

MADRID 1968

Resistance mécanique d'un massif rocheux aux tirs à l'explosif

Application aux fouilles de fondation d'un barrage

Mechanical resistance of rock masses to blasting operations

Mechanische Widerstand einer Felsmasse in Sprengarbeiten

E. MORENON
Ingénieur d'Electricité de FranceC. FOURNIER
Directeur Technique de la Compagnie de Prospection Géophysique Française

Résumé

L'exécution d'un ouvrage de Génie Civil nécessite presque toujours des travaux préalables de déroctage à l'explosif pour l'ancrage des fondations.

Ce déroctage crée des ébranlements caractérisés par un niveau d'accélération de la masse rocheuse et une fréquence d'oscillation pouvant créer des ruptures par traction du terrain environnant de ouvrages existants, voisins (apparition de fissures ou microfissures).

C'est l'étude de l'approche de ces phénomènes et de leur ampleur, ainsi que la détermination d'un «critère de danger», que se propose de traiter la présente communication.

Summary

Civil engineering operations in nearly every case necessitate preliminary excavation by blasting of rock for the preparation of foundations.

This blasting generates vibration waves characterized by peaks of acceleration and oscillating frequency in the bedrock capable of causing tensile stresses which rupture the surrounding ground or nearby existing works (by the creation of fissures or microfissures).

It is the study of the approach to these phenomena and to their magnitude as well as to the determination of a «criterium of danger» which are going to be dealt with in the present paper.

Zusammenfassung

Die Durchführung von Ingenieurarbeiten bedürfen fast immer einen ersten Aushub durch Sprengung des Felsen, um die Gründungen vorbereiten zu können.

Diese Sprengungen erzeugen Erschütterungen, welche durch eine Beschleunigung und eine schwingende Frequenz in der Felsmasse charakterisiert sind. Diese Erschütterungen bewirken Scherbrüche im umgebenden Boden oder in den nahegelegenen Bauten (durch das Hervorrufen von Rissen oder Microfissuren).

In diesem Referat wird die Untersuchung dieser Erscheinungen und ihre Bedeutung, sowie die Bestimmung eines «Gefahrkriteriums» erläutert.

Avant propos

Pour construire un ouvrage, on est amené nécessairement à perturber les conditions initiales du site par diverses excavations ou fouilles, en général à l'explosif, destinées à l'ancrage de la construction.

Cette perturbation peut être indispensable à connaître lorsqu'il s'agit de travaux annexes à exécuter au voisinage immédiat d'ouvrages déjà existants.

C'est le cas pour le Barrage de Tolla, en Corse, où Electricité de France fut amenée à envisager le creusement d'une fouille pratiquement accolée aux appuis du barrage-voûte.

L'objet de cette communication est de montrer comment l'étude préalable mise en oeuvre a permis de cerner les moyens d'investigation générale par méthode mécanique, pour la connaissance:

- des lois de propagation des contraintes,
- de l'ampleur des zones perturbées,
- de critère de danger, sous forme d'abaque de sécurité «charge d'explosif - distance aux points de tir».

Variables et représentations caractéristiques

Les ingénieurs Américains et Japonais ont déjà abordé ce type de problème en se basant sur des résultats expérimentaux (études sur des sites de barrages, en particulier *).

Pour cette étude, nous avons retenu la méthode de F. J. Crandell, dont nous donnons un bref résumé de la théorie et que nous essaierons de justifier.

Les symboles définis ci-après serviront à toute la suite de l'exposé:

- S : déplacement en millimètres.
- A : Amplitude en millimètres.
- v : vitesse en mètres/seconde.
- Γ : accélération en m/s^2 .
- f : fréquence en Hertz

- (*) -- Exploitation d'une carrière près du barrage Ochoco, sur l'Oregon.
 -- Exploitation d'une carrière près du barrage de Grand Coulee, sur la Columbia River.
 -- Affouillement à l'explosif au voisinage immédiat (15 à 20 m.) du barrage Dervis, sur le Colorado River

- t : temps en secondes.
- m : masse en kg.
- D : distance en mètres du point de tir évaluée du capteur au bord de la volée la plus proche de ce capteur.
- α : coefficient d'amortissement.
- Q : charge de l'explosif en kg.
- W : énergie cinétique.
- q : énergie relative en m^2/s^2 .

F. J. Crandell considère l'ébranlement comme étant de forme sinusoïdale

$$s = A \sin 2\pi ft \quad (1)$$

possédant une vitesse d'oscillation max. $v_m = 2\pi f A \cdot 10^{-3}$ (2) et une accélération max. $\Gamma_m = 4\pi^2 f^2 A \cdot 10^{-3}$ (MKS) (3).

Il établit, de plus, une relation directe entre les dégâts provoqués et l'énergie cinétique de l'ébranlement, responsable des déformations dynamiques.

$$W_0 = \frac{1}{2}mv^2 = 2\pi^2 f^2 A^2 m 10^{-6} \text{ (Joule)} \quad (4)$$

$$W_0 = \frac{m}{8\pi^2} \frac{\Gamma^2}{f^2}$$

La masse étant supposée constante, l'énergie cinétique varie donc directement avec

$$\left(\frac{\Gamma}{f}\right)^2$$

Crandell pose alors

$$q = \left(\frac{\Gamma}{f}\right)^2 \quad (5)$$

appelle cette entité *énergie relative* et établit expérimentalement que des dommages légers apparaissent pour des valeurs de q dépassant 0,28, alors que des dommages deviennent importants si q atteint 0,56.

Justification des limites de Crandell

La validité de ces limites a d'abord été recherchée systématiquement à partir de petites charges, par observations visuelles de l'étendue des fissures créées par l'explosion. Le test a été, en général, concluant.

Ainsi par exemple, on a pu observer qu'un tir de 3 kg. de Tolamite en 5 trous a créé des fissurations superficielles jusqu'à 6 m. de la volée. Les mesures d'accélération et de fréquence donnent, pour $q = 0,56$, une distance critique de 7 m.

Nous avons essayé également de relier par le calcul l'apparition de dégâts à la résistance à la rupture du terrain par traction. On peut montrer en effet que:

$$R_{Tmax} = \frac{10V \delta \Gamma_{max}}{\omega} \quad (1)$$

avec R_T en kg/cm^2

V : vitesse du milieu en km/s .

δ : densité.

Γ : accélération en m/sec^2 .

En effet, soit une fonction

$$U = U_0 \sin \left[\omega \left(t + \frac{x}{v} \right) \right] e^{-\alpha \omega \left(t + \frac{x}{v} \right)}$$

représentant le déplacement d'un point situé à une distance x du point d'explosion implanté sur un matériau de vitesse de transmission V en fonction de la pulsa-

tion ω . $\frac{x}{v}$ représente le déphasage dans l'espace.

La formule précédente représente la relation existant entre:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial x} & \text{proportionnel à la contrainte } R_T \\ \text{et} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} & = \Gamma \end{aligned} \right\} \text{pour leur valeur maximum}$$

Elle n'est valable que pour α petit $\leq 0,1$, ce qui est le cas pour le granite de Tolla.

$$\text{D'autre part, } R_T = \frac{-2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (2)$$

c , cohésion, φ angle de frottement interne (ceci pour la première phase des ondes purement longitudinales).

$$\begin{aligned} \text{Pour } \varphi = 0 \quad R_T &= -2c \\ \varphi = 30^\circ \quad R_T &= -1,15c \\ \varphi = 45^\circ \quad R_T &= -0,82c \end{aligned}$$

Les valeurs de la cohésion mesurées sur divers sites par des méthodes statiques donnent (grossièrement) $1 < c < 10 \text{ kg/cm}^2$, c'est-à-dire et très approximativement $0,5 < R_T < 20 \text{ kg/cm}^2$.

