

Modélisation semi-empirique des effets des tirs de mines

S. AKEL

Gaz de France,
direction de la Recherche,
361, avenue
du Président Wilson,
BP 33, 93211 La Plaine-
Saint-Denis Cedex

O. MARTEL

École nationale
des ponts et chaussées,
28, rue des Saints-Pères,
75007 Paris

Résumé

Un des moyens de contrôle des effets des tirs de mines est la mesure des vitesses particulières au droit des structures sensibles. Au préalable, des seuils sont fixés pour ces vitesses afin que l'ouvrage sensible conserve son intégrité. La pose de géophones est couramment effectuée afin d'enregistrer ces vitesses et de les comparer à ces seuils pendant toute la durée du chantier. Pour les ouvrages linéaires enterrés tels que les conduites haute pression, la pose de ces capteurs est délicate d'une part, et elle nécessite d'autre part leur déplacement continu en fonction de l'avancée du chantier, notamment pour les chantiers autoroutiers. On propose donc une méthode semi-empirique d'évaluation des vitesses particulières en tout point de l'espace qui permet d'affiner et de mieux contrôler les effets de tirs de mines sur ce type d'ouvrage. Cette approche peut servir comme une disposition complémentaire à la pose de géophones qui permet néanmoins d'éviter leur déplacement continu le long de l'ouvrage enterré. Des résultats intéressants sont par ailleurs mis en évidence lors de la conception de ce modèle, qui peuvent éventuellement expliquer certains aspects des lois empiriques existant dans ce domaine. Enfin, un exemple d'illustration est présenté afin de montrer la mise en œuvre pratique du modèle proposé.

Semi-empirical modelling of mining effects

Abstract

Typically when controlling mining effects, the particle velocity in the vicinity of sensitive structures is measured and compared to average limits so that the structural integrity is preserved. Special transducers are usually installed on these sensitive structures in order to record and check the particle velocity level. For underground linear structures as high pressure pipelines for example, installing transducers is a delicate operation and, moreover, these transducers need to be displaced continuously in order to follow the forward moving of the mining process, as in highway constructions. Therefore, we propose a semi-empirical approach in order to estimate the particle velocity for better controlling the mining effects on this type of structures. This model may be used as a complementary procedure allowing to keep the transducers at their initial place even when mining position is changing along the pipeline. Furthermore, when developing the proposed model, we produced interesting results which may give an explanation to some aspects of the empirical models existing in this field. Finally, a realistic case is completely discussed in order to show the practical use of the present approach.

Introduction

Les structures linéaires enterrées, telles que les canalisations haute pression, peuvent être soumises aux effets des tirs de mines lorsqu'elles sont à proximité de chantiers de travaux publics (autoroutiers ou autres). Ces effets sont de nature essentiellement vibratoire dont la nocivité est à examiner. Les recommandations actuelles de l'AFTES 1993 fournissent des seuils en vitesse particulière dont le respect ne remet pas en cause l'intégrité de l'ouvrage. Des moyens spécifiques sont cependant nécessaires afin de vérifier le respect de ces seuils. L'installation de capteurs de vitesse ou géophones est couramment effectuée sur les structures sensibles. Ce moyen présente toutefois un inconvénient pour les structures linéaires enterrées, puisqu'il nécessite un déplacement continu de ces capteurs au fur et à mesure de l'évolution du chantier, opération souvent délicate et onéreuse car elle nécessite le dégagement de la conduite, la suppression du revêtement de protection, l'ancrage du géophone et, évidemment, l'opération inverse lorsque les mesures sont achevées.

On se propose dans cette étude de mettre au point une méthode semi-empirique qui consiste à donner une estimation des vitesses particulières en tout point de l'ouvrage. Cette méthode ne devrait cependant pas supprimer totalement l'installation de capteurs; néanmoins, elle permettra d'éviter de les déplacer pour suivre l'évolution du chantier et des points critiques de l'ouvrage.

