

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

**Département de Génie Minier**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

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

*Etudes des vibrations dues aux tirs de mines.  
Apport de la modélisation*

Dirigé par :  
Dr. BOUMBAR Nadia

Elaboré par :  
KERKEBANE Hana

**2007/2008**

## Table des matières :

- Remerciements.....	03
- Résumés.....	04
- Introduction.....	06

### Premier chapitre : Présentation de la carrière de Keddara

1-Généralités.....	08
1-1-Présentation de l'entreprise ENOF.....	08
1-2-Présentation de la filiale ALGRAN.....	08
1-3-Historique du gisement Keddara.....	09
2-Situation géographique et accès au gisement.....	10
3-Géologie.....	12
3-1-Généralités.....	12
3-2-Géologie régionale.....	13
3-3-Stratigraphie de la région.....	13
3-4- Tectonique de la région .....	15
3-5-Roches métamorphiques.....	16
3-6-Généralités sur le gisement.....	16
3-7-Caractéristiques hydrogéologiques.....	17
3-8-Caractéristiques hydrauliques.....	18
4-Exploitation du gisement.....	18
4-1-Etat de l'exploitation.....	18
4-2-Méthode d'exploitation.....	18
4-3-Paramètres d'exploitation.....	18
4-4-Paramètres de foration.....	19
4-5-Production de l'unité.....	21
4-6-Régime de travail de la carrière.....	23
4-7-Objectifs.....	23
5-Traitement dans l'unité de Keddara.....	23
5-1-Description du processus de l'installation de concassage.....	23
5-2-Description de la station ARJA.....	25
5-3-Traitement du sable.....	25

### Deuxième chapitre : Théorie du travail à l'explosif

1-Définition d'un explosif.....	29
2-déflagration et détonation.....	29
3-Transfert d'énergie dans le milieu connexe.....	30
4-Effet général des ondes de choc sur le massif rocheux.....	32
5-Effet des ondes réfléchies.....	34
6-Précisions complémentaires dans le cas pratique.....	35

## **Troisième chapitre : Ondes et vibrations**

1-Les ondes sismiques.....	38
1-1-Introduction.....	38
1-2-Milieu élastique.....	38
1-3-Ondes sismiques.....	39
1-4-Ondes aériennes.....	44
1-5-Atténuation des ondes sismiques.....	45
2-Les vibrations.....	48
2-1-Fonction d'un phénomène vibratoire.....	49
2-2-Les facteurs influant sur le niveau de vibration.....	50
2-3-Critère de dommage.....	51
3-La différence entre tir de mine et séisme.....	52

## **Quatrième chapitre : Prédiction et contrôle des vibrations**

1-Les critères de nuisance et prédiction.....	56
1-1-La recherche d'un critère de nocivité des vibrations.....	56
1-1-1-La vitesse particulière maximum.....	57
1-1-2-Le spectre de réponse.....	62
1-1-3-La longueur d'onde.....	64
1-2-Influence des paramètres de tir sur les vibrations.....	65
1-2-1-Influence de la charge.....	65
1-2-2-Influence de la distance.....	66
1-3-Loi de propagation.....	67
1-4-Prédiction de la fréquence.....	70
2-Optimisation des contrôles de vibrations.....	71
2-1-Les critères physiques de nuisance des vibrations.....	72
2-1-1-Détermination des critères de contrôle.....	72
3-Cas de Keddara.....	74

## **Cinquième chapitre : Modélisation des tirs de mines**

1-Introduction.....	79
2-Théorie de la modélisation.....	79
2-1-Introduction.....	79
2-2-Modélisation.....	79
3-Optimisation du tir.....	81
4-Observation.....	86
- Conclusion.....	87
- Bibliographie.....	88

## **Remerciements :**

En réalisant ce travail, on accumule quelques dettes, envers de nombreuses personnes, qu'elles en soient toutes remerciées en particulier Adel et Lamia.

Ne pouvant toutes les citer, mes remerciements vont tout particulièrement :

- à ma promotrice Mlle N.Boumbar, envers qui je suis très reconnaissante pour l'aide précieuse qu'elle m'a apportée ainsi que pour sa disponibilité,
- à l'ensemble des enseignants du département du Génie Minier, qui m'ont encadrés tout au long de ce cursus,
- au personnel de l'ENOF et plus particulièrement à celui de Keddara, pour leur aide et leur accueil durant le déroulement du stage,
- à mes parents, pour leur soutien,
- à ceux, enfin, qui m'ont accompagné dans la rédaction.

Mais aussi, merci à l'ensemble des membres du jury, qui ont bien voulu évaluer mon travail.

## ملخص

إن الأعمال المرتبطة بورشات الهندسة المدنية أو تلك المرتبطة بالإستغلالات، تلجا غالبا إلى إستعمال المفجرات. هذه الأخيرة تؤدي إلى مشاكل بيئية عن طريق الهزات الأرضية المترتبة عنها.

أثبتت الدراسة البيبليوغرافية أن العامل المستعمل عامة في تقدير الهزة العظمى هو السرعة الجزيئية و مع ذلك يجب أخذ طيف التواتر بعين الإعتبار عند تقييم الخطر، في حين أن إستعمال القياس و التمثيل معان طريق النمذجة الزلزالية الهجينة التي تسمح بتقييم الهزات قبل بداية الإستغلال من أجل تكييف مخطط التفجير الذي يهيء لنا فرصة تامين أحسن مردود بأقل خطر.

أبرز الكلمات مفجرات، اهتزازات، سرعة جزيئية، طيف التواتر، مخطط التفجير، نمذجة.

## Résumé

Les travaux liés aux chantiers de génie civil ou aux exploitations minières ont souvent recours à l'utilisation des explosifs. Ces derniers engendrent des problèmes environnementaux à travers les vibrations sismiques qu'ils provoquent.

Une étude bibliographique nous a montré que le paramètre généralement utilisé pour l'estimation de la vibration maximale est la vitesse particulière.

Cependant, le spectre de fréquence doit être également pris en compte dans l'estimation du risque.

Par ailleurs, la combinaison de mesures in - situ et de la modélisation à travers la M.S.H. (modélisation sismique hybride) permet d'estimer les vibrations avant même la mise en exploitation pour adapter le plan de tir de manière à garantir un bon rendement tout en minimisant le risque.

**Mots clés :** Explosifs, vibrations, vitesse particulière, spectre de fréquence, plan de tir, modélisation.

## **Abstract**

The work related to civil engineering or exploitation of mines yard; often use the explosives that engender environmental problems through the seismic vibrations that they provoke.

The bibliographical study shown to us that the parameter commonly used to estimate the vibration is the maximum speed of particle.

However, the spectre of frequency must be also taken in the estimation of the risk.

In addition, the combination of measures in - situ and of the modelling through the M.S.H. (Hybrid Seismic Modelling) allows us to estimate the vibrations before the exploitation to adapt the blasting pattern and to guarantee a good efficiency with a minimum of risk.

**Keywords:** Explosives, vibration, speed particle frequency, spectrum, blasting pattern, modelling.

## **Introduction :**

Dans toutes les activités industrielles mettant en oeuvre les énergies explosives , qu'il s'agisse de chantiers de génie civil, de grands travaux souterrains ou d'exploitations de carrières en roches massives, les contraintes d'impact des tirs sur l'environnement constituent un problème important.

Les techniques de minage évoluent afin de mieux assurer, à la fois une productivité élevée de l'énergie explosive et un meilleur respect de l'environnement.

L'Entreprise Nationale des Produits Miniers Non Ferreux et des Substances Utiles (ENOF) a donc proposé ce sujet pour le cas précis de la carrière de Keddara, dans l'espoir de parvenir à des solutions qui limitent la gêne des riverains, tout en ayant un rendement satisfaisant lors des tirs.

Un stage au niveau de la carrière nous a permis de voir le fonctionnement de l'exploitation ainsi que de nous initier à la pratique des tirs. Cependant aucune mesure de vibration n'a pu être réalisée, l'entreprise ne disposant pas de matériel d'enregistrement.

Le premier chapitre présente la carrière de Keddara.

Une étude bibliographique relative aux explosifs ainsi qu'aux vibrations liées aux tirs de mines a été nécessaire. Celle-ci est présentée dans les deuxième et troisième chapitres.

Dans le quatrième chapitre, nous abordons la problématique de l'estimation du contrôle des vibrations liées à l'utilisation des explosifs.

Enfin, un calcul des vibrations dans le cas d'un modèle de terre simplifié, nous permet de montrer l'apport de la modélisation dans l'estimation au préalable des vibrations avant même la mise en exploitation d'une mine ou d'une carrière, cela est présenté dans le dernier chapitre.

## **PREMIER CHAPITRE :**

# **PRÉSENTATION DE LA CARRIÈRE DE KEDDARA**

## **1 - GENERALITES :**

### **1 - 1 - Présentation de l'entreprise ENOF :**

Le groupe ENOF (**Entreprise Nationale des Produits Miniers Non Ferreux et des Substances Utiles**) exploite 18 mines et carrières et produit une gamme variée de minerais, il est organisé en 6 filiales depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2001.

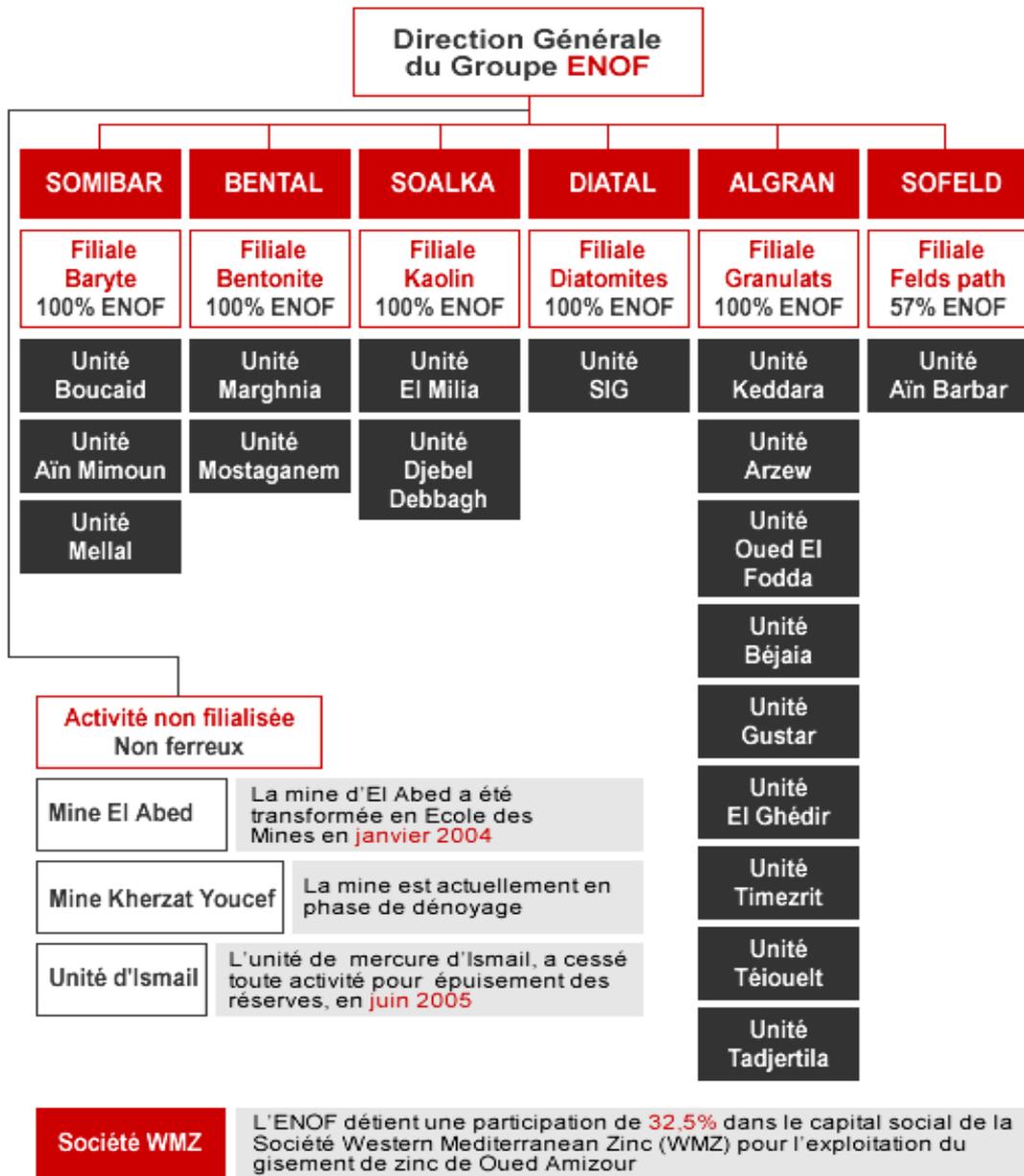
Spécialisé dans l'exploitation des mines souterraines et à ciel ouvert pour la production des minerais non ferreux et des substances utiles non métalliques, le groupe ENOF a pour vocation : la production, la commercialisation et le développement des produits miniers. La diversité et la qualité de ses produits font du groupe ENOF un partenaire de choix pour les industries nationales et internationales.

Sa progression est marquée par les investissements qu'il engage chaque année dans les opérations de développement et de la mise en valeur de nouveaux gisements.

### **1 - 2 - Présentation de la filiale ALGRAN :**

Filiale du Groupe ENOF, activant dans le secteur des mines, ALGRAN (Algérienne des granulats) est spécialisée dans la production d'agrégats et compte dans son portefeuille 9 unités d'agrégats implantées sur tout le Nord de l'Algérie, dont celle de Keddara.

La Filiale ALGRAN a pour objet la recherche, le développement et l'exploitation des carrières, la production et la commercialisation des agrégats.



**Figure N°1** : Organigramme du groupe ENOF.

### 1 - 3 - Historique du gisement de Keddara :

Le gisement de calcaires de Keddara a été mis en évidence, étudié et évalué en 1974 par l'unité de recherche de Tizi-Ouzou de l'ex - Entreprise Nationale de Recherche et d'Exploitation Minière (SONAREM).

Les réserves de catégorie C (probables) avaient été estimées à près de 15 millions de tonnes.

## Etude des vibrations dues aux tirs de mines. Apport de la modélisation

Les travaux de terrains tels que : l'ouverture de la carrière, la préparation des premiers gradins et le montage de la station de concassage ont été réalisés entre 1975 et 1978.

Une prospection détaillée a également été réalisée à la fin 1978 début 1979, puis l'entrée en production de la carrière a eu lieu dès Novembre 1978.

Après les grandes opérations de restructuration industrielle de la décennie 80, et en particulier de la SONAREM, la carrière de Keddara a été rattachée à l'Entreprise Nationale des Produits Miniers Non Ferreux et des Substances utiles (ENOF).

Une seconde opération de restructuration s'est produite en Janvier 2002, qui a donné naissance à la nouvelle filiale baptisée ALGRAN Groupe ENOF.

### **2 - SITUATION GEOGRAPHIQUE ET ACCES AU GISEMENT :**

Le gisement de calcaire de Keddara est localisé dans la commune de Boudouaou dans la Wilaya de Boumerdes.

Il est situé à 45 Km d'Alger, à une quinzaine de kilomètres au Sud de Boudouaou, à 1,2 Km à l'Ouest du village de Keddara (Figure N°2).

L'accès au site se fait par la route nationale N°29 reliant Boudouaou à Lakhdaria.

Le gisement d'une surface de 624 313 m<sup>2</sup> est allongé Est-Ouest, il se trouve à 1 Km de la route nationale N°29.

Ses limites géographiques sont les suivantes :

- ◆ au Nord et à l'Est, des terrains privés à vocation agricole et des forêts,
- ◆ a l'Ouest, le barrage de Keddara,
- ◆ au Sud, l'oued Keddara.

La localisation du centre du gisement est définie plus exactement par les coordonnées

Lambert suivantes : X = 568,600 Y = 369,000



Figure N°2 : Localisation de l'unité de Keddara.

## **3 – GÉOLOGIE :**

### **3 - 1 – Généralités :**

Les roches sédimentaires de la région est de l'Algérois affleurent sur une grande surface, offrant un très fort potentiel en agrégats.

Plusieurs entreprises exploitent ces carrières destinées à la production des matériaux de construction. Elles ont été surtout implantées en grand nombre dans la région de Keddara en raison de la facilité d'accès et de la proximité du massif montagneux du Bouzegza par rapport à la capitale Alger.

Seules 3 unités sont actuellement en exploitation : ENOF, SCP et Hydro Aménagement.

Les analyses chimiques et physico - mécaniques réalisées sur des échantillons représentatifs par l'ORGM (Office national de la recherche géologique et minière) ont montré que les agrégats de Keddara sont de bonne qualité et peuvent être utilisés dans tous les domaines de construction et de travaux publics : constructions et routes

#### **A - Essais sur les concasses monolithes :**

Les caractéristiques physico - mécaniques de la roche sont :

Poids spécifique : .....	2,71 t/m <sup>3</sup>
Poids volumique : .....	2,66 t/m <sup>3</sup>
Densité apparente : .....	1,44 t/m <sup>3</sup>
Densité absolue : .....	2,72 t/m <sup>3</sup>
Porosité : .....	2,00 %
Absorption d'eau : .....	0,44 %
Résistance à la compression : .....	1250 kg/cm <sup>2</sup>
Résistance à l'usure (Los Angeles) : .....	28,85 %

La composition chimique sommaire de la roche est :

Ca O: .....	37, 88 %
MgO: .....	.0, 78 %
SiO <sub>2</sub> : .....	2, 49 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : .....	2, 01 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : .....	0, 61 %
PAF : .....	42,22 %

#### **B - Essai de friabilité du sol:**

La valeur moyenne de friabilité qui est de 65,3% a été donné a partir d'essais sur des échantillons provenant de trois sondages différents (Rapport de l'ENOF : 2008).

## **3 - 2 - Géologie régionale :**

La région est accidentée et comporte une arête saillante, formée de terrains éocènes avec pointements de calcaires liasiques, elle n'est que le prolongement, affaibli vers l'Ouest, de la chaîne du Djurdjura.

Cette ligne de crête, entaillée par les profondes coupures de Oued Isser et de Oued Keddara, a pour sommets culminants Bouzegza (1 032 mètres) et Tegrimount (1 028 mètres).

Elle sépare deux régions distinctes : au Nord, le massif avec ses dépressions tertiaires ; au Sud, les contreforts crétacés, qui sont une dépendance de l'Atlas Blidéen, et se rattachent au massif de Tablat.

Le massif schisteux des Khachna se compose d'une série de contreforts dont le mamelon culminant ne dépasse pas 630 mètres (Iris-Znabir) ; c'est une réduction du massif kabyle, auquel il se rattache à l'Est par la chaîne cristalline des Flissa.

Plusieurs dépressions interrompent la continuité ; à l'Ouest, la vallée du Corso, occupée par le Crétacé Supérieur et des lambeaux démantelés de terrains miocènes ; à l'Est, c'est la zone des collines de l'Oued Djemaâ, qui se prolonge par la vallée de Drâ - El - Mizane jusqu'au pied du Djurdjura central.

Au Sud des Issers, commencent les contreforts monotones qui s'étendent vers le Sud jusqu'à la plaine des Arib et des Beni-Slimane.

Au Sud-Ouest, une arête importante se rattache au Djebel Zima (1 048 mètres), point culminant de cette partie de l'Atlas.

A l'exception des vallées de l'oued Corso et de Boudouaou, qui occupent la partie Nord-Ouest, toute la région appartient au bassin des Issers, dont la vallée traverse la région du Sud au Nord.

Ces terrains sont d'âge allant du Précambrien au Quaternaire représentés par :

## **3-3-Stratigraphie de la région :**

### **A- LE PRÉCAMBRIEN :**

Caractérisé essentiellement par une variété de schistes métamorphisés (phyllithes), séricite, chlorite, parfois intercalés par des bancs étroits de quartzites gris et gris clairs, ainsi que des calcaires gris et gris bruns au Sud du village de Keddara. La puissance des dépôts est supérieure à 200 m.

## **B-LE TRIAS :**

Très répandu dans les limites de la chaîne calcaire, il est présenté principalement par des grès quartzeux et arkoses rouges, gris foncés. Ces terrains renferment des inter - couches de gravelles et de poudingues .Il arrive aussi parfois que l'on rencontre des couches d'argile rose. L'épaisseur de ces dépôts est d'environ 500 m.

## **C- LE JURASSIQUE :**

Représenté par le Jurassique Inférieur et le Jurassique Supérieur.

### **1- Le Jurassique Inférieur (Lias) :** subdivisé en deux unités :

-**unité inférieure** : constituée essentiellement de calcaires et de dolomies massives gris clair, sa puissance est d'environ 500 m.

-**unité supérieure** : observée sur les versants sud de Djebel Bouzegza et Dra Sahar en concordance sur les calcaires argileux gris d'une puissance de 150 m environ.

### **2- Le Jurassique Supérieur (Malm) :**

Rencontré sous forme de petites écailles au niveau d'un grand accident sublatitudinal longeant le versant sud de la chaîne calcaire entre les terrains du Crétacé Supérieur et du paléogène. Il est constitué d'argiles rougeâtres, avec des radiolarites siliceuses de couleur verdâtre.

## **D- LE CRETACE :**

Représenté par le **Crétacé Inférieur** et **Crétacé Supérieur**.

### **1- Le Crétacé Inférieur :**

C'est essentiellement des formations flyschoides, subdivisés en : Néocomien, Aptien et Albien.

- **Le Néocomien / Aptien** : Il se trouve sous forme de bandes sublatitudinales, vers l'ouest de Oued Isser. Il repose sous forme d'une grande écaille représentée par des alternances régulières de couches de grès quartzeux blancs gris, et d'argilites. La puissance de la formation varie de 500 à 700 m.

-**L'Aptien / Albien** : Formé de flyschoides avec une alternance régulière de grés et surtout d'argilites d'une épaisseur avoisinant les 100 m.

### **2- Le Crétacé Supérieur :**

Il est en contact avec les dépôts du Crétacé Inférieur et du Paléogène, delimité de ces derniers par les accidents disjonctifs. Ce niveau est représenté par des marnes schisteuses uniformes, de gris à gris foncé, assez massives par endroit, d'une puissance dépassant les 100m.

## **E- LE PALEOGENE :** Représenté par des dépôts **Eocènes** et **Oligocènes**.

## **1-L'Eocène** : (moyen / supérieur).

-**L'Eocène moyen (Lutétien)** : Rencontré sous forme de blocs tectoniques, en nappes et en écailles, ce sont des calcaires massifs gris et gris clairs, renfermant plusieurs foraminifères. L'assise est d'une puissance d'environ 100 m, au dessus de laquelle repose une formation flyschoides, formée de grés grisâtres alternés avec des argiles, calcaires gris et des marnes. Ces dépôts ont une puissance approchant les 100 m

- **L'Eocène supérieur** : Correspond à une formation flyschoides en lits moyens avec présence d'Arkoses, calcaires grisâtres alternés avec des marnes micacées grises, gris verdâtre. Dans les parties sud cette formation flyschoides incorpore des couches de conglomérats polygéniques, (par endroit ces couches ont une puissance de 5 m). La puissance de ces dépôts est de 600 à 800 m.

## **2- L'Oligocène** :

C'est une puissante série de flyschs alternée par des grés et des marnes prédominant les grés arkosés, calcaires polygéniques grossiers, gris assez consistant, en gros bancs (jusqu'au gravelles). Dans la partie de la coupe de l'assise, on remarque une alternance de bancs puissants de 5 à 10 m de grés gris, calcaires, quartz micacés et des marnes micacées, sa puissance atteint les centaines de mètres.

## **F- LE QUATERNAIRE** :

Représenté par différents types génétiques :

- a)- Le type alluvionnaire : se trouvant dans les lits actuels des oueds et sur les terrasses.
- b)- Le type diluviaux / proluviaux des creux et versants.
- c)- Les travertins formés par des sources qui sortent en surface en traversant des couches carbonatées.

L'épaisseur des dépôts quaternaires varie de 1,5 à 3,0 m, (Rapport de l'ENOF, 2008).

## **3 - 4 – Tectonique de la région** :

L'axe orogénique est tracé par la chaîne des Beni-Khalfoun et des Ammal, qui est constituée d'une manière générale par un pli anticlinal correspondant à la crête et des plis synclinaux sur les deux versants.

L'axe principal est jalonné par des pointements liasiques qui occupent le voisinage des sommets culminants (Tegrimount, Bou-Zegza).

Le Djebel Zima (Koudiat Zega), au Sud-Ouest, montre la zone éocène accidentée et de nombreux plis légèrement déversés en éventail.

## Etude des vibrations dues aux tirs de mines. Apport de la modélisation

Au Nord de l'arête éocène, la zone oligocène forme un grand pli synclinal orienté de l'ouest à l'Est, à la bordure duquel s'appuient les terrains miocènes.

Ces dépressions, sensiblement orientées du S-SE au N-NO, correspondent à des plis synclinaux du massif ancien.

Le plus important est occupé par le Carnien (vallée de l'oued Djemaâ).

Le pli synclinal de l'isser (Beni - Amrame, Souk - El - Had) est orienté sensiblement N / S.

Il en est de même de la dépression de l'oued Corso (pli synclinal du Crétacé Supérieur).

La région est affectée surtout par des accidents discontinus avec un pendage fort de 60° environ, où l'on distingue deux familles de plan de failles :

- 1- Nord 100° à 290°,
- 2- Nord 55° à 65°.

On note aussi la présence des cavités karstiques, généralement remplies de boue parfois très oxydées.

Il existe aussi des diaclases formant un réseau de cassures dans toutes les directions.

### **3 - 5 - Roches métamorphiques :**

Ce sont essentiellement des métagabbrodiorites et des granitogneiss.

**a- Métagabbrodiorites :** ce sont des roches massives schisteuses en grains fins verdâtres et gris verdâtre, avec des traces nettes de modifications telles qu'une teneur élevée en chlorite, une carbonatation ...etc.

**b- Granitogneiss :** ce sont généralement des roches grises à gris clair et parfois rosâtres comportant 50 à 70 % de feldspaths et 20 à 30 % de quartz et de micas clairs.

### **3 - 6 - Généralités sur le gisement :**

#### **a- Caractéristiques géologiques du gisement :**

Le gisement de Keddara occupe la dorsale de la chaîne calcaire qui se prolonge de Djebel Bouzegza à l'ouest jusqu'à Kef Marouane à l'est.

Le gisement de Keddara est associé à un bloc tectonique qui se prolonge sur 20 Km, constitué de calcaires bréchiques de direction Nord - Est, de grès, de marnes et de schistes argileux vers la direction nord. A considérer comme substances utiles les calcaires lutétiens.

Des calcaires gris et gris foncé en petits cristaux avec de nombreuses petites coquilles de nummulites (1 à 2 cm) sont fortement cimentés avec les roches encaissantes.

La roche est massive avec de nombreux filonnets ramifiés de calcite blanche à grands cristaux.

Les coquilles de nummulites qui constituent 80 à 90 % de la roche cimentée par une calcite à grands cristaux et dolomite. Dans les calcaires la dolomitisation diminue avec la profondeur et cède la place à une minéralisation : dolomite, calcite et sidérite, et dolomite calcite.

### **b- Tectonique du gisement :**

Dans ce gisement, on note la présence d'une faille stérile sur le front de taille au Nord de la carrière ayant une direction NNE – SSW avec un pendage plus ou moins prononcé vers le N-NO.

On remarque aussi l'existence des failles intraformationnelles dans toutes les directions, ainsi que les diaclases qui sont très fréquentes.

Dans la partie est du gisement, les entailles de la carrière ont mis en évidence dans la zone de failles des brèches tectoniques grés - calcaires, avec une puissance visible de 28 m. Selon leurs propriétés physico mécaniques, elles peuvent être employées dans la production des agrégats et considérées par conséquent comme substances utiles. (Rapport de l'ENOF ,2008).

### **3 - 7 - Caractéristiques hydrogéologiques :**

La recherche hydrogéologique réalisée à partir de la surface et les observations hydrogéologiques effectuées dans certains trous de sondages, montrent à l'évidence qu'aucune nappe d'eau souterraine n'a été rencontrée.

Un forage de 130 mètres de profondeur réalisé à 1 Km au Nord du gisement par les services de l'hydraulique de la Wilaya de Boumerdes montre que l'on a affaire à une formation épimétamorphique calcaro-schisteuse bleuâtre altérée en surface (dans les 30 premiers mètres) et comprenant des fissures remplies de silice blanchâtre.

L'étude effectuée par la SONAREM a, quant à elle, permis d'individualiser deux grands ensembles (Rapport de l'ICB, décembre 2001) :

- ◆ une assise calcaire massive et compacte à Nummulites,
- ◆ l'assise marno - calcaire gréseuse sous-jacente.

L'assise calcaire massive et compacte à Nummulites est dépourvue de sources d'eau et de puits dans les abords du périmètre d'exploitation. Elle occupe les 2/3 du périmètre d'exploitation.

Elle peut être fortement sujette à l'érosion ; lors des grandes averses, il se forme, sur les premiers mètres, une accumulation d'eau qui ne peut constituer de nappe car elle est temporaire et d'importance négligeable.

L'assise marno-calcaire gréseuse sous-jacente est quant à elle, une formation sédimentaire très peu perméable ne permettant pas l'infiltration et ne peut donc constituer de nappe aquifère.

Il y'a deux points d'eaux à l'Est et au Sud du gisement qui alimentent l'unité en eau potable.

### **3 - 8 - Caractéristiques hydrauliques :**

Le réseau hydrographique proche du site s'organise autour de talwegs qui se jettent dans l'oued Corso, en dehors du bassin versant de l'oued Keddara et du barrage du même nom de 150 millions de m<sup>3</sup>.

L'écoulement des eaux dans les deux talwegs, en période de crue, s'effectue de manière linéaire du Sud vers le nord et indique un régime torrentiel évident sur un substratum imperméable.

## **4 - EXPLOITATION DU GISEMENT :**

### **4 - 1 - Etat de l'exploitation :**

Le gisement actuel est en voie d'épuisement. Pour le remplacer l'entreprise a acquis quatre permis d'exploitation sur le site de Keddara :

- Bouzegza nord dit Mhana,
- Djebel Ifri,
- Boundass,
- Dra – Essaha.

### **4 - 2 - Méthode d'exploitation :**

Compte tenu de la nature du minerai exploité, en l'occurrence du calcaire dur et du fait qu'il s'agit de l'exploitation d'un gisement superficiel situé en altitude, la méthode d'exploitation retenue a été l'exploitation à ciel ouvert en gradins, ayant un certain nombre de caractéristiques cités ci - après. (Rapport d'exploitation de l'ENOF, 2008).

### **4 - 3 - Paramètres d'exploitation :**

Les paramètres utilisés généralement dans la carrière sont :

## **A- La hauteur des gradins :**

La hauteur de gradin est estimée en fonction de plusieurs paramètres, à savoir :

- la stabilité du talus du gradin ; dans ce cas il s'agit d'un gisement très stable,
- la hauteur de l'engin d'excavation,
- la capacité de production,
- la puissance des engins de foration.

## **B - L'Inclinaison des gradins :**

L'inclinaison du gradin dépend essentiellement de la stabilité du gisement en exploitation.

Le plan d'exploitation a permis de procéder au choix d'une inclinaison de 85° (Rapport d'exploitation de l'ENOF, 2008).

## **C - La berme de sécurité :**

La berme de sécurité est la largeur qu'on l'on doit laisser inexploitable au bord de la carrière, une fois le gradin épuisé.

Dans le cas de l'exploitation du gisement actuel, une berme de sécurité de quatre mètres suffit.

## **D - Méthode d'extraction et d'abattage :**

La dureté du minerai est de l'ordre de 8 selon l'échelle de Mohs et de ce fait la méthode d'extraction ne peut se faire que par abattage à l'explosif.

## **4-4- Paramètres de foration :**

Les paramètres de foration généralement utilisés dans la carrière sont :

### **A- Le diamètre de trou :**

Le diamètre de trou est choisi selon la capacité de l'engin de foration, la maille de foration, la nature du gisement ainsi que le type d'explosif à utiliser.

Il a été vérifié expérimentalement que le type d'engin de foration utilisé dans la carrière donne un meilleur rendement avec un diamètre  $D = 89$  mm.

### **B - La profondeur du trou :**

La profondeur du trou ne se limite pas à la hauteur du gradin du fait qu'il doit y avoir une sur profondeur qui permettra d'éliminer les rebords au pied du gradin.

Cette profondeur de sous foration  $h$  est estimée à 1 m et la profondeur des trous  $H$  à 14 m.

### **C - La distance entre trous :**

a est la distance entre trous et qui généralement est de l'ordre de 3,0 m dans ce cas là.

### **D - Distance entre les rangées:**

b est la distance entre rangées et qui généralement est de l'ordre de 2,5 m.

### **E - Quantité de charge par trou :**

La quantité de charge par trou  $Q_{ch}$  est calculée par la relation :

$$Q_{ch} = Q * H (W+b) * a / 2$$

$$Q_{ch} = 0.40 * 14 * (3+2.5) * 3 / 2 = 46.2 \text{ Kg/m}^3$$

### **F - Disposition de la charge dans les trous :**

Il se trouve que la régularité du tir est meilleure lors de l'utilisation des charges discontinues ; les rebords se trouvent minimisés et c'est pourquoi ce type de chargement est recommandé.

### **G - Consommation spécifique d'explosif :**

Dans les carrières il a été vérifié expérimentalement que la consommation spécifique d'explosif est de l'ordre de  $Q_{sp} = 0,40 \text{ Kg/m}^3$

### **H - La ligne de moindre résistance :**

La ligne de moindre résistance est fonction du gradin ainsi que de sa stabilité, on l'estime à :

$$W = 3,5\text{m}$$

Tous ces paramètres sont regroupés dans le tableau N°1 ci - dessous :

DÉSIGNATION	SYMBOLES :	VALEURS :
1- Diamètre de trou	D	110 mm et 89 mm
2- Ligne de moindre résistance	W	3,5 m
3- Angle de trou	$\theta$	85°
4- Profondeur du trou	H	14,0 m
5- Profondeur de sous foration	h	1,0 m
6- Distance entre les trous	a	3,0 m
7- Distance entre les rangées	b	2,5 m
8- Nombre de rangées	n	4
9- quantité de charge par trou : - <u>pour diamètre 110 mm</u>  - <u>pour diamètre 89 mm</u>	$Q_{ch}$	-Anfomil 25 kg -Brisant 40 kg -Anfomil 12,5 kg -Brisant 40 kg
10- Volume dégagé par trou : - pour diamètre 110 mm	V	-200 tonnes
11- Consommation spécifique	$Q_{sp}$	-400 gr /m <sup>3</sup>

### **4 - 5 - Production de l'unité :**

#### **A - Production par poste :**

La production par poste  $R_p$  se calcule comme suit :

$$R_p = K_u \times H_p \times R_H$$

$$R_p = 0.6 \times 6 \times 300 = 1\ 080 \text{ tonnes / poste}$$

#### **B - Production journalière :**

La production journalière  $R_j$  se calcule comme suit :

$$R_j = R_p \times N_p$$

$$R_j = 1\ 080 \times 2 = 2\ 160 \text{ tonnes / jour.}$$

#### **C - Production annuelle :**

La production annuelle notée  $P_0$  est la production journalière \* le nombre de jours ouvrables.

Elle est calculée par :  $P_0 = R_j \cdot N_0$

$$P_0 = 2\ 160 \times 280 = 604\ 800 \text{ tonnes / an}$$

La production totale annuelle est d'environ **600 000 tonnes.**

La capacité de production de la carrière est en fait de **650 000 tonnes.**

### **D - Volume dégagé par trou :**

Le volume dégagé par trou  $V_{tr}$  est donné ci-dessous :

$$V_{tr} = H \times (w+a)/2 \times 3$$

$$V_{tr} = 12 \times (3+2.5)/2 \times 3$$

$$V_{tr} = 99 \text{ cm}^3$$

Si on prend en considération un coefficient de foisonnement minimum de 1,2 on aura :

$$V_{tr} = 99 \times 1,2 = 120 \text{ m}^3$$

### **E - Nombre de trous réalisés par poste :**

C'est le rendement par poste divisé par le nombre de trous :

$$R_p = 1\ 080 \text{ tonnes} = 800 \text{ m}^3 / \text{poste}$$

$$N_{tp} = R_p / V_{tr} = 800 / 120 = 7 \text{ trous.}$$

### **F - Nombres de chariots de foration nécessaires :**

Etant donné qu'un chariot de foration réalise en moyenne 4 trous / poste, le nombre de chariots de foration nécessaires est de 2.

Compte tenu de certains aléas, un troisième chariot est nécessaire.

### **G - Chargement :**

Le premier facteur qui permettra de définir le chargement est la charge spécifique d'explosif qui est la charge totale de l'explosif mis en œuvre rapportée au volume rocheux à abattre.

Le deuxième facteur est la densité de chargement. Elle dépend du diamètre de la cartouche d'explosif par rapport au diamètre du trou. Plus la densité du chargement sera élevée, meilleur sera le couplage explosif / terrain et meilleure sera le rendement de l'énergie explosive pour fragmenter la roche.

### **H - Rendement jour par pelle :**

Le rendement jour par pelle  $R_{jp}$  est calculé par la relation :

$$R_{jp} = K_u \times T_p / T_{ch} \times V_{ch}$$

$$R_{jp} = 0.7 \times 6 \times 60/3 \times 18 = 1\ 512 \text{ m}^3$$

### **I - Roulage:**

Le nombre de dumpers nécessaires, en considérant un cycle de temps de 8 minutes, est de :  
 $N_c = 3.$

L'unité dispose de trois dumpers (deux de 35 tonnes et un de 50 tonnes).

### **4 - 6 - Régime de travail de la carrière :**

Actuellement la carrière fonctionne en deux postes de quatre jours par poste :

- un poste de travail de 10 heures,
- quatre jours (04 j) par équipe (alternance de deux équipes),
- trois cent trois jours ouvrables (300 j) par an,
- vingt cinq jours ouvrables (25 j) par mois en moyenne.

### **4 - 7 – Objectifs :**

L'unité a pour objectif de développer et accroître ses capacités de production par l'exploitation des deux gisements (Mehana et Ifri) qui sont en phase d'exploration. Une importance plus grande sera portée sur la préservation et l'amélioration des conditions internes et externes de l'environnement.

La mise en place d'un laboratoire de contrôle de la production est aussi prévue, tout comme la mise en place d'un système management de la qualité (ISO 9001 / 2000).

Toutefois la fidélisation des clients par le respect de leurs exigences reste la clef de la réussite.

## **5- TRAITEMENT DANS L'UNITÉ DE KEDDARA :**

L'unité a démarré en 1978 et a subi un acte de sabotage en janvier 1997 qui l'a contraint à arrêter sa production de janvier à mai 1997.

Un concasseur de la station secondaire, détruit totalement a été remplacé par un équipement d'occasion. Celui-ci a enregistré plusieurs arrêts durant l'année 2001 et son remplacement par un concasseur à percussion (Krupp) n'a été effectué qu'en 2003. (Rapport d'exploitation de l'ENOF, 2008).

### **5-1- Description du processus de l'installation de concassage :**

#### **A - Installation primaire :**

Le tout venant avec une grosseur de 1 000 mm maximale est déversé à l'aide des dumpers dans une trémie réceptrice.

La fraction supérieure à 200 mm sélectionnée par un alimentateur passe par un concasseur giratoire de marque BABITLESS type BP 38, d'un débit de 800 t/h où elle subit une réduction à 200 mm.

La fraction inférieure à 200 mm passant à travers la grille de l'alimentateur est en fonction de sa qualité, soit soumise à un criblage préalable dans un crible à deux étages de marque COMESSA ou la fraction 0-40 mm est exclue comme stérile, sinon elle rejoint le produit issu du concasseur à l'aide d'un by-pass pour un stockage dans un chapeau chinois d'une capacité de 3 000 tonnes.

## **B - Installation secondaire :**

Le produit du chapeau chinois avec une grosseur de 0-200 mm principalement, est soumis dans un premier temps à un criblage dans un crible à deux étages de marque BABBITLESS ou la fraction inférieure à 40 mm est extraite du processus comme produit marchand et la fraction (+40,-200 mm) passe par un concasseur à percussion de marque KRUPP HAZMAG type APS 1313K d'un débit de 300 t/h où elle est réduite à 50 mm.

Le produit issu du percuteur subit des opérations de criblage sur trois cribles à deux étages travaillant en série de marque SN METAL et BABBITLESS où les fractions suivantes sont mises en stock dans des silos :

### **1-fractions du premier crible :**

- fraction supérieure à 70 mm avec la possibilité de la remettre dans le cycle pour un concassage dans le percuteur ;
- fraction -70 + 40 mm avec la possibilité de la réduire à 25 mm dans un concasseur giratoire de marque BABBITLESS type BS 704N à un débit de 120 t/h.

### **2-fractions du deuxième crible :**

- fraction -40+25 mm avec la possibilité de la soumettre soit au concasseur BS 704N , soit à un autre concasseur giratoire de la même marque précédente de type\_BS 704EG d'un débit de 120 t/h pour une réduction à 25 mm ;
- fraction -25+15 mm avec la possibilité de la réduire soit dans le concasseur BS704 EG, soit dans un quatrième concasseur giratoire de marque BABBITLESS type BS 702 d'un débit de 30 t/h pour une réduction à 15 mm pour une opération de concassage tertiaire.

### **3-Fractions du troisième crible sans recyclage :**

- fraction -15+8 mm
- fraction -8+ 3 mm
- fraction -3+0 mm

La capacité installée de la station secondaire est de 300 tonnes / heure.  
Compte tenu de la vétusté des équipements, le coefficient d'utilisation est de 60%.  
La Figure N°3 résume et schématise les étapes de ce processus de traitement.

### **5-2- Description de la station ARJA :**

Le produit avec une granulométrie de 0 à 200 mm est soutiré du chapeau chinois à l'aide d'un extracteur appartenant à l'installation BABBITLESS pour alimenter un pré crible à deux étages (toile supérieure de 70 mm et toile inférieure de 40 mm) par le biais d'un convoyeur.

La fraction inférieure à 40 mm est mise en stock (en tas) par un convoyeur, par contre les fractions supérieures à 40 mm passent par un concasseur à percussion à un débit de 200 t/h.

Le produit issu du concasseur à une granulométrie de 0/70 mm. Il est dirigé vers un crible sur silos à 4 étages doté des toiles suivantes 25 mm, 15 mm, 8 mm et 3 mm.

Les fractions issues du crible représentent des produits finis de l'installation .Elles sont stockées dans des silos et se résument comme suit :

- fraction supérieure à 25 mm ;
- fraction 15/25 mm ;
- fraction 8/15 mm ;
- fraction 0/3 mm.

La Figure N°4 résume et schématise les étapes de ce processus dans la station ARJA.

### **5-3- Traitement du sable :**

Cette opération est réalisée dans un décanteur à aubes qui permet de brasser, de récupérer et d'égoutter le sable tout en permettant l'élimination des fillers qui seront entraînés par les eaux de sur verse. (Rapport d'exploitation de l'ENOF, 2008).

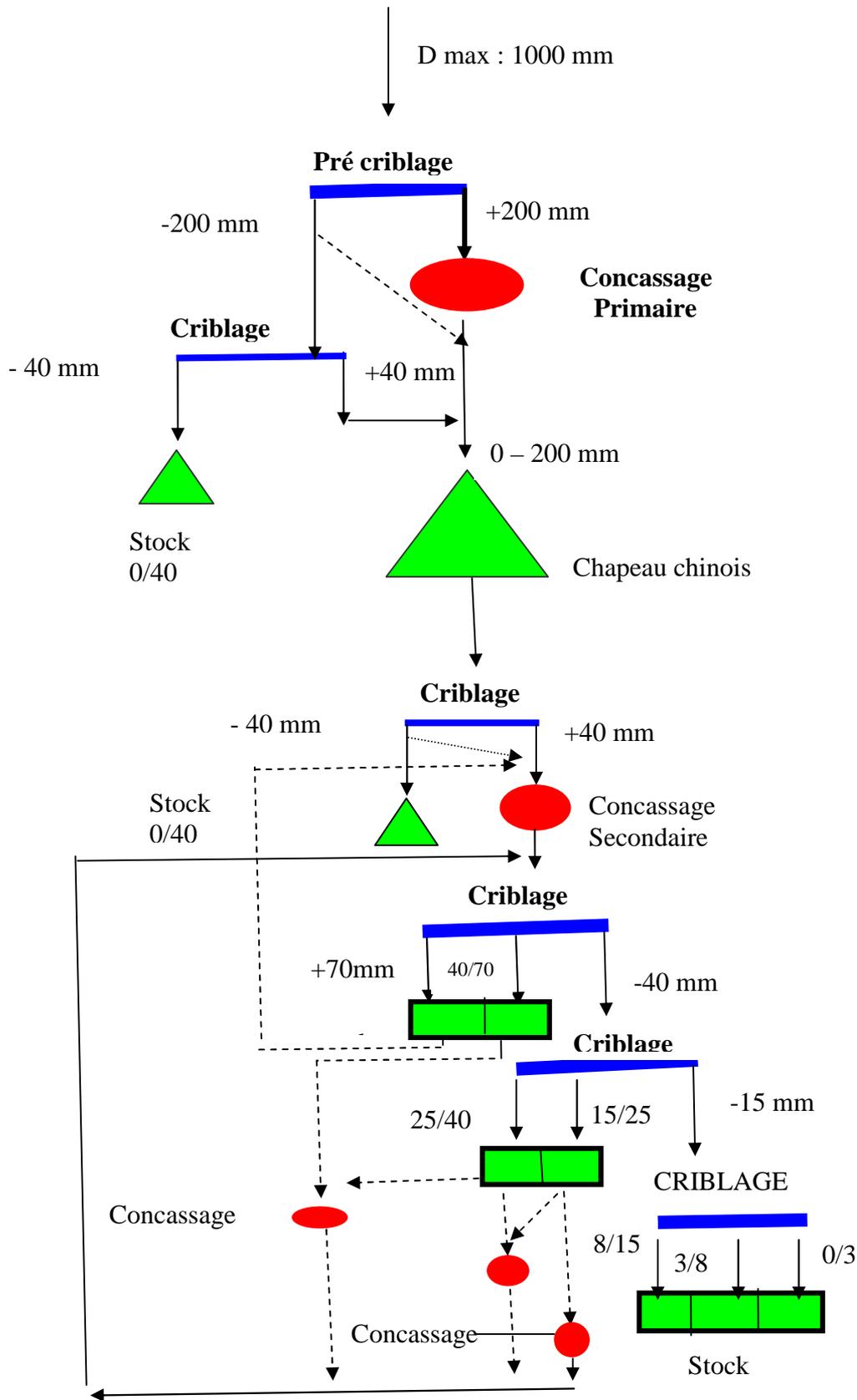
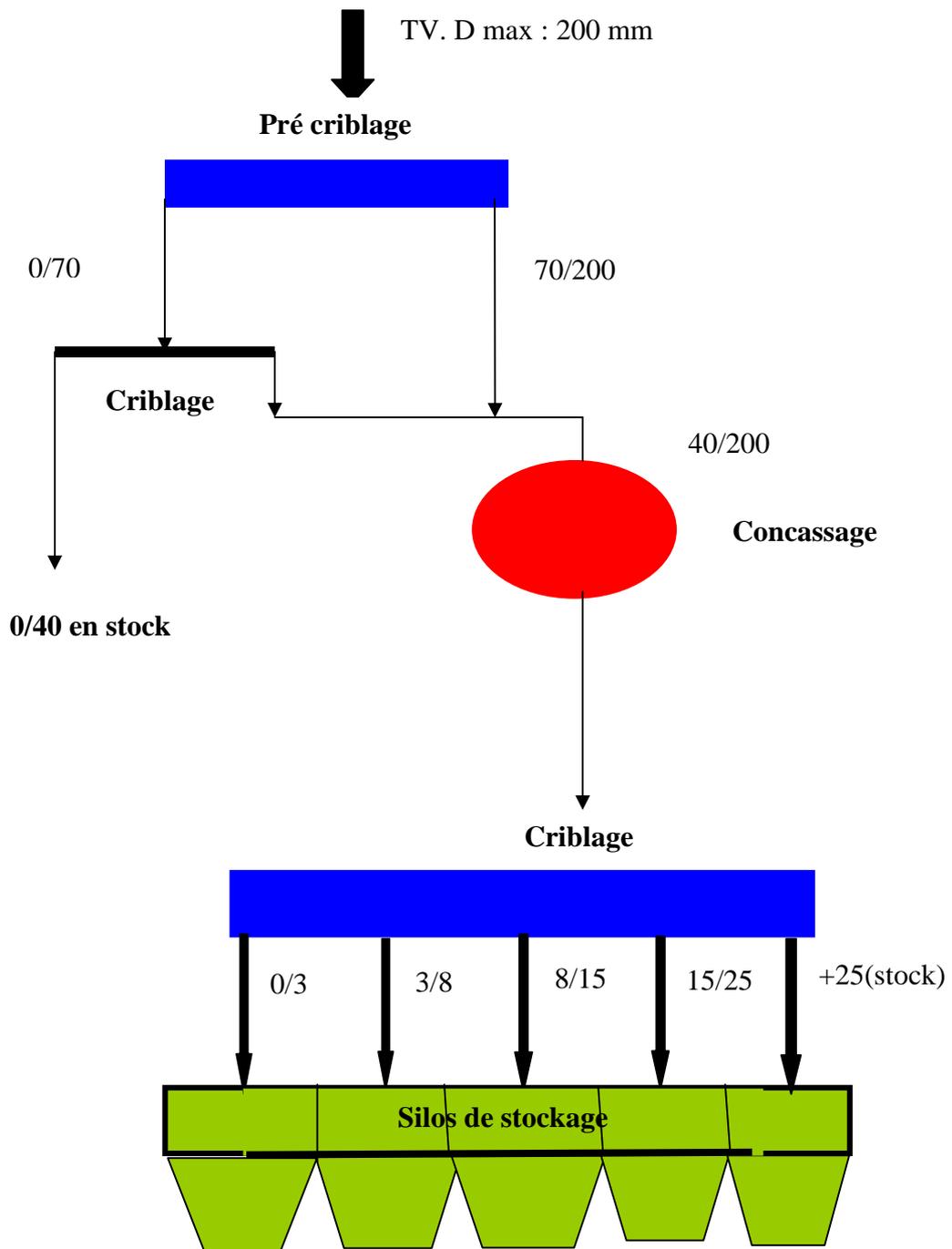


Figure N°3 : Schéma technologique de l'installation BABBITLESS(Rapport d'exploitation de l'ENOF, 2008).



**Figure N° 4** : Schéma technologique de l'installation ARJA  
(Rapport d'exploitation de l'ENOF, 2008).

## **DEUXIÈME CHAPITRE :**

# **THÉORIE DU TRAVAIL A L'EXPLOSIF**

## **1 - Définition d'un explosif :**

On appelle explosif une combinaison chimique ou un mélange mécanique qui, sous l'action d'une impulsion extérieure (réchauffement, étincelles, chocs), est apte à exploser, c'est-à-dire qu'il peut se transformer instantanément en d'autres combinaisons chimiques avec dégagement de chaleur et formation de gaz capables de produire un travail mécanique.

On appelle explosion une réaction chimique très exothermique et extrêmement rapide libérant une grande quantité de gaz qui, sous l'effet de la température élevée instantanément, produit un travail mécanique et engendre dans le milieu environnant des ondes de choc.

## **2 - Déflagration et Détonation :**

### **A - Déflagration :**

La déflagration de la substance explosive est provoquée par la décomposition de la molécule suivie par une combustion des atomes de carbone et d'hydrogène contenus dans la matière. La vitesse de décomposition est relativement lente et est comprise entre 10 et 400 m/s.

### **B - Détonation :**

La détonation est le régime de décomposition le plus rapide et donc celui qui donne les effets mécaniques les plus importants. Ce qui est le plus généralement recherché dans l'emploi des explosifs.

La détonation est une réaction chimique exothermique qui se propage dans l'explosif couplé avec une onde de choc.

Cette réaction chimique exothermique donne des gaz (surtout CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O) dont la température est comprise entre 1000 et 4000 ° C. La pression est de 1000 à 25000 MPa soit 10 à 250 Kbars.

La vitesse de détonation est comprise entre 1000 et 8000 m/s.

La détonation se propage dans l'explosif qui se trouve initialement dans des conditions de température, de pression, de volume massique  $T_0$ ,  $P_0$ ,  $V_0$ , à une vitesse supérieure à la vitesse du son. La zone de réaction est étroite quand l'explosif est un corps pur ou un mélange homogène.

A la fin de la réaction de décomposition, les produits de réaction sont aux conditions  $T_1$ ,  $P_1$ ,  $V_1$ , et les gaz de décomposition se détendent en participant aux effets mécaniques de l'explosion.

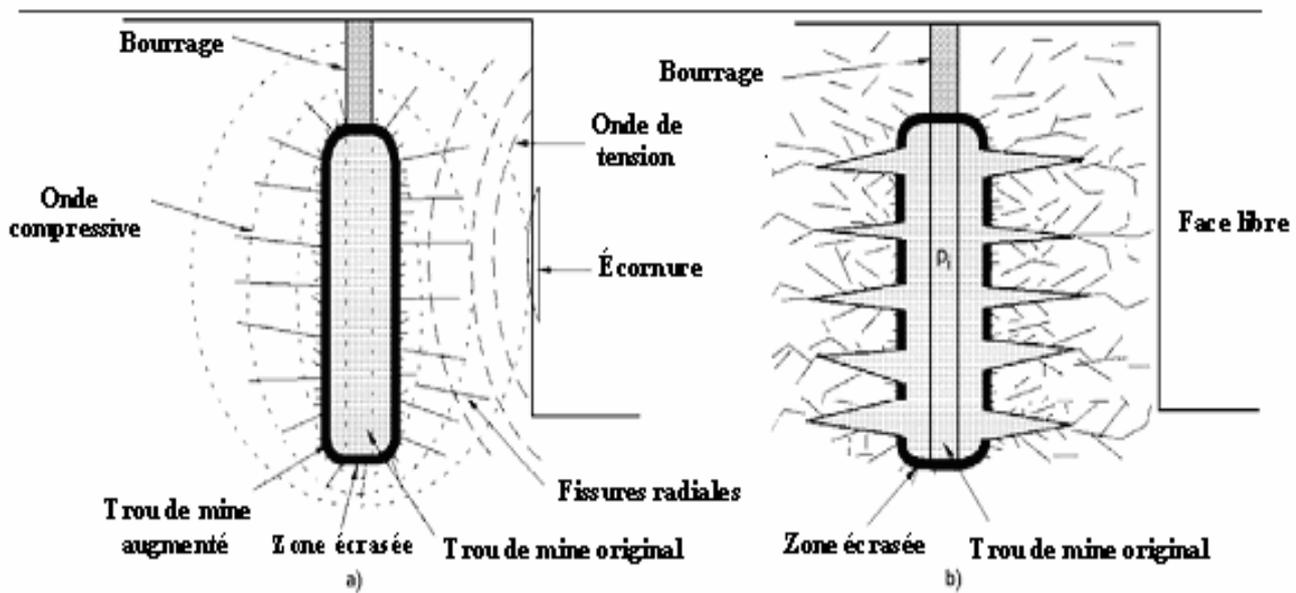
Le mécanisme d'abattage résultant s'effectue selon divers processus indissociables :

- fissuration sous l'effet de l'onde de choc, de la roche à divers niveaux (zone de broyage, zone de fissuration radiale, zone sismique), (Figure 6-a) ;

- accentuation sous l'effet de la pression des gaz, des fissures précédentes ou celles préexistantes dans le massif, créant ainsi une fragmentation de la roche en place (Figure 6-b) ;

- étalement, sous l'effet de la poussée exercée par les gaz résiduels, des roches fragmentées.

(Blanchier et al, 1988).



**Figure N° 6:** -a) propagation de l'onde de choc,  
-b) expansion de pression de gaz.  
(Scot et al, 1996 in mémoire de fin d'études de Gharbi, 2007)

### 3 - Transfert d'énergie dans le milieu connexe :

La détonique définit le transfert de pression (ou d'énergie) entre deux milieux dans le cas d'une onde de choc plane parallèle à la surface de discontinuité.

Dans l'hypothèse acoustique ( $\rho$  constante) la pression transmise  $P_{tr}$  par l'explosif à un milieu rocheux connexe s'exprime en fonction de la pression incidente  $P_i$  par la relation :

$$P_{tr} = P_i \frac{Z}{Z+1} \dots\dots\dots (1)$$

Avec :

$$Z = \frac{P_e \times V_d}{P_r \times V_r} \text{ est le rapport d'impédance,}$$

$P_e$  et  $V_d$  : masse volumique et vitesse de détonation de l'explosif,

$P_r$  et  $V_r$  : masse volumique et vitesse de propagation des ondes dans la roche.

Si on tient compte de l'inclinaison du front de l'onde sur la surface de discontinuité :

$$P_{tr} = P_i \frac{1+N}{1+NZ} \dots\dots\dots (2)$$

où N est un coefficient empirique pris égal à 5, déterminé pour améliorer la corrélation entre la formule et l'expérimentation.

Il est à noter que les relations (1) et (2) supposent que la masse volumique de la roche et la vitesse de propagation sont sensiblement constantes. Ceci n'est pas en général le cas à proximité de l'explosif où les écarts peuvent être de l'ordre de 20%.

Le flux d'énergie par unité de surface s'écrit sous la forme :

$$E = \frac{1}{P_c} \int_0^t p^2 dt \dots\dots\dots (3)$$

Et pour une onde normale, on a alors :

$$E_{tr} = \frac{1}{P_c} \int_0^t P_{tr}^2 dt = \frac{1}{P_c} \int_0^t P_i^2 \frac{4}{(1+Z)^2} dt$$

$$\frac{E_{tr}}{E_i} = \frac{4Z}{(1+Z)^2}$$

Le transfert d'énergie présente un maximum pour  $Z=1$ , l'énergie étant entièrement transmise. C'est le cas de l'adaptation parfaite d'impédance.

Cette relation présente en fait une distorsion importante avec l'expérience. Elle présuppose par la relation (3) que l'on est en élasticité, dans le cas d'une onde plane (ou d'une onde divergente loin de la source).

Pour connaître l'état de contrainte en tout point, il suffit alors de déterminer la décroissance de la pression radiale en fonction de la distance à la charge.

a- Décroissance en  $1/r^3$  jusqu'à ce que la contrainte soit inférieure à la résistance en compression de la roche.

b- Décroissance en  $1/r^5$  à  $1/r^2$  par la suite ( $1/r^{1.8}$  en moyenne). Cette décroissance est plus forte à grande distance.

### **4 - Effet général des ondes de choc dans le massif rocheux :**

Le mécanisme général de fragmentation des roches à l'aide d'explosifs peut se résumer à l'enchaînement des phénomènes suivants : décomposition de la matière explosive en gaz à haute pression et hautes températures, propagation d'ondes de contrainte dans le massif, rupture ou endommagement de la roche, détente des gaz à travers les zones de fragilité créées, ouvrant de manière franche des fissures et finalement, la mise en mouvement et l'éjection des fragments de matériaux. (Bernard.T).

Lors de la détonation d'une charge dans un massif rocheux, la propagation de cette onde s'accompagne de phénomènes irréversibles qui permettent de définir trois zones (figure7) :

- la zone de broyage,
- la zone de fissuration radiale,
- la zone sismique.

#### **a - La zone de broyage :**

Dans les premiers temps de la propagation, les contraintes subies par la roche sont très élevées de 5 à 75 Kbars de pression « d'explosion » (c'est-à-dire la pression latérale sur les parois sensiblement égale à 50% de la pression de détonation dans le cas du remplissage complet du trou).

Le niveau des contraintes est en général suffisant pour que l'on suppose un régime hydrodynamique.

Elles excèdent en général la résistance à la compression de la roche  $R_c$  qu'elles broient en fines particules.

Du point de vue de la mécanique des milieux fissurés les microfissures existantes dans le massif (joints de grains...) se développent et se ramifient fortement.

L'onde émise n'est pas la seule responsable de l'état de contrainte, les gaz qui s'engouffrent dans les fissures y participent.

La décroissance des contraintes est toutefois très rapide. A courte distance, 3 à 5  $r_c$  ( $r_c$  : rayon de la charge) elles sont revenues au deçà de la résistance à la compression de la roche. (Blanchier et al, 1988).

### **b- La zone de fissuration radiale (zone transitoire) :**

La roche subit en plus de la contrainte de compression radiale une contrainte tangentielle de traction. Celle-ci, malgré une décroissance en  $1/r^3$  dans la zone de broyage en  $1/r^2$  par la suite, demeure néanmoins supérieure à la résistance à la traction sur une distance importante.

La contrainte tangentielle est responsable de la rupture (en traction). Des fissures radiales se développent alors autour de la cavité jusqu'à ce que la contrainte tangentielle devienne inférieure à la résistance en traction ( $R_t$  de 20 à 150 bars).

### **c- La zone sismique :**

Au-delà, aucune fissuration microscopique marquante n'apparaît. Les variations de masse volumique au cours de la déformation sont négligeables. Un modèle classique de comportement classique est alors utilisable (par exemple le comportement élastique).

Il ne faudrait pourtant pas conclure que l'onde de contrainte n'a aucun effet sur le milieu de propagation. Elle continue à affaiblir le massif mais sans mettre pour autant en cause sa structure globale (pré - fissuration).

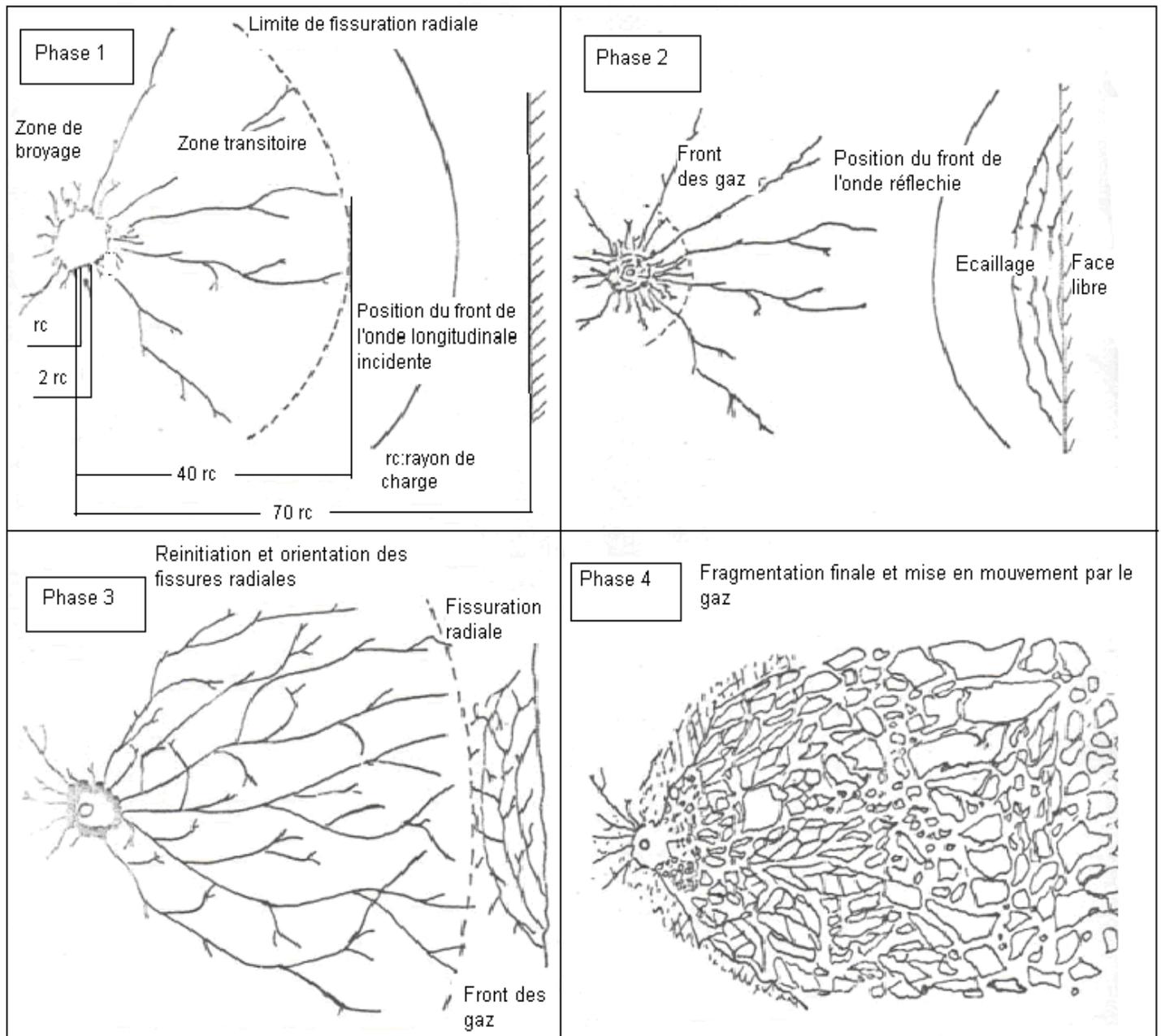


Figure N° 7: – Développement de la fissuration et de la fracturation ;(Blanchier et al, 1988).

## 5 - Effet des ondes réfléchies :

Dans le cas précédent, nous avons supposé le massif infini. En fait, les tirs sont généralement réalisés près d'une face libre qui constitue une discontinuité importante.

En effet, dès qu'elle rencontre une discontinuité, l'onde de contrainte émise se scinde en une onde transmise et une onde réfléchi.

## Etude des vibrations dues aux tirs de mines. Apport de la modélisation

La répartition entre l'énergie transmise et l'énergie réfléchie dépend du rapport des impédances des matériaux de part et d'autre de la discontinuité.

Dans le cas de l'interface roche / air pris dans cet ordre, la réflexion est presque totale. L'onde de compression (longitudinale) se réfléchit en une onde de traction. Celle-ci peut conduire à des contraintes excédant la résistance à la traction de la roche. Cela se produit lorsque la distance entre la source et la discontinuité est faible.

Une fissuration parallèle au plan d'onde apparaît alors. Ce phénomène est appelé écaillage. La présence de nombreuses discontinuités dans le massif (microfissures) induit deux effets sur l'onde qui se propage :

- affaiblissement du maximum de contrainte ;
- diminution des fréquences associées aux ondes de contraintes (phénomènes vibratoires).

Les ondes réfléchies jouent deux rôles :

- modification de l'orientation des fissures radiales ;
- initiation de nouvelles fissures.

Ainsi une nouvelle fissuration perpendiculaire à l'écaillage apparaît au voisinage de la surface libre.

### **- Fragmentation finale –mise en mouvement.**

Si l'onde émise et l'onde réfléchie sur la surface libre ont pu pré - fissurer, ou affaiblir suffisamment le massif entre cette surface libre et le trou de mine, les gaz emprisonnés vont pouvoir poursuivre leur propagation et leur action.

Ils filtrent dans les fissures, complétant éventuellement la fissuration et mettent les blocs formés en mouvement.

## **6- Précisions complémentaires dans le cas pratique :**

Le niveau de contrainte de l'onde de choc dépend :

- de la nature de l'explosif ;
- du chargement (remplissage, diamètre...) ;
- du mode d'amorçage ;
- des conditions de transfert de l'onde (selon la nature du massif).

Dans les trous de mine, dans le cas de l'utilisation d'explosifs encartouchés, un vide annulaire apparaît entre la charge et le massif. Nous dirons que l'explosif est découplé.

Dans la plupart des cas, l'espace annulaire est rempli d'air. L'onde de choc émise devra donc se propager dans l'air avant de pénétrer dans la roche.

Compte tenu du transfert explosif-air, de la décroissance de l'onde dans l'air et de l'impédance de l'air et de la roche, la transmission de l'onde de choc se fait alors mal : l'onde de choc est écrêtée.

Pour tenir compte de ce phénomène, certains spécialistes utilisent dans les relations de transfert par impédance, la densité de chargement de l'explosif dans le trou au lieu de la densité d'encartouchage. La relation d'impédance n'a plus alors aucune signification physique.

Dans le cas de la théorie élastique, la pression de paroi se déduit de la pression d'explosion (la moitié de la pression de détonation) par les relations :

$$P_o = P \times (\Phi_c/\Phi_t)^{n\gamma}$$

où n vaut 2 en cylindrique et 3 en sphérique,  $\Phi_c$  et  $\Phi_t$  sont les rayons de la charge et du trou. Le coefficient  $\gamma$  prend la valeur 1,2 (valeur confirmée expérimentalement pour les explosifs d'abattage).

Le rôle de l'onde de choc sera d'autant plus important dans l'abattage que la quantité de fissures qu'il faut créer sera élevée. Cela concerne les roches peu fissurées et les configurations où la distance de la charge à la face libre est importante.

Toutefois son efficacité est illusoire si la roche est très plastique (absorption rapide de l'énergie de l'onde) ou si le massif possède d'importantes fissures ouvertes (absence de transmission).

L'effet des gaz est complémentaire de celui de l'onde de choc. L'état du massif rocheux à abattre conditionne l'importance relative du choc et des gaz. Il constitue donc un des facteurs de choix de l'explosif.

Au voisinage du trou de mine le réseau de fissures radiales est très dense. Au-delà, quelques fissures radiales seulement se propagent.

La ramification de ces fissures dominantes crée une fissuration transverse.

La présence de microfissures (joints de grains...) permet le développement d'un réseau complémentaire de fissuration.

Enfin, l'action de l'onde longitudinale P de compression est complétée par celle de l'onde S de cisaillement ou de distorsions qui créent globalement un système de fissurations fort complexe dans la roche. (Blanchier et al, 1988).

## **TROISIÈME CHAPITRE :**

## **ONDES ET VIBRATIONS**

## **1 - LES ONDES SISMIQUES :**

### **1-1- Introduction :**

Le concept d'onde est devenu indispensable pour la description et la compréhension de la plupart des phénomènes en physique et ses applications: l'optique, l'acoustique, les rayons X, les électrons en matière condensée, les ondes radio, les ondes gravitationnelles, la sismologie...

La sismologie n'existe que depuis un siècle et a connu une explosion dans les années soixante-dix avec l'introduction des ordinateurs et des données numériques.

Les ondes sismiques nous ont apporté une meilleure compréhension des tremblements de terre et sont les seules ondes qui se propagent en profondeur dans la Terre. Elles sont à la base de l'essentiel des connaissances sur la structure et la composition de la Terre profonde.

Une onde sismique est décrite mathématiquement par l'équation d'élasticité, une équation d'onde pour les trois composantes du déplacement.

### **1-2- Milieu élastique :**

La propriété d'un corps à s'opposer à une variation de forme ou de dimension puis à revenir à son état initial s'appelle élasticité et le corps en question est dit élastique.

Les notions de contrainte et de déformation sont fondamentales en élasticité.

La contrainte étant la force agissant sur une surface unité, la déformation désigne par contre un changement de forme ou de dimension d'un corps soumis à une contrainte.

La loi de Hook établit une relation de proportionnalité entre la déformation et la contrainte l'ayant produite.

Pour un milieu élastique, homogène et isotrope, cette loi s'exprime par :

$$\sigma_{ij} = \lambda \Delta + 2\mu \varepsilon_{ii} \quad ; i = x, y, z.$$

$$\sigma_{ij} = \mu \varepsilon_{ij} \quad ; i, j = x, y, z. \text{ si } i \neq j$$

Avec :

$\sigma_{ij}$  est la contrainte parallèle à l'axe  $i$  agissant sur une surface perpendiculaire à l'axe  $j$ .

$\varepsilon_{ij}$  est la déformation de cisaillement autour de l'axe  $K$  ( $K \neq i, j$ ).

$\varepsilon_{ii}$  est la déformation normale

$\Delta$  est la dilatation.

$\lambda, \mu$  sont les constantes de Lamé du milieu considéré. (Sherrif et geldart, 1981).

Outre les constantes de Lamé, d'autres constantes élastiques sont souvent employées en élasticité. Le coefficient de poisson  $\tau$  est un exemple. Ce coefficient est lié aussi à  $\lambda$  et  $\mu$  par :

$$\tau = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$$

Les roches de la croûte terrestre sont considérées comme étant élastiques à condition que les déformations soient petites comme pour celles produites par les ondes sismiques.

## **1-3- Ondes sismiques:**

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques. L'onde peut traverser un milieu sans modifier durablement ce dernier. L'impulsion de départ va "pousser" des particules élémentaires, qui vont "pousser" d'autres particules et reprendre leur place. Ces nouvelles particules vont "pousser" les particules suivantes et reprendre leur place, etc.

Les vibrations engendrées par un séisme se propagent dans toutes les directions. On distingue les ondes de volume qui traversent la Terre et les ondes de surface qui se propagent parallèlement à sa surface. Elles se succèdent et se superposent sur les enregistrements des sismomètres. Leur vitesse de propagation et leur amplitude sont modifiées par les structures géologiques traversées, c'est pourquoi, les signaux enregistrés sont la combinaison d'effets liés à la source, aux milieux traversés et aux instruments de mesure. La surface qui constitue la limite entre les particules au repos et les particules en mouvements constituent le front d'onde.

A partir de la source, cette surface se déplace à une certaine vitesse : il s'agit de la vitesse de propagation de front d'onde.

Ces ébranlements, qui se déplacent sous forme d'ondes, traversent le Globe et donnent des indications irremplaçables sur sa constitution. On distingue :

### **a- Les ondes de volume :**

Elles se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et d'une manière générale elle augmente avec la profondeur.

La théorie de l'élasticité permet d'établir l'équation de propagation d'une perturbation  $\Psi$  à travers un milieu élastique.

$$\nabla^2 \Psi = \frac{1}{V^2} \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \right)$$

On distingue :

### **a -1- Les ondes P :**

Les ondes primaires (P) appelées aussi ondes de compression ou ondes longitudinales. Le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par dilatations et compressions successives, parallèlement à la direction de propagation de l'onde.

Ce sont les plus rapides (6 km/s près de la surface) et sont enregistrées en premier sur un sismogramme. Elles sont responsables du grondement sourd que l'on peut entendre au début d'un tremblement de terre.

L'équation de propagation d'une onde P à travers un milieu homogène et isotrope de densité  $\rho$  et caractérisé par les constantes  $\lambda$  et  $\mu$  s'écrit :

$$\nabla^2 \Delta = \frac{1}{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \left( \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} \right)$$

où  $\Delta$  est la dilatation exprimée par :

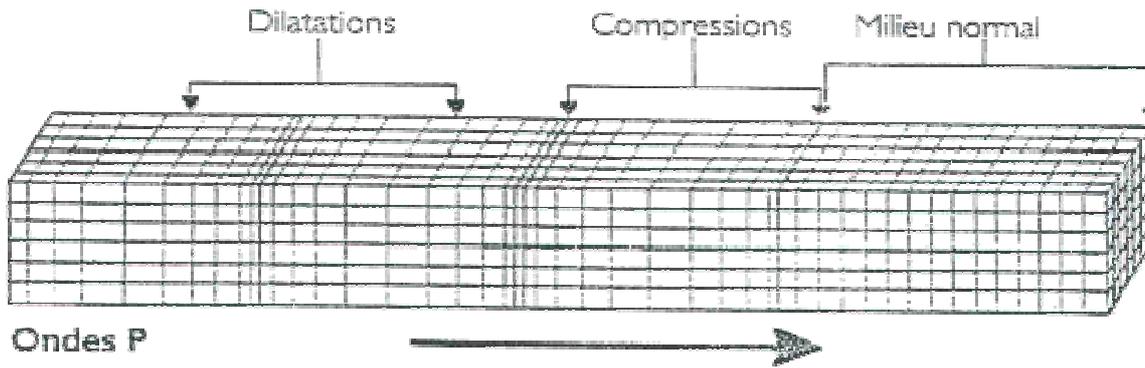
$$\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

$u, v, w$  étant les déplacements particuliers suivant les trois directions  $x, y, z$ .

La célérité d'une onde de compression est donnée par l'expression :

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

L'onde P comprime et étire alternativement les roches. On l'enregistre bien sur la composante verticale du sismomètre.



## a-2- Les ondes S :

Les secondaires (S) appelées aussi ondes de cisaillement ou ondes transversales. A leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides. Elles sont en particulier arrêtées par le noyau externe de la Terre. Leur vitesse est plus lente que celle des ondes P. Elles apparaissent en second sur les sismogrammes.

La différence des temps d'arrivée des ondes P et S suffit, connaissant leur vitesse, à donner une indication sur l'éloignement du séisme. (Sherrif et Geldart, 1981).

Les ondes de volume se propagent un peu comme les rayons lumineux : elles peuvent être réfléchies ou réfractées, c'est-à-dire déviées à chaque changement de milieu, au passage manteau - noyau par exemple. Elles peuvent ainsi suivre des trajets très complexes à l'intérieur de la Terre. Leur temps de parcours dépend de ce trajet. Elles n'arrivent pas toutes en même temps au même endroit.

L'équation de propagation d'une onde S s'écrit :

$$\nabla^2 \theta = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \right)$$

Ou  $\theta$  est la rotation de composantes  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  donnée par :

$$\theta_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} ;$$

$$\theta_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} ;$$

$$\theta_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} .$$

## Etude des vibrations dues aux tirs de mines. Apport de la modélisation

L'onde S se propage moins vite que l'onde P, sa célérité est donnée par l'expression :

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

Les vitesses de propagation des ondes P ( $V_p$ ) et S ( $V_s$ ) sont reliées par la relation :

$$V_s/V_p = \sqrt{\frac{\mu}{\lambda + 2\mu}} = \sqrt{\frac{0.5 - \tau}{1.0 - \tau}}$$

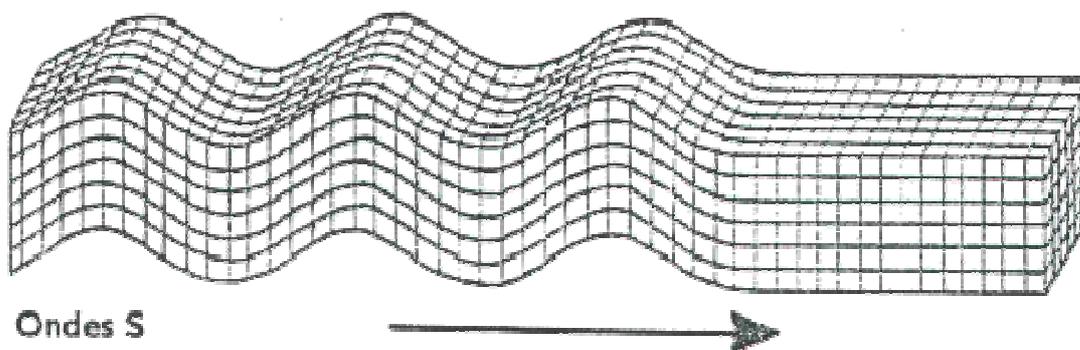
$\tau$  : Coefficient de poisson

Ce rapport peut prendre des valeurs variant de 0 à 70 %. Pour la plupart des roches, le coefficient de poisson est de l'ordre de 1/4. Le rapport correspondant de vitesse est égale à 43%.

Ne résistant pas aux changements de forme, les fluides possèdent un coefficient  $\mu$  de rigidité nul et par conséquent ne transmettent pas l'onde S.

Contrairement aux séismes, engendrés par des forces de cisaillement, les explosions produisent des efforts radiaux traduits par la prépondérance relative des ondes P.

L'onde S se propage en cisillant les roches latéralement à angle droit par rapport à sa direction de propagation. On l'enregistre bien sur les composantes horizontales du sismomètre.



### b- Les ondes de surface :

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 sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte.

On peut distinguer :

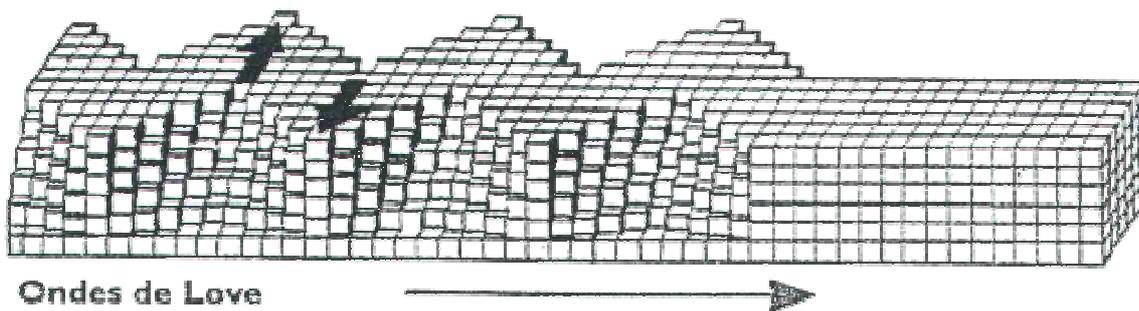
## **b-1- L'onde de Love (L):**

Le déplacement est essentiellement le même que celui des ondes S sans mouvement vertical. Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations des édifices.

Elle est observée seulement lorsqu'il y a une couche de basse vitesse recouvrant un substratum de vitesse plus élevée. Elle se propage par multiples réflexions entre le sommet et le plancher de la couche de basse vitesse. Ce sont des ondes dispersives.

Puisque leur mouvement est horizontal, elle n'est pas enregistrée lors de levés sismiques car la plupart des géophones ne répondent qu'aux mouvements verticaux.

L'onde L déplace le sol d'un côté à l'autre dans un plan horizontal perpendiculairement à sa direction de propagation. On l'enregistre uniquement sur les composantes horizontales du sismomètre.



## **b-2- L'onde de Rayleigh (R) :**

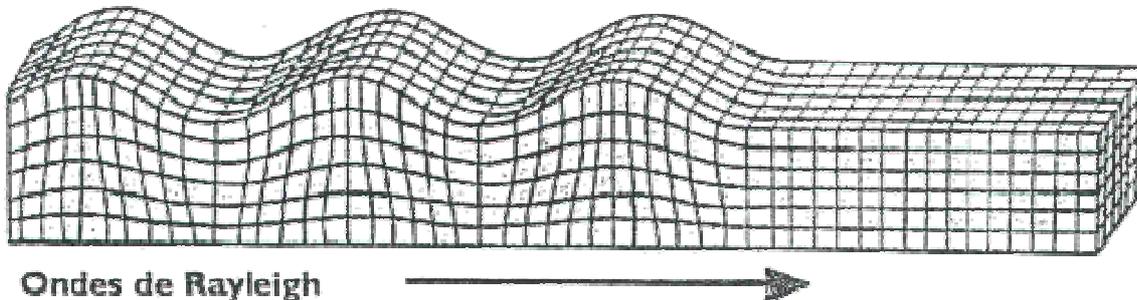
Le déplacement est complexe, assez semblable à celui d'une poussière portée par une vague, un mouvement à la fois horizontal et vertical, elliptique, en fait.

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

L'onde de Rayleigh voyage le long de la surface libre d'un matériau solide. Le mouvement des particules suit une trajectoire elliptique rétrograde et se fait dans un plan vertical.

L'amplitude du mouvement décroît exponentiellement avec la profondeur. Leur vitesse varie aussi en fonction de la longueur d'onde (dispersion). (Sherrif et geldart, 1981).

Pour l'onde R le déplacement des particules est à la fois horizontal et vertical. Cette onde est enregistrée sur les trois composantes du sismomètre. Les vibrations engendrées par cette onde durent plusieurs minutes.



### **1 - 4 - Ondes aériennes :**

Il s'agit de vibrations acoustiques, transmises par l'air, provenant de la libération des gaz de tir des charges explosives qui se dissipent à travers les fissures du massif rocheux et également du cordeau détonant placé au sol pour l'amorçage des mines.

Quand une charge explosive détone à l'air libre, une onde de choc à front raide se forme en se propageant dans l'air avec une vitesse supersonique jusqu'à une distance de l'ordre de 20 à 30 fois environ le diamètre de la cartouche d'explosif. Au delà de cette distance l'onde aérienne se propage à la vitesse du son dans l'air, soit environ 330 mètres par seconde.

Près de la source, l'onde de surpression aérienne comprend une large bande de fréquences. La majeure partie de l'énergie correspond à des fréquences inférieures à 100 Hz environ. Plus loin des tirs, seules les fréquences les plus basses se propagent.

Ce phénomène acoustique, ressenti par les habitants du voisinage comme un bruit, se manifeste comme une onde de surpression aérienne caractérisée par une crête très brève suivie d'une série d'oscillations. (J.Dangreux et al, 1981).

L'intensité de cette onde aérienne s'amortit selon la loi, fonction de la distance et de la racine cubique de la charge explosive utilisée. Elle peut se mesurer en décibels, mais le plus souvent en pascals puisqu'il s'agit d'un phénomène de surpression.

On peut enregistrer des ruptures de vitres peu épaisses à partir de 700 pascals suivant l'orientation, les dimensions et la qualité de la pose.

La mesure de cette onde aérienne se fait soit avec des capteurs de surpression dynamique, soit avec des sonomètres.

La surpression aérienne peut être sensiblement atténuée en supprimant les explosifs tirés à l'air libre, comme c'est le cas pour le cordeau détonant maître ou pour les tirs de pétardage, en

prenant le soin de bien recouvrir d'argile le pétard ou le cordeau détonant.

## **1-5- Atténuation des ondes sismiques :**

Les ondes élastiques issues d'une source sismique se propagent à travers le sol en s'atténuant jusqu'à ce qu'elles disparaissent complètement. Cette atténuation est due aux trois phénomènes physiques suivants :

- la dispersion géométrique ;
- l'absorption ;
- la partition de l'énergie des ondes au niveau des interfaces.

### **a- Dispersion géométrique (ou sphérique):**

Les ondes élastiques subissent au cours de leur propagation une dispersion résultant de la perpétuelle expansion de leurs fronts d'ondes, leur énergie se trouve par conséquent répartie sur une surface de plus en plus étendue.

L'atténuation de la densité d'énergie (énergie par unité de volume) par ce processus peut être calculée par un demi-espace élastique, homogène et isotrope dans le cas d'une source ponctuelle sphérique ou linéaire de longueur infinie.

Une source sismique ponctuelle ou sphérique produit des fronts d'ondes sphériques centrés sur le point source.

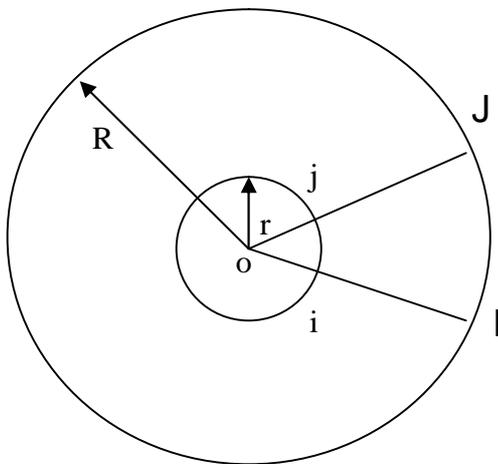
Soient  $E_0$  et  $E$  les densités sur les fronts d'ondes de rayons respectifs  $r$  et  $R$  atteints par l'énergie élastique issue de  $O$  et qui se propage avec la vitesse  $V$  respectivement aux temps  $t_0$  et  $t=t_0+\Delta t$ .

En supposant le milieu parfaitement élastique, l'énergie  $E_0, V, S_0$  qui se propage à travers la calotte sphérique de rayon  $r$  et ayant une surface égale à  $S_0$ , par unité de temps est égale à l'énergie  $E, V, S$  se propageant à travers la calotte sphérique de rayon  $R$  et de surface  $S$  avec la même vitesse et pendant le même intervalle de temps soit  $E, V, S = E_0, V_0, S_0$

En remarquant que les surfaces  $S$  et  $S_0$  sont proportionnelles aux carrés des rayons  $R$  et  $r$ , on peut écrire :

$$E/E_0 = (r/R)^2$$

Cette relation montre clairement que pour les ondes sphériques la densité d'énergie s'atténue en  $R^{-2}$  (divergence sphérique).



**FIGURE N°8 :** Front d'onde issu d'une source placée en O

La figure 8 peut également représenter une coupe transversale des fronts d'ondes cylindriques engendrés par une source linéaire infiniment longue ou encore des fronts d'ondes de surface circulaire issus d'une source superficielle qui se propagent à la surface du sol. Le calcul pour les deux types d'ondes est analogue à celui des ondes sphériques sauf que cette fois-ci, les arcs i,j et l,J obtenus par l'intersection des rais Ol OJ avec les deux cercles sont respectivement proportionnels à r et R. Le rapport des densités d'énergie est dans ce cas égal à :

$$E/E_0 = r/R$$

Par conséquent, l'énergie s'atténue comme  $R^{-1}$  pour les ondes cylindriques (divergence cylindrique) et de surface.

### **b- Partition de l'énergie au niveau d'une interface :**

Chaque fois qu'une onde traverse une discontinuité séparant deux milieux caractérisés par des paramètres élastiques différents, elle subit à la fois un phénomène de réflexion et de réfraction.

L'énergie réfléchie vaut alors N fois l'énergie incidente, tandis que celle réfractée ou transmise vaut T fois l'énergie incidente.

N et T sont respectivement les coefficients de réflexion et de transmission. Ils caractérisent les deux milieux. (Sherrif et Geldart, 1981).

Ces deux coefficients se calculent à partir des expressions :

$$N = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

$$T = \frac{4(Z_2 \times Z_1)}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

$Z_1$  et  $Z_2$  sont les impédances acoustiques des deux milieux 1 et 2 égaux au produit de la densité du milieu correspondant par la célérité des ondes sismiques dans ce milieu.

$$Z_i = \rho_i \cdot V_i$$

### **c- Absorption :**

La propagation d'une onde sismique à travers un milieu élastique idéal provoque la vibration des particules autour d'une position d'équilibre sans que l'énergie de l'onde ne soit diminuée.

Dans le cas où le milieu n'est pas parfaitement élastique, ce qui est le cas du sol, cette énergie se dissipe progressivement en se transformant en chaleur.

Ce phénomène qui contribue à l'atténuation de l'énergie sismique s'appelle l'absorption.

Pour une roche donnée, l'absorption augmente avec la fréquence et réduit l'énergie élastique exponentiellement avec la distance.

Si  $E_1$  et  $E_2$  sont les énergies observées en deux points distants de  $x$ , alors :

$$E_2 = E_1 e^{-\alpha x}$$

Les résultats expérimentaux indiquent que le coefficient d'absorption est approximativement proportionnel à la fréquence c'est-à-dire que  $\alpha \lambda$  est approximativement constant pour une roche donnée contenant une quantité constante de fluides.

Une expérience a été réalisée dans une formation de marnes massives du Colorado (USA), épaisse d'environ 1 200 m et de vitesse moyenne 2 330 m/s ; la valeur mesurée de  $\alpha$  a été d'environ 0,85 dB/  $\lambda$ . Donc une onde de fréquence 10 Hz perd 0.85 dB chaque 233 m, ce qui arrive en 79 m à une onde de 30 Hz. (Telford et al, 1976).

Pour comparer la perte par absorption avec la perte par divergence, on calcule les pertes correspondant au parcours entre un point situé à 200 m de la source et quatre autres points, plus éloignés, pour  $\alpha = 0.25$  dB /  $\lambda$  qui est une valeur arbitraire. Les résultats présentés dans le tableau ci - dessous sont obtenus à l'aide des équations :

**Absorption** : perte en dB =  $10 \log \left( \frac{E_1}{E_2} \right) = 4.3 \alpha r = 1,1 (x/\lambda) = \frac{1,1(x-200)}{\lambda} = \frac{1,1v(x-200)}{2000}$  ;

**Divergence** : perte en dB =  $10 \log \left( \frac{E_1}{E_2} \right) = 20 \log(x-200)$  ;

où x est la distance à la source,  
 $\alpha = 0,25 \text{ dB} / \lambda$  et  $V = 2000 \text{ m/s}$ .

	$v/x$	1200 m	2200 m	4200 m	8200 m
Absorption	01 Hz	0,55 dB	1,1	2,2	4,4
	03 Hz	1,60 dB	303	6,6	13
	10 Hz	5,5 dB	11	22	44
	30 Hz	16 dB	33	66	130
	100 Hz	55 dB	110	220	440
Divergence	toutes	16 dB	21	26	32

Ce tableau montre que la perte par divergence est plus importante que celle par absorption aux basses fréquences et aux faibles distances. Lorsque la fréquence et la distance croissent, les pertes par absorption augmentent et deviennent prédominantes. Les pertes, plus fortes aux plus hautes fréquences, entraînent une modification de la forme du train d'onde avec la distance. (Telford et al, 1976).

## 2- LES VIBRATIONS :

Parmi les sources de vibrations artificielles les plus fréquentes on distingue :

- les vibrations entretenues ou compensées dans le temps (trafic routier, station de pompage, engin).
- les vibrations transitoires ou en impulsion, comme le compactage dynamique et les tirs des mines.

L'explosif apparaît comme la source de vibration la plus violente. C'est sur l'utilisation d'explosifs que plusieurs adaptations sont possibles. Ces adaptations portent sur le plan de tir qui caractérise la nature de la source.

Une vibration peut être définie comme l'oscillation d'une particule ou d'un corps à partir de sa position de référence.

Les études de vibration prennent en considération les mouvements particuliers, en particulier les vitesses particulières de vibration.

L'explosion utilisée pour disloquer le rocher, limitée en un temps relativement court libère une grande quantité d'énergie, qui peut être répartie en :

- une énergie utile qui provoque sur une partie de la roche une rupture et un déplacement, c'est l'abattage du rocher.
- une énergie inutile qui engendre des déformations élastiques du milieu, c'est le phénomène des vibrations.

Pour optimiser un plan de tir, on essaiera de réduire l'énergie de vibration, au profit de l'énergie utile d'abattage.

Les phénomènes de vibrations peuvent poser des problèmes d'une grande diversité, en fonction de l'origine de la vibration et de la nature des constructions soumises à ces vibrations

### 2-1- Fonction d'un phénomène vibratoire :

Il y a trois fonctions qui caractérisent un phénomène vibratoire :

- **le déplacement**, c'est la distance parcourue par un élément de la matière à partir de sa position d'équilibre,
- **la vitesse**, c'est la rapidité avec laquelle se déplace l'élément de matière,
- **l'accélération**, c'est la variation de vitesse avec le temps.

Dans le cas d'un mouvement périodique sinusoïdal, l'expression du mouvement s'écrit :

$$E = E_0 \sin(\omega t)$$

$E_0$  : Elongation maximale.

$\omega$  : Pulsation du mouvement

$$\omega = 2\pi F = \frac{2\pi}{T}$$

F : Fréquence de la vibration.

T : Période de la vibration.

La vitesse de la vibration est donnée par :

$$V(t) = E_0 \omega \cos(\omega t)$$

Et l'accélération du mouvement par :

$$A(t) = -E_0 \omega^2 \sin(\omega t)$$

$$\text{Avec } A_{\max} = E_0 \omega^2 = 4E_0 \pi^2 F^2$$

### **2-2- Les facteurs influant sur le niveau de vibration :**

Le niveau de vibrations mesuré dépend de trois facteurs :

- la distance entre le tir et l'ouvrage ;
- la quantité d'explosif ;
- le rendement du tir.

Pour ce qui est de la distance entre le tir et l'ouvrage le niveau de vibration dépendra de :

- la nature des terrains ;
- la structure géologique ;
- la géomorphologie du site.

#### **2-2-1- Le plan de tir :**

Le plan de tir décrit la façon dont la quantité d'explosif a été utilisée.

Les principales caractéristiques du plan de tir sont la foration, le chargement et l'amorçage.

- **La foration**, avec les paramètres suivants :

- profondeur de foration ;
- maille de foration ;
- diamètre de foration ;
- inclinaison.

- **Le chargement :**

Le premier facteur qui permettra de définir le chargement est la charge spécifique d'explosif c'est à dire la charge totale d'explosif mise en œuvre, rapportée au volume rocheux à abattre.

Le second facteur du chargement est la densité de chargement défini comme le rapport du volume d'explosif au volume du trou de mine. Cette densité dépend du diamètre de la cartouche d'explosif par rapport au diamètre du trou. Plus la densité de chargement sera élevée, meilleur sera le couplage explosif / terrain et meilleur sera le rendement de l'énergie explosive du tir pour fragmenter la roche.

On notera que la réduction de la charge spécifique d'explosif n'est pas un facteur de réduction des niveaux de vibration.

- **L'amorçage :**

Le plan d'amorçage comporte deux aspects :

- initier au mieux la détonation qui permettra à l'explosif de libérer le maximum d'énergie ;
- étaler dans le temps, l'explosion de la quantité totale d'explosif. (P.Allard, 1988).

## **2-2-2- Le rendement d'un tir :**

Généralement on cherche le meilleur usage possible de l'énergie explosive, c'est-à-dire un maximum de déplacement et de fragmentation de la roche abattue et un minimum de fragmentation du massif à l'arrière du tir.

L'énergie transmise dans le massif sous forme de vibrations sera d'autant plus faible, que l'effet du tir dans le massif sera réduit.

L'énergie dissipée sous forme de vibrations sera accrue dans le cas d'un tir resté suspendu, c'est-à-dire lorsque le déplacement du rocher à abattre sera faible ou nul. Il en est ainsi également des mauvais arrachements en pied de front.

La charge spécifique d'explosif et le plan d'amorçage sont les facteurs essentiels qui conditionnent un bon rendement du tir.

L'amélioration du rendement d'un tir peut être obtenue en modifiant des paramètres du plan de tir tels que :

- amélioration de la séquence d'amorçage en veillant à ce que la surface de dégagement soit maximale à chaque instant d'amorçage ;
- augmentation de la densité de chargement en améliorent le couplage explosif – terrain ;
- augmentation de la charge spécifique ;
- choix de l'explosif le mieux adapté à la nature du terrain ;
- meilleure orientation du front de dégagement par rapport à la structure du massif, quand cela est possible. (Allard.P, 1988)

## **2-3- Critère de dommage :**

On peut caractériser l'onde vibratoire par les paramètres suivants :

- l'amplitude,
- la vitesse particulière,
- l'accélération,

- La fréquence,
- la durée des oscillations.

Cependant les recherches montrent que le paramètre le plus significatif, vis-à-vis des effets destructifs des vibrations, paraît être la vitesse particulaire tout au moins dans la gamme de fréquence 5 à 200 Hz, gamme que l'on rencontre le plus fréquemment pour des tirs en carrière, et en particulier sur le rocher. (J.Dangreux, 1981).

L'incertitude sur les paramètres à prendre en considération ainsi que les grandeurs limites à ne pas dépasser, expliquent l'absence d'une normalisation effective.

Les recherches en dynamique structurale ont montré que les structures répondent de différentes façons quand elles sont excitées par des vibrations identiques dans tous les aspects. Une structure résidentielle répond moins à un mouvement de terrain de 12 mm/s avec une fréquence principale de 80 Hz qu'à une fréquence principale de 10 Hz. Alors le mouvement à 80 Hz a moins de probabilité de fissurer la structure en mouvement que 10 Hz. (L.E. Sanchez, 1995).

### **3- La différence entre tirs de mine et séisme :**

La sismicité des tirs de mines et la sismologie représentent deux échelles dans l'espace et dans le temps sensiblement différentes. Néanmoins ces deux domaines concernent la propagation des vibrations induites par un événement sismique si on met de côté le fait que les travaux à l'explosif sont associés à l'émission d'une surpression aérienne.

L'amplitude et la fréquence du phénomène sismique enregistré sont des paramètres fondamentaux qui les distinguent :

- en matière de tir de mines, le sismologue parlera de très courte période (inférieure à 1 seconde) ;
- à l'inverse, le mineur considère un séisme comme un phénomène de très basse fréquence (inférieure à 1 Hz).

Pour un séisme, les effets secondaires catastrophiques sont nombreux avec des glissements de terrain, des fractures majeures, un changement du paysage et surtout des victimes.

Les termes les plus graves pour désigner les conséquences d'un tir de mine sont loin de ces considérations. On parlera plutôt d'incidents, voire exceptionnellement d'accidents, somme toutes minimales par rapport aux autres types de risques industriels et a fortiori d'un risque naturel majeur, voire modéré.

La mesure directe d'un séisme faite à plusieurs centaines de kilomètres de l'hypocentre permet d'appréhender la magnitude qui est relative à l'énergie dégagée par la source.

Contrairement à un tir de mines, la source est généralement située en profondeur, dans un contexte géologique régional particulier, à l'échelle du globe avec des coordonnées à priori inconnues. À l'inverse, le lieu, le volume et la quantité d'énergie potentielle contenue dans la charge explosive sont connus à priori.

Une remarque cependant que la détermination de l'énergie mesurée sur les ondes de volume pour un séisme est comparée à une énergie ramenée à la quantité d'énergie mesurée par le fabricant dans un confinement aqueux. Elle ne correspond par conséquent en aucun cas à une énergie sismique dissipée.

Les conditions de mise en oeuvre, l'interaction explosive - roche et la séquence de mise à feu sont des facteurs déterminants dans l'efficacité de l'énergie explosive potentielle, le pourcentage de transformation en énergie sismique dans l'environnement par rapport à la fragmentation du rocher.

La manière d'appréhender le problème de la description de la source, que ce soit à priori pour les tirs de mines ou à posteriori pour les séismes, peut être approchée par une représentation analytique du mécanisme à la source en utilisant un tenseur des moments sismiques spécifiques. Pour une source artificielle, en l'occurrence explosive, la connaissance de la fonction source, qui représente la pression appliquée sur la paroi du trou pendant la détonation, est fondamentale.

Il faut avant tout distinguer les effets ressentis par l'homme des dommages réellement occasionnés par l'événement sismique quel qu'il soit avant de s'intéresser aux dégâts éventuels, le fait de ressentir quelque chose reste très subjectif, en particulier dans le cas des tirs de mines où l'impact immédiat est d'une part attendu, d'autre part accompagné d'une surpression aérienne.

La notion de perception d'une vibration, si elle est absolue pour un capteur, reste très relative pour un être humain. Une vibration peut être ressentie par une personne et provoquer une gêne sans pour cela être nuisible pour la structure.

Les mesures utilisées pour évaluer les dommages aux structures sont difficilement comparables si on prend une échelle d'intensité utilisée par les sismologues où les seuils limites pour les tirs de mines définis par les différentes normes à travers le monde dont les niveaux retenus montrent une grande disparité.

D'une manière générale la sollicitation d'une structure par des vibrations mécaniques dépendra du type de construction, des fondations et de la nature du sol. Il est, encore une fois, difficile de cerner les réactions d'un bâtiment quotidiennement influencé par ces paramètres. (P.Bernasconi)

# Etude des vibrations dues aux tirs de mines. Apport de la modélisation

## SEISMES

Echelle d'intensité Mercalli dite "modifiée" d'après Neumann

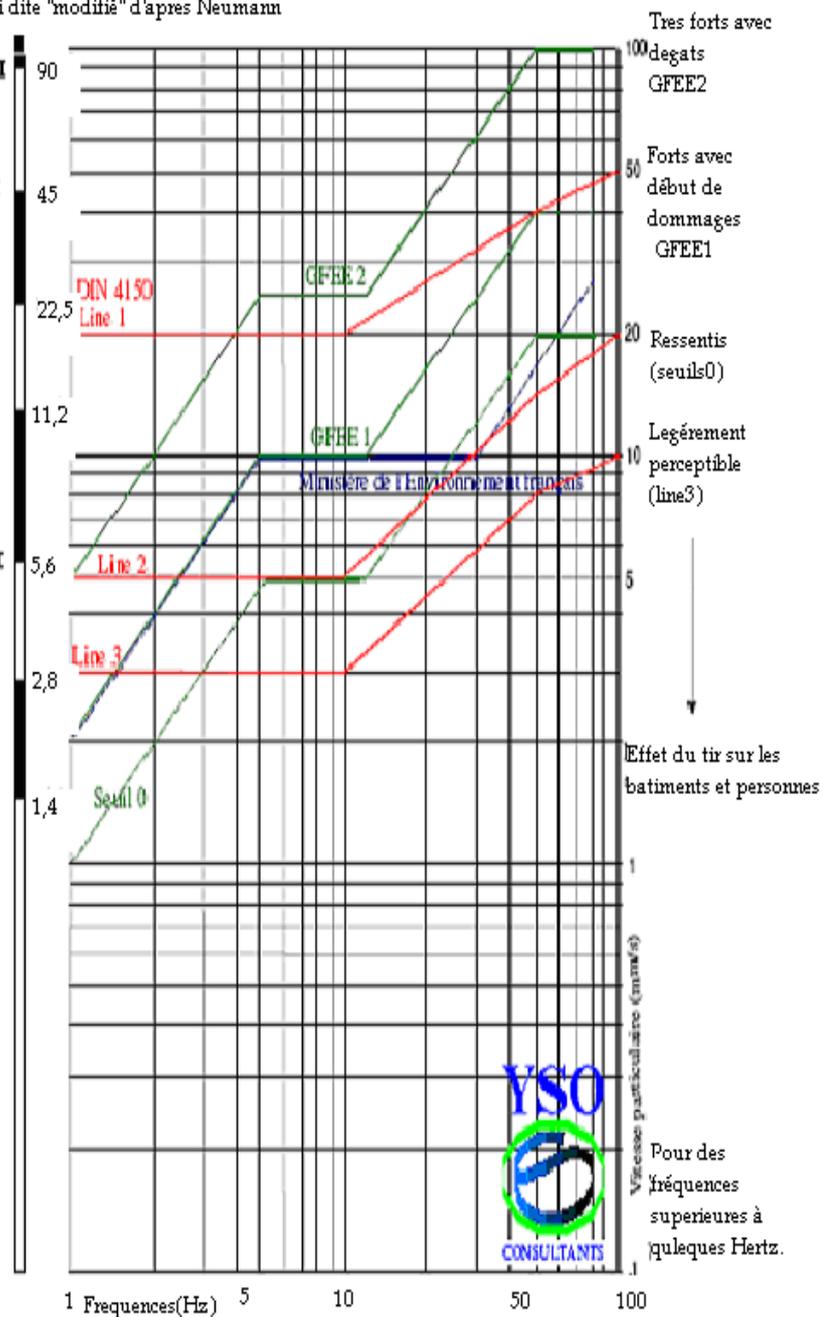
Dégâts importants surtout bâtiment en mauvais état	beaucoup de gens se réfugient en plein air	très forte	VII
cheminées et crépis endommagés	frayeur	forte	VI
Crépi de maisons se détache, objets suspendus se balancent	ressentis partout en plein air	assez forte	V
fenêtres vibrent	ressentis dans les maisons, réveil	moyenne	IV
	ressentis nettement avant tout par des personnes au repos	Légère	III
	ressentis sporadiquement	très légère	II
	non ressentis	Imperceptible	I



Effet des séismes sur les bâtiments et les personnes  
D'après Mayer Rosa 1986 sur l'échelle MSK.

Pour des fréquences inférieures à quelques Hertz.

## VIBRATIONS DUES AUX TIRS DE MINES



D'après P. Bernasconi

## **QUATRIÈME CHAPITRE :**

# **PRÉDICTION ET CONTRÔLE DES VIBRATIONS**

## 1- LES CRITERES DE NUISANCE ET PREDICTION :

Les vibrations produites par les tirs constituent l'une des nuisances inévitables liées à l'emploi des explosifs.

La manipulation des mesures de vibrations a considérablement amélioré l'utilisation des explosifs à proximité de sites construits en permettant une meilleure adaptation des plans de tirs aux conditions imposées par l'environnement.

Malgré cela, des problèmes subsistent encore et toutes les réponses ne sont pas apportées aux questions posées, en particulier dans le choix et l'application de limites de sécurité.

### 1-1- La recherche d'un critère de nocivité des vibrations :

Rares sont les expérimentateurs qui ont eu le loisir de provoquer des dégâts aux constructions tout en mesurant l'intensité des vibrations les ayant produites. Les expériences réalisées en Suède, au Canada en Tchécoslovaquie et aux Etats Unis, constituent la base des documents utilisés.

De nombreuses observations systématiques ont été réalisées aux Etats - Unis par l'U.S. bureau of mines. Cette étude portait sur des constructions proches d'exploitations minières à ciel ouvert. Si les mesures très complètes réalisées à cette occasion ont permis de mieux comprendre les réactions des immeubles concernés, elles ne présentent pas toute la généralité souhaitable, en particulier dans les types de constructions qui sont la plupart des maisons à ossature en bois.

La quasi-totalité des études réalisées se proposait de résoudre le problème posé par la présence d'exploitations minières, de carrière ou de chantiers de travaux publics à proximité de zones habitées. C'est pourquoi les constructions concernées ont presque toujours été des maisons d'habitation courantes, à un ou deux étages, plus rarement des immeubles urbains anciens en maçonnerie. Le but était d'éviter tous problèmes avec les occupants des immeubles concernés, ce qui a conduit à une définition stricte de la notion de dégâts.

Trois classes de dégâts sont généralement utilisées :

**1- seuil d'apparition**, correspondant à l'écaillage de peinture, l'allongement de fissures existantes, la formation de très fines fissures dans des plâtres ;

**2- dégâts légers**, détachement et chute de morceaux de plâtres, apparition de fines fissures dans la maçonnerie, il s'agit encore de dégâts superficiels qui n'affaiblissent pas la structure ;

**3- dégâts importants**, Il s'agit cette fois de dommages provoquant un affaiblissement de la structure, avec apparition de lézardes et de fissures ouvertes, des chutes d'éléments de maçonnerie.

Les dégâts de type 1 sont proches de ceux produits par le vieillissement naturel des constructions et c'est là une source de difficulté quand à leur identification. Il faut des observations immédiatement avant et après le tir pour être certain de leur origine.

### **1-1-1- La vitesse particulière maximum :**

Une des premières investigations sur les vibrations produites lors des tirs de mine et leurs effets sur les structures est faite par l'U.S. bureau of mines à partir de 1930. Le critère de dommage proposé à ce moment fut l'accélération du mouvement oscillatoire et cela par analogie aux travaux réalisés dans le génie parasismique.

Durant les essais on constata seulement des dégâts lorsque l'accélération était approximativement égale ou supérieure à l'accélération de la gravité (g), c'est pour cela qu'ils recommandèrent un seuil de 0,1 g à ne pas dépasser. (L.E.Sanchez, 1995)

La conclusion essentielle de toutes les études réalisées a été que la vitesse de vibration (vitesse de déplacement du point de mesure), était le paramètre le mieux représentatif de l'apparition de dégâts aux constructions, la probabilité d'apparition de dégâts augmente lorsque la vitesse de vibration croît.

Les courbes publiées par l'U.S. bureau of mines sont très claires à cet égard. On doit observer qu'il s'agit bien d'une probabilité d'apparition de dégâts, le choix d'une valeur limite implique l'adoption de la probabilité correspondante. Cet aspect probabiliste découle de la nécessité d'utiliser des méthodes statistiques pour analyser les données relevées au cours d'expériences très diverses, chacune prise isolément étant insuffisante pour obtenir une conclusion.

Cela ne signifie pas que pour une structure donnée des dégâts apparaîtront inéluctablement si l'on accroît indéfiniment le nombre de sollicitations, mais plutôt que sur un grand nombre de constructions, on risque d'en trouver quelques unes qui, en raison des particularités présentées par leur état ou celui du sol environnant, subiront des dommages.

Dans une construction, l'apparition de fissures traduit une libération de contraintes. C'est l'ensemble des contraintes préexistantes et des contraintes dues aux vibrations qui sera susceptible de provoquer des fissures.

Si les contraintes préexistantes sont élevées, un accroissement même faible apporté par les vibrations pourra suffire à passer le seuil. L'état de contrainte initial des constructions joue un rôle important dans l'aspect probabiliste de ce problème.

De nombreuses propositions ont été faites pour établir des valeurs limites ou recommandées pour préserver les constructions.

Une des premières publications qui propose l'emploi de la vitesse de vibration (vitesse des particules) se doit à Langefors et collaborateurs en 1958 en se basant sur des essais réalisés sur des roches saines et dures avec comme variable de mesure cette fois la translation.

## Etude des vibrations dues aux tirs de mines. Apport de la modélisation

---

D'après ces auteurs le risque de dommage pour des cas de structures dites normales construites directement sur la roche est :

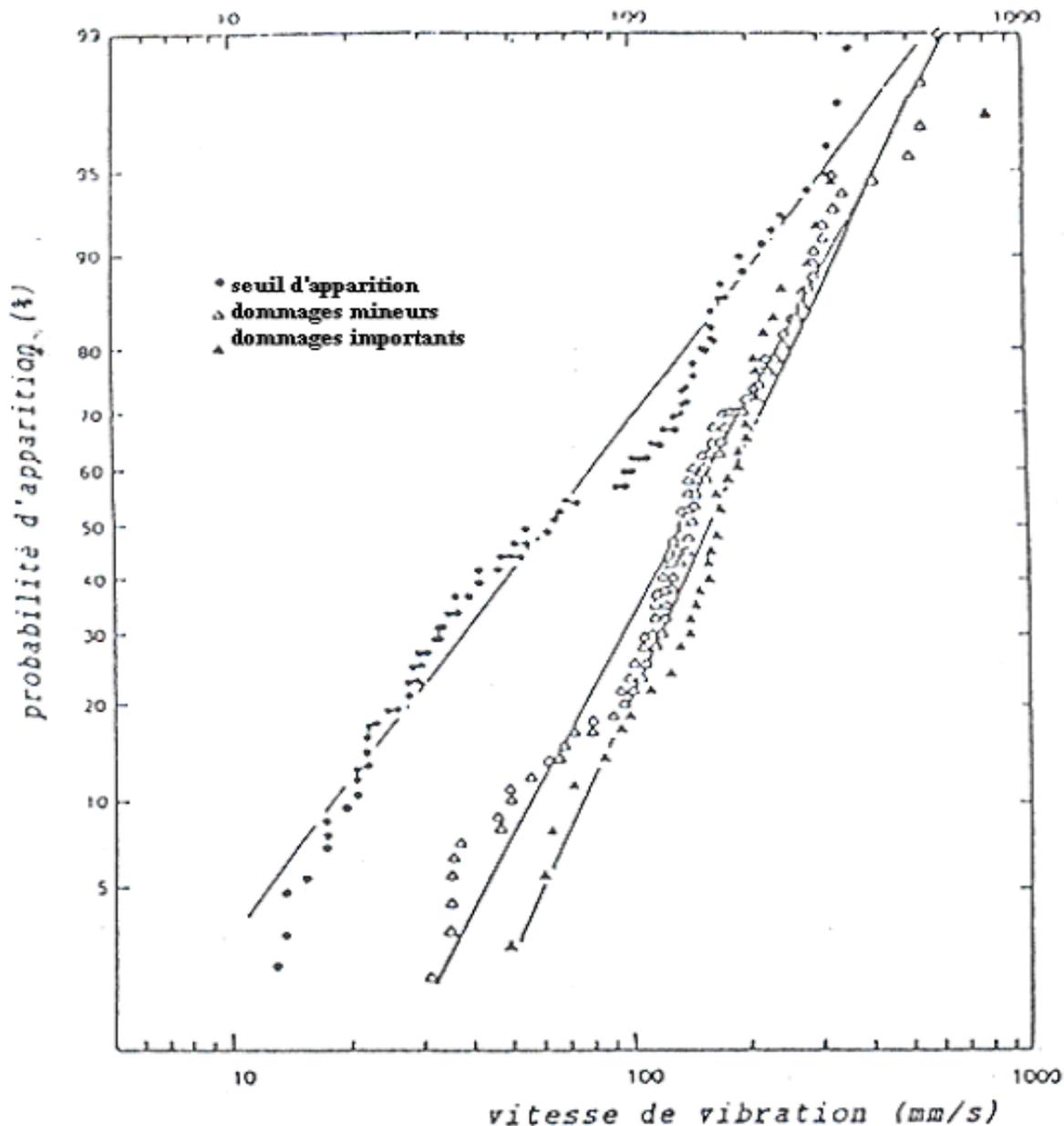
- 70 mm/s, aucune fissure observable ;
- 110 mm/s, petites fissures et chute de revêtement ;
- 160mm/s, fissures ;
- 230mm/s, fissures importantes.

Le critère de dommage par contre s'exprime en fonction du quotient entre la vitesse de particules ( $v$ ) et la vitesse de propagation de l'onde de choc à travers le massif rocheux ( $c$ ) et les critères sous cette forme sont valides pour  $c=3000\text{mm/s}$ .

Cependant, on doit noter que les fréquences enregistrées durant les essais sont assez élevées, entre 50 et 500 Hz, ce qui est dû à la nature de la roche. (L.A.Sanchez, 1995).

Au fur et à mesure de la publication des résultats des travaux de recherche, on a pu assister à une évolution des valeurs de la vitesse de vibration jugée acceptable pour les immeubles, certains pays ont défini des règlements dont on trouvera des exemples sur le tableau 3. Des valeurs variables selon l'état ou la nature des constructions sont le plus souvent proposées.

La multiplication des mesures de vibration a eu comme conséquence fâcheuse un alignement sur les cas les plus défavorables, en retenant systématiquement la valeur minimum de la vitesse pour laquelle des dégâts avaient été observés, on a eu tendance ensuite à adopter cette valeur comme nouvelle limite valable dans tout les cas, même si elle était due à un ensemble de circonstances très particulières.



**Figure N°9** : Analyse probabiliste des dommages (d'après Siskind in P.Chapot, 1988).

Une évolution importante a été la prise en compte des fréquences dont l'importance n'était pas apparue au cours des premières expériences. On a pu observer que pour des fréquences basses (inférieures à 10Hz), des dégâts pouvaient apparaître pour des vitesses plus faibles, inférieures à 10mm/s. L'étude des probabilités d'apparition de dégâts confirme ce phénomène. En effet, à vitesse égale des mouvements à basse fréquence correspondent à des déplacements plus importants, ce qui a conduit certains auteurs à adopter une limite en déplacement pour les basses fréquences.

En France, l'Association Française des Travaux en Souterrain (AFTES) a proposée en 1976 des valeurs limites qui constituaient une synthèse de ce qui était alors proposé, tenant compte

## Etude des vibrations dues aux tirs de mines. Apport de la modélisation

aussi bien des très faibles valeurs alors proposées en Allemagne que des seuils plus élevés adoptés aux Etats - Unis ou en Suède.

On remarque toutefois, que tous recommandent des seuils croissants, lorsque la fréquence augmente, avec des lois de progression différentes.

Les catégories de construction correspondent à celles mentionnées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Valeurs de référence de la vitesse de vibration en mm/s (D'après Schwenzfeier in P. Chapot, 1988).

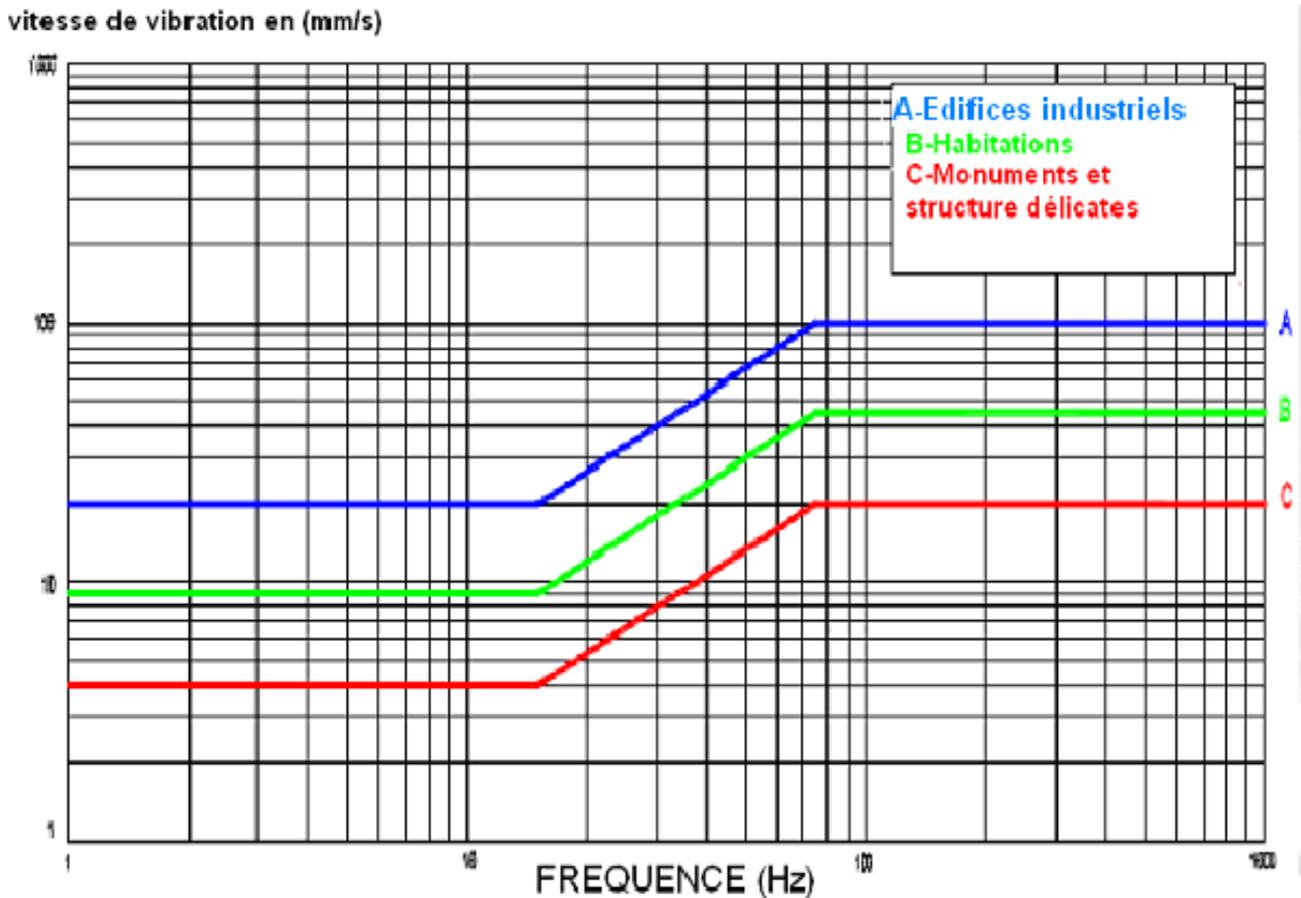
Pays :	Référence :	Date :	Gamme de fréquence considérée (Hz) :	Construction en mauvais état ou monument :	Construction courante de qualité moyenne à bonne :	Construction de qualité supérieure et bâtiment industriel :
Angleterre	Ashley Parks	1976	-	7,5	12	25
Allemagne Federale	DIN 4150	1971	8 à 80	2	4 à 8	10 à 40
	DIN 4150	1975	6 à 60	4	8	30
	DIN 4150	1983	<10, 50,100	3 à 10	5 à 20	20 à 50
Allemagne de l'Est	KDT	1972	3, 30, 60,100	2 à 14	10 à 70	30 à 200
Australie	ASCA	1967	-	15	25	50
Autriche	NOT	1980	-	3 à 5	10	10 à 40
France	AFTES	1976	>10	2,5 à 7,5	7,5 à 22,5	22,5 à 70
	AFTES	1982	-	-	10 à 30	-
ISO	Projet GB	1972	8 à 80	(4,15)	8,3	(16,6)
Russie	-	-	-	10	30	-
Suède	Langefors	1967	-	18	35	70
	Persen	1980	-	25	35	70 à 100
Suisse	VSS	1978	10 à 90	8 à 12	12 à 25	30 à 40
USA	USBM	1981	4, 10, 40,100	-	13 à 50	-
	Chae	1978	-	12 à 25	50	100
Tchécoslovaquie	CSN	1973	-	10	20 à 25	35 à 80

Les valeurs américaines ne prennent pas en compte la qualité de la construction, sauf en ce qui concerne la nature des cloisons, plaque de plâtre recouverte de papier ou enduit de plâtre sur lattes, la limite supérieure à 19 mm/s se référant aux plaque de plâtre, plus résistantes à la fissuration. Il s'agit d'autre part de vibrations du sol, alors qu'en Suisse et en Allemagne, il s'agit de valeurs mesurées à la base des constructions.

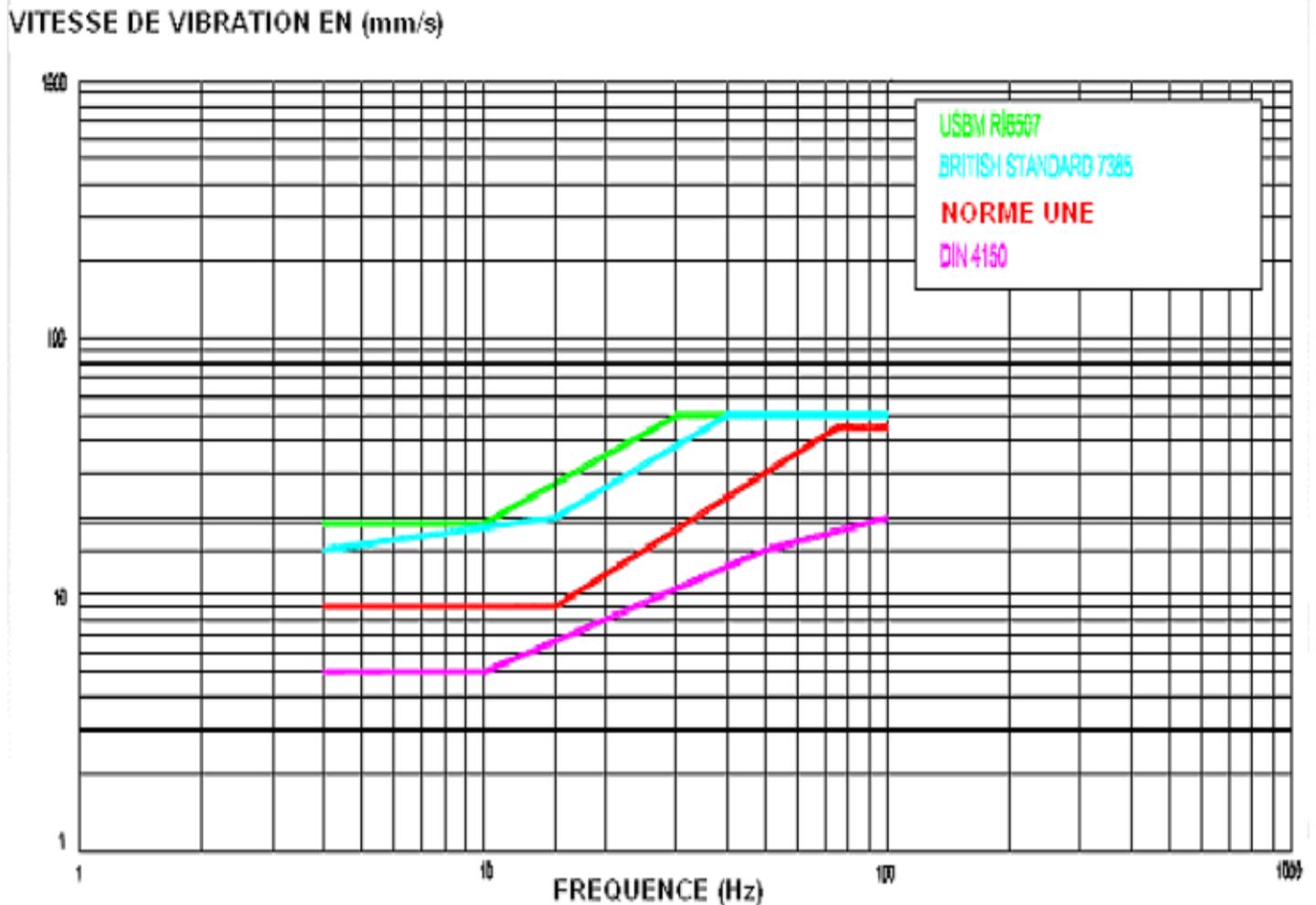
En dehors des grands traits qui leur sont communs (influence de la fréquence en particulier), la diversité des valeurs proposées montre bien qu'aucun de ces éléments ne prétend définir des seuils techniques absolus. Ils définissent des règles de conduite, dont les conditions d'application peuvent varier.

## Etude des vibrations dues aux tirs de mines. Apport de la modélisation

Généralement on vise avec ces références une catégorie d'immeubles bien déterminée, à savoir les maisons résidentielles courantes, à un ou deux étages, avec une extension à une catégorie dite « bâtiments industriels » en béton armé. Seule la norme Suisse fait référence à des structures plus variées et même à des sites naturels comme les cavernes.



**FIGURE N°10** : Critère de limitation des vibrations de la norme UNE. (J.A.Pascual de Blas ,2002)



**FIGURE N°11 :** Comparaison des critères pour des habitations entre 4 Hz et 100 Hz. (J.A.Pascual de Blas ,2002).

## 1-1-2- 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.

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 différentes fréquences 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 dans une 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 correspondant à l'amortissement.

Les équations du mouvement de ce modèle sont connues et permettent en particulier de calculer le terme  $d$ , représentant le déplacement relatif entre le sol (dont le déplacement est  $U$ ) et la masse (de déplacement  $X$ ).

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.

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 mesures ont été faites qui donnent pour les constructions courantes des fréquences propres de 5 à 10 Hz pour les superstructures et de 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 d'un 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 et 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.

Les études expérimentales réalisées par l'U.S. bureau of mines ont montré que les mouvements des maisons testées étaient plus reliés aux spectres de réponse calculés qu'à la vitesse maximum du sol. (P.chapot, 1988)

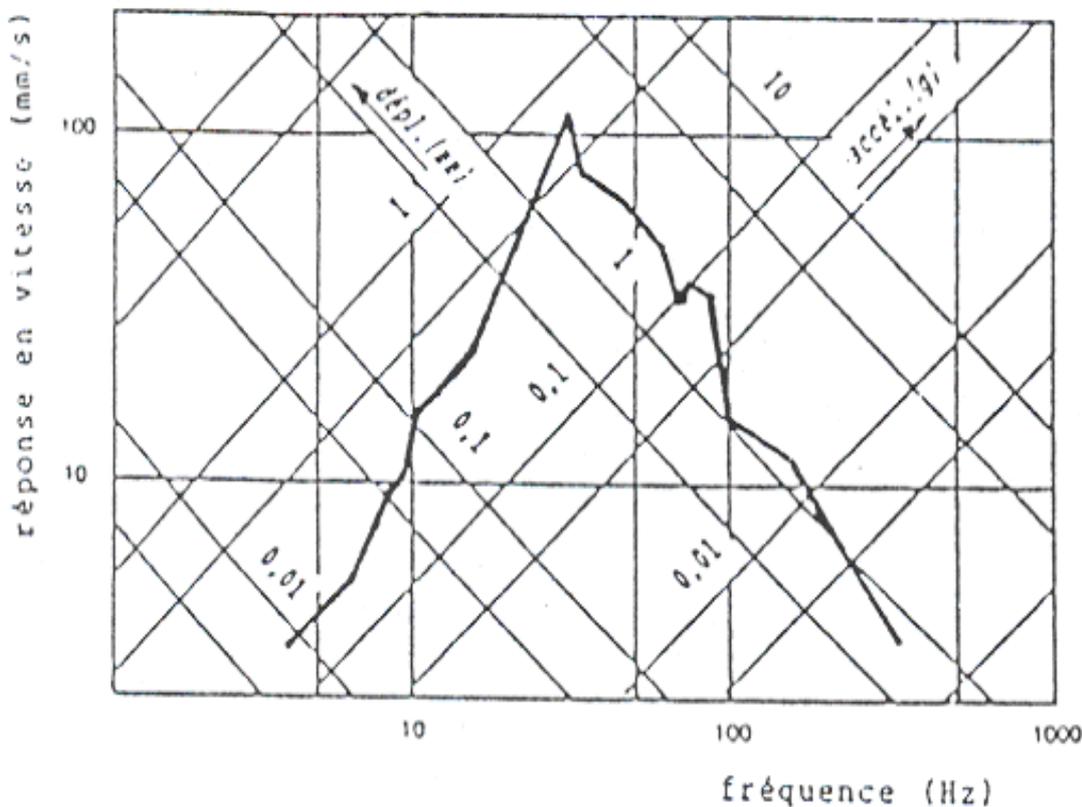
A partir de l'enregistrement du sol en un point, il est possible de calculer plusieurs spectres de réponses, correspondant à des structures d'amortissement différentes.

Il existe aussi un certain nombre d'inconvénients. D'un point de vue pratique, la mesure de la vibration du sol est moins simple que ce qu'elle peut paraître, comment placer le capteur sur le sol, comment s'affranchir des hétérogénéités locales des sols superficiels ?

Si une démarche de ce type est imposée au concepteur de constructions parasismiques, il est généralement possible dans le domaine des explosifs de faire une mesure directe des mouvements absolus d'une structure au cours d'un tir réel, ce qui peut paraître préférable au calcul indirect avec des paramètres approches de la méthode du spectre de réponse.

Enfin, on ne dispose guère actuellement de spectres de références qui pourraient jouer le rôle de limites comme cela a pu être proposé avec les vitesses maximum.

Si quelques exemples existent, le nombre de spectres de réponse calculés pour des cas où les dommages éventuels ont été observés, restent très inférieurs aux références accumulées avec des mesures de vitesse.



**Figure N°12 :** Spectre de réponse obtenu à partir d'une mesure de vitesse (d'après Dowding in P. Chapot, 1988).

### **1-1-3- La longueur d'onde :**

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.

Si la longueur d'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.

Pour une longueur d'onde égale ou double de la longueur de la construction, les mouvements des extrémités 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. (P. Chapot, 1988)

Pour des dimensions d'immeuble courantes de 10 à 20m, ce cas peut être rencontré dans les roches (vitesses de propagation 1000 à 3000 m/s) pour des fréquences supérieures à 20 Hz. On peut le rencontrer également pour de très faibles vitesses de propagation (250 à 500 m/s), associées à des basses fréquences : 5 à 10 Hz par exemple. De telles vitesses de propagation

ne se rencontrent pas dans les roches massives, mais dans les roches meubles, ou dans la zone d'altération superficielle des roches.

Des études théoriques ont montré que pour les fréquences supérieures à 20 Hz, les déphasages ne constituent pas un problème, la structure n'étant pas excitée dans leur ensemble. En dessous de 20 Hz et pour les vitesses de propagation constantes dans la roche, les longueurs d'onde sont suffisamment longues pour que les mouvements différentiels restent limités, et le modèle à un degré de liberté 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 surfaces sont prépondérantes. On retrouve la encore des risques plus élevés associés aux basses fréquences.

### **1-2- Influence des paramètres de tir sur les vibrations :**

Parmi les nombreux paramètres d'un tir, un certain nombre sont déterminants quand à l'intensité des vibrations transmises au sol, en particulier la quantité d'explosif mise en œuvre, la distance au tir, qui représentent les seuls paramètres aisément mesurables.

D'autres sont également importants, la nature de l'explosif, la nature géologique du sol, la séquence d'amorçage. Ils sont plus difficiles à quantifier.

Certains éléments liés au mécanisme du tir jouent un rôle important, les vibrations du sol représentent une énergie mécanique qui n'a pas été utilisée pour briser la roche, elles sont donc liées à l'efficacité du tir. On peut également penser que la forme de la charge, le mode de répartition des trous de mines dans l'espace, jouent un rôle dans la transmission de l'énergie au sol et la répartition en divers types d'ondes.

Seuls les rôles de la distance et de la quantité d'explosifs sont faciles à étudier. En ce qui concerne les autres paramètres difficiles à quantifier, les expériences n'ont pas mis en évidence le rôle particulier de l'un d'entre eux.

#### **1-2-1- Influence de la charge :**

Le résultat le plus important des études de vibrations a été de montrer que la vitesse de vibration mesurée en un point donné ne dépend pas de la charge totale d'une volée mais de la charge instantanée, c'est à dire de la charge mise à feu à un instant donné par des détonateurs à court retard de même numéro ce qui veut dire de même temps de retard .

En effet même si plusieurs charges successives contribuent à ébranler le sol, cette coopération ne va pas au delà de la durée de l'ébranlement provoqué par une charge isolée. Or cette durée est suffisamment courte pour qu'après quelques numéros de micro retard, on atteigne un niveau de vibration quasi constant.

## Etude des vibrations dues aux tirs de mines. Apport de la modélisation

Des expériences faites aux Etas Unis ont conduit à retenir la valeur minimum de 8 ms pour définir la notion de charges séparées.

L'apparition de l'exploseur séquentiel modifie quelque peu cette notion. Avec cet appareil on peut en effet obtenir des mises à feu avec des décalages d'une définition de la milliseconde.

Ces décalages combinés aux retards des détonateurs habituels à 25 ms peuvent donner lieu à des intervalles très variables entre les dates d'explosion des différentes charges constituant une volée. La précision des détonateurs électriques étant de l'ordre de quelques millisecondes, la limite de 8ms pour considérer des charges comme effectivement séparées paraît justifiée, mais il y a quelques aspects à considérer avec des intervalles théoriques de 9 et 7 ms respectivement, car ils conduisent à des charges unitaires passant du simple au double.

Si l'on considère la charge unitaire, des mesures expérimentales montrent que la vitesse de vibration mesurée varie comme la charge à un exposant compris selon les expérimentateurs entre 0.5 et 1. (P. Chapot ,1988)

Aux tirs très confinés correspondraient les valeurs proches de 1, les faibles valeurs correspondant aux tirs bénéficiant d'un très bon dégagement. Des études de corrélation sur des chantiers de travaux publics ont montré que la valeur de 0.75 pouvait constituer une bonne approximation.

Il semble que pour de gros tirs en carrières, des valeurs plus proches de 0.5 conviennent mieux.

On constate effectivement que lorsqu'on double la charge, on ne double généralement pas la vitesse.

### **1-2-2- influence de la distance :**

La distance constitue le paramètre le plus facile à étudier, il suffit de placer plusieurs capteurs à différentes distances d'un tir pour avoir une expérience avec une seule variable. Diverses expériences ont conduit à considérer que la vitesse mesurée est inversement proportionnelle à la distance à une puissance généralement comprise entre 1,5 et 2.

Toutefois la plupart des lois de propagation ne précisent pas si l'on considère les ondes de volumes ou les ondes de surface. Selon le cas, leur comportement sera très différent : l'atténuation géométrique (diminution de l'amplitude en raison de l'expansion du front d'ondes), varie proportionnellement à la distance  $D$  à la puissance 1 à 2 pour les ondes de volume (selon que l'on se trouve loin ou près de la source), alors qu'il s'agit de  $D$  à la puissance 0.5 pour les ondes de surface.

D'autre part, ces deux types d'onde ne se propagent généralement pas dans les mêmes milieux, alors que les ondes de volume traversent un matériau rocheux, les ondes de surface se propagent dans des matériaux de recouvrement ou des roches altérées ou les vitesses de propagation sont très faibles, souvent inférieures à 1000 m/s alors qu'elles sont généralement supérieures à 2000 ou 3000 m/s dans la roche compacte ou prennent naissance les ondes de volume. (P. Chapot ,1988)

Pour la même raison les fréquences transmises sont plus basses, ceci étant accentué par le fait qu'en raison de leur moindre atténuation les ondes de surface sont observables à de plus grandes distances que les ondes de volume et que d'une façon générale les fréquences élevées sont absorbées plus rapidement.

Il est parfois possible d'observer au cours de la même volée, que près du tir les vitesses maximales sont dues aux ondes de volume, alors qu'à plus grande distance ce sont les ondes de surface qui sont prépondérantes. L'amortissement n'est alors pas le même dans les deux cas, on doit observer pour les ondes de surface un exposant plus proche de la valeur théorique de 0.5. Ce phénomène est sans doute à l'origine de certaines dispersions dans les tentatives de corrélation vitesse/distance.

### **1-3- Loi de propagation :**

La loi de propagation qui permet d'estimer la vitesse de vibration maximale sur un site est donnée par la relation : (P. Chapot ,1988)

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

V : la vitesse de vibration exprimée en m/s ;

K : constante caractéristique des terrains ;

D : distance entre la zone de l'explosion de la charge et le point de mesure exprimé en m ;

Q : charge unitaire instantanée d'explosif en Kg ;

Le terme K va représenter la totalité des autres paramètres de la géologie à la nature de l'explosif ce qui est une insuffisance de ce modèle.

Si ce coefficient K n'a pas pu être exprimé en fonction d'autres paramètres, c'est parce que chacun d'eux possède un domaine de variation faible, compte tenu de la précision relativement médiocre des mesures de vibrations au sol.

D'un point de vue très global, il n'y a pas de différence fondamentale entre les effets d'un kilo de dynamite ou d'un kilo de gel, pas plus qu'entre les propriétés physiques d'un massif de grès ou d'un massif de calcaire, dans tout les cas on fragmente un certain volume de roche.

L'impossibilité de réaliser plusieurs fois le même abattage à l'explosif avec des capteurs aux mêmes endroits rend très difficile l'étude expérimentale du poids d'un seul paramètre, même s'il est aussi simple que la nature de l'explosif. Il faudrait pour cela alterner, sur un même chantier des volées avec l'un et l'autre des produits étudiés et constituer une série d'observations suffisamment longue pour en extraire un résultat significatif (quatre ou cinq points au moins dans chaque série, soit 8 à 10 volées au minimum).

Si les expériences doivent être faites avec des mesures en des points différents pour chaque tir, la dispersion supplémentaire des résultats due aux variations dans le couplage des capteurs conduit à augmenter de façon importante le nombre des observations nécessaires.

On déduit donc que le paramètre K que l'on peut déterminer expérimentalement n'est valable pour un site donné, voir même pour un plan de tir donné, dans ce cas là pour les tirs séquentiels à intervalle réduit, il serait plus prudent de comparer entre les volées à séquence d'amorçage identique.

Certains auteurs, s'appuyant sur des considérations théoriques et en considérant des charges sphériques, utilisent la racine cubique de la charge, mais il semble que ce mode de réduction corresponde moins bien aux résultats expérimentaux obtenus sur la plupart des chantiers.

De nombreuses mesures on conduit à adopter la relation :

$$V \text{ (mm/s)} < 6000 (D/\sqrt{Q})^{-1,8}$$

Si l'on s'intéresse aux valeurs moyennes plutôt qu'aux valeurs maximales, on peut admettre :

$$V \text{ (mm/s)} < 2500 (D/\sqrt{Q})^{-1,8}$$

Cette relation est commode pour faire une première estimation de ce qui peut se produire sur un site donné, la relation précédente donnant un maximum, qui n'est atteint que dans les conditions les plus défavorables.

Les très rares cas des valeurs plus élevées qui ont été notés, correspondent à des sites où les ondes de surface sont prépondérantes et pour lesquelles l'amortissement en fonction de la distance est moins rapide. Dans ce cas c'est la relation suivante qui a été proposée par Comeau:

$$V = K. Q^{0,5} . D^{-1}$$

L'exposant 1 de la distance suggère que la formule s'applique à des ondes de surface, mais elle ne semble pas convenir aux mesures à courte distance des zones de tir, et pour les faibles charges où les ondes de volume sont généralement prépondérantes. (P. Chapot, 1988).

Des expressions analogues ont été formulées par certains auteurs en utilisant une réduction de la distance par la racine cubique de la charge. Dowding propose par exemple :

$$V \text{ (mm/s)} = 1300 (D/\sqrt[3]{Q})^{1,46}$$

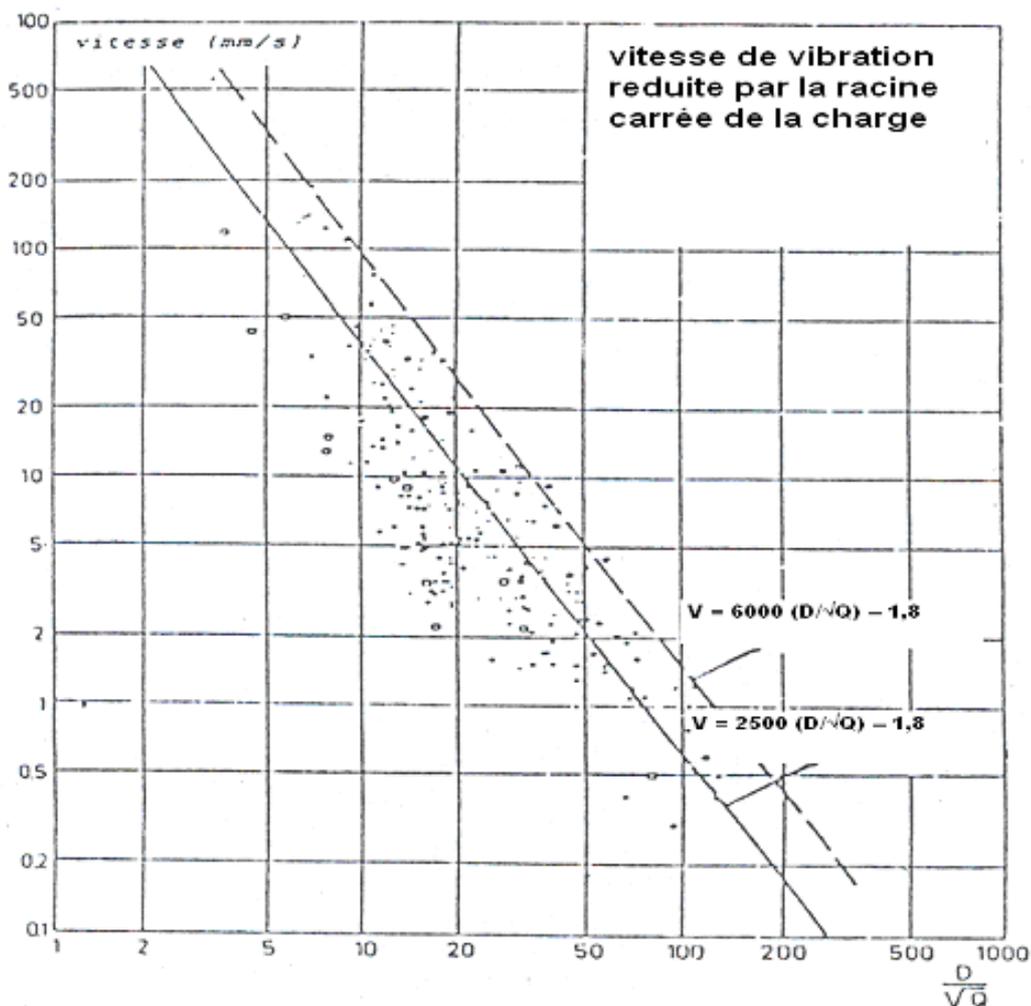
Ce qui est une simplification de la relation générale :

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

## Etude des vibrations dues aux tirs de mines. Apport de la modélisation

Elles permettent une représentation graphique simple, mais elles n'impliquent pas une relation fonctionnelle entre les exposants  $a$  et  $b$ . Avec un exposant global de  $-1,8$ , cela revient à adopter un exposant de  $0,9$  pour la charge, ce qui est un peu élevé si l'on considère ce qui a été dit sur l'influence de la charge.

On doit observer que dans les mesures réelles sur chantier l'étude de l'influence de la distance a lieu pour des valeurs extrêmes pouvant varier du simple au décuple (10 à 100 m, ou 50 à 500 m par exemple), ce qui va multiplier la vitesse par plus de cinquante, alors que les essais à la charge variable ne se font que dans un rapport de quelques unités, en multipliant la charge par 5 on ne multiplie la vitesse que par trois. La distance a donc généralement un poids prépondérant dans la plupart des déterminations expérimentales et l'approximation apportée en réduisant la distance par la racine carrée (ou cubique) de la charge a pratiquement peu d'incidence.



**Figure N°13:** Vitesse de vibration en fonction de la distance réduite.

## En conclusion :

Une synthèse des résultats expérimentaux a été réalisée par P. Chapot à partir de 600 valeurs mesurées sur 15 sites différents.

-Le coefficient  $a$  est compris entre 0.5 et 1.2, les valeurs les plus couramment rencontrées se rapprochent de 0.75.

-le coefficient  $b$  est compris entre 1 et 2.5 avec une valeur moyenne proche de 1.8.

-La constante  $K$  est généralement comprise entre 800 et 8000 avec une valeur moyenne à 2500. P. Chapot a retenu trois valeurs proposées pour la constante  $K$  :

- $K=6000$  : permet d'estimer la valeur maximale probable dans la plupart des cas.
- $K=2500$  : est une valeur moyenne qui permet une estimation moyenne ; le résultat peut être au dessus ou au dessous avec la même probabilité.
- $K=1200$  : permet de faire une estimation moyenne dans le cas de tir particulièrement bien dimensionné avec un excellent rendement.

## 1-4- Prédiction de la fréquence :

Si les divers facteurs déterminant la valeur de la vitesse de vibration ont été largement étudiés, il n'est pas de même en ce qui concerne la fréquence. L'expérience montre que les fréquences dominantes sont beaucoup plus élevées à proximité des tirs à charge unitaire faible (quelques kilos d'explosif, 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 fréquence élevée sont plus amorties par le terrain, ce qui explique que les fréquences associées au maximum de vitesse diminuent lorsque l'on s'éloigne du tir.

Il semble d'autre part que les tirs à forte charge provoquent d'avantage de basse fréquence, 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 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.

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

-Déplacement :  $d \text{ (mm)} = K_d \cdot Q^{0.7} \cdot D^{-1.1}$

-Accélérations :  $a = K_a \cdot Q^{0.28} \cdot D^{-1.84}$

-Vitesse :  $V \text{ (mm/s)} = K_v \cdot Q^{0.48} \cdot D^{-1.46}$

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

Si le coefficient pour la vitesse  $K_v$  peut être pratiquement considéré comme indépendant de la célérité des ondes sismiques, il n'en est pas de même pour les coefficients relatifs aux déplacements et à l'accélération pour lesquels les valeurs proposées par Dowding (in P. Chapot, 1988) sont, si l'on adopte une densité constante de 2.4 :

$$K_d = 81000 \cdot C^{-1.4}$$

$$K_a = 0.00253 \cdot C^{1.45}$$

Ce qui conduit à des valeurs pouvant passer pratiquement du simple au double dans la gamme de vitesses allant de 2 000 à 3 000 m/s. (P.Chapot, 1988)

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

## **2 - OPTIMISATION DES CONTROLES DE VIBRATIONS :**

L'énergie explosive constitue aujourd'hui le moyen le plus performant pour exécuter des excavations en site rocheux. Le seul critère du niveau zéro - crête de la vitesse de vibration - permet dans de nombreux cas de répondre aux exigences de sécurité. On observe toutefois :

- que, d'une part les niveaux zéro - crête proposés comme seuils de vitesse maximale tendent à être de plus en plus bas,
- d'autre part que, malgré des niveaux zéro - crête parfois élevés aucun dégât n'est provoqué.

L'analyse en fréquence des signaux de vibrations constitue un complément indispensable à la mesure des niveaux zéro - crête pour juger de la nocivité d'une vibration.

Les niveaux zéro - crête de vitesse de vibration pour garantir la sécurité doivent être relativement faibles sur les composantes dont la fréquence est proche des fréquences propres d'oscillations des structures à surveiller.

La plage de fréquences sur laquelle se contrôle les niveaux zéro - crête est généralement étroite entre les 2 limites extrêmes : 1 Hz et 150 Hz.

L'expérience montre que l'on peut différencier quatre plages de fréquences :

- très basses fréquences (CTBF), au-dessous de 10 Hz ;

- basses fréquences (CBF), entre 10 Hz et 40 Hz ;
- moyennes fréquences (CMF), entre 30 et 70 Hz ;
- hautes fréquences, au dessus de 70 Hz sans toutefois excéder 150 Hz.

Le choix du type de capteur combiné à un système de filtrage permet de définir le spectre de surveillance sur lequel sont mesurés des niveaux zéro – crête.

Ces niveaux zéro – crête de vitesse ou d'accélération sont au nombre de deux :

- un seuil conseillé qui servira d'objectif pour dimensionner le plan de tir le plus rentable possible ;
- un seuil absolu qui constitue la limite à partir de laquelle le plan de tir ou la méthode d'abattage, doivent être révisés pour cause de nuisances excessives.

L'application de tels critères de surveillances est contrôlée sur chantier avec un appareillage adapté. (P.Allard, 1988).

### **2-1- Les critères physiques de nuisance des vibrations :**

La surveillance de vibration est communément réalisée à partir de la mesure de niveaux zéro – crête des vitesses de vibration. Les critères pris en compte sont des vitesses zéro – crête maximales.

Pour préconiser un seuil de vibration, il faut assurer que tant que ce seuil ne sera pas dépassé, la probabilité d'avoir des dégâts sera faible ou nulle. A l'inverse, le dépassement de ce seuil ne signifie pas que les dégâts seront systématiquement observés, car les seuils sont généralement proposés avec une certaine marge de sécurité.

#### **2-1-1- Détermination des critères de contrôle :**

Les observations expérimentales porteront principalement sur les trois points suivants :

- les amplitudes en fonction du temps sur les fonctions vitesses en plus rarement accélérations ;
- le contenu spectral des vibrations à partir de la transformée de Fourier du signal temps ;
- les modifications du contenu spectral des vibrations en fonction de la position des points de mesures.

##### **a - Le spectre de fréquences :**

Le paramètre fréquence est le plus complexe, en effet un signal ne sera que très exceptionnellement caractérisé par une seule valeur de fréquence. Il s'agit pratiquement toujours d'une bande de fréquences plus ou moins large.

Pour définir le contenu spectrale d'une vibration, il y'a trois valeurs caractéristiques des spectres :

- la fréquence qui présente l'amplitude maximale sur le spectre :NC ;
- la plage de fréquences à -12 dB définie par les canaux extrêmes de fréquences NF et NS de telle sorte que tous les canaux extérieurs, inférieurs à NF et supérieurs à NS, aient une amplitude inférieure,
  - soit à 50% de l'amplitude maximale à la fréquence NC du spectre : plage à -6 dB ;
  - soit à 25% de l'amplitude maximale à la fréquence NC du spectre : plage à -12 dB.

Les deux fréquences NF et NS permettent de connaître la largeur du spectre sur une certaine dynamique. Une vibration sera d'autant plus nocive que son contenu spectral sera étroit. (P.Allard, 1988).

Ainsi à la limite lorsque la structure vibre à sa fréquence de résonance, le spectre pourra être réduit à une seule raie de fréquence. On observe en plus, dans ce cas, un amortissement très lent de la vibration. Dans ces conditions la vibration présente un caractère nocif accru.

### **b - Vitesse de propagation et fréquence de vibration :**

Les recommandations d'AFTES font référence à la qualité des terrains de fondation de la construction, en introduisant la vitesse de propagation des ondes de compression.

Il existe une relation entre la vitesse de propagation et la fonction de filtre du terrain et par conséquent sur la plage de fréquence des vibrations qui viennent solliciter la construction :

- à courte distance de la zone de tir (quelques mètres), les vibrations détectées dans le terrain, présentent des niveaux élevés sur des fréquences élevées 200 Hz à 500 Hz et même 1000 Hz ;
- après une propagation de plusieurs dizaines de mètres, la vibration est filtrée, les fréquences élevées sont d'autant plus atténuées que le milieu est moins compact (vitesse de propagation plus faible).

### **c - Etudes spéciales :**

En plus des études réalisées généralement et qui concernent la mesure de la vitesse et de la fréquence, on peut recourir à d'autres études spécifiques comme la détermination de l'accélération de rupture qui s'utilise surtout dans le cas des roches ornementales. On détermine avec cette méthode la charge maximale pour éviter les ruptures dans le massif rocheux.

Une étude bidimensionnelle de transmission des vibrations peut être faite en déterminant une carte des isolignes de vitesse de vibration autour de la zone en question avec l'aide de mesure de vibrations sous forme de maille de points bidimensionnelle.

Sinon, on peut étudier la réponse des édifices singuliers car en mesurant à la base et en différents points de la structure, il est possible d'obtenir la réponse d'une structure concrète aux vibrations en déterminant ses fréquences propres.

Cependant, ces études s'appliquent à des cas particuliers seulement, car elles restent très coûteuses et pas toujours justifiées. (J.A.Pascual de Blas, 2002).

### 3 - Cas de Keddara :

L'étude d'impact au niveau de la carrière de Keddara a été faite par INTERNATIONAL CONSULTING BUREAU (ICB) en décembre 2001. Elle porte entre autre sur les vibrations engendrées par les tirs d'abattage en carrière.

Pour ce qui est des installations de concassage (concasseurs, broyeurs et tamis) les vibrations engendrées ont été considérées limitées dans l'espace, au regard de l'éloignement relatif du village de Keddara qui se trouve à 1 200m. C'est pourquoi, ces vibrations n'ont pas été prises en considération.

Le rayon de la zone dangereuse, pour les constructions soumises aux ondes sismiques, a été estimé par la formule suivante :

$$R_s = \alpha k_s 3\sqrt{Q} \quad , m$$

Où :

- ◆  $\alpha = 1,2$  - indice lié à l'action de l'explosion de la charge. Il indique le mode de projection de la roche abattue par rapport au front de taille,
- ◆  $k_s = 5$  est le coefficient qui tient compte du substratum sur lequel est située la construction,
- ◆  $Q$  = poids total de la charge tirée, en Kg

En tenant compte du fait que la capacité maximale du chariot de foration est d'une centaine de trous forés par mois et que la charge par trou est de 25 Kg, la charge totale qui peut être tirée à la fois mensuellement est de l'ordre 2 500 kg.

Ceci donne en utilisant la formule ci-dessus :  $R_s = 81$  m

Dans le cas extrême où le temps de foration est doublé, et ce, pour des raisons d'approvisionnement en explosifs, la charge totale serait de  $2Q$  soit 5 000 Kg.

Ceci donne un rayon d'action égal à :  $R_s = 103$  m

Le rayon d'action de l'onde aérienne au delà duquel il y a absence totale de débris de vitres est donné par la formule :

$$RA = k_A \sqrt{Q} \quad ; m$$

Où :

**KA** = 50, KA étant le coefficient de proportionnalité qui tient compte de la disposition des charges et de leur poids par rapport aux faces libres du front de taille alors :

- ◆ Pour Q = 2500 kg d'explosifs : RA = 2 500 m
- ◆ Pour Q = 5000 kg d'explosifs : RA = 3 536 m

Les valeurs précédentes montrent que le rayon d'action de l'onde aérienne est plus étendu que celui de l'onde sismique. C'est pour cela que cette étude considère qu'elle représente un niveau de contrainte plus élevé par rapport aux constructions environnantes et notamment le village de KEDDARA qui est situé à 1,2 Km des fronts de taille.

Pour réduire les effets des ondes aériennes lors des tirs d'abattage, ICB a proposé de réduire la charge instantanée et pour ce faire, utiliser des détonateurs microretards ou des relais de détonation. L'impact généré par le bruit a également été considéré. Pour apprécier ses niveaux de bruit, deux exemples de récepteurs de référence ont été pris :

- ◆ le bloc administratif situé à l'intérieur du périmètre de l'unité, à environ 200 mètres de la zone de tir d'abattage,
- ◆ le village de KEDDARA qui est à environ de 1 200 mètres de la zone de tir d'abattage.

Le niveau sonore a été calculé comme suit :

$$\text{Leq B} = \text{leq A} - 23 \log D/d$$

Avec :

- ◆ leq B : niveau du bruit auquel est exposé le récepteur pendant une période donnée,
- ◆ leq A : niveau du bruit de la source sonore,
- ◆ d : distance entre le récepteur et la source,
- ◆ D : distance dépourvue de tout obstacle entre la source et le point de mesure du niveau sonore.

Pour un niveau sonore maximal de leq A= 110 dB et une distance d de 1 m de la zone de tir et d'abattage, le niveau de bruit auquel est exposé le bloc administratif situé à une distance D=200 m de la source est :

$$\text{Leq B} = 110 - 23 \log 200 = 58 \text{ Db}$$

Pour le bloc administratif situé à une distance D=130m de la source qui est cette fois l'installation de concassage, le niveau de bruit a été estimé à :

$$\text{Leq B} = 110 - 23 \log 130 = 61,40 \text{ dB}$$

Avec :

- ◆ D = 130 m
- ◆ d = 1m
- ◆ leq = 110 dB

De même le niveau de bruit auquel est exposé le village de Keddara est :

$$\text{Leq B} = 110 - 23 \log 1\ 200 = 30 \text{ dB}$$

La valeur trouvée est faible par rapport au seuil fixé par la réglementation algérienne qui admet en matière d'émissions de bruit :

- 70 décibels en période diurne (6 h à 22 h) et 45 décibels en période nocturne (22 h à 6 h) dans les zones d'habitations, les voies et les lieux publics et privés. ;
- 45 décibels en période diurne (6 h à 22 h) et 40 décibels en période nocturne (22h à 6 h) au voisinage immédiat des établissements hospitaliers ou d'enseignement et dans les aires de repos et de détente, ainsi qu'au sein des enceintes.

De même, il est admis qu'il ne faut pas dépasser 80 dB durant 8h / j et 5 j /semaine.

Les mesures à adopter pour limiter les gênes occasionnées sont que les engins et les camions doivent être utilisés conformément à la réglementation Algérienne et dans un périmètre éloigné par rapport aux agglomérations en sachant que :

- ◆ les engins d'une puissance comprise entre 200 et 300 CV émettent 83 dB à 7 m,
- ◆ les engins d'une puissance inférieure à 200 CV émettent 80 dB à 7 m.

Il a été démontré précédemment qu'un récepteur situé dans un rayon de 130 m de la station de concassage enregistre un niveau sonore égal à 66,4 dB si on rajoute l'effet d'un vent porteur.

Dans un rayon de 200 m de la zone de tir et d'abattage on peut enregistrer un niveau sonore de 61 dB si on devait tenir compte d'un vent porteur.

Pour les riverains situés au-delà de ce rayon, l'impact sonore est négligeable voire nul. En ce qui concerne le personnel travaillant sur le site (c'est à dire dans une zone d'un rayon de moins de 40 mètres), les niveaux de bruits sont de fait plus importants et afin de les atténuer le bruit est proposé de prendre les mesures suivantes :

- ◆ bardage des machines surtout la partie criblage – stockage,
- ◆ obligation doit être faite aux ouvriers opérateurs en contact direct avec les équipements, de porter des anti-bruits.

### **Remarque:**

On voit que l'étude réalisée par ICB pour Keddara ne prend en considération que les ondes aériennes, et qu'elle ne fait aucune estimation, ni aucune mesure de la vitesse particulière, encore moins du spectre de fréquence, paramètres considérés comme essentiels dans l'appréciation du niveau du risque.

Par ailleurs, on peut remettre en cause les formules utilisées pour l'estimation du rayon de la zone dangereuse, car il n'est pas déterminé pour le terrain qui caractérise l'exploitation de Keddara et il ne prend pas en considération les paramètres rentrant en jeu dans ces travaux, ce qui rend les résultats proposés peu fiables lors de l'estimation.

## **CINQUIÈME CHAPITRE :**

# **MODÉLISATION DES TIRS DE MINES**

## 1- Introduction :

Avant tout projet d'exploitation minière, il est nécessaire d'avoir une estimation préalable des vibrations et de leurs effets environnementaux. Il est donc nécessaire de connaître le niveau des vibrations à différentes distances du lieu de l'explosion.

Seule l'étude d'un milieu en particulier peut fournir une équation fiable. La modélisation peut être une solution pour l'estimation des vibrations avant que la mine ne soit en exploitation, même si elle n'exclut pas les mesures in - situ qui demeurent indispensables. La modélisation peut par exemple permettre de choisir le meilleur plan de tir qui permette à la fois de réduire le niveau des vibrations à un seuil acceptable tout en garantissant un bon rendement.

## 2-Théorie de la modélisation :

### 2-1-Introduction :

L'approche pour l'étude des vibrations liées aux tirs de mines est identique à celle utilisée en sismologie. Elle revient à trouver la distribution des forces ou des moments équivalents à la déformation anélastique associée à un séisme ou à une explosion dans le cas d'un tir.

L'idée de base émise en 1963 par les japonais (Nicolas, 2003) est que les séismes sont des phénomènes non élastiques pour lesquels on cherche à trouver un phénomène équivalent (mêmes causes, mêmes effets) dans la théorie de l'élasticité. Cet équivalent est connu sous le nom de forces ou de moments équivalents.

Les équations classiques relatives aux ondes élastiques demeurent à ce jour le meilleur modèle simplifié dont nous disposons pour l'analyse du phénomène vibratoire engendré par les tirs de mines, (J.A. Pascual de Blas, 2002).

Cette analyse concerne uniquement la propagation des ondes dans la zone extérieure à la source explosive et considérée comme élastique.

### 2-2- Modélisation :

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

$$\rho \cdot \ddot{u}_{ii} = \sigma_{ij,k} + f_i$$

Où :

$\rho$  est la densité ;  $\ddot{u}_{ii}$  l'accélération ;  $\sigma_{ij,k}$  la contrainte ;  $f_i$  la force à la source (l'indice k représente le cas où  $i = j$ ).

La déformation linéaire est définie par :  $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{ij} + u_{ji})$

L'équation de l'élasto - dynamique s'écrit :  $\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij}$

Avec :

$$\begin{aligned} \delta_{ij} &= 1 \text{ si } i \neq j ; \\ \delta_{ij} &= 0 \text{ si } i = j. \end{aligned}$$

Pour une force ponctuelle de type impulsionnelle :

$$\vec{f}(r, t) = f_i \cdot \vec{e}_i \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) \delta(t - t_0).$$

Où :

$f_i$  est une force ;  $\vec{e}_i$  une direction ;  $\delta$  : fonction de Dirac.

La solution à ce problème peut être écrite sous la forme symbolique de  $G_{ij}(r, t; r_0, t_0)$ , où G est le tenseur de Green, i la direction de déplacement au point d'observation et j la direction d'application de force.

Plusieurs solutions de G sont connues notamment pour un demi - espace homogène et pour le modèle à couches.

Une fois la fonction de Green générée, le champ de déplacement s'écrit sous la forme:

$$u_i(r, t) = \int_{v_0}^t dt_0 \int_{v_0} dV G_{ij}(r, t; r_0, t_0) f_j(r_0, t_0) ; \text{ Connue comme le théorème de représentation.}$$

On obtient donc une expression générale du déplacement grâce à la fonction de Green qui relie forces (ou tenseur) au mouvement. (Kanamori.M, Boschi.E, 1982)

La méthode utilisée est de considérer la force équivalente qui s'écrit sous forme  $f(r, t) = -\nabla \cdot m(r, t)$  et qui provient de la distribution de la contrainte inélastique.

$m_{ij}$  représente l'excès de contrainte, soit la contrainte nécessaire pour annuler la déformation produite. La caractérisation des différentes sources sismiques (séisme – explosion) réside dans l'expression du tenseur des contraintes  $m_{ij}$ .

$$m_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk}^T + 2\mu \varepsilon_{ij}^T$$

On trouve alors après intégration par parties :

$$u_i(r,t) = \int_0^t dt_0 \int_{v_0} dV G_{ij,k}(r,t;r_0,t_0) m_{jk}(r_0,t_0)$$

Cette représentation est valide pour toutes les sources sismiques d'origine interne, elle est aussi valide pour les modèles de terre pour lesquels le tenseur de Green peut être calculé.

Pour des milieux non homogènes la  $G_{ij}$  devient très vite complexe et on est contraint de travailler par évaluation numérique.

### **3- Optimisation du tir :**

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.

$$u(r,t) = S * G$$

Où :

\* est le produit de convolution

G sont les fonctions de Green qui représentent les conditions de propagation des différents types d'ondes dans le milieu rocheux, ces fonctions sont fortement influencées par la géologie.

S est la source explosive, elle est caractérisée par le type d'explosif, les caractéristiques géomécaniques du milieu rocheux et la géométrie de la charge.

On peut disposer de la fonction de green en enregistrant les vibrations relatives à un tir unitaire pour simuler un tir de mines, il suffit alors de convoluer la mesure avec la fonction source. C'est-à-dire sommer sur l'ensemble des tirs.

Pour illustrer l'apport de la modélisation, nous avons calculé les vibrations dues à un tir en considérant le modèle simplifié d'une terre homogène infinie.

Dans le cas d'une explosion, le déplacement est donné par :(Bullen.K.E, Bolt.B.A, 1985)

$$U(r,t) = \left( \frac{Aa^2 \sqrt{2}}{4\mu r} \right) \sin \left( \frac{\alpha t 2\sqrt{2}}{3a} \right) \exp \left( - \frac{2\alpha t}{3a} \right).$$

$$t > t_1 \text{ avec } t_1 = \frac{r - a}{\alpha}$$

et  $U_r = 0$  pour  $0 < t < t_1$

$\alpha$  : Vitesse des ondes P,  
 $a$  : Dimension de la source,  
 $r$  : distance source - point,  
 $A$  : pression,  
 $\mu$  : constante élastique.

On peut donc simuler un tir de production en sommant les vibrations pour  $n$  tirs. De même on peut calculer le spectre de fréquence en utilisant la transformée de Fourier du signal (figure N°14, N°15 et N°16).

Cette approche est donc une combinaison de mesures et de calculs, on peut également tendre vers une approche entièrement synthétique, c'est-à-dire calculer numériquement le signal en prenant la fonction  $S$  et la fonction de Green sous forme analytique. On validera alors le calcul pour l'enregistrement in - situ d'un tir de production tout en notant que la fonction de Green devient très complexe pour un modèle de terre non homogène.

D'une façon générale la sismicité du tir dépend de la fiabilité de détonation des charges explosives et de l'ordonnancement de leur mise à feu.

A condition de remplir ces conditions fondamentales, les calculs numériques de la Modélisation Sismique Hybride (MSH) d'un tir, permettent d'en maîtriser la sismicité globale.

La maîtrise des vