

analyse des phénomènes vibratoires dûs aux tirs en tunnels

par

P. Allard

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, Aix-en-Provence

A. Rozière

S.N.C.F.-Ouvrages d'Art, Paris

RESUME : Des tirs de mines sont exécutés dans des tunnels SNCF pour des travaux de reprise en sous-oeuvre : abaissement de plate-forme, approfondissement ou créations de niches supplémentaires en piedroits.

Contrairement aux contrôles classiques, sur des constructions indépendantes du site miné et situées à des distances d'une dizaine à quelques centaines de mètres des tirs, les mesures de contrôle en tunnels sont réalisées en plaçant les capteurs à seulement quelques mètres du tir. Dans ce cas, la vibration présente un spectre de fréquence très large avec des niveaux les plus élevés entre 200 et 1000 Hz.

L'étude présentée comporte l'analyse des vibrations détectées en différents points d'une section de tunnel, pendant des tirs en niche ou des tirs en plate-forme. L'analyse porte sur l'ensemble des impulsions, d'une volée à micro-retards et sur les 2 ou 3 premières impulsions de la même volée. Notre étude porte sur les spectres de fréquences mais également sur l'évolution du signal temps en fonction de la gamme de fréquences, avec un système de filtrage passe-bas.

En conclusion, nous proposons quelques principes méthodologiques pour l'étude des risques encourus sur l'ouvrage au cours du chantier de minage.

INTRODUCTION

Les mesures et contrôles réalisés dans les tunnels SNCF, au cours de chantiers de minage ont pour but de s'assurer que l'énergie dégagée par l'explosif et dissipée sous la forme de vibration, est réduite au niveau le plus faible possible pour ne pas provoquer de dégâts sur l'ouvrage.

Corrélativement cette énergie de l'explosion sera utilisée au mieux pour fragmenter et abattre la roche.

Les sollicitations dynamiques répétées pourraient, en effet, modifier la résistance naturelle du massif entraînant une nouvelle sollicitation du revêtement.

L'exposé qui suit présente des résultats d'enregistrements au cours de tirs de mines réalisés dans des tunnels de la ligne SNCF NARBONNE - PORT-BOU pour la mise au gabarit électrique.

La formation géologique est constituée par des schistes métamorphiques anciens.

TECHNOLOGIE ET METHODE D'ETUDE

Les mesures de vibrations sont réalisées avec des ensembles tridirectionnels de géophones d'un modèle courant qui présentent une fréquence de résonance de 4,5 Hz. Les problèmes de bande passante peuvent se poser principalement vers les hautes fréquences.

Quelques étalonnages réalisés sur un pot vibrant entre 5 Hz et 1500 Hz, montrent que au-dessus de 300 Hz les problèmes se posent principalement au niveau des fixations des capteurs, avec des pics de résonances sur des bandes de fréquences très étroites entre 750 et 800 Hz et vers 1500 Hz.

Des systèmes de fixation avec des bridages rigides nous ont permis de vérifier que la réponse intrinsèque de certains capteurs est constante à 5 % près jusqu'à plus de 1000 Hz.

L'enregistrement des vibrations est réalisé en analogique sur bande magnétique en modulation de fréquence avec une bande passante de 0 à 1250 Hz et une dynamique de 52 dB.

L'exploitation est réalisée :

- . d'une part sur le signal en fonction du temps de la forme $y = f(t)$. Ce type d'enregistrement nous permet de visualiser les signaux émis par chaque amorce de tir. Il peut s'agir de micro-retards à 25 ms ou de retards à 500 ms ;

- . d'autre part sur un spectre de fréquences avec une représentation de la forme $Y = F(N)$. Cette fonction de la fréquence est obtenue par le calcul de la transformée de Fourier du signal-temps.

L'analyseur utilisé (fig. 1) échantillonne le signal temps sur 1024 points avec une fréquence égale à 2,56 fois la fréquence maximale d'analyse.

L'analyse est alors réalisée sur 400 canaux

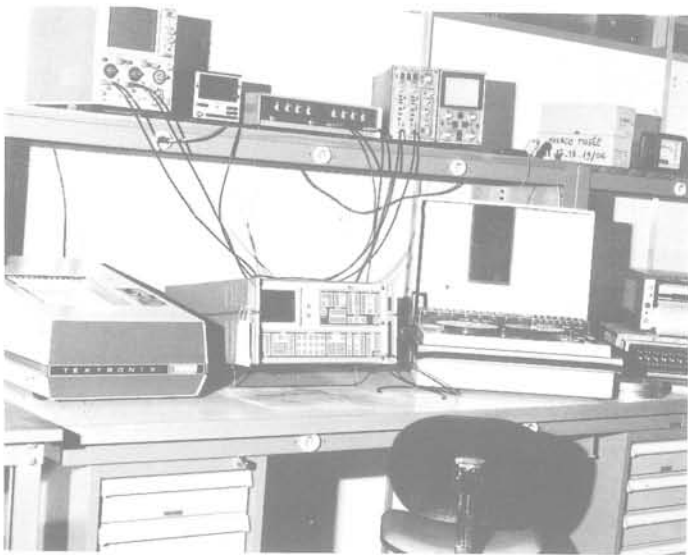


Fig. 1 CHAÎNE D'ANALYSE DES VIBRATIONS

Nous utiliserons une analyse sur l'ensemble des impulsions pendant une durée de 400 ms. Nous obtiendrons alors 400 canaux d'analyse sur la bande 0 - 1000 Hz.

Pour réaliser l'analyse sur un temps plus réduit, permettant l'échantillonnage des 2 ou 3 premières impulsions seulement (deux ou trois micro-retards) nous réaliserons un échantillonnage sur 40 ms ou 80 ms. L'analyse sera alors présentée sur la bande 0 - 10 kHz ou 0 - 5 kHz. Le signal sera contenu seulement sur 100 bandes d'analyse entre 0 et 2500 Hz ou entre 0 et 1250 Hz.

Afin de comparer différents spectres et de calculer des fonctions et transferts nous réaliserons des rapports de spectres.

Le filtrage, en passe-bas des signaux reproduit grâce à l'enregistreur magnétique nous permettra de connaître la forme des impulsions en fonction de la bande passante.

En raison de la nature impulsionnelle des signaux, nous utiliserons un filtre, tel que le temps de propagation de groupe dans la bande passante soit optimisé. Un tel filtrage sera décrit par la légende suivante :

F.D - (flat delay) P.B - (passe bas) X Hz

Pour les fréquences supérieures à X l'atténuation est de 48 dB/octave ou 96 dB/octave. A la fréquence X l'atténuation est de 16 dB. L'atténuation à 3 dB est à considérer à la fréquence X/2 Hz.

L'étude que nous proposons, comporte :

L'analyse en amplitude et en fréquence de signaux détectés en différents points d'une section de tunnel lors de tirs dans des niches à créer, ou à approfondir et des tirs en pied-droit.

Nos observations porteront sur les spectres de fréquences, et les amplitudes en fonction de la bande passante avec des filtrages en passe bas.

IMPLANTATION DES CAPTEURS

Nous prendrons en considération 3 capteurs disposés comme indiqué sur la fig. 1 en section transversale du tunnel.

Le capteur C est situé latéralement à 2,50 m du bord de la niche minée et à 1,50 m au-dessus des voies.

Les capteurs D et G sont situés dans le même plan de section transversale que le capteur C. Sur tous ces capteurs les 3 directions seront repérées de la façon suivante :

- H1 : direction horizontale parallèle à l'axe du tunnel
- H2 : direction horizontale perpendiculaire à l'axe du tunnel
- V : direction verticale

