'effet de la détente des gaz est ici le plus important).

2. Il n'est pas inutile de rappeler, bien que cela paraisse évident, que la quantité d'énergie réellement transmise au rocher (donc utilisée pour fragmenter la roche) par rapport à la quantité d'énergie libérée par la détonation est d'autant plus grande que les caractéristiques de l'explosif sont bien adaptées à celles du rocher à abattre.

Différentes études ont montré que cette adaptation peut être quantifiée de façon assez simple par le rapport des impédances mécaniques de l'explosif et du rocher (3) dans les conditions du tir envisagé.

Si l'on désigne par $I_e = V_d \times \gamma_c$, l'impédance de l'explosif, formule dans laquelle : V_d = vitesse de détonation (m/s)
 γ_c = densité de chargement (g/cm³) ou densité de l'explosif x coefficient du couplage,

et si $I_r = V \times \gamma$ représente l'impédance mécanique du rocher, où :

V = vitesse des ondes de compression dans le rocher (m/s) (la vitesse V peut être mesurée par une méthode sonique au voisinage du fourneau)
et γ = masse volumique de la roche (g/cm³),

le rapport $Z = I_e/I_r$ permet de juger l'adéquation de l'explosif au rocher à abattre.

Le transfert de l'énergie de choc de l'explosif au rocher est d'autant meilleur que Z est proche de 1.

II. PROPAGATION DES VIBRATIONS DANS LES TERRAINS - EFFETS SUR LES CONSTRUCTIONS

1. L'étude proprement dite des vibrations et de leur propagation sortant du cadre de cette publication, nous ne retiendrons que quelques faits essentiels permettant de comparer nos essais aux études antérieures effectuées sur le même site de Quenast.

Nous savons qu'un tir en masse est constitué de nombreux fourneaux répartis sur une ou plusieurs rangées et dont la mise à feu n'est pas instantanée. Les impulsions mécaniques engendrées proviennent donc de l'émission de plusieurs ondes de choc déphasées, auxquelles viennent s'ajouter celles induites par réflexion ou réfraction successives sur les surfaces de discontinuité du massif. Il s'ensuit que c'est en réalité un train d'ondes complexes qui est transmis au massif lors d'un tir en masse.

Les ondes émises par une impulsion mécanique dans le sol se décomposent par ailleurs en ondes profondes et superficielles qui

agissent différemment; les premières représentant en plus deux types bien connus, les ondes longitudinales et les ondes transversales (4), (5), (6), (7). Ces ondes obligent les particules de matière à se déplacer dans le sens de leur propagation.

De plus, la vitesse de transmission du train d'ondes dépend principalement de la nature et de la texture de la roche, ainsi que des conditions géologiques de mise en place du massif qu'il traverse (la vitesse de transmission variant généralement de 1.500 à 6.500 m/s).

Toute particule influencée par un train d'ondes oscille donc autour de sa position d'équilibre d'un mouvement oscillatoire complexe de type amorti. Les paramètres définissant cette oscillation (déplacement, vitesse, accélération) peuvent être représentés chacun analytiquement par une série convergente de Fourier.

Cette possibilité de décomposition en vibrations harmoniques et le fait que seul nous intéresse, au cours d'un tir, un maximum (durant une période) qui caractérise l'intensité du phénomène, nous permettent d'assimiler la vibration durant la période où elle atteint son maximum à une sinusoïde équivalente.

En conséquence, les valeurs maximales du déplacement, de la vitesse et de l'accélération de la particule, données au tableau I, méritent seules notre attention.

2. Le diagramme classique de Nicholls, Johnson et Duvall (8), reproduit à la figure 1, montre clairement que le paramètre en relation directe avec les dégâts causés aux constructions est la vitesse de vibration des particules, bien plus que leur déplacement ou leur accélération (la vitesse, à une constante près, est en effet égale au produit de la fréquence par le déplacement).

La vitesse de vibration est donc le paramètre significatif du phénomène vibratoire à prendre en considération, en ce qui concerne le volet "dégâts aux constructions" (pour les tirs en carrière). La vitesse est une expression vectorielle avec ses trois composantes qui oscillent avec des déphasages différents. Dans le cas d'ébranlements provoqués par des tirs de masse, l'étude du US Bureau of Mines (8) a montré

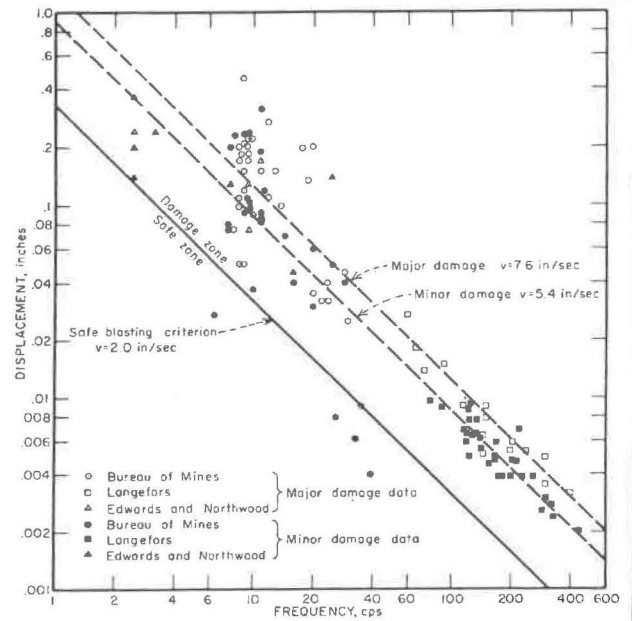


Fig. 1 : Déplacements de vibration mesurés en pouces en fonction de la fréquence de la vibration mesurée en cycles par seconde

que la composante verticale de la vitesse de vibration est en pratique toujours la plus élevée, donc la plus dangereuse.

Plus récemment (9), en 1981, l'analyse statistique des résultats, obtenus par Ch. Chapleau, indiquait que dans 90 % des cas : V résultante = V verticale \times (1,02 à 1,25), étayant ainsi l'affirmation précédente.

Pratiquement, la valeur de 50 mm/s (2 in/s) peut être choisie comme limite supérieure des vitesses de vibration ne provoquant pas de dégâts aux constructions moyennes normalement entretenues (safe blasting criterion).

Le diagramme du US Bureau of Mines, présenté sous une autre forme (8) à la figure 2, indique d'ailleurs cette valeur-seuil comme étant la séparation entre les zones de dégâts et de sécurité.

Tableau I. Paramètres de la vibration

		Ordre de grandeur
Déplacement maximal	: A (de $a = A \sin 2 \pi f t$)	0 - 500 μ
Vitesse maximale	: $V = 2 \pi f A$ (de $v = \frac{d a}{d t}$)	0 - 100 mm/s
Accélération maximale	: $G = 4 \pi f^2 A$ (de $a_c = \frac{d^2 a}{d t^2}$)	
Vitesse résultante maximale	: $\bar{v}_R = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$	
f = fréquence de la vibration		10 à 80 Hz

tre (déterminée par calcul et affinée in situ), aucun travail d'abattage n'est effectué; par contre, l'énergie sismique est très importante et peut représenter plusieurs dixièmes de l'énergie mécanique totale (11).

Ainsi, au siège de Quenast, l'expérience a montré que l'épaisseur du burden ne pouvait dépasser 5 m avec les explosifs actuellement commercialisés en Belgique.

La distance tir-point de mesure diminue au fur et à mesure que l'exploitation se développe (que les fronts avancent dans une direction donnée), puisque l'emplacement du point de mesure - les maisons riveraines - reste en principe fixe. Il faut donc adapter la charge de la volée la plus chargée C en fonction de la diminution de la distance D.

Au siège de Quenast, les points de mesure sont disposés comme indiqué à la figure 3 (la fin du gisement est atteinte au nord). La figure 4 montre que la répartition de ces points de mesure nous permet de travailler par triangulation suivant la direction où le tir a lieu. On peut remarquer que le point appelé 46 est commun aux trois triangles, il sert de référence.

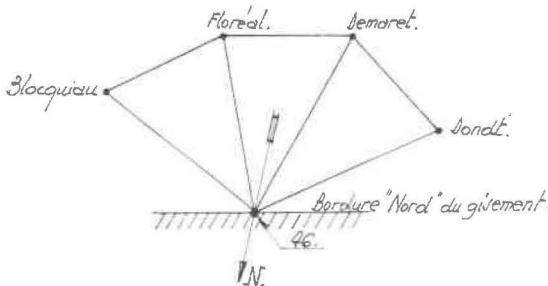


Fig. 4 : Représentation schématique des différents points de mesure permettant de travailler par triangulation suivant la direction où le tir a lieu

Quant au dispositif d'amorçage, il constitue l'objet principal de cette communication et est décrit au chapitre suivant.

IV. CONTROLE DES VIBRATIONS - INFLUENCE DU MODE D'AMORÇAGE ET DES CHARGES

1. L'instrument de mesure utilisé est le vibrographe Tellus, transducteur de déplacement de type mécanique. La fréquence de résonance du Tellus est de 7 Hz. L'appareil convient pour les mesures de fréquences comprises entre 15 et 170 Hz et des amplitudes comprises entre 10 et 500 microns (rappelons que, lors d'un tir en carrière, la fréquence est généralement comprise entre 10 et 100 Hz). Sa précision est de ± 1 mm/s.

Remarque : L'appareil Tellus est un vibrographe facile à mettre en oeuvre, simple et peu coûteux. Il permet, surtout grâce à son disque en papier amovible, de toujours conserver un support matériel archi-

vable, une trace exacte et fidèle de l'enregistrement du tir, ce qui est un avantage appréciable lors de tout litige possible postérieur au tir.

2. Pour chaque tir, nous plaçons trois vibrographes Tellus aux sommets de l'un des triangles décrits aux figures 3 et 4.

Cette façon systématique de procéder permet :

a) L'adéquation des plans de tirs à la distance tir-vibrographe.

b) La constitution et l'archivage (grâce au support matériel constitué par le disque en papier du Tellus) de dossiers de tirs complets qui peuvent être d'une grande utilité en cas de plainte et d'enquête de la part de l'Administration des Mines.

c) L'analyse au point de vue des vibrations de nouvelles techniques et la comparaison avec des essais antérieurs (procédure facilitée en utilisant constamment le même type de vibrographe Tellus).

D'autre part, on ne doit pas perdre de vue que toutes les limites proposées par les projets de normes ou la recommandation du US Bureau of Mines (50 mm/s) ont un caractère probabiliste. Par conséquent, on ne doit jamais négliger une réclamation, si futile puisse-t-elle paraître a priori, même si on a la certitude que les vitesses de vibration pour le tir en question sont en dessous des seuils de sécurité habituels.

Cette réflexion de portée générale est concrétisée au centre de Quenast de la façon suivante :

a) Par l'instauration d'une heure de tir précise (en l'occurrence 16 h 15) fixée de commun accord avec les riverains, les responsables communaux et les responsables des écoles.

b) Par un dialogue quasi permanent avec les populations riveraines de l'exploitation.

L'expérience montre que cette procédure permet de créer un climat de bonne entente et de mutuelle compréhension entre les exploitants et les riverains.

3. L'influence du mode d'amorçage et des charges a été examinée plus particulièrement. Dans ce paragraphe, nous décrivons les résultats obtenus au siège de Quenast ainsi que leur analyse. En toute rigueur, ces résultats ne donnent qu'une tendance représentative des phénomènes observés.

a. Influence de la méthode de minage avec amorçage latéral par le dessus

Pour un même type d'amorçage, en l'occurrence l'amorçage latéral, nous avons comparé pour deux directions déterminées (Quenast et Blocquiau) les vibrations obtenues par la méthode de minage sous l'aire avec celles obtenues lors de l'étude de l'Inix à Quenast (1), effectuées à l'époque sur des tirs non forés sous l'aire (avec utilisation de mines de pied).

On constate sur des diagrammes logarithmiques (fig. 5 et 6) que les droites des régressions sont parallèles et non superposées.

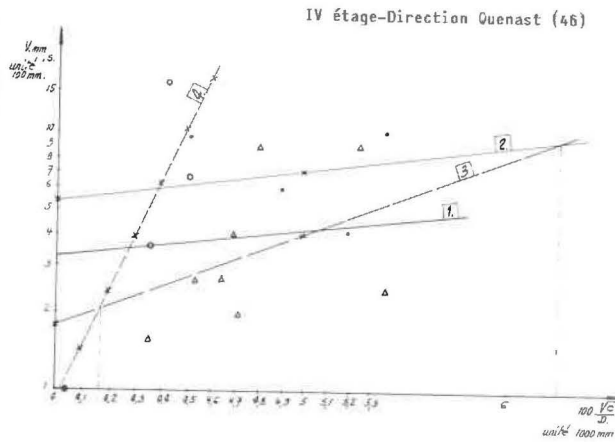


Fig. 5 :