Loi empirique d'atténuation pour l'estimation des vitesses particulières

Le problème soulevé par les vibrations engendrées par les tirs de mines a été largement discuté suite au développement croissant des chantiers de génie civil faisant appel à cette technique. Afin d'apprécier les effets de ces vibrations, des lois empiriques ont été établies donnant une estimation des vitesses particulières à une distance donnée et en fonction de la quantité d'explosif utilisée. La plus communément admise actuellement se met sous la forme suivante :

$$v = KQ^\alpha D^{-\beta}$$

où v désigne la vitesse particulière maximale (en m/s) estimée à la distance D (en m) du tir, caractérisé par une masse d'explosif Q (en kg) amorcée à un instant donné. La constante K et les puissances α et β dépendent de plusieurs facteurs liés à la nature des terrains, au type d'explosif et au procédé de tir lui-même; ces trois paramètres sont évalués par l'intermédiaire de tirs d'essais à charges réduites effectués *in situ* (Fig. 1). La valeur de K varie généralement de 0,8 à 8 avec une valeur moyenne de 2,5; α de 0,5 à 1,2 et β de 1 à 2,5 [2].

Une forme simplifiée de cette loi empirique, souvent utilisée en France, est donnée par ($\beta = 2\alpha$):

$$v = K \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-\beta}$$

Ces lois supposent que le tir est concentré en un point et que les iso-vitesses particulières maximales sont des sphères concentriques dont le niveau décroît au fur et à mesure qu'on s'éloigne du tir. Notons que cette loi, par construction, présente un diagramme linéaire dans un repère log-log en fonction des trois grandeurs v , D et Q .

Description de la méthode d'approche semi-empirique

On se propose dans ce paragraphe de présenter une nouvelle méthode semi-empirique qui tente d'améliorer et d'interpréter les lois empiriques existant dans ce domaine d'une part, et, d'autre part de répondre au problème réel posé par le respect des seuils pour les structures linéaires enterrées.

Cavité sphérique dans un massif infini

Le problème et la modélisation théorique des tirs de mines ont été abordés par Persen [12] dont l'objectif principal était d'optimiser le tir de mines en termes de rendement. Nous reprenons dans ce paragraphe la partie relative à la modélisation simple du tir ponctuel par une cavité sphérique dans un massif infini visco-élastique linéaire, le comportement du massif obéissant à une loi de type kelvin¹ comme suit :

$$\sigma_{ij} = \lambda(\epsilon_{kk} + \eta_1 \dot{\epsilon}_{kk}) \delta_{ij} + 2\mu(\epsilon_{ij} + \eta_2 \dot{\epsilon}_{ij})$$

où σ désigne l'état de contrainte dans le massif, ϵ celui des déformations, $\dot{\epsilon}$ celui des vitesses de déformation, λ et μ les constantes de Lamé, η_1 et η_2 les constantes de viscosité. Dans la suite, pour simplifier, nous supposons, comme dans [12], que :

$$\eta_1 = \eta_2 = \eta$$

Cette cavité est soumise à l'effet quasi instantané d'une pression moyenne p qui s'applique pendant une durée τ . Il s'agit d'évaluer, pour ce problème théorique posé, la valeur des vitesses particulières en fonction du temps et en tout point de l'espace. La solution de ce problème dynamique à symétrie sphérique, dans l'hypothèse des petites perturbations, peut être facilement obtenue numériquement en résolvant l'équation d'équilibre dynamique² suivante :

$$(\lambda + 2\mu) \left(1 + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2u}{r^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

1. L'application à des problèmes dynamiques de cette loi de comportement implique une dispersion des célérités (vitesse de phase, vitesse de groupe), qui n'est pas observée dans la pratique. La seule justification du bien-fondé de cette loi repose sur la loi d'amortissement $D^{-\beta}$, de même nature que celle qui est classiquement observée. L'argument apparaît très insuffisant, mais de nombreux auteurs continuent d'appliquer ce type de modélisation.

2. La résolution numérique que nous avons adoptée dans cette étude est basée sur la méthode des éléments finis avec intégration directe de type Newmark. S'agissant d'un problème à symétrie sphérique, l'élément fini utilisé est unidimensionnel à deux nœuds ayant un degré de liberté par nœud (le déplacement radial u).

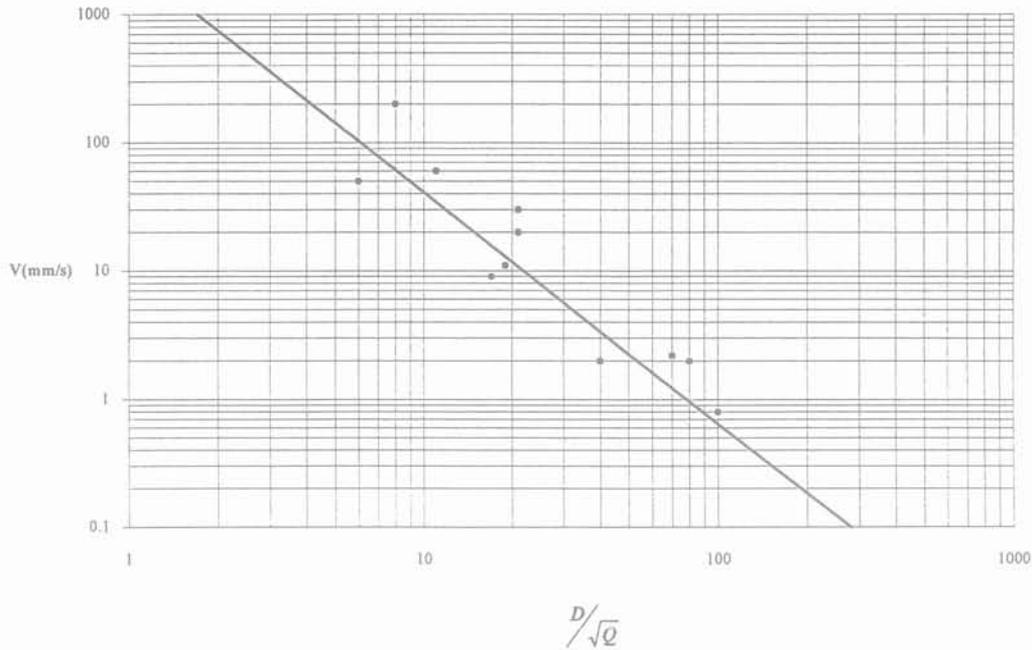


FIG. 1 Droite de régression fixant les paramètres de la loi empirique d'atténuation (cas $\beta = 2\alpha$).
Linear regression for estimating the parameters of the empirical attenuation rule (case $\beta = 2\alpha$).

où $u(r,t)$ désigne le déplacement radial à la distance r du centre de la cavité sphérique et ρ la masse volumique du sol. La solution de cette équation aux dérivées partielles est le champ de déplacement u en tout point de l'espace et à tout instant. La vitesse particulière en tout point et à tout instant se déduit par :

$$v = \frac{\partial u}{\partial t}$$

Par conséquent, la vitesse particulière maximale peut être déterminée en tout point de l'espace.

A partir de cette solution, nous pouvons tracer dans un repère log-log, l'évolution de la vitesse particulière maximale en fonction de la distance d'un point quelconque au centre de la cavité sphérique. L'allure de la courbe correspondante se rapproche d'une droite (Fig. 2), confirmée par un bon coefficient de régression linéaire sur l'ensemble des points issus du calcul numérique ($r = 0,99$). Ce résultat conforte notre approche puisqu'il concorde avec l'approche empirique proposée. Nous pouvons donc assimiler un tir de mine concentré à une cavité sphérique sous pression. A présent, il s'agit de décrire quantitativement les paramètres définissant le modèle simple proposé.

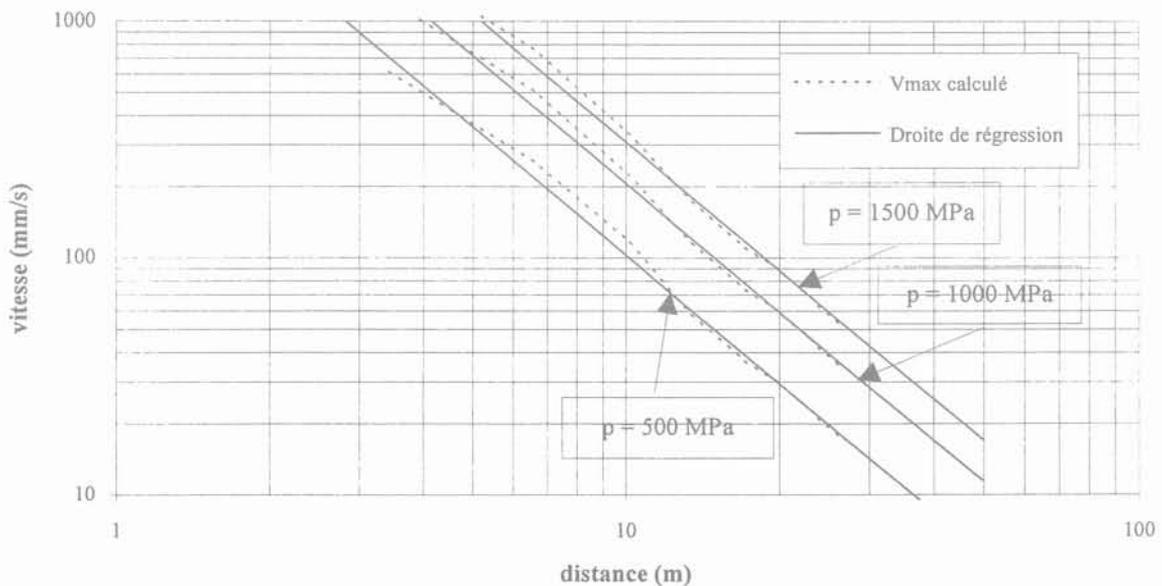


FIG. 2 Vitesse particulière maximale dans un modèle théorique de cavité sphérique soumise à un créneau de pression.
Maximum particle velocity in the theoretical model of a spherical cavity subjected to a pressure pulse.

Identification des paramètres

Le paragraphe précédent nous permet d'identifier une source capable d'engendrer des vibrations maximales comparables à celles issues des lois empiriques. Cette source est toutefois définie en fonction de sept paramètres qui constituent les données du problème théorique à résoudre, à savoir :

- le rayon R de la cavité sphérique ;
- les constantes élastiques du sol (λ ; μ) et sa masse volumique ρ ;
- la constante de viscosité du sol η ;
- la pression moyenne p et sa durée d'application τ .

Les caractéristiques élastiques ainsi que le poids volumique peuvent être quantifiés par des essais spécifiques, par exemple, en mesurant les pseudo-vitesses de propagation des ondes de compression c_p et de cisaillement c_s , le milieu n'étant pas parfaitement élastique ; ces vitesses sont données par les expressions suivantes :

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{et} \quad c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Le rayon de la cavité sphérique peut être estimé en fonction de la dimension du trou contenant la charge [12]. La durée d'application de la pression peut être estimée en fonction de la vitesse de détonation des explosifs (entre 2 000 et 7 000 m/s) et du volume équivalent de la charge Q [12]. En revanche, le coefficient de viscosité et la pression constituent deux paramètres difficilement identifiables. Nous pouvons cependant donner une évaluation de ces deux paramètres, à savoir η et p , en nous basant sur la loi empirique d'atténuation largement adoptée dans les tirs à l'explosif comme suit :

Sachant que les solutions numérique et empirique présentent une allure linéaire dans un repère log-log, il suffit de superposer les deux droites correspondantes en ajustant judicieusement les deux paramètres p et η . Notons que la solution numérique en vitesse est proportionnelle à la pression p (hypothèse de comportement viscoélastique linéaire), nous pouvons donc l'écrire sous la forme suivante :

$$\log v = \log k + \log p - \beta_{\text{num}} \log D$$

où v désigne la vitesse particulaire maximale à la distance D du centre de la cavité, k et β_{num} des constantes dépendant des paramètres du problème tels que la viscosité, les constantes de Lamé et le poids volumique du sol, le rayon de la cavité et la durée d'application de la pression. D'un autre côté, la relation empirique s'écrit :

$$\log v = \log K - \beta_{\text{exp}} \log D + \frac{\beta_{\text{exp}}}{2} \log Q$$

En identifiant ces deux équations, on trouve :

$$\beta_{\text{num}}(\lambda, \mu, \rho, R, \tau, \eta) = \beta_{\text{exp}} = \beta$$

$$p = \frac{K}{k(\lambda, \mu, \rho, R, \tau, \eta)} (\sqrt{Q})^\beta$$

La dépendance de β vis-à-vis des six paramètres λ , μ , ρ , R , τ et η ne peut être exprimée de façon explicite, le paramètre η devra donc être ajusté manuellement afin de satisfaire la première équation du système précédent. La construction d'abaques β_{num} en fonction de η (voir § suivant) facilite la détermination de la viscosité adéquate. Cette dernière étant fixée, le paramètre numérique k , indépendant de p , se déduit automatiquement (des abaques k en fonction de η peuvent être effectués simultanément à ce stade). Connaissant k et β , la deuxième équation permet ainsi de déterminer la pression moyenne p en fonction de la quantité d'explosif utilisé à un instant et pour un site donnés.

Identification des paramètres par abaques

Vu le nombre important des paramètres intervenant dans la description de la source équivalente engendrant les mêmes niveaux extrêmes de vibrations qu'un tir réel ponctuel, le nombre d'abaques sera lui aussi important. Rappelons toutefois que le modèle développé sert à identifier une source équivalente. Étant donné l'incertitude liée à ce type de problème, la valeur très précise des paramètres décrivant le modèle n'est pas, *a priori*, requise. D'ailleurs, la source équivalente n'est certainement pas unique. Cependant, le point commun à toutes ces sources équivalentes possibles est la parfaite correspondance entre les résultats numériques et empiriques en termes de vitesse particulaire maximale pour chaque jeu de sept paramètres fixés préalablement et dont certains sont interdépendants. Partant du principe que l'objectif visé est la recherche d'une source de vibrations équivalente plausible, nous avons donné à certains paramètres des valeurs numériques vraisemblables afin d'établir les abaques numé-

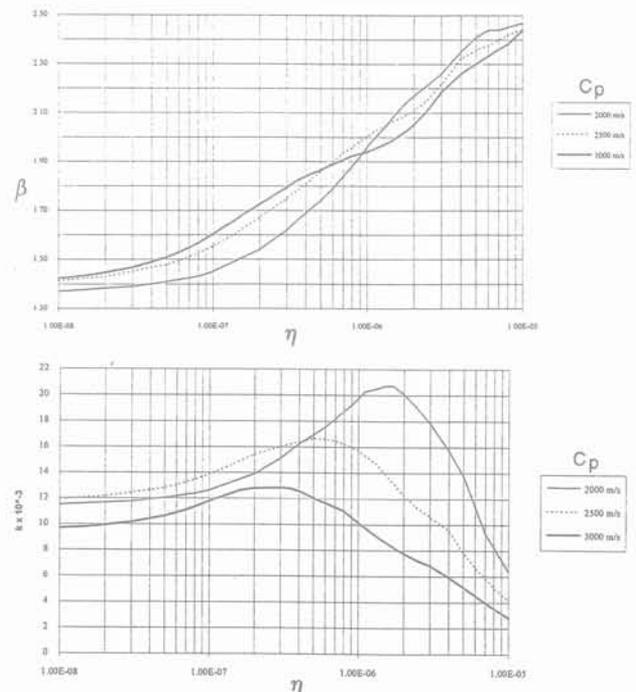


FIG. 3 Exemples d'abaques pour l'évaluation des paramètres η et k .
Tables for evaluating the parameters η and k .

Application aux tirs de mines réels

Le modèle développé ci-dessus identifie la source équivalente à un tir de mines ponctuel. Les tirs de mines réels s'effectuent suivant des plans de tirs avec plusieurs charges Q_i amorcées à des instants distincts t_i en des points distincts x_i de l'espace. Chaque charge Q_i peut être considérée comme un tir ponctuel correspondant à une source ponctuelle de pression moyenne p_i , telle que :

$$p_i = \frac{K}{k} \left(\sqrt{Q_i} \right)^\beta$$

S'agissant d'un milieu visco-élastique linéaire de type Kelvin, nous pouvons appliquer le principe de superposition de Boltzman afin de combiner, en termes de vitesse particulière, l'effet de toutes les charges amorcées à un instant donné. Cette combinaison linéaire peut être accomplie en se basant sur la solution numérique élémentaire en vitesse $v_u(r,t)$ due à une charge unitaire $Q_u = 1 \text{ kg}$ engendrant une pression moyenne unitaire p_u donnée par :

$$p_u = \frac{K}{k}$$

La solution finale en vitesse particulière s'écrit alors sous la forme suivante :

$$\bar{v}(\bar{x}, t) = \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{Q_i} \right)^\beta \bar{v}_u(\bar{x} - \bar{x}_i, t - t_i) Y(t - t_i)$$

Y étant la fonction de Heavyside, v_u étant exprimée en coordonnées cartésiennes. Cette expression permet de déterminer en tout point de l'espace le champ des vitesses particulières, de dresser ainsi les courbes d'iso-vitesses particulières à tout instant et par conséquent, les courbes d'iso-vitesses particulières maximales en tout point de l'espace.

Exemples d'illustration

Un chantier de terrassement nécessite l'emploi d'explosifs au voisinage d'une conduite enterrée à 2 m de profondeur. Les résultats des tirs d'essais ont permis de calculer les coefficients β et K de la loi empirique d'atténuation, elle s'écrit sous la forme :

$$v = 3,0 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,8}$$

Le plan de tir établi en fonction de la loi empirique est donné par le diagramme suivant où est indiqué l'ordre de mise à feu de chaque charge estimée à 4 kg répartie sur une hauteur de 1 m.



FIG. 5 Géométrie du plan de tir.
Geometry of blasting pattern.

riques correspondants et effectuer ainsi des exemples d'illustration :

$$- R = 0,1 \text{ m}$$

$$- \tau = 200 \mu\text{s}$$

$$- \rho = 2,5 \text{ t/m}^3$$

$$- c_s = 1600 \text{ m/s}$$

Notons que ces abaques peuvent être éventuellement utilisés pour d'autres types de tirs de mines (par exemple pour $R \neq 0,1 \text{ m}$). En effet, en se servant de ces abaques et en superposant la solution numérique à la solution empirique, nous identifions une source équivalente engendrant les mêmes vibrations maximales en termes de vitesses particulières mais ayant une cavité sphérique de rayon $R = 0,1 \text{ m}$. L'incidence de la vraie dimension de la cavité apparaîtra de façon implicite grâce à l'identification des paramètres p et η qui complètent la description de cette source équivalente.

3.4

Remarque importante

D'après le retour d'expérience, le paramètre β de l'approche empirique prend des valeurs toujours comprises entre 1 et 2,5. Cette fourchette est relativement confirmée par le modèle numérique proposé. En effet, la construction des abaques numériques β_{num} a nécessité plusieurs calculs par éléments finis en balayant des valeurs de η entre 0 et $+\infty$. Ce balayage s'est réduit à une fourchette pour η comprise entre environ 0 et 10^{-5} s sachant que pour une valeur de η en dessous de 10^{-7} s environ, le milieu a un comportement plutôt élastique (le paramètre β_{num} est constant dans cet intervalle, figure 4) et, pour une valeur de η supérieure à 10^{-5} s environ, le milieu a un comportement purement visqueux (pas de vibrations). Pour cette fourchette, les valeurs prises par β_{num} sont comprises entre 1,3⁵ et 2,5 environ (Fig. 3 et 4). Cette propriété conforte, a posteriori, notre approche semi-empirique.

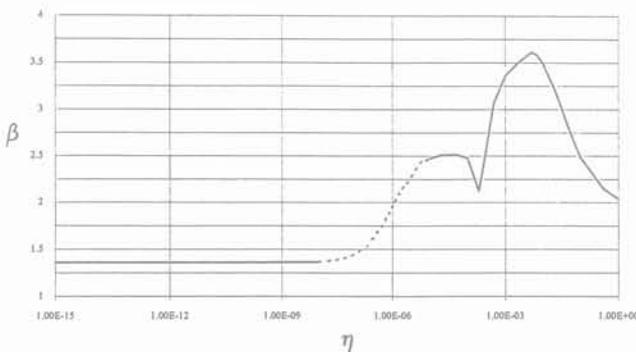


FIG. 4 Valeurs du paramètre β en fonction de la viscosité η .
Values of β with respect to η .

3. Théoriquement, pour un milieu infini, β tend vers 1 quand la viscosité tend vers 0. Afin d'effectuer les simulations numériques, nous nous sommes contentés d'un milieu sphérique fini de rayon égal à 50 m (voisinage proche du tir) qui explique cette valeur minimale de 1,3.

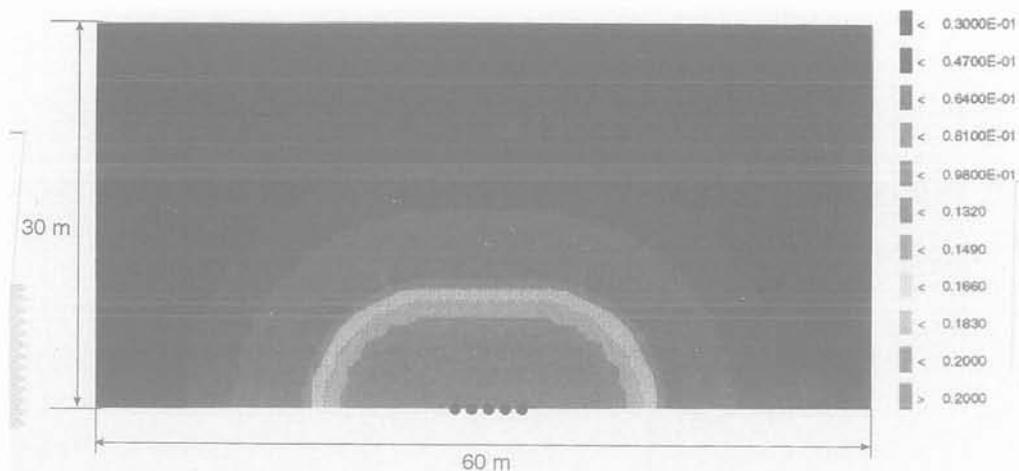


FIG. 6 Courbes d'iso-vitesses particulières maximales (m/s). Charges concentrées de 4 kg – retard 10 ms.
Maximum equi-particle velocity curves (m/s). Concentrated charges of 4 kg – delay time 10 ms.

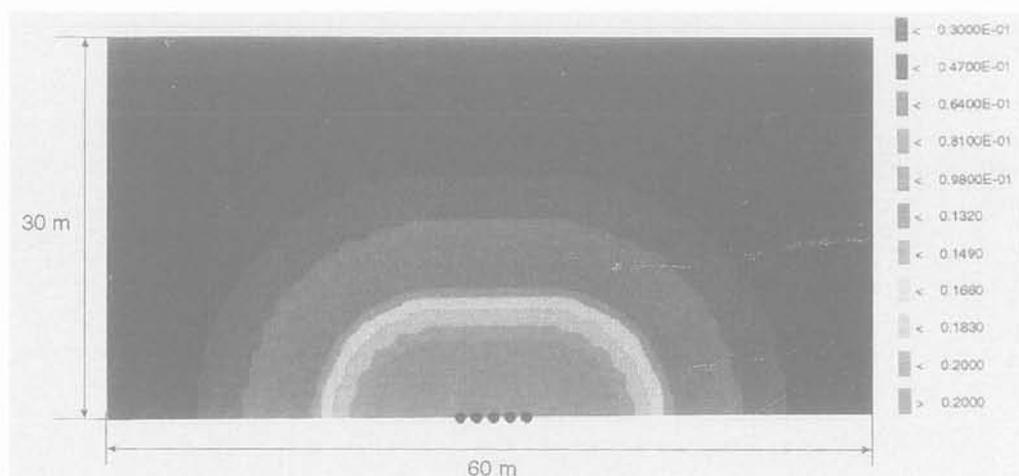


FIG. 7 Courbes d'iso-vitesses particulières maximales (m/s). Charges concentrées de 4 kg – retard = ∞ .
Maximum equi-particle velocity curves (m/s). Concentrated charges of 4 kg – delay time = ∞ .

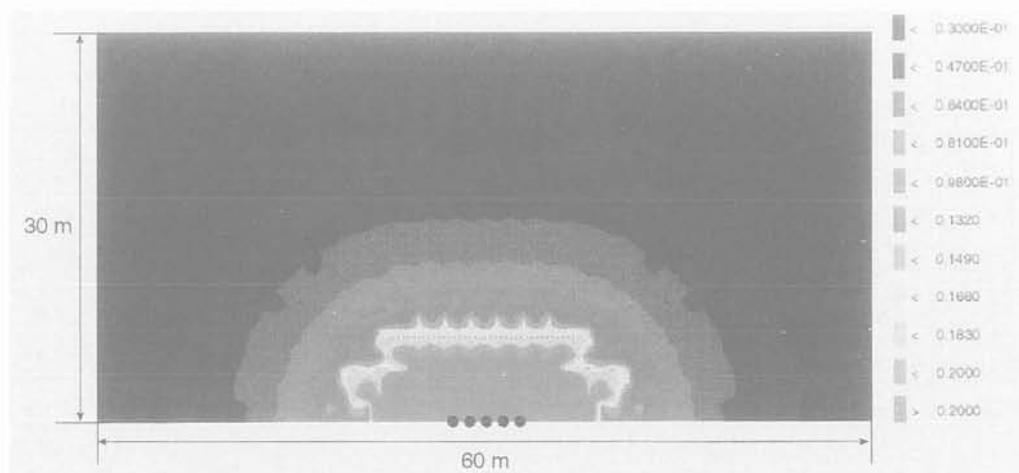


FIG. 8 Courbes d'iso-vitesses particulières maximales (m/s). Charges concentrées de 2 x 2 kg – retard 20 ms.
Maximum equi-particle velocity curves (m/s). Concentrated charges of 2 x 2 kg – delay time 20 ms.

Par ailleurs, les mesures des célérités des ondes P et S effectuées sur le terrain, $c_p \approx 3\,000$ m/s et $c_s \approx 1\,600$ m/s, ont permis d'estimer les constantes de Lamé à savoir: $\lambda \approx 9\,650$ MPa et $2\mu \approx 12\,860$ MPa. L'identification des paramètres, moyennant les abaques présentés dans la figure 3, fixe les deux paramètres η et k de la source de vibrations équivalentes, soit $\eta = 3,0 \cdot 10^{-7}$ s et $k = 12,8 \cdot 10^{-3}$. A titre indicatif, une évaluation de la pression moyenne qui s'applique sur la cavité sphérique correspondante est donnée par:

$$p = \frac{3,0}{12,8 \cdot 10^{-3}} \left(\sqrt{4} \right)^{1,8} = 816 \text{ MPa}$$

Trois simulations numériques ont été effectuées, la première suppose que les charges de 4 kg, situées à 9 m de profondeur, sont ponctuelles et mises à feu avec un retard de 10 millisecondes. Les iso-vitesses particulières maximales issues de ce premier calcul sont représentées dans la figure 6 sur un demi-carré de 60 m de côté à une profondeur de 2 m (niveau de la conduite enterrée). La seconde simulation (Fig. 7) suppose que les charges sont mises à feu de façon distincte (retard très grand), hypothèse souvent retenue dans l'utilisation de la loi empirique d'atténuation pour des micro-retards

supérieurs à 8 millisecondes. Enfin, la dernière simulation (Fig. 8) tient compte du fait que la charge est répartie en fractionnant les 4 kg en deux charges ponctuelles de 2 kg situées sur la même verticale.

6

Conclusions

Nous avons proposé un modèle semi-empirique de prédiction des effets des tirs de mines. Ce modèle simple satisfait *a minima* les tirs d'essais nécessaires à la détermination de la loi empirique d'atténuation. Il justifie, *a posteriori*, certaines des hypothèses ou des constatations faites sur le terrain: l'adoption d'une allure quasi rectiligne de la loi empirique d'atténuation dans un repère log-log, la fourchette de la puissance β . Il permet par ailleurs d'affiner les estimations des vitesses particulières maximales lorsqu'il s'agit de plusieurs tirs de mines. Toutefois, les résultats obtenus nécessitent une confirmation expérimentale. A terme, cette approche permettrait de pallier le manque d'instrumentation systématique aux points supposés critiques pour certaines structures telles que les conduites enterrées.

Bibliographie

- [1] Allard P. – Optimisation des contrôles de vibrations – Critères avec spectres de surveillance. Industrie Minérale – Mines et carrières – Les Techniques, 1988.
- [2] Allard P., Cecchini D., Lahet Y., Mermet Y. – Étude des vibrations engendrées par les tirs de mines. Scetauroute, Laboratoire des Ponts et Chaussées, 1986.
- [3] Bejui H. – L'utilisation du guide pour la mesure et le contrôle de l'effet des vibrations sur les constructions. AFTES Groupe de travail n° 3. *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, n° 115, 1993.
- [4] Bejui H. – Texte de recommandations concernant l'étude des effets sismiques de l'explosif. AFTES Groupe de travail n° 3. *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, supplément au n° 117, 1993.
- [5] Chapot P. – Étude des vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux. Rapport de recherche LPC n° 105, 1981.
- [6] Chapot P. Vibrations: critères de nuisance et prédiction. Industrie Minérale – Mines et carrières – Les Techniques, 1988.
- [7] Devine J.-F., Beck R.H., Meyer A.V.C., Duvall W.I. – Effect of charge weight on vibration levels from quarry blasting. Bureau of Mines, Report of Investigations 6774, 1965.
- [8] Esparza E.D., Westine P.S., Wenzel A.B. – Pipeline response to buried explosive detonations, vol. I et II, SRI, American Gas Association, 1981.
- [9] Esparza E.D. – Pipeline response to blasting in rocks. SRI, American Gas Association, 1991.
- [10] Hinzen K.G. – Modelling of blast vibrations. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.*, vol. 25, n° 6, 1988, p. 439-445.
- [11] Kou S.Q., Rustan A. – Burden related to blasthole diameter in rock blasting. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.*, vol. 29, n° 6, 1992, p. 543-553.
- [12] Persen L.N. – Rock dynamics and geophysical exploration. Developments in geotechnical engineering, vol. 8, Amsterdam, Oxford, New York, Elsevier Scientific Publishing Company, 1975.
- [13] Siskind D.E., Stagg M.S., Kopp J.W., Dowding C.H. – Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. Bureau of Mines Report of Investigations, 1980.