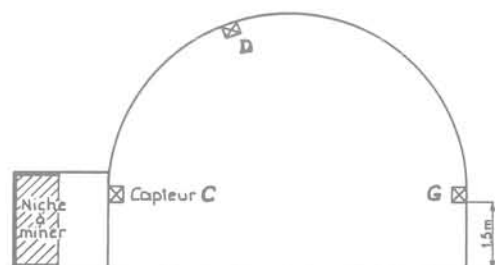


Fig. 2 POSITIONNEMENT DE 3 CAPTEURS SUR UNE SECTION POUR UN TIR DE NICHE

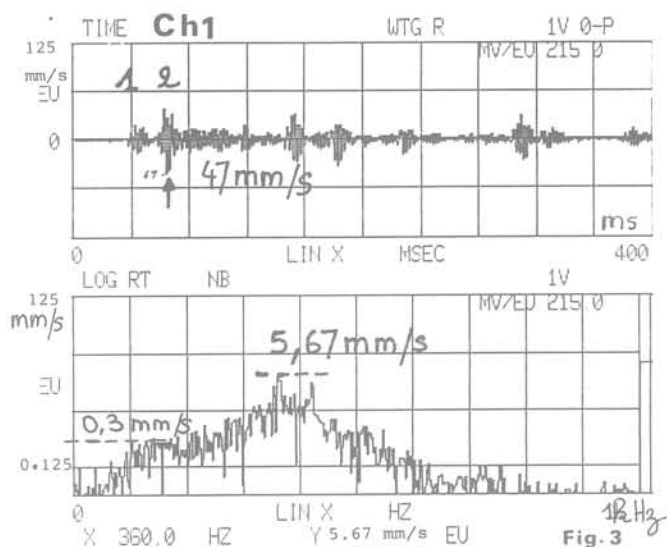


Fig. 3

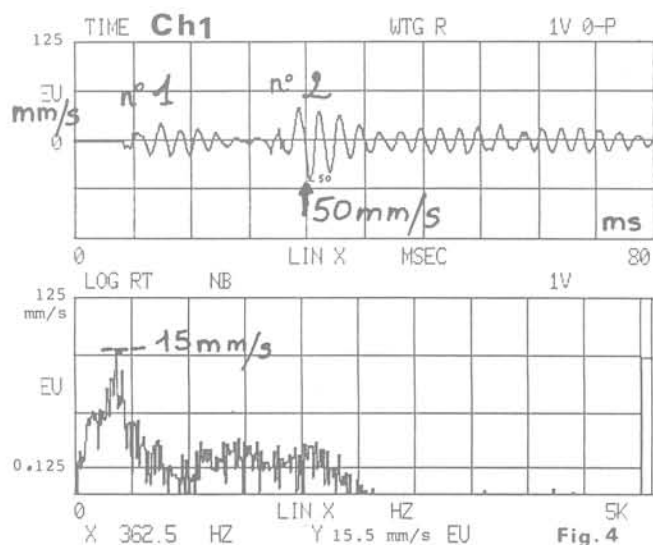


Fig. 4

Fig 3 : Signal détecté sur le capteur Ch1 lors d'un tir de bouchon en approfondissement de niche.

Ce tir est constitué par 15 forages en 38 mm de diamètre suivant une maille de 0,30 x 0,30m la charge par forage est de 100 g. Le signal temps nous permet d'observer sur 400 ms les impulsions consécutives aux 13 numéros de micro-retards. Le niveau maximal est obtenu sur le micro-retard n°2 avec 47 mm/s.

Le spectre met en évidence une amplitude maximale sur le canal 360 Hz avec un niveau de 5,67 mm/s zéro-crête.

Notons un palier sur le spectre entre 100 et 200 Hz, mais à des niveaux d'environ 0,3 mm/s.

La fig. 4 présente le signal consécutif au premier, second et troisième numéro d'amorce du tir décrit ci-dessus.

Sur la plage de fréquences 0 - 1000 Hz le spectre est semblable à celui de la fig. 3. Le niveau maximal est de 15,5 mm/s sur le canal 362,5 Hz (largeur du canal : 12,5 Hz).

Des analyses du même type réalisées sur les autres capteurs et sur les 3 directions mettent en évidence un caractère identique des spectres, quelque soit le nombre des impulsions.

La plage de fréquences des signaux délivrés par le capteur Ch1 avec une dynamique de 30 dB est comprise entre 100 Hz et 600 Hz.

Effectuons une analyse du même type sur le signal délivré par le géophone vertical du capteur D, au cours du même tir. (fig. 5 et 6)

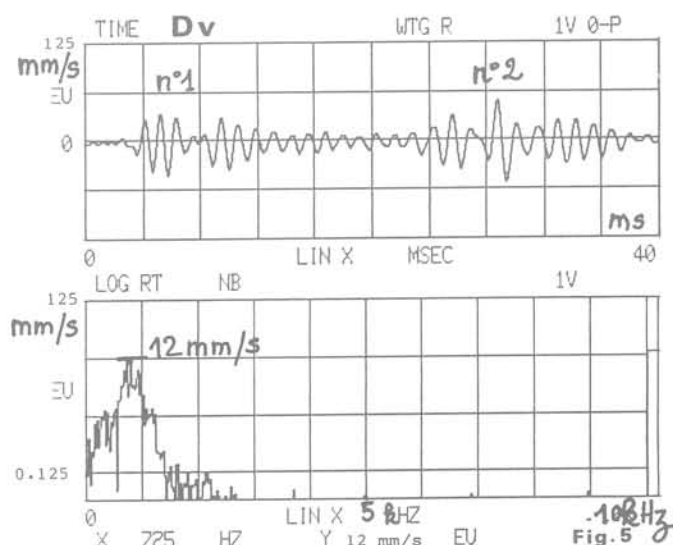


Fig. 5

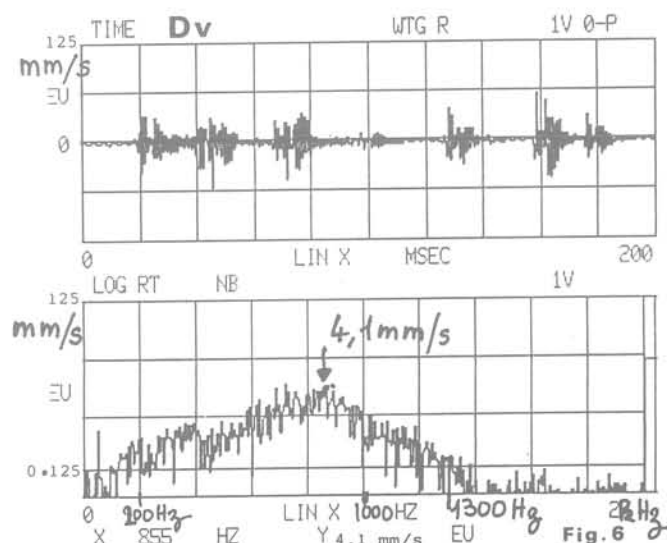


Fig. 6

Cette analyse confirme les propos précédents concernant la plage de fréquences en fonction du nombre d'impulsions.

La fig. 5 présente l'analyse des 2 impulsions relatives aux micro-retards n°1 et 2.

La bande de fréquences totale des signaux tant sur la fig. 5 que sur la fig. 6 est plus large que celle observée sur le capteur C (fig. 4).

La valeur maximale du spectre est obtenue sur une plage de fréquences de 725 Hz à 855 Hz.

Avec une dynamique de 30 dB sous le niveau maximal du spectre on trouve une plage de fréquences de 100 Hz à 1300 Hz. Cette dernière fréquence correspond d'ailleurs à la coupure hautes fréquences de l'enregistrement magnétique.

Des enregistrements analogues au cours de tirs en plate-formes ou de tirs de longrines présentent également une plage de fréquences très large.

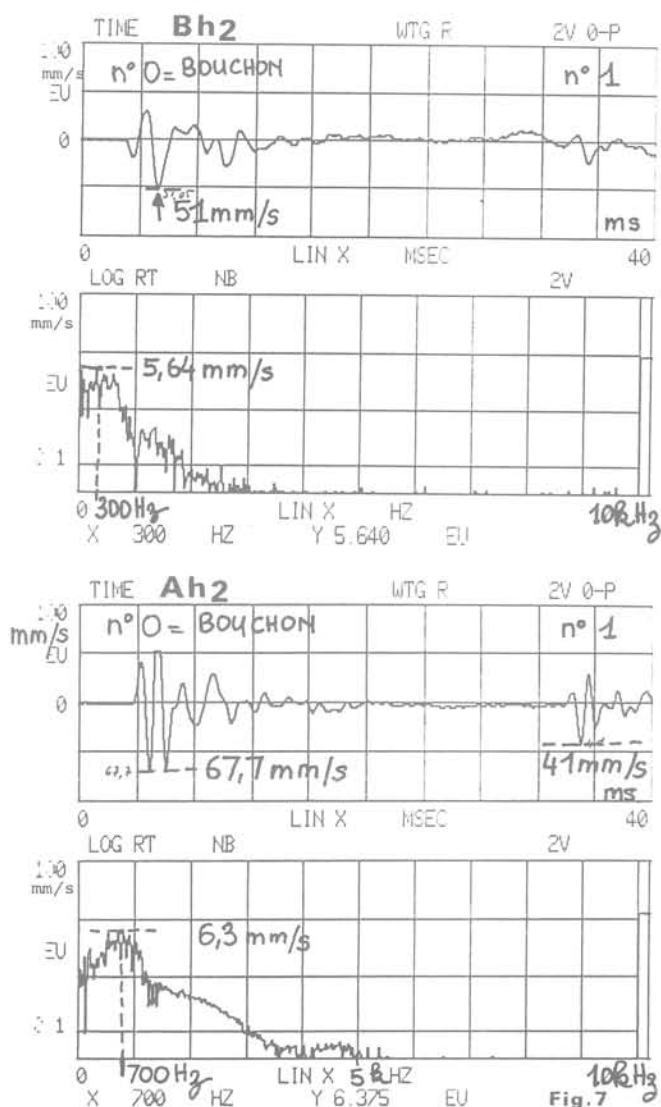


Fig. 7 : Analyse spectrale sur les signaux délivrés par 2 géophones horizontaux perpendiculaires à l'axe du tunnel scellés à une hauteur de 1,5 m sur les pieds droits et à des distances de 2 m pour le capteur A et 4 m pour le capteur B par rapport à l'extrémité de la volée. Celle-ci est constituée par un tir de plot de longrine.

Les signaux présentés correspondent aux micro-retards numéro zéro et n° 1, qui constituent le bouchon de la volée. Les numéros zéro amorcent 2 forages chargés à 100 g chacun ; les numéros 1, amorcent 2 forages chargés à 125 g chacun.

Fig. 8 : Les 2 spectres de fréquences représentent l'analyse sur 100 canaux entre 25 Hz et 2525 Hz des 2 signaux représentés sur la fig. 7. Il s'agit en fait d'une dilatation des spectres de cette même figure.

Observations : La plage de fréquences est particulièrement large, en particulier vers les basses fréquences sur la capteur B. Ces niveaux varient peu, sur les canaux 25 à 650 Hz.

Sur le capteur A le plus proche, la fréquence d'amplitude maximale est à 700 Hz, et la décroissance des niveaux vers les basses fréquences est relativement faible.

La fig. 9 représente le rapport entre les 2 spectres précédents. On observera des niveaux sensiblement constants ou très sélectivement amplifiés entre 25 Hz et 500 Hz, puis une atténuation croissante avec la fréquence entre 500 et 1000 Hz avec une pente moyenne de 25 dB par octave.

Au dessus de 1000 Hz l'atténuation varie de 5 à 20 dB.

Conclusion : Les tirs réalisés en tunnel, tant pour le creusement de niches, que pour l'abaissement de la plate-forme, engendrent sur la section du tunnel des vibrations sur une plage de fréquences très large.

Les fréquences d'amplitude maximale se situent entre 250 Hz et 900 Hz.

La plage totale de fréquences dépend très largement de l'orientation de l'axe de mesure. Les fréquences inférieures à 500 Hz présentent des niveaux relativement élevés sur les pieds droits, suivant la direction perpendiculaire à la paroi (h2).

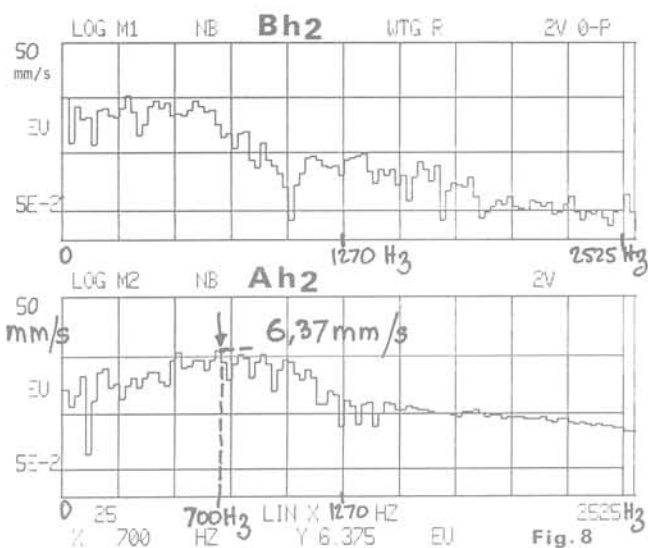


Fig. 8

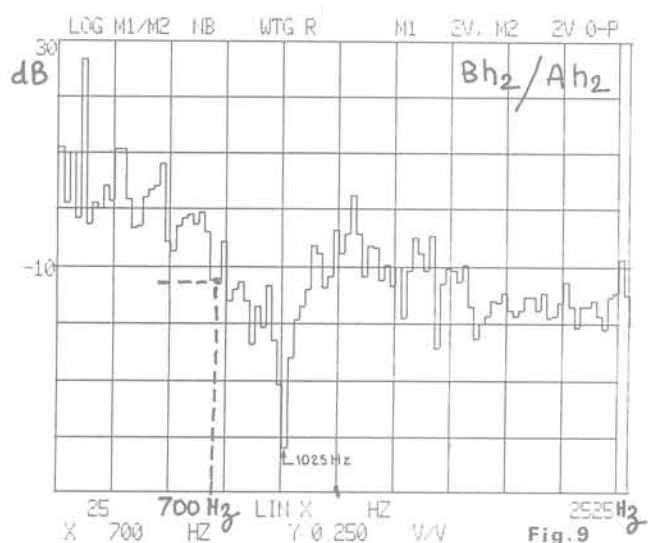


Fig. 9

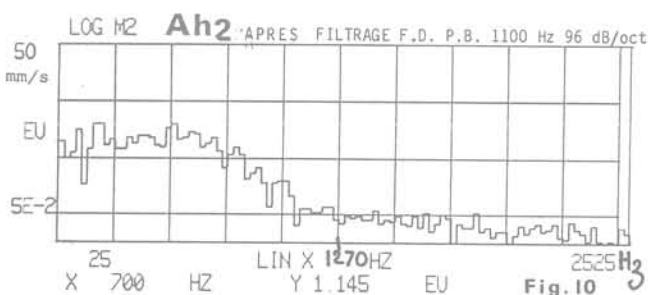


Fig. 10

FILTRAGE DES FREQUENCES ELEVEES

Nous avons vu sur la fig. 9 que, entre les capteurs A et B, nous avons un filtrage des fréquences supérieures à 500 Hz.

Sur les fréquences inférieures à 500 Hz on observe par contre une sensible amplification.

Appliquons au signal du capteur A, un filtrage passe bas à 1100 Hz, avec une pente d'atténuation de 96 dB/octave, le spectre alors obtenu sur ce signal filtre est très comparable au spectre du signal B en particulier entre 25 Hz et 1000 Hz (fig. 10).

La fig. 11 représente le signal de la première impulsion, en fonction du temps : d'une part sans filtrage, d'autre part avec le filtrage passe-bas à 1100 Hz (fig. 11) l'atténuation est notable puisque la valeur zéro-crêtes passe de 68 mm/s à 10 mm/s sur le premier pic négatif.

Sur le signal filtré la valeur zéro crête maximale est obtenue sur le 2ème pic négatif avec 23,3 mm/s.

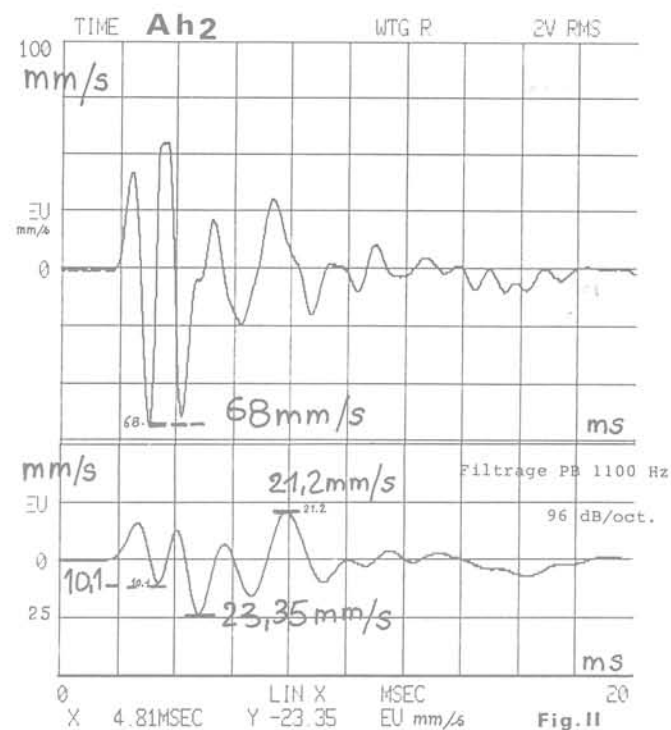


Fig. 11

On comprendra dans ces conditions que les mesures de niveaux zéro-crêtes des vitesses de vibrations dans un tunnel sont largement fonction de la bande passante de la chaîne de mesure, depuis le capteur et son mode de fixation sur la paroi, jusqu'à la saisie du phénomène.

La fig. 12 représente l'ensemble des impulsions enregistrées lors d'un tir de niche, d'une part sur la bande totale d'enregistrement (0-1250 Hz) puis avec des filtrages passe-bas successivement à 500 Hz - 300 Hz 200 Hz et 100 Hz. Les niveaux zéro-crêtes maxi passent ainsi successivement de 49 mm/s à 14 mm/s - 3,5 mm/s - 1,1 mm/s et 0,4 mm/s.

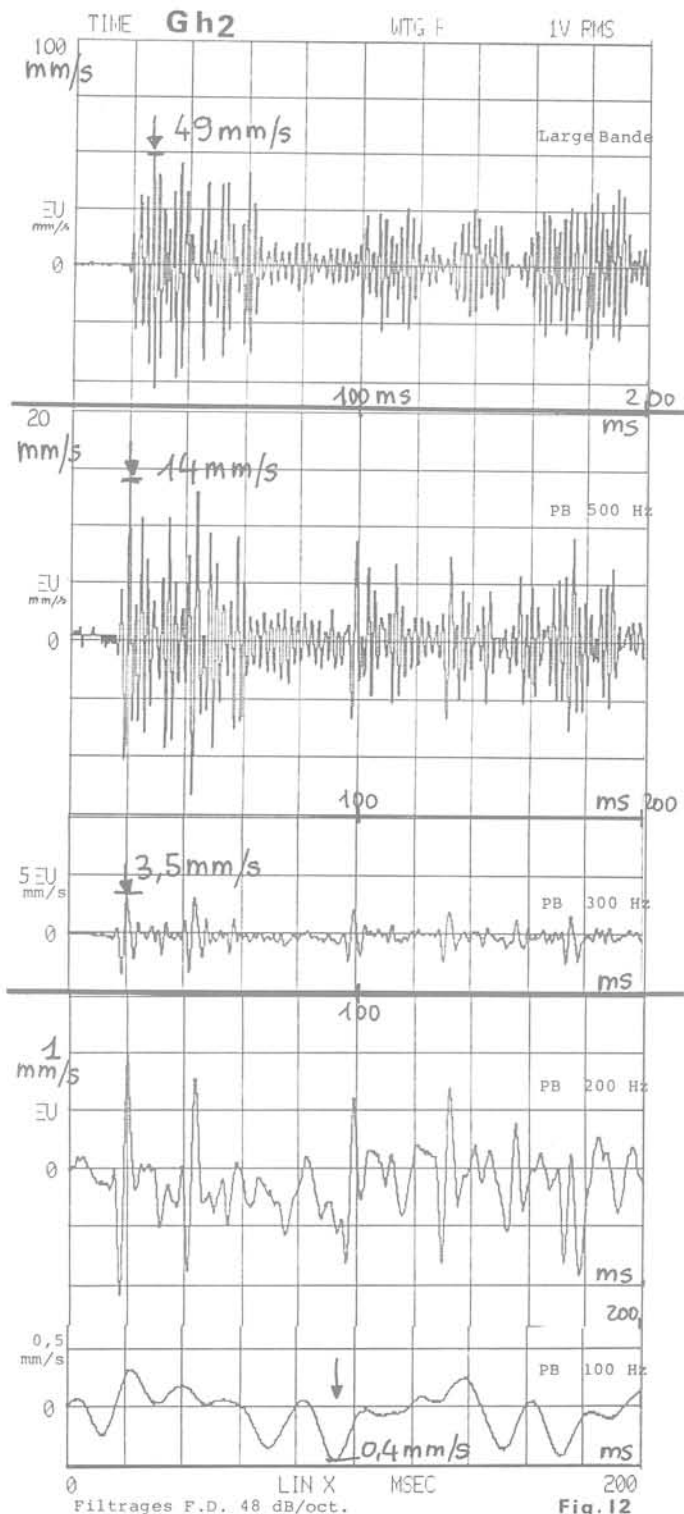


Fig. 12

CONCLUSION

Les tirs de mines réalisés au cours des travaux de reprise en sous oeuvre des tunnels engendrent sur les parements d'une section située entre 0 et 5 mètres de l'extrémité d'une volée, des vibrations sur une plage de fréquences très large entre quelques hertz et 2 KHz.

Les fréquences d'amplitude maximale se situent entre 250 et 900 Hz.

Sur la bande de fréquences la plus large, les vibrations atteignent couramment des niveaux élevés de 50 à 100 mm/s. La détection des vibrations sur une gamme de fréquences supérieures à 500 Hz et fortement conditionnée par le mode de fixation des capteurs.

Les géophones couramment utilisés ne présentent pas des caractéristiques toujours très adaptées pour la détection sur des fréquences supérieures à quelques centaines de hertz.

Les caractéristiques des appareils de saisie les plus couramment utilisés ne sont généralement pas connues avec précision dans le domaine des fréquences supérieures à 250 Hz.

Le contrôle et l'efficacité d'un tir, ne peut donc pas être assuré uniquement en déterminant la vitesse de vibration zéro-crête maximale de la série d'impulsions successives.

Les problèmes de nuisances sont principalement préoccupants sur le domaine des basses fréquences. C'est pourquoi nous préconisons pour les contrôles de tirs de mines en tunnel, une première phase d'ajustage des tirs de mines avec une étude complète des vibrations. Les spectres de fréquences nous permettent d'apprécier le degré de nocivité des vibrations en fonction de la gamme de fréquences. L'amplitude zéro-crête de la vibration, en tant que critère de nocivité, ne pourra être valablement retenue que sur une plage de fréquences, caractérisée par une transmission préférentielle dans l'ouvrage, c'est à dire un amortissement nul ou très lent dans les environs du tir.

L'utilisation de séries souvent complètes de micro-retards, a pour effet d'engendrer sur cette gamme de fréquences généralement basses, une vibration pratiquement entretenue, pendant environ 500 ms. La connaissance des niveaux efficaces de la vibration pendant le temps de la volée peut également constituer un critère d'appréciation de l'énergie dissipée sous la forme de vibrations dans l'ouvrage.