- [1] Utilisation de mines de pied - Amorçage latéral. Diamètre de forage 105 mm (Etude Iniex)
- [2] Forage sous l'aire - Amorçage latéral. Diamètre de forage 105 mm
- [3] Forage sous l'aire - Amorçage par détonateur Nonel au pied. Diamètre de forage 105 mm
- [4] Forage sous l'aire - Amorçage par détonateur Nonel au pied. Diamètre de forage 165 mm

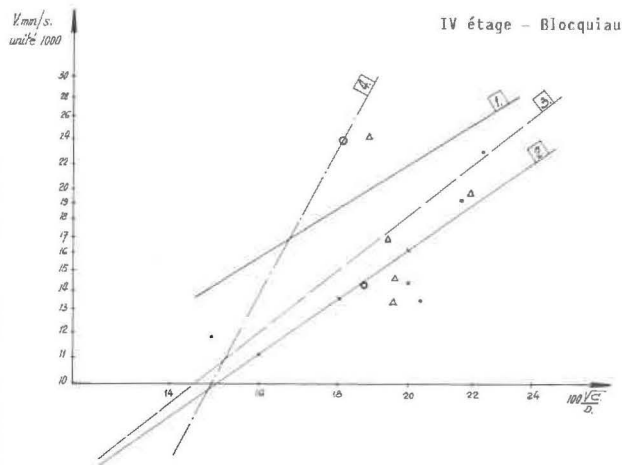


Fig. 6 :

- [1] Utilisation de mines de pied - Amorçage latéral. Diamètre de forage 105 mm (Etude Iniex)
- [2] Forage sous l'aire - Amorçage latéral. Diamètre de forage 105 mm
- [3] Forage sous l'aire - Amorçage par détonateur Nonel au pied. Diamètre de forage 105 mm
- [4] Forage sous l'aire - Amorçage par détonateur Nonel au pied. Diamètre de forage 165 mm

Pour de faibles rapports \sqrt{C}/D , c'est-à-dire les distances D importantes (500 m dans la direction de Quenast), la méthode de minage sous l'aire avec amorçage latéral fournit des vibrations plus importantes, tandis que pour des distances faibles (à fort rapport \sqrt{C}/D), la méthode de minage sous l'aire provoque des vibrations moins importantes que celle avec utilisation de mines de pied.

Le tableau II reprend les résultats obtenus.

De la comparaison des deux méthodes, on peut retenir :

1°) Le passage des tirs au-dessus de l'aire à des tirs sous l'aire ne modifie pas la façon dont les ondes sont transmises (palléisme des droites). En d'autres termes, les caractéristiques de filtrage du site ne sont pas modifiées.

2°) Les différences observées par rapport aux résultats de l'Iniex sont liées à la distance tir-captur.

Personnellement, nous pensons que le tir sous l'aire provoque une grande proportion d'ondes de fréquence élevées d'autant mieux amorties que la distance D augmente.

b. Influence de l'amorçage par le pied avec détonateurs Nonel au pied

Pour une même méthode de minage, le minage sous l'aire, nous comparons les résultats obtenus avec un amorçage latéral, d'une part, et en utilisant un amorçage ponctuel par le pied (détonateur Nonel), d'autre part.

Les explosifs utilisés dans le pied et dans la colonne sont identiques dans les deux cas : Irégel 406 SD dans le pied et nitrate-fuel dans la colonne.

Les graphiques 5, 6 et 7 donnent également les valeurs obtenues dans trois directions distinctes (Quenast, Blocquiau, Hennuyères). Pour les trois directions considérées, nous faisons la même constatation, à savoir que, jusqu'à une certaine valeur de \sqrt{C}/D , les vibrations sont inférieures à celles données, dans des conditions de charge et de distances identiques, par la méthode latérale, mais qu'au-delà de ce rapport il y a augmentation des vibrations.

Le tableau III reprend les résultats obtenus.

