

Mémoire de fin d'étude



En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

SIMULATION DES VIBRATIONS D'UN TIR DE MINES À L'AIDE DE MINESEIS

Dirigé par:

Dr. BOUMBAR Nadia

Réalisé par:

MESBAH Abdelhalim



Louanges à Dieu, le seul et unique.

à ma mère, à mon père,

à tous mes enseignants

à mes frères et à tous mes amis,

à tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

à tous ceux qui m'ont aidé à devenir ce que je suis

Je dédie ce modeste travail.



Résumé :

L'exploitation minière engendre généralement des vibrations qui peuvent être nuisibles à l'environnement immédiat de la mine il est non seulement nécessaire de réduire ce niveau de vibration mais il est aussi important de les prévoir à priori afin de satisfaire aux exigences à la fois économiques et d'environnement.

Mineseis - développé par (Yang, 1998) – initialement mis au point pour discriminer les tirs de mines des tirs nucléaires clandestins, peut-être également utilisé pour le contrôle et l'optimisation des tirs de mines.

Un des aspects importants est de montrer qu'il est important de prendre en compte l'effet des masses éjectées lors du tir, dans l'estimation de la fonction source.

Par ailleurs, la modélisation des tirs de mines à l'aide de ce programme permet non seulement d'évaluer la vitesse particulaire maximale, grandeur généralement utilisée en routine pour le contrôle des vibrations, mais également de connaître le contenu spectral du signal synthétique.

On constate également que *Mineseis* est équivalent à la méthode sismique hybride, MSH, développé par (Bernasconi; 1996) ces dernières années pour l'évaluation des risques encourus par les structures situées dans le voisinage des exploitations minières.

Mots clés : Explosifs, vibrations, MSH, *Mineseis*, sismogramme synthétique, fonction source, *Spall*

Abstract

Mining exploitation breed usually vibrations that can be harmful to the environment mine neighbourhood, that's why is not only necessary to reduce the vibrations standard but it's also prior important to predict these vibrations in order to satisfy both economics and environmental requirements.

Mineseis program, was developed initially by Yang in 1998, to discriminate the mining shooting blasts from the clandestine nuclear shooting, and later was used to control and optimize the former one.

In fact, the main aspect of this study is to show how is important to take into account the effect of the ejected masses during shooting according to the estimation of the function source.

Furthermore, modeling the mining shooting blasts by means this program enables not only to evaluate the maximum particle velocity, sizing generally used in Routine vibration monitoring, but also to know the spectrum content of the synthetic signal.

We also find that Mineseis is equivalent to Hybrid seismic method (HSM), developed recently by Bernasconi in 1996 for risk assessment incurred by the structures located in the mining exploitation vicinity.

Keywords: Explosives, vibration, MSH, *Mineseis*, synthetic seismogram, source function, Spall

تلخيص

عادة ما يتسبب الاستغلال المنجمي في اهتزازات يمكن أن تكون ضارة بالبيئة , وليس ضروريا فحسب خفض مستوى الاهتزاز ولكن أيضا المهم التنبؤ مسبقا لإستوفاء المتطلبات الاقتصادية والبيئية على حد سواء.

Mineseis –الذي وضعه (يانغ ، 1998) – في البداية وضع لتمييز التفجير المنجمي عن التفجير النووي السري, ويمكن استعماله لمراقبة وتحسين التفجيرات المنجمية.

جانب هام هو إظهار أنه من المهم أن نأخذ في الاعتبار تأثير القذائف خلال الانفجار، في تقدير وظيفة المصدر.

علاوة على ذلك ، وضع نماذج للتفجير المنجمي باستخدام هذا البرنامج يسمح ليس فقط بتقييم السرعة القصوى للجسيمات, تستخدم عادة في مراقبة الاهتزازات ، ولكن أيضا معرفة محتوى الطيفي للإشارة الاصطناعية.

نجد أيضا أن *Mineseis* يعادل الأسلوب الزلزالي الهجين ، MSH ، التي وضعه (برناسكوني، 1996) في السنوات الأخيرة لتقييم المخاطر التي تكبدها البنايات التي تقع على مقربة من مواقع التفجير.

كلمات البحث : المتفجرات ، الاهتزاز ، MSH ، *Mineseis*، تسجيل الزلزال الاصطناعي ، وظيفة المصدر ، قذيفة

SOMMAIRE :

INTRODUCTION GENERALE.....(17)

CHAPITRE 1: CONTROLE DES VIBRATIONS

I- LES TIRS DES MINES..... (19)

I-1 Introduction..... (19)

I-2 L'EXPLOSIF..... (19)

I-3 PLAN DE TIRS (24)

I-4 Optimisation de tir..... (28)

I-5 Effet du tir sur l'environnement (30)

II- CONTROLE DE VIBRATION (31)

II-1 INTRODUCTION (31)

II-2 LES ONDES SISMIQUES (31)

II-3 ATTENUATION DES ONDES SISMIQUES..... (35)

II-4 DIFFERENCE ENTRE SEISMES ET TIRS DE MINES..... (37)

II-5 CONTROLE DES VIBRATIONS..... (39)

II-6 INFLUENCE DE LA FREQUENCE..... (41)

II-7 EFFET DE LA VIBRATION SUR LES STRUCTURES ET LES GENS (45)

II-8 MODELISATION DES TIRS DE MINES : LA MODELISATION SISMIQUE HYBRIDE

(MSH) (47)

III- CONCLUSION (50)

CHAPITRE 2:MODELISATION DE TIR DE MINE: MINESEIS

I- Introduction (52)

II-Théorie élastique..... (53)

III- Théorème de représentation (54)

VI- Description des sources sismiques..... (56)

V- MineSeis (58)

V-1 Introduction..... (58)

V-2 Formulation.....	(58)
CHAPITRE 3 : LE PROGRAMME MINESEIS	
I- Introduction.....	(67)
II- Structure du programme.....	(67)
II. a. Les fichiers de Données (les fichiers Mat)	(67)
II. b. Les fichiers d'exécutables (les fichiers M)	(73)
III- Exemples d'utilisation.....	(74)
1. Exemple1	(74)
2. Exemple2	(77)
CONCLUSION GENERALE.....	(82)
ANNEXE1.....	(84)
ANNEXE2.....	(85)
BIBLIOGRAPHE.....	(88)

Table des figures

Fig. I.1 : Décomposition d'une cartouche d'explosif	(19)
Fig. I.2: régimes d'explosif.....	(21)
Fig. I.3: .a) propagation de l'onde de choc.....	(22)
.b) expansion de pression de gaz.....	(22)
Fig. I.4: Développement de la fissuration et de la fracturation	(23)
Fig. I.5 : Les différents éléments du plan de foration	(26)
Fig. I.6 : a) détonation en retard de la surface de tir.....	(27)
b) déplacement de l'énergie d'amorçage entre les trous.....	(27)
Fig. I.7 : Les différents types d'amorçage	(28)
Fig. I.8 : L'énergie d'explosifs dans le tir de mine.....	(30)
Fig. I.9 : propagation des ondes longitudinales P	(32)
Fig. I.10: propagation des ondes transversales S	(32)
Fig. I.11 : propagation des ondes de love	(34)
Fig. I.12 : propagation des ondes de Rayleigh	(34)
Fig. I.13 : les principales types d'ondes liées aux explosifs	(35)
Fig. I.14 : relations angulaires entre rayons incidents, réfléchis et transmis pour les différents types d'ondes.....	(36)
Fig. I.15 : Comparaison de la "PPV" mesurée avec celle prédite par les différents Modèles	(40)
Fig. I.16 : modélisation par une oscillation simple à un degré de liberté	(42)
Fig. I.17 : l'influence de la longueur d'onde des vibrations du sol.....	(43)
Fig. I.18: Vitesse particulière maximum admissible en fonction de la fréquence de vibrations des dynamitages	(45)
Fig. I.19: Sensibilité des humains aux vibrations verticales selon relher et melster.....	(46)
Fig. I.20 : Convolution d'une charge sur 4 trous décales de 25 ms	(48)
Fig. I.21 : Principe de modélisation sismique hybride	(48)
Fig. I.22 : principaux paramètres constituant d'un tir	(50)
Fig. II.1 : schéma montrant la convolution des différents éléments qui contribue au sismogramme.....	(52)
Fig. II.2: représentation de la réponse du milieu par la fonction de Green	(55)

Fig. II.3 : représentation du tenseur des moments	(56)
Fig. II.5: les fonctions sources : l'explosion, les composants verticaux et horizontales liées à l'effet de la masse	(61)
Fig. II.6 : représentation de l'angle entre les trous de mine	(65)
Fig. II.7 : les modèles d'un réseau de tir (rectangulaire, quinconce).....	(65)
Fig. III.1 : le panneau principal du programme (plot panel).....	(68)
Fig. III.2 : Le panneau relatif à la source explosive.....	(69)
Fig. III.3 : Le panneau relatif à la source spall.....	(70)
Fig. III.4: Le panneau de la superposition.	(71)
Fig. III.5 : Les résultats du calcul du panneau de superposition.	(72)
Fig. III.6 : Représentation graphique de la Fonction d'explosion	(74)
Fig. III.7: .a) Représentation graphique de la Fonctions spall vertical.....	(75)
.b) Représentation graphique de la Fonctions spall horizontale	(75)
Fig. III.8: .a) le sismogramme synthétique de tir unitaire (explosion).....	(76)
.b) le sismogramme synthétique de tir unitaire (explosion + spall).....	(76)
Fig. III.9: Superposition d'impulsion (trous alignés).....	(77)
Fig. III.10: .a) Superposition d'impulsion (20x17).....	(77)
.b) représentation du dispositif en quinconce de tir	(78)
.c) représentation du dispositif en rectangulaire de tir	(78)
Fig. III.11: .a) Sismogramme synthétique (trous alignés).....	(78)
Fig. III.12: .a) Sismogramme synthétique (20x17- rangée quinconce).....	(79)
.b) Sismogramme synthétique (20x17- rangée rectangulaire).....	(79)
Fig. 1 : Diagramme de Bode d'un filtre de <i>Butterworth</i> passe-bas du premier ordre	(85)
Fig. 2 : Gains de filtres de <i>Butterworth</i> passe-bas d'ordre 1 à 5 en fonction de la fréquence	(86)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Caractéristiques des explosifs	(20)
Tableau I.2 : Les dommages prévisibles sur les personnes et les biens.....	(22)
Tableau. I.3: Les vitesses des ondes P, S et les masses volumiques de divers types de terrains	(33)
Tableau. I.4 : Caractéristiques des séismes et des tirs.....	(38)
Tableau I.5: La gamme des paramètres typique des vibrations.....	(41)

Notations

Les principales notations en usage dans la mémoire sont compilées dans le tableau ci-dessous.

<i>Symbole</i>	Signification (unité s'il y a lieu)
δ	Fonction de Dirac
δ_{ij}	Symbole de Kronecker
$\lambda,$	Coefficients de Lamé (Pa)
ρ	Masse volumique (kg.m^{-3})
σ_{ij}	Composantes du tenseur des contraintes de Cauchy
σ_0	Amplitude de la force ponctuelle appliquée à la surface libre
∂_i	Dérivée partielle par rapport à x_i
∂_t	Dérivée partielle par rapport au temps
μ	Module de rigidité ou de cisaillement [Pa]
V_P	Vitesse des ondes longitudinales (m.s^{-1})
V_S	Vitesse des ondes de cisaillement (m.s^{-1})
c_{ijkl}	Tenseur d'ordre quatre
τ_{ji}	Représente les tenseur de contrainte
E	Module d'young (pa)
f_i	Densité de forces volumiques (Pa.m^{-1})
f_0	Amplitude de la force ponctuelle enterrée
h	Epaisseur de la couche (m)
h_{ij}	Tenseur de taux de déformation associé à la source explosive (s^{-1})
t	Temps (s)
T	Traction (force de contact)
u_i	Composante du déplacement (m)
v_i	Composante de la vitesse (m s^{-1})
V_0	Amplitude de la source explosive
x_i	Coordonnées spatiales (m)
V	La vitesse particulaire maximale
B	Banquette
E	Espacement
H	Hauteur du front

L_S	Surprofondeur
L_B	Bourrage
L_C	Charge de colonne
L_P	Charge de pied
L_T	Longueur de forage
Z	L'impédance de roche
s_c	L'énergie pondérale de l'explosif de colonne
s_p	L'énergie pondérale de l'explosif de pied
ρ_{Lc}	La charge linéaire de l'explosif de colonne
ρ_{Lp}	La charge linéaire de l'explosif de pied
S_p	La charge linéaire minimale pour briser la roche
ρ_e	La masse volumique de l'explosif
ρ_r	La masse volumique d'une onde de choc dans la roche
v_e	La vitesse de détonation de l'explosif
v_r	La vitesse de propagation d'une onde de choc dans la roche
$\mathbf{v}^0(\mathbf{x}, \mathbf{t})$	<i>La vitesse particulière du tir unitaire</i>
$\mathbf{S}(\xi^0, \tau)$	<i>Signal de la source du tir unitaire</i>
ξ^i	Coordonnées de trou d'indice i
ξ^0	<i>Coordonnées de la source du tir unitaire</i>
t^i	Délai (ms)
τ	<i>Temps de référence de tir (s)</i>
$I(t)$	La réponse instrumentale
n_j	Normale à la surface
T_i	Tractions (la force de contact- pression)
\ddot{u}_i	Accélération du mouvement
f_i	La force dans la direction i
ε_{ij}	Tenseur des déformations
Φ_f, Ψ_f	Représente la décomposition d'Helmholtz de la force f
\vec{W}	Représente le champ de potentiel
G_{ij}	Les fonctions de Green
M_{jk}	Le tenseur de densité de moment sismique
M_0	Moment sismique

ΔV	Variation relative de volume
P_s	La pression maximale de choc dans la région inélastique
P_{0s}	La pression maximale de choc au rayon élastique
P_{0c}	La pression statique au rayon élastique
r_{el}	La rayon élastique de la source
ω	La fréquence
$H(t)$	Fonction de Heaviside
W_0	Le rendement de source
A	Un constant dépend le milieu
A/A_{cal}	Moyen à charge
$\psi(t)$	Le potentiel de déplacement réduit.
$\psi(w)$	La transformée de Fourier de $\psi(t)$
m_T	La masse éjectée (spall)
v_{oz}	La vitesse verticale initiale de la masse
v_{lz}	La vitesse verticale d'impact de la masse
v_z	La vitesse horizontale de la masse
v_h	Vitesse horizontale de la masse
T_s	Dwell time
f_z	Force verticale
F_h	Force horizontale
h_{ff}	La variation de hauteur de la masse
$[u_i]$	Discontinuité des de déplacement à la source
T_{sr}	La largeur de l'impulsion initiale d'extraction de la masse
T_{sf}	La largeur l'impulsion d'impact
f_s	La force du à l'effet de la masse
I	Matrice d'identité
θ	L'azimut du récepteur
$u_r, u_t \text{ et } u_r$	Sont respectivement la composante radiale, transversale et verticale
A_i	Un facteur d'échelle
u	Sismogramme synthétique pour un tir
T_i	Le délai entre $i^{\text{ème}}$ trou et le trou de référence
r_0	La distance entre le récepteur et le trou de référence (première trou)
r_i	La distance entre le $i^{\text{ème}}$ trou et le trou de référence

v_{po}	La vitesse des ondes P, au niveau de la source
χ	L'angle d'incidence du rai au point de trou
ξ_i	L'angle entre la ligne reliant le $i^{\text{ème}}$ trou et le trou de référence, et la ligne reliant le récepteur et le trou de référence
<i>TCOC</i>	Détonateurs non électriques à conducteur d'onde de choc
<i>CUP</i>	Coefficient d'utilisation pratique
<i>USBM</i>	Bureau des mines de l'Etats-Unis

CHAPITRE 1:
Contrôle des vibrations

I - LES TIRS DES MINES

I-1 INTRODUCTION

Un tir de mine consiste à générer une onde de choc, qui fissure le matériau, suivie d'un dégagement de gaz assez important pour s'engouffrer dans les fissures et abattre la roche par effondrement des fragments. Il consiste en la réalisation de trous quasiment verticaux à quelques mètres du front. Ces trous sont remplis d'explosifs et c'est la mise à feu coordonnées de ces explosifs qui permet d'abattre les roches situées entre les trous et la paroi rocheuse.

I-2 L'EXPLOSIF

I-2-1 Définitions

On appelle substances explosives tout agent chimique ou mélange de composants chimiques susceptibles, par réaction chimique et sous l'influence d'un amorçage convenable, de dégager des gaz à une température très élevée, à une haute pression et à une vitesse telle qu'il peut en résulter des dommages sur les personnes ou sur les biens (*Fig. I.1*).

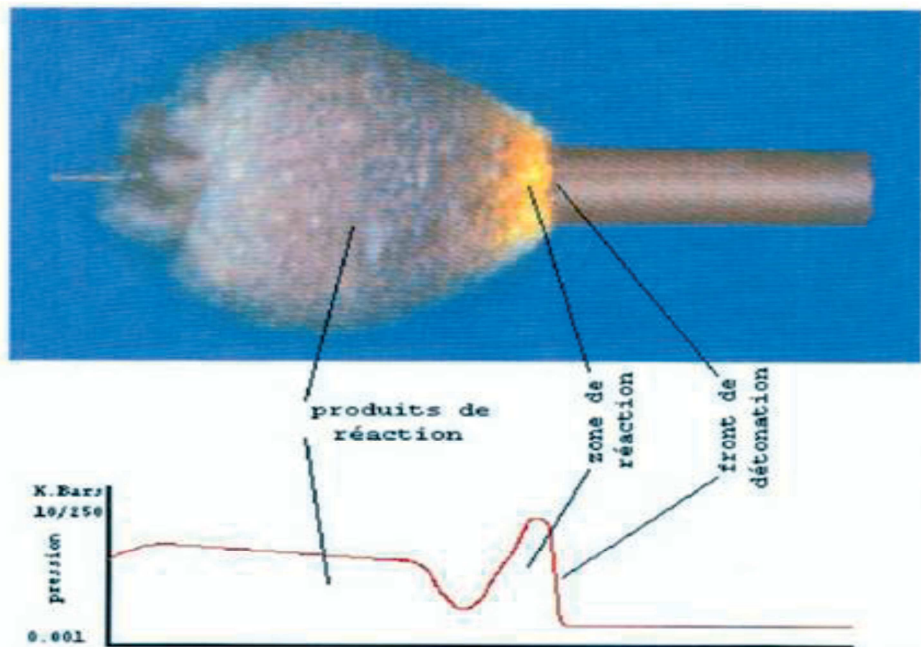


Fig. I.1 : Décomposition d'une cartouche d'explosif (SYNDUEX, 2008)

Ces substances consistent généralement en un mélange intime de corps combustibles renfermant une quantité d'oxygène insuffisante pour la combustion totale, avec des corps comburants qui apportent l'oxygène nécessaire à celle-ci.

Des composés chimiques explosifs peuvent également entrer dans certains mélanges:

- ✓ Les émulsions explosives
- ✓ Les explosifs nitratés
- ✓ Les nitrate-fuels (ANFO)
- ✓ La poudre noire
- ✓ Les dynamites
- ✓ Les bouillies et gels explosifs
- ✓ Les nitrates fiouls alourdis

I-2-2 Caractéristiques

La caractérisation en laboratoire des explosifs industriels est indispensable au développement et à l'agrément de formules nouvelles.

Cependant, la plupart des mesures effectuées sur les explosifs présentent un caractère strictement comparatif, les conditions expérimentales étant assez éloignées des conditions réelles d'utilisation

Les principales caractéristiques des explosifs industriels sont les suivantes :

- ✓ L'énergie
- ✓ La densité
- ✓ La sensibilité à l'amorce
- ✓ La vitesse de détonation
- ✓ Le diamètre critique de détonation
- ✓ L'aptitude à transmettre la détonation
- ✓ La sensibilité aux chocs, à la friction, à la chaleur et à l'humidité

Le tableau I.1 reporte les principales caractéristiques ainsi que les conditions d'utilisation de certains explosifs utilisés en l'Algérie.

Tableau I.1 : Caractéristiques des explosifs (O.N.E.X. Algérie)

TABLEAU 3 : CARACTERISTIQUES DES EXPLOSIFS (O.N.E.X. Algérie)

DESIGNATION COMMERCIALE	RESISTANCE A L'EAU	DENSITE	VITESSE DE DETONATION (M/S)	PUISSANCE C,U,P	C,S,E (CM)	VOLUME GAZ L/KG	UTILISATION
GEONIT	Très bonne	1,50	5800	1,15	18	733	Explosif sismique en région humide et off-shore. Explosif pour roches dures
GELANIT I	Bonne	1,40	6300	1,33	8	865	Abattage en carrière. Roches dures
GELANIT II	Bonne	1,45	6000	1,27	6	808	Explosif pour roches dures. Abattages souterrains
CARRINIT	Médiocre	1,00	4500	1,27	10	892	Explosif pour roches dures à mi-dures
MARMANIT I	Médiocre	0,95	4000	1,28	5	842	Explosif pour les roches de dureté moyenne. Abattages souterrains
MARMANIT II	Médiocre	0,98	4100	1,27	2	868	Explosif pour les roches de dureté moyenne.
MARMANIT III	Médiocre	0,95	3800	1,18	2	907	Explosif pour les roches tendres
N. 18 BIS	Médiocre	0,95	2500	1,16	4,5		Explosif sismique en région sèche. Explosif pou roches tendres
ANFOMIL	Médiocre	0,90	3000	1,15	0	975	Explosif pour travaux à ciel ouvert, explosifs pour roches tendres.

Suivant le comportement de l'explosif lors de sa réaction, son confinement et sa vitesse de décomposition, on distingue deux types d'explosion : la déflagration et la détonation.

- La déflagration

La déflagration correspond à une explosion durant laquelle le front de réaction se propage à une vitesse inférieure à la vitesse de l'onde de pression à l'intérieur de l'explosif -combustion dont la vitesse est relativement faible (1000m/s)-. Lors de ce type d'explosion, la libération de l'énergie produite par l'explosion est plutôt progressive comparée à la détonation. La déflagration engendre par conséquent des effets et des pressions plutôt modérés. (Fig. I.2).

- La détonation

Réaction très rapide ($> 1000\text{m/s}$) donnant naissance à une onde de choc (énergie de choc) qui se propage dans le milieu connexe et à un dégagement de gaz à très haute température et pression (énergie de gaz).

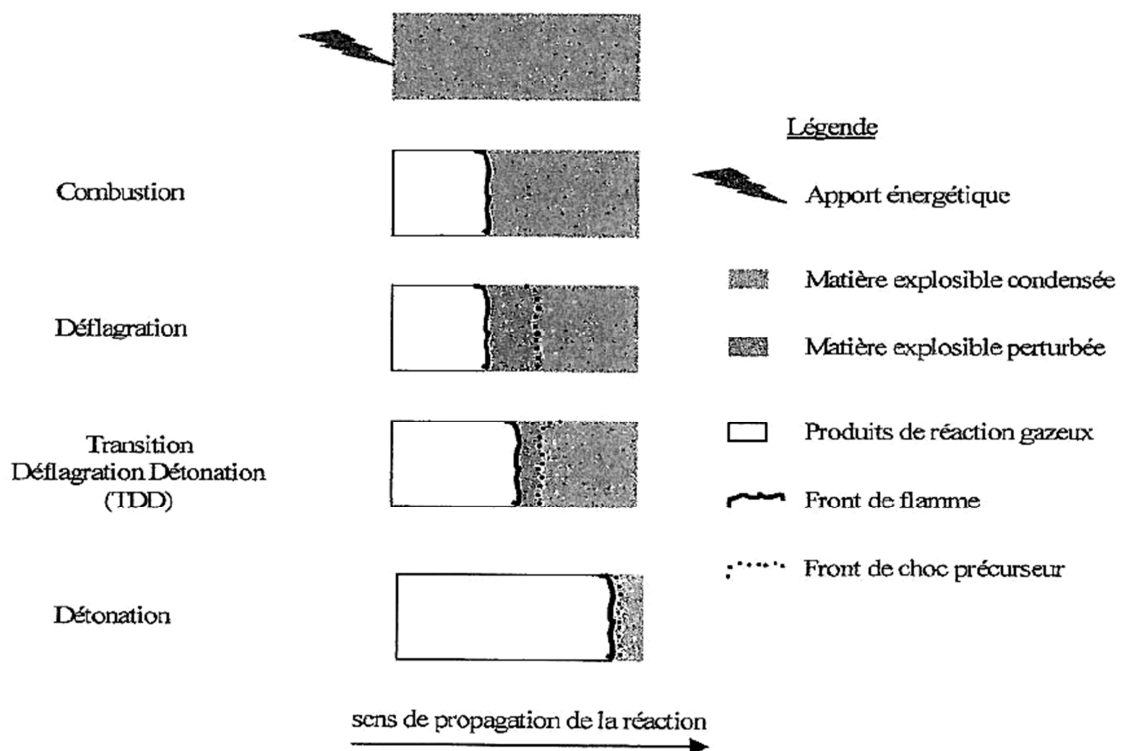


Fig. I.2: régimes d'explosif (D. VAN SCHENDEL, 2009)

Donc pour le cas d'une détonation le front de réaction se propage à l'intérieur de l'explosif à la même vitesse que l'onde de pression. Les gaz produits sont ainsi piégés à l'intérieur de l'explosif. La réaction se déroule alors sous température et pression élevées, jusqu'à ce que tout l'explosif ait réagi. Les gaz à très haute pression et à très haute température sont alors instantanément libérés. Toute l'énergie produite lors de la réaction est donc relâchée très brutalement, décuplant ainsi son pouvoir destructeur (Fig. I.3). C'est d'ailleurs ce type de réaction qui est recherchée par les militaires lors de la confection d'explosifs tels que le TNT.

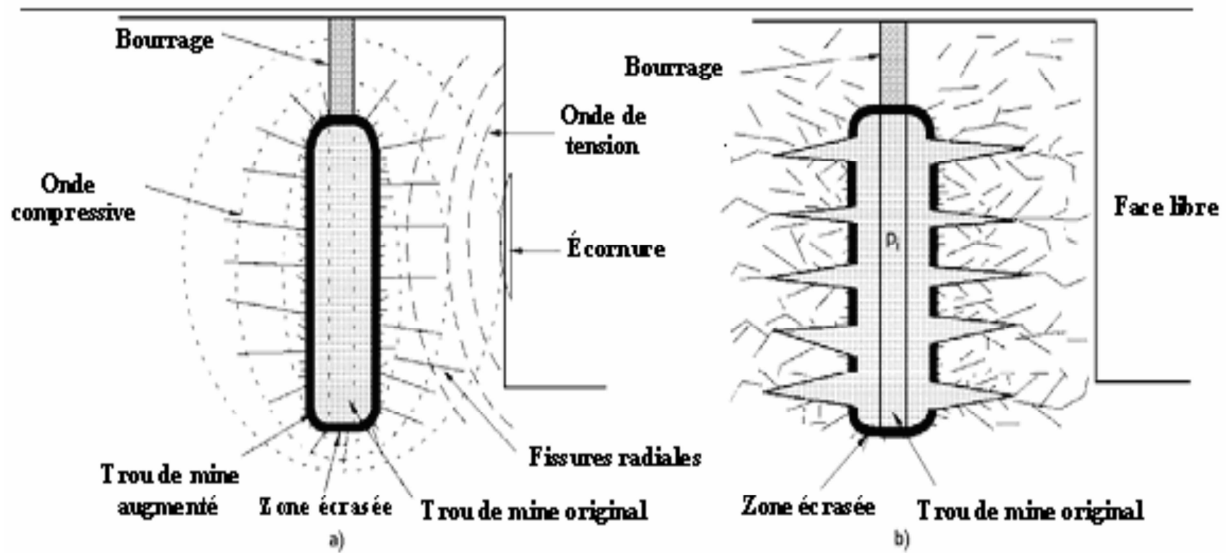


Fig. 1.3: -a) propagation de l'onde de choc -b) expansion de pression de gaz
(Scot et al, 1996)

I-2-3 Effets des ondes de choc

▪ Sur le massif rocheux

La détonation d'une charge s'accompagne de phénomènes irréversibles qui permettent de définir trois zones : (Fig.1.4).