Nous rapprocherons ces valeurs de celles obtenues par une méthode décrite par M. Chefeville, du Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (Bulletin R. I. L. E. M. n.° 15, Août 1953). Cette méthode, expérimentale et étudiée sur le béton, relie le module dynamique E_d à la résistance à la traction (à 5 % près).

$$\text{On a } R_T \text{ en } kg/cm^2 = \left(\frac{E_d}{70.000} \right)^2$$

Nous tenterons ici d'extrapoler cette méthode au rocher. On peut dresser le tableau suivant:

E_d	R_T
100.000	2 kg/cm^2
200.000	8,1 kg/cm^2
300.000	18,3 kg/cm^2

Ces valeurs confirment celles obtenues à partir de (2). Il conviendrait peut-être d'introduire un coefficient de sécurité.

On a d'autre part:

$$E_d (kg/cm^2) = V^2 \frac{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}{(1 - \sigma)} \cdot 10 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{dans un} \\ \text{milieu tri-} \\ \text{dimensionnel} \\ \text{et infini} \end{array} \right.$$

V, vitesse longitudinale en km./sec. σ coefficient de Poisson. Ou, en posant:

$$\frac{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}{(1 - \sigma)} = M$$

$$E_d = V^2 \delta M \cdot 10^4 \quad (3)$$

De (1), (2), et (3), on tire:

$$\frac{V^4 \delta^2 M^2}{50} = 10 V \delta \Gamma_m$$

(Γ_m accélération limite)

c'est-à-dire $\Gamma_m \text{ m./s}^2 = \frac{V^2 \delta M^2 \omega}{500}$ (V en km./sec) (4)

d'où une nouvelle méthode de détermination des limites dangereuses.

Vérifions pour les valeurs caractéristiques moyennes du site.

Par exemple, pour

$$V = 3, \quad \delta = 2,5 \quad M^2 = 0,9 \quad \omega = 3.000$$

on a:

$$\Gamma_m = 364 \text{ m./sec.}^2$$

d'où

$$q = \left[\frac{\Gamma_m \times 2\pi}{\omega} \right]^2 = 0,585$$

Ce résultat est remarquablement proche du 0,56 de Grandell. Bien entendu, d'autres valeurs de V changeraient ce résultat, mais il s'agit là d'une valeur moyenne correspondant à un rocher moyen.

Aussi, nous avons admis par la suite la validité de ces limites.

L'expérimentation

A. Appareillage et processus de mesures

Le but de la méthode d'enregistrement est de connaître essentiellement l'accélération et la fréquence des ébranlements transmis au terrain par les tirs.

La précision de la mesure nécessitant un appareillage spécialement adapté à cette étude, c'est-à-dire sans inertie et permettant un enregistrement direct du phénomène, la chaîne de mesures comportait donc, pour chaque canal,

- 1 accéléromètre étalonné-fréquence propre 20 KHertz.
- 1 adaptateur d'impédance.
- 1 liaison par câble coaxial 75 Ω . m.
- 1 amplificateur à bande large 5 à 5.000 Hertz.
- 1 caméra d'enregistrement à tube cathodique (TE-LEC), et à grande vitesse de déroulement (4 m./s.).

L'appareillage permet l'étude simultanée sur 8 voies. L'enregistrement se fait sur papier photographique.

Nous avons réservé deux voies:

- l'une pour le time-break,
- l'autre pour un accéléromètre de référence.

Pour les mesures proprement dites, il restait donc 6 voies.

Pour l'étalonnage et le contrôle, nous disposions de:

- 1 oscilloscope PHILIPS GM. 6056, et
- 1 générateur BF TELEEC.

Sur le terrain, nos accéléromètres étaient scellés au rocher par groupes de trois et suivant des stations alignées, de plus en plus éloignées du point de tir.

Les trois capteurs de chaque station étaient orientés suivant des directions tri-rectangulaires:

- accéléromètre X Axe d'oscillation parallèle au dispositif d'enregistrement,
- accéléromètre Y Axe d'oscillation perpendiculaire au dispositif,
- accéléromètre Z Axe d'oscillation vertical.

On mesure donc à chaque station l'accélération totale reçue:

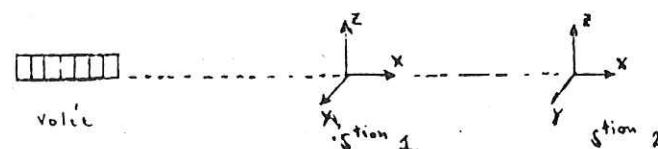


Schéma du dispositif - 2 stations coupe verticale

Ces tensions de sortie V des accéléromètres, proportionnelles aux accélérations γ et transmises au poste d'amplification, correspondent à un rapport $\frac{V}{\gamma}$ variant

de 11 à 16 mV./g. suivant la longueur du câble coaxial interposé entre le capteur et l'adaptateur d'impédance, ou entre le capteur et l'amplificateur (étalonnage fourni par les Ateliers de Construction de Bagnoux-construc-teurs des accéléromètres).

B. Etablissement d'une loi générale de propagation

L'estimation de «*énergie relative*» q se fait par la mesure de Γ et f. Il était donc intéressant de trouver une loi reliant Γ et f,

- à la quantité d'explosif Q (en kg.),
- à la distance D de l'explosion à l'accéléromètre (en m.).

L'expérimentation a débuté par la mise en oeuvre de faibles charges (0,2 à 1,2 kg. de Tolamite), tirés en un ou deux trous.

En fonction de la distance D on obtient une loi de la forme

$$\Gamma = A e^{-aD}$$

Les coefficients A et a sont fonction de la charge suivant les relations:

$$A = 97 Q^{0,213}$$

$$a = 0,184 Q^{-0,18}$$

Γ^1

$\Gamma = f(D)$ 0,500 kg de l'air sec $\Gamma = 85 e^{-0,201 D}$
 $\Gamma = f(D)$ 1,200 kg de l'air sec $\Gamma = 98 e^{-0,183 D}$
 $\Gamma = f(D)$ 0,200 kg de l'air sec $\Gamma = 70 e^{-0,216 D}$

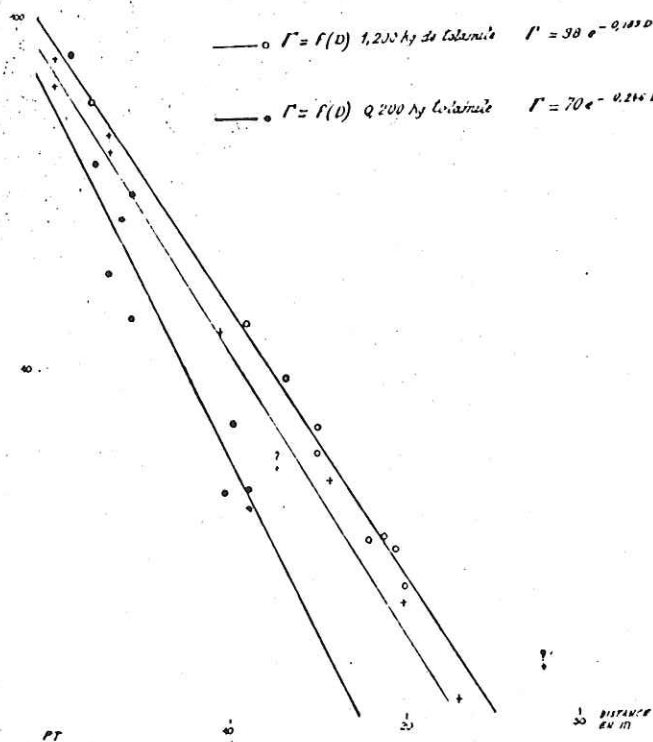


FIG. 1

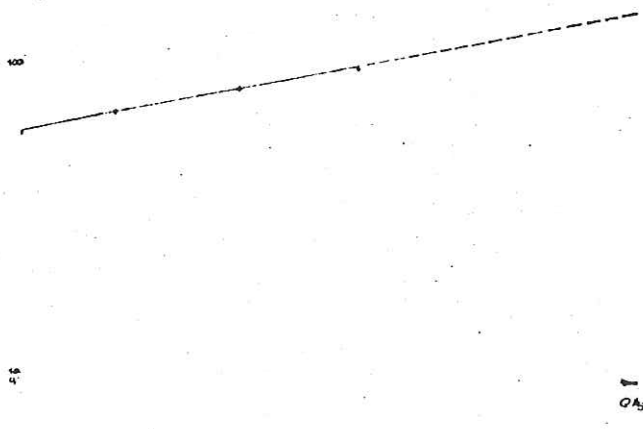
Il vient en définitive:

$$\Gamma = 97 Q^{0,213} e^{-(0,184 Q^{-0,18}) D} \text{ en } g \quad (4)$$

A^1

Variation du coefficient A

$$A = 97 Q^{0,213}$$



Il restait à vérifier que, pour des volées classées à nombreux trous et à charges élevées, cette loi restait valable.

Différentes volées de 3, 5, 9, 6 kg. et 24 kg. ont été tirées. Les valeurs de Γ mesurées encadrent à chaque fois la droite caractéristique correspondante, déduite de la relation (4), (fig. 3).

La dispersion est ici plus grande, ce qui est normal compte tenu de la difficulté de définir géométriquement

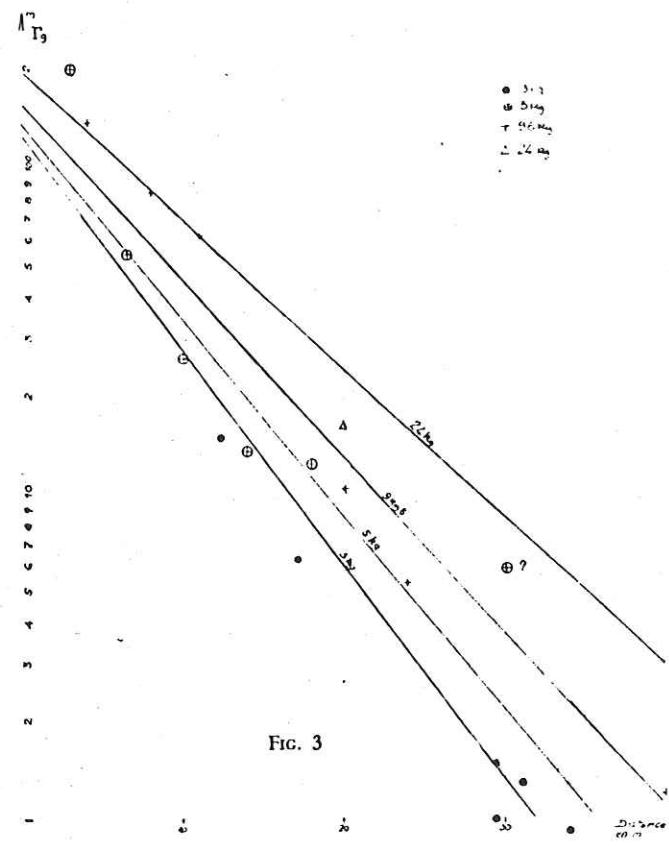


FIG. 3

B^1

Variation du coefficient B

$$B = 0,184 Q^{-0,18}$$

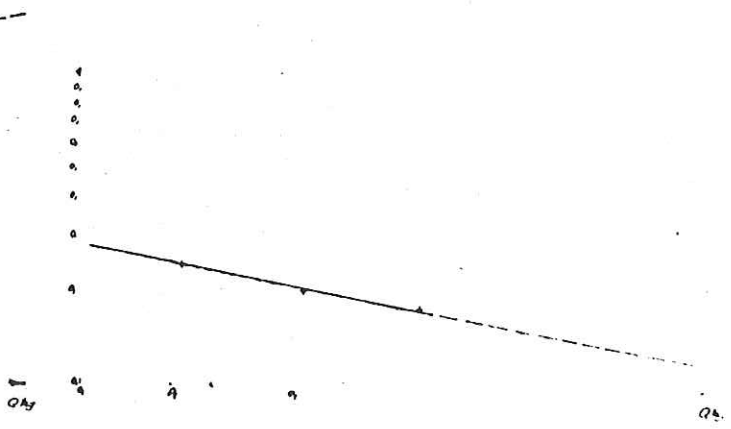


FIG. 2

un point de tir dans une volée couvrant plusieurs m.².

Nous avons estimé cependant que la loi (4) donnait une représentation moyenne satisfaisante.

C. *Etablissement d'une loi de fréquence en fonction de la distance*

La mesure des fréquences est le problème le plus ardu à résoudre, surtout pour les points situés à proximité de l'explosion. Les difficultés sont nombreuses et viennent, en particulier:

- de phénomènes parasites 50 cycles,
- de la fugacité du phénomène à observer: les ondes intéressantes ne sont visibles en général que sur les deux ou trois premiers cycles,
- de la valeur élevée des accélérations (près du point de tir), qui perturbent, ou même endommagent, l'appareillage et les points de fixation immédiatement après la première arrivée.

Il semble cependant que la fréquence f soit, en première approximation, indépendante de la charge Q et décroissante avec la distance.

L'examen de la fig. 4, où ont été reportées les fréquences de l'ensemble de l'étude en fonction de la distance, montre que la relation est du type:

$$f = h D^n$$

en coordonnées bilogarithmiques.

La pente de cette droite est imposée par les résultats obtenus sur les tirs éloignés de 350 m.

Les deux droites extrêmes peuvent s'écrire:

$$f = 2.300 D^{-0,41}$$

$f = 950 D^{-0,41}$

(2)

C'est cette deuxième relation, qui va dans le sens de la sécurité, que nous utiliserons pour la détermination de q .

D. *Etablissement d'abaques de sécurité*

$$q = F(Q, D)$$

Ce faisceau de courbes (fig. 5), est directement tiré de la relation:

$$q = \left(\frac{\Gamma}{f} \right)^2$$

ce qui donne, en arrondissant certains exposants à titre de simplification:

$q = Q^{0,4} \cdot D^{0,8} e^{-(0,37 Q^{-0,18}) D}$

La courbe $q = 0,56$ donne la limite de la zone dangereuse.

8 A

$$f = G(D)$$

- o Comptage sur 1^{re} arrivées
- + " sur fréquence moyenne (Table III)
- " sur tirs en carrière

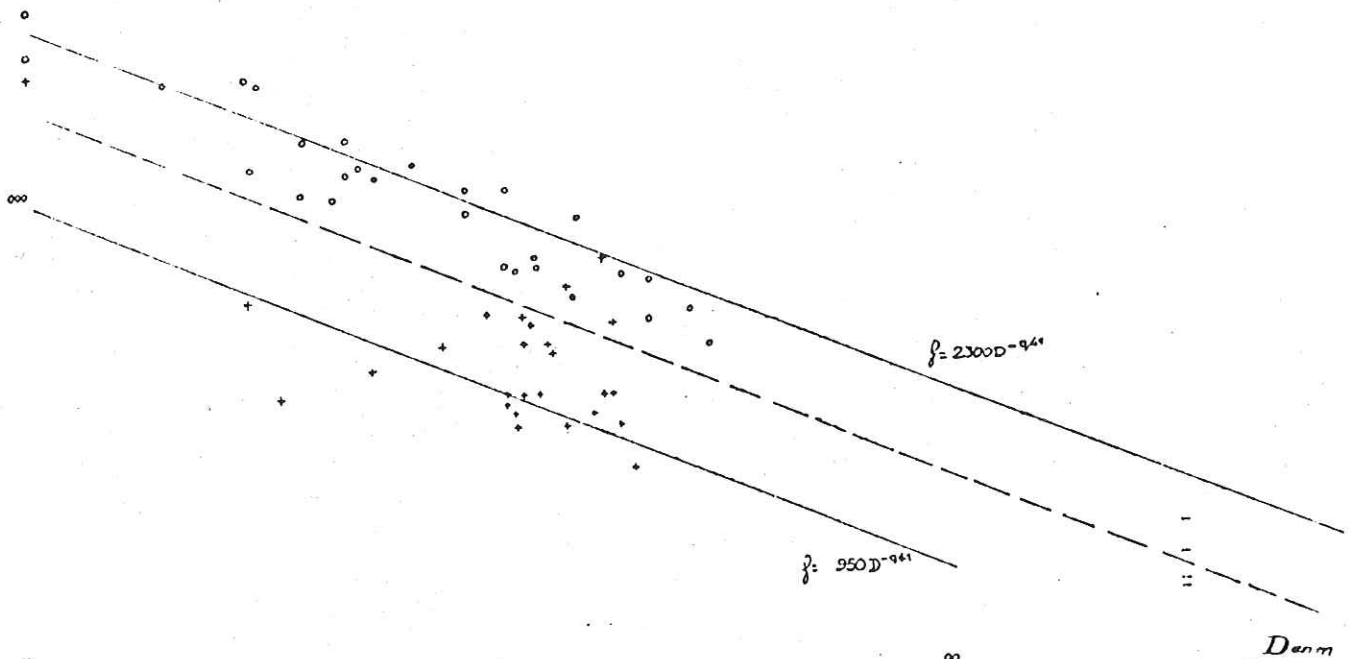


FIG. 4

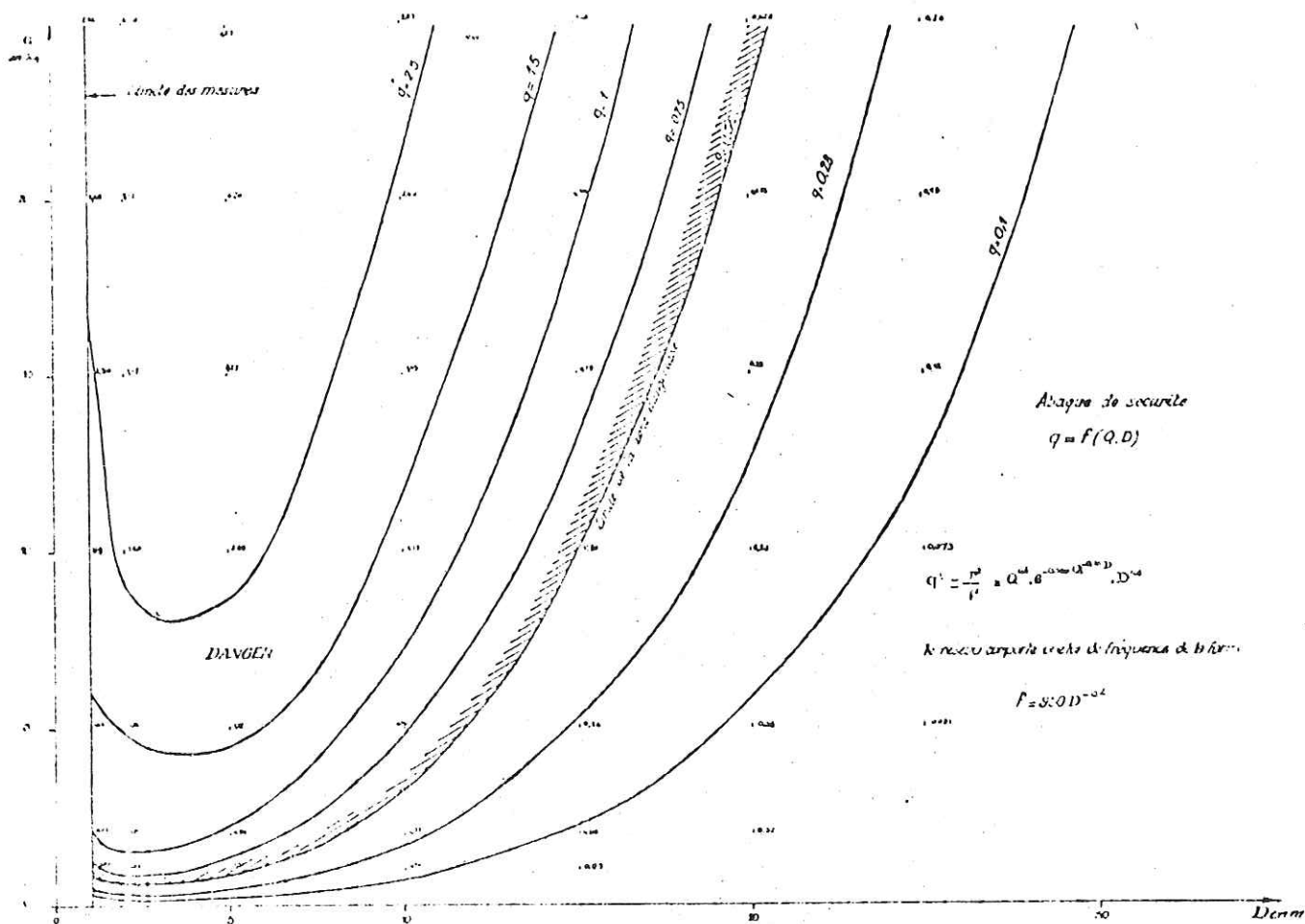


FIG. 5

Le faisceau permet donc de déterminer la charge limite à mettre en oeuvre pour une distance donnée, ou inversement.

Ce faisceau de courbes de la fig. 5 appelle cependant une remarque: les courbes q présentent des minima — pour des distances au point d'explosion faibles. C'est-à-dire que, pour $Q = C^te$ la loi fréquence décroît au départ plus vite que la loi accélération, en fonction de la distance D .

Il s'en déduit une augmentation temporaire des dégâts à mesure que l'on s'éloigne du point de tir.

Nous n'attacherons qu'une valeur qualitative à cette remarque, car nous ne disposons pas d'un nombre suffisant de mesures de fréquence entre 0 et 4 m., et nous n'avons fait aucune mesure entre 0 et 1 m.

Elle indique néanmoins dans quel sens pourrait évoluer le phénomène et peut éventuellement présenter un intérêt pour le problème de terrassement par explosifs nucléaires.

Conclusion

Nous n'avons pas, ici, parlé de l'aspect pratique de cette étude, qui a finalement conduit à la définition

d'un plan de tir, car il nécessitait l'analyse de nombreuses autres variables, entre autres:

- l'influence de la fissuration de la roche (naturelle ou créée artificiellement),
- le rôle des micro-retards,
- la qualité de l'explosif,
- l'influence du coefficient d'amortissement...
...et le temps nous aurait manqué!

Nous avons simplement voulu montrer le processus de tentative d'approche du problème dans des essais préliminaires. Ceci, afin d'avoir des ordres de grandeur des phénomènes, de leur variation, nous permettant ainsi de mettre en place des dispositifs de mesures pour les essais en vraie grandeur que, pour des raisons évidentes, on ne pouvait pas répéter à volonté.

BIBLIOGRAPHIE

- CRANDELL, F. J.—*Ground Vibration due to blasting and its effect upon structure*. Boston Society of Civil Engineers. April, 49.
- DON LEE, L.—*Vibration from blasting rock*. (Harvard University Press.)
- THONEN, J. R., and VINDES, S. L.—*Seismic effects of quarry blasting U. S. Dept of the Interior*. (Bureau of Mines. Bull. 442, 1942.)
- ROCARD, Y.—*Dynamique Générale des Vibrations*.
- FLEURY, P., et MATHIEU, J. P.—*Vibrations Mécaniques*.