On peut tirer plusieurs conclusions :

1°) Le tir sous l'aire avec amorçage ponctuel a pour résultat de modifier la "répon-

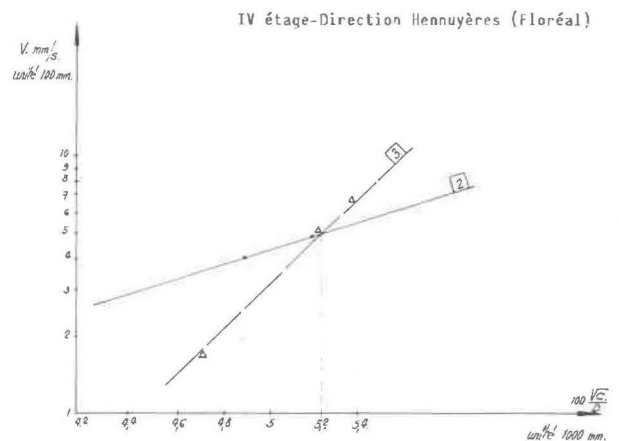


Fig. 7 :

- [2] Forage sous l'aire - Amorçage latéral. Diamètre de forage 105 mm
- [3] Forage sous l'aire - Amorçage par détonateur Nonel au pied. Diamètre de forage 105 mm

Tableau II. Résultats obtenus pour les directions Quenast et Blocquiau avec amorçage latéral : 1°) avec foration sous l'aire
2°) avec utilisation de mines de pied

Minage sous l'aire (amorçage latéral)						
Direction Quenast (D = 500 m)			Direction Blocquiau (D de 120 à 270 m)			
V (mm/s)	C (kg)	\sqrt{C}/D	V (mm/s)	C (kg)	D (m)	\sqrt{C}/D
10,2	720	0,0537	23	720	120	0,224
4,2	673,8	0,0519	19,4	673,8	120	0,216
0	573,5	0,0479	14,4	573,5	120	0,199
6,1	507,5	0,0451	11,8	570	160	0,149
			4,1	602	270	0,091

Ce qui donne ($V = K \left(\frac{\sqrt{C}}{D}\right)$) :

Minage sous l'aire (amorçage latéral)	
$\alpha = 1,311$ et $K = 362,952$	$\alpha = 1,692$ et $K = 247,477$

Méthode avec utilisation de mines de pied (amorçage latéral)	
$\alpha = 1,010$ et $K = 86,330$	$\alpha = 1,460$ et $K = 228,620$

Tableau III. Résultats obtenus pour les directions Quenast (46), Blocquiau et Hennuyères (Floréal) avec minage sous l'aire : 1°) avec amorçage latéral
2°) avec amorçage par le pied

Méthode Nonel (minage sous l'aire)								
Direction Quenast (D de 468 à 500 m)			Direction Blocquiau (D = 120 m)			Direction Hennuyères (D de 468 à 500 m)		
V (mm/s)	C (kg)	\sqrt{C}/D	V (mm/s)	C (kg)	\sqrt{C}/D	V (mm/s)	C (kg)	\sqrt{C}/D
2,5	720	0,0537	26,8	720	0,2236	6,7	720	0,0537
2	552,5	0,0470	14,6	552,5	0,1959	1,7	552,5	0,0470
2,7	512,5	0,0453	24,3	512,5	0,1887	0	512,5	0,0453
2,7	537,5	0,0464	16,9	537,5	0,1932	0	537,5	0,0464
9	550	0,0469	0	550	0,1954	0	550	0,0469
4,1	547,5	0,0468	13,4	547,5	0,1950	0	547,5	0,0468
9	687	0,0524	20	687	0,2184	5,1	687	0,0524
1,6	472	0,0464				0	472	0,0464

Ce qui donne pour $V = K \left(\frac{\sqrt{C}}{D}\right)^\alpha$

Méthode Nonel (minage sous l'aire)		
$\alpha = 3,692$ et $K = 261.372,430$	$\alpha = 1,891$ et $K = 385,259$	$\alpha = 9,743$ et $K = 1,53P \times 10^{13}$

Méthode latérale (minage sous l'aire)		
$\alpha = 1,311$ et $K = 362,952$	$\alpha = 1,692$ et $K = 247,477$	$\alpha = 2,966$ et $K = 31.704,507$

On obtient l'égalité des vibrations par la méthode Nonel et par la méthode latérale, respectivement pour :

$\frac{100 \sqrt{C}}{D} = 6,305$	$\frac{100 \sqrt{C}}{D} = 10,832$	$\frac{100 \sqrt{C}}{D} = 5,232$
----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------

se" du terrain, lorsque le rapport \sqrt{C}/D reste identique à celui de l'amorçage latéral, et cela dans tous les cas.

