



HAL
open science

Analyse des surpressions aériennes générées par les tirs de mine : CT 23, fiches 2-23-52-00, dossier 00-00-13786

Jean-Jacques Leblond

► **To cite this version:**

Jean-Jacques Leblond. Analyse des surpressions aériennes générées par les tirs de mine : CT 23, fiches 2-23-52-00, dossier 00-00-13786. 2013. hal-00852429

HAL Id: hal-00852429

<https://hal.science/hal-00852429>

Submitted on 21 Aug 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

04 NOV. 2002

CT 23 – FICHES 2-23-52-00

**ANALYSE DES SURPRESSIONS
AERIENNES GENEREES PAR LES TIRS
DE MINE**

SOMMAIRE

1 – PRESENTATION	3
2 – ETUDE DE LA SURPRESSION AERIENNE GENEREE PAR UN TIR	3
2-1 – ORIGINE DU PHENOMENE.....	3
2-2 – CARACTERISATION PHYSIQUE DE LA SURPRESSION AERIENNE EMISE PAR UN TIR DE MINE	5
2-2-1 – <i>Cas d'une charge isolée à l'air libre</i>	5
2-2-2 – <i>Cas de plusieurs charges déconfinées à courte distance</i>	12
2-2-3 – <i>Effet du confinement des charges</i>	14
2-2-4 – <i>Influence du déplacement des matériaux abattus</i>	17
2-3 – PROPAGATION DE L'ONDE DE SURPRESSION AERIENNE	18
2-3-1 – <i>Principe général de propagation dans un milieu homogène</i>	18
2-3-2 – <i>Influence du milieu de propagation</i>	20
2-4 – CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'ONDE DE SURPRESSION RESULTANTE	24
3 – MESURE DE LA SURPRESSION AERIENNE.....	25
3-1 – UNITES DE MESURE UTILISES DANS LA PRATIQUE.....	25
3-2 – MESURAGE DE LA SURPRESSION AERIENNE	26
3-2-1 – <i>Matériel de mesure</i>	26
3-2-2 – <i>Mode opératoire de la mesure</i>	28
4- INFLUENCE DU DIMENSIONNEMENT DU TIR SUR LA SURPRESSION AERIENNE.....	29
4-1 – DONNEES DE REFERENCE ET OBSERVATIONS PRELIMINAIRES ..	29
4-2 – DEFINITION DES PARAMETRES INFLUANTS.....	33
4-3 – ORIENTATION ET L'ENVIRONNEMENT DES TIRS	34
4-4 – VOLUME DU TIR ET CHARGE MISE EN ŒUVRE	38
4-5 – CONFINEMENT DES CHARGES.....	46
4-6 – COMPARAISON VIBRATION-SURPRESSION.....	53
5 – EFFETS DE LA SURPRESSION AERIENNE.....	56
5-1 – EFFETS SUR LES STRUCTURES	58
5-1-1 – <i>Effet d'une surpression aérienne sans vibration associée sur fondations</i>	60
5-1-2 – <i>Effet d'une surpression aérienne associée à une vibration sur fondation</i>	60

5-1-4 – <i>Manifestations imputables à la surpression</i>	67
5-1-5 – <i>Aspect réglementaire</i>	68
5-2 – EFFETS SUR LES PERSONNES	70
5-3 – GENE EXPRIMEE EN FONCTION DU COUPLE VIBRATION SURPRESSION	71
5-4 – EFFETS DES SURPRESSIONS SUR LES ANIMAUX.....	78
6 – CONCLUSIONS.....	79

1 – PRESENTATION

Traditionnellement, les nuisances générées par un tir de mine sont scindées en trois familles.

- Les projections dont les effets immédiats et redoutés ont imposé des mesures préventives et un examen attentif, notamment à proximité de constructions ou d'activités humaines.

- Les vibrations transmises par le sol, qui sont aujourd'hui bien connues, étudiées, contrôlées et réglementées notamment dans le domaine des carrières.

- La surpression aérienne, souvent confondue avec le bruit du tir considérée, sauf certains tirs particuliers (souterrain, démolition...) comme une gêne passagère. Ces phénomènes sont généralement mal connus, peu étudiés et mesurés et très exceptionnellement contrôlés.

Nous constatons, par ailleurs, un nombre croissant de plaintes de riverains concernant la perception de vibrations lors de tirs, alors que les niveaux mesurés restent faibles, voire diminuent sensiblement suite à des adaptations des tirs mises en œuvre pour prendre en compte ces plaintes.

Ces situations nous ont conduit à rechercher l'origine de ces plaintes en analysant d'une façon globale les nuisances générées par les tirs à travers la mesure synchronisée du couple surpression-vibration.

Cette démarche, objet du présent rapport, a imposé dans une première phase d'approfondir nos connaissances sur les surpressions aériennes tant au niveau de leur propagation que de leur conséquence sur les structures et les personnes. Dans une seconde phase, nous avons cherché à définir les relations existantes entre vibration et surpression aérienne au niveau des phénomènes physiques eux-mêmes puis de leur conséquence sur les personnes exposées lors d'un tir.

2 – ETUDE DE LA SURPRESSION AERIENNE GENEREE PAR UN TIR

2-1 – ORIGINE DU PHENOMENE

Initialement, la surpression aérienne générée par un explosif détonant est due à l'émission de gaz à grande vitesse, à haute température et à haute pression.

La vitesse d'émission des gaz au niveau de la charge varie en fonction du type d'explosif et du régime de détonation de 3000 m/s (nitrate-fioul) à 6000 m/s (dynamite) voire 7000 m/s pour les cordons détonants. Dans tous les cas, cette vitesse est supersonique dans l'air.

La pression au niveau de la charge ou pression de détonation varie de 3,5 à 15 Gpa en diamètre 80 mm confiné. La température atteint plusieurs dizaines de milliers de degré au niveau de la charge mais décroît très rapidement avec la détente des gaz constituant un paramètre négligeable même à courte distance du tir.

Cette émission initiale de gaz produit donc un front d'ondes de surpression qui se déplace à une vitesse supersonique et initie, une onde de choc attestée par le bruit du tir comparable au bang d'un avion franchissant le mur du son.

Ce front d'onde va affecter successivement les parois du forage dans lequel la charge est placée, le massif rocheux ou la structure à fragmenter et déplacer puis émerger dans l'atmosphère. Les valeurs de pression et de vitesse de ce front d'onde émergent vont dépendre directement de l'interaction massif-explosif et du volume de massif traversé.

Chaque charge d'un tir émet son propre front d'onde de surpression, affecté par son transit dans un milieu propre à chaque forage, qui se combine avec les fronts d'onde émis par les autres trous suivant une chronologie dépendant de la séquence initiale du tir et du temps de trajet de chaque front d'onde dans le massif.

Le déplacement des matériaux abattus provoque également une onde de surpression aérienne qui dépend directement de la vitesse de déplacement et du volume en mouvement. Cette composante, devient très importante pour certains types de tir, notamment en démolition.

On conçoit dès l'origine que la surpression aérienne mesurée à quelques mètres d'un tir comportant un nombre important de trous non simultanés va correspondre à un signal complexe présentant sur un même site des variations importantes d'un tir à l'autre.

En terme d'effet, il convient également de différencier :

- le bruit du tir qui représente la nuisance auditive directe vis à vis des riverains et trouve son origine dans la vitesse d'émission des gaz,

- le « souffle » qui représente la nuisance mécanique du tir vis à vis des structures et trouve son origine dans l'énergie du front d'onde de surpression.

2-2 – CARACTERISATION PHYSIQUE DE LA SURPRESSION AERIENNE EMISE PAR UN TIR DE MINE

2-2-1 – Cas d'une charge isolée à l'air libre

Après émission dans l'atmosphère et à partir de quelques mètres du tir, le front d'onde de surpression se propage à une vitesse égale à la vitesse du son dans l'air, suivant un modèle proche d'une onde de choc sphérique de grande puissance.

Pour une charge isolée permettant de considérer l'émission comme ponctuelle et la libération d'énergie comme instantanée, la grande intensité de l'onde de choc génère sur le front d'onde un saut de pression très important. D'après LANDAU et LIFCHITZ (mécanique des fluides – 1971), on peut représenter ce front d'onde dans l'air, considéré comme un gaz polytropique, suivant le schéma de la figure 1 avec :

- r : rayon d'un point quelconque A inclus dans la sphère
- R : rayon de la sphère à l'instant t à une distance proche de la source
- p : Pression du point A
- P_R : Pression maximale sur le front d'onde de rayon R
- v : Vitesse du gaz au point A
- V_R : Vitesse du front d'onde de surpression
- d : Masse volumique du gaz au point A
- d_R : Masse volumique du gaz sur le front d'onde de surpression

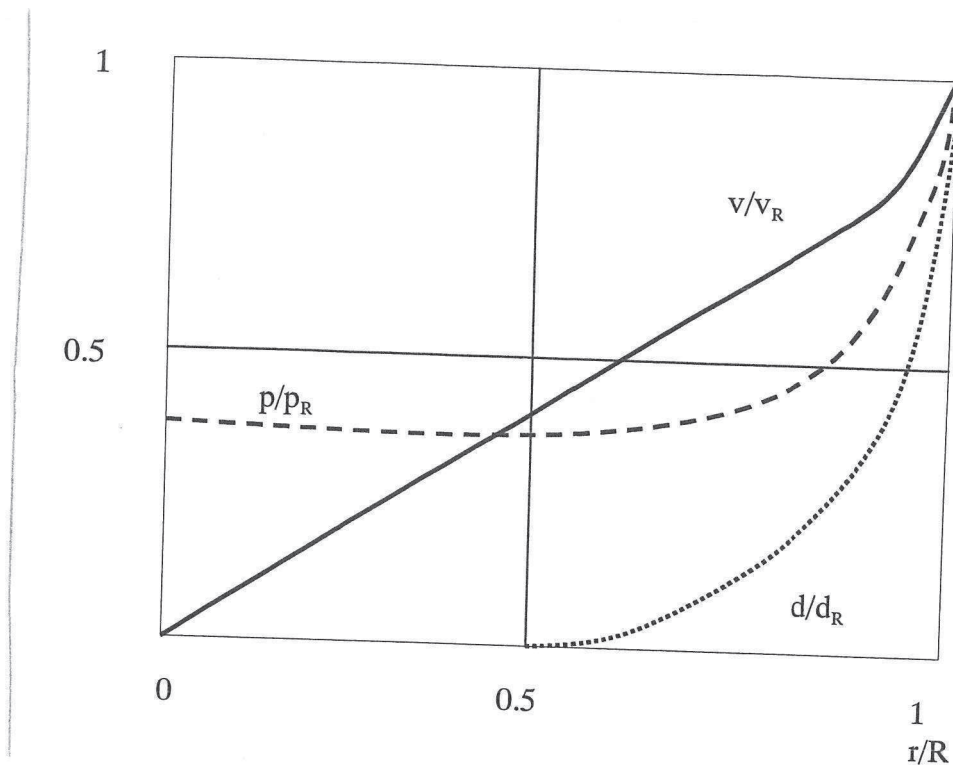


Figure 1 : variation relative au sein de la sphère de P, V et d en fonction des valeurs maximales sur le front d'onde de rayon R.

On notera la très rapide décroissance de la masse volumique vers l'intérieur de la sphère. Cela signifie que presque toute la matière est concentrée dans une couche relativement mince située derrière le front de l'onde de choc. Cette densification impose à l'arrière du front la présence d'une zone de dépression, la masse totale de gaz au sien de la sphère étant constante.

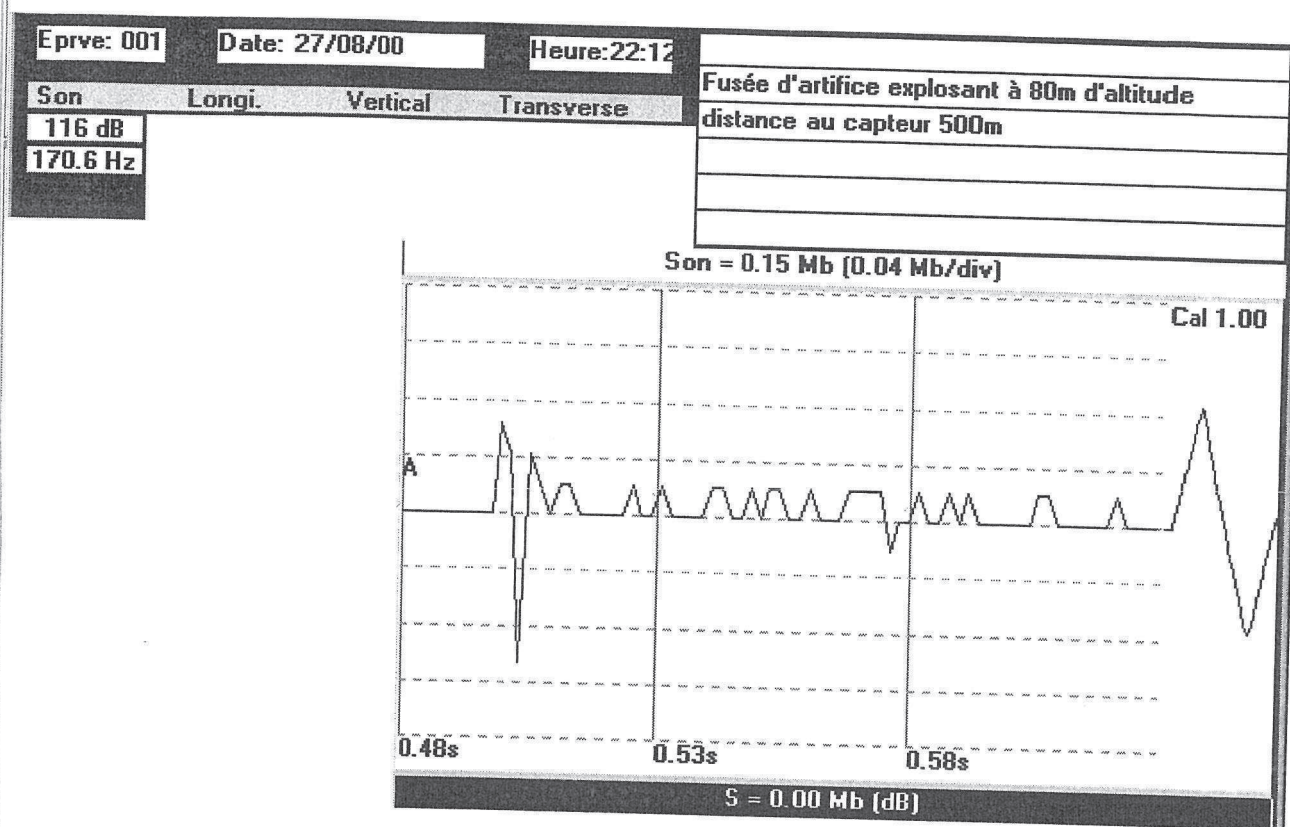


Figure 2 – explosion aérienne d'une fusée d'artifice enregistrée à 500 m

L'enregistrement temporel de la figure 2 illustre un phénomène de ce type avec une onde de compression initiale suivie d'une zone de dépression qui contient sur cet exemple la valeur maximale enregistrée en représentation linéaire (échelle verticale en Millibar).

Ce modèle reste valable dans son principe vis à vis d'une charge explosant au niveau du sol, l'expression n'étant plus sphérique mais hémisphérique. L'enregistrement temporel de la figure 3 illustre un phénomène de ce type, la cartouche d'explosif mise à feu étant posée directement sur le sol.

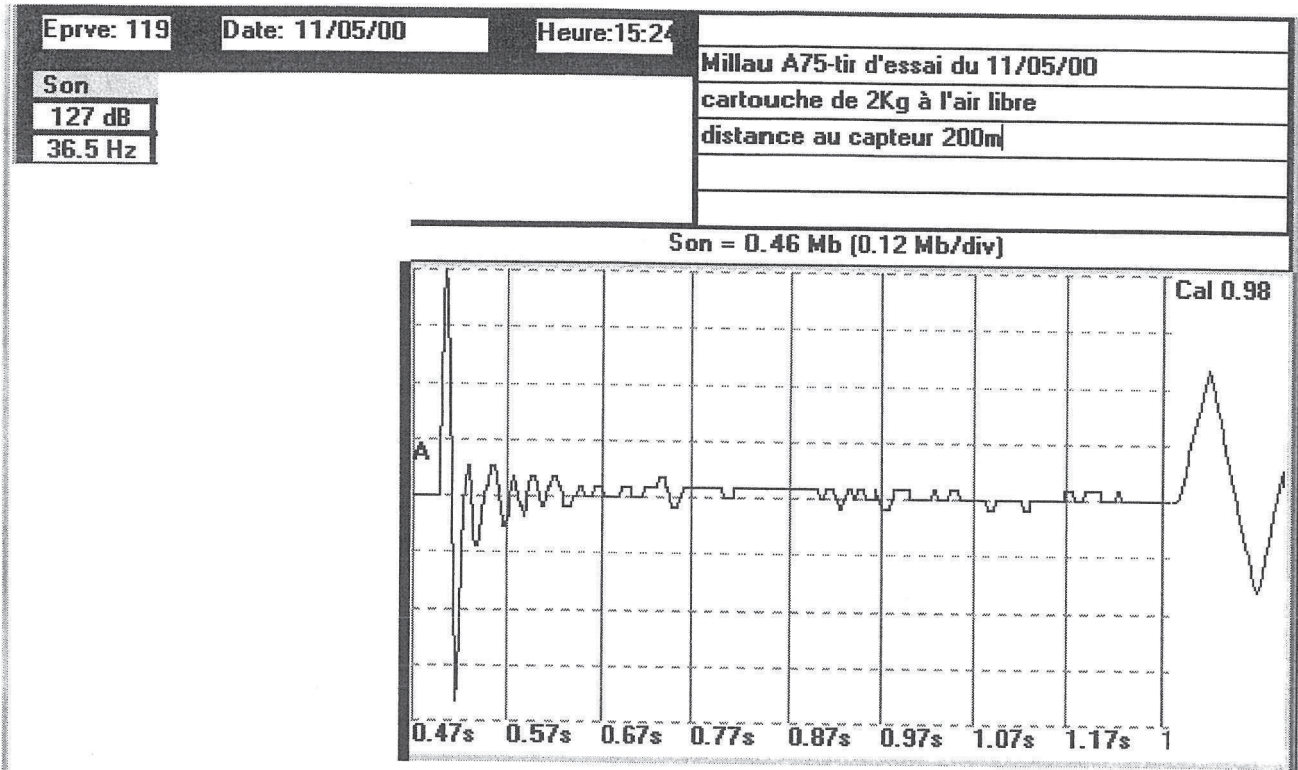


Figure 3 – explosion au niveau du sol d'une cartouche d'explosif de 2 kg

On constate sur cet enregistrement la présence d'une compression initiale puis d'une dépression d'amplitude équivalente. Le signal indique ensuite une série d'oscillation s'amortissant progressivement dont l'origine nous semble devoir être attribuée au microphone oscillant sur son pied.

Si l'on revient sur le modèle de LANDAU, on constate que l'onde de compression initiale provoque une densification du gaz qui concerne un volume constitué d'une couche sphérique possédant une certaine épaisseur, la masse volumique du gaz ne diminuant que progressivement à l'arrière du front de l'onde de choc. De même lorsque la sphère s'épand et que l'énergie revient à la pression initiale avant explosion, la zone de dépression correspond donc également à un volume sphérique possédant également une épaisseur propre.

Sachant que le front d'onde de choc, au delà de quelques mètres de la source, se déplace à la vitesse du son, on peut à partir des enregistrements temporels de surpression estimer l'épaisseur de ces couches d'air en compression et dépression. Ce calcul réalisé sur la courbe de la figure 3 conduit à une épaisseur de 4 à 5 m pour les deux couches correspondant à des durées de 13 à 14 ms de surpression puis de dépression pour une charge isolée située à 200 m, à l'air libre.

Les fréquences de l'onde de surpression aérienne peuvent être décrites, comme pour les vibrations à partir d'une analyse par transformée de Fourier discrète (FFT) et représentées par un spectre d'énergie ou d'amplitude.

Pour des charges isolées et non confinées ces spectres sont, en règle générale, semblables à ceux figurant sur les figures 4 et 5 ci-après (mesures effectuées entre 150 et 200 m des charges en champ libre).

Les caractéristiques principales de ces spectres que nous avons constatées pour une vingtaine de mesures effectuées entre 100 et 400 m sont les suivantes :

Fréquence dominante : 18 à 70 Hz, (1 mesure à 145 Hz sur une fusée d'artifice).

Fréquence associée au maximum de surpression : 20 à 130 Hz.

Plage de fréquence de 6 dB d'atténuation : 15 à 150 Hz.

Plage de fréquence à 12 dB d'atténuation : 5 à 200 Hz.

Ces fréquences se situent dans la partie basse de la plage des fréquences audibles par l'homme, voire dans le domaine des infrasons (≤ 25 Hz pour une partie du signal).

Figure 4 – trace et spectre de fréquence associés – cartouche à l'air libre

MILLAU A75-tir d'essai du 11/05/00
cartouche de 2Kg à l'air libre
distance au capteur 200m

No d'epreuve: 119 Date: 11/05/00 Heure: 15:24
Trigger Son : 106 dB Trigger Sismique : 0.318 mm/s No de Serie : 395

Amplitudes and Frequences

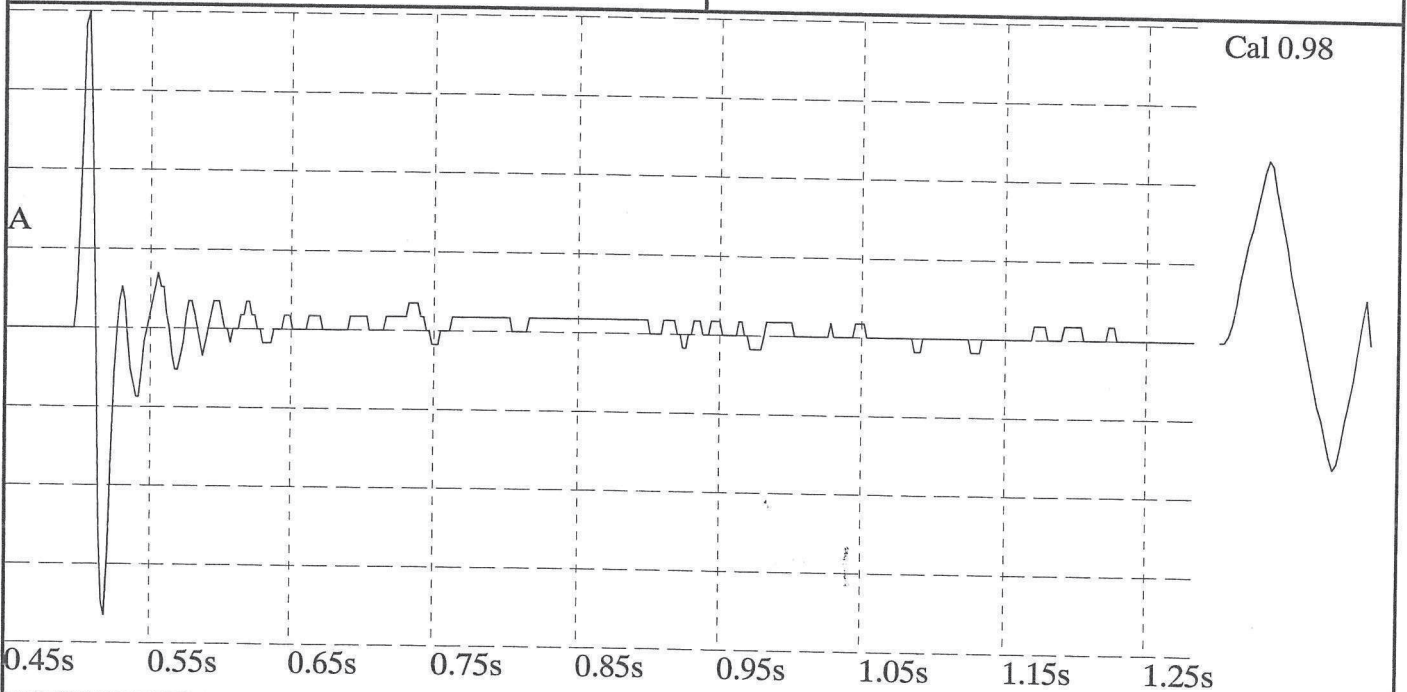
Son: 127 dB @ 36.5 Hz.

Echelles Graphes

Duree: 0.450 sec a : 1.282 sec

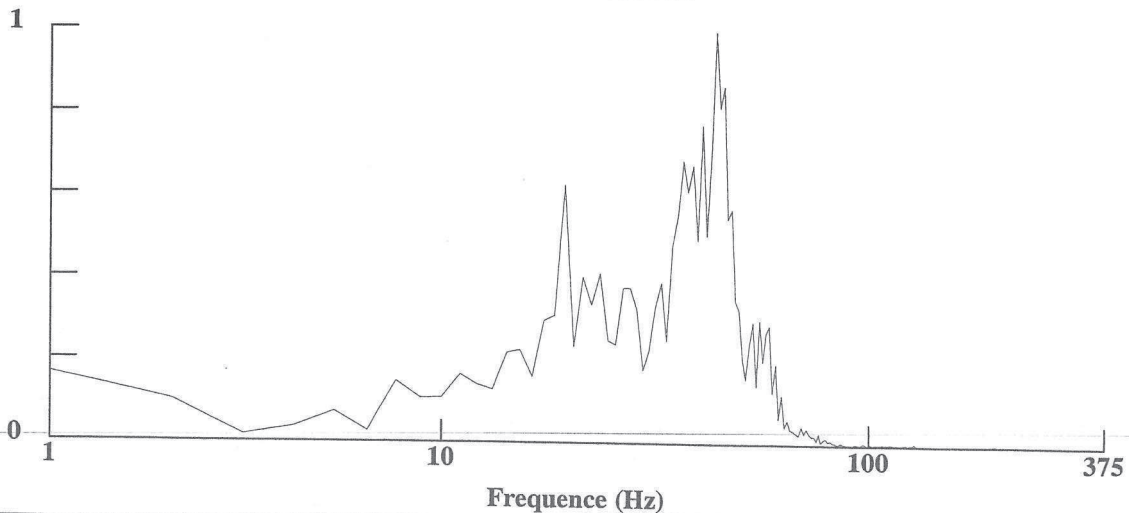
Son: 0.46 Mb (0.12 Mb/div)

Echelles Temps: 0.10 secondes



Analyse FFT (Spectre d'Energie)

Son
Max.= 42.00 Hz



libre.

Figure 5 – trace et spectre de fréquence associé. Cordeau détonant à l'air

RD22 Pont de Fleurat 25/09/01
9.5 Kg d'émulsion encartouchée répartis dans 3
trous de 6m amorcés au cordeau détonant
(cordeau maître en surface)

No d'epreuve: 047 Date: 25/09/01 Heure: 12:00
Trigger Son : 110 dB Trigger Sismique : 0.381 mm/s No de Serie : 395

Amplitudes and Frequences

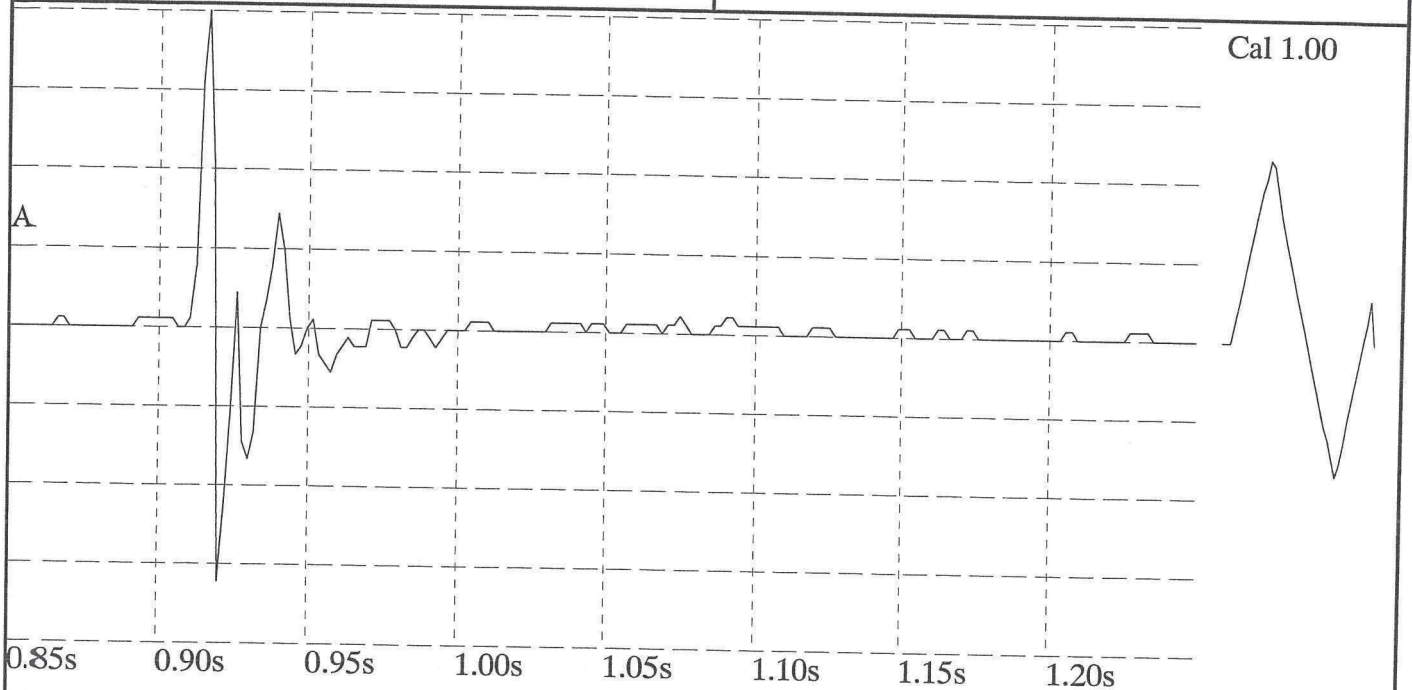
Son: 131 dB @ 73.1 Hz.

Echelles Graphes

Duree: 0.851 sec a : 1.250 sec

Son: 0.72 Mb (0.18 Mb/div)

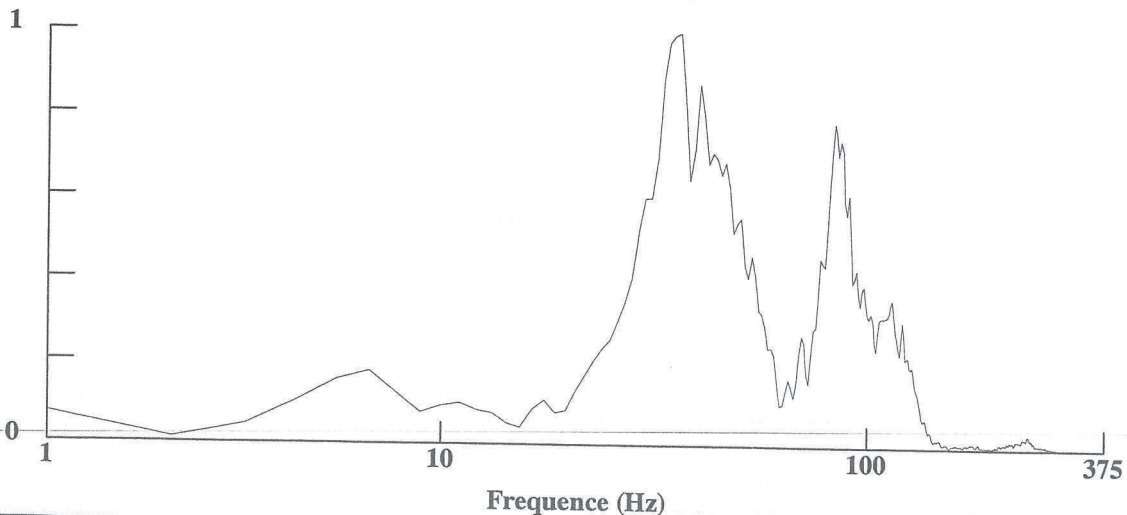
Echelles Temps: 0.05 secondes



Analyse FFT (Spectre d'Energie)

Son

Max.= 34.00 Hz



2-2-2 – Cas de plusieurs charges déconfinées à courte distance

Dans le cas général, un tir de mine comporte plusieurs charges explosant successivement avec des intervalles de temps de quelques millisecondes fixés par la séquence d'amorçage.

La surpression aérienne résultante mesurée à quelques mètres du tir correspondra donc à une combinaison des ondes émises par chaque charge spatialement et temporellement décalée les unes par rapport aux autres. Il faut également remarquer que si la première charge émet une surpression dans un milieu à l'équilibre, les charges ultérieures génèrent une onde de surpression dans un milieu plus ou moins perturbé en fonction des intervalles de temps et de distance les séparant.

Le signal résultant correspondra à une onde de surpression complexe comme l'illustre la figure 6.

Cet exemple concerne un tir de découpage au cordeau détonant comportant 20 trous distants de 0,50 m les uns des autres et initiés par détonateurs électriques à micro-retard 25 ms n° 0 à 19 (un numéro par trou). Le tir était couvert par un tapis de bottes de paille et deux nappes de géotextile (bâtiment à 1,80 m des charges).

Figure 6 – Signal et spectre de fréquence d'un tir déconfiné acquis à très courte distance

MONTPEYROUX-Découpage au cordeau détonant
20 trous séparés de 25ms
0.14Kg par trou
capteur à 4m du centre du découpage

No d'epreuve: 053 Date: 21/02/01 Heure: 10:13
Trigger Son : 120 dB Trigger Sismique : 2.032 mm/s No de Serie : 349

Amplitudes and Frequences

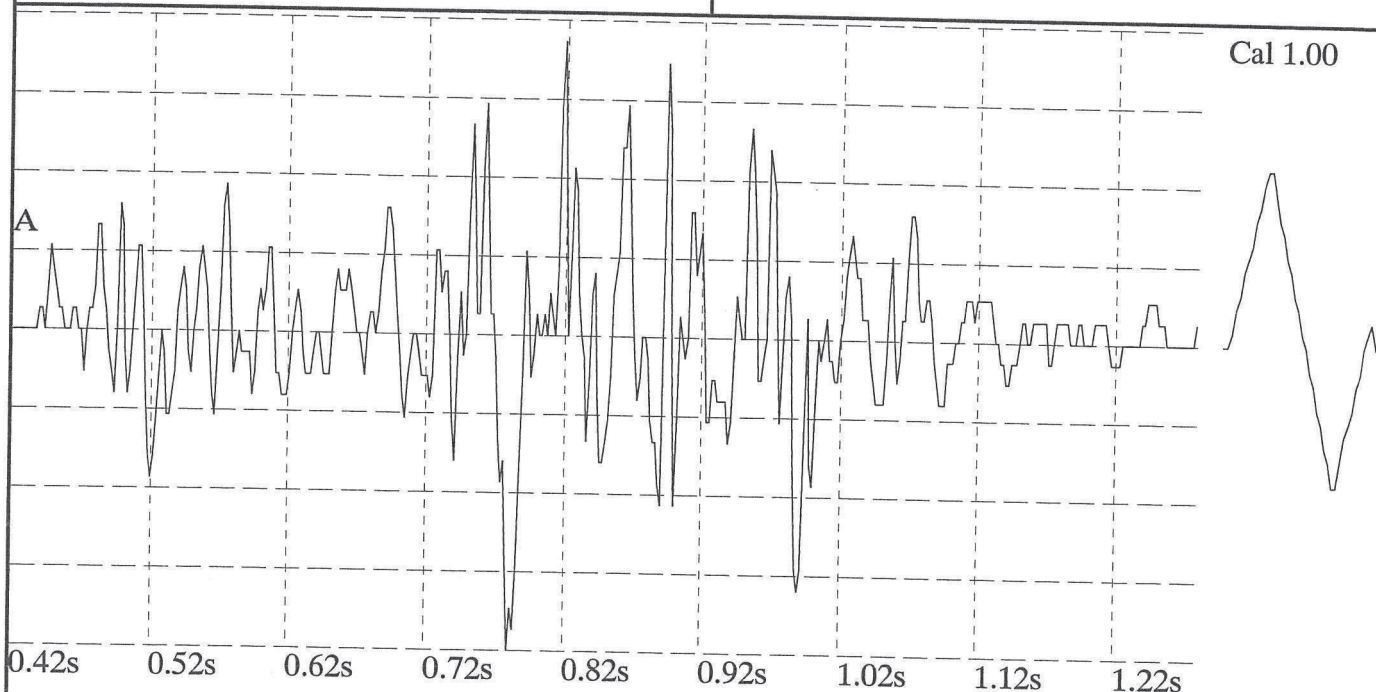
Son: 130 dB @ 25.6 Hz.

Echelles Graphes

Duree: 0.424 sec a : 1.282 sec

Son: 0.60 Mb (0.15 Mb/div)

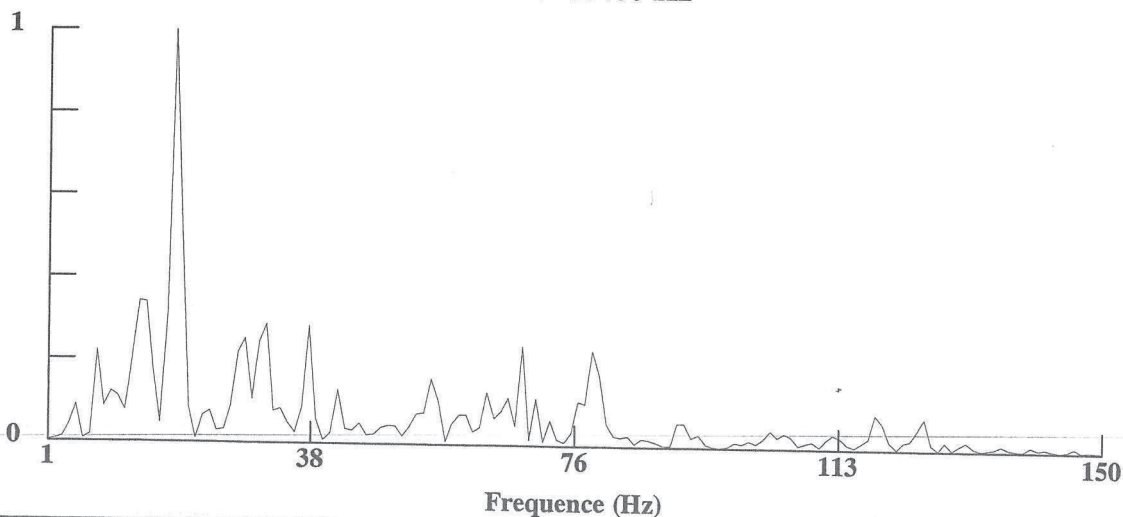
Echelles Temps: 0.10 secondes



Analyse FFT (Spectre d'Energie)

Son

Max.= 19.00 Hz



Le microphone était implanté à très courte distance des charges (4 m du centre de découpage) afin d'enregistrer l'onde de surpression initiale avant qu'elle ne soit altérée par propagation.

On constate sur l'enregistrement que, malgré la faible distance tir-capteur, il n'est pas possible de retrouver la signature unitaire des charges. Le spectre de fréquence indique une fréquence dominante de 19 Hz, inférieure à la fréquence de la séquence de tir (40 Hz).

Il y a donc cumul, dès l'origine, des surpressions émanant de chaque charge, comme pour les vibrations transmises par le sol. La fréquence de 40 Hz apparaît de manière très faible sur le spectre (25% de l'énergie associée à la fréquence dominante).

La durée du signal (à 90% d'atténuation de la valeur maximale de surpression) est d'environ 800 millisecondes pour une séquence de tir de 475 millisecondes.

Comme pour les vibrations transmises par le sol, il semble impossible de modéliser le signal résultant de plusieurs charges, dans une configuration pourtant simple et à très courte distance du tir donc sans effet d'altération des signaux du à la propagation.

2-2-3 – Effet du confinement des charges

En règle générale, les charges d'explosif mises en œuvre dans un tir de mine sont confinées dans un trou avec présence d'un bourrage en partie sommitale.

L'onde de surpression aérienne émergeant dans l'atmosphère va dépendre fondamentalement de ce confinement qui a pour effet de diminuer à la fois la vitesse d'émission des gaz dans l'atmosphère ainsi que la pression maximale associée. Compte-tenu que le volume de gaz émis est indépendant du confinement, la diminution de la vitesse des gaz va se traduire par une augmentation de la durée d'émission et une diminution du pic de surpression. A partir d'un certain niveau de confinement, les gaz émergeant ne provoqueront plus de détonation, leur vitesse n'étant plus supersonique.

L'augmentation de la durée d'émission entraîne une augmentation de la phase de montée en pression initiale donc une diminution des fréquences de l'onde de surpression émise entre un tir confiné associé à un grondement sourd et un tir déconfiné (découpage par exemple) associé à un claquement sec.

L'onde de surpression résultant d'un tir de plusieurs charges successives confinées va donc se caractériser par un signal beaucoup plus lissé que ceux vus dans les paragraphes précédents avec un spectre de fréquence nettement plus marqué dans la gamme des basses fréquences et notamment des infrasons, comme illustré sur la figure 7.

Cet enregistrement est caractéristique de tirs de type cratère avec amorçage fond de trou très fréquents en travaux publics. Le signal enregistré se caractérise par une oscillation à basse fréquence voisine de 1 à 2 Hz avec quelques pics ponctuels.

L'énergie maximale de l'onde de surpression se situe dans le domaine des infrasons non audibles. Le maximum de surpression se situe sur les pics ponctuels à fréquence audible. On note également dans la majorité des cas que :

- l'onde de compression présente une fréquence plus élevée que l'onde de dépression qui lui succède (4 Hz pour 1,5 Hz sur la figure 7),
- le maximum de surpression est atteint sur cette onde de compression initiale.

Le confinement des charges va dépendre du dimensionnement du tir (maille, hauteur de bourrage, type d'amorçage) mais également du mécanisme de l'explosion de chaque charge et de la réaction du massif rocheux.

Figure 7 – trace et spectre de fréquence associé pour un tir confiné de type « cratère ».

A75-MILLAU tir du 11/05/00
tir d'abattage -21 trous- séquence 25ms
charge 24 Kg par trou (profondeur 6m)
distance tir-captur: 200m

No d'epreuve: 120 Date: 11/05/00 Heure: 15:26
Trigger Son : 106 dB Trigger Sismique : 0.318 mm/s No de Serie : 395

Amplitudes and Frequences

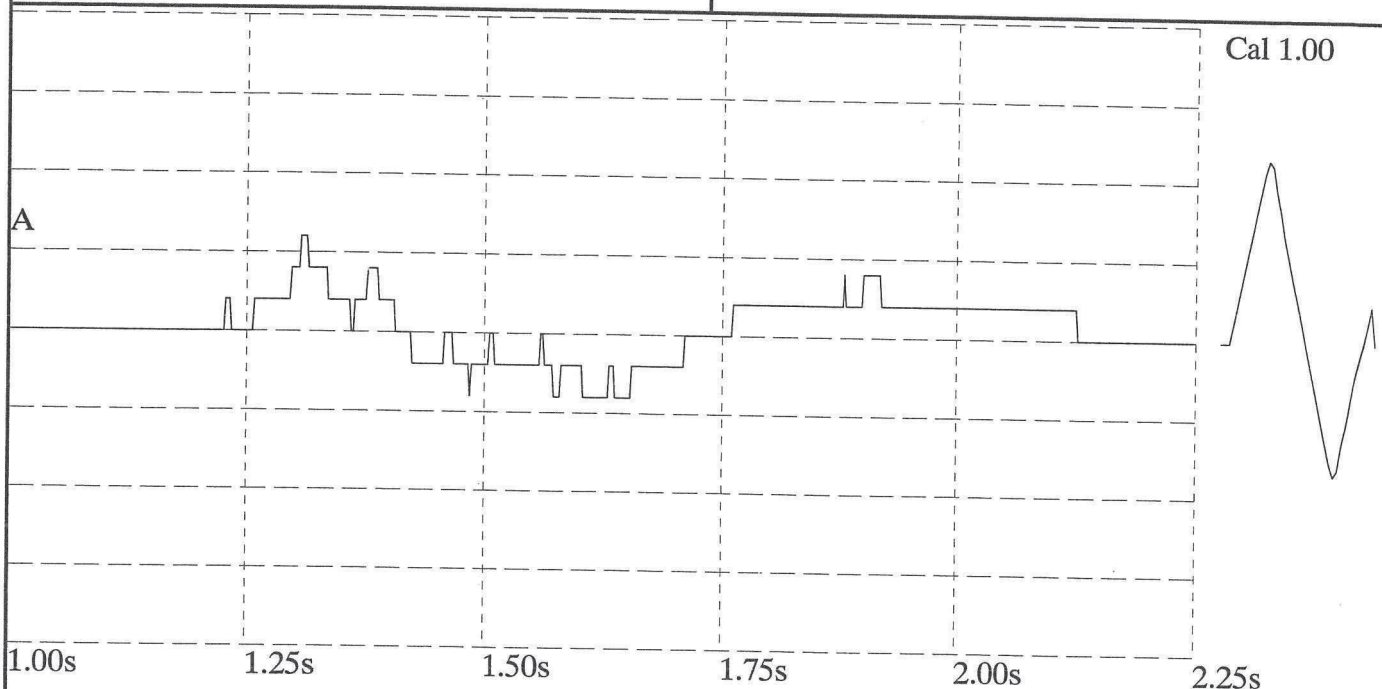
Son: 110 dB @ 0.0 Hz.

Echelles Graphes

Duree: 1.000 sec a : 2.250 sec

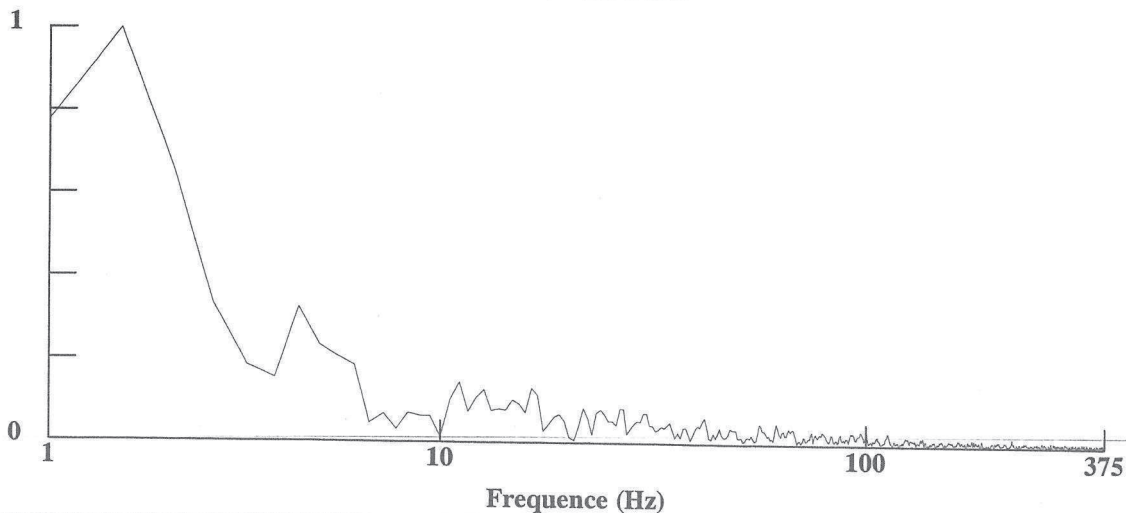
Son: 0.20 Mb (0.05 Mb/div)

Echelles Temps: 0.25 secondes



Analyse FFT (Spectre d'amplitude)

Son
Max.= 1.50 Hz



2-2-4 – Influence du déplacement des matériaux abattus

Le tir de mine provoque un déplacement des matériaux qui se traduit dans un premier temps par un gonflement du massif (en front de taille pour les tirs en gradin et sur la surface sommitale du tir en tir en cratère). La vitesse de déplacement de ce massif est de l'ordre de 10 à 15 m/s, les blocs projetés atteignant, quant à eux, des vitesses initiales de l'ordre de 50 m/s. Ce mouvement peut être grossièrement assimilé à celui d'une membrane de quelques dizaines à quelques centaines de m² provoquant ainsi une onde de surpression dans l'air (figure 8). La fréquence de cette onde de surpression est très basse compte-tenu de la surface en mouvement. L'énergie transmise va dépendre du volume en mouvement et de la vitesse de déplacement.

Cette composante proportionnelle au volume du tir et à moindre titre au confinement des charges, va se combiner avec les surpressions aériennes liées à l'émission des gaz renforçant les composantes à basses fréquences de l'onde résultante dans des proportions restant à définir au stade actuel de nos connaissances sur le sujet.



Figure 8 – Exemple de gonflement initial du massif sur un tir de carrière (surface du (front 1000 m²))

2-3 – PROPAGATION DE L'ONDE DE SURPRESSION AERIENNE

2-3-1 – Principe général de propagation dans un milieu homogène

A partir de quelques mètres de la charge, l'onde de surpression aérienne se propage dans l'air à la vitesse du son suivant un mode d'expansion sphérique, la pression maximale diminuant avec la distance. La relation type généralement utilisée pour prédire le niveau crête maximal de la surpression aérienne est :

$$p = K \left(\frac{D}{Q^{1/3}} \right)^{-1,2} \text{ avec:}$$

P : pression maximale en Pa.

D : distance entre le tir et le point de mesure en m.

Q : charge unitaire instantanée d'explosifs en kg.

K : constante dépendant du site et de la source.

L'expérience montre toutefois que ces lois présentent une très grande variabilité du fait de la source et du nombre important de paramètres contenus dans la constante K.

En terme de fréquence, on constate également une évolution du spectre avec la distance qui tend à s'appauvrir et à se concentrer vers les fréquences représentatives les plus basses comme l'illustre le tableau ci-après (figure 9), où M_p correspond au point de mesure le plus proche du tir et M_e au point le plus éloigné.

Site	Source de surpression	Distance tir-capteur (m)		Surpression max (DBL)		Fréquence dominante Fd (Hz)		Plage de fréquence à 25% de la puissance spectrale de Fd (Hz)	
		Mp	Me	MP	Me	Mp	Me	Mp	Me
Montpeyroux	Découpage au cordeau détonant Charge unitaire 0.14Kg 20trous	4	14	130	124	19	22	9 à 150	9 à 80
St Julien de coppel	Tir de carrière Amorçage fond de trou 38 trous-CU 66Kg	450	1300	120	106	6	1	1 à 10	1 à 8
Le Cros	Tir de carrière Amorçage au cordeau 20g 9 trous-CU 72Kg	210	600	128	106	1	1.25	1 à 20	1 à 8
Monnières	Tir de carrière Amorçage fond de trou 20 trous-CU 34Kg	420	640	119	116	2	1	1 à 18	1 à 10
St Germain du Teil	Tir de TP en « cratère » Amorçage fond de trou 162 trous-CU 15Kg	78	260	122	112	20.5	1.25	1 à 80	1 à 60
LRPC Clermont	Impact de foudre lors d'un orage	500	900	128	122	39	33	1 à 200	1 à 90

Figure 9 – Résultats de mesures de surpression aérienne attestant de l'évolution du spectre de fréquence en fonction de la distance.

Le dernier exemple de ce tableau correspond à un impact de foudre lors d'orage. Il illustre à la fois le principe de l'abaissement des fréquences avec la distance (chacun ayant constaté de lui-même que le bruit associé à la foudre est d'autant plus grave, donc à plus basses fréquences que le point d'impact est éloigné), et la similitude entre les surpressions aériennes associées à un tir de mine et à la foudre.

2-3-2 – Influence du milieu de propagation

Effets de la morphologie et de l'occupation du sol

La morphologie du site et l'occupation du sol (végétation, bâti), va fortement influencer la propagation de l'onde de surpression, chaque obstacle rencontré affectant le signal résultant par :

- réflexion (phénomène d'écho),
- réfraction,
- Diffusion.

Chacun de ces modes de transmission va dépendre de l'angle incident du front d'onde de surpression initial (donc de la géométrie des obstacles) et des caractéristiques mécaniques de l'obstacle (absorption de l'énergie par déformation...).

On notera également qu'à l'interface entre l'air et un obstacle se crée une « couche limite » affectée de phénomènes très complexes (turbulences, ondes latérales...).

L'existence de cette couche limite a pour conséquence pratique d'imposer, d'éloigner le microphone de mesure des parois d'une structure instrumentée pour s'affranchir de son influence.

L'influence du site est intégré dans la formule de prédiction du chapitre 2-3 dans le coefficient K susceptible de variation importante sur un même site en fonction :

- du point d'observation,
- de l'orientation du tir vis à vis du point d'observation,

- de la position du tir vis à vis des fronts de taille et talus existants à proximité influençant fortement la combinaison des surpressions émanant des différents trous (les ondes réfléchies sur les parois qui émanent des premiers trous se combinent avec les ondes directes des trous suivants en fonction de la séquence de tir et du temps de trajet des ondes réfléchies).

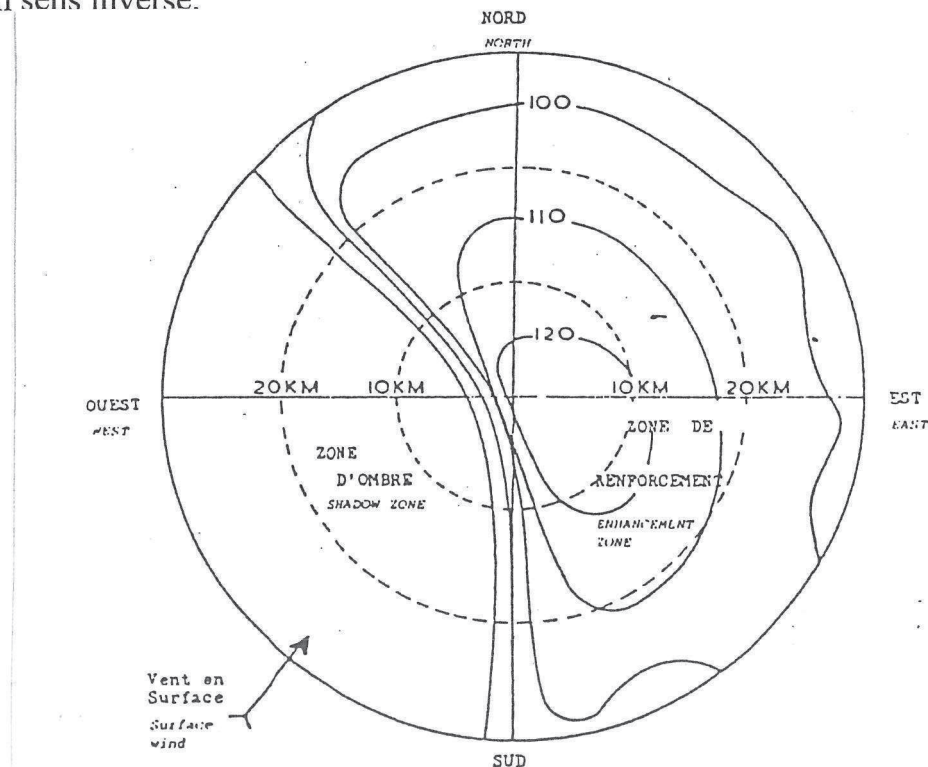
Ainsi constate-t-on régulièrement dans la pratique des variations dans un rapport de 1 à 4 dans la valeur du coefficient K sur un même site entre deux points de mesure distincts mais équidistant du tir, (soit une variation de 12 DBL sur la valeur crête de surpression exprimée en décibel linéaire).

Effet des conditions météorologiques

Les conditions météorologiques constituent également une source très importante de variation des modes de propagation de la surpression aérienne.

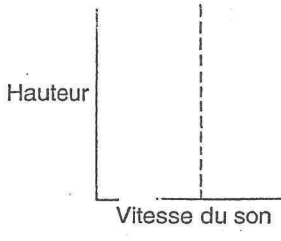
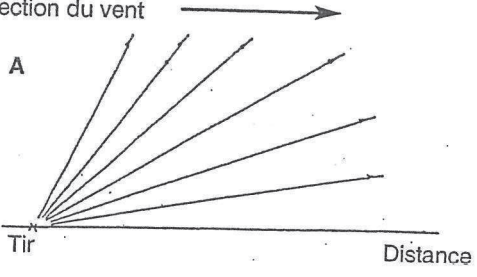
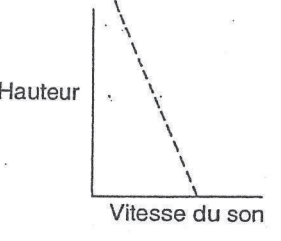
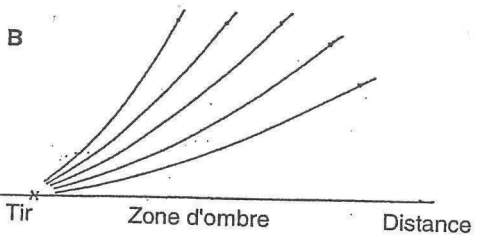
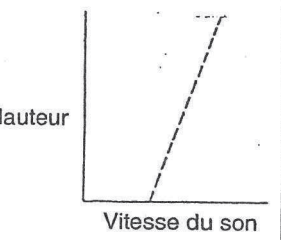
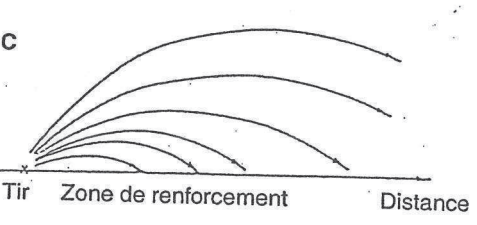
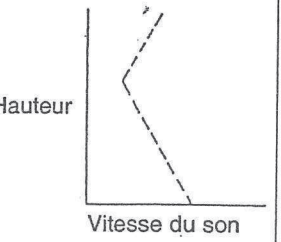
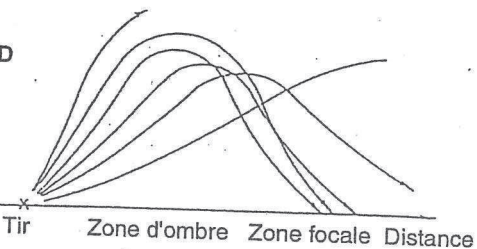
Trois éléments atmosphériques sont prépondérants :

- le vent qui provoque une anisotropie importante de la propagation en fonction de sa direction et de sa vitesse (figure 10). La surpression aérienne est renforcée dans le sens du vent proportionnellement à sa vitesse. On constate également qu'il modifie les fréquences du signal qui sont augmentées dans le sens du vent et diminuées en sens inverse.



- courbes isobares de prévision de niveau sonore en présence de vent (Explotech 1995).

Figure 11 – effet du gradient thermique de l'air sur la propagation des surpressions aériennes générées par un tir (d'après Explotech 1995)

Variation relative de la vitesse du son en fonction de l'altitude	Schéma de principe de la propagation des ondes de surpression	observations
	<p>Direction du vent →</p> <p>CAS A</p> 	<p>La température est constante avec l'altitude, la vitesse du son également. La propagation n'est perturbée que par l'effet du vent.</p>
	<p>CAS B</p> 	<p>La température diminue avec l'altitude, entraînant une baisse de la vitesse. La propagation est amplifiée dans le sens vertical et atténuée au niveau du sol.</p>
	<p>CAS C</p> 	<p>La température augmente avec l'altitude, la vitesse du son aussi. Les ondes reviennent vers le sol.</p>
	<p>CAS D</p> 	<p>La température décroît avec l'altitude puis augmente ; la vitesse du son évolue de même. C'est le cas d'une inversion classique de conditions orageuses. Les ondes convergent en un point parfois très éloigné après réflexion (zone focale).</p>

- La présence d'eau en suspension dans l'air (pluie, neige, brouillard) qui amortit l'énergie transmise par surpression aérienne. Ainsi nous avons constaté une diminution de 14 DBL sur la carrière de ROCHE EN REGNIER (43) pour un même point de mesure distant de 1000 m de deux tirs identiques réalisés pour l'un par temps sec et clair et pour l'autre lors d'un épisode neigeux important.
- La température de l'air et sa variation avec l'altitude qui va influencer la vitesse de l'onde de surpression et générer dans certains cas des phénomènes de réflexion (inversion thermique). Ces phénomènes sont illustrés par le tableau ci-joint (figure 11) et la figure 12 représentant une carte de prévision des surpressions dans le cas D de la figure 11

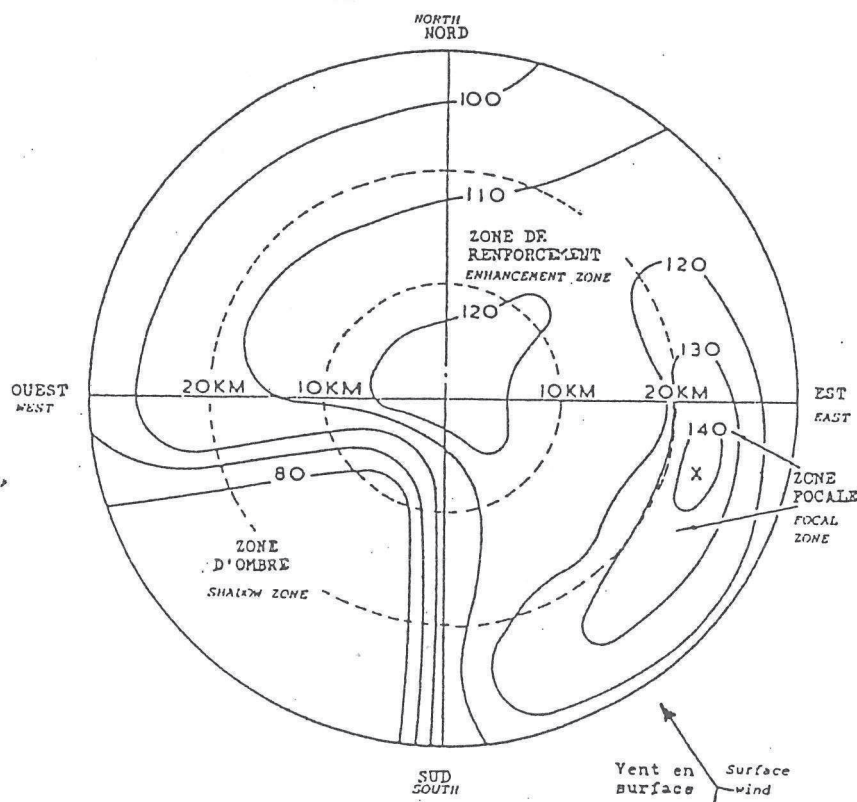


Figure 12 – Courbes isobares de prévision des surpressions associées au cas D de la figure 11 (d'après Explotech 1995).

2-4 – CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'ONDE DE SURPRESSION RESULTANTE

La lecture des chapitres précédents montre que l'onde de surpression résultante générée en un point par un tir de mine correspond à un signal très complexe, soumis à une grande variabilité, impossible à modéliser dans l'état actuel de nos connaissances.

Ce signal présente toutefois des caractéristiques propres qui permettent de le décrire, de l'identifier et de le mesurer :

- La surpression aérienne associée à un tir présente une forme dite en N identique à celle associée à un bang d'avion supersonique ou un impact de foudre, ce qui correspond à la succession d'une onde de compression puis d'une onde de dépression.

- Les fréquences de ce signal sont faibles, dans la plage 0-500 Hz soit dans le domaine des infrasons et des sons audibles les plus graves.

- L'énergie maximale transmise se situe dans les fréquences les plus basses donc les infrasons inaudibles.

- Les valeurs crêtes de surpression sont atteintes sur les composantes à plus hautes fréquences du signal.

- Le contenu fréquentiel du signal tend à s'appauvrir et se concentrer vers les infrasons lorsque la distance du point de mesure au tir augmente.

La grande variabilité de l'onde aérienne résultante est due à trois types de phénomènes qui se combinent :

- Le signal initial issu de la source que constitue le tir dépend des paramètres de dimensionnement de celui-ci et notamment du confinement de l'explosif mais en grande partie également du fonctionnement réel du tir et de la réaction du massif rocheux ainsi que des conditions réelles de mise en œuvre (déviation de forage, qualité du bourrage). Ces phénomènes agissent toutefois peu sur les fréquences principales du signal mais vont affecter plus sensiblement la valeur crête de surpression (effet canon notamment).

- Le signal initial va être rapidement affecté par l'environnement immédiat du tir (front de taille, talus définissant ainsi des directions privilégiées de propagation. La position du tir, son orientation et sa séquence d'amorçage auront donc une action forte sur l'onde résultante.

- La propagation de l'onde est très affectée par les conditions météorologiques.

3 – MESURE DE LA SURPRESSION AERIENNE

3-1 – UNITES DE MESURE UTILISES DANS LA PRATIQUE

L'unité internationale de pression est le Pascal (Pa) correspondant à la pression exercée par une force de 1 Newton sur une surface de 1 m².

On constate, dans la pratique, que les appareils de mesure utilisés sur les tirs de mine, importés pour la majorité des USA, restituent les résultats graphiques en millibar (noté Mb sur les figures précédentes) avec :

$$\text{Un millibar} = 100 \text{ Pascal}$$

Compte-tenu du domaine étendu de variation de la surpression aérienne, l'unité le plus souvent utilisé en remplacement du Pascal ou du bar est le décibel (dB), comme en acoustique défini par :

$$P_{\text{db}} = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \text{ avec :}$$

P_{dB} : pression aérienne exprimée en décibel

log : logarithme décimal

P : pression aérienne exprimée en Pascal

P_0 : pression de référence arbitrairement fixée à $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Cette valeur très faible correspond au seuil de pression audible d'un son pur de fréquence 1000 Hz.

Il convient toutefois, pour éviter des confusions d'unités notamment avec celles utilisées en acoustique de préciser que l'unité de surpression aérienne est non pondérée, c'est-à-dire qu'elle s'applique à un signal non filtré à la différence des dBa, dBb, et dBc utilisés en acoustique. Dans ce but, il paraît souhaitable d'adopter l'appellation décibel linéaire noté DBL ou parfois DBF. Cette habitude paraît s'imposer du fait de la prédominance des composantes à très basses fréquences (infrasons) dans la surpression générée par un tir, composantes étant supprimées par filtrage ou non mesurées du fait des capacités du matériel en acoustique.

Dans la pratique, on retiendra qu'une augmentation de 6 dBL correspond à un doublement de la pression.

Enfin, pour caractériser les effets de la pression aérienne vis à vis des structures et intégrer la fréquence et la durée de l'onde aérienne, on définit la notion d'impulsion I par la formule :

$$I = 20 \log \int_0^T \frac{P(t)}{P_0} dt \text{ avec :}$$

P(t) : pression aérienne en fonction du temps exprimée en Pa

P₀ : pression de référence en Pa (2 X 10⁻⁵ Pa)

log : logarithme décimal.

L'analyse fréquentielle du signal est effectuée comme pour les vibrations, par transformées de Fourier discrètes (FFT) aboutissant à un spectre représentant le signal en abscisse par sa fréquence et en ordonnée par une densité spectrale relative de puissance ou d'amplitude.

On peut noter qu'il existe une proportionnalité entre l'impulsion I et la densité spectrale de puissance. On pourra donc rechercher à caractériser de manière relative les composantes du signal les plus nocives pour les structures à travers l'examen du spectre de puissance.

3-2 – MESURAGE DE LA SURPRESSION AERIENNE

3-2-1 – Matériel de mesure

Si l'on souhaite décrire le phénomène physique associé à la surpression aérienne, le matériel de mesure doit permettre l'acquisition du signal dans le domaine des infrasons non couverts par les sonomètres classiques prévus pour la mesure du bruit audible pour l'homme.

D'après les études menées notamment par l'USBM, la surpression aérienne réelle est décrite à :

± 0,5 DB en mesurant sur la plage de fréquence 1-375 Hz,

± 30 DB en mesurant à l'aide d'un sonomètre en utilisant un filtre de type DBa, qui s'intéresse à la seule partie audible du signal.

Compte-tenu de la durée faible du phénomène à observer et de son contenu fréquentiel, la mesure s'effectue donc en DB linéaire sur la plage 1-375 Hz. Cette plage fréquentielle est compatible avec celle utilisée pour la mesure des vibrations permettant l'acquisition de ces deux phénomènes de manière synchrone sur un enregistreur unique (figure 13).

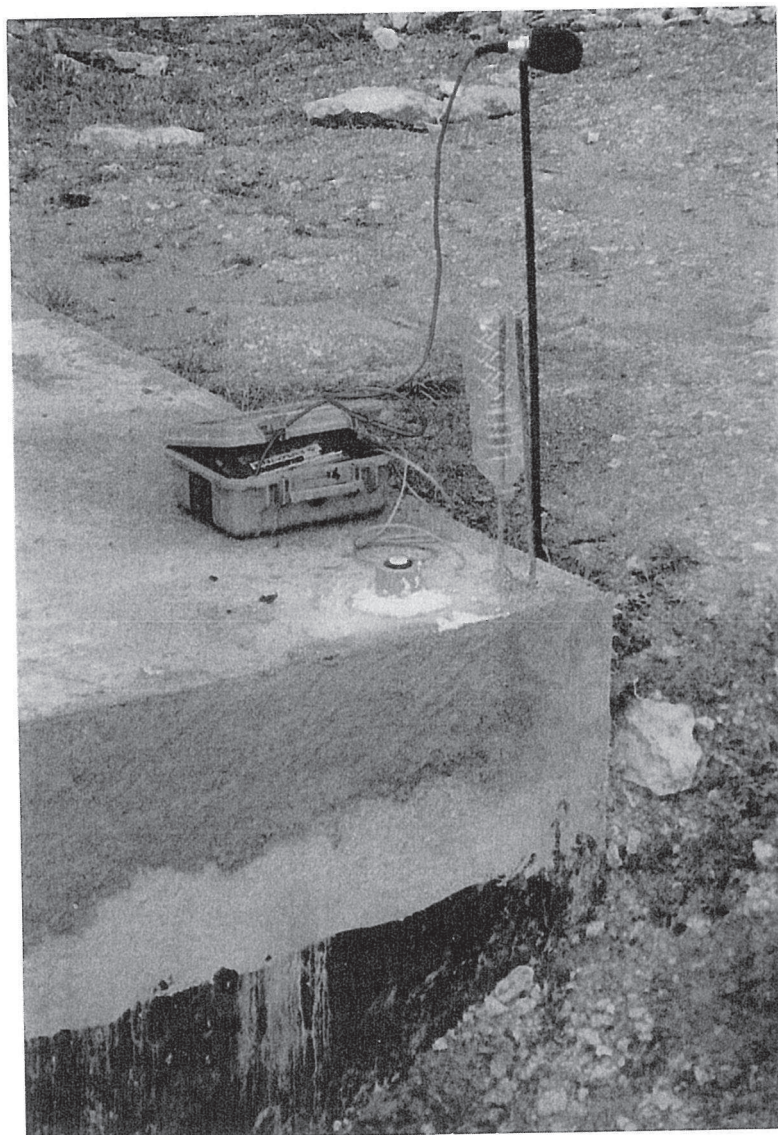


Figure 13 – Station de mesure synchrone de vibration et de surpression aérienne.

Le capteur est un microphone à membrane basse fréquence fourni généralement avec un pied de fixation d'une longueur de 1 m.

La plage de mesure utile de ces appareils varie généralement entre 100 et 150 DBL permettant de couvrir la majorité des tirs de mine courants. Il est important de noter que ces microphones ne doivent pas être utilisés à proximité immédiate des tirs (< 20 m) ou en milieu fermé (tirs souterrains), les niveaux de surpression constatés pouvant largement excéder les 150 DBL et endommager la membrane.

3-2-2 – Mode opératoire de la mesure

Il n'existe pas, à notre connaissance, de mode opératoire normalisé pour cette mesure.

La norme NFS 31-010 de décembre 1996 (caractérisation et mesure des bruits de l'environnement) exclut le domaine des infrasons et ne s'applique donc pas à ce matériel. Toutefois, elle contient des dispositions concernant le positionnement des instruments et la prise en compte des conditions météorologiques qui demeurent applicables.

Les points de mesure doivent être distants de 1,50 m à 2,00 m des parois et façades de bâtiment et d'une manière générale de tous obstacles afin de s'affranchir des effets de la « couche limite » décrit au chapitre 2-3-2. De même le microphone doit être fixé sur son pied complet (1 m) afin de ne pas être perturbé par les phénomènes de turbulence à la surface du sol.

Les paramètres d'acquisition à définir sont les même que pour la mesure de vibration :

- Fréquence d'échantillonnage et filtres anti-repliement (1024 Hz habituellement avec coupure à 375 Hz passe bas).

- Durée d'acquisition qui doit intégrer lors d'une mesure synchrone vibration-surpression aérienne, les vitesses différentes de chaque type d'onde et la durée du signal. La durée habituelle varie de 5 à 10 secondes pour un tir distant de 100 à 1500 m du point de mesure).

- Seuil de déclenchement de l'acquisition qui doit être réglé en fonction du niveau du bruit de fond et de l'amplitude attendue du phénomène à mesurer.

- Durée du « pré-trigger » permettant d'acquérir un enregistrement sur l'intervalle de temps immédiatement antérieur à la date de franchissement du seuil (habituellement 0,5 seconde).

Lors d'une mesure de surpression aérienne, et compte-tenu de la grande variabilité du phénomène, l'opérateur doit recueillir et conserver un maximum d'informations sur :

- La distance tir-récepteur et la caractérisation du site sur ce trajet (relief, végétation, bâti...).

- Le dimensionnement du tir et son orientation vis à vis des points de mesure.

- L fonctionnement du tir. Ce paramètre très subjectif, peut être approché par observation directe du tir (projections, émissions de gaz, effet canon, bruit) et de ses résultats (blocométrie, forme et étalement du tas, foisonnement).

- Les conditions météorologiques (vent, couverture nuageuse...).

La restitution des résultats doit comporter :

l'identification de la mesure (lieu, date, heure),

les informations citées ci-dessus sur le contexte du chantier,

- les paramètres d'acquisition du matériel de mesure,

- la trace temporelle enregistrée,

- le spectre de fréquence obtenu par FFT.

Lorsque des mesures sont à réaliser de manière répétée, les points instrumentés doivent être rigoureusement identiques d'une intervention à l'autre.

4- INFLUENCE DU DIMENSIONNEMENT DU TIR SUR LA SURPRESSION AERIENNE

4-1 – DONNÉES DE REFERENCE ET OBSERVATIONS PRELIMINAIRES

L'étude de l'influence des paramètres de dimensionnement du tir sur la surpression aérienne résultante développée dans ce chapitre s'appuie sur des constats réalisés sur quelques tirs de référence. Le tableau ci-après (figure 14) contient la synthèse des données utiles propres à chacun de ces tirs.

- La colonne « distance » correspond à la distance tir-point de mesure. Les notations suivantes sont utilisées dans le tableau :

- Fd : fréquence dominante extraite du spectre établi par FFT.

Fd.

- Plage de fréquence : plage de fréquence à 25% de la densité spectrale de

- K : coefficient de la loi de prédiction définie au chapitre 2-3-1.

$$P = K \left(\frac{D}{Q^{1/3}} \right)^{-1,2} \begin{cases} K_u \text{ calculé à partir de la charge unitaire du tir (8ms)} \\ K_t \text{ calculé à partir de la charge totale du tir} \end{cases}$$

- Q : charge unitaire instantanée calculée sur la base d'un intervalle minimal de temps de 8 ms.

- FDT : amorçage fond de trou.

- AL : amorçage latéral descendant.

La colonne « type de tir » contient les notations suivantes :

Aérien : explosif à l'air libre.

Cratère : tir réalisé sans front de taille classique en TP.

Gradin : tir réalisé sur un front de taille classique en carrière.

Isolé : charge mise en oeuvre dans un trou unique.

Découpage : tir comportant un chargement continu sur l'ensemble des forages (explosif en surface).

Relevage : tir réalisé dans des trous horizontaux.

SITE	SURPRESSION AERIENNE						PARAMETRES DU TIR						OBSERVATIONS		
	distance (m)	amplitude max(DBL)	Fd (Hz)	Plage de fréquence-Hz	Ku	Kt	Type de tir	Q (Kg)	Charge totale(Kg)	Volume abattu-m3	Bourrage			Amorçage	
											Hauteur-m	Nature		Type	Séquence
Monton	500	116	148	5 à 220	22000	22000	aérien	1	1	0	0	/	/	instantanée	fusée d'artifice
Millau	200	127	42	15 à 70	19600	19600	aérien	2	2	0	0	/	/	instantanée	charge aérienne
Millau	200	110	1.5	1 à 8	1020	300	cratère	24	504	1600	2.5	4/6mm	FDT	25ms	pas de projections
Trancis	62	110	25	1 à 70	890	890	isolé	1	1	0	5.6	4/6mm	FDT	instantanée	pas de projections
Trancis	150	131	33	15 à 140	11800	11800	isolé	9.5	9.5	0	4.8	4/6mm	AL	instantanée	cordeau en surface
Trancis	180	130	35	4 à 130	16800	10850	découpage	5	15	0	0	4/6mm	AL	25ms	cordeau en surface
Trancis	160	112	1.2	1 à 40	630	360	cratère	15	300	1000	2.5	cutting	AL	25ms	peu de projections
Cressy	120	124	1.2	1 à 2	2250	670	cratère	42	380	2800	2	6/10mm	FDT+AL	25ms	AL en fin de séquence
Cressy	425	122	4.5	1 à 25	6350	1920	gradin	75	1500	3800	4	6/10mm	AL	25ms	effet canon sur quelques trous
Cressy	45	126	1.2	1 à 9	810	270	gradin	50	800	2600	3	6/10mm	FDT	25ms	peu de projections
Cressy	400	112	1	1 à 8	1840	570	gradin	80	1520	3900	4	6/10mm	AL	25ms	peu de projections
Roche	780	132	38	8 à 70	98000	34900	relevage	9	60	200	0	/	AL	25ms	tir de boules de phonolites
Roche	770	106	1.5	1 à 15	2720	1080	gradin	38	380	1330	3	2/6mm	FDT	25ms	abattage seul
Roche	790	115	1.5	1 à 20	10900	2440	découpage	31	675	2350	2.3	2/6mm	FDT	8ms	abattage+découpage
Ste Mar.	160	118	1.2	1 à 20	910	310	gradin	170	2550	7800	5	6/10mm	AL	25ms	mesure à l'abri d'un merlon
Ste Mar.	350	132	6	1 à 15	11600	3930	gradin	170	2550	7800	5	6/10mm	AL	25ms	mesure face au front
Ste Mar.	400	114	1.2	1 à 6	1700	580	gradin	170	2550	7800	5	6/10mm	AL	25ms	mesure à l'arrière du front
Gumond	175	122	19	1 à 40	2500	1150	cratère	15	375	1000	2.2	4/6mm	FDT	33ms	peu de projections
Gumond	220	130	15	1 à 30	9960	3060	cratère	34	650	1750	1.5	4/6mm	FDT	8ms	tir de faible hauteur
Gumond	160	128	32	1 à 40	4700	1340	gradin	48	1100	3020	2	4/6mm	FDT	8ms	peu de projections
Gumond	150	143	15	1 à 30	28160	6720	découpage	34	1225	3960	1.5	4/6mm	FDT+AL	13ms	abattage+découpage
Monnières	480	117	1	1 à 20	5650	1530	gradin	34	884	4350	2.5	4/6mm	FDT	8ms	gradin inférieur
Monnières	420	119	2	2 à 25	6180	1870	gradin	34	680	3350	2.5	4/6mm	FDT	8ms	gradin supérieur
St Germain	260	112	20	1 à 40	2140	490	cratère	15	600	2430	2.2	2/6mm	FDT	8ms	tir de faible hauteur
Roncevaux	675	86	40	8 à 60	300	300	isolé	20	20	0	7	sable	AL	instantanée	trou unique
Roncevaux	725	109	1.5	1 à 8	5440	2470	banc	13	75	0	7.5	sable	AL	25ms	fragmentation d'un banc profond
Roncevaux	380	106	13	2 à 40	2070	630	cratère	9	180	1600	1.5	sable	FDT	25ms	peu de projections
Villieras	210	124	2	1 à 40	4730	1250	cratère	35	980	2800	2	4/6mm	FDT	8ms	projections importantes

Figure 14 – données de référence

Banc : tir destiné à fragmenter un banc profond (rapport hauteur de bourrage/charge par trou très élevé).

Le premier constat évident à la lecture du tableau est la grande amplitude de variation du coefficient K quelle que soit la définition de la charge d'explosif introduite dans la formule. Il faut toutefois noter que ce constat est influencé par le choix des tirs introduits dans cette analyse correspondant à des situations extrêmes (tirs aériens, tir de relevage). Il n'en demeure pas moins que sur un même site et dans des conditions de mesurage identiques, les variations suivantes sont constatées :

Gumond (tranchée expérimentale dans des pélites) : $\left\{ \begin{array}{l} K_u \text{ de } 2500 \text{ à } 28160 \text{ (x11)} \\ K_T \text{ de } 1150 \text{ à } 6720 \text{ (X6)} \end{array} \right. \quad (x = \text{multiplier})$

Trancis (chantier de TP dans des gneiss) :

$\left\{ \begin{array}{l} K_u \text{ de } 630 \text{ à } 16800 \text{ (X 26)} \\ K_t \text{ de } 360 \text{ à } 11800 \text{ (X 33)} \end{array} \right.$

Cressy (Carrière de basaltes)

$K_u \text{ de } 810 \text{ à } 6350 \text{ (X8)}$

$K_t \text{ de } 270 \text{ à } 1920 \text{ (X7)}$

Ces tirs se différencient par contre par leurs caractéristiques géométriques, les conditions de mise en œuvre des explosifs et le mécanisme de l'abattage qu'ils ont généré, attestant ainsi de l'influence de ces facteurs sur les surpressions aériennes induites.

L'utilisation d'une échelle logarithmique en DBL tend à masquer la variation réelle de la surpression mesurée, pour des personnes habituées à raisonner en échelle linéaire. Ainsi les valeurs extrêmes figurant dans ce tableau respectivement de 86 et 143 dB correspondent à une variation de 0,4 à 282 Pascal soit un rapport de 705.

La définition de la charge unitaire à intégrer dans la formule de prédiction reste à définir notamment en ce qui concerne l'intervalle minimal de temps permettant de considérer deux charges comme distinctes au titre des surpressions aériennes qu'elles génèrent. Pour les vibrations transmises par le sol, cet intervalle est fixé à 8 ms dans le guide technique sur la pratique du tir séquentiel (CORSS – 1997), l'expérience montrant que cette valeur est trop faible dans certains cas. Compte-tenu de la vitesse de propagation plus faible de l'onde de surpression et d'un temps d'émission au niveau du tir lui-même plus long, il paraît évident que ce délai doit être augmenté dans des proportions restant à préciser.

Ce problème ne modifie toutefois pas qualitativement les conclusions des paragraphes suivants. En effet, la comparaison des valeurs de K_u calculée avec la charge unitaire, et K_t , calculé avec la charge totale, ne montre pas de variation fondamentale dans le classement relatif des tirs. Ceci tient notamment au fait que la charge intervient à une puissance relativement faible (0,4) dans la loi de prédiction type. Nous n'utiliserons, dans la suite de ce chapitre, que les valeurs de K_u considérée comme une variable relative représentative de la nocivité des tirs en terme de surpression.

Il existe une corrélation directe entre la surpression aérienne et les projections provoquées par un tir. Les projections sont même la conséquence des surpressions aériennes qui constituent l'énergie initiale propulsant les matériaux. L'examen visuel d'un tir peut fournir des indications relatives intéressantes sur les surpressions aériennes à travers la visualisation des projections gazeuses ou solides.

Ces informations peuvent concerner la localisation d'une zone de déconfinement de l'explosif mais aussi la vitesse et la direction d'émission des gaz.

4-2 – DEFINITION DES PARAMETRES INFLUANTS

Trois facteurs fondamentaux sont identifiés :

- L'orientation du tir et son environnement qui va définir des directions privilégiées d'émission des surpressions.
- Le volume du tir et les charges d'explosif mises en œuvre qui fixent l'énergie initiale (volume total de gaz émis et volume de matériaux déplacés).
- Le confinement des charges qui va agir sur le mode d'émission de l'onde de surpression et notamment sa vitesse initiale. Ce paramètre est certainement le plus aléatoire car directement lié à la réaction du massif rocheux et du bourrage lors de la détonation des charges.

4-3 – ORIENTATION ET L'ENVIRONNEMENT DES TIRS

- Tir en gradin

La géométrie d'un tir en gradin préfigure deux directions principales d'émission des surpressions aériennes comme l'illustrent les projections et fumées blanches du tir photographié ci-après (figure 15).

La direction principale se situe face au front de taille. Elle correspond à la fois à la zone privilégiée d'émission des gaz (surface libre la plus proche) et à la zone de gonflement et de déplacement du massif abattu.

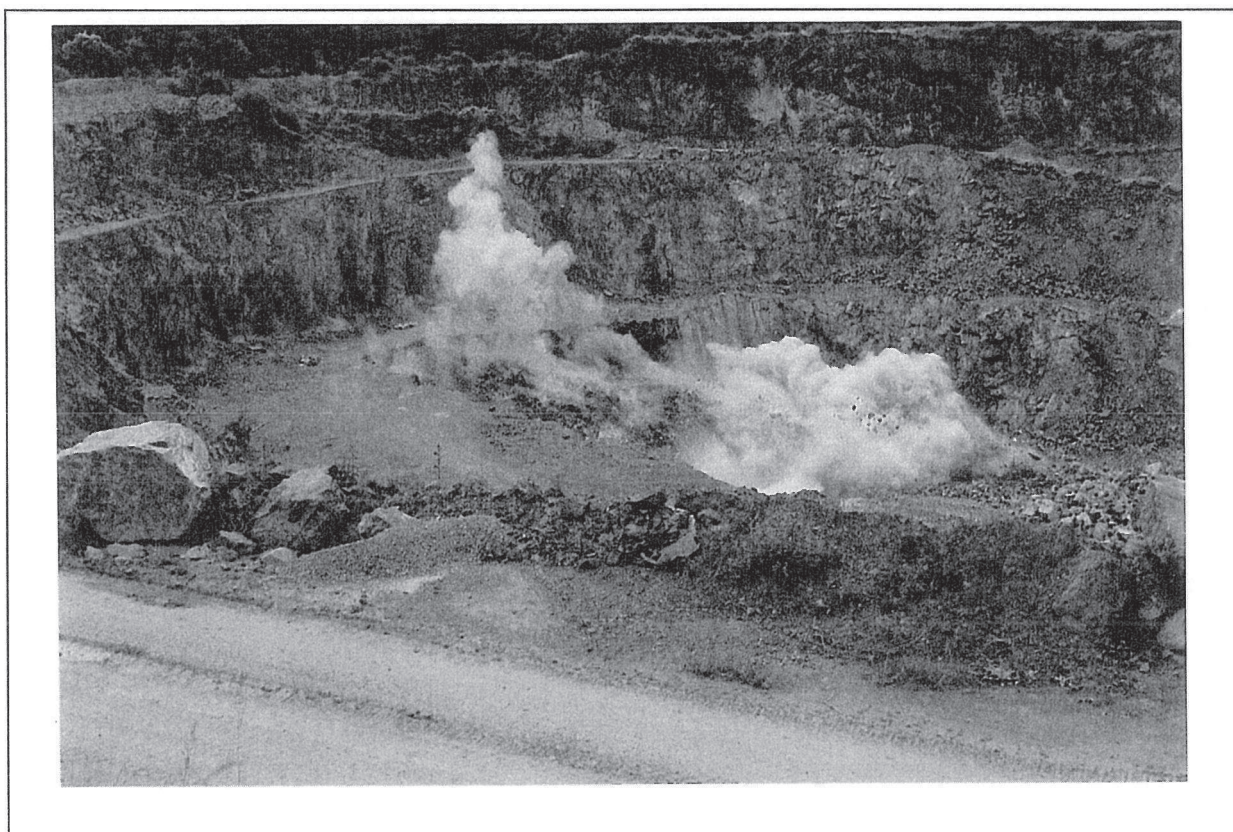


Figure 15 – Tir en gradin. Directions privilégiées d'émission des surpressions aériennes matérialisées par les fumées de tir.

La seconde se situe à l'arrière du front dans l'axe des trous de la dernière rangée. Cette composante dépend de la qualité et de la tenue du bourrage ainsi que du mode d'amorçage. En fonction de la géométrie du site, cette composante peut se réfléchir très rapidement sur le front supérieur situé à l'arrière du tir.

Cette anisotropie est illustrée dans les données de base de la figure 14 par le site de «Ste Mar », où les trois points instrumentés sur un même tir conduisent aux résultats suivants :

Capteur 1 : situé latéralement au tir séparé par un merlon $K = 910$.

Capteur 2 : situé face au front en contrebas $K = 11600$ soit $X 12$.

Capteur 3 : situé à l'arrière du front sur un point haut $K = 1700$ soit $X 2$.

L'axe nettement le plus défavorable se situe face au front. En présence de points sensibles particuliers, on pourra jouer sur l'orientation du front pour limiter la surpression dans leur direction. Il est également possible de l'atténuer en intercalant un obstacle massif à courte distance devant le tir ou devant la structure à préserver. La tendance actuelle qui préconise des exploitations en dent creuse s'avère très favorable pour limiter les surpressions aériennes.

- Tir en cratère

La géométrie d'un tir en cratère favorise une émission hémisphérique de la surpression aérienne (figure 16), les gaz étant émis verticalement (surface libre la plus proche). On constate, dans la majorité des cas que la surpression aérienne est amplifiée dans la direction de progression de la séquence de tir.

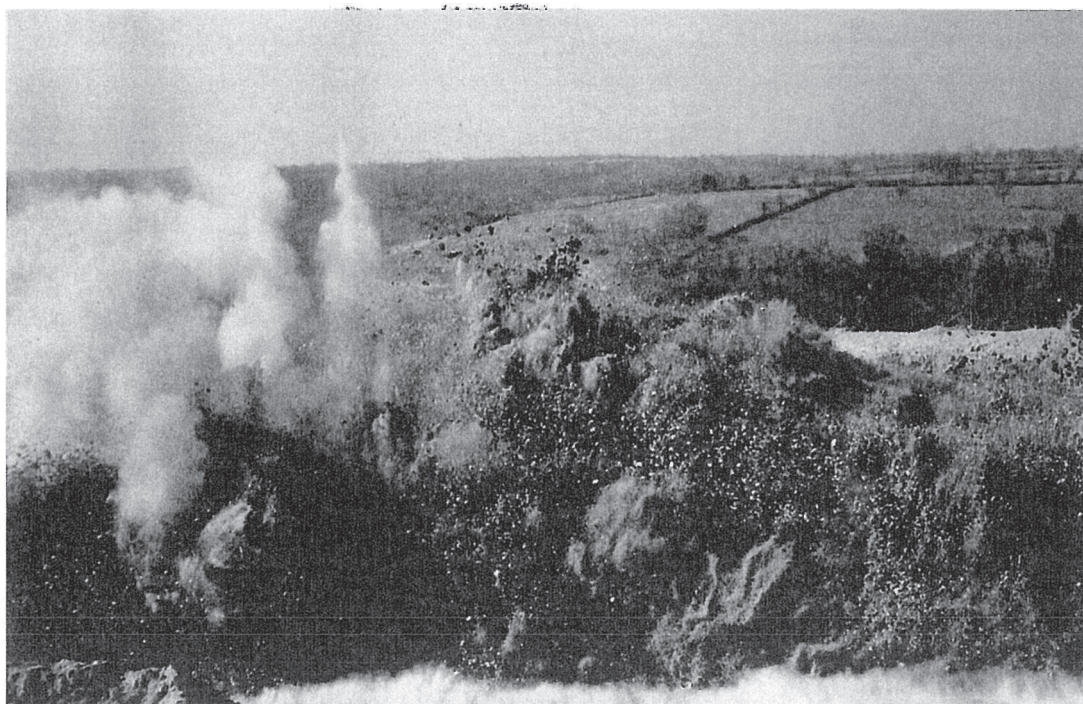


Figure 16 – tir en cratère – expansion verticale des gaz et des matériaux

La géométrie du site et notamment la présence de talus en travaux publics va favoriser la propagation en direction des zones ouvertes, soit dans l'axe des projets (parallèlement aux talus) en déblai et côté remblai en profil mixte.

- Tirs en site urbain

Les tirs en site urbain se caractérisent par des charges réduites mises en œuvre dans un environnement sensible aux vibrations comme aux surpressions et aux projections. La configuration des tirs est souvent imposée et la limitation des nuisances constitue un impératif absolu.

Dans ces conditions, il convient de mettre en œuvre des dispositions permettant de retenir les surpressions à la source, au même titre que les projections.

Dans la pratique, les tirs sont recouverts par des dispositifs divers absorbant l'énergie des gaz par leur masse et leur déformation comme illustré dans les figures 17 et 18 ci-après.

La difficulté réside dans le dimensionnement de ces dispositifs qui ne doivent pas se transformer eux-mêmes en projectiles s'ils sont sous dimensionnés.

L'exemple des figures 17 (avant tir) et 18 (après tir) correspond à l'enregistrement de la figure 6 de ce document. Le dispositif de protection mis en œuvre constitué d'une double nappe de géotextile antistatique et de bottes de paille de 50 kg en parement et 300 kg en lest s'est avéré très efficace avec une absence de projections sur le bâtiment à 1,80 m des premières charges et un coefficient K égal à 730 à 4 m du tir (microphone visible sur la figure 17).

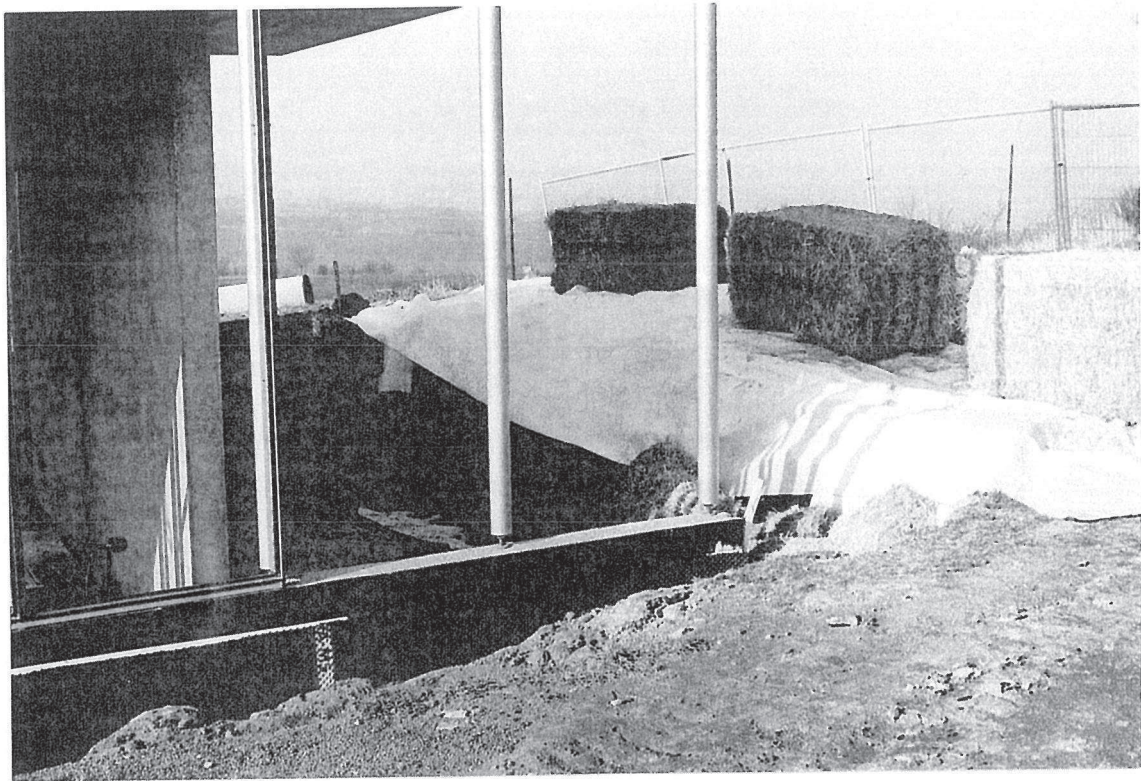


Figure 17 – Montpeyroux (63) – dispositif de protection contre les surpressions et les projections sur un tir à faible distance d'un bâtiment.

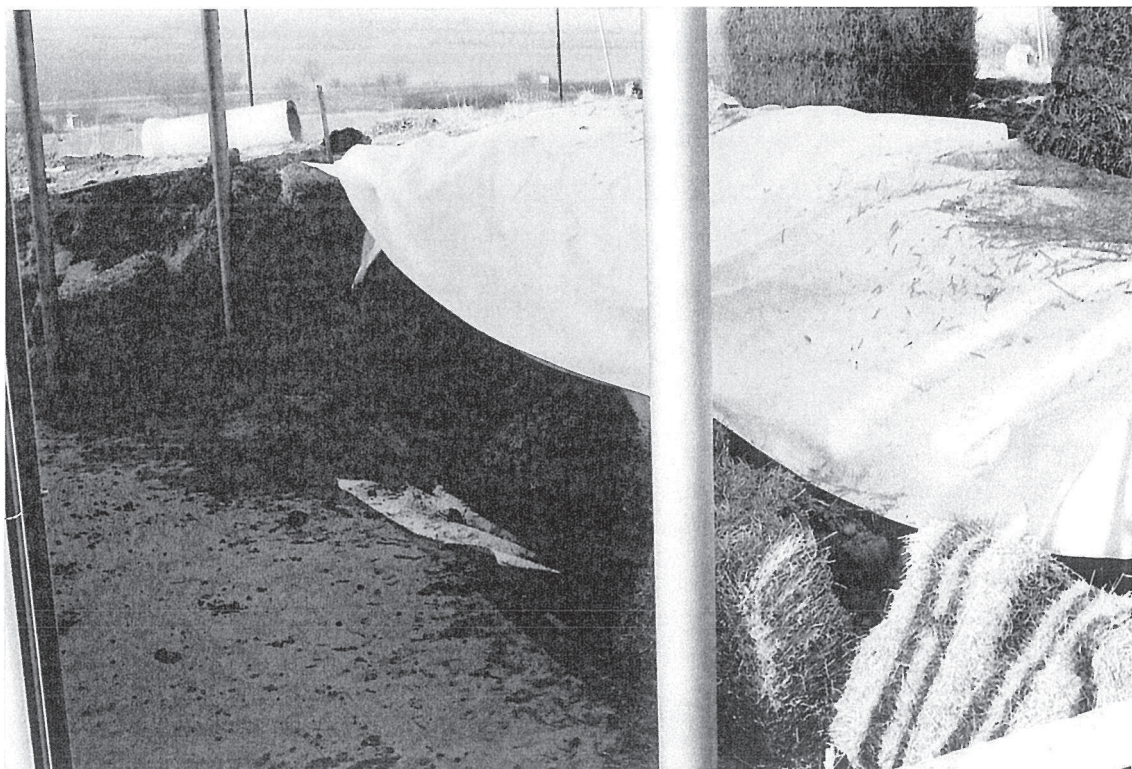


Figure 18 – Montpeyroux (63) – état du dispositif après tir

4-4 – VOLUME DU TIR ET CHARGE MISE EN ŒUVRE

- La charge unitaire

Le report des résultats des tirs de référence sur le diagramme logarithmique $D/Q^{1/3}$ - P (figure 19) à partir de la charge unitaire indique une très grande dispersion des valeurs avec une loi moyenne qui toutefois montre bien une atténuation des surpressions en fonction du rapport $D/Q^{1/3}$.

Cette dispersion indique que si la charge unitaire influe sur la surpression aérienne, elle n'est pas le facteur principal justifiant les variations constatées.

La dispersion est atténuée en séparant les tirs en fonction de leur degré de confinement (charges de surface, tirs en gradin, tir « cratère ») mais demeure toutefois sensible.

- La charge totale et le volume du tir

Ces deux paramètres sont étroitement liés et agissent de la même manière sur les surpressions.

Le report des résultats des tirs de référence sur un diagramme identique à la figure 19 utilisant la charge totale au lieu de la charge unitaire aboutit aux mêmes conclusions.

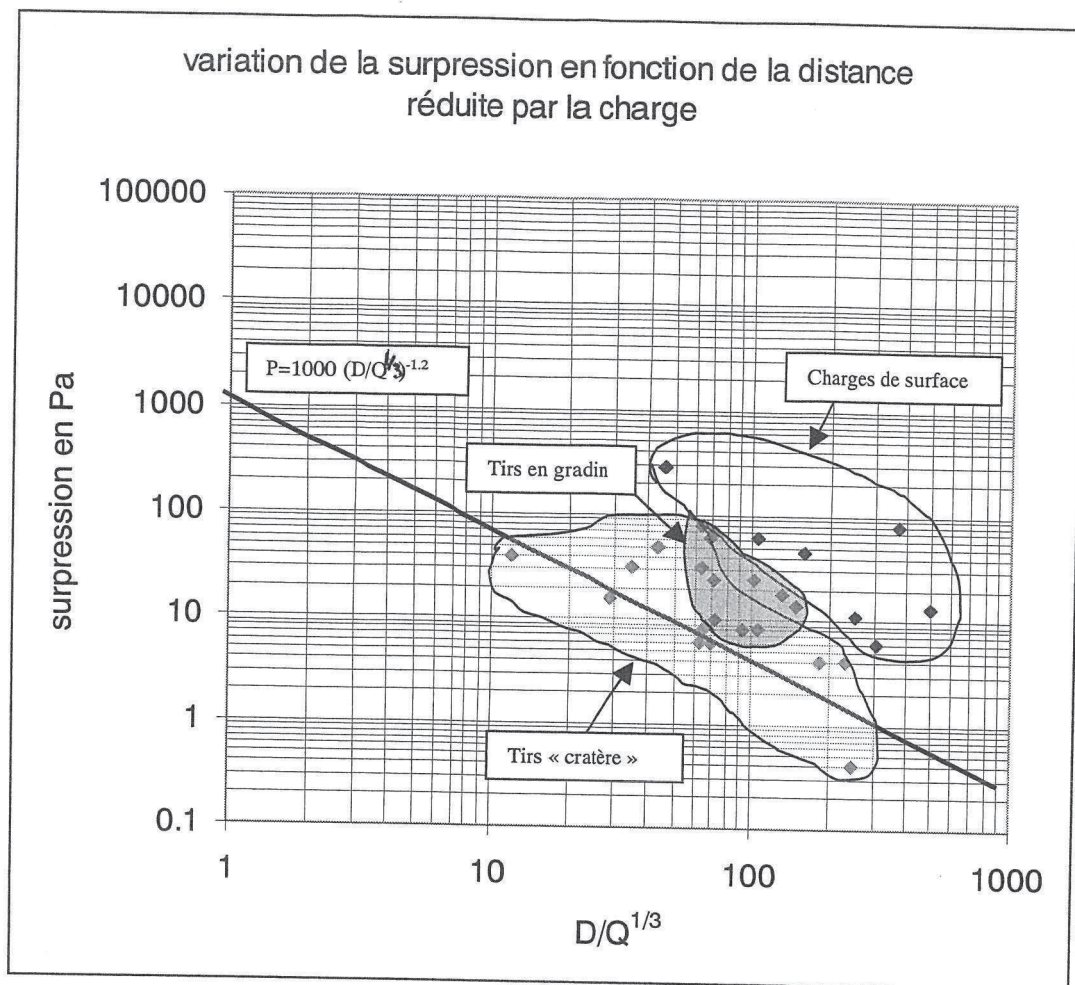


Figure 19 – Tirs de référence – relation entre surpression et la distance réduite par la charge unitaire.

On constate par contre que la fréquence dominante et la plage de fréquences privilégiées tendent à se concentrer vers les basses fréquences avec l'augmentation du volume et de la charge totale du tir. Les tirs caractérisés par un contenu fréquentiel plus large sont soit associés à un découpage, soit sujet à projections ou effet canon.

- La charge spécifique

La charge spécifique, qui correspond à la masse d'explosifs par unité de volume abattu joue un rôle important dans les surpressions induites par un tir mais de façon non linéaire.

Si la charge spécifique est trop faible (tir sous chargé), la pression exercée par l'explosif au sein du massif rocheux est insuffisante pour générer une fissuration importante et un déplacement du massif. Les gaz s'échappent alors par le point de moindre résistance constitué par le bourrage dans l'axe du trou. Ce phénomène est nommé « effet canon », le forage se comportant comme un canon de fusil (figure 20). Il se caractérise par une colonne de fumée étroite émergeant de la surface du tir indiquant l'émission dans l'atmosphère de gaz à grande vitesse. Ces phénomènes génèrent des surpressions aériennes importantes dans des plages de fréquence souvent supérieures à 10 Hz comme illustré sur la figure 7 correspondant à l'enregistrement du tir de la figure 20 (effet canon sur un trou en début de séquence à une fréquence de 9,3 Hz).



Figure 20 – Tir affecté d'un effet canon lié au sous-chargement d'un trou.

La valeur crête de la surpression aérienne est de 120 DBL sur le pic associé à ce trou, alors qu'elle n'excède pas 114 DBL sur le reste de l'enregistrement. Le spectre de fréquence reste toutefois dominé par les composantes à basse fréquence caractéristiques du volume total du tir.

Si la charge spécifique est trop forte (tir surchargé), le massif rocheux cède très rapidement et les gaz sont émis à grande vitesse provoquant des projections et des panaches de fumées (figures 22 et 23) associés à des surpressions couvrant une plage de fréquence plus large (1 à 40 Hz dans le cas de VILLIERAS dans la figure 14).

Figure 21 – Enregistrement de la surpression aérienne associée au tir de la figure 20

Tir affecté par un effet canon en début de séquence

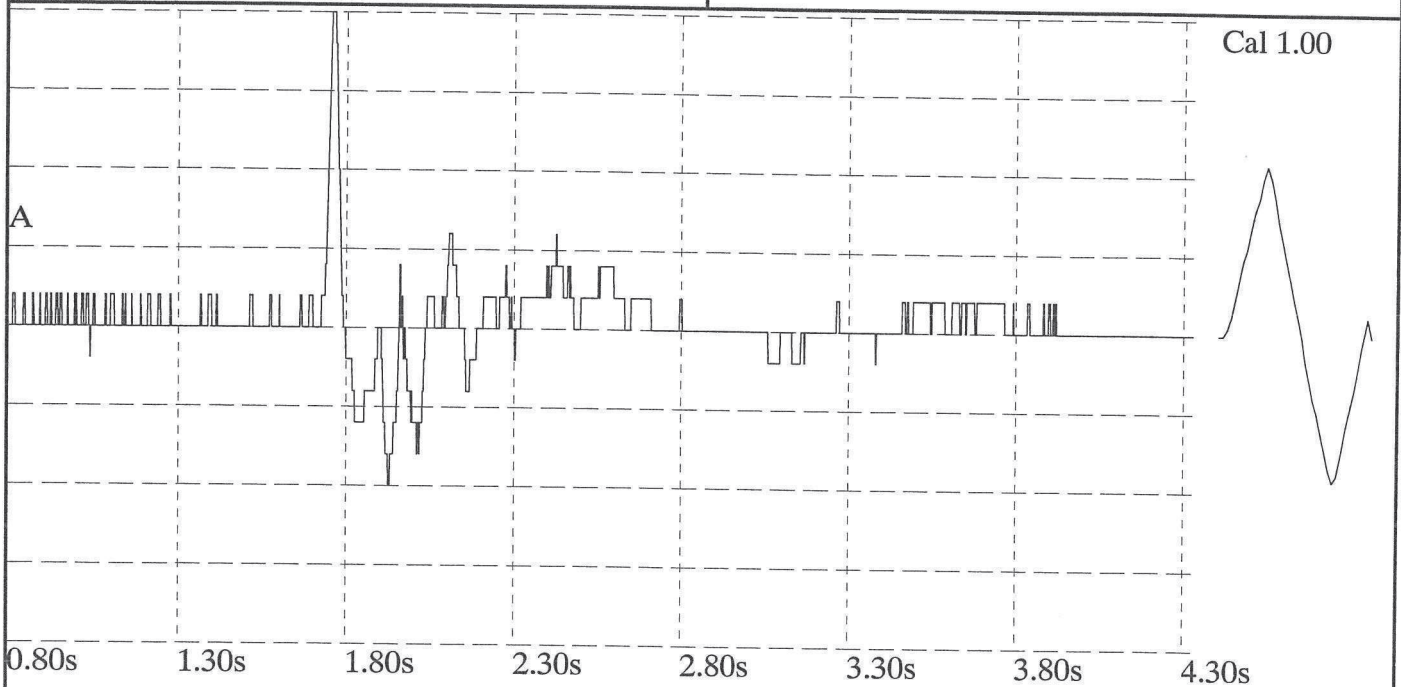
No d'epreuve: 032 Date: 11/06/01 Heure: 11:43
Trigger Son : 106 dB Trigger Sismique : 0.254 mm/s No de Serie : 356

Amplitudes and Frequences

Son: 120 dB @ 9.3 Hz.

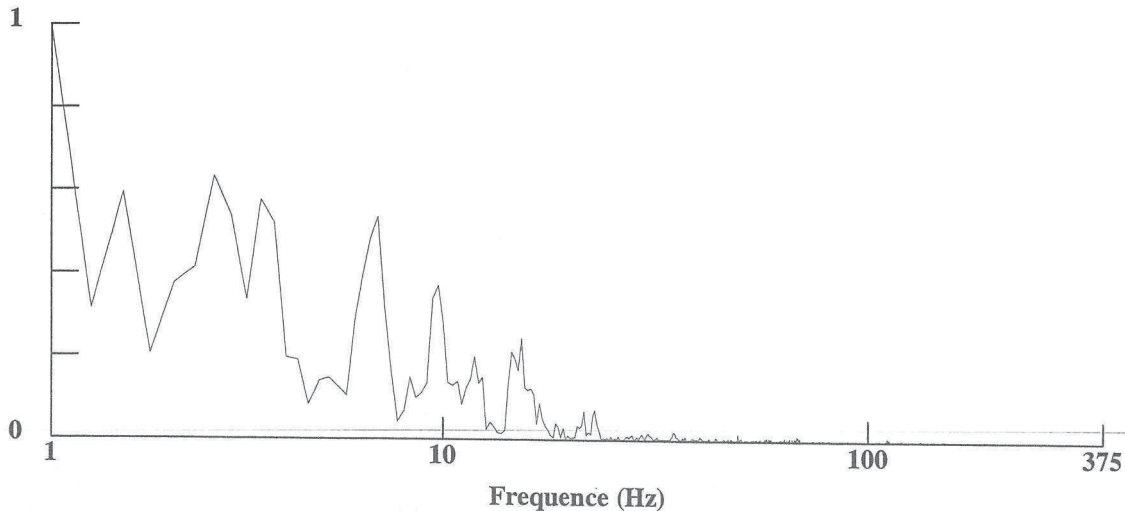
Echelles Graphes

Duree: 0.802 sec a : 4.330 sec
Son: 0.20 Mb (0.05 Mb/div)
Echelles Temps: 0.50 secondes



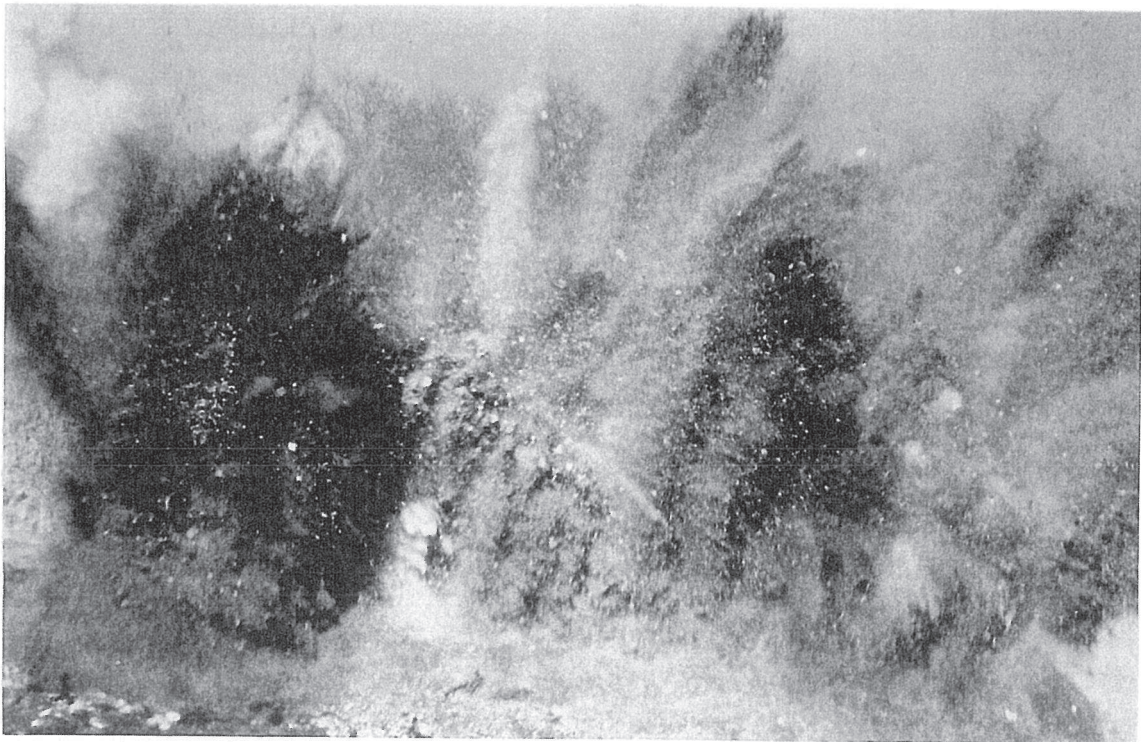
Analyse FFT (Spectre d'Energie)

Son
Max.= 1.00 Hz





Figures 22-23 – tirs surchargés provoquant une émission à grande vitesse de projections et de gaz.



La charge spécifique optimisée en terme de surpression aérienne se situe donc dans une plage intermédiaire propre à chaque matériau à abattre.

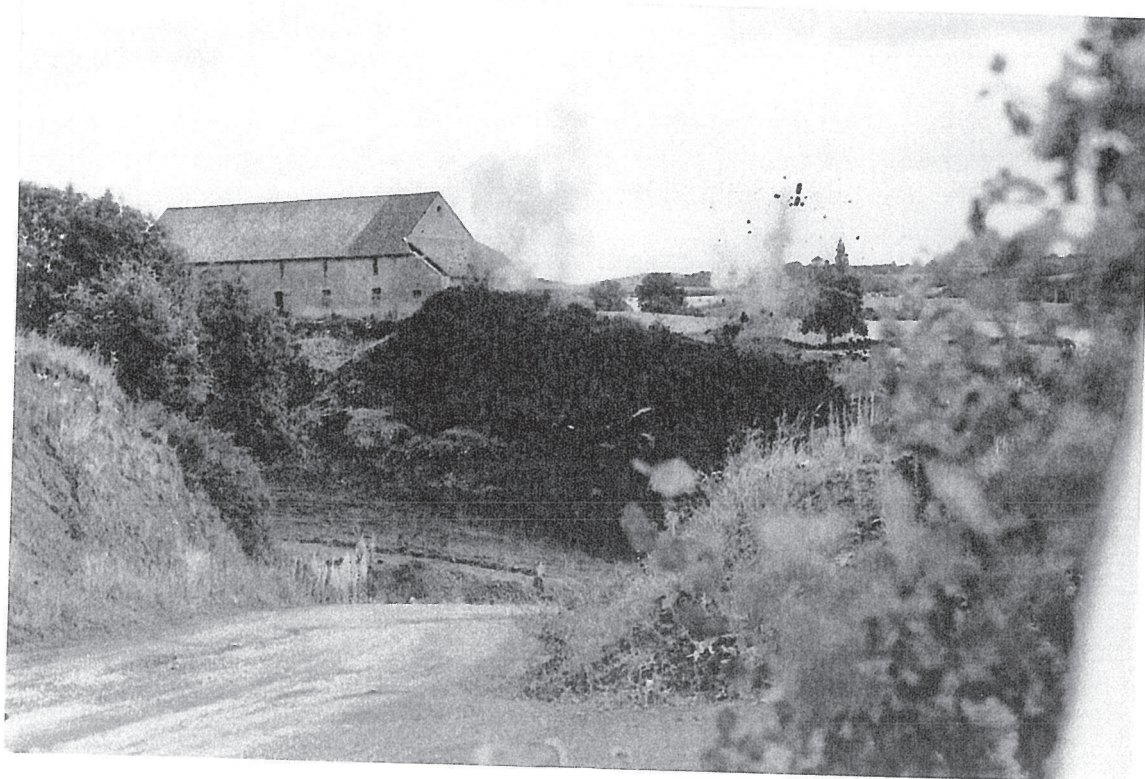
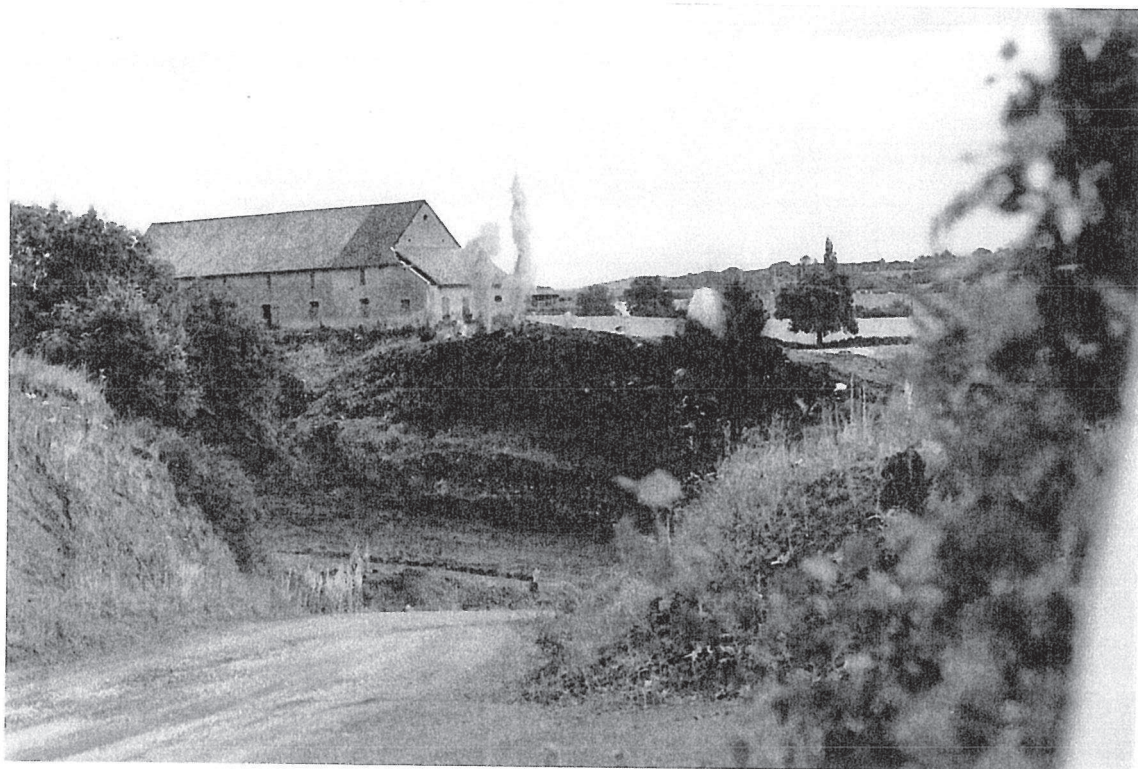
Ce paramètre peut être calé à l'échelle d'un massif mais varie de façon importante à l'échelle du trou de mine affecté des hétérogénéités de la roche, des déviations éventuelles de forage ou de problèmes de mise en œuvre des explosifs.

Ces variations de charges spécifiques réelles associées aux hétérogénéités du massif à l'échelle du trou de mine sont responsables en partie de la grande variabilité de l'amplitude de la surpression aérienne sur un même site et pour des tirs théoriquement identiques.

Les figures 24 et 25 ci-après illustrent ces variations avec dans un même tir :

- une zone sous-chargée affectée d'effet canon à gauche.
- Une zone centrale sans anomalie.
- Une zone surchargée à droite provoquant des projections sensibles.

Figures 24 et 25 : tir affecté à la fois de phénomènes de sous-chargement et de sur-chargement.



Il paraît irréaliste aujourd'hui d'envisager de faire varier la charge spécifique en fonction de la structure du massif propre à chaque trou d'une volée. Il est par contre possible dans bien des cas, optimiser le chargement d'un tir afin de diminuer les variations de charge spécifique réelle en :

- Améliorant la qualité de la foration, les erreurs d'implantation et les déviations affectant fortement la géométrie réelle des trous donc la charge spécifique.

- Mesurant la géométrie réelle de la foration et des fronts afin de moduler le chargement des trous en fonction des volumes réels à abattre.

- Suivant la foration afin de détecter d'éventuelles discontinuités importantes du massif (failles, altération, zones fracturées) et d'adapter le chargement des trous dans ces zones.

4-5 – CONFINEMENT DES CHARGES

Le confinement des charges est le paramètre qui apparaît comme fondamental en matière de surpression aérienne.

Si l'on revient sur les données de référence, on constate en effet qu'une charge de 2 kg d'explosifs en surface génère la même amplitude maximale qu'un tir en cratère comportant 35 kg de charge unitaire et une tonne de charge totale.

La surpression aérienne générée est par contre très différente en terme de durée et de contenu fréquentiel.

Plusieurs paramètres de dimensionnement du tir agissent sur le degré de confinement de la charge d'explosif qui peut elle même être constituée de plusieurs éléments présentant des niveaux de confinement très variables (cordeaux détonants par exemple).

- Profondeur, maille et hauteur de bourrage

Ces paramètres géométriques de dimensionnement d'un tir sont liés entre eux par des règles d'efficacité et de sécurité qui imposent de les faire varier de concert. Nous avons retenu dans le tableau de la figure 14 la hauteur de bourrage comme représentative de cette famille de variables.

Le diagramme de la figure 26 ci-après représente les variations du coefficient K en fonction de la hauteur de bourrage. On constate une corrélation entre ces deux variables mais avec un écart-type très important qui tient au fait que les données de référence contiennent des tirs réalisés suivant des techniques très différentes.

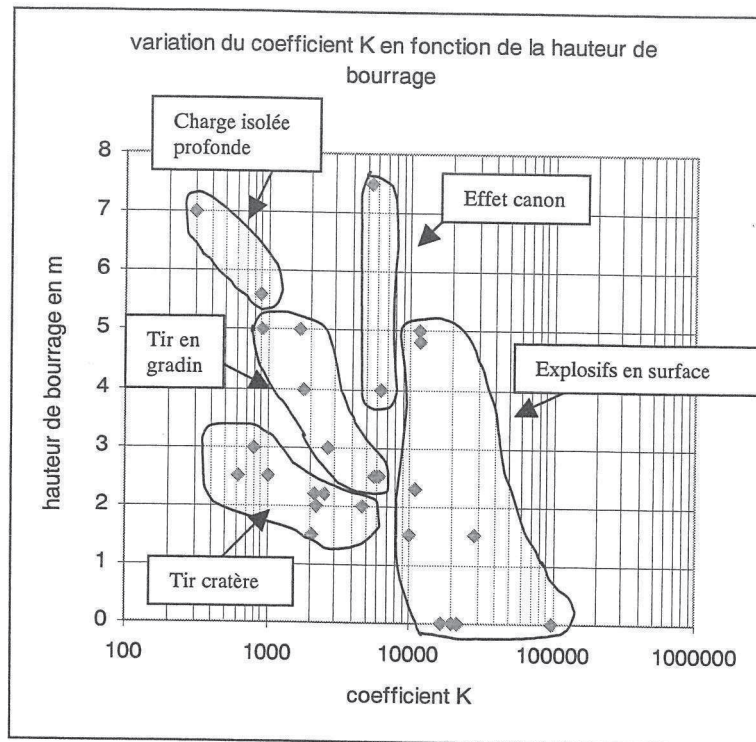


Figure 26

Si l'on regroupe les tirs par famille comme illustré sur la figure 26 on constate que :

- les tirs les plus contraignants (K maximum) correspondent à la présence d'explosifs en surface pour tout ou partie de la charge, et notamment pour les tirs comportant du découpage même associé à des trous d'abattage.

On peut en conclure que l'amplitude maximale de surpression aérienne est provoquée pour ce type de tir par le découpage, caractérisé par des charges faibles mais en sub-surface, indépendamment de l'abattage présentant des charges nettement plus élevées mais confinées. Par contre, la fréquence dominante reste faible, influencée essentiellement par les trous d'abattage.

Les tirs comportant des trous faisant canon se comportent comme les tirs de découpage (pic d'amplitude associée à l'effet canon et fréquence dominante associée au reste du tir). Le confinement des charges ne doit donc pas conduire à sous-charger le tir au risque d'aggraver la nuisance.

Les charges isolées profondes correspondent à des tirs où le volume faible de gaz émis à grande profondeur se dissipe dans le réseau de fissures du massif et est insuffisant pour expulser le bourrage.

Le nombre de surfaces libres influe nettement sur l'amplitude de la surpression aérienne. Les tirs cratère à une seule surface libre, génèrent systématiquement moins de contraintes à charge égale que les tirs en gradin à deux surfaces libres (le font de taille favorise le déconfinement de l'explosif et le déplacement du massif).

TECHNIQUES D'AMORÇAGE

L'examen des données de référence indique que l'amorçage fond de trou est moins nocif que l'amorçage latéral en terme d'amplitude maximale de la surpression aérienne.

Ce principe est clairement illustré par l'enregistrement de la figure 27 ci-après. Il s'agit d'un tir de type cratère de 42 trous identiques dans leur dimensionnement et chargement. L'amorçage a été réalisé à l'aide de 2 séries complètes de détonateurs à micro-retard 25 ms n° 0 à 20. Les seize premiers numéros (n° 0 à 15) sont en fond de trou. Les numéros 16 à 20 sont en surface fixés sur un cordeau détonant 12 g/m recouvert de 20 cm de gravettes 6/10 mm.

On distingue très nettement sur l'enregistrement les pics de surpression liés aux derniers trous amorcés en tête à haute fréquence (130 Hz) qui constituent les amplitudes maximales.

Figure 27 – Effet du mode d'amorçage sur la surpression aérienne

CRESSY tir du 03/07/01
charge unitaire: 42Kg - 21 trous
distance: 120m
amorçage fond de trous: détonateurs 0 à 15
amorçage latéral : détonateurs 16 à 20

No d'epreuve: 011 Date: 03/07/01 Heure: 12:05
Trigger Son : 112 dB Trigger Sismique : 1.524 mm/s No de Serie : 349

Amplitudes and Frequences

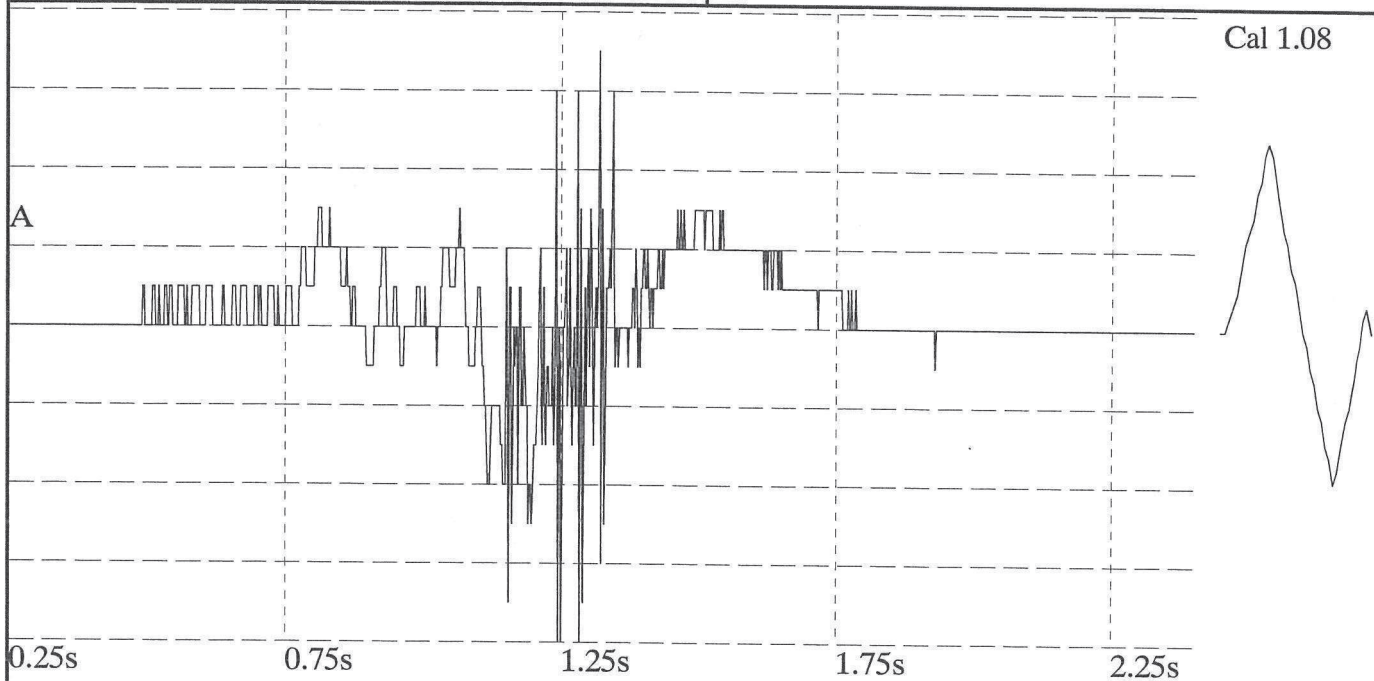
Son: 124 dB @ 128.0 Hz.

Echelles Graphes

Duree: 0.250 sec a : 2.399 sec

Son: 0.32 Mb (0.08 Mb/div)

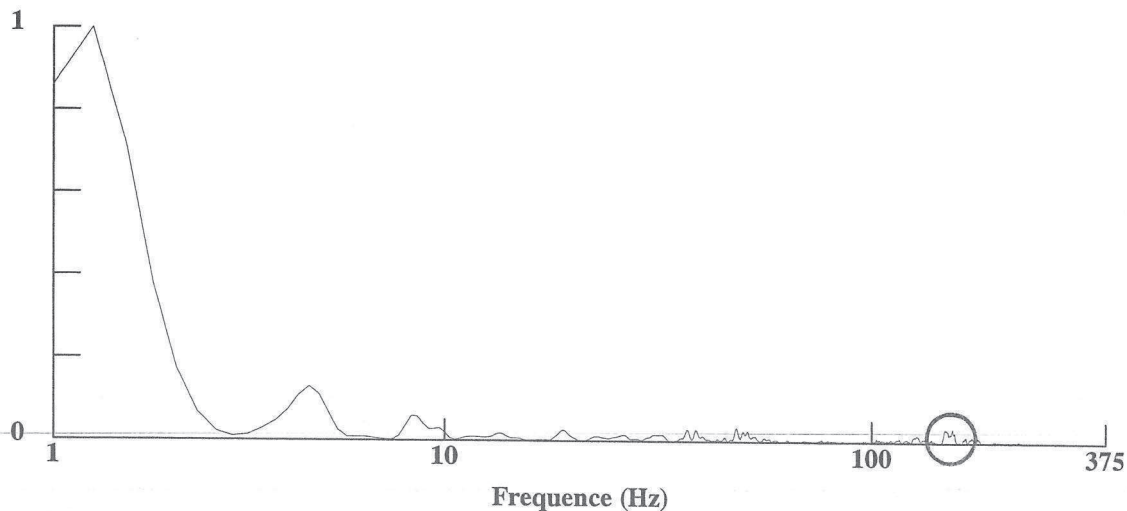
Echelles Temps: 0.50 secondes



Analyse FFT (Spectre d'Energie)

Son

Max.= 1.25 Hz



La pression maximale associée au début du tir, amorcé en fond de trou, est d'environ 16 Pa (118 DBL), la présence de cordons détonants en surface la porte à 32 Pa (124 DBL), soit un doublement de l'amplitude.

L'examen du spectre de fréquence indique par contre que l'énergie transmise se situe essentiellement dans les basses fréquences, les pics d'amplitude associés aux cordons marquant très peu le spectre d'énergie (cerclé sur la figure 27).

Cette nocivité relative de l'amorçage latérale s'explique, comme les tirs de découpage, par la présence d'explosifs en surface ou à proximité de la surface. L'amplitude maximale de surpression est provoquée par ces charges, même faibles, le spectre de fréquence restant, quant à lui, marqué par le reste du tir.

On peut également s'interroger sur l'influence du cordon détonant sur le bourrage, que l'amorçage soit descendant ou remontant. En effet, dans tous les cas, l'explosion du cordon détonant affecte le bourrage avant la charge principale d'explosif (initialement en amorçage descendant, par sa vitesse de détonation supérieure aux autres explosifs en amorçage remontant).

Le bourrage est donc soumis à l'effet des gaz émis par le cordon détonant qui le traverse et tend à l'éjecter avant qu'il ne soit atteint par le front d'onde de compression de la charge principale. Ceci se traduit par des colonnes très nettes de gaz émergeant des trous favorisant une direction préférentielle d'émission à l'arrière du tir (figure 28).



Figure 28 – débouillage des trous liés à l'amorçage latéral de sécurité (double amorçage) réalisé au cordeau détonant. A noter les panaches de gaz à grande vitesse et l'éjection du bourrage (éléments gris à la base des colonnes).

Bourrage

Le bourrage a pour vocation de freiner la vitesse d'émission des gaz du tir vers la surface et d'absorber une partie de l'énergie générée par ces gaz par travail mécanique (chocs entre éléments et frottements). Les matériaux qui le constituent doivent donc avoir un caractère anguleux et frottant et présenter un certain pourcentage de vide permettant la mise en mouvement propre de chaque élément. Les parois du forage doivent également être frottantes, ce qui n'est pas le cas lorsqu'il est tubé (figure 29). La présence d'eau dans le bourrage limite son efficacité en comblant les vides.

Dans la pratique, on constate que les meilleurs résultats sont obtenus avec des matériaux concassés élaborés suivant les classes 2/6 – 4/6 et 6/10 mm, la taille des éléments devant croître avec le diamètre du forage.

On peut également intercaler dans le bourrage des membranes concaves déformables (« plugs ») qui retardent l'éjection du bourrage en se plaquant contre la paroi du trou lorsque l'onde de compression les atteint.

Les matériaux fins, et notamment les produits de foration (« cuttings ») constituent un mauvais matériau de bourrage par le pourcentage faible de vide et la taille réduite des éléments. Ces matériaux se comportent comme un milieu continu peu consommateur d'énergie par ses mouvements internes et sujet à rupture d'ensemble brutale.

Outre sa qualité, l'efficacité du bourrage va dépendre des conditions de mise en œuvre. La figure 30 ci-après illustre une situation très défavorable susceptible de provoquer un pic de surpression de forte amplitude lié :

- A la présence du tubage à paroi lisse qui n'opposera aucune résistance par frottement à l'éjection du bourrage.
- A la présence d'un espace annulaire vide entre le tube et la paroi du trou qui constitue un point d'émission des gaz à grande vitesse.
- A la présence d'un cordeau détonant en surface.
- A la présence d'explosif en vrac (nitrate-fioul aluminisé) sur la surface du carreau traversé par le cordeau détonant qui l'amorcera à l'air libre.

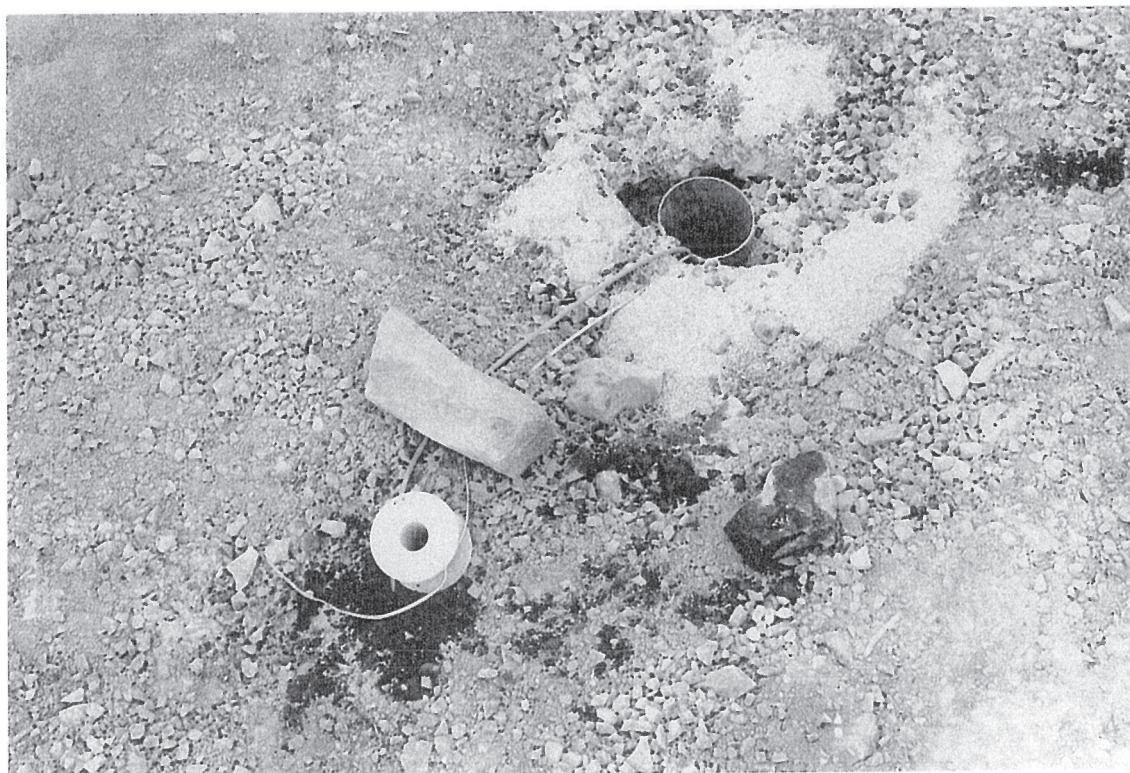


Figure 30 – Conditions de mise en œuvre d'une charge très défavorable en terme de surpression

Nous ignorons le niveau atteint lors de ce tir, l'appareil de contrôle situé à 150 m ayant saturé à 148 DBL soit 500 Pa.

La séquence de tir

La séquence de tir agit sur le confinement des différentes charges d'un tir à travers la création successive de surfaces libres autour des trous.

Un intervalle trop court entre trou va générer des phénomènes de blocage des charges arrière d'un tir et favoriser des phénomènes d'effet canon et de projections verticales.

Un intervalle trop long entre trou va générer des phénomènes de déconfinement des charges arrière et l'émission dans l'atmosphère de gaz à grande vitesse. Il favorisera également un déplacement plus important du massif.

La séquence intervient également, comme vu dans un chapitre précédent, dans la combinaison des surpressions émises par chaque charge unitaire.

4-6 – COMPARAISON VIBRATION-SURPRESSION

Les nuisances associées à un tir de mine se répartissent entre les surpressions aériennes et les projections qui sont nettement corrélées ainsi que les vibrations transmises par le sol.

Dans tous les cas ces nuisances sont générées par une énergie résiduelle non consommée en fragmentation du massif et transmise dans l'environnement.

On peut estimer que les vibrations correspondent à l'énergie de choc de l'explosif, alors que les surpressions sont plutôt associées à l'énergie des gaz du tir.

Il paraît intéressant, à ce stade, d'analyser les variations relatives de ces deux phénomènes en fonction des paramètres de dimensionnement d'un tir. Cette analyse est synthétisée dans le tableau ci-après (figure 31). Le sens des flèches indique le sens de variation des vibrations et des surpressions en fonction des valeurs croissantes du paramètres.

Paramètres du tir	Influence sur la vitesse de vibration	Influence sur l'amplitude de la surpression	Influence sur les fréquences associées à la surpression
Nombre de surfaces libres			
Maille-hauteur d'abattage			
Hauteur de bourrage			
Charge unitaire instantanée			?
Charge totale nombre de trous			
Charge spécifique			?
Intervalle minimum de temps de la séquence de tir			
Type de tir et environnement			
Tir en gradin	Émission privilégiée à l'arrière du front	émission privilégiée face au front	Fréquences basses
Tir « cratère »	Émission privilégiée dans le sens croissant de la séquence de tir	Émission privilégiée dans le sens croissant de la séquence de tir	Fréquences basses
découpage	contraignant	contraignant	Fréquences audibles
relevage	contraignant	contraignant	Fréquences audibles
pétardage	peu contraignant	contraignant	Fréquences audibles
effet canon	sans effet	contraignant	Fréquences audibles
technique d'amorçage à privilégier	Fond de trou	fond de trou	
conditions météorologiques	Sans effet	effet important	Peu d'effet

Figure 31 – Influence des paramètres de dimensionnement du tir sur les vibrations et surpressions aériennes

On constate, à la lecture de ce tableau, qu'il n'y a pas de relation directe entre l'évolution des paramètres du tir et les niveaux de vibration et surpression.

En règle générale, les modifications de plans de tir qui favorisent la fragmentation et le rendement de l'explosif sont favorables à la fois, aux vibrations et aux surpressions (charge spécifique, séquence de tir).

Au contraire, ces deux phénomènes s'opposent vis à vis des paramètres agissant sur le confinement des charges (nombre de surfaces libres, maille, hauteur d'abattage ou de bourrage).

On note enfin que la surpression aérienne est beaucoup plus sensible que les vibrations à des phénomènes extérieurs au tir (conditions météorologiques) ou à des dysfonctionnements ponctuels (effet canon, déviation de forage, discontinuité du massif), justifiant d'une plus grande variabilité pour des tirs similaires.

Ces observations nous amènent à deux constats :

- La modification d'un plan de tir dans le but de minimiser les seules vibrations conduit dans bien des cas à augmenter les niveaux de surpression aérienne.
- L'existence de plaintes ponctuelles de riverains suite à des tirs de mine paraît plus liée aux surpressions aériennes sujet à fortes variations dans des conditions de tirs identiques qu'aux vibrations, à la répétitivité mieux établie.

La prise en compte des nuisances issues d'un tir de mine doit donc comporter une réflexion sur le couple vibration-surpression intégrant les effets de ces deux phénomènes sur les structures et sur les personnes.

5 – EFFETS DE LA SURPRESSION AERIENNE

Les effets de la surpression aérienne générée par un tir de mine ne se limitent pas au simple bruit du tir facilement identifiable. La part d'énergie transmise en infrasons sollicite les structures et les personnes sans être associable à du bruit donc identifiée comme tel. Lorsque les niveaux sont très importants, le phénomène est appelé «souffle» et responsable d'effets destructeurs redoutables tels ceux subis par la ville de TOULOUSE lors de l'explosion de l'usine AZF en septembre 2001. Ces dommages sont heureusement sans proportion avec les effets que l'on peut craindre d'un tir de mine. On conçoit bien toutefois qu'il existe une progression dans ces effets, comme pour les vibrations et qu'avant les dommages se manifeste de la gêne, que les riverains n'identifient pas comme du bruit mais bien souvent comme des vibrations. Cette impression est généralement renforcée par le fait qu'en réponse à leur plainte, un contrôle des vibrations est réalisé, beaucoup plus rarement une mesure de surpression aérienne.

Le tableau de la figure 32 définit cette progression dans les effets depuis la gêne jusqu'aux dommages, avec mention de quelques références réglementaires existantes. Les valeurs indiquées sont des valeurs moyennes, des variations importantes existant en fonction des personnes et des structures.

Si l'on revient sur les tirs de référence de la figure 14, on constate que :

- un tir est imperceptible.
- 5 tirs sont sous le niveau d'apparition de plaintes.
- 14 tirs sont au-dessus du niveau de « plaintes nombreuses », soit 50 %.
- 9 tirs dépassent la valeur conseillée en France soit 30%.
- 6 tirs génèrent des vibrations sensibles des planchers.
- 1 tir dépasse le seuil de l'OMS.

La fourchette de surpression aérienne que nous avons constatée depuis 1997, sur environ 1000 mesures, varie de 84 à 148 DBL soit dans une plage variant de l'imperceptibilité aux premiers dommages.

Amplitude de la surpression aérienne		Effets constatés et seuils applicables
Décibel linéaire	Pascal	
<100	<2	Surpression imperceptible
112	8	Apparition des premières plaintes
120	20	Les plaintes deviennent nombreuses, les vitres vibrent, les lustres oscillent....
125	35	Seuil conseillé par l'arrêté du 22/09/94 (carrières)
130	63	Seuil USBM- Vibrations sensibles des planchers
135	112	Premiers dégâts superficiels (fissures de plâtre et d'enduit, déplacement de tuiles)
139	180	Seuil maximum d'exposition des personnes (OMS)
140	200	Bris des vitres les plus fragiles
170	6000	Bris de toutes les vitres

Figure 32 – Effets progressifs de la surpression aérienne

5-1 – EFFETS SUR LES STRUCTURES

L'action d'une onde de surpression sur une structure se traduit par une force dont l'intensité dépend de la pression exercée et de la surface sollicitée.

La réponse de la structure se traduit par un déplacement dont les caractéristiques dépendent de sa géométrie, de son élasticité, de sa masse. Cette réponse correspond à un régime initial d'oscillations forcées au passage de l'onde de pression, puis d'oscillations libres en phase d'amortissement.

Mécaniquement l'onde de surpression génère donc une vibration sur les structures exposées dont l'intensité dépend de la sollicitation initiale et de la réponse propre des structures.

La sollicitation initiale sera décrite par :

- la pression maximale exprimée en DBL ou en Pascal,

l'impulsion $I = 20 \log \int_0^T \frac{P(t)}{P_0} dt$ qui permet de prendre en compte l'énergie transmise, la durée du phénomène et sa fréquence.

L'acquisition de ces grandeurs passe par une mesure de surpression.

La réponse de la structure pourra quant à elle être décrite par une mesure de vibration.

Le choix du point de mesure est alors fondamental pour bien décrire le phénomène qui affecte initialement la structure par ses parois verticales alors que les vibrations transmises par le sol la sollicite à partir de ses fondations. Les deux phénomènes sont par contre identifiables, dès que le point de mesure est éloigné de la source ($\approx \frac{300 \text{ m}}{300 \text{ m}}$), leur vitesse de propagation étant différente.

Le mode opératoire de la mesure de vibration prévoit que les instrumentations soient effectuées au plus près des fondations sur un élément porteur de la structure. La quasi totalité des mesures que nous avons effectuées et qui figure dans ce document respecte ce principe. Les vibrations associées à l'onde de surpression aérienne figurant ci-après correspondent donc à la réponse des fondations sollicitées par une vibration émanant de la partie aérienne de la structure. Elles ne décrivent pas directement les phénomènes en terme de vitesse comme de fréquence sur les façades les plus exposées des bâtiments.

L'étude des vibrations associées aux surpressions en milieu de façade ou de cloison est en cours et sera traitée dans le cadre de rapports ultérieurs concernant les expérimentations sur le site de CRESSY SUR SOMME (71).

Figure 33 – Effet d'une surpression seule sur une structure

**Impact de foudre à 300m
capteur sur seuil de porte en rez de chaussée
A: surpression aérienne
R: vibration voie horizontale normale à la façade**

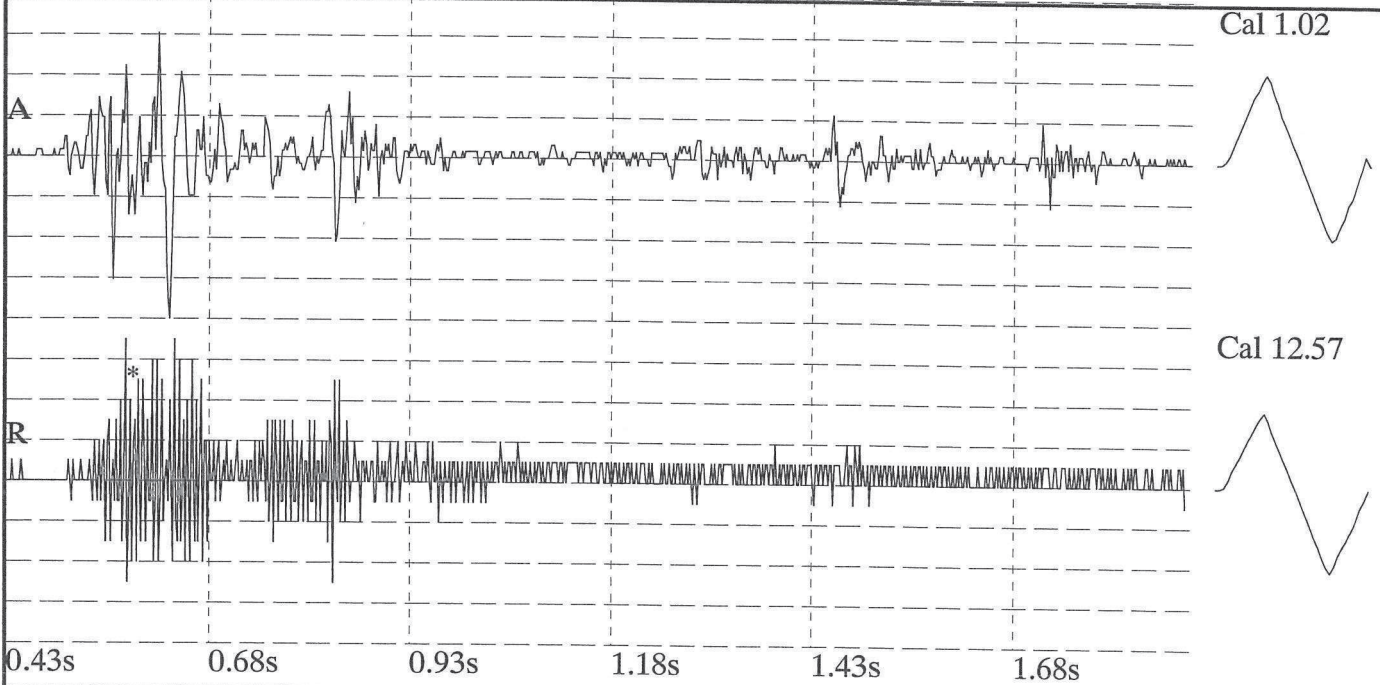
No d'epreuve: 003 Date: 30/08/00 Heure: 14:31
Trigger Son : 106 dB Trigger Sismique : 1.143 mm/s No de Serie : 356

Amplitudes and Frequences

Son: 128 dB @ 34.1 Hz.
Longi.: 0.4445 mm/s @ 170.6 Hz. (*75ms)

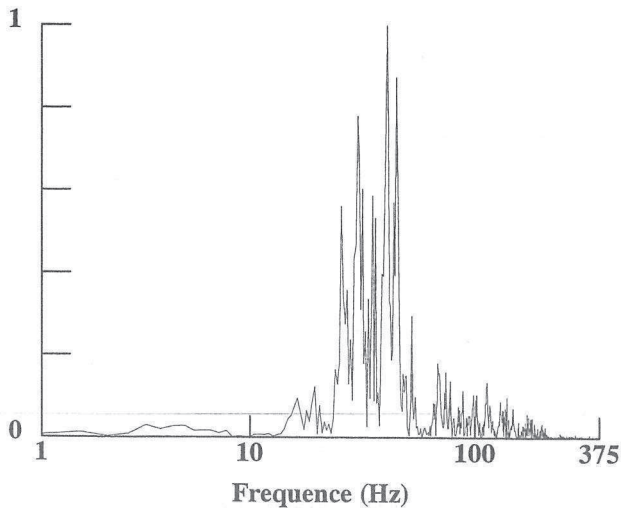
Echelles Graphes

Duree: 0.428 sec a : 1.900 sec
Son: 0.50 Mb (0.13 Mb/div)
Sismique: 0.508 mm/s (0.127 mm/s/div)
Echelles Temps: 0.25 secondes

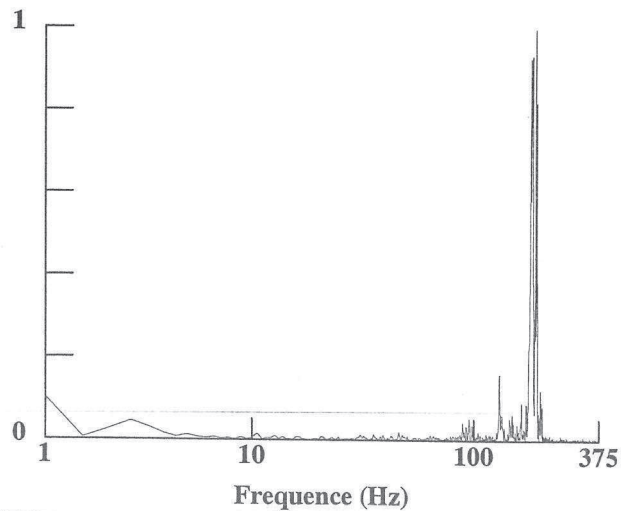


Analyse FFT (Spectre d'Energie)

Son
Max.= 39.00 Hz



Longi.
Max. = 189.50 Hz



5-1-1 – Effet d'une surpression aérienne sans vibration associée sur fondations

L'enregistrement de la figure 33 correspond aux traces et spectres de fréquence associés acquis lors d'un impact de foudre à 300 m environ du point de mesure.

La synchronisation des voies de surpression (A) et de vibration (R) permet de constater que la vibration de la structure a bien pour origine l'onde de surpression aérienne due à la foudre, et à ses échos.

Les amplitudes constatées sont à l'échelle de celles associées à un tir de mine avec 128 DBL et 0,44 mm/s.

Les fréquences des deux signaux sont par contre plus élevées que celles associées à un tir de mine. L'onde aérienne est dans la gamme des fréquences audibles (20 à 60 Hz), la vibration génère des déplacements faibles de la fondation compte-tenu des fréquences élevées constatées. Nous ignorons par contre les caractéristiques des vibrations sur les façades.

5-1-2 – Effet d'une surpression aérienne associée à une vibration sur fondation

L'enregistrement de la figure 34 correspond à un tir de trois trous de 6 m chargés de 3 kg d'émulsion encartouchée raccordées par du cordeau détonant en surface. Le niveau crête de surpression est relativement élevé (131 DBL) et à haute fréquence (73 Hz). L'enregistrement est réalisé sur le seuil d'une porte rez-de-chaussée, face au tir.

Figure 34 – Effet de surpression associée à une vibration

RD22 Pont de Fleurac 25/09/01
9.5Kg d'émulsion encartouchée répartis dans
3trous de 6m amorcés au cordeau détonant
distance 150m

No d'Epreuve: 047 Date: 25/09/01 Heure:12:00
 Trigger Son : 110 dB Trigger Sismique:0.381 mm/s No de Serie : 395

Amplitudes and Frequences

Son: 131 dB @ 73.1 Hz.
 Longi.: 1.4605 mm/s @ 32.0 Hz. (*34ms)
 Resultante: 1.8415 mm/s (36ms)

Echelles Graphes

Duree: 0.400 sec a : 1.400 sec
 Son: 0.72 Mb (0.18 Mb/div)
 Sismique:1.778 mm/s (0.4445 mm/s/div)
 Temps: 0.10 secondes

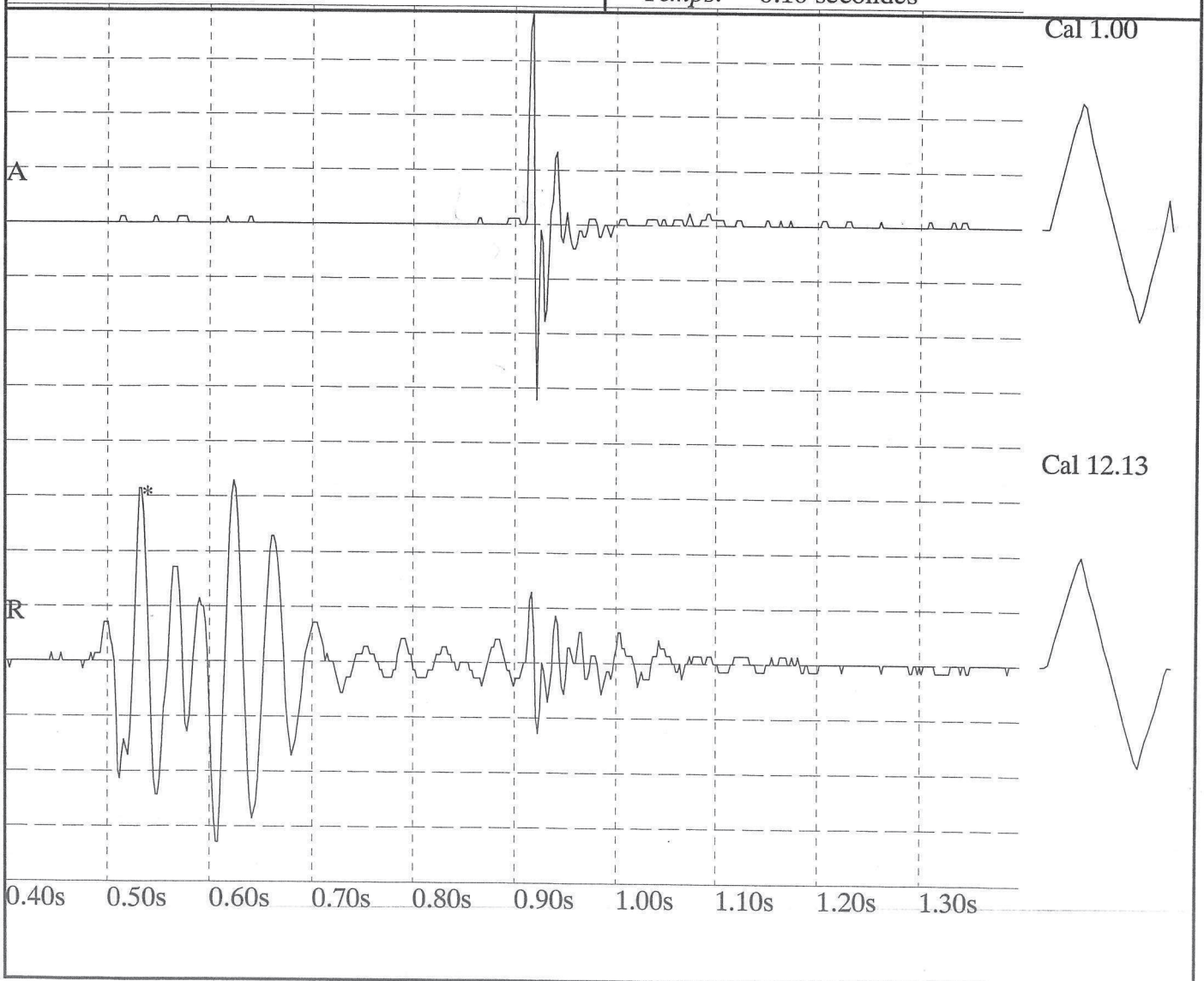


Figure 35

extrait d'enregistrement montrant l'arrivée d'une vibration synchronisée avec l'onde de surpression

A: surpression

T: vibration normale à la façade

No d'Epreuve: 312 Date: 11/10/01 Heure:15:53
Trigger Son : 142 dB Trigger Sismique:0.445 mm/s No de Serie : 1157

Amplitudes and Frequences

Son: 133 dB @ 11.3 Hz.

Transverse: 4.064 mm/s @ 19.6 Hz. (*743ms)

Resultante: 4.2863 mm/s (743ms)

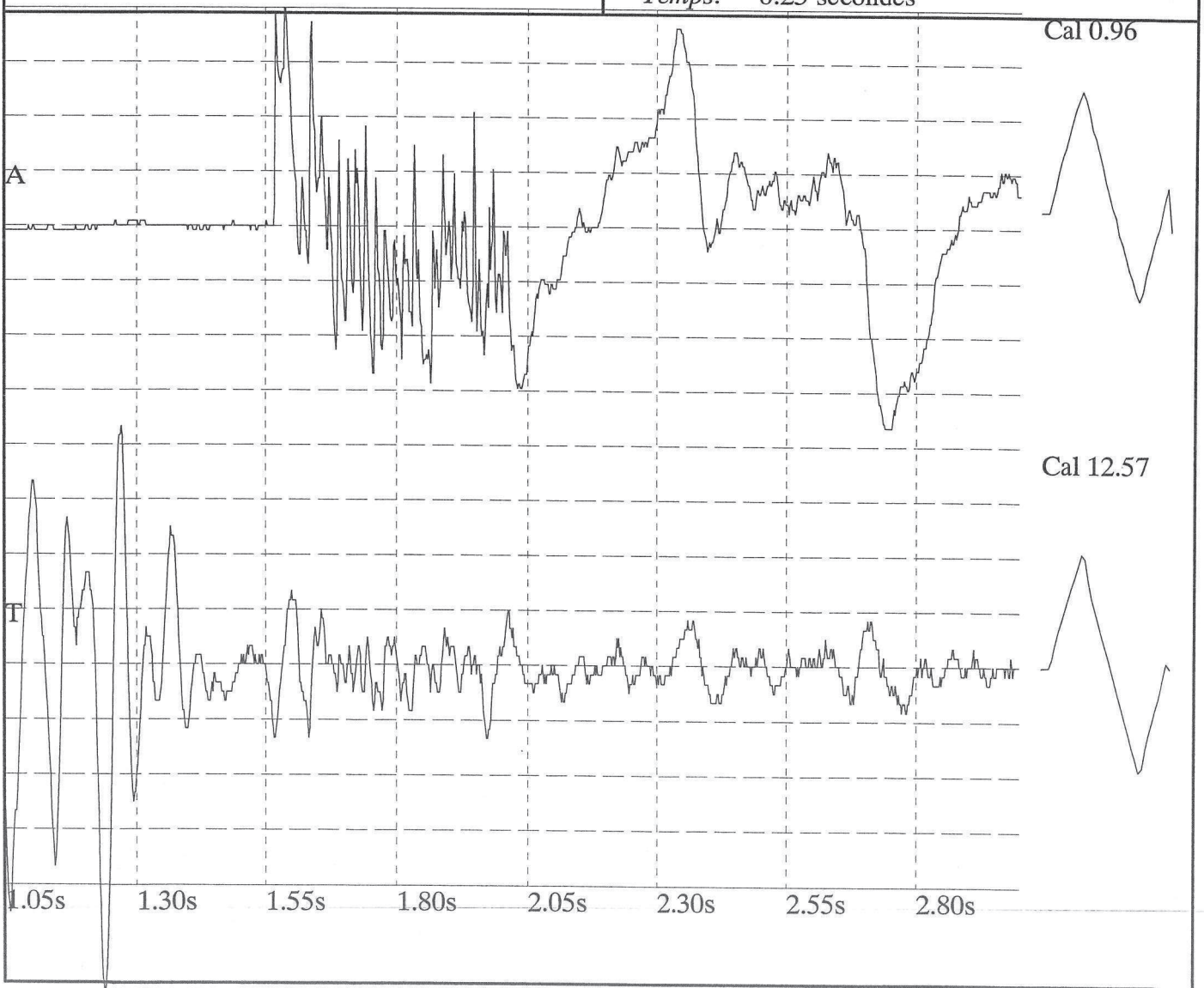
Echelles Graphes

Duree: 1.051 sec a : 3.000 sec

Son: 0.92 Mb (0.23 Mb/div)

Sismique:0.762 mm/s (0.1905 mm/s/div)

Temps: 0.25 secondes



L'enregistrement de vibration montre :

- Entre 0,5 s et 0,7 s le passage de la vibration transmise par le sol ($V = 1,4$ mm/s à une fréquence dominante de 30 Hz).
- Entre 0,7 s et 0,9 s, la phase d'amortissement de la structure à une fréquence dominante de 20 Hz qui lui est propre.
- Entre 0,9 s et 1 s le passage de la vibration générée par la surpression aérienne sur la façade ($V = 0,5$ mm/s sur la fondation) à une fréquence dominante de 70 Hz.
- Entre 1 s et 1,2 s la phase d'amortissement de la structure à une fréquence dominante de 20 Hz, identique à la précédente.

En l'absence de la mesure de surpression aérienne, on pourrait croire qu'il y a eu deux tirs espacés de 0,4 s.

Cet exemple, idéal pour décrire les vibrations associées à l'onde de surpression, n'est toutefois pas représentatif du cas général. En effet, l'importance de la surpression liée au mode d'amorçage, la relative faiblesse de la charge d'explosifs et la séquence de tir très courte amplifie le phénomène par rapport aux tirs classiques. Cet exemple est par contre représentatif de tirs peu confinés tel le découpage, le pétardage ou le relevage.

Dans une volée d'abattage moyenne, en gradin ou en cratère, on n'observe ce phénomène que de manière très atténuée à grande distance du tir. A plus courte distance (inférieure à 300 m), il ne peut être observé, l'onde vibratoire issue de la surpression se superposant avec la vibration transmise par le sol.

Dans la pratique, nous avons constaté l'existence de ce signal pour des tirs où la surpression atteint 130 DBL, comme illustré sur la figure 35 ci-après (tir de gradin de 3 tonnes de charge totale mesurée à 350 m). La vitesse maximale associée à cette vibration secondaire est de 0,25 mm/s sur la fondation, pour 4 mm/s de crête sur la vibration solidienne.

Variation de la surpression aérienne au sein de la structure

Toutes les mesures contenues dans ce qui précède ont été acquises en façade à l'extérieur des bâtiments. Nous nous sommes interrogés sur les variations de la surpression aérienne à l'intérieur de structures.

Pour étudier ce problème, nous avons instrumenté l'habitation du site expérimental de CRESSY avec :

- Un microphone M1 à 1,50 m de la façade principale au droit d'une fenêtre.
- Un microphone M2 face à la même fenêtre ouverte lors des tirs au milieu de la pièce.
- Un microphone M3 dans la pièce voisine toutes ouvertures closes (porte, fenêtre et volets).

Les résultats de ces mesures figurent dans le tableau ci-après (figure 36). La dernière ligne correspond à des mesures effectuées sur un autre site avec un microphone extérieur (M1) et un microphone à l'intérieur du bâtiment toutes ouvertures closes (M3). Les mesures sont en décibel linéaire, le pourcentage associé correspond à la variation relative de la surpression par rapport au capteur extérieur M1 en échelle linéaire.

M1 extérieur	M2 Intérieur fenêtre ouverte	M3 Intérieur fenêtre close
126	128 +30%	
122	124 +30%	
120	123 +50%	
124	118 -50%	120 -30%
125	129 +65%	129 +65%
143	135 -65%	138 -40%
112	114 +30%	117 +80%
115	117 +30%	119 +65%
118		120 +30%

Figure 36 – comparaison des surpressions en DBL mesurées à l'extérieur et à l'intérieur d'un bâtiment

On constate à la lecture de ce tableau que :

- Pour 7 tirs sur 9, les surpressions maximales sont supérieures à l'intérieur du bâtiment de 30 % en moyenne (+ 2 DBL).
- Que les surpressions sont supérieures dans la pièce où les fenêtres sont closes de 30% en moyenne (+ 2 DBL).
- Si l'on s'intéresse aux deux tirs où les surpressions sont maximales à l'extérieur, on constate que ces pics correspondent à des fréquences élevées (40 à 128 Hz) associées à des cordons détonants en surface alors que les valeurs à l'intérieur du bâtiment sont atteintes dans le domaine des infrasons. A l'inverse les autres tirs ne présentent à l'intérieur comme à l'extérieur du bâtiment que des fréquences représentatives inférieures à 10 Hz.

Les deux bâtiments concernés par ces résultats sont des constructions anciennes en pierres liées par des mortiers maigres avec des surfaces de façade face au tir de 30 à 50 m².

Nous supposons que ces résultats s'expliquent par la réponse de ce type de structure aux surpressions :

- Les composantes à haute fréquence sont absorbées et réfléchies par la structure.
- Les composantes à basses fréquences sont amplifiées au sien de la structure qui se comporte comme une caisse de résonance.

Nous n'avons à ce jour aucun résultat permettant de préciser à quel niveau de fréquence se situe la limite entre ces deux réponses ; nous ne disposons pas non plus de résultats attestant de ce type de comportement sur d'autres types de construction.

Si l'on revient sur la figure 36, on constate que sur 14 mesures acquises à l'intérieur du bâtiment :

- 2 excèdent le seuil d'apparition de premiers dégâts et de vibrations sensibles des planchers,
- 9 excèdent le seuil de plaintes nombreuses.

Les spectres de fréquence de ces enregistrements se situent par contre en quasi-totalité dans les infrasons indiquant que le bruit entendu dans les bâtiments est très faible.

Il est également important de noter que le fait de fermer les fenêtres amplifie la surpression interne dans le cas de CRESSY.

5-1-4 – Manifestations imputables à la surpression

Nous n'avons à ce jour jamais constaté de dégâts imputables incontestablement à la surpression aérienne sur les tirs que nous avons instrumentés. Les plaintes de riverains que nous avons enregistrées sont par contre souvent fondées sur des symptômes répétitifs dont l'origine nous semble provenir de la surpression.

Cette responsabilité est incontestable pour :

- les vibrations de vitrage,
- les mouvements de portes,
- les déplacements de tuile associés à l'onde de dépression,
- les oscillations de lustre et autres objets suspendus.

Elle nous paraît engagée sans qu'on puisse la dissocier de l'effet des vibrations transmises par le sol pour :

- les vibrations de cloisons minces,
- les oscillations de plancher,
- les chutes d'éléments décollés de plâtre ou d'enduit,
- les bruits de vaisselle à l'intérieur des placards et armoires ou plus généralement émanant du mobilier.

Sur ce dernier point, l'enregistrement de la figure 37 montre une surpression à fréquence audible synchrone avec l'onde de vibration solidienne. Il s'agit en fait du bruit provoqué par la mise en vibration des anneaux concentriques de fonte obstruant les ouvertures du plateau d'un vieux fourneau bouilleur situé dans la cuisine de l'habitation de CRESSY. Le microphone est situé à 1 m du fourneau au droit du linteau de la cheminée sur lequel est scellé le capteur de vibration. Cet exemple illustre à l'inverse de ceux traités aux chapitres 5-1-1 et 5-1-2 les liens existants entre vibration et surpression aérienne.

5-1-5 – Aspect réglementaire

De même qu'il n'existe pas de mode opératoire normalisé pour la surpression aérienne, on note une quasi-absence de réglementation.

Les textes applicables au bruit excluent de leur champ d'application les phénomènes impulsionnels tels que les tirs de mine.

Seule la circulaire d'application de l'arrêté du Ministère de l'Environnement du 22.09.94 préconise un seuil maximum de 125 DBL applicable aux carrières sans préciser de mode de mesure ni d'affectation à la protection des structures ou des personnes.

Figure 37 – vibration solidienne provoquant un « bruit » à l'intérieur d'une habitation

CARRIERE DE CRESSY
TIR6-03/08/01
capteur sur poutre cheminée

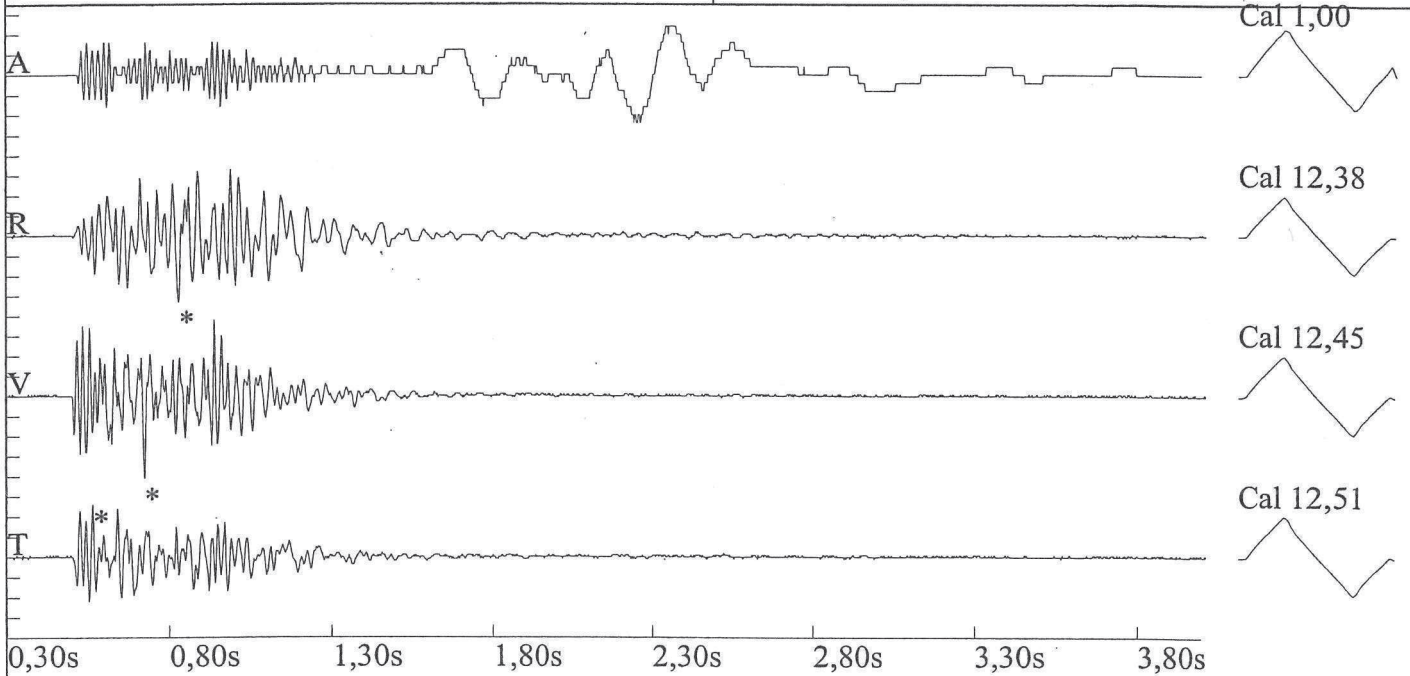
No d'epreuve: 012 Date: 03/08/01 Heure: 11:41
 Trigger Son : 110 dB Trigger Sismique : 0,318 mm/s No de Serie : 395

Amplitudes and Frequences

Son: 116 dB @ 4,7 Hz.
 Longi.: 2,159 mm/s @ 30,1 Hz. (*327ms)
 Vertical: 2,667 mm/s @ 39,3 Hz. (*218ms)
 Transverse: 1,7145 mm/s @ 46,5 Hz. (*60ms)

Echelles Graphes

Duree: 0,301 sec a : 4,002 sec
 Son: 0,20 Mb (0,05 Mb/div)
 Sismique: 2,54 mm/s (0,635 mm/s/div)
 Echelles Temps: 0,50 secondes



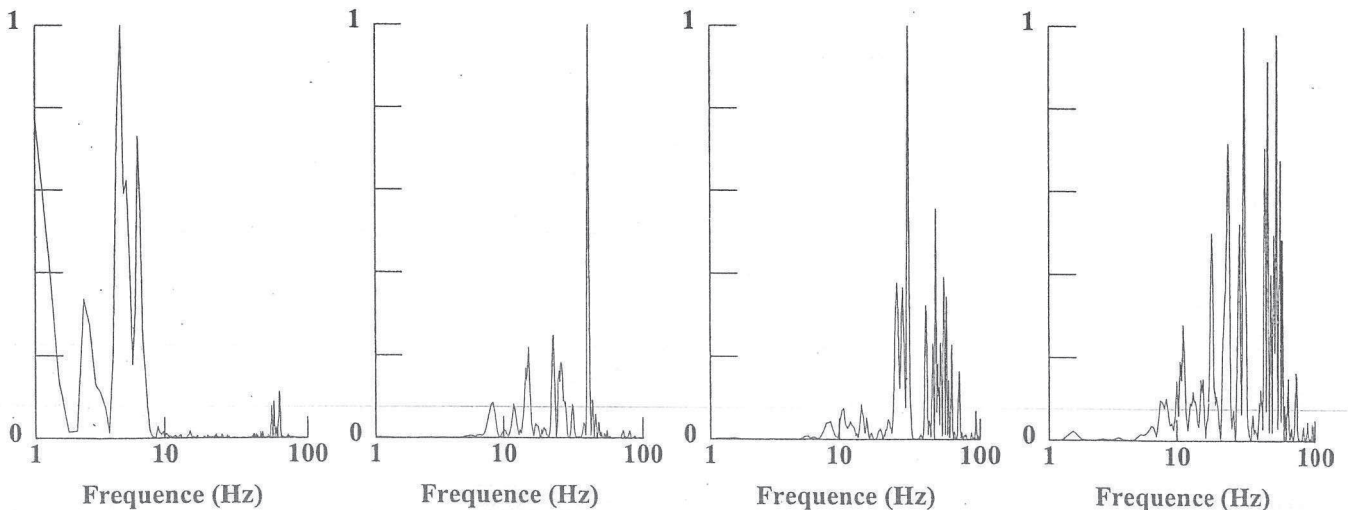
Analyse FFT (Spectre d'Energie)

Son
 Max. = 4,25 Hz

Longi.
 Max. = 39,00 Hz

Vertical
 Max. = 29,25 Hz

Transverse
 Max. = 29,25 Hz



5-2 – EFFETS SUR LES PERSONNES

L'effet d'une surpression aérienne sur une personne dépend à la fois de l'amplitude du phénomène et des fréquences qui lui sont associés. Nous ne traiterons dans ce chapitre que du domaine propre aux tirs de mine soit :

- des niveaux crête compris entre 86 et 145 dBL,
- des durées d'exposition brèves permettant de considérer les phénomènes comme impulsionnels (et à ce titre, hors champ d'application de la législation sur le bruit),
- des fréquences basses plaçant les surpressions dans le domaine des infrasons et de la partie basse fréquence de la gamme audible.

Dans ces conditions, on constate que la surpression aérienne va affecter une personne de deux manières distinctes :

- directement, à travers le bruit qui correspond à la partie audible de l'onde aérienne,
- indirectement, à travers l'effet de la surpression sur l'environnement immédiat de la personne et notamment sur la structure dans laquelle il se trouve le plus souvent.

En ce qui concerne le bruit, il constitue une gêne facilement identifiable quant à son origine. Il correspond à un paramètre très subjectif d'un individu à l'autre. Il attire l'attention sur les autres nuisances créées et rend perceptible un tir même s'il est associé à des surpressions faibles.

En ce qui concerne les effets indirects, ils sont difficilement identifiables, et la plupart du temps associés à des vibrations. La plainte qui en résulte est donc naturellement exprimée comme une vibration, et bien souvent contrôlée comme telle à l'aide d'un sismographe implanté sur les fondations ou un élément porteur de la structure comme requis par le mode opératoire de la mesure de vibration. Cette mesure ne permet pas de quantifier le phénomène réel associé à l'onde de surpression qui sollicite d'abord les éléments en élévation de la structure, ceux-ci transmettant ensuite une vibration résiduelle sur la fondation.

En terme d'amplitude, on n'atteint qu'exceptionnellement des valeurs susceptibles d'entraîner des dommages. Ces effets indirects constituent en général une gêne indissociable des vibrations transmises par le sol, si ce n'est par un décalage temporel des phénomènes.

D'un point de vue réglementaire, le caractère impulsif d'un tir de mine permet en théorie de considérer la gêne comme admissible et de fixer des valeurs maximales de vibration ou de surpression dans un but de préservation des structures.

Dans la pratique, on constate la nécessité de prendre en compte la gêne à travers :

- la législation elle-même, puisque, par exemple, l'arrêté du 22.09.94 applicable aux carrières fixe une limite pondérée en vibration de 10 mm/s pour « ...les immeubles occupés ou habités par des tiers ou affectés à toute autre activité humaine et les monuments... ». Le même texte précise ensuite « ... Pour les autres constructions, des valeurs limites plus élevées peuvent être fixées... »,
- la gestion au quotidien des exploitations et chantiers qui, pour fonctionner sur un site, doivent s'intégrer dans un environnement humain qui impose la prise en compte des plaintes.

Le traitement de cette gêne, exprimée en terme de vibration, nécessite à notre avis de raisonner à partir du couple vibration-surpression et non à partir d'un seul de ces phénomènes. La mesure de la seule vibration sur la fondation ne décrit pas la totalité des phénomènes affectant la structure. L'absence de mesure peut conduire à intégrer la plainte exprimée dans la conception des tirs en recherchant à diminuer les vibrations transmises par le sol. Ceci aura pour conséquence de déconfiner les charges et d'augmenter la surpression et les plaintes du riverain si l'origine de la gêne est en réalité liée à cette surpression.

5-3 – GENE EXPRIMEE EN FONCTION DU COUPLE VIBRATION SURPRESSION

Nous avons reporté dans le tableau ci-après (figure 38) les résultats de mesures effectuées sur différents sites associés à la réaction exprimée par les riverains. Ces résultats sont issus pour partie d'études menées par la Société Calcia et publiée dans la revue « Les Techniques de l'Industrie Minérale – Tirs – applications et implications » n° 14 – juin 2002.

Les mesures de vibration ont été enregistrées sur fondations ou éléments porteurs.

Les mesures de surpression ont été acquises à l'extérieur des bâtiments, au droit des façades faisant face aux tirs. Les réactions des riverains ont été recueillies immédiatement après les tirs, le tableau précise, lorsqu'elle est connue, la position de la personne au moment du tir.

Les données ont été triées selon l'intensité de la gêne ressentie selon cinq familles :

- imperceptible,
- perceptible,
- supportable,
- désagréable,
- insupportable.

type de tir	charge unitaire Kg	charge totale Kg	distance tir-mesures m	vibration			suppression			ressentis des riverains	situation lors du tir
				vitesse max mm/s	Fd.fréquence dominante Hz	plage de fréquence à 25% de Fd Hz	amplitude max DBL	Fd.fréquence dominante Hz	plage de fréquence à 25% de Fd Hz		
cratère	8	175	780	0.6	10	5 à 30	100	12	5 à 50	imperceptible	rez de chaussée
gradin			610	1.5	12		106			imperceptible	
cratère	9	182	675	0.5	10	3 à 20	106	13	2 à 50	imperceptible	rez de chaussée
gradin			610	3	17		110			imperceptible	
gradin			270	4.3	39		110			imperceptible	
gradin	26	647	900	0.55	75	2 à 100	110	12	1 à 40	imperceptible	1 ^{er} étage
gradin	34	1600	600	1.7	26	5 à 35	110	1	1 à 10	imperceptible	rez de chaussée
gradin			490	0.9	64		112			imperceptible	
gradin			390	0.95	18		112			imperceptible	
gradin			>660	2.5	16		112			imperceptible	
gradin			215	0.55	25		122			imperceptible	
gradin	66	2350	1325	0.4	1.1	1 à 12	106	1	1 à 8	perceptible	1 ^{er} étage
gradin	69	900	650	1.5	10	7 à 15	106	1	1 à 6	perceptible	rez de chaussée
cratère	27	600	320	0.5	14	5 à 40	110	1.5	1 à 8	perceptible	rez de chaussée
gradin	43	800	435	0.8	16	14 à 40	112	10	8 à 15	perceptible	rez de chaussée
cratère	15	600	260	0.6	7	6 à 12	112	20	1 à 30	perceptible	extérieur
découpage	31	675	900	0.2	5	2 à 15	115	1	1 à 8	perceptible	1 ^{er} étage
relevage	8	160	500	0.2	4	3 à 7	120	34	10 à 40	perceptible	rez de chaussée
gradin			820	2	11		106			supportable	
gradin	170	2900	400	5.3	10	5 à 25	114	1	1 à 18	supportable	rez de chaussée
gradin	34	1600	480	2.3	34	25 à 40	117	1	1 à 20	supportable	1 ^{er} étage
gradin	66	2350	460	0.9	1.7	1 à 30	118	1.6	1 à 10	supportable	rez de chaussée
relevage	7	140	740	0.06	80	2 à 100	119	12	8 à 50	supportable	1 ^{er} étage
cratère	15	375	175	1.3	8	7 à 15	122	19	1 à 40	supportable	1 ^{er} étage
gradin			>640	2.2	21		106			désagréable	
gradin			750	2.5	15		112			désagréable	
gradin			>1050	1.5	15		120			désagréable	
gradin	92	1200	700	0.95	15	8 à 30	123	5.7	1 à 15	désagréable	rez de chaussée
gradin	113	1700	350	1.7	20	4 à 25	125	1	1 à 12	désagréable	rez de chaussée
gradin			280	5.1	19		130			désagréable	
gradin			>650	2.4	24		122			insupportable	
gradin			>710	1.54	13		122			insupportable	
gradin			>650	1.3	18		122			insupportable	
relevage	3	60	720	0.6	8.5	2 à 100	132	40	10 à 60	insupportable	1 ^{er} étage
découpage	34	1225	150	8.8	15	6 à 100	143	15	1 à 40	insupportable	1 ^{er} étage

Figure 38 – gêne exprimée en fonction des vibrations et surpressions aériennes constatées

On peut à partir de ce tableau définir les plages de variations des phénomènes associés au tir par famille :

Imperceptible

	Vibration	Surpression
amplitude	0,5 à 4,3 mm/s	100 à 112 DBL + 1 valeur à 122 DBL
Fréquence	10 à 75 Hz	1 à 13 Hz
Plage de fréquence à 25% de la puissance spectacle de Fd	2 à 100 Hz	1 à 50 Hz

Perceptible

	Vibration	Surpression
Amplitude	0,2 à 1,5 mm/s	106 à 120 DBL
Fréquence dominante	1,1 à 16 Hz	1 à 34 Hz
Plage de fréquence à 25% de puissance spectrale de Fd	1 à 40 Hz	1 à 40 Hz

Supportable

	Vibration	Surpression
Amplitude	0,06 à 5,3 mm/s	114 à 122 DBL + 1 valeur à 106 DBL
Fréquence dominante	8 à 80 Hz	1 à 19 Hz
Plage de fréquence	1 à 100 Hz	1 à 50 Hz

Désagréable

	Vibration	Surpression
Amplitude	0,95 à 5,1 mm/s	112 à 130 dBL + 1 valeur à 106 DBL
Fréquence dominante	15 à 21 Hz	1 à 5,7 Hz
Plage de fréquence	4 à 30 Hz	1 à 15 Hz

Insupportable

	Vibration	Surpression
Amplitude	0,6 à 2,4 mm/s	122 à 143 DBL
Fréquence dominante	8 à 24 Hz	15 à 50 Hz
Plage de fréquence	2 à 100 Hz	1 à 60 Hz

On constate à l'examen de ces valeurs que :

Trois tirs sont ressentis de manière anormale par rapport aux valeurs moyennes (1 tir imperceptible avec une surpression élevée, deux tirs supportables ou désagréables avec des valeurs de vibration et de surpression faibles). Ceci traduit le caractère très subjectif de l'appréciation de la gêne qui dépend notamment de l'état psychologique de la personne et de ses sentiments vis à vis du chantier ou de l'exploitation.

Indépendamment de ces trois cas, on note une certaine imbrication entre les différentes familles liées probablement à la subjectivité précitée, avec toutefois une progression nette du sentiment de gêne en fonction du niveau de surpression.

Cette progression est moins sensible pour les vibrations, mais le raisonnement est faussé par l'échantillon des mesures. En effet, toutes les mesures de vibration restent dans une fourchette faible comprise entre 0,06 et 8,8 mm/s au-dessous des valeurs réputées comme nuisibles. Ceci découle du fait qu'il s'agit de tirs de production sur des sites où la maîtrise des vibrations a été intégrée dans les techniques de tir car préalablement étudiée ou réglementée. Les mesures de surpression ont été réalisées soit à titre expérimental soit en réponse à des plaintes dont l'origine ne pouvait pas être imputée aux seules vibrations.

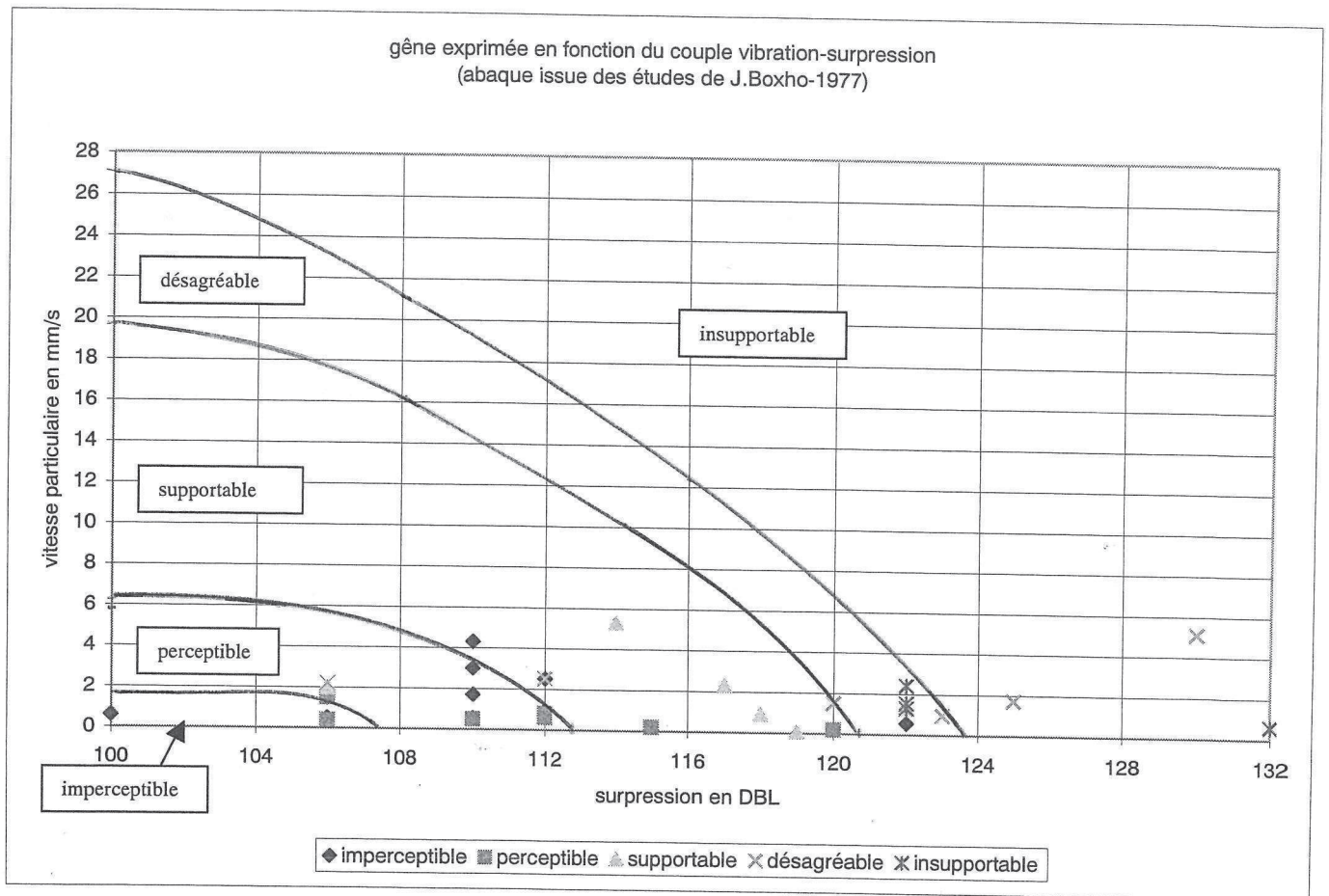


Figure 39 – abaque de Boxho (1977) avec report des mesures de la figure 38

L'examen des contenus fréquentiels permet également d'établir quelques constats :

Les familles Imperceptible et Perceptible se distinguent peu par les amplitudes, mais on constate par contre que la perception des phénomènes s'accompagne de fréquences dominantes plus basses pour les vibrations et plus élevées pour les surpressions. Les tirs jugés insupportables présentent les fréquences dominantes associées à la surpression les plus élevées, dans la gamme audible.

L'analyse réalisée ci-dessus à partir du couple vibration-surpression a été menée de manière plus générale en Belgique et a abouti à l'abaque ci-après (figure 39) proposée par J. BOXHO en 1977 (vibrations dues aux tirs-critères de dégâts) et reprise par P. BOILLAT en 1995 (« la surpression aérienne » Explotech). Nous avons reporté sur ce document les mesures issues de la figure 38.

La corrélation entre les courbes de Boxho et le résultat des mesures n'est pas parfaite pour diverses raisons :

- La subjectivité de la notion de gêne. Ces courbes correspondent à des valeurs moyennes obtenues à partir d'échantillons très dispersés.
- L'utilisation de l'abaque de Boxho étendu à des tirs actuels ne correspondant pas au contexte sociologique de l'étude de 1977, menée dans des bassins miniers belges auprès d'une population impliquée dans l'économie minière et habituée à sa présence. On constate notamment que la tolérance aux vibrations définie par cette abaque est très optimiste en regard des constats que nous pouvons faire pour les tirs actuels en France.
- La prise en compte comme paramètre unique de l'amplitude maximale de la vitesse de vibration et de la surpression. Cette abaque n'intègre pas le contenu fréquentiel des phénomènes qui joue un rôle fondamental dans la perception et les effets d'une vibration ou d'une surpression sur les personnes et les structures.

Bien que perfectible et à adapter au contexte actuel, l'utilisation d'abaques de ce type constitue une approche intéressante pour analyser l'origine de la gêne exprimée par des riverains à l'issue d'un tir. Ce type d'approche introduit la notion d'équilibre entre vibration et surpression, l'habitude actuelle étant plutôt celle du « tout vibration ». Elle conduit également à conclure qu'une vibration sera d'autant mieux tolérée que la surpression associée sera faible et réciproquement.

La position relative des points par rapport aux axes permet d'estimer le poids relatif de chaque phénomène dans le ressenti des riverains et d'orienter d'éventuelles modifications des plans de tir, dont on pourra suivre les effets en s'assurant que la diminution d'une des valeurs ne se traduit pas par une augmentation excessive de l'autre.

La définition d'abaques de référence nécessite une analyse sur un nombre de données supérieures à celui dont nous disposons à ce jour. Les principales modifications à apporter à l'abaque de Boxho concernent la prise en compte :

- Des fréquences des vibrations à travers l'utilisation de plusieurs courbes caractéristiques de plages de fréquence ou du déplacement en lieu et place de la vitesse.
- Des fréquences de la surpression et de la durée du phénomène en utilisant l'impulsion plutôt que l'amplitude.

5-4 – EFFETS DES SURPRESSIONS SUR LES ANIMAUX

Nous sommes régulièrement confrontés à des problèmes de gêne créés par des tirs à proximité d'animaux. Les situations réelles que nous avons rencontrées sont de trois ordres :

- Un effet de panique d'animaux enfermés qui se traduit par :
 - Des risques de mort par piétinement et par étouffement (pintades et poulets en Vendée, perdreaux dans l'Aveyron, porcelets dans l'Allier).
 - Des franchissements de clôture (chevreuils et moutons en Haute Vienne).
 - Une agressivité anormale entre animaux (porcs dans l'Allier ou chiens dans le Cantal).
- Une perte de production déclarée par les éleveurs suite à un chantier (élevage de poules pondeuses en Charente ou de lapins dans le Lot).
- La perturbation d'animaux sauvages protégés dans leur habitat naturel (chauve-souris en Lozère ou faucon pèlerin dans le Jura).

Jusqu'à aujourd'hui, ces problèmes ont été abordés essentiellement sous l'angle des vibrations et dans la majorité des cas à posteriori suite à des plaintes.

Dans le cas de l'élevage de perdreaux dans l'Aveyron, le problème a été étudié en amont lors de tirs d'essai instrumentés en surpression et vibration.

Nous avons constaté dans ce cadre que les animaux réagissaient de manière identique aux tirs de 2 kg d'explosifs à l'air libre et de 500 kg d'explosifs confinés. Leur réaction est apparue liée essentiellement à l'effet de surprise, plus qu'à la nature de la nuisance. Les animaux semblent d'autant plus sensibles, qu'ils sont dans un état de repos lors de l'explosion. Les réactions ont été limitées dans la pratique en les dérangeant quelques instants avant les tirs qui les surprenaient alors dans une phase d'activité plutôt qu'au repos.

La gêne ressentie par des animaux lors d'un tir nous paraît associée au couple vibration-surpression. Il faudrait également considérer pour chaque espèce la bande passante de son audition, notamment dans le domaine des basses fréquences pour imaginer ce qu'elle entend réellement lors du tir (à ce titre, on peut noter par exemple que les chiens réagissent très fortement aux explosions de fusées d'artifice).

La prise en compte de ce type de problème passe, à notre sens, par une analyse générale de la réaction des animaux et non pas uniquement par une limitation des vibrations, qui peut s'avérer inutile, voire nocive si elle conduit à augmenter les surpressions.

6 – CONCLUSIONS

La surpression aérienne générée par un tir reste un phénomène mal connu, susceptible d'une grande variabilité sur un même site en fonction de la géométrie des tirs, du mécanisme de l'abattage et des conditions météorologiques.

L'énergie transmise est essentiellement contenue dans le domaine des infrasons, inaudibles, ne permettant pas d'appréhender les effets de la surpression sur les structures et les êtres par le seul bruit du tir.

Les surpressions aériennes et les vibrations sont des phénomènes très liées par leur origine et leurs effets sur les structures qui se combinent.

Peu génératrice de dommages, la surpression aérienne apparaît comme un facteur de gêne à travers le bruit et ses effets sur les structures qui nécessitent d'être mieux connus, mais qui se traduisent en partie par des vibrations. Sa diffusion à l'intérieur des bâtiments est également mal connue.

Le traitement de la gêne exprimée lors de tirs de mine passe, à notre sens, par une étude du couple vibration-surpression en recherchant un équilibre plutôt qu'en s'attachant à minimiser un des paramètres au risque de rendre insupportable les effets de l'autre.

La réduction de la surpression aérienne passe par des adaptations des techniques de tir, qui, à la différence des vibrations, ont des incidences financières faibles. Certaines techniques de tir sont très nocives tel le pétardage, le découpage et l'amorçage latéral supérieur et d'une manière plus générale toute méthode conduisant à la présence d'explosifs, même en faible quantité, à proximité de la surface.

BIBLIOGRAPHIE

A. BLANCHIER « La surpression aérienne » - Tirs – Applications et Implications – les techniques de l'Industrie Minérale n° 141 – juin 2002.

P. BOILLAT – « La surpression aérienne » - Explotech – 1995

L. LANDAU, E. LIFCHITZ – Physique théorique, tome 6 – Mécanique des Fluides – Edition Mir 1989