- La zone de broyage: les contraintes en général excèdent dans un temps très court la résistance à la compression de la roche R_c qu'elles broient en fines particules
- La zone de fissuration radiale (zone transitoire): la roche subit en plus de la contrainte de compression radiale une contrainte tangentielle de traction (distance comprise entre 20 et 50 R_c).
- La zone sismique: réapparition des vibrations qui affaiblissent le massif.

▪ Sur les personnes et les biens

Les dommages prévisibles sur les personnes et les biens sont présentés dans le tableau I.2. La prévision des dommages est faite sur la base de la réglementation en vigueur et de la classification internationale

Tableau I.2 : Les dommages prévisibles sur les personnes et les biens.

Zone	Distance R	Dommages prévisibles aux personnes	Dommages prévisibles aux biens
Z_1	$0 < R_1 \leq 5Q^{1/3}$	Blessures mortelles dans plus de 50% des cas	Dégâts très graves
Z_2	$< R_2 \leq 8Q^{1/3}$	Blessures graves pouvant être mortelles	Dégâts importants
Z_3	$< R_3 \leq 15Q^{1/3}$	Blessures	Dégâts moyens
Z_4	$< R_4 \leq 22Q^{1/3}$	Possibilité de blessures	Dégâts légers
Z_5	$< R_5 \leq 44Q^{1/3}$	Très faibles possibilités de blessures légères	Dégâts très légers

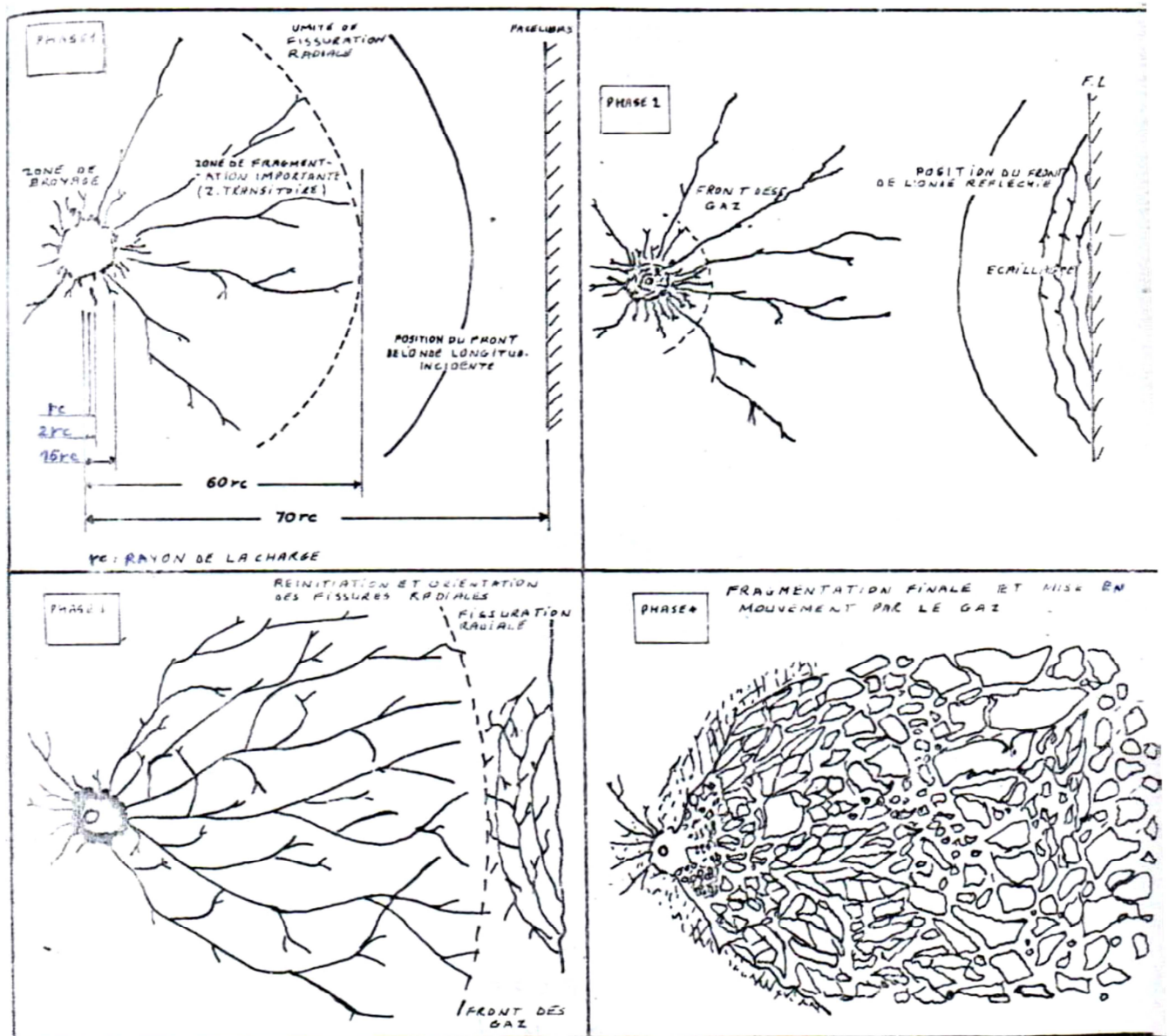


Fig. I.4: Développement de la fissuration et de la fracturation

I-2-4 PRINCIPALES UTILISATIONS

L'utilisation des explosifs dans le domaine du Bâtiment et des Travaux Publics civil est diversifiée: elle est destinée aux terrassements rocheux de voies de communication à ciel ouvert ou en souterrain (routes, voies fluviales, voies ferrées), aux carrières, aux creusements de fondations d'ouvrages d'art (barrages, ponts et centrales), aux aménagements portuaires, à la démolition urbaine et de friches industrielles, à certains emplois spéciaux.

La plus fréquente consiste en la réalisation d'excavations. Dans ce cas, les techniques de mise en œuvre dépendent principalement de la géométrie à réaliser, de la nature des matériaux à extraire ou à démolir et des contraintes d'environnement.

Le domaine préférentiel d'emploi des explosifs se situe dans les roches dures où il présente les meilleurs résultats d'efficacité et de rendement.

I-3 PLAN DE TIRS

I-3-1 Définitions:

- **Trou de mine** : trou obtenu par forage destiné à recevoir une charge. (Ce trou peut-être soit vertical, horizontal ou oblique, Il n'est pas nécessairement dans une mine)
- **Charge** : ensemble de produits explosifs destinés à être amorcés par le même accessoire pyrotechnique de tir.
- **Charge-amorce** : cartouche d'explosif ou bousteur muni d'un artifice de mise à feu.

La conception d'un tir s'appuie sur un certain nombre de données variables et d'éléments propres à l'entreprise qu'il faut s'efforcer de connaître ou de définir.

Il est nécessaire de définir les paramètres qui pourront soigneusement être étudiés et mesurés.

On peut déterminer par des calculs ou des considérations plus approfondies les conditions de sautage liées aux paramètres de base. Ce sont les paramètres de tir qui caractérisent le plan de foration et le plan d'amorçage, à savoir :

- | | |
|-----------------------------|---|
| ▪ La maille | ▪ La profondeur de foration |
| ▪ La banquette | ▪ L'inclinaison des fourneaux |
| ▪ Le diamètre du trou | ▪ La consommation spécifique |
| ▪ Le nombre de rangées | ▪ La hauteur et la composition du bourrage |
| ▪ Le type d'amorçage | ▪ La nature et la quantité de charge de pied |
| ▪ L'espacement entre trous | ▪ La nature et la quantité de charge de colonne |
| ▪ La séquence de mise à feu | |

I-3-2 Plan de foration

Nous reprenons dans l'ordre présenté ci-dessous comment déterminer ou calculer les paramètres du Plan de foration: (*Fig. I.5*)

- **Diamètre de Foration ϕ**

Dans le cas général, le diamètre devrait être choisi en fonction de l'objectif de production, de la granulométrie et du coût global. Il conditionnera partiellement la granulométrie (qui dépend du diamètre à cause de son incidence directe sur la maille). Le coût de la foration diminue généralement avec l'augmentation du diamètre de foration.

- **Banquette B**

Elle dépend des objectifs technico-économiques de la charge d'explosif, et la hauteur du front, généralement : $B = 40 * \phi$

- **Espacement E**

C'est la distance entre deux trous de même rangée, elle est liée à la banquette:

$$1 * B < E < 1,3 * B \quad , (E \approx 1.25B_{max})$$

Donc **La maille** = $E \cdot B$ est proportionnel à l'énergie volumique comprise dans le trou. Elle a une influence sur le résultat de tir car elle contribue à la modification de granulométrie des blocs entre l'état initial du massif et l'état du tas après le tir.

- **Surprofondeur L_S**

Celle-ci favorise nettement la sortie du pied. Son rôle devient nul ou insignifiant si le massif a des discontinuités horizontales prédominantes. Elle augmente aussi avec la profondeur du trou et le nombre de rangées. Elle est liée essentiellement à la banquette : $0,15 * B < L_S < 0,3 * B$

- **Hauteur du front H**

La hauteur adoptée est de 10 à 15m. Mais de fréquentes dérogations sont accordées pour des fronts de 20 à 25m maximum, si le gisement est reconnu comme sûr et sous réserves de conditions particulières d'exploitation.

- **Inclinaison de forage α**

L'inclinaison des forages par rapport au plan vertical perpendiculaire au front, fonction de la hauteur du front H et des conditions de stabilité de la roche :

- ✓ Si hauteur faible ($H < 10$ m) : α entre 0 et 5 degrés
- ✓ Si hauteur élevée ($10 \text{ m} < H < 35$ m) : α entre 5 à 30 degrés

* le forage présente trois zones : (*Langefors U. et Kihlström B.*)

a. Bourrage L_B

Son objectif est de diminuer les projections et d'améliorer l'effet de gaz des explosifs. Son efficacité dépend de sa nature : les gravillons non compactés sont particulièrement satisfaisants.

Il est proportionnel à la banquette, pour un amorçage latéral en mines profondes, sa longueur doit être égale à la banquette, en mines courtes il peut être faible : il peut descendre à $0,5 B$

b. Charge de colonne L_C

Dont l'énergie volumique est -selon Lange fors- environ 2.5 fois plus faible que celle de la charge de pied. Elle a une hauteur égale à : $L_C = H - L_P - L_B$

c. Charge de pied L_P

Celle qui contribue au dégagement et à la fragmentation du pied: $L_P = L_S + B = 1,3 * B$

a) Longueur de forage L_T

La longueur de forage est fortement influencée par la capacité des équipements de forage à garantir une déviation faible. L'inclinaison des forages favorise le dégagement du pied et diminue les effets arrière. L_T est déterminée par la formule : $L_T = H / \cos(\alpha) + L_S = L_B + L_P + L_S$

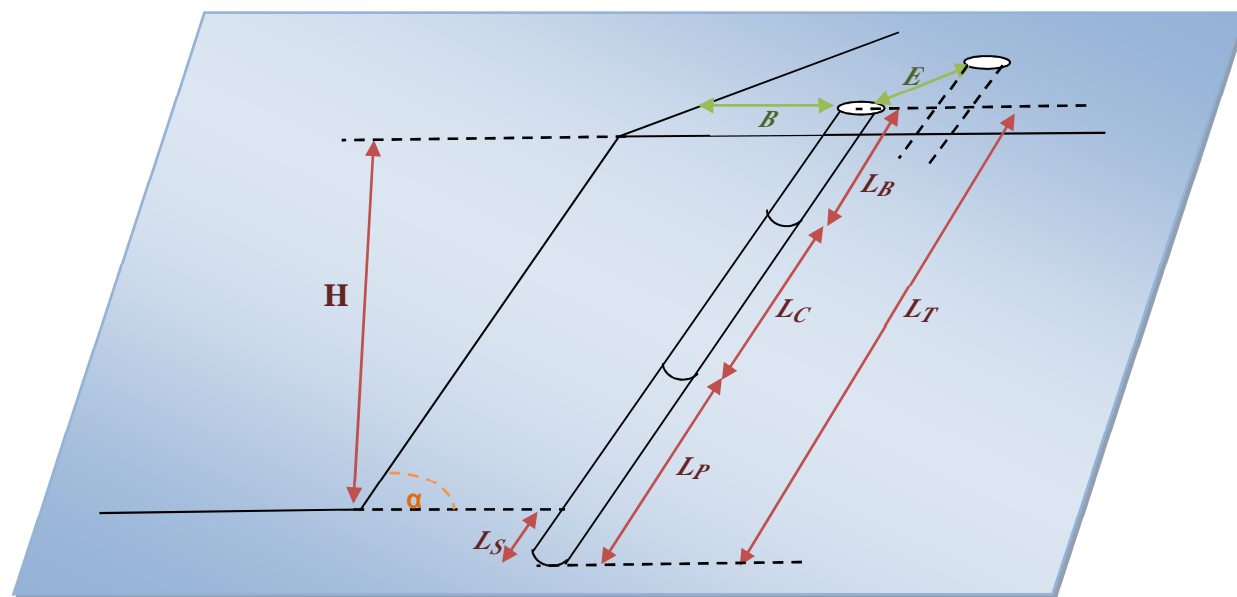


Fig. I.5 : Les différents éléments du plan de foration (Cours Dr. Omraci, ENP.2008)

Ne pas confondre les deux notions suivantes :

- **La charge spécifique:** Qui est la quantité d'explosif mise en œuvre pour abattre un m³ de roche
- **La charge unitaire:** Qui est la quantité d'explosif mise à feu par retard en une seule fois (par même numéro de retard)

b) **Le nombre de rangées (n)** est déterminé en fonction des contraintes matérielles, de site et d'environnement

Une fois la charge de pied déterminée, **la charge de colonne** s'en déduit en appliquant :

$$S_c \cdot \rho_{Lc} = 0,5 \cdot S_p \cdot \rho_{Lp}$$

Où S_c et ρ_{Lc} sont respectivement l'énergie pondérale et la charge linéaire de l'explosif de colonne

S_p et ρ_{Lp} sont respectivement l'énergie pondérale et la charge linéaire de l'explosif de pied.

I-3-3 Mode d'amorçage

La chaîne pyrotechnique est l'assemblage des différents éléments permettant de provoquer une explosion.

Quelque soit la technique de tir utilisée, cette chaîne comporte trois éléments :

- la charge explosive
- le dispositif d'amorçage : il crée l'onde de choc initiale entraînant l'explosion de la charge
- le dispositif de mise à feu : il permet au préposé au tir de déclencher l'explosion en toute sécurité, à l'abri des projections.

a) Pour les tirs **séquentiels**, chaque charge détonne avec un retard qui lui est propre (Fig. I.6). Il n'y a donc pas deux charges qui partent avec le même retard, le retard entre les dates de départ peut être réalisé à l'aide de différents artifices de mise à feu (Fig. I.7) :

- ✓ relais de détonation montés sur cordons détonants
- ✓ détonateurs électriques
- ✓ détonateurs électroniques
- ✓ détonateurs non électriques à conducteur d'onde de choc (TCOC).

L'utilisation des relais de détonation montés en surface sur **les cordons détonants** n'est pas conseillée car elle présente des risques de ratés non négligeables dus au croisement de certains brins de cordons détonants.

Les détonateurs électriques et électroniques imposent une parfaite isolation des connexions électriques ainsi que des connecteurs électroniques qui ne peuvent être immergés. Ils sont sujets au risque d'un départ intempestif dû à une source de courant d'origine extérieure (foudre, poste émetteur, radar, etc.) ; c'est pourquoi la tendance actuelle est de privilégier l'emploi de détonateurs **non électriques à tube conducteur d'onde de choc**.

La mise à feu des diverses charges explosives se fait de préférence en amorçage postérieur ce qui augmente d'une part la qualité de la fragmentation et évite (ou limite fortement) qu'un détonateur, soit décapité par l'explosion d'une charge voisine.

De même que pour les tirs en surface, la redondance de l'amorçage est de préférence assurée par un second détonateur mais, dans ce cas, pour tenir compte des particularités du milieu, il est généralement placé dans la même cartouche amorce.

On peut définir :

Composition retard : poudre pyrotechnique qui brûle à vitesse constante (Fig. I.7) :

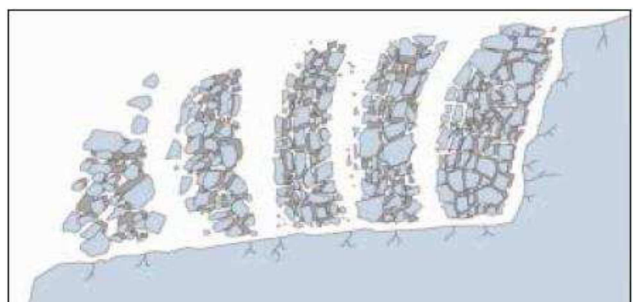
- Microretard : une longueur élémentaire brûle en 25 ms
- Retard : une longueur élémentaire brûle en 500 ms

Chaque numéro = ajout d'une longueur élémentaire de composition retard :

$$1 = 25 \text{ ms}, 2 = 50 \text{ ms}, \dots, 20 = 500 \text{ ms}$$

Temps entre trous d'une même rangée : $3 * E < \text{Temps (ms)} < 10 * E$

Temps entre rangées : $10 * B < \text{Temps (ms)} < 30 * B$



Delay detonation of a typical bench blast.

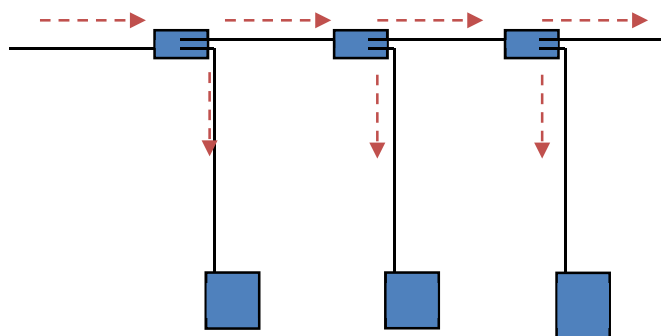


Fig. I.6 : a-détonation en retard de la surface de tir

b-déplacement de l'énergie d'amorçage entre les trous
(La société Nitro-Bickford, Avril 2000)

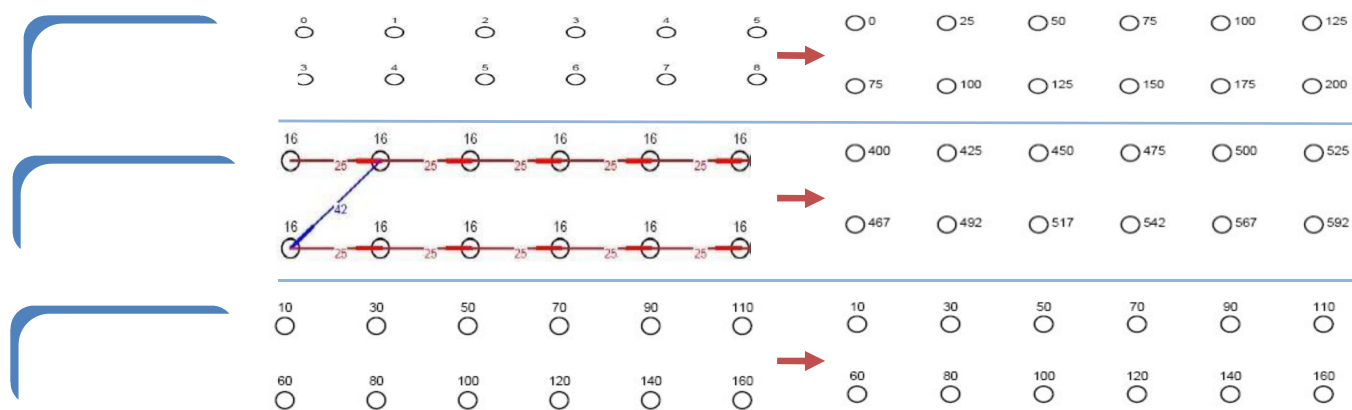


Fig. I.7 : Les différents types d'amorçage (Bleuzen Y., 2010)

b) Pour **les tirs instantanés**, l'amorçage peut être initié à l'aide de détonateurs instantanés ou par un cordeau détonant de 20 g/m. Chaque charge est préparée de manière à avoir une longueur excédentaire d'environ 0.5 à 0.75 m dépassant du trou ou du tubage. Donc plusieurs charges, voir l'ensemble du tir peut partir au même retard.

Cette deuxième méthode est souvent retenue dans le cas de charges creuses pour éviter la désensibilisation due à l'onde de pression.

I-4 OPTIMISATION DE TIR

I-4-1 La puissance de l'explosif:

L'explosif possède certaines caractéristiques de rendant plus ou moins efficace dans des conditions données (masse volumique, la vitesse de détonation et la puissance)

La puissance est un indicateur de l'efficacité d'un explosif. On a longtemps mesuré la puissance par le « *CUP* » (coefficient d'utilisation pratique) basé sur une expérimentation dans un bloc de plomb. Le *CUP* se détermine par l'expression suivante :

$$CUP\% = (m_0/m) \times 100$$

Où m est la masse en g qui produit le même volume d'évasement que celle d'une masse m_0 égale 10 à 15 g. Cette définition est maintenant abandonnée car elle n'est plus significative pour les nouveaux types d'explosifs apparaissant actuellement. D'autre part, elle donne une valeur qui n'est pas toujours bien corrélée avec les effets de l'explosif sur le terrain (*Dr. Serradj T.*).

On a donc le « **weight strenght** » défini par *Langefors*, en suède, dont nous rappelons la définition ci-dessous:

$$S = 5Q / 6Q_0 + V / 6V_0$$

Q et V étant l'énergie totale et le volume de gaz dégagés lors de l'explosion, les valeurs de Q_0 et V_0 correspondent à celles d'une dynamite suédoise servant de référence : $Q_0=1160$ kcal/ kg, $V_0=850$ l/kg

La charge linéaire minimale pour briser la roche, est donnée par :

$$S_p = 0.88 \cdot (f/L_p) \cdot (E/B) \cdot [(0.07/B) + R + 0.004 \cdot B] \cdot B^2$$

Où : f est le facteur de contrainte dépendant de l'inclinaison du trou

- L_p Longueur de la charge de pied
- E Espacement de trous (m)
- B Banquette (m)
- R Résistance de tirage « Rock constant ».

I-4-2 Le choix de l'explosif

Le choix de l'explosif est important car il détermine la qualité de la fragmentation et la possibilité de diminuer les nuisances sur l'environnement. Le maximum de l'énergie de l'explosif est transmis au rocher si le rapport des **impédances Z** est voisin de **1**, c'est à dire :

$$Z = \frac{\rho_e \cdot v_e}{\rho_r \cdot v_r} \leq 1$$

Où :

ρ_e et v_e sont respectivement la masse volumique et la vitesse de détonation de l'explosif.

ρ_r et v_r sont respectivement la masse volumique et la vitesse de propagation d'une onde de choc dans la roche.

Choix des explosifs en fonction de la présence d'eau et de l'énergie à mettre en œuvre pour obtenir le résultat souhaité

- limitation de la charge unitaire peut conditionner le choix du diamètre de foration
- choix de l'amorçage en fonction de la taille du tir et des contraintes environnementales (sismique, sécurité)
- tendance au développement du tir électronique pour augmenter la taille des tirs à charge unitaire identique et diminuer la fréquence des tirs sur une année

I-4-3 L'amélioration du rendement du tir

Le rendement du tir peut être amélioré par des mesures techniques consistant à :

- Adapter au mieux l'explosif à la roche à abattre,
- Orienter le front d'abattage en fonction de la structure du massif,
- Opter pour une séquence d'amorçage qui assure une surface de dégagement maximale à chaque instant d'amorçage,
- Optimiser les paramètres géométriques du tir (banquette, espacement entre trous, inclinaison),
- Améliorer la densité de chargement (rapport volume d'explosif / Volume du trou),
- Assurer un bourrage de qualité,
- Couvrir les tirs par une protection de textile non tissé qui évite la projection des graviers.

Pour toutes ces raisons, il est impératif d'avoir recours à des professionnels confirmés pour optimiser les résultats et limiter au maximum les effets négatifs des séquences de tir sur l'environnement.

I-5 EFFET DE TIR SUR L'ENVIRONNEMENT :

Les tirs peuvent engendrer des nuisances à l'environnement par (Fig. I.8):

I-5-1 Le bruit :

Il a été considérablement diminué par l'arrivée sur le marché de machines nouvelles ayant pris en compte ce paramètre. Par ailleurs, les progrès réalisés dans les artifices de mise à feu, l'élaboration de plans de tir adaptés et l'utilisation d'exploseurs séquentiels ont relégué cette nuisance au stade d'un gêne acceptable. En effet, quelque soit la charge mise en œuvre le bruit de l'explosion est devenu ponctuel et très assourdi.

I-5-2 Les risques de projections :

Les projections sont essentiellement dues soit à l'hétérogénéité du terrain (présences de quartz, d'argile, etc ...), soit à la mauvaise qualité de la perforation (profondeur, parallélisme), soit au mauvais dosage d'explosif mis en œuvre. Une partie des matériaux peut être alors projetée de façon extrême violente et provoquer éventuellement des dégâts sensibles.

Les tirs à faible profondeur sont particulièrement générateurs de projection à cause de la faiblesse de la zone de bourrage. Tous ces risques peuvent être diminués par la pose de protections appropriées (bidim, paille, grillage, etc...) mais en réalité, ils ne sont sérieusement limités que par la mise en œuvre d'un plan de tir mûrement réfléchi par des artificiers dont la compétence professionnelle est notoirement reconnue.

I-5-3 Les vibrations :

Elles sont dues à l'onde de choc provoquée par l'explosion des tirs de mine. Les vibrations provoquent les nuisances les plus contraignantes. L'optimisation du tir permet de les réduire car des tirs mal conçus peuvent engendrer des désordres importants.

Dans un tir, la part d'énergie mise en jeu, réellement utilisée pour la fragmentation du massif, est relativement faible. En fait, la plus grande part de l'énergie restante est perdue. Elle se trouve à l'origine des phénomènes parasites.

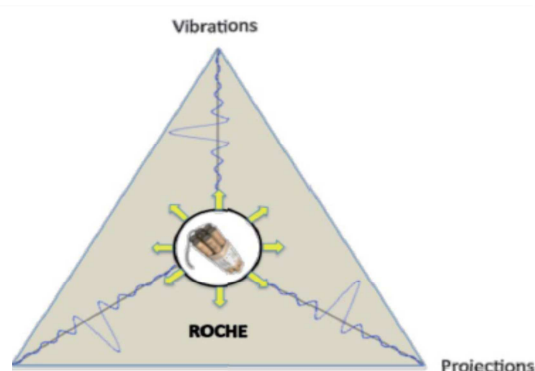


Fig. I.8. : L'énergie d'explosifs dans le tir de mine

II- CONTROLE DE VIBRATION

II-1 INTRODUCTION

Une vibration peut être définie comme étant un mouvement oscillatoire d'une particule ou d'un corps à partir de sa position de référence (ou position de repos). Les vibrations qui se propagent constituent des ondes vibratoires. Les vibrations engendrées par la source sismique se propagent dans toutes les directions.

On distingue deux types d'ondes, les ondes de volume qui traversent la terre et les ondes de surface qui se propagent en surface. Sur un enregistrement sismique, ces ondes peuvent se succéder ou bien se superposer. Leurs vitesses de propagation et leurs amplitudes sont modifiées par les structures géologiques qu'elles traversent. Ainsi, les signaux enregistrés sont la combinaison d'effets liés à la source, aux milieux traversés et aux instruments de mesure.

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques qui peuvent se propager sur des distances très importantes. L'impulsion de départ (source) va déplacer les particules élémentaires présentes dans le milieu, qui elles-mêmes vont à leur tour déplacer d'autres particules avant de reprendre leur place, se propageant ainsi en créant une réaction en chaîne.

Le tir d'explosif génère, tout comme un tremblement de terre, des ondes sismiques se propageant sous la surface du sol. Les trois principaux types d'ondes sont les ondes longitudinales **P**, les ondes transversales **S**, et les ondes de surface. Les ondes de choc produites par une explosion se propagent dans l'air à une vitesse de 340m/s .

II-2 LES ONDES SISMIQUES

II-2-1 Les ondes de volume

Lors d'une détonation des explosifs dans les trous, l'énergie est transférée dans la roche environnante à la suite du choc généré et les pressions de gaz. Initialement, la pression de l'onde de choc est plus élevée que la résistance à la compression de la roche autour du trou de forage. Toutefois, la pression de choc se désintègre rapidement à des valeurs inférieures à la résistance à la compression. À ce stade, le choc se déplace à l'intérieur de la roche sans la casser en compression.

- **Les ondes P**

On appelle ondes longitudinales, ondes de compression ou ondes primaires P car ce sont elles qui arrivent en premier. Le mouvement des particules se fait selon un mouvement de compression et de dilatation. Le sens de vibration des particules est parallèle à l'axe de propagation (*Fig. I.9*).

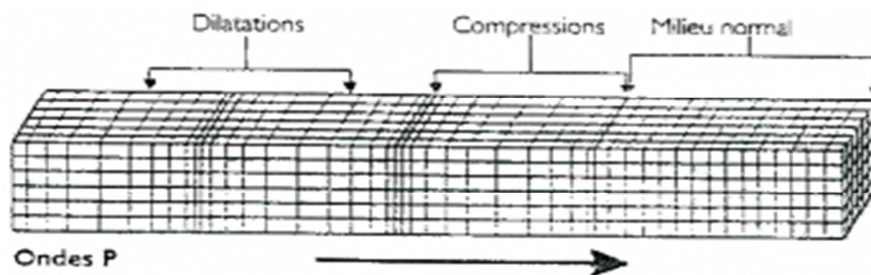


Fig. I.9 : propagation des ondes longitudinales P (Chapellier D. & Mari J-L., 1999)

Sa vitesse s'exprime en fonction des paramètres d'élasticité :

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

Où : ρ = densité [sans dimension]

λ = Coefficients de Lamé [Pa]

μ = module de rigidité ou de cisaillement [Pa]

▪ Les ondes S

On les appelle des ondes transversales, ondes de torsion ou ondes secondaires S car ce sont elles qui arrivent en second.

Le mouvement des particules dans ce cas se fait perpendiculairement à la direction de propagation (Fig. I.10). Comme il n'existe pas de module de cisaillement dans les liquides, les ondes S ne s'y propagent pas.

La vitesse des ondes secondaires s'exprime elle aussi en fonction des paramètres d'élasticité :

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

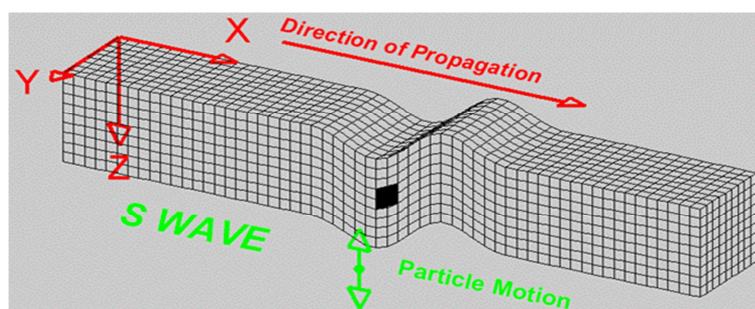


Fig. I.10: propagation des ondes transversales S (Braile L., 2004)

- Le rapport entre les vitesses V_p et V_s est un précieux indicateur de la **nature de la roche**, il sert par exemple d'indicateur de présence d'hydrocarbure.

De plus, comme les équations précédentes, la vitesse de propagation des ondes P et des ondes S dépend de la densité du milieu traversé. Avec la profondeur, les couches ont tendance à devenir

de plus en plus denses. Par conséquent, la vitesse de propagation des ondes de volume augmente avec la profondeur (sauf en cas de présence d'une zone à moindre vitesse) (Tableau. I.3).

Tableau. I.3: Les vitesses des ondes P, S et les masses volumiques de divers types de terrains
(Chapellier D. & Mari J-L., 1999)

Nature des terrains	Vitesse des ondes P [m/s]	Vitesse des ondes S [m/s]	Masse volumique [g/cm ³]
éboulis, terre végétale	300-700	100-300	1.7-2.4
sable sec	400-1200	100-500	1.5-1.7
sable humide	1500-4000	400-1200	1.9-2.1
argiles	1100-2500	200-800	2.0-2.4
marnes	2000-3000	750-1500	2.1-2.6
grès	3000-4500	1200-2800	2.1-2.4
calcaires	3500-6000	2000-3300	2.4-2.7
craie	2300-2600	1100-1300	1.8-2.3
sel	4500-5500	2500-3100	2.1-2.3
anhydrite	4000-5500	2200-3100	2.9-3.0
dolomie	3500-6500	1900-3600	2.5-2.9
granite	4500-6000	2500-3300	2.5-2.7
basalte	5000-6000	2800-3400	2.7-3.1
charbon	2200-2700	1000-1400	1.3-1.8
eau	1450-1500	-	1
glace	3400-3800	1700-1900	0.9
huile	1200-1250	-	0.6-0.9

II-2-2 Les ondes de surface (guidées)

Ce sont des ondes guidées par la surface de la Terre. Leur effet est comparable aux rides formées à la surface d'un lac. Elles apparaissent lorsqu'un milieu est limité par une surface libre, et leur énergie décroît très rapidement avec la profondeur. Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte.

Ces ondes se propagent dans les couches superficielles et par conséquent ne contiennent pas d'information sur les structures géologiques profondes que l'on souhaite identifier. Comme ces ondes sont très énergétiques, elles ont tendance à gêner l'interprétation des données sismiques en contexte pétrolier.

Plusieurs types d'ondes de surface peuvent exister en fonction de la topologie du milieu et de la nature de la source émise :

► L'onde de Love

Elles naissent des interférences entre les ondes P et les ondes S_H et sont caractérisées par un mouvement horizontal perpendiculaire à la direction de propagation et sans déplacement vertical. Les ondes de Love (ondes Q) provoquent un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations des édifices. Elles sont observées seulement lorsqu'il y a une couche de basse vitesse recouvrant un substratum de vitesse plus élevée. Elles sont souvent présentes dans les données sismologiques.

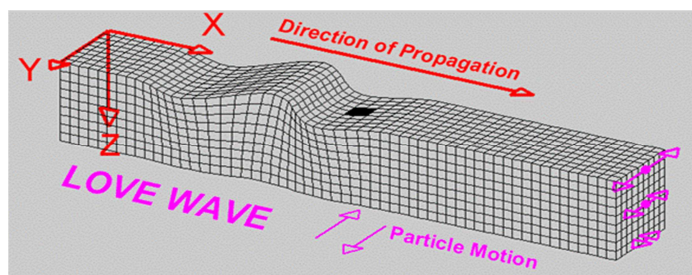


Fig. I.11 : propagation des ondes de love (Braile L., 2004)

► L'onde de Rayleigh

Elles naissent des interférences entre les ondes P et les ondes S_V , dans un milieu homogène (d'un matériau solide), semi-infini (surface libre- limite air/formation-). Le déplacement est complexe, un mouvement à la fois horizontal et vertical, elliptique.

- Les ondes de Rayleigh ont une amplitude du mouvement décroît exponentiellement avec la profondeur et ont une faible vitesse (d'environ 9/10 de V_s) qui varie aussi en fonction de la longueur d'onde (dispersion), c'est à dire que la vitesse de propagation dépend de la fréquence.

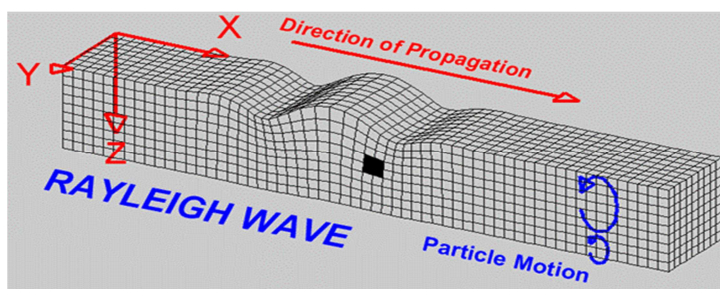


Fig. I.12 : propagation des ondes de Rayleigh (Braile L., 2004)

Les ondes de Love se propagent à environ 4 km/s, elles sont plus rapides que les ondes de Rayleigh.

► L'onde de Stoneley:

Ce sont des ondes d'interface ou de surface, de grande amplitude que l'on retrouve à l'interface solide-fluide. Elles existent sous certaines conditions particulières d'interface solide-liquide. On les appelle également ondes de tube en sismique de puits ou elles constituent une source importante de bruit

L'ensemble de ces ondes de surface forme ce que l'on appelle le "ground-roll" en sismique pétrolière et caractérise le bruit de surface. Il est présent dans la plupart des enregistrements sismiques et géotechnique, car elles donnent des informations sur les formations proches de la surface. Ces ondes sont caractérisées par une très forte énergie, par des vitesses relativement faibles, et un contenu fréquentiel basse fréquence (éliminer, généralement par des filtrages).

La Fig. I.13 montre les types d'ondes principales liées aux explosifs. Elles sont produites par une charge hypothétique cratères.

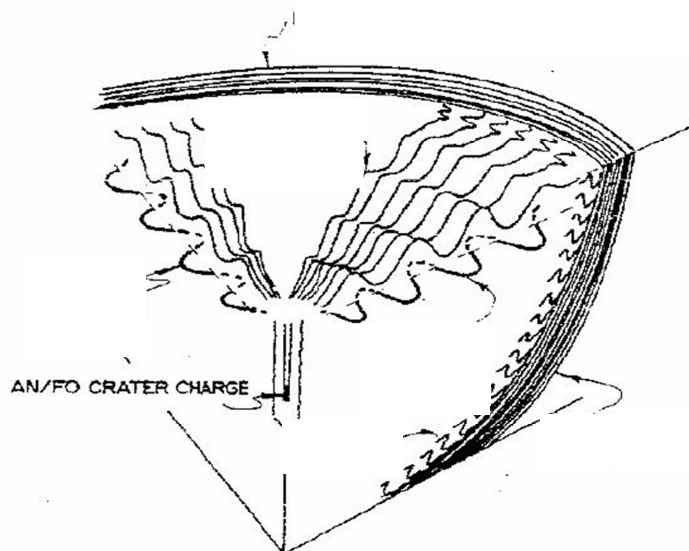


Fig. I.13 : les principales types d'ondes liées aux explosifs (Bauer A., 1981).

Les ondes P se déplacent plus vite que les ondes S qui se déplacent plus vite que les ondes de surface. Les ondes S se déplacent à une vitesse de $1/2 - 1/3$ de celle de l'onde P et l'onde de Rayleigh à une vitesse de $0,9$ à $0,95$ de celle de l'onde S (Bauer, 1981). Ainsi, la période des ondes de volume est de l'ordre de 1 seconde; tandis que les ondes de surface ont une période plus élevée d'environ de 20 seconde et sont de plus grande amplitude.

À de petites distances toutes ces ondes arrivent en même temps. Au fur et à mesure que la distance d'enregistrement augmente, les différentes ondes se séparent et l'identification est possible. Toutefois, dans la plupart des explosions des mines se compose d'une série d'explosions qui sont retardés par les retards de la milliseconde. Il en résulte un chevauchement des ondes.

II-3 ATTENUATION DES ONDES SISMIQUES

Au cours de leur propagation, les ondes traversent des milieux dont la nature diffère (vitesse, densité,...). Ainsi, lors du passage d'une couche à l'autre, il se produit un changement d'impédance du milieu. Ce paramètre caractéristique du milieu est lié à la vitesse de propagation des ondes et à la densité du matériau qui constitue le milieu. Il caractérise la résistance qu'un milieu oppose à sa mise en mouvement lorsqu'il est traversé par une onde. Lors d'un changement de milieu, au niveau d'une interface, les ondes subissent différents phénomènes tels que des réflexions et des transmissions.

Il est possible de classer les milieux de propagation en plusieurs catégories :

- Les milieux de propagation anisotropes pour lesquels la vitesse des ondes dépend de la direction
- Les milieux de propagation isotropes pour lesquels les propriétés sont identiques quelle que soit la direction d'observation.

Ces deux types de milieu peuvent de plus être dispersifs ou non-dispersifs. La dispersion correspond à la déformation d'un train d'ondes due à la variation de la vitesse de propagation avec la fréquence

Une onde émise se propage dans une série de milieux pouvant posséder des propriétés différentes. En général, plus l'onde se propage en profondeur et plus elle rencontre des roches compactes. Ainsi, l'onde va subir une série d'atténuations qui induira une décroissance de son amplitude et une déformation de sa forme d'onde.

Différentes causes sont responsable de cette atténuation, à savoir:

II-3-1 Réflexion et réfraction aux interfaces:

Lorsqu'une onde traverse une interface séparant deux milieux différents de vitesse V_1 et V_2 , une partie de l'énergie est réfléchi dans le premier milieu, l'autre est transmise dans l'autre milieu et ceci conformément à la loi de Snell-Descartes (Fig. I.14):

$$\frac{\sin i}{V_1} = \frac{\sin t}{V_2}$$

Où i et t représentent respectivement l'angle d'incidence et de réfraction.

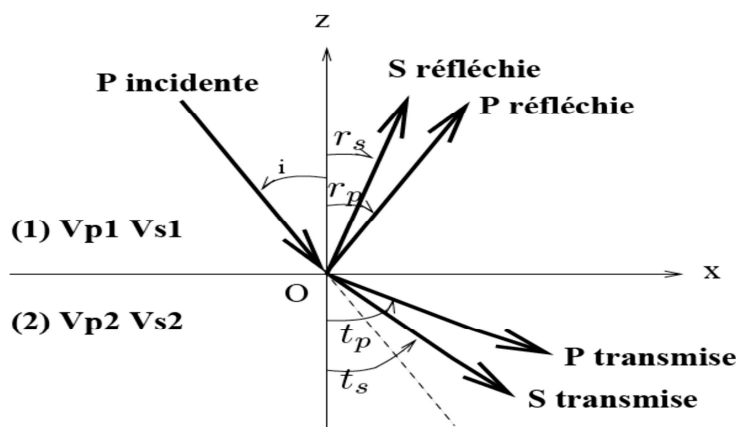


Fig. I.14 : relations angulaires entre rayons incidents, réfléchis et transmis pour les différents types d'ondes. (M. Lavergne, 1986)

Lorsqu'une onde de type P atteint une interface, elle donne en général naissance à quatre ondes, deux ondes transmises (une onde P et une onde S) et deux ondes réfléchies (une onde P et une onde S). Les relations angulaires entre les directions de propagations de différentes ondes sont fournies par la loi de Descartes:

$$\frac{\sin i}{V_{P1}} = \frac{\sin r_P}{V_{P1}} = \frac{\sin r_S}{V_{S1}} = \frac{\sin t_P}{V_{P2}} = \frac{\sin t_S}{V_{S2}}$$

La création d'une onde S (réciproquement d'une onde P) à partir d'une onde P (réciproquement S) est appelée phénomène de conversion. Les ondes S_H ne peuvent pas produire de phénomènes de conversion.

II-3-2 Dispersion géométrique

En se propageant, l'amplitude de l'onde va s'atténuer du fait de l'expansion géométrique du front de l'onde. Dans un milieu homogène, les fronts d'onde sont sphériques et ponctuellement l'énergie décroît selon le carré du rayon du front d'onde mais l'atténuation géométrique du mouvement des particules est proportionnelle à la distance r parcourue par l'onde. Cette atténuation toujours présente indépendamment du milieu, est appelée également divergence sphérique.

II-3-3 Absorption:

Lorsque le milieu traversé n'est pas parfaitement élastique, ce qui est le cas du sol, l'énergie sismique se dissipe progressivement sous forme de chaleur, Ce phénomène qui contribue à l'atténuation de l'énergie sismique avec la distance est connu sous le nom d'absorption anélastique. L'énergie de l'onde varie donc avec la distance selon la relation :

$$E = E_0 e^{-\alpha x}$$

Où E_0 est l'énergie initiale, E l'énergie initiale à une distance x de la source et α le coefficient d'atténuation ou d'absorption.

Les études expérimentales ont montré que le coefficient d'absorption est proportionnel à la fréquence, les vibrations à haute fréquence sont plus absorbées que celles à basse fréquence. Ce qui explique qu'à grande distance de la source seules les basses fréquences persistent, (*Telford et Al, 1976*).

Lorsque la distance et la fréquence augmente, les pertes par absorption sont plus importantes, tandis qu'à courte distance, c'est la perte par divergence qui prédomine

II-4 DIFFERENCE ENTRE SEISMES ET TIRS DE MINES

Il existe plusieurs similitudes entre les ondes engendrées par ces deux mécanismes, mais il y a aussi plusieurs différences, soit dans le contenu du train d'ondes, son mode de propagation, sa gamme de fréquence et dans les paramètres des ondes au site de la perception. Les comparaisons doivent se faire aux niveaux de la source, de la quantité d'énergie, des types d'ondes engendrées, de la propagation des paramètres ondulatoires (fréquence, accélération, vitesse des ondes, vitesse des particules, amplitudes, etc. ...) ou de la susceptibilité aux dommages des édifices (*Chagnon J., 1980*).

Le tableau suivant résume les principales différences entre les séismes et les tirs à l'explosif. On constate des similitudes et des différences. Au niveau de la perception par les humains et des dommages aux structures les séismes et les tirs se recoupent ; les durées sont fort différentes mais les vitesses particulières peuvent atteindre des niveaux comparables.

Tableau. I.4 : Caractéristiques des séismes et des tirs (Chagnon J., 1980)

	SEISMES	TIRS
Source	Profonde Asymétrique	Superficielle Symétrie sphérique
Energie	Enorme	Faible
Ondes	P,S,L,R, Longue durée Atténuation lente et inégale	P,S,L,R, Courte durée Atténuation rapide
Effets de site	Possibles	Possibles
Perception	A grande distance	Sur de faibles distances
Paramètres		
Fréquence	0.1 à + 1000 Hz	5 à + 500 Hz
Accélérat.	0.0001 - 2g	0.0001 - 2 g
Vitesse des particules	0.05 - 50 cm/s	0.05 - 30 cm/s

Un séisme d'une certaine magnitude engendrant un train d'onde une gamme de fréquences bien étalées pourrait être perçue de la même manière qu'un tir moins fort mais plus rapproché parce que les accélérations les plus fortes à un niveau de fréquence précis sont identiques et correspondent à un niveau où la sensibilité des humains et des structures est grande.

En général les vibrations à basse fréquence soit de l'ordre de l'Hertz sont celles qui ont les accélérations les plus grandes. Elles sont présentes en grande quantité lors de séismes et à peu près absentes dans les tirs à l'explosif.

D'autres vibrations engendrées par un séisme pourraient être perçues à cause de la durée du phénomène alors qu'une grande partie des ondes (à fréquence élevée) ne serait pas ressentie ou n'aurait pas d'effets appréciables.

Le tir à l'explosif à cause de la courte durée et de la forte atténuation des ondes engendrées offre une gamme étroite de vibrations dommageables et ce à une fréquence supérieure à celle des séismes.

Il y a une relation entre la magnitude d'un séisme et ses effets destructeurs, donc entre la magnitude et la vitesse particulaire. Toutefois cette relation est souvent faussée par le jeu des effets de site qui fait en sorte que des séismes de magnitude faible, soit de l'ordre de 5 peuvent engendrer localement des accélérations et des vitesses particulières élevées à cause d'une amplification attribuable à la nature du sol, son épaisseur et à la géométrie du roc sous-jacent. Ces effets agissent principalement sur les basses fréquences, donc sont plus susceptibles de se produire lors d'un séisme que lors d'un tir.

II-5 CONTROLE DES VIBRATIONS

L'énergie explosive constitue le moyen le plus performant pour exécuter des excavations en site rocheux. Si les effets négatifs d'un tir de mines ne peuvent pas être éliminés, de nombreuses études ont été menées pour réduire leur impact sur l'environnement.

Le principal objectif de ces études a été de garantir une marge de sécurité suffisante pour assurer la pérennité des ouvrages dans le voisinage de la mine tout en veillant à ne pas pénaliser les conditions économiques de cette dernière.

Afin d'apprécier l'effet des vibrations engendrées par les tirs de mines, des lois empiriques ont été engendrées donnant une estimation des vitesses particulières à une distance donnée et en fonction de la quantité d'explosif utilisée.

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

On en déduit la charge unitaire autorisée en appliquant la loi de CHAPOT. Cette loi caractérise le comportement du massif vis à vis de la propagation des ondes vibratoires. Elle peut varier en fonction de la nature du massif. C'est la loi la plus communément admise actuellement pour l'estimation de la vitesse particulière maximale V_{max} . Elle s'exprime par une relation générale de la forme (*Chapot, 1998*) :

$$V = K Q^a D^{-b}$$

Où V désigne la vitesse particulière maximale (limite) en (m/s) estimé à la distance D en (m) entre le tir et le point de mesure et due à une masse d'explosif Q en (kg) amorcée à un instant donné (charge unitaire instantanée par micro retard).

Les constantes K , a et b représentent l'ensemble des paramètres influençant le niveau des vibrations, allant de la nature du terrain, de celle de l'explosif et du procédé de tir utilisé.

La vitesse particulière maximum se détermine sur tout l'enregistrement. Près du tir, elle est due aux ondes de volume, alors qu'à plus grande distance, ce sont les ondes de surface qui sont prépondérantes.

K , a et b doivent être déterminées expérimentalement par l'intermédiaire de tirs d'essais a varie de 0.5 à 1.2 et b de 1 à 2.5 (*Akel et Martel, 1996*).

Le coefficient K est lié au site. Il varie de quelques centaines à plusieurs milliers d'unités. Il traduit à la fois, les conditions de tir et de site. Il dépend du type de terrain, du type d'explosif utilisé ainsi que du mode de tir. Il est calculé initialement pour chaque site à partir du premier tir, permettant ainsi d'estimer les charges unitaires utilisables en fonction de la distance des ouvrages à protéger. Ce coefficient peut varier d'un tir à l'autre en fonction de la nature du terrain.

'Dowding' propose par exemple $V = 1300 (D / Q^{1/3})^{1.46}$, tandis que pour 'Comeau' $V = K \cdot Q^{0.5} \cdot R^{-1}$. Le coefficient -1 pour la distance suggère que la formule s'applique à des ondes de surface et donc ne peut pas être pour des mesures à faible distance où les ondes de volume sont prépondérantes.

Tout ceci montre bien l'importance des mesures sur sites pour la détermination de ces coefficients pour chaque mine en particulier. Les coefficients **K**, **a** et **b** sont alors déterminés pour chaque terrain en ajustant, par régression linéaire les équations aux mesures.

Récemment d'autres auteurs, au lieu d'utiliser la régression linéaire pour l'estimation de la vitesse particulaire maximale, s'orientent vers de nouvelles méthodes telles que les réseaux de neurones, ou la régression multi variable.

- *Khandelwal and Singh (2006)* compare pour un site donné la vitesse maximale déterminée par les réseaux de neurones à celle estimée à partir de différentes équations basée sur la charge et la distance. De même qu'une analyse de régression multi variable est faite pour l'estimation de la vitesse particulaire maximale et de la fréquence. Dans ce cas outre la charge et la distance, d'autres paramètres sont pris en compte à savoir : La profondeur et le diamètre du trou, la banquette, l'espacement, la force de charge, l'explosif par trou, la distance, le module de Young, le coefficient de poisson, la vitesse de l'onde P, la densité, ...etc.

C'est ainsi que selon l'auteur les estimations donnés par :

- ✓ L'équation d'USBM : $v = K[R/\sqrt{Q_{MAX}}]^{-B}$.
- ✓ L'équation d'Ambraseys-Hendron : $v = K[R/(Q_{MAX})^{1/3}]^{-B}$.
- ✓ L'équation de Langefors – kihlstrom : $v = K[(Q_{MAX}/R^{2/3})^{1/2}]^B$.
- ✓ L'équation de Indian Standard : $v = K[Q_{MAX}/R^{2/3}]^B$.

montrent une moins bonne corrélation avec les mesures que celle basée sur la méthode des réseaux de neurones, (*Fig. I.15*)

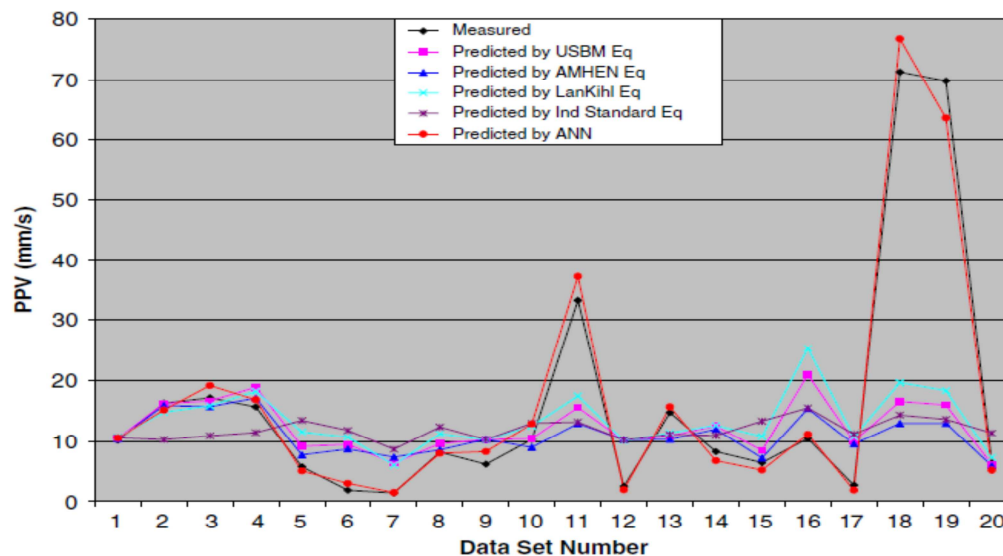


Fig. 14. Comparison of predicted PPV with measured.

Fig. I.15. Comparaison de la "PPV" mesurée avec celle prédite par les différents Modèles

(*Khandelwal M., Singh T.N., 2006*)

Les études montrent que les paramètres les plus importants des vibrations sont: l'amplitude maximale, la fréquence principale et la durée. La gamme des paramètres typiques est montrée dans la table :

Tableau I.5: La gamme des paramètres typique des vibrations (Khandelwal M., Singh T.N.,2005)

Paramètres	Valeurs
Le Déplacement	0.0001 — 10 mm
La vitesse Particulaire	0.001 — 1000 mm/s
L'Accélération Particulaire	10- 100000mm/s ²
Durée de l'impulsion	0.5 — 3 sec
La Longueur de l'onde	30— 1500m
La Fréquence	0.5 —200 Hz
La Contrainte	0.003 — 5x10 ³

II-6 INFLUENCE DE LA FREQUENCE

Le critère du niveau zéro-crête de la vitesse particulaire permet dans de nombreux cas de répondre aux exigences de sécurité. Cependant il a été observé dans certains cas que malgré un niveau de vitesse particulaire élevée, aucun dégât n'a été observé.

De même que dans certains cas de fréquences basses (inférieures à 10 Hz), des dégâts pouvaient apparaître pour des vitesses plus faibles, inférieures à 10 mm/s. L'étude de probabilité d'apparition de dégâts confirme ce phénomène. En effet à vitesse égale des mouvements à basses fréquences correspondent à des déplacements plus importantes ce qui a conduit certains auteurs à adopter une limite en déplacement pour les basses fréquences, (*Chapot, 1988*).

Une évolution importante dans l'évaluation du risque a été la prise en compte des fréquences et l'analyse en fréquences des signaux des vibrations est nécessaire en complément de la vitesse particulaire pour juger du risque d'une vibration.

Les niveaux zéro-crête de vibrations pour garantir la sécurité doivent être relativement faibles sur les composants dont la fréquence est proche de la fréquence propre d'oscillations des structures à surveiller, (*Allard, 1988*).

II-6-1 Le spectre de réponse

Le spectre de réponse utilisé par les sismologues, permet de prendre en compte la totalité du contenu fréquentiel du mouvement du sol (*Chapot, 1988*).

Il s'agit de caractériser un mouvement du sol par la réponse d'un oscillateur simple à un degré de liberté. Soumis à ce mouvement et ce pour des fréquences différentes de l'oscillateur.

Un tel système est caractérisé par une masse, un ressort et un amortisseur.

Le comportement de constructions simples est analogue à celui du modèle précédent, lorsque l'on considère le mouvement en direction : les masses peuvent être considérées comme concentrées au niveau des planchers. Les murs sont comparables au ressort. Et la déformation de l'ensemble se fait avec une dissipation d'énergie correspondante à l'amortissement (*Fig. I.16*).

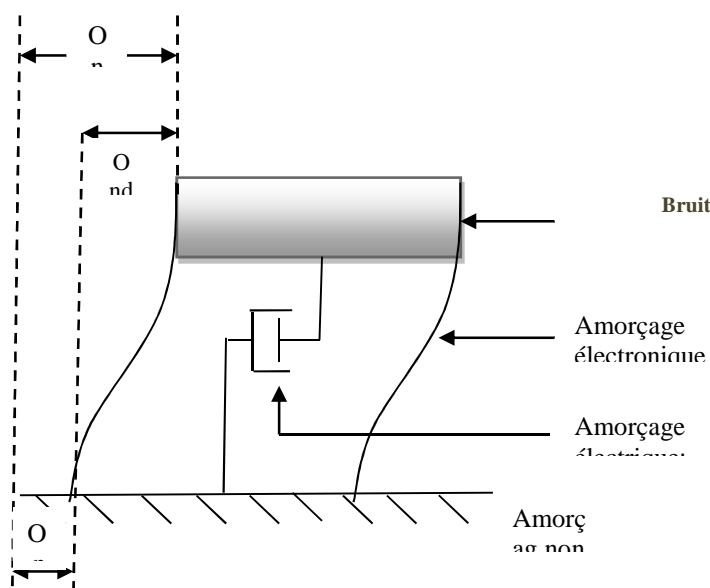


Fig. I.16 : modélisation par une oscillation simple à un degré de liberté (Chapot, 1988)

Les équations de mouvement de ce modèle sont connues et permettent en particulier de calculer le terme \mathbf{d} représentant le déplacement relatif entre le sol (dont le déplacement est \mathbf{U}) et la masse (de déplacement \mathbf{x})

La résolution des équations de base suppose connue la masse en mouvement, la raideur du ressort et le coefficient d'amortissement, paramètres généralement inconnus et difficilement mesurables.

Il est possible de s'en affranchir en utilisant la fréquence propre du système et l'amortissement exprimé sous forme de fraction de l'amortissement critique.

Ces derniers paramètres sont accessibles à partir de l'observation des oscillations libres d'une structure : la fréquence propre du système amorti est directement visible sur un enregistrement, et la diminution de l'amplitude des oscillations successives permet le calcul du pourcentage d'amortissement. De nombreuses ont été faites qui donnent pour les superstructures des fréquences propres de 5 à 10 Hz pour les superstructures et 12 à 20 Hz pour les murs, avec un degré d'amortissement de 2 à 10%.

Il est donc possible de calculer en fonction du temps le déplacement relatif d'un oscillateur simple dont on connaît la fréquence et l'amortissement lorsqu'il est soumis à un mouvement du sol connu par son expression (accélération ou vitesse par exemple) en fonction du temps.

Le déplacement ainsi calculé va passer par une valeur maximum. Si l'on répète le calcul pour diverses fréquences, on obtiendra, en retenant chacune des valeurs un spectre de réponse en déplacement relatif pour une excitation du sol donnée.

On peut passer à des vitesses en multipliant le déplacement par la pulsation correspondante, et l'on obtient ainsi un spectre de réponse dit de « pseudo-vitesse », pour tenir compte du mode de passage du déplacement à la vitesse qui n'est rigoureux que dans le cas de mouvement sinusoïdal.

Ce mode d'appréciation de la nocivité d'une vibration du sol présente plusieurs avantages. Il prend en compte à la fois le contenu fréquentiel de la vibration incidente et l'amplification due aux caractéristiques de la structure. La vitesse considérée est liée à un déplacement relatif, est bien qu'elle soit calculée et non directement mesurée, on conçoit qu'elle puisse être mieux reliée à l'apparition de dégâts qu'une vitesse maximum absolue.

Les études expérimentales réalisées par l'US Bureau Of Mines ont montrées que les mouvements des maisons testées étaient mieux reliés aux spectres de réponses calculées qu'à la vitesse maximum du sol.

A partir de l'enregistrement de sol en un point, il est possible de calculer plusieurs spectres de réponses, correspondant à des structures d'amortissement différents.

- La longueur d'onde des mouvements du sol constitue un paramètre important, puisqu'elle détermine les déphasages entre les divers points d'une structure en contact avec le sol, et donc les mouvements différentiels.

Comme le montre la (Fig. I.17), si la longueur de l'onde est très supérieure à la dimension de l'immeuble, l'ensemble de la structure se déplace dans la même direction ou avec des mouvements différentiels faibles.

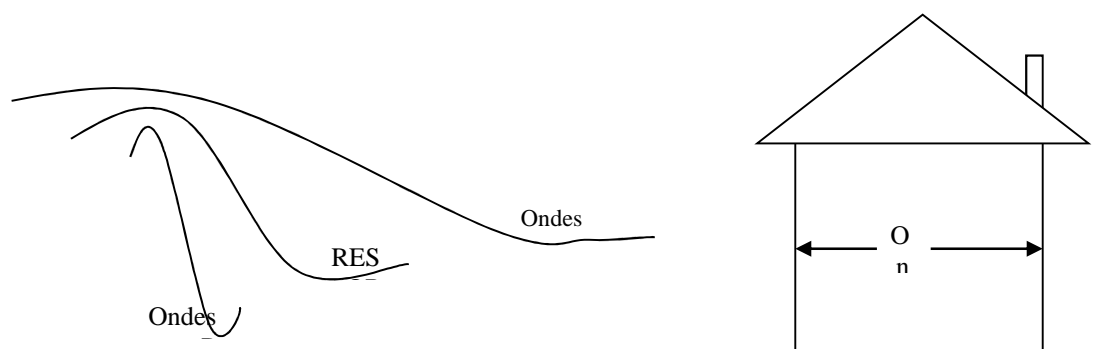


Fig. I.17 : l'influence de la longueur d'onde des vibrations du sol, (Chapot, 1988).

Pour une longueur d'onde égale au double de la longueur de la construction, les mouvements de l'extrémité de celle-ci sont opposés, ce qui crée les mouvements différentiels maximum. La validité du modèle à un degré de liberté proposé dans la méthode du spectre de réponse peut dans ce cas être mise en doute.

Pour des dimensions d'immeuble courantes de 10 à 20 m, ce cas peut être rencontré dans les roches (vitesse de propagation de 1000 à 3000 m/s) pour des fréquences supérieures à 20 Hz. On peut le rencontrer également de très faibles vitesses de propagation (250 à 300 m/s), associées à

des basses fréquences 5 à 10 Hz par exemple. De telle vitesse de propagation ne se rencontrent pas dans les roches massives mais dans les sols meubles, ou dans la zone d'altération superficielle des roches.

- Des études théoriques ont montrées que pour les fréquences supérieures à 20 Hz les déphasages ne constituent pas un problème, la structure n'étant pas excitée dans son ensemble. En dessous de 20 Hz et pour les vitesses de propagation courantes dans la roche, les longueurs d'onde sont suffisamment longues pour les mouvements différentiels restent limités, et le modèle a un degré de liberté est encore acceptable.

Il n'en est par contre, pas de même avec les vitesses très faibles de 200 à 500 m/s. Ce pourra être le cas lorsque les ondes de surface sont prépondérantes. On retrouve la encore des risques plus élevées associées aux basses fréquences.

II-6-2 Prédiction de la fréquence :

Si les divers facteurs déterminant la valeur de la vitesse de vibration ont été largement étudiés, il n'en est pas de même en ce qui concerne la fréquence.

Les expériences montrent que les fréquences dominantes sont beaucoup plus élevées à proximité des tirs à charge unitaire faible (quelques kilos d'explosifs, quelques dizaines de mètres) qu'à quelque distance de tir en carrière (plusieurs dizaines de kilos, quelques centaines de mètres).

On sait que les vibrations de fréquences élevées sont plus amorties par le terrain, ce qui explique que les fréquences associées au maximum de vitesse diminuent lorsqu'on s'éloigne du tir. Il semble d'autre part que les tirs à forte charge provoquent d'avantages de basse fréquences, bien que l'on puisse se demander si c'est en raison du mécanisme du tir ou plus simplement parce que les vibrations se faisant sentir à des distances plus élevées, les oscillations encore visibles sont à plus basse fréquence. Plus encore que pour la détermination des vitesses on peut craindre que les déterminations statistiques faites à partir de mesures sur chantier ne soient biaisées, les observations relatives à de faibles charges étant réalisées à de courtes distances, alors que les effets des tirs importants sont généralement observés à de grandes distances.

Dowding propose une estimation des fréquences à partir d'une prédiction des vitesses, des accélérations et des déplacements, (*Chapot, 1988*)

En se basant sur des mesures expérimentales, et en adoptant une réduction de la distance par la racine cubique de la distance, il parvient aux relations suivantes :

- Déplacements : $d_{mm} = K_d Q^{0.7} D^{-1.1}$
- Vitesse : $V_{mm/s} = K_v Q^{0.48} D^{-1.46}$
- Accélérations : $a_g = K_a Q^{0.28} D^{-1.84}$

Les divers coefficients K s'expriment en fonction de la densité de la roche et de la vitesse de propagations des ondes sismiques dans le terrain traversé.

Si le coefficient pour la vitesse K_v peut être pratiquement considéré comme indépendant de la célérité sismique, il n'en est pas de même pour les coefficients relatifs au déplacement et à l'accélération pour lesquels les valeurs proposées par *Dowding* sont, si l'on adopte une densité constante, de 2.4 :

$$K_d = 81\,000 C^{-1.4} \quad ; \quad K_a = 0.00253 C^{1.45}$$

Ce qui conduit à des valeurs pouvant passer pratiquement du simple au double dans la gamme de la vitesse allant de 2000 à 3000 m/s

Comme pour toutes les formules de prédiction proposées, la dispersion de résultats expérimentaux qui en sont à l'origine est élevée, et la valeur des divers coefficients devrait être ajustée à chaque cas.

Pour la différence observée expérimentalement entre les effets des tirs à faible charge, à court distances et ceux des fortes charges à des distances plus élevées : les fréquences dominantes sont plus basses dans le cas des fortes charges, ce qui peut conduire à des déplacements plus importants, même si la vitesse maximum est moindre (*Chapot, 1988*).

II-7 EFFET DE LA VIBRATION SUR LES STRUCTURES ET LES GENS

Pour évaluer la possibilité de dommages causés par les vibrations aux différentes structures ou gens, on doit se baser sur des critères reconnus.

- La (*Fig. I.18*) représente le critère maximal de vibrations (vitesse de particules en mm/s) admissible ne causant pas de dommage notable, en fonction de la fréquence des vibrations selon l'USBM (bureau des mines de l'Etats-Unis).

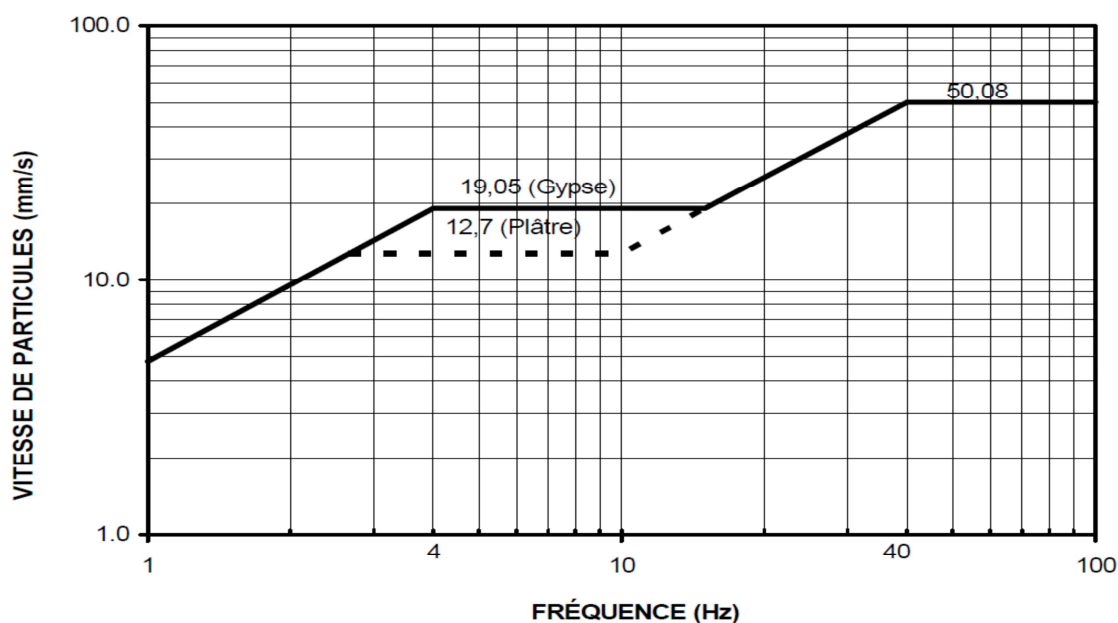


Fig. I.18: Vitesse de particulaire maximum admissible en fonction de la fréquence de vibrations des dynamitages (Courbe limite établie par "USBM", 1980).

Il est important de retenir que les études des effets des vibrations sur l'être humain sont plus subjectives que celles sur les structures. Les gens sont plus sensibles aux vibrations que les structures qu'ils occupent. La réaction des individus aux vibrations d'un abattage varie d'une personne à l'autre.

Les vibrations seront moins ressenties quand on est à l'extérieur qu'à l'intérieur, debout plutôt qu'assis et assis plutôt qu'allongé. Les gens peuvent ressentir des vibrations extrêmement basses qui sont plusieurs fois plus faibles que celles à partir desquelles il peut y avoir des dommages aux structures.

La (Fig. I.19) présente les niveaux de perception des vibrations pour les humains en fonction de différentes fréquences de transmission des ondes dans le sol. En se référant à cette figure, on constate que les vibrations peuvent être perceptibles pour l'être humain à un niveau aussi bas qu'environ 0,3 mm/s.

La vitesse exprimée en mm/s doit toujours être accompagnée d'une fréquence exprimée en Hz.

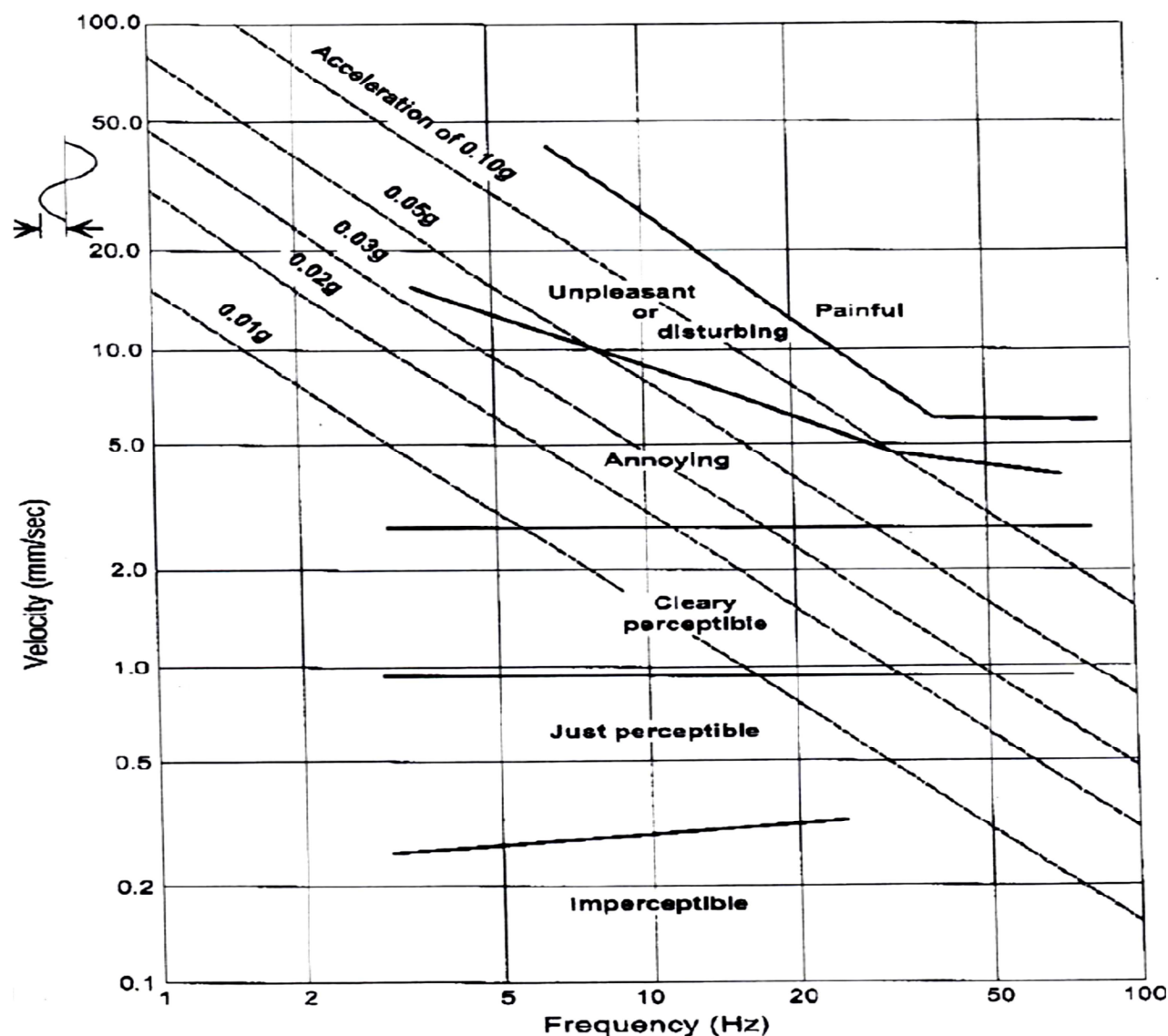


Fig. I.19: Sensibilité des humains aux vibrations verticales selon relher et melster.
(whiffin et leonard, 1971)

II-8 MODELISATION DES TIRS DE MINES :

La modélisation sismique hybride (MSH)

Comme nous avons vu au début de ce chapitre, les paramètres que sont la charge et la distance entre la source explosive et le récepteur permettent d'approcher la notion de vitesse particulière caractérisée par une amplitude de l'ordre de quelque mm/s et de très courte période, de quelque hertz à quelque dizaine de Hertz à travers l'utilisation de loi empiriques.

Cette loi cependant ne tient compte ni de la géométrie ni de la séquence du tir de production.

Le technique de signaux élémentaires, mesures in-situ, appelée **modélisation sismique hybride (MSH)** mise au point par (*Bernasconi, 1996*), permet de prendre en compte les caractéristiques du tir de production.

Depuis plus de dix ans, cette méthode est développée par (*YSO Consultants*) dans le but d'optimiser le rendement des tirs et de fait de réduire les vibrations dues aux tirs sensibles. Il s'agit d'une combinaison « hybride » de mesures in situ et de simulations par ordinateur. Cette méthodologie est applicable pour toute configuration de tir. Ces dernières années de recherches ont surtout portées sur les tirs de carrières et les travaux souterrains. Cette méthode fait désormais l'unanimité des entrepreneurs en associant les impératifs industriels et le respect de l'environnement.

II-8 -1 Le Principe:

Lors de tirs de charges unitaires, des mesures de vibrations sont enregistrées selon différents profils, variant en direction et en distance, de sorte à caractériser les différentes signatures sismiques unitaires de chaque charge type.

Les signaux sismiques produits par la détonation de charges unitaires sont enregistrés dans les conditions de propagation réelles spécifiques du site. Ces enregistrements contiennent les informations relatives d'une part, au mécanisme complexe du rayonnement de l'énergie sismique d'une source explosive artificielle et d'autre part, à l'effet de filtre dû au cheminement de la propagation du signal dans le sol.

Par superposition des signaux vibratoires de charges unitaires décalés dans le temps, il est possible de simuler le phénomène vibratoire d'un tir de mines comportant plusieurs charges.

La (*Fig. I.20*) montre un exemple simple de superposition de 4 signaux identiques réels correspondant à 4 charges dont la détonation est décalée dans le temps de 25 millisecondes.

Dans cet exemple, on remarque que la somme résultant de la superposition des 4 signaux présente une amplitude maximale de vitesse particulière de vibration (5.5 mm/s) sensiblement plus faible que celle enregistrée pour une seule charge (7.8 mm/s) (*Sifre et Bernasconi, 2002*)

En considérant les hypothèses suivantes :

- Toutes les charges individuelles des tirs de production sont identiques aux type de charges unitaires (explosif, charges unitaire par retard ; mode d'amorçage...)
- Les différences de trajectoires en distance entre source et capteur pour les charges individuelles d'un tir de production ne sont pas significatives
- Le délai entre trous est réalisé avec précision.

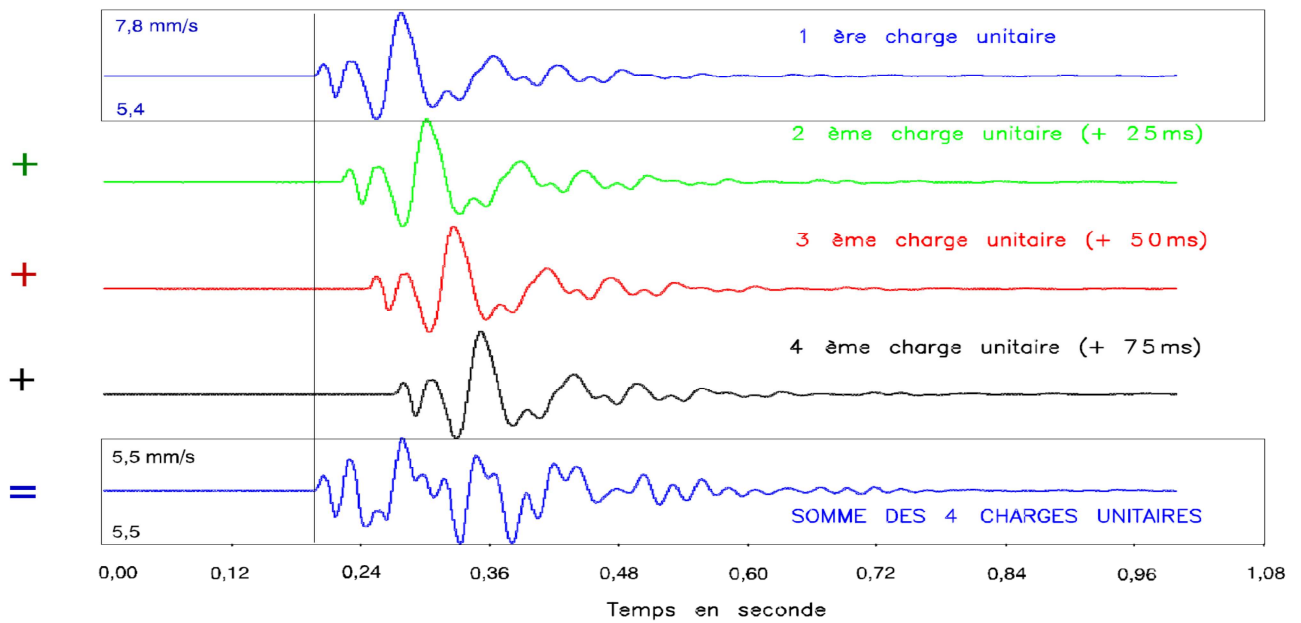


Fig. I.20 : Convolution d'une charge sur 4 trous décalés de 25 ms (YSO Consultants, 2006)

Le schéma de principe de la procédure de calcul d'une modélisation sismique hybride est représenté ci-dessous.

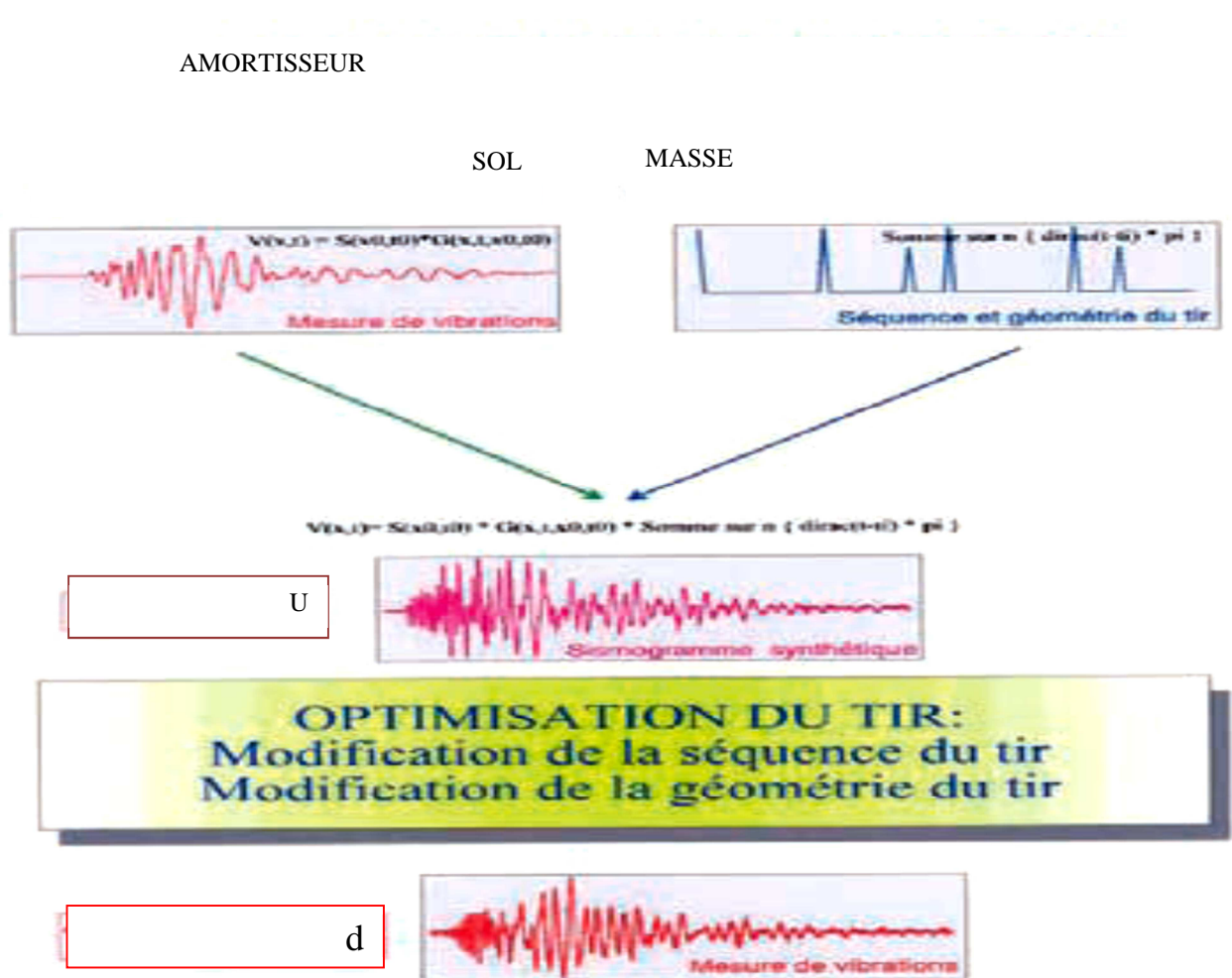


Fig. I.21 : Principe de modélisation sismique hybride (SYNDUEX, 2008).

Par superposition du signal d'une charge unitaire avec une fréquence d'amorçage et une géométrie du tir, on simule sur ordinateur les vibrations produites par un tir de production « synthétique » de plusieurs charges. En faisant varier systématiquement la séquence de mise à feu dans la modélisation, il est possible de déterminer les intervalles optima entre date de détonation des différentes charges.

Des milliers de simulations de séquences sont ainsi testées pour une multi modélisation sismique ; la séquence du tir réel de production est choisie pour validation, parmi celles présentant les plus faibles énergies sismiques.

Les tirs industriels développés selon cette conception permettent d'établir que les meilleurs résultats sont obtenus lorsque la séquence de mise à feu est réalisée avec une bonne précision, ce qui implique un choix judicieux du système d'initiation.

Dans la pratique, il ressort qu'au minimum d'énergie sismique ainsi obtenu dans l'environnement correspond un optimum d'efficacité des énergies explosives dans le tir.

II-8 -2 Théorie:

Si on considère un volume suffisamment grand autour d'un tir de mines, à l'extérieur, à un instant donné les déformations du milieu qui sont induites sont suffisamment petites pour pouvoir les assimiler à des déformations linéaires quasi-statiques. Le caractère linéaire du système ainsi défini permet de résoudre sa réponse quand il est soumis à une excitation quelconque, à partir d'une excitation élémentaire type impulsion de Dirac (*Bernasconi et Sifre, 1996*)

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{f} * \mathbf{G}$$

- Où : \mathbf{G} sont les fonctions de GREEN et \mathbf{f} l'excitation à la source

Les mesures fournissent des « signatures » sismiques d'une charge individuelle éloignée et représentative du tir de production:

$$\mathbf{v}^0(\mathbf{x}, t) = \mathcal{S}(\xi^0, \tau) * \mathbf{G}^0(\mathbf{x}, t, \xi^0, \tau)$$

- $\mathbf{v}^0(\mathbf{x}, t)$: signal de la vitesse particulière du tir unitaire
- ξ^0 : coordonnées de la source du tir unitaire
- τ : temps de référence de tir
- $\mathcal{S}(\xi^0, \tau)$: signal de la source du tir unitaire
- $*$: est l'opération de convolution

Tir pour m charges (ou nombre total de détonation) d'indice i :

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}, t) = \sum_i^m [\mathcal{S}(\xi^i, \tau) * \mathbf{G}^i(\mathbf{x}, t; \xi^i, \tau) * \Sigma(t - t^i)]$$

- ξ^i : coordonnées de trou d'indice i
- t^i : délai

On suppose alors que chaque trou est identiquement chargé, c.à.d. que la source est identique quelque soit le trou, et si le capteur est suffisamment loin de la source, les fonctions de green sont identiques.

Les calculs de MSH sont validés par le tir de production mis en œuvre dans les conditions ayant donné les meilleurs résultats dans les calculs.

D'une façon générale, les niveaux sismiques des tirs optimisés par MSH, sont du même ordre de grandeur que les amplitudes de la vitesse particulière pondérée enregistrées pour les tirs de charges unitaires, alors que les tirs classiques de production sont eux en général d'un niveau plus important.

La (Fig. I.22) illustre globalement les principaux paramètres constituant d'un tir; parmi ceux qu'il est possible de maîtriser, la performance des charges explosives est une fonction essentielle visant à garantir des mécanismes particuliers dans le tir. Cette performance est, de plus, variable en fonction de la géométrie et des conditions géomécaniques du massif.

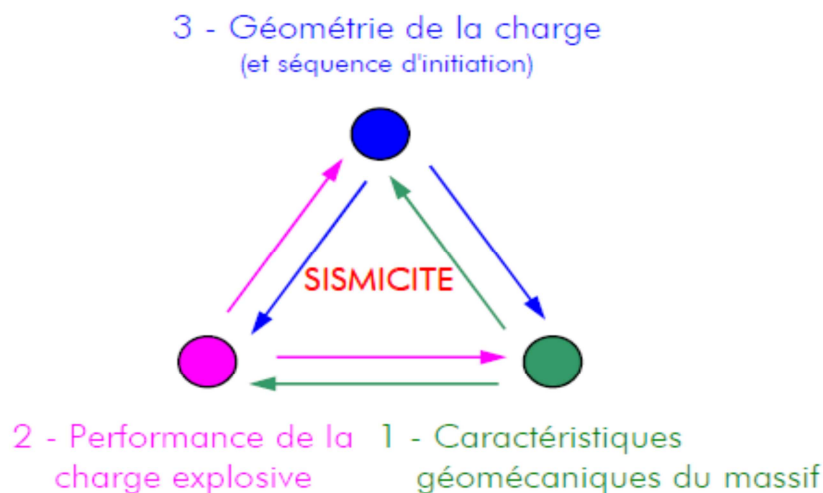


Fig. I.22 : principaux paramètres constituant d'un tir (Bernasconi, Bequet et Sifre, 2002)

II-9 CONCLUSION

Les tirs en sites sensibles (zones urbaines, proximité d'ouvrages, etc...) sont des tirs dans lesquels l'environnement proche ne peut supporter qu'un faible niveau de vibrations. Ce niveau est défini par la vitesse de propagation de la vibration dite aussi vitesse particulière, exprimée en mm par seconde et la fréquence associée exprimée en Hertz

Pour une évaluation correcte des risques encourus par les structures, l'approche classiquement utilisée et qui se base sur les équations de style « Chapot » s'avère insuffisante. Les études actuelles montrent l'importance de se tourner vers des méthodes numériques comme par exemple la méthode sismique hybride, (MSH).

Cela implique cependant une bonne connaissance la fonction source qui caractérise le tir, et de la fonction de green qui représente le milieu.

CHAPITRE 2:

Modélisation des Tirs de Mine : MineSeis

I- INTRODUCTION :

Une estimation au préalable des vibrations et de leurs effets environnementaux est essentielle avant tout projet d'exploitation minière. Si les équations empiriques classiques qui lient la vitesse particulière maximale à la charge et la distance restent largement utilisées, de nouvelles approches, même si elles n'excluent pas les mesures in-situ, consistent en une modélisation des vibrations liées aux tirs de mines.

Les mouvements enregistrés dans un sismogramme représentent à la fois, les effets de la propagation et les effets de la source.

La modélisation, pour décrire un mouvement sismique doit donc comporter:

- Une description de la source sismique.
- Les équations qui traduisent la propagation du mouvement, une fois celui-ci initié.
- La théorie qui lie la source à la solution de l'équation du mouvement.

L'approche pour l'étude des vibrations liées aux tirs de mines est identique à celle utilisée en sismologie. L'idée est que les séismes (également les explosions) sont des phénomènes non élastiques pour lesquelles on cherche à trouver un phénomène équivalent dans la théorie de l'élasticité. Cet équivalent est connu pour le nom de forces ou de moments équivalents (*Nicholas, 2003*).

Les équations classiques relatives aux ondes élastiques restent à ce jour le meilleur modèle simplifié pour l'analyse du phénomène vibratoire engendré par les tirs de mines.

En effets pour un milieu élastique linéaire, ce problème est bien connu est a une solution bien défini. Les conditions à la source et celles relatives au milieu définissent de manière univoque le mouvement.

Le mouvement enregistré $u_i(x,t)$ s'exprime comme la convolution de trois termes : un terme de source $S(t)$, un terme de propagation et d'effet de site représentée par la fonction de Green $G(t)$ et un terme qui traduit la réponse instrumentale $I(t)$, (*Fig. II.1*).

$$u_i(x,t) = S(\xi,t) * G_i(t;\xi,x) * I(t) \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

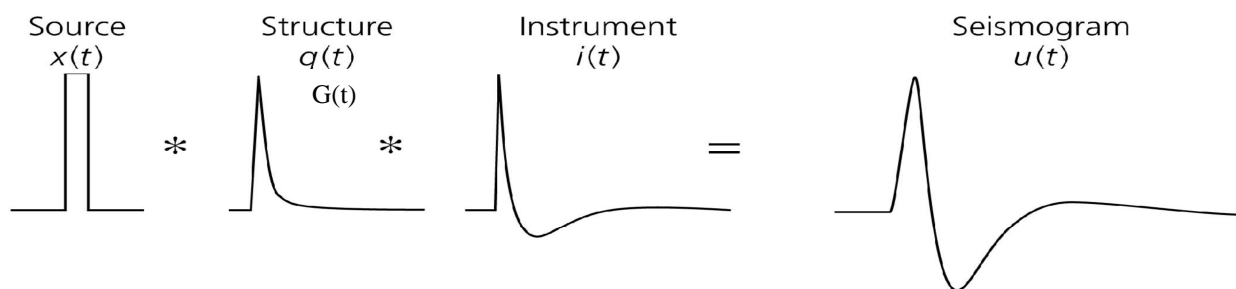


Fig. II.1 : schéma montrant la convolution des différents éléments qui contribue au sismogramme

II- THEORIE ELASTIQUE

Dans l'hypothèse d'une terre élastique homogène isotrope, l'équation du mouvement est donnée par la relation:

$$\rho \ddot{u}_i = f_i + \tau_{ji,j} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Où: τ_{ji} : Représente les tenseur de contrainte .

\ddot{u}_i : Est l'accélération du mouvement.

f_i : La force dans la direction i.

ρ : La densité.

De même que l'équation de l'élasto-dynamique s'écrit (*Loi de Hooke*) :

$$\tau_{ji} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2 \mu \varepsilon_{ij} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

avec $\varepsilon_{ij} = 1/2 (u_{ij} + u_{ji})$: est le Tenseur des déformations.

δ_{ij} : Symbole de Kronecker (1 si $i=j$; 0 si $i \neq j$)

λ et μ : les constantes élastiques de Lamé.

La solution de l'équation du mouvement sans second nombre s'écrit comme la combinaison de deux termes, les potentiels d'Helmholtz Φ et Ψ tel que, (*C. Nicholas, 2003*):

$$\vec{u} = \vec{\nabla} \Phi + \vec{\nabla} \wedge \Psi = \overrightarrow{grad} \Phi + \overrightarrow{rot} \Psi = u_P + u_S \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

Avec : $\vec{\nabla} \cdot \vec{\Psi} = 0$

Où : Equation des ondes P : $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \alpha^2 \nabla^2 \Phi \quad |\alpha^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \quad \dots\dots\dots$
 (2.5)

Equation des ondes S : $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \beta^2 \nabla^2 \Psi \quad |\beta^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad \dots\dots\dots$
 (2.6)

Sachant que : α, β sont les vitesses des ondes P et S respectivement.

Dans le cas général on a :

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \frac{\Phi_f}{\rho} + \alpha^2 \cdot \nabla^2 \Phi \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

Et

$$\frac{\partial^2 \vec{\Psi}}{\partial t^2} = \frac{\vec{\Psi}_f}{\rho} + \beta^2 \cdot \nabla^2 \vec{\Psi} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

Φ_f et $\vec{\Psi}_f$ Représente la décomposition d'Helmholtz de la force \vec{f}

$$\vec{\Psi}_f = -\vec{\nabla} \wedge \vec{W} \quad \text{et} \quad \Phi_f = \vec{\nabla} \vec{W}$$

\vec{W} représente le champ de potentiel tel que : $\nabla^2 \vec{W} = \vec{f}$

Pour une force ponctuelle d'amplitude $X_0(t)$ et de direction x_1 , les équations des ondes sont :

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = -\frac{X_0(t)}{4\pi\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{1}{|x|} \right) + \alpha^2 \nabla^2 \Phi \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

Et

$$\frac{\partial^2 \vec{\Psi}}{\partial t^2} = \frac{X_0(t)}{4\pi\rho} \cdot \left(0, \frac{\partial(1/x)}{\partial x_3}, -\frac{\partial(1/x)}{\partial x_2} \right) + \beta^2 \cdot \nabla^2 \cdot \vec{\Psi} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

Ce sont des équations simples qui permettent d'obtenir de façon exacte la fonction de Green, qui représente le déplacement associé à une force impulsionnelle.

III- THEOREME DE REPRESENTATION :

Le théorème de représentation consiste à définir pour une source quelconque le déplacement en un point de l'espace et à un instant t à partir du déplacement produit par la source la plus simple possible c'est-à-dire une impulsion unitaire unidirectionnelle localisée de manière précise dans le temps et dans l'espace. Ainsi, si la force impulsionnelle appliquée est de la forme:

$$\vec{g}_i(\vec{x}, t) = \delta_{in} \delta(\vec{x} - \vec{\xi}) \delta(t) \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

Le déplacement associé, solution de l'équation du mouvement est:

$$\vec{v}_i(\vec{x}, t) = G_{in}(\vec{x}, t; \vec{\xi}, 0)$$

$G_{in}(\vec{x}, t; \vec{\xi}, 0)$ correspond à la fonction de Green et dépend des coordonnées de la source $(\vec{\xi}, t_0)$ et du récepteur (x, t) .

Pour une force plus générale, le théorème de représentation permet d'écrire (Aki et Richards, 2002):

$$\begin{aligned} \vec{u}_n(\vec{x}, t) = & \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \iiint_V \vec{f}_i(\vec{\xi}, \tau) G_{ni}(\vec{r}, t - \tau; \vec{\xi}) dV(\vec{\xi}) \\ & + \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \iint_S G_{ni}(\vec{r}, t - \tau; \vec{\xi}) \vec{T}_i(\vec{\xi}, \tau) dS(\vec{\xi}) \quad \dots\dots\dots (2.12) \\ & - \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \iint_S \vec{u}_i(\vec{\xi}, \tau) c_{ijkl} n_j [G_{nk,l} + G_{nl,k}](\vec{r}, t - \tau; \vec{\xi}) dS(\vec{\xi}) \end{aligned}$$

C_{ijkl} : Tenseur d'ordre 4, qui caractérise le milieu et qui pour un milieu élastique isotrope homogène se ramène aux constantes élastiques de Lamé λ et μ .

T : représente la force de contact (pression) définie par : $T_i = \tau_{ij} n_j$

Le théorème de représentation permet d'exprimer les déplacements en tout point du milieu en fonction des forces volumiques appliquées à la source, des conditions aux limites appliquées sur la surface entourant la source et des fonctions de Green du milieu.

Le tenseur de Green vérifie les propriétés de réciprocity temporelle et spatiale c'est-à-dire que l'on peut inverser la source et le récepteur.

Le calcul de la fonction de Green élasto-dynamique est un problème difficile d'une manière générale.

La fonction de Green traduit la réponse du milieu. Elle est définie de façon unique par les conditions aux limites (Fig. II.2).

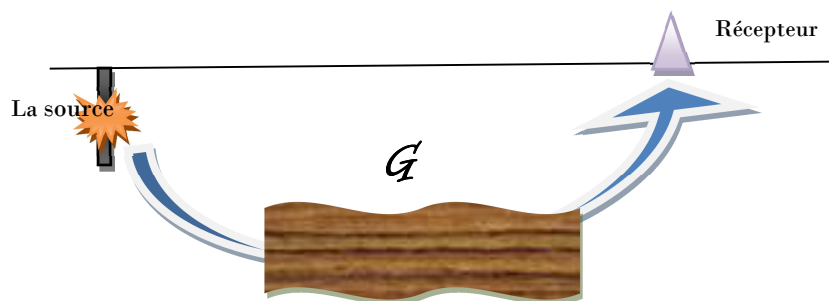


Fig. II.2: représentation de la réponse du milieu par la fonction de Green (Hagos L. Z., 2006)

Une autre formulation du théorème de représentation est :

$$u_i(\mathbf{x}, t) = \int_0^t \int_V G_{ij,h}(\mathbf{x}, t | \xi, t_0) * M_{jh}(\xi, t_0) dV dt \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Où: x est le point d'observation au temps t .
 y est le point de la source au temps t_0 .
 V est le volume de la source.

G_{ij} sont les fonctions de Green qui traduisent les effets de propagation du milieu.

M_{jk} est le tenseur de densité de moment sismique qui caractérise la source.

L'équation précédente s'écrit encore (Aki et Richards, 2002):

$$u_n(x, t) = M_{kl} * G_{nk,l} \dots\dots\dots (2.14)$$

C'est-à-dire que le déplacement est défini comme une convolution du tenseur des moments et des dérivées du tenseur de Green.

IV- DESCRIPTION DES SOURCES SISMIQUES:

On distingue les sources liées aux failles et les sources volumiques, cas d'une explosion.

La description mathématique des sources sismiques à été faite soit en termes de force appliquée à des points du milieu contenant la source ou alors en termes de discontinuités du déplacement ou des déformations à travers la surface qui définit la source.

Les deux approches peuvent être regroupées si on peut définir des forces de volumes équivalentes à une discontinuité de déplacement ou de déformation.

Le tenseur du moment sismique permet la description des sources. Il représenté une description mathématique de ces forces équivalentes ou des moments équivalents (Fig. II.3).

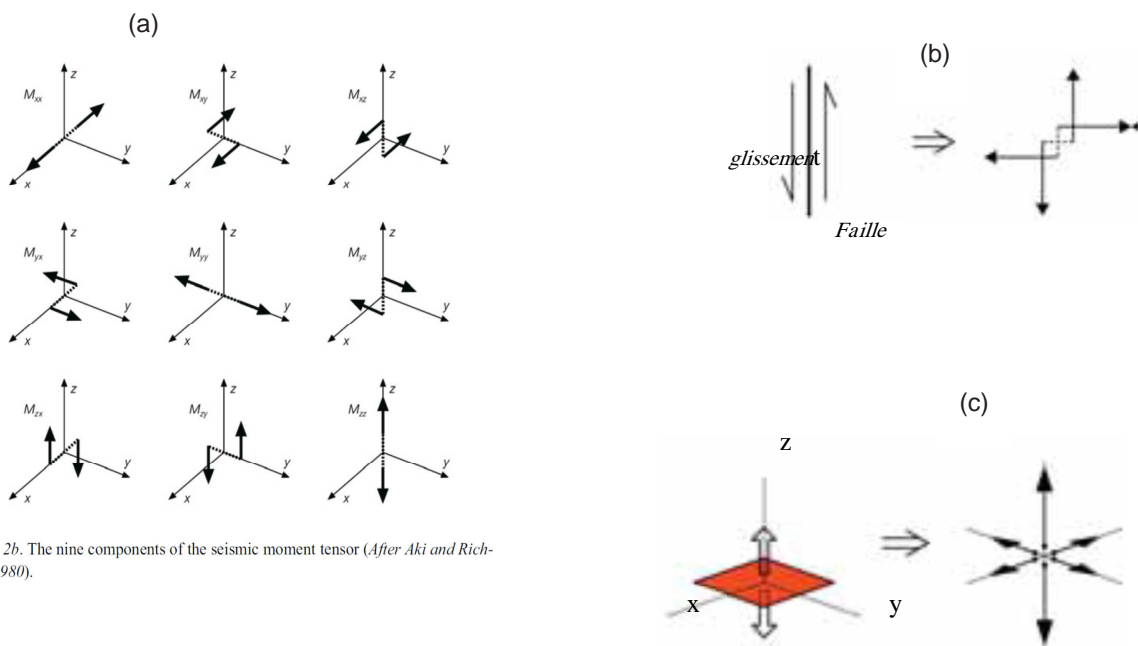


Figure 2b. The nine components of the seismic moment tensor (After Aki and Richards, 1980).

Fig. II.3 : représentation du tenseur des moments (Aki & Richard, 2002).

- (a) Les neuf couples possibles associés aux composantes du tenseur des moments sismique décrivant le système de forces équivalentes d'une source sismique dans le sol.
- (b) Le glissement sur une faille peut être décrit par une superposition de deux couples de forces dans laquelle chaque couple est représenté par une paire de forces décalées perpendiculairement à la force. Les sources associées au glissement sur une faille possèdent ainsi un système de forces équivalentes sous forme d'un double couple composé de quatre forces.
- (c) L'ouverture d'une fracture en tension à une représentation sous forme de trois dipôles orthogonaux où chaque dipôle comporte une paire de forces décalées dans le sens de la force.

On a ainsi par exemple pour une source ponctuelle de glissement le tenseur des moments qui s'écrit :

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & M_0 \\ 0 & 0 & 0 \\ M_0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{Tel que : } M_0 = \mu S D.$$

Où M_0 : moment sismique
 S : surface de la faille
 D : déplacement.

Et pour une explosion

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} (\lambda + \frac{2}{3}\mu)\Delta V & 0 & 0 \\ 0 & (\lambda + \frac{2}{3}\mu)\Delta V & 0 \\ 0 & 0 & (\lambda + \frac{2}{3}\mu)\Delta V \end{pmatrix}$$

ΔV : variation relative de volume

Quand les longueurs d'onde des ondes sismiques observées sont beaucoup plus longues que l'ampleur spatiale de la source, la source peut être approchée par une source ponctuelle et le système de force représenté par les composants de moment-tenseur et de simple-force est localisé en ce moment.

Retrouver la fonction source du mouvement sismique consiste à déconvoluer le mouvement sismique enregistré en surface par la fonction de Green Source-Station. Or cette opération est souvent difficile à réaliser pour la simple raison que la fonction de Green est souvent inconnue. En effet, l'intérieur de la terre est un milieu complexe, hétérogène, dont il est difficile de déterminer la structure fine. Même s'il nous est possible d'en déterminer la structure grossière, la précision, avec laquelle on connaît le milieu, est insuffisante pour voir modéliser correctement sa fonction de Green.

V- MINESEIS :

V-1 Introduction:

MineSeis a été développé pour modéliser les tirs de mines et permettre de comprendre et de caractériser l'effet de la source sur le spectre sismique, afin de pouvoir différencier les tirs de mines des tirs nucléaires clandestins. Un des aspects importants de cette modélisation est celui de la source

Les tirs à l'explosif sont modélisés comme une superposition linéaire de plusieurs sources identiques, chacune correspondant à un tir unique, et qui présentent entre elles un retard dans le temps.

Le tir élémentaire est modélisé comme une combinaison d'une source isotrope explosive et d'une source qui traduit l'effet de la masse arrachée par l'exposition et qui de part son impact sur le sol, provoque elle aussi des vibrations, cette seconde source est dénommée « *Spall source* ».

C'est le modèle de *Mueller et Murphy* et une modification de celui de (*Anandkrishnan et al, 1997*) qui sont utilisés pour modéliser respectivement l'explosion et l'effet du « *Spall* ».

Le délai représente à la fois le retard dû au tir et celui dû à la localisation du tir.

V-2 Formulation:

V-2-1 Fonction source d'une explosion

Le modèle utilisé pour représenter la source est celle de la fonction d'une pression à symétrie sphérique agissant dans un rayon élastique, c'est à dire, le rayon à partir duquel le milieu commence à se comporter de manière élastique. La solution dans le domaine fréquentiel se déduit aisément à partir de l'équation des ondes et *la loi de Hooke*. On suppose qu'il existe une surface sphérique entourant le point de détonation en dehors de laquelle la théorie de déformation infinitésimale est applicable. En désignant le rayon de la sphère comme le rayon élastique r_{el} , puis pour distances radiales $r \geq r_{el}$, l'équation du mouvement se réduit à l'équation des ondes à une dimension dans le potentiel de déplacement, ψ .

La force qui représente la source explosive isotrope s'exprime dans le domaine de la fréquence par (*Yang, 1997*) :

$$\bar{\psi}(\omega) = \frac{r_{el} v_p^2}{4\rho v_s^2} \left[\frac{(P_{0s} - P_{0c})\alpha v_p/r_{el} + P_{0c}\pi\delta(\omega)}{\left(\alpha v_p/r_{el}\right)^2 + \omega^2} + P_{0c}\pi\delta(\omega) \right] - i \left[\frac{(P_{0s} - P_{0c})\omega}{\left(\alpha v_p/r_{el}\right)^2 + \omega^2} - \frac{P_{0c}}{\omega} \right] \dots\dots\dots (2.15)$$

$$\left(\frac{v_p}{r_{el}} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{v_p}{v_s} \right)^2 \omega^2 + i \frac{v_p}{r_{el}} \omega$$

Où v_p est la vitesse des ondes P au niveau de la source, et v_s est la vitesse des ondes S au niveau de la source,

P_{0s} est la pression maximale de choc au rayon élastique, et P_{0c} est la pression statique au rayon élastique,

ρ est la densité du milieu, α est la constante de diminution de la pression, r_{el} est la rayon élastique de la source, et ω est la fréquence,

La pression maximal P_{0s} est définie par :

$$P_{0s} = 1.5\rho gh$$

Où: g : l'accélération gravitationnelle

h (m): profondeur de la source

La pression statique est définie par :

$$P_{0c} = \frac{4\mu}{3} d \left(\frac{r_c}{r_{el}} \right)^3$$

Où: μ : le module du cisaillement

d : un facteur de compaction moyen à charge (il est de 0,6 pour les tuf et la rhyolite).

r_c : est le rayon de la cavité de la source :

$$r_c = 16.3 W^{0.29} E^{0.62} \rho^{-0.24} \mu^{-0.67} h^{-0.11}$$

Où W (kt) et E sont respectivement le rendement de la source et le module d'Young.

Les valeurs moyennes du facteur $(E^{0.62} \rho^{-0.24} \mu^{-0.67})$ sont pour:

Le granit : 1,513 ; sel : 1,721 ; rhyolite : 1,758 ; tuf : 1,927 ; et alluvions : 1,761.

le rayon élastique r_{el} est lié à la charge W (kt) et à la profondeur de la source par la relation :

$$r_{el} = 1999 \left(\frac{A}{A_{cal}} \right)^{1/2.4} \frac{W^{1/3}}{(\rho h)^{1/2.4}}$$

Où A est un constant dépend le milieu

A/A_{cal} : moyen à charge (c'est l'unité de tuf et de rhyolite)

$\psi(t)$, la transformée de Fourier inverse de $\psi(w)$ représente le potentiel de déplacement réduit.

Pour une source ponctuelle $\psi(t)$ est lié au moment de la source par :

$$M(t) = 4\pi\rho v_p^2 \psi(t) \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

V-2-2 Fonction source pour le spall:

L'effet de la chute des masses arrachées par l'explosion est représenté par une force verticale f_z et une force horizontale f_h , tel que, (Fig. II.5) :

$$\begin{aligned} f_z &= f_{z1} + f_{z2} + f_{z3} \\ &= \{m_T V_{0z} \delta(t)\} - \\ &\quad - \{m_T g [H(t) - H(t - T_s)]\} + \\ &\quad + \{m_T V_{1z} \delta(t - T_s)\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

$$f_h = m_T V_h [\delta(t) - \delta(t - T_s)]$$

Où: m_T : la masse éjectée (spall)

V_{0z} : la vitesse verticale initiale de la masse

V_{1z} : la vitesse verticale d'impact de la masse

v_z : la vitesse horizontale de la masse

V_h : vitesse horizontale de la masse

T_s : "dwell time" temps que s'écoule entre l'éjection de la masse et son impact sur le sol

$\delta(t)$: fonction de Dirac ; et $H(t)$: fonction de Heaviside

Tel que :

$$V_{1z} = (V_{0z}^2 + 2h_{ff}g)^{1/2} \quad \text{et} \quad T_s = (V_{0z} + V_{1z})/g$$

h_{ff} est la variation de hauteur de la masse.



Fig. II.5: les fonctions sources : l'explosion, les composants verticaux et horizontales liées à l'effet de la masse (Anandakrishnan S., Taylor R., Stump W., 1996).

Eu réalité le phénomène de l'extraction et de l'impact de la masse sont moins rapides qu'un Dirac. Il doit être tenu compte de phénomènes plus complexes tel que celui de l'expansion de la masse et de l'effondrement des vides lors de l'impact.

Une version moins lisse du modèle est donnée par (Stump, 1985, Equation 5):

$$\begin{aligned}
 * f_z &= f_{z1} + f_{z2} + f_{z3} \\
 &= \left\{ m_T V_{0z} \left(\frac{30t^4}{T_{sr}^5} - \frac{60t^3}{T_{sr}^4} + \frac{30t^2}{T_{sr}^3} \right) [H(t) - H(t - T_{sr})] \right\} - \dots\dots\dots (2.18) \\
 &\quad - \left\{ m_T g \left[\left(\frac{6t^5}{T_{sr}^5} - \frac{15t^4}{T_{sr}^4} + \frac{10t^3}{T_{sr}^3} \right) [H(t) - H(t - T_{sr})] + [H(t - T_{sr}) - H(t - T'_s)] + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \left(1 - \left(\frac{6(t - T'_s)^5}{T_{sf}^5} - \frac{15(t - T'_s)^4}{T_{sf}^4} + \frac{10(t - T'_s)^3}{T_{sf}^3} \right) \right) [(H(t - T'_s) - H(t - T'_s - T_{sf}))] \right] \right\} + \\
 &\quad + \left\{ m_T V_{1z} \left[\frac{30(t - T'_s)^4}{T_{sf}^5} - \frac{60(t - T'_s)^3}{T_{sf}^4} + \frac{30(t - T'_s)^2}{T_{sf}^3} \right] [H(t - T'_s) - H(t - T'_s - T_{sf})] \right\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 * f_h &= f_{h1} + f_{h2} \\
 &= \left\{ m_T V_h \left(\frac{30t^4}{T_{sr}^5} - \frac{60t^3}{T_{sr}^4} + \frac{30t^2}{T_{sr}^3} \right) [H(t) - H(t - T_{sr})] \right\} - \dots\dots\dots (2.19) \\
 &\quad - \left\{ m_T V_h \left[\frac{30(t - T'_s)^4}{T_{sf}^5} - \frac{60(t - T'_s)^3}{T_{sf}^4} + \frac{30(t - T'_s)^2}{T_{sf}^3} \right] [H(t - T'_s) - H(t - T'_s - T_{sf})] \right\}
 \end{aligned}$$

Où : T_{sr} représente la largeur de l'impulsion initiale d'extraction de la masse.

T_{sf} représente la largeur l'impulsion d'impact.

Et $T_{sf} \geq T_{sr} ; T'_s = T_s - (T_{sf} - T_{sr}) / 2 > 0.$

-Les conditions $T_{sr} \leq T_s$ et $T'_s > 0$ imposent des contraintes sur T_{sr} et T_{sf} .

Un cas particulier est celui où $V_h = 0$ et $V_{Iz} = V_{0z}$ Correspond au modèle des tirs pour lesquels el n'ya pas de chute de masse.

La force f_s du à l'effet de la masse peut représentée par le tenseur du moment $M_s(t)$, (x. yang, 1997)

$$f_s(t) = \rho h \frac{d^2}{dt^2} [M_s(t)] \dots\dots\dots (2.20)$$

Pour les tirs de mines en surface h représente la banquette

V-2-3 Tenseur des moments

En utilisant l'équation générale (Aki et richard, 2002) qui donne le tenseur de densité du moment sismique :

$$m_{pq} = [u_i] \lambda_j C_{ijpq} \dots\dots\dots (2.21)$$

Avec : $[u_i]$ discontinuité des de déplacement à la source.

λ_j normale à la surface de la source.

Ainsi pour une explosion isotrope on a $Me(t) \cdot I$, avec :

$$Me(t) = 4\pi \rho v_p^2 \psi(t) \quad , \quad I : \text{matrice d'identité}$$

Taudis que l'effet de la masse est représentée par sa composante verticale :

$$M_{sz}(t) \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda + 2\mu \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.22)$$

Et sa composante horizontale :

$$M_{sh}(t) \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu \cos^2 \phi & 2\mu \sin \phi \cos \phi & 0 \\ 2\mu \sin \phi \cos \phi & \lambda + 2\mu \sin^2 \phi & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.23)$$

Où:

Φ représenté l'angle (α) entre la direction mouvement horizontale de la masse et le Nord

M_{sz} et M_{sn} sont calculées avec l'équation (2.20), avec respectivement f_z et f_n .

V-2-4 Calcul du sismogramme synthétique:

Les composantes du sismogramme synthétique s'expriment dans le domaine des fréquences (Yang X., 1997)

$$\begin{aligned} \blacksquare \quad u_t = & -M_{11} \left[\frac{SS_t \sin 2\theta}{2} \right] + \dots\dots\dots (2.24) \\ & + M_{12} [SS_t \cos 2\theta] + \\ & + M_{22} \left[\frac{SS_t \sin 2\theta}{2} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \blacksquare \quad u_r = & M_{11} \left[\frac{SS_r \cos 2\theta}{2} + \frac{EX_r + LD_r}{3} \right] + \dots\dots\dots (2.25) \\ & + M_{12} [SS_r \sin 2\theta] - \\ & - M_{22} \left[\frac{SS_r \cos 2\theta}{2} - \frac{EX_r + LD_r}{3} \right] + \\ & + M_{33} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{EX_r}{2} - LD_r \right) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \blacksquare \quad u_z = & M_{11} \left[\frac{SS_z \cos 2\theta}{2} + \frac{EX_z + LD_z}{3} \right] + \dots\dots\dots (2.26) \\ & + M_{12} [SS_z \sin 2\theta] - \\ & - M_{22} \left[\frac{SS_z \cos 2\theta}{2} - \frac{EX_z + LD_z}{3} \right] + \\ & + M_{33} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{EX_z}{2} - LD_z \right) \right] \end{aligned}$$

Avec : θ : l'azimut du récepteur.

u_r , u_t et u_z sont respectivement la composante radiale, transversale et verticale.

SS, EX, LD sont les fonctions de green.

Dans son programme MineSeis (Yang X., 1998) considère la même fonction pour tous les tirs, la distance d'enregistrement étant grande devant la distance entre les tirs.

Pour de faibles distances d'enregistrement, cette hypothèse devra être évaluée. On notera que la même approximation est faite pour la méthode sismique hybride.

La différence essentielle entre la méthode sismique hybride et celle utilisée dans MineSeis réside donc ce dernier cas dans la prise en compte de l'effet des masses éjectés.

V-2-5 Superposition des tirs :

Pour calculer le sismogramme synthétique dû à l'ensemble des tirs d'une séquence de tir, il faut tenir compte à la fois du délai inhérent à la séquence de tir mais également de celui lié à une localisation différente pour chaque tir.

On a alors le déplacement total qui s'écrit :

$$U(t) = \sum_{i=1}^P A_i u(t - T_i - \tau_i) \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

Où :

A_i : est un facteur d'échelle ;

u : sismogramme synthétique pour un tir;

P : le nombre total de trous du plan de tir;

T_i : le délai entre $i^{\text{ème}}$ trou et le trou de référence (premier trou) ;

Et τ_i est la différence du temps de trajet de l'onde P entre le $i^{\text{ème}}$ trou et le trou de référence tq:

$$\tau_i = \frac{r_0 \sin \chi}{v_{p0}} \left[\left(1 + \frac{r_i^2}{r_0^2} - \frac{2r_i \cos \xi_i}{r_0} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

Tq : r_0 est la distance entre le récepteur et le trou de référence ;

r_i est la distance entre le $i^{\text{ème}}$ trou et le trou de référence;

v_{p0} est la vitesse des ondes P , au niveau de la source ;

χ est l'angle d'incidence du rai au point de trou.

ξ_i est l'angle entre la ligne reliant le $i^{\text{ème}}$ trou et le trou de référence, et la ligne reliant le récepteur et le trou de référence; (Fig. II.6).

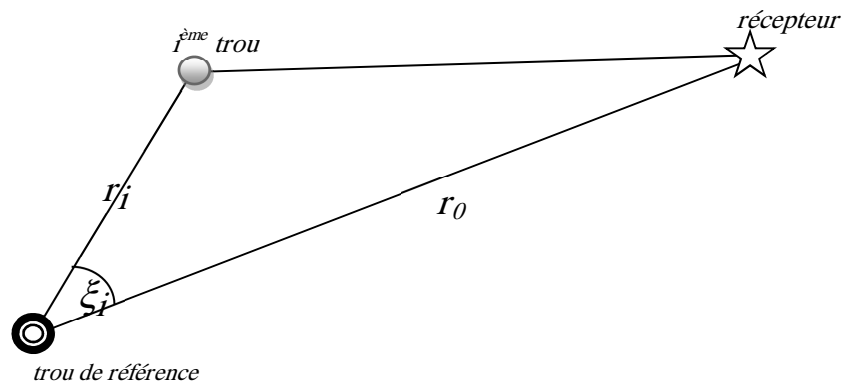


Fig. II.6 : représentation de l'angle entre les trous de mine, (Anandakrishnan S., Taylor R., Stump W., 1996).

Le terme $\frac{\sin \chi}{v_{p0}}$ est le paramètre de rai, il peut être remplacé, dans un modèle à couche par la vitesse des ondes **P** en profondeur.

Dans le cas d'un réseau de tirs simple de forme rectangulaire, ou en quinconce (Fig. II.7), les paramètres r_i et ξ_i peuvent s'exprimer en fonction de la banquette **a** et de l'espacement **b**

- Pour un modèle rectangulaire et les lignes impaires en quinconce, nous avons :

$$r_i = \sqrt{[(n-1)a]^2 + [(m-1)b]^2} \quad \text{et} \quad \xi_i = \theta' + \tan^{-1} \left[\frac{(n-1)a}{(m-1)b} \right].$$

- Pour les rangées paires du réseau en quinconce :

$$r_i = \sqrt{[(n-1)a]^2 + [(m-0.5)b]^2} \quad \text{et} \quad \xi_i = \theta' + \tan^{-1} \left[\frac{(n-1)a}{(m-0.5)b} \right]$$

n : nombre de lignes du réseau de tir

m : nombre de colonnes du réseau de tir

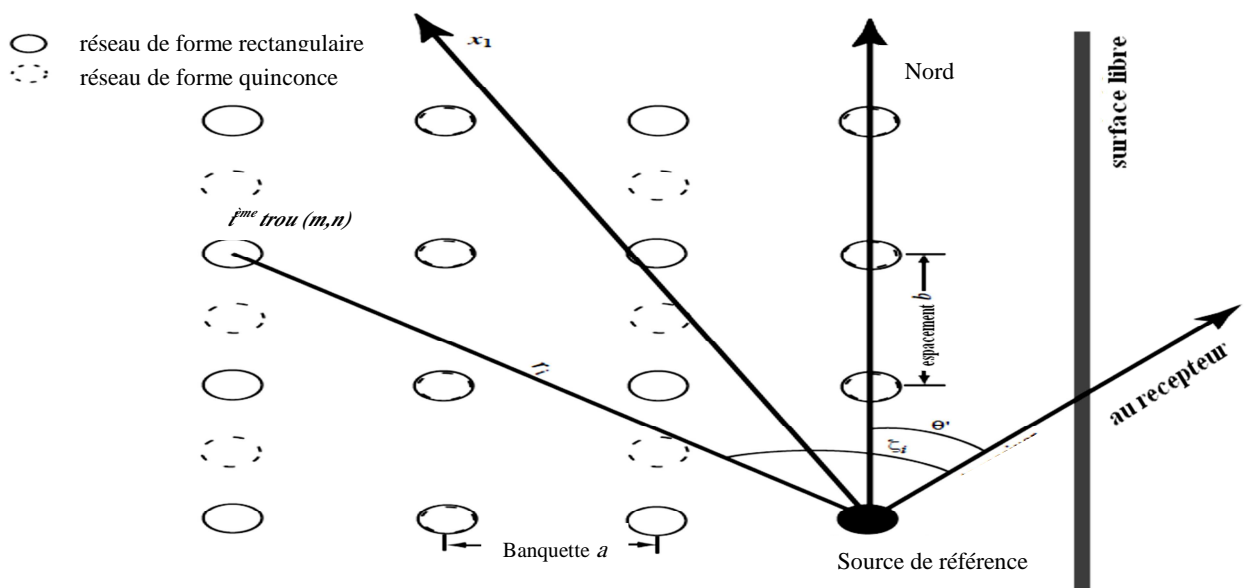


Fig. II.7 : les modèles d'un réseau de tir (rectangulaire, quinconce), (Yang X., 1998).

CHAPITRE 3:
Le programme MineSeis

I - INTRODUCTION

MineSeis est un programme Matlab qui permet la modélisation des tirs de mines. Il a été développé par (Yang, 1997) dans le but de différencier les tirs de mines des tirs nucléaires.

C'est un programme qui utilise la technique **GUI**, c'est-à-dire des interfaces graphiques qui facilitent l'interaction entre l'utilisateur et le programme.

Le programme fournit un outil pratique et interactif pour les études de modélisation de sources explosives, des tirs industriels en prenant compte à la fois de l'effet du tir proprement dit, l'explosion, et de l'effet des masses éjectées durant le tir.

Un tir de mines est modélisé comme la superposition d'un tir de charge unique. Ce dernier étant une combinaison d'une source explosive isotrope et d'une source dénommée *spall* source qui représente l'effet de la masse éjectée. Le programme calcule le sismogramme synthétique correspondant à une charge unique. Il superpose ensuite toutes les charges élémentaires en faisant une somme, décalée dans le temps, des sismogrammes élémentaires. Le décalage ou retard traduit à la fois le délai de mise à feu entre les tirs et celui introduit par une localisation différente pour chaque tir.

II - STRUCTURE DU PROGRAMME

Les éléments de MineSeis sont rangés dans deux dossiers ou répertoires :

- ✓ Le dossier « src » qui contient tous les programmes où « fichiers.m » qui permettent les différentes opérations de calcul et de visualisation.
- ✓ Le dossier « data » qui contient l'ensemble des fichiers de données nécessaires à l'exécution du programme.

II - a. Les fichiers de données (les fichiers Mat)

Le programme est enclenché en tapant *MineSeis* dans la ligne de commande de matlab. Un panneau principal s'affiche alors (Fig. III.1) qui permet d'effectuer les différentes opérations de calcul.

Ce panneau présente 3 touches principales relatives aux calculs des fonctions sources (explosion et *spall*) et à la superposition des sismogrammes.

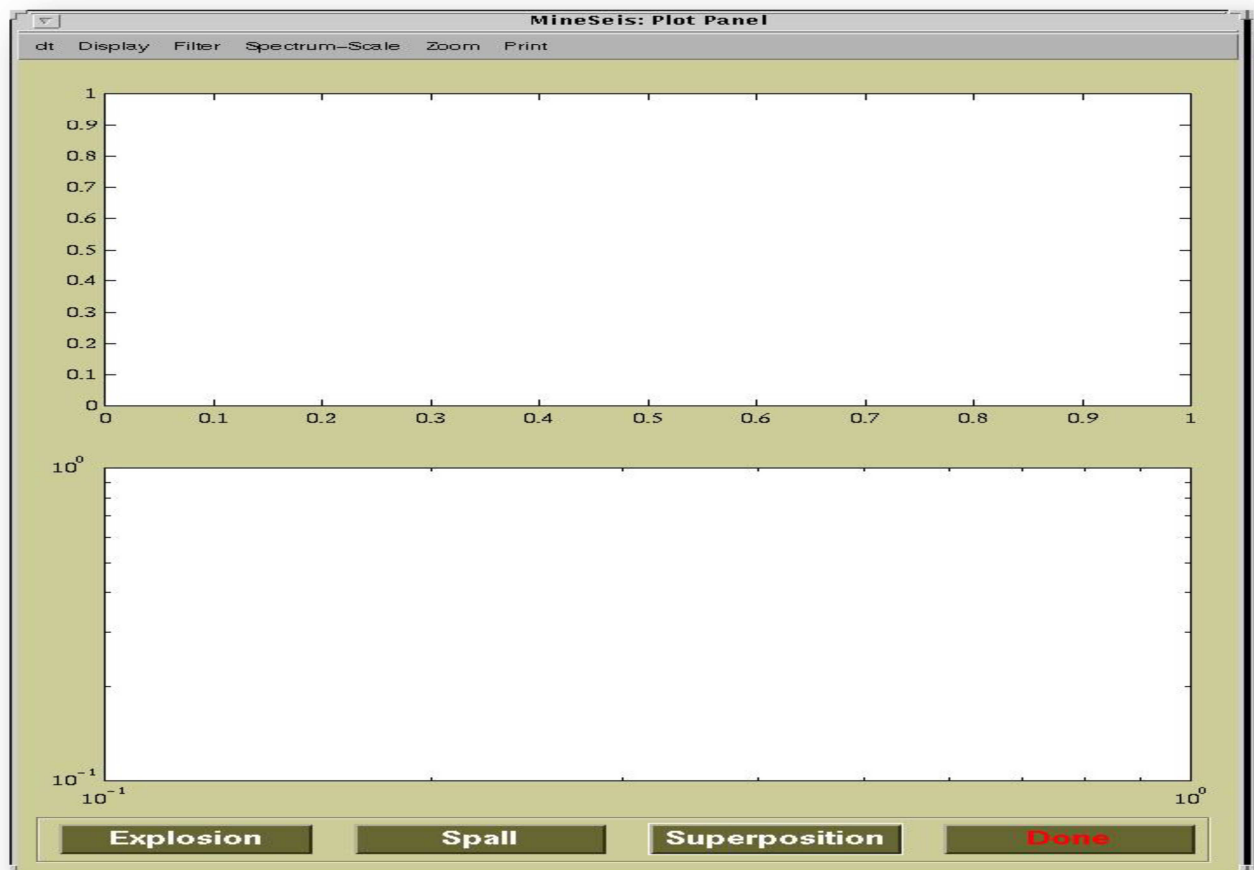


Fig. III.1 : le panneau principal du programme (plot panel).

Le panneau supérieur sert au tracé des courbes en fonction du temps et le panneau inférieur sert à représenter le spectre, c.à.d. le signal en fonction de la fréquence.

Le programme utilise un taux d'échantillonnage global pour tous ses calculs qui peuvent être définis de la "**dt**" menu. La valeur par défaut de taux d'échantillonnage est de 1000 échantillons par seconde.

Différentes fonctions sont disponibles dans la barre de menu supérieure du panneau principal. Selon la touche activée on peut:

- "**Print**" : sert à imprimer les courbes.

- "**Filtre**" : sert à filtrer les sismogrammes affichés. Des filtres de *Butterworth*, passe-haut, passe-bas, passe-bande sont utilisés. coupe-bande sont disponibles.

- "**Spectrum-Scale**" : on peut choisir soit une échelle linéaire ou logarithmique pour le tracé des courbes.

- "**Zoom**" : pour zoomer sur certaines parties de la courbe.

- "**Display**" : est utilisé pour afficher les courbes relatives aux grandeurs calculées désiré dans la fenêtre.

La barre de menu inférieure du panneau principal permet de calculer les fonctions sources (explosion et spall) ainsi que le sismogramme unitaire ou le sismogramme total.

Chaque touche sollicite l'entrée de données. Ces données sont soit définies au préalable dans des fichiers qui seront alors chargés au moment de l'exécution du programme soit introduites dans des fichiers créés lors du déroulement du programme.

Les fichiers de données au nombre de 5 sont :

1) Expl*.mat

Qui se présente comme un fichier Access. Il contient les éléments qui caractérisent le milieu de la source explosive :

- $V_p(m/s)$, $V_s(m/s)$ respectivement la vitesse de l'onde P et celle de l'onde S ,
- $\rho_0(g/cm^3)$ la densité du milieu,
- $h(m)$ la profondeur de la source,
- $W(kt)$ le rendement de la source.

Ces éléments sont introduits en cliquant sur la touche « explosion » du panneau principal qui entraîne l'apparition d'un deuxième panneau (Fig. III.2).

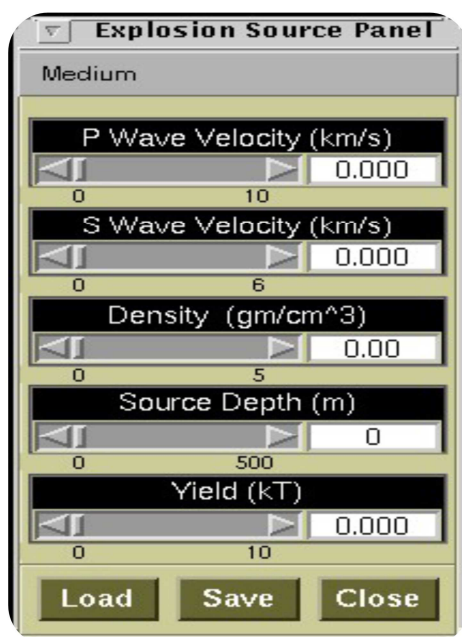


Fig. III.2 : Le panneau relatif à la source explosive.

D'autres données également sont contenues dans ce fichier à savoir :

- Dte intervalle d'échantillonnage pris par défaut égal à 0.001s.
- K et Ac qui caractérisent le type de milieu. Ce sont respectivement le taux de diminution de la pression et une constante qui caractérise le milieu, (équations, 2.15)

Ces paramètres peuvent être déterminés en cliquant sur la touche 'medium' du panneau (Fig. III.2).

- Rdp le potentiel réduit défini par l'équation (2.16) et qui est une fonction du temps t .
- Le temps t .

2) Spall*.mat

Qui se présente comme un fichier Access. Il contient les éléments relatifs à l'effet de la masse éjectée lors du tir. Il est créé ou chargé en appuyant sur la touche « spall » du panneau principal.

Ceci entraîne alors l'affichage d'un troisième panneau (Fig. III.3) qui permet l'introduction des paramètres suivants :

- $mass$ la masse éjectée en kg
- V_0 (m/s) la vitesse d'éjection de la masse
- q l'angle d'éjection
- h_{ff} (m) la distance de projection verticale de la masse
- T_{sf} (s) la longueur de l'impulsion de l'impact
- T_{sr} (s) la largeur de l'impulsion initiale

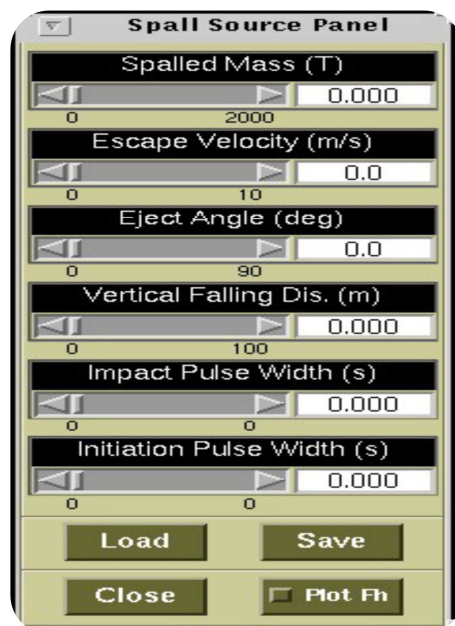


Fig. III.3 : Le panneau relatif à la source spall.

Le fichier contient également les éléments suivants :

- Dts (s) l'intervalle d'échantillonnage pris par défaut égal à 0.001s
- f_h la fonction source horizontale
- f_v la fonction source verticale
- $t(s)$ le temps

Les trois derniers éléments sont calculés par le programme selon les équations (2.18 , 2.19)

3) gnr*.mat

Ce fichier contient la fonction de green qui permet de calculer le sismogramme synthétique pour un tir unitaire. Ce fichier contient la variable grn . C'est une matrice dont chaque colonne représente les composantes de la fonction de green exprimées en nanomètres à l'exception de la première ligne qui contient :

- Le temps du premier point de données,
- La distance source-station,
- L'azimut de la station en degrés,
- Et l'intervalle d'échantillonnage.

Pour *MineSeis* la fonction de green est une donnée pour le programme. Elle peut-être estimée soit à partir d'un enregistrement, soit par calcul numérique. Il existe différents codes qui permettent le calcul des fonctions de green, et *MineSeis* possède deux fonctions qui transforment le résultat de ces codes en format matlab.

Le fichier *grn*.mat* est exigé par le programme suite à l'activation de la touche « superposition » du panneau principal. Cela entraîne alors l'affichage d'une quatrième fenêtre (*Fig. III.4*) qui permet l'introduction des paramètres relatifs au plan de tir à savoir :

- L'azimut de la normale au front de taille
- La vitesse des ondes *P* (km/s) en profondeur
- La distance source station (km)
- La banquette (m)
- L'espacement (m)
- L'azimut de la station

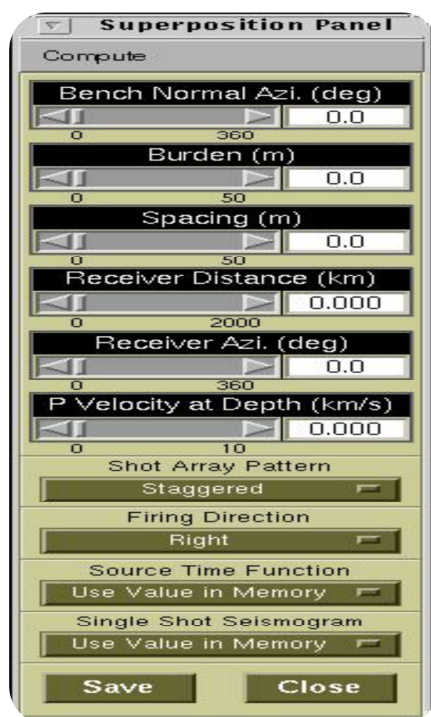


Fig. III.4: Le panneau de la superposition.

La touche « compute » de la 4eme fenêtre permet alors le calcul soit du sismogramme synthétique unitaire, soit la superposition des différents tirs (impulsions) ou encore la superposition des sismogrammes unitaires (*Fig.III.5*). Cela nécessite alors l'introduction des fichiers *ts.mat* et *yd.mat*.



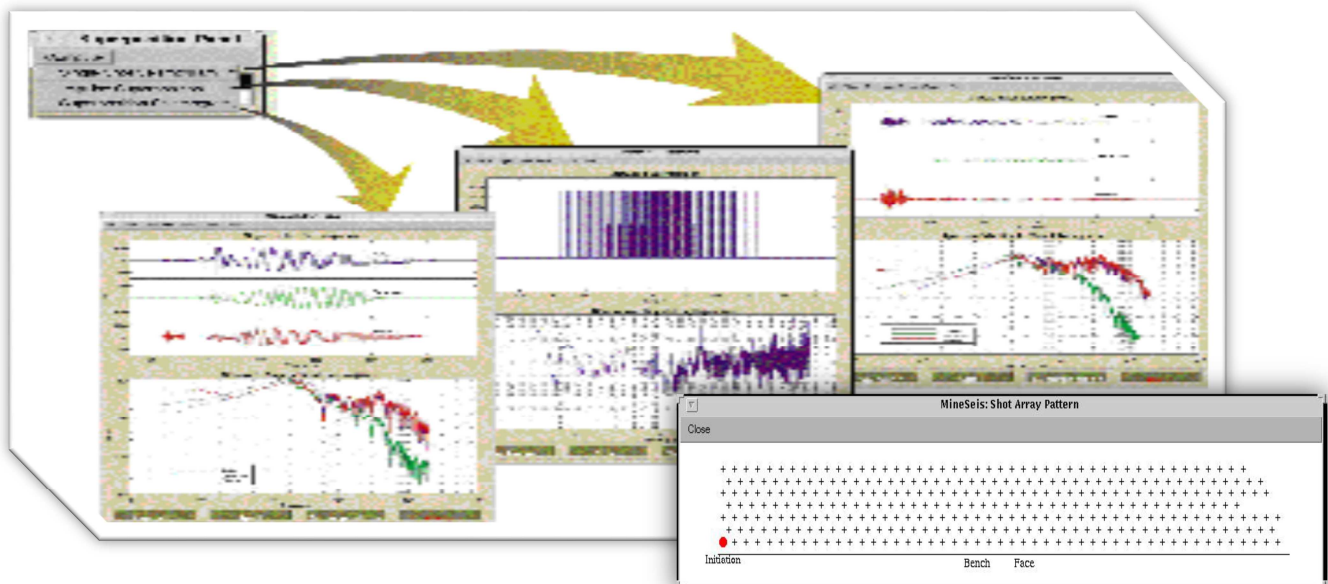


Fig. III.5 : Les différents résultats du calcul du panneau de superposition.

4) ts.mat

Ce fichier est relatif à la séquence de mise à feu. C'est une matrice construite manuellement. Le premier élément représente le trou de référence, les suivants les trous successifs conformément à la séquence de tir. Les lignes et les colonnes de la matrice correspondent respectivement aux lignes et aux rangées du plan de tir. La variable « *ts* » exprimée en seconde donne le délai par rapport au trou de référence.

5) yd.mat

Ce fichier est relatif au rendement du tir. Il est construit manuellement. Le nombre d'élément du fichier correspond au nombre de trous. La variable « *yd* » est exprimée kg.

Le 4^{ème} panneau permet également de choisir entre un plan de tir rectangulaire ou en quinconce et de définir la direction du tir, vers la droite ou la gauche, lorsque l'observateur regarde le front de taille. Cette information est nécessaire au calcul des retards dus à la distribution spatiale des trous de mines.

La 4^{ème} fenêtre donne également la possibilité d'utiliser un sismogramme élémentaire mesuré au lieu d'être calculé. Il est dans ce cas enregistré au préalable sous forme de fichiers de données.

Lors du calcul du sismogramme synthétique, l'utilisateur est sollicité pour introduire l'angle entre la normale au front de taille et la direction horizontale d'éjection de la masse. Cet angle est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir de la normale au front de taille. Si l'azimut de la normale au front de taille est faible, l'angle est positif, sinon il peut être négatif.

Le sismogramme synthétique unitaire est normalisé par rapport à la kilotonne.

II - b. Les fichiers d'exécutables(les fichiers M)

Les fichiers avec une extension *.m* sont ceux qui permettent soit les calculs soit le tracé des courbes soit l'affichage des interfaces graphiques. Ils sont contenus dans le répertoire « **src** ». On distingue en particulier :

1) Les fichiers script

Qui permettent l'affichage des différentes fenêtres qui facilitent l'interaction avec l'utilisateur. Dans l'ordre d'apparition des fenêtres lors de l'exécution du programme on a :

- *MineSeis* : pour l'affichage de la première fenêtre lors du lancement du programme
- *Mainpanel.m* : permet l'affichage du panneau principal (Fig. III.1)
- *Explsource.m* : permet l'affichage du panneau relatif à l'explosion (Fig. III.2)
- *spallsource.m* : permet l'affichage du panneau relatif au *spall* (Fig. III.3)
- *Superpositionsource.m*: permet l'affichage du panneau superposition (Fig. III.4)

2) Les fonctions :

Plusieurs fichiers *.m* assurent le calcul et le tracé des différentes grandeurs calculées. On distingue :

- *Expfun.m* : c'est la fonction appelée par le panneau relatif à l'explosion. Elle utilise le fichier *mm.m* pour le calcul de la fonction source pour l'explosion. Elle permet également le tracé de la fonction, sa sauvegarde.
- *spallfun.m* : c'est la fonction appelée par le panneau relatif à *spall*. Elle utilise le fichier *spall.m*. Elle permet également le tracé de la fonction, sa sauvegarde.
- *superpositionfun.m* : c'est la fonction appelée par le panneau relatif à la superposition. Elle calcul le sismogramme synthétique unitaire, la superposition des impulsions et des sismogrammes. Il enregistre, filtre et trace les courbes de calculées.

Ainsi que les fichiers qui assurent les calculs intermédiaires tels que :

- *buildgrn-kennett.m* et *buildgrn-refseis.m* : ils permettent de transformer les fonctions de green déterminés d'après des codes particuliers de fonction de green (*Mgenkennet* ou *refseis*) dans un format adapté pour matlab.
- *Fconv.m* : permet les opérations de convolution.
- *Filtdata.m* : c'est le fichier qui permet le filtrage en utilisant le filtre de *Butterworth*. L'ordre du filtre ainsi que la fréquence coin sont précisés lors de l'opération du filtrage. On peut réaliser au choix un filtre basse fréquence, ou un filtre haute fréquence, ou encore un filtre passe bande.

III. EXEMPLES D'UTILISATION

Si le programme a été écrit dans le but de discriminer le signal produit par un tir de mines de celui d'un tir d'essai nucléaire, il peut néanmoins être également utilisé pour l'étude des vibrations engendrées par les tirs de mines. On peut en faisant varier les différents paramètres qui caractérisent un plan de tir, prévoir les vibrations et donc choisir le meilleur plan du tir au sens du rendement et de l'environnement.

Les exemples présentés ci-après permettent de montrer comment on peut faire varier les différents paramètres qui caractérisent un plan de tir, pour prévoir les vibrations et donc choisir le meilleur plan du tir.

1. Exemple 1

Ce premier exemple montre l'importance de la prise en compte de l'effet des masses éjectées (*spall*). Afin de réaliser ce calcul, nous prenons le fichier de données fourni avec le programme. Il est relatif au cas d'un tir de mines important enregistré à grande distance (90 km) correspondant à 343 trous de mine tous alignés, contenant chacun une charge w de 0,0033kt.

Fonction source

Les deux figures III.6 et III.7 (a et b) montrent respectivement la fonction *explosion* et la fonction *spall*.

Ces fonctions ont été tracées en prenant un pas d'échantillonnage de 0.001s, et pour un milieu de schiste caractérisé par :

$$\begin{array}{ll} V_p &= 1.9 \text{ km/s} & h &= 40 \text{ m} \\ V_s &= 0.9 \text{ km/s} & W &= 0.0033 \text{ kt} = 3300 \text{ kg} \\ \rho &= 1.8 \text{ gm/cm}^3 & & \end{array}$$

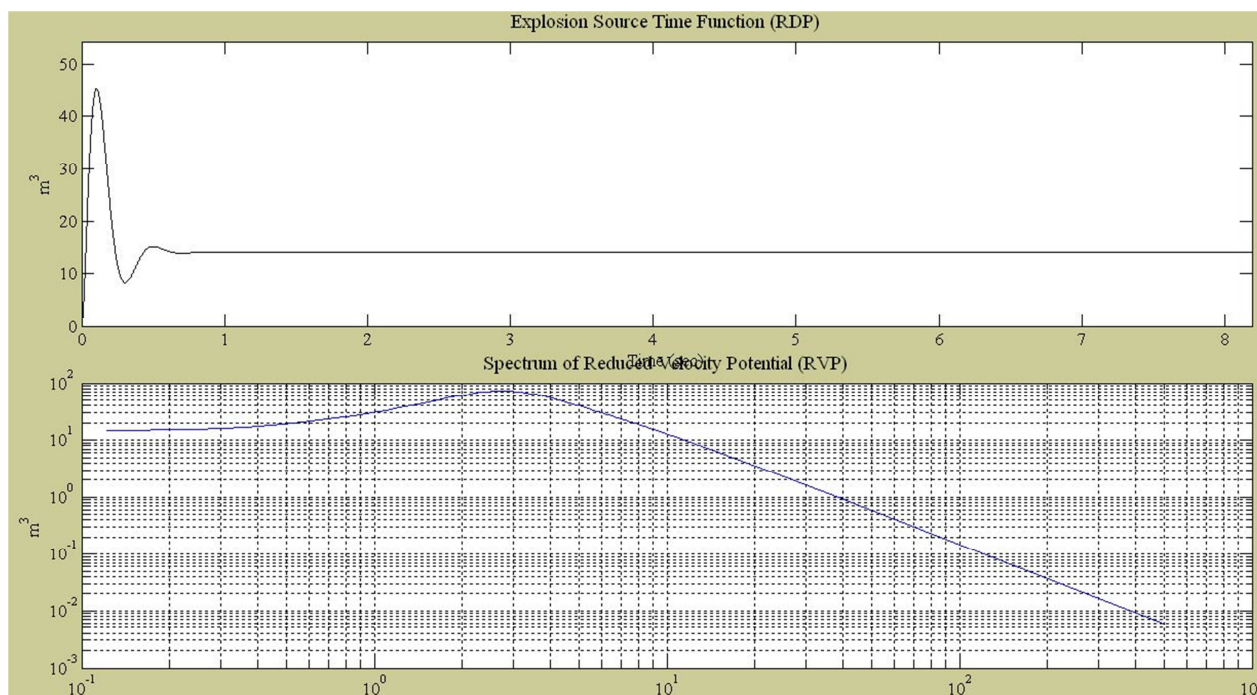


Fig. III.6 : Représentation graphique de la Fonction d'explosion

Le phénomène lié à l'éjection de la masse est défini par:

$$m = 31.4 \text{ kt} \quad v_0 = 2.879 \text{ m/s}$$

$$\alpha = 80 \text{ deg} \quad d = 20 \text{ m}$$

$$t_{sf} = 2 \text{ s} \quad t_{sr} = 0.1 \text{ s}$$

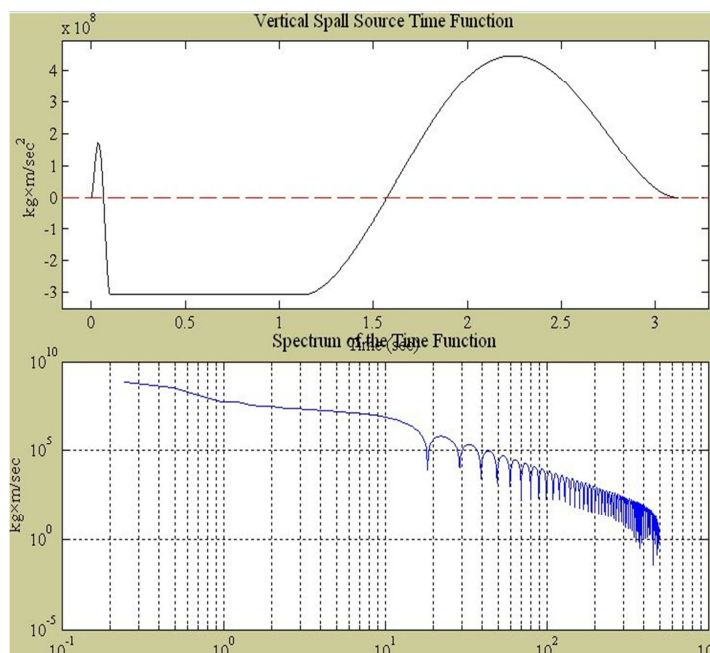


Fig. III.7.a : Représentation graphique de la Fonction spall vertical

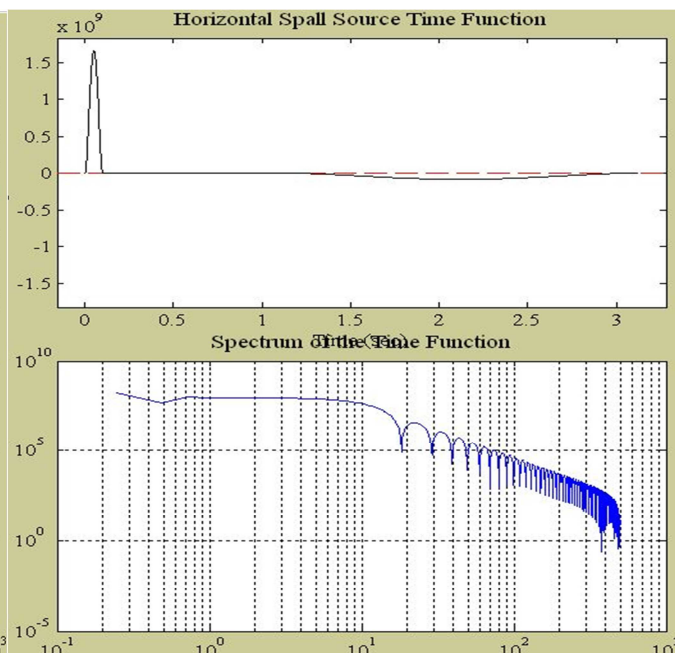


Fig. III.7.b : Représentation graphique de la Fonction spall horizontale

Sismogramme de tir unitaire:

Pour les calculs du sismogramme synthétique, nous avons utilisé la fonction de Green (grn90km0deg10sps.mat) et un angle de 5 degrés entre la normale au banc et la direction horizontale d'éjection de la masse, avec :

$$\alpha_B = 10 \text{ deg}$$

$$B = 3 \text{ m}$$

$$E = 3.75 \text{ m} (\approx 1.25B)$$

$$D_{s-r} = 90 \text{ km}$$

$$\beta_R = 0 \text{ deg}$$

$$V_{ph} = 1.9 \text{ km/s}$$

Les figures III.8 donnent le sismogramme unitaire (relatif à un trou de mine) en tenant compte soit uniquement de l'explosion (a) soit de l'ensemble explosion et masse éjectée.

La comparaison des deux courbes montre que l'effet des masses ne peut pas être négligé. On observe en effet une différence entre les deux courbes aussi bien au niveau du contenu fréquentiel -les basses fréquences sont plus atténuées dans le premier cas (a)-, que de l'amplitude de la vitesse. L'amplitude est plus légèrement faible notamment pour le mouvement transversal.

On observe par ailleurs que la durée du signal est plus importante dans le cas de la prise en compte des masses. Ce dernier point pouvait d'ailleurs être prévisible comme le montre la forme des fonctions sources ponctuelle dans le temps pour explosion et plus étalée dans le deuxième cas, fig. III.6 et III.7.

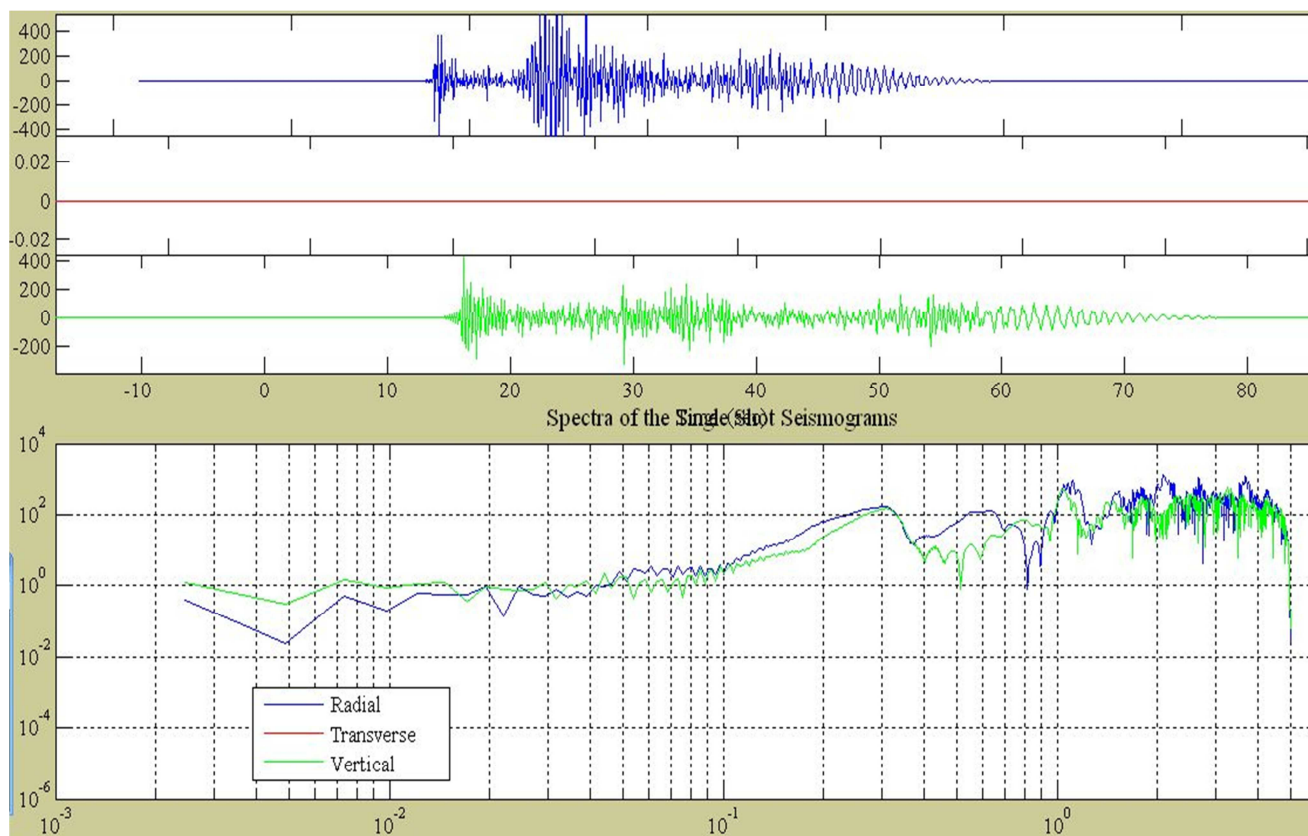


Fig. III.8-a: le sismogramme synthétique de tir unitaire (explosion)

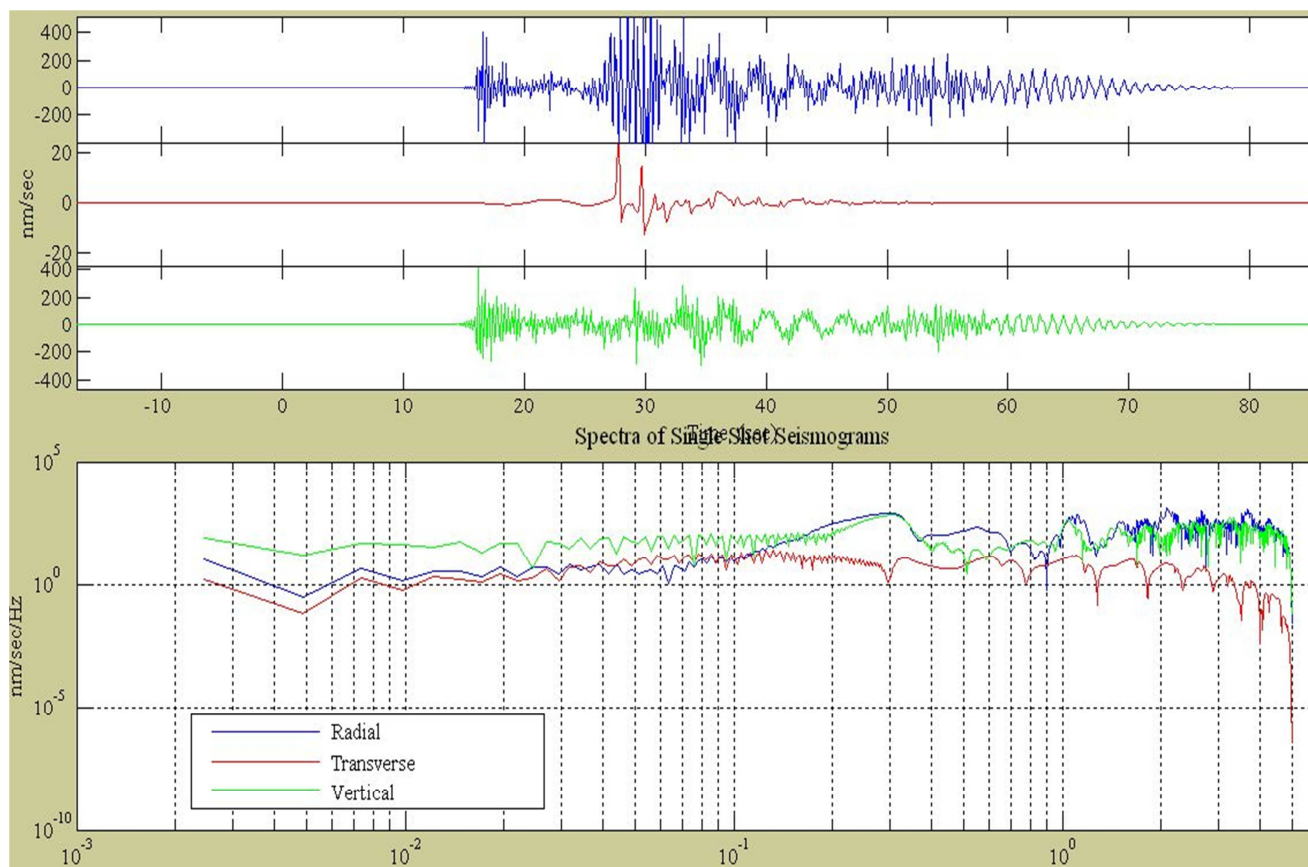


Fig. III.8-b: le sismogramme synthétique de tir unitaire (explosion + spall)

2. Exemples 2

Pour cet exemples nous montrons l'importance du plan de tir .c 'est nous ainsi par exemple ,que nous calculons le sismogramme de la superposition relatif à tout le plan de tir en faisant la somme des sismogramme unitaires pour l'ensemble des trous de mines

Pour obtenir le sismogramme de la superposition, *Mineis* superpose d'abord les impulsions. Cette étapes sert à calculer les retards entre les tirs. C'est a ce moment qu'interviennent les fichiers «ts» et «yd » (Fig III.9, Fig. III.10)

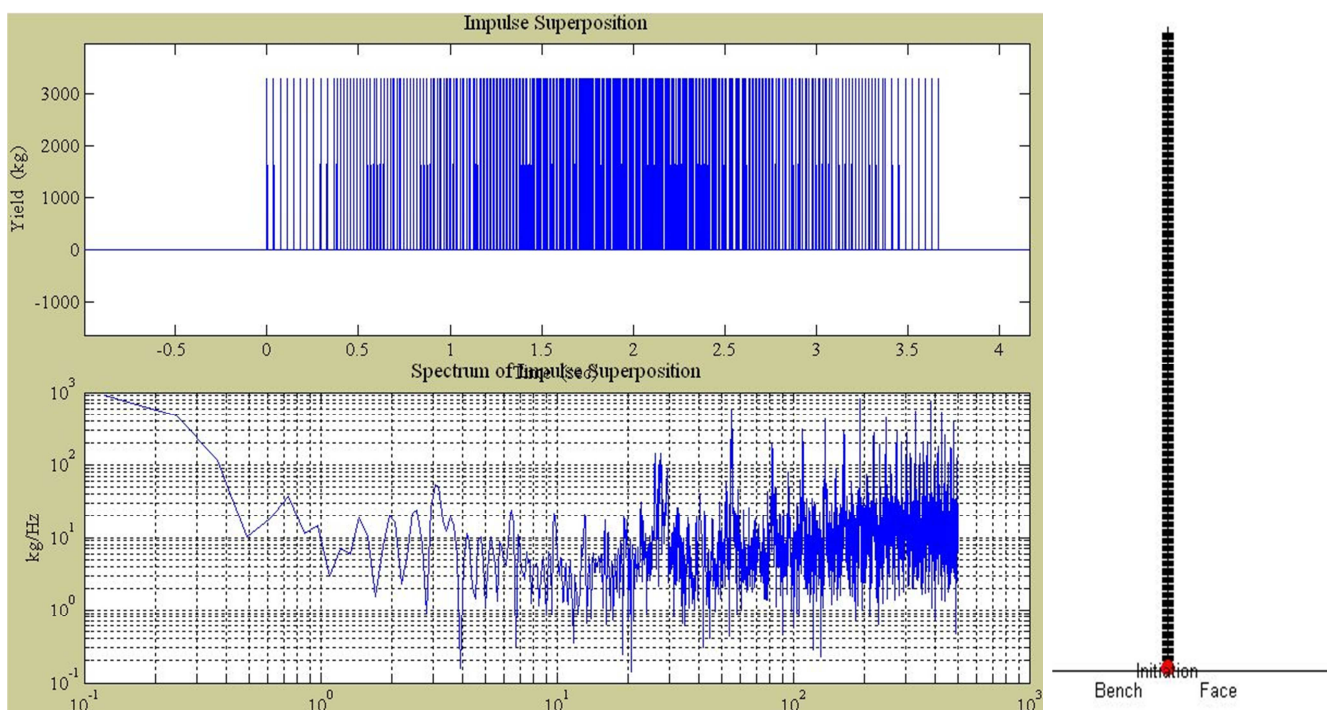


Fig. III.9: Superposition d'impulsion (trous alignés).

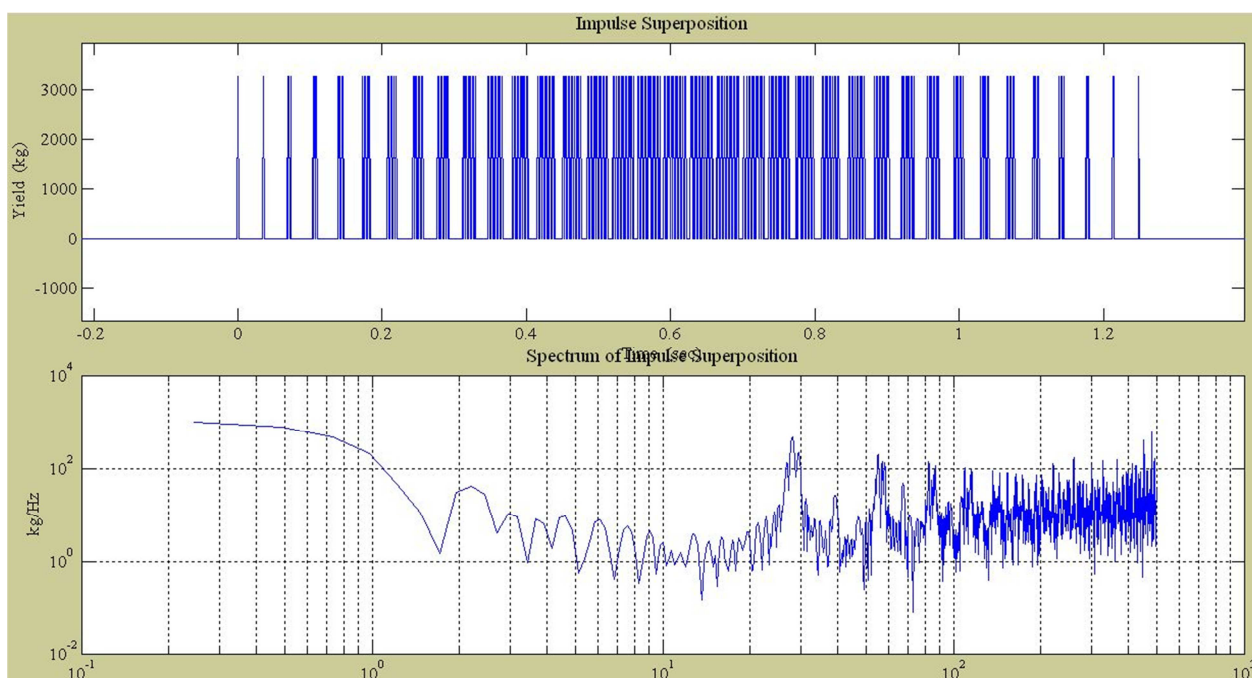


Fig. III.10.a: Superposition d'impulsion (20x17).

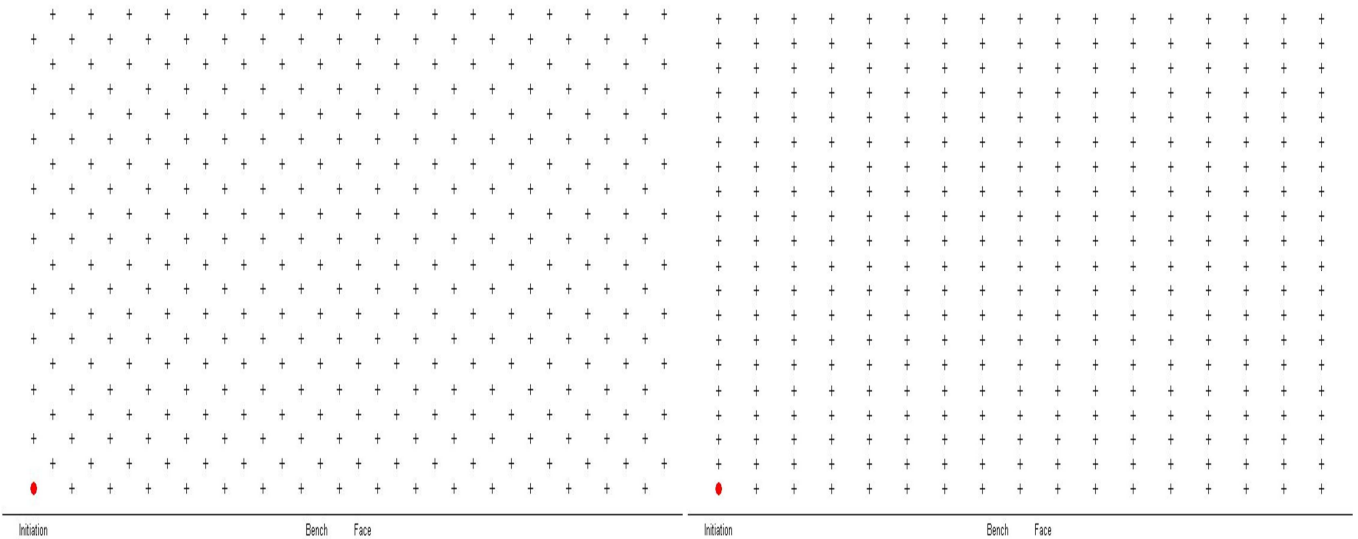


Fig.III.10.b: représentation du dispositif de tir quinconce

Fig.III.10.c: représentation du dispos rectangulaire

Pour montrer l'importance du plan de tir, ou pour montrer plutôt comment *Mineis* peut servir à étudié l'effet des différents paramètres d'un plan de tir sur le niveau de vibrations, nous calculons le sismogramme de la superposition pour des trous mines alignée (Fig. III.11) et celui relatif a un plan de tir contenant le même nombre de trous mais disposées suivant un quadrillage rectangulaire, FigIII.12, tous les autres paramètres du plan de tir étant identique dans les deux cas.

Dans le cas de quadrillage rectangulaire nous avons crié les fichiers «ts» et «yd » en prenant 20lignes et 17 colonnes, soit un nombre de 340 trous, le dispositif aligné lui présente 343 trous

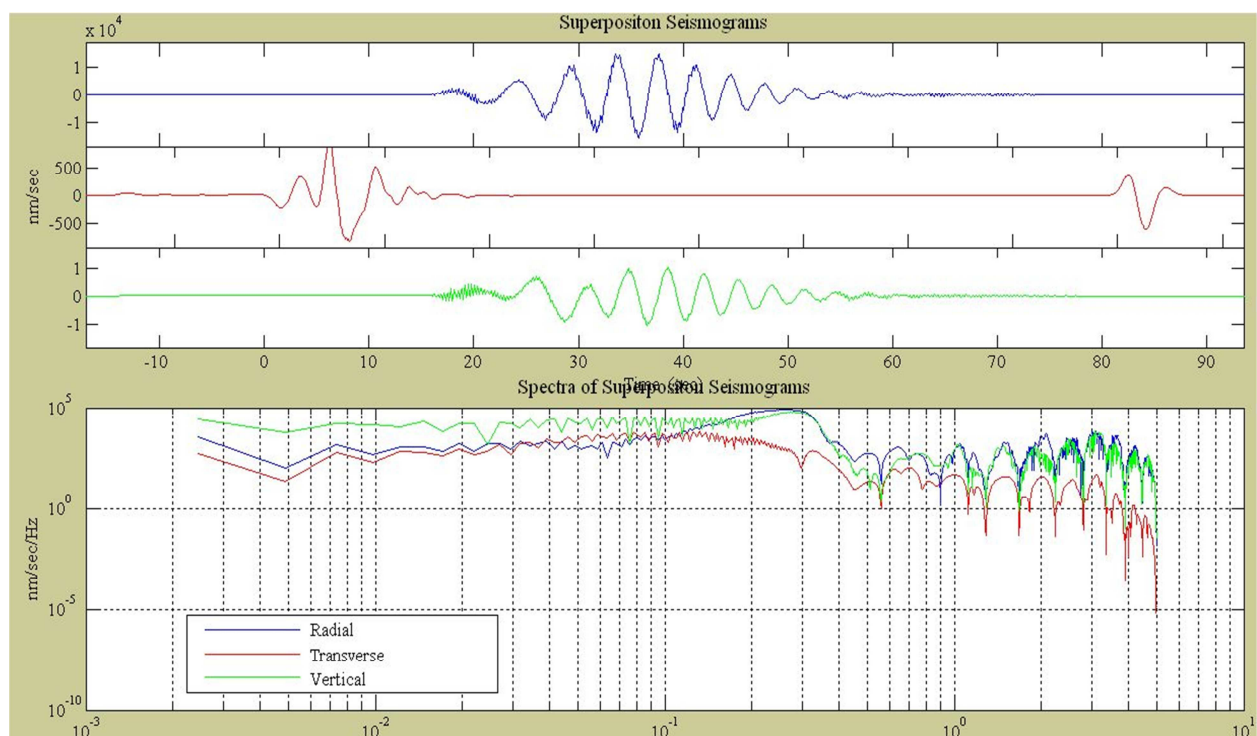


Fig. III.11: Sismogramme synthétique (trous alignés).

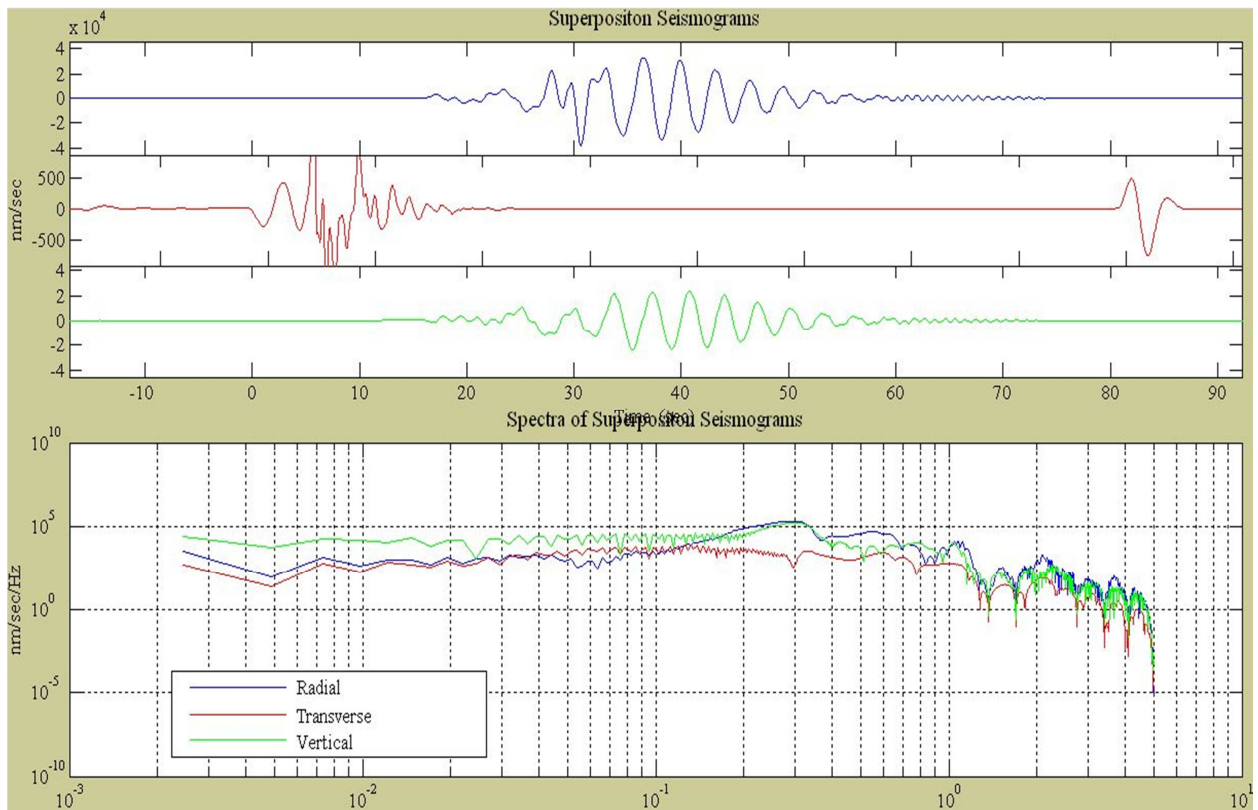


Fig. III.12.a: Sismogramme synthétique (20x17-rangée quinconce).

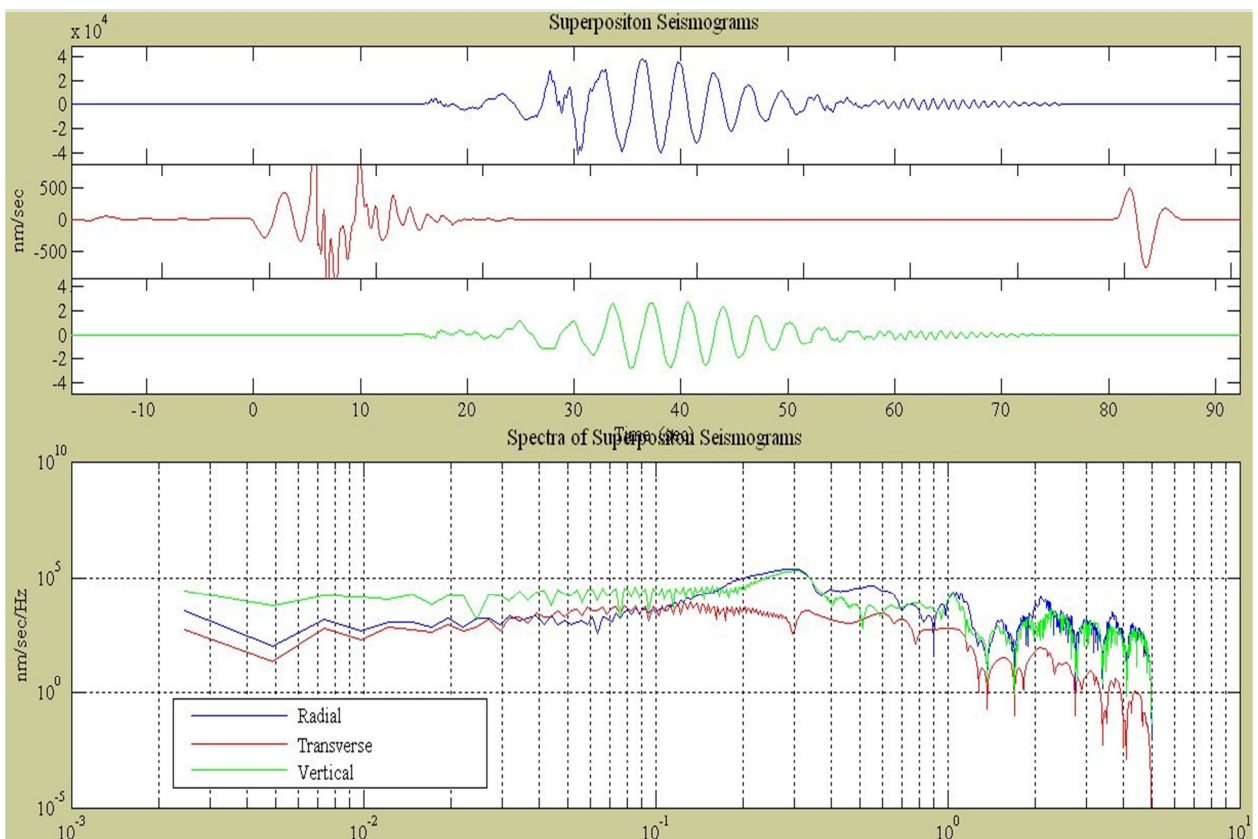


Fig. III.12.b: Sismogramme synthétique (20x17-rangée rectangulaire)

En comparant la (Fig. III.12.a) et (Fig.III.12.b), on ne constate pratiquement aucune différence. Ce résultat s'explique par le fait que la variation de la distance entre 2 stations voisines lorsque l'on passe du dispositif rectangulaire à une disposition en quinconce des stations est négligeable devant la distance au récepteur.

Cependant les figures III.11 et III.12, montrent l'importance de la disposition de trous. Le signal est différent notamment au niveau de l'amplitude et de la durée du signal.

Nous illustrons par cet exemple comment MineSeis pourrait être utilisé pour simuler et étudier l'effet de tous les paramètres qui définissent un plan de tir.

Cependant ne disposant pas de fonction de Green qui corresponde à un cas typique des tirs de mines, (faible distance épacentrale de l'ordre de 2 km environ), nous ne pouvons pas le faire.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION

Un des problèmes environnementaux engendrés par l'exploitation minière est lié à l'utilisation des explosives. En effet, cette dernière engendre dans la zone environnant l'exploitation des vibrations, qui outre la gêne ressentie par les riverains peuvent aller jusqu'à occasionner des dégâts aux structures.

La méthode classique pour l'estimation du niveau de vibration et qui est connue sous l'appellation (loi d'empirique de chapot) s'avère suffisante. En effet, de part son caractère empirique, elle ne peut pas être appliquée directement quelque soit le milieu considéré. Des études doivent être menées pour chaque milieu afin de déterminer les constantes qui caractérisent le milieu.

Par ailleurs, si elle permet de calculer la vitesse particulaire maximale, elle ne tient pas compte de la fréquence, paramètre important pour l'évaluation des risques.

Un autre défaut de cette méthode est de se baser uniquement sur la charge unitaire et la distance entre le tir et le site pour déterminer la vitesse particulière. Or, comme le montre l'étude bibliographique que nous avons menée, les autres paramètres qui caractérisent le plan de tir peuvent être également pris en compte pour réduire le niveau des vibrations.

En règle générale le seuil de vibration maximale admissible est assorti d'une gamme de fréquence. Ce dernier peut être modulé en fréquence si la gamme de fréquence dommageable est connue ou si elle a fait l'objet d'études particulières.

Le recours à la modélisation permettrait d'étudier l'influence des paramètres du plan de tir sur le niveau des vibrations. la méthode MSH qui combine la modélisation et les mesures *in situ* constitué un bon outil pour à la fois le suivi de l'exploitation mais également pour le choix des plan de tir avant la mise en route de l'exploitation.

L'outil *Mineiseis* permet de réaliser de manière aisée une étude de type MSH, Il permet à la fois de connaître le niveau des vibrations et de déterminer le contenu spectral.

En effet, par deux exemples simples, nous montrons que l'effet provoqué par les chutes des masses éjectées lors de tir peut être non négligeable sur le niveau des vibrations.

On montre par exemple qu'une fonction source qui tient compte des *spall* provoque un niveau de vibration supérieur à celui du uniquement à l'explosion.

Le spectre des deux signaux est également différent.

Il en est de même pour la durée de la vibration qui est plus importante dans le premier cas.

Par ailleurs, un autre exemple nous a permis de montrer l'influence du plan de tir,

Nous regrettons cependant de ne pas avoir pu traiter un cas davantage représentatif des exploitations minières que nous connaissons en Algérie. La difficulté majeure réside dans l'estimation de la fonction de Green. Pour notre étude nous ne disposons que de celle relative à un enregistrement lointain et pour un milieu relativement homogène.

Mineiseis donne la possibilité d'intégrer des codes tels que *refseis* pour le calcul des fonctions de Green. Il serait souhaitable de poursuivre ce travail dans ce sens de manière à faire de *Mineiseis* un bon outil pour l'estimation des vibrations liées aux tirs,

Enfin il est important de noter qu'une modélisation ne peut s'affranchir de mesures in situ seul moyen qui permet véritablement de valider le modèle.

Annexe 1 :

✚ Produit de convolution :

Sous la forme :

$$\varphi(x) = (G * j)(x) = \int G(x - y) j(y) dy$$

✚ Distribution de Dirac

On note $\delta(x)$ la distribution de Dirac. Cette distribution vérifie la propriété fondamentale que, pour toute fonction $\varphi(x)$ lisse à support compact :

$$\int \varphi(x) \delta(x - x_0) dx = \varphi(x_0)$$

✚ La transformée de Fourier

On définit ici la transformée de Fourier de la fonction $f(x)$ de n variables \mathbf{x}^k , ($k = 1, \dots, n$) par :

$$\hat{f}(\xi) = \int e^{-i\xi x} f(x) dx$$

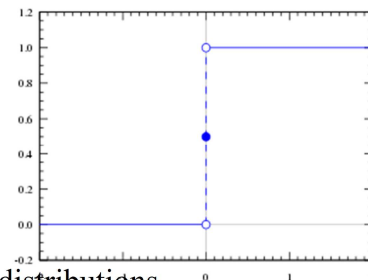
La formule de transformation inverse s'écrit alors :

$$f(x) = \int e^{+i\xi x} \hat{f}(\xi) \frac{d\xi}{(2\pi)^n}$$

✚ Fonction de Heaviside :

Est une fonction H discontinue définie par:

$$\forall x \in \mathbb{R}, H(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ \frac{1}{2} & \text{si } x = 0 \\ 1 & \text{si } x > 0. \end{cases}$$



C'est une primitive de la fonction δ de Dirac en théorie des distributions.

La fonction est utilisée dans les mathématiques du traitement du signal pour représenter un signal obtenu en fermant un interrupteur à un instant donné et en le maintenant fermé indéfiniment.

Annexe 2 :

Filtre de Butterworth

Un **filtre de Butterworth** est un type de modèle de filtre linéaire, conçu pour posséder un gain aussi constant que possible dans sa bande passante (Fig. 1).

Le gain d'un filtre de Butterworth est le plus constant possible dans la bande passante et tend vers 0 dans la bande de coupure. Sur un diagramme de Bode logarithmique, cette réponse décroît linéairement vers $-\infty$

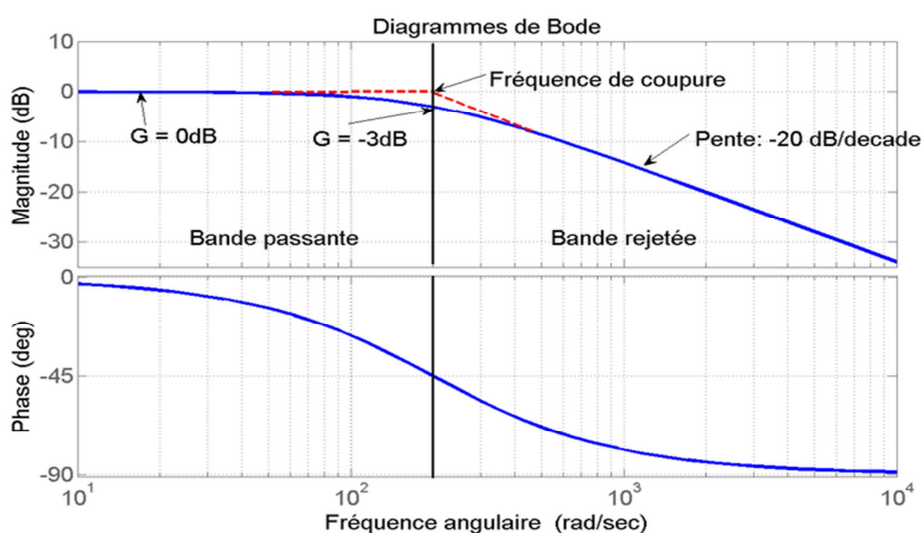


Fig. 2 : *Diagramme de Bode d'un filtre de Butterworth passe-bas du premier ordre, (Butterworth S., 1930)*

Comme pour tous les filtres linéaires, le prototype étudié est le filtre passe-bas, qui peut être facilement modifié en filtre passe-haut ou placé en série pour former des filtres passe-bande ou coupe-bande.

Le gain d'un filtre de Butterworth passe-bas d'ordre n est: (Fig. 2)

$$G_n(\omega) = |H_n(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}}}$$

Où: G_n est le gain du filtre

H_n sa fonction de transfert

ω la fréquence angulaire (ou pulsation) du signal

ω_c la fréquence de coupure (angulaire) du filtre (à -3 dB)

et n l'ordre de filtre

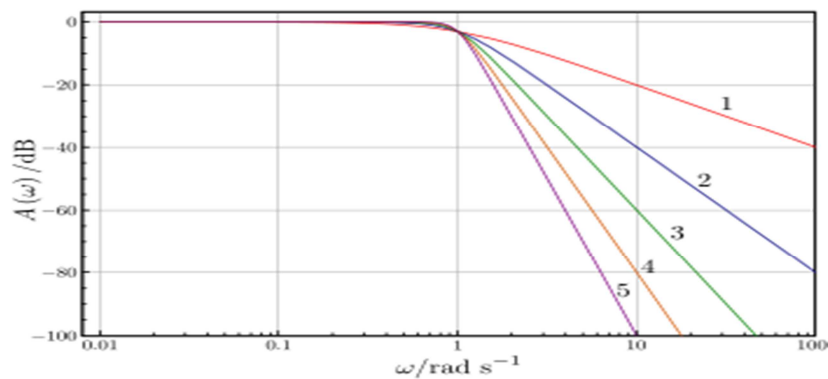


Fig. 2 : Gains de filtres de Butterworth passe-bas d'ordre 1 à 5 en fonction de la fréquence

-Un **filtre passe-bande** est un filtre ne laissant passer qu'une bande ou intervalle de fréquences compris entre une fréquence de coupure basse et une fréquence de coupure haute du filtre. Un circuit passe-bande peut servir à éliminer le bruit du signal, si l'on sait que le signal a des fréquences comprises dans une gamme de fréquences déterminée. En mécanique, un filtre passe-bande peut permettre d'atténuer des vibrations ou oscillations perturbatrices voire néfastes.

-Un **filtre passe-haut** est un filtre qui laisse passer les hautes fréquences et qui atténue les basses fréquences, c'est-à-dire les fréquences inférieures à la fréquence de coupure. Il pourrait également être appelé filtre coupe-bas. Le filtre passe-haut est l'inverse du filtre passe-bas et ces deux filtres combinés forment un filtre passe-bande. Les filtres passe-haut et passe-bas sont utilisés pour traiter les signaux d'une série de données.

- Un **filtre coupe-bande** aussi appelé filtre réjecteur de bande ou filtre cloche est un filtre empêchant le passage d'un intervalle de fréquences. Il est composé d'un filtre passe-haut et d'un filtre passe-bas dont les fréquences de coupure sont souvent proches mais différentes, la fréquence de coupure du filtre passe-bas est systématiquement inférieure à la fréquence de coupure du filtre passe-haut.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- Akel S. , Martel O. , (1996), Evaluation semi-empirique des vibration dues aux tirs à l'explosif, AFTES-Journées d'études internationales de Chambéry.
- Aki K. , Richards P.G. , (2002, Second Edition). Quantitative Seismology, W.H. Freeman, San Francisco.
- Allard, P., (1988), étude des vibrations engendrées par les tirs de mines - GSC 09 – Mécanique des roches, 148 p.
- Anandakrishnan S., Taylor S. R., Stump B. W., (November 12, 1996), Quantification and Characterization of Regional Seismic Signals from Cast Blasting in Mines: A Linear Elastic Model.
- Bernasconi, P., Bequet B. et Sifre Y., (mars 2002), un exemple de l'ingénierie du minage : le chantier de la RN2 (déviation Urcel-Chavignon)
- Bernasconi, P. Mines & Carrières Volume (85 janvier 2003), Approche probabiliste d'une loi empirique de la vitesse particulaire crête des charges unitaires. Pages 58-63.
- Bernasconi P. & Sifre Y., (1996). The Seismic-Hybrid Modelling (MSH): Theory and practice(s). EXPLO96, University of Leeds U.K., 151-164.
- Blanchier A. & Sauvage A. C., (03 février 2006), La surpression aérienne : un impact à maîtriser.
- Bleuzen Y. , A. Explosif, Nancy_2010.
- Braile L.,(Décembre 2004), Seismic Wave Demonstrations and Animations.
- Butterworth S., (1930), On the Theory of Filter Amplifiers, Wireless Engineer, vol. 7, pp. 536-541.
- Chapellier D. & Mari J-L., (1999), PRINCIPE DE BASE: Cours online de géophysique.
- Chapot P. (1981). Etude des vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux. Rapport de recherche du LCPC de Nancy N°105.
- Khandelwal M., Singh T.N., (2005), Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: A neural network approach.
- Khandelwal M., Singh T.N., (2006), Evaluation of blast-induced ground vibration predictors.
- Langefors U., Kihlström B., The modern technique of Rock Blasting, seconde édition, p 70.

Mclaughlin K., Bonner J. and Barker T., (October 2002), Seismic source mechanisms for quarry blast.

Mueller R.A. and Murphy J.R., (December 1971), seismic characteristics of underground nuclear detonations

Nicolas C., (mars 2003), Sismologie – S1.

O.N.E.X. : guide technique des explosifs et accessoires de tir.

Schendel D.V., (Marseille_2009), Explosifs et explosions.

Serradj T., Optimisation du minage, Ecole des mines el-Abed.

Sifre, Y. & P. Bernasconi. Techniques de l'Industrie Minérale N° 14, (juin 2002), Tirs applications et implications. 6.2.1.3. Evolution de la conception des tirs.

Société Nitro-Bickford, Avril 2000, en France, Maîtrise du minage.

Stump B., (1985), Constraints on explosive sources with spall from near-source waveforms.

SYNDUEX , la technicité maîtrisée ,(décembre 2008), Guide de mine en œuvre des produits explosifs en milieu subaquatique.

United States Bureau of Mines "USBM", RI-8507, 1980.

Yang X., (1997), Mining explosion and collapse source characterization and modeling with near-source seismic data.

Yang X., (April 1998), MineSeis A MATLAB GUI Program to Calculate Synthetic Seismograms from a Linear, Multi-shot Blast Source Model.

Yang X. and Stump B. W., LAUR-96-3012, Source moment tensor estimation of surface mining blasts

YSO Consultants, (31 octobre 2006), Ingénierie des tirs de mines : Optimisation des tirs par l'utilisation de la modélisation sismique et de l'amorçage électronique.

عَمْرٌ بِحَمْدِ اللَّهِ