2°) Cette réponse du terrain est modifiée favorablement en dessous d'une valeur critique du rapport \sqrt{C}/D , dont la valeur est variable avec la direction.

3°) Le gain obtenu, c'est-à-dire la différence entre la vitesse de vibration mesurée par la méthode latérale et celle mesurée par un amorçage ponctuel par le pied en valeur absolue, est également variable avec la direction pour une même variation de \sqrt{C}/D au-dessous et au-dessus de la valeur critique.

La question que l'on est amené à se poser est de savoir pourquoi y a-t-il amélioration jusqu'à une certaine valeur, puis aggravation ? Pour répondre à cette question, il faut revenir à la définition du rapport \sqrt{C}/D . Dans le cas présent, pour une direction donnée, les distances D sont pratiquement constantes, ce qui signifie que la seule variable à considérer est C.

Or, nous pouvons décomposer cette charge en charge de pied et en charge de colonne. Nous sommes donc amenés à distinguer deux cas :

a) Adéquation "parfaite" du rapport charge de pied - charge de colonne à la partie du massif intéressé par le tir

Comme nous l'avons déjà dit, nous pensons que le minage sous l'aire produit des fréquences élevées qui s'amortissent plus vite que les basses fréquences.

Ici, cette proportion de fréquences élevées est, à notre avis, encore augmentée par l'amorçage par le pied, puisque ce dernier sortira en premier lieu.

Par contre, un autre phénomène doit être pris en considération. Dans le cas de l'amorçage latéral, nous utilisons des relais (raccords pour cordeaux détonants) qui ont en réalité une dispersion fort importante pouvant osciller de 5 à 35 milli-secondes par rapport à la valeur nominale 20 ms du retard. Il s'ensuit que chaque fourneau n'est plus allumé à un temps bien précis (cas du Nonel), mais à des intervalles très variables.

Par causalité, un phénomène d'interférences secondaire et "non voulu" est ainsi créé. Cette interférence "parasitaire" atténuée

les vibrations, car elle renforce le travail de filtrage du site (sorte de pré-filtre).

L'effet résultant sur la vitesse de vibration est d'autant plus bénéfique que C augmente.

b) Non-adéquation "parfaite" du rapport charge de pied - charge de colonne à la partie du massif intéressée par le tir

Si la charge de colonne est incorrecte, cette imprécision n'est pas atténuée dans le cas de l'amorçage ponctuel par le pied. Au contraire, l'effet multiplicateur est d'autant plus marqué que C augmente.

Par contre, dans le cas des relais de détonation, la conséquence de cette imprécision est masquée par le phénomène des "interférences parasites" dues à la dispersion des relais. Comme nous l'avons vu, cet effet atténué d'autant mieux les vibrations que C augmente.

Malgré le peu de mesures comparatives, nous pouvons noter que, pour les directions donnant pour un même rapport \sqrt{C}/D un niveau élevé de vibrations qui correspond à un filtrage global moins efficace, la valeur critique de \sqrt{C}/D est d'autant plus faible (fig. 8).

Ainsi, pour une augmentation constante d'une unité à la valeur critique, on obtient pour :

100 \sqrt{C}/D	(v. Nonel - v. latéral)
5,232	15,14
6,305	4,92
10,832	0,12

Il s'ensuit qu'une erreur d'amorçage et de charge est d'autant plus perçue que le filtre terrain est globalement moins bon.

Du point de vue strict de l'étude des vibrations, le problème de la répartition adéquate de l'explosif brisant et de l'explosif soufflant dans un fourneau de mine est un problème délicat qui demande une étude fine et de longue haleine, car chaque tir reste en fait un cas d'espèce qu'il faut traiter comme tel.

c) Influence des grands diamètres

Les résultats donnés aux points a) et b) correspondent à des tirs forés en diamètre 105 mm. Par souci d'être exhaustifs, nous

Tableau IV. Résultats obtenus pour les directions Quenast, Blocquiau et Hennuyères avec des tirs forés en 165 mm de diamètre sous l'aire et amorcés ponctuellement au pied par un détonateur Nonel

Direction Quenast (D de 491 à 500 m)			Direction Blocquiau (D de 120 à 165 m)			Direction Hennuyères (D = 500 m)		
v (mm/s)	C (kg)	$\frac{\sqrt{C}}{D}$	v (mm/s)	C (kg)	$\frac{\sqrt{C}}{D}$	v (mm/s)	C (kg)	$\frac{\sqrt{C}}{D}$
0	407	0,0403	17	407	0,168	0	407	0,0404
15,7	487	0,0441	0	487	0,184	0,5	487	0,0441
6,7	505	0,0449	14,3	505	0,187			
3,6	475	0,0444	24	475	0,132	0	475	0,0436

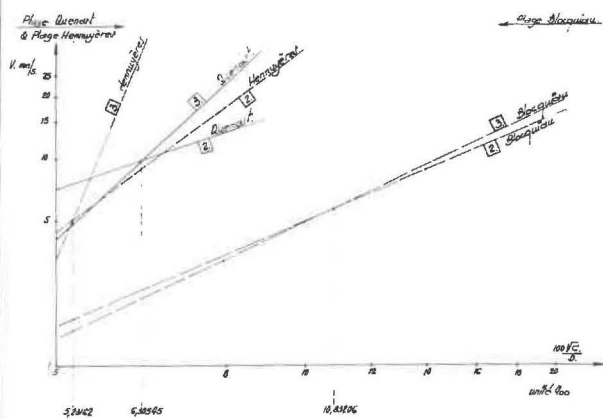


Fig. 8 :

Valeurs critiques du rapport V_c/D pour les directions Quenast (46), Blocquiau et Hennuyères (Floréal)

[2] Forage sous l'aire - Amorçage latéral. Diamètre de forage 105 mm

[3] Forage sous l'aire - Amorçage par détonateur Nonel au pied. Diamètre de forage 105 mm

donnons au tableau IV les quelques résultats qui sont relatifs à des essais de tirs en grands diamètres (165 mm) réalisés au siège de Quenast (objet d'une prochaine recherche). Il est évident que ces chiffres demandent à être confirmés par une étude fine et répétitive réalisée in situ. Néanmoins, nous pensons qu'il est intéressant de les présenter, mais en les interprétant cependant avec la prudence qui s'impose.

Rappelons que les vibrographes Tellus ont une précision relative de ± 1 mm/s. Il s'ensuit que si, d'une part, on admet qu'une lecture zéro puisse être interprétée comme égale à un et, d'autre part, étant donné le nombre peu élevé de points, on peut tracer une droite (et non plus une droite de régression) pour les directions Quenast et Blocquiau (fig. 5 et 6).

Les deux droites représentent donc des tirs forés sous l'aire en 165 mm de diamètre avec amorçage par le pied à l'aide de détonateurs Nonel. On constate (fig. 5 et 6) que ces deux droites sont encore plus redressées que les droites correspondant à des tirs forés et amorcés avec les mêmes méthodes, mais avec un diamètre de forage plus petit, en l'occurrence 105 mm.

Il existe également, mais cette fois par rapport à la droite des tirs forés sous l'aire et amorcés avec Nonel en diamètre de forage 105 mm, un rapport critique V_c/D . On peut d'ailleurs faire les mêmes observations pour ces rapports critiques Nonel 165 mm - Nonel 105 mm (minage sous l'aire) que pour les rapports critiques Nonel 105 mm - méthode latérale 105 mm (minage sous l'aire), mais on constate que les valeurs critiques Nonel 165 mm - Nonel 105 mm (minage sous l'aire) sont inférieures à celles Nonel 105 mm - méthode latérale 105 mm (minage sous l'aire).

Nous pouvons émettre à ce sujet l'hypothèse suivante : à cause de la charge élevée par fourneau en grands diamètres, le nombre de mines par volée diminue. En effet, si pour le Nonel en diamètre 105 mm une volée

complète comprend quatre ou cinq fourneaux, par contre, pour le Nonel en diamètre 165 mm elle n'en compte qu'un ou deux.

CONCLUSIONS

1°) Il est illusoire de penser que l'on peut annuler les vibrations engendrées par les tirs en masse, car il faut utiliser de l'explosif pour abattre le massif.

La source potentielle de vibrations (l'explosif) est indispensable pour assurer un découpage convenable du massif. Mais il faut que cet explosif soit adapté à la roche à abattre et placé dans des conditions telles qu'il puisse réaliser le travail mécanique qu'on attend de lui et rien de plus.

2°) La définition d'un niveau de sécurité relève, comme dans beaucoup de cas, de la recherche d'un compromis entre :

- . la nécessité pour l'exploitant, surtout à l'heure actuelle, de rentabiliser au maximum son gisement, et
- . le devoir d'assurer une sécurité d'existence aux populations riveraines de la carrière.

Nous pensons qu'une réglementation unique au niveau des pays de la Communauté Européenne est indispensable en la matière, et ce dans les délais les plus brefs. Les valeurs limites de sécurité à adopter devront, de plus, tenir compte du type de vibrations à envisager et définir un critère en fonction de celui-ci.

3°) Des progrès importants ont été réalisés dans les domaines des explosifs industriels et des modes d'amorçage. Cependant, nous devons constater que, plus la mise à feu devient précise (Nonel, amorçage séquentiel) et plus la connaissance fine du massif devient primordiale pour réaliser une adéquation la plus parfaite possible de l'explosif à la roche.

Cela demande, bien entendu, la mise en place de techniques qui ne sont pas encore utilisées en Belgique (utilisées, par contre, couramment aux USA et au Canada). Par exemple, l'utilisation systématique de sondes microsismiques permettant de mesurer au moment du forage l'état de fissuration aux abords de chaque fourneau. Les diagrammes relevés permettant en définitive un meilleur choix des charges de pied et de colonne ainsi que des séquences d'amorçage, afin de réaliser l'adéquation la plus parfaite possible de l'explosif à la roche (procédure informatisée en Amérique du Nord).

4°) Nous devons également constater que la formule de prédiction de la vitesse de vibration proposée par le US Bureau of Mines n'est plus adaptée aux nouvelles techniques de tir, car elle ne fait intervenir que la charge C . Or, il existe une différence fondamentale entre placer, par exemple, 200 kg d'explosif brisant dans le pied du fourneau et 300 kg d'explosif poussant dans la colonne, ou faire l'inverse.

Dans le cas du minage sous l'aire, qui est la technique la plus utilisée de nos jours, nous avons vu que l'influence qualitative et quantitative de la charge de colonne est prépondérante. Dès lors, nous pensons que cette formule devrait être modifiée et tendre analytiquement vers une équation de la forme :

$$v = K \left(R \cdot \frac{\sqrt{C_1}}{D} \right)^\alpha$$

avec C_1 = la charge de la colonne,
 R = une fonction (rapport des charges, mode d'amorçage) à déterminer in situ.

Il est évident que la forme analytique définitive ne pourra être déterminée que par une étude fine et répétitive réalisée in situ.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) R. BRIGODE et J. BOXHO. Etude des vibrations de tir aux carrières de Quenast. Annales des Mines de Belgique, janvier 1977.
- 2) M. DUMAS. Abattage des roches. Céficem 1976.
- 3) D. FOURMAINTRAUX, V. SIFRE et R. BEDAUX. Revue Ingersoll-Rand, janvier 1983.
- 4) J. MOUNIER et M. GILTAIRE. Note documentaire sur la propagation des vibrations dans les terrains et sur leur enregistrement. Laboratoire du Centre d'Etudes et Recherches du Charbonnage de France, décembre 1959.
- 5) J. BOXHO. Vibrations dues aux tirs - Critères de dégâts et environnement. Journée des Carriers organisée par l'Iniex, mars 1977.
- 6) R. VANDELOISE. Mesures des vibrations des tirs. Journée des Carriers organisée par l'Iniex, décembre 1977.
- 7) J.M. CHARLET. Cours de géophysique appliquée. Faculté Polytechnique de Mons.
- 8) H.R. NICHOLLS, C.F. JOHNSON et W.I. DUVALL. Blasting vibrations and their effects on structures. United States Department of the Interior, Bureau of Mines, bulletin 656, 1971.
- 9) Ch. CHAPLEAU. Le creusement de tunnels à l'explosif en site urbain. Revue Explosifs, janvier-juin 1981.
- 10) KOTARO NAWA. Réduction des vibrations du sol par le tir de mines avec retards millisecondes. Revue Explosifs, n° 1, 1965.
- 11) U. LANGEFORS, H. WESTERBERG et KILSTROM. Ground vibrations in blasting. Water Power, October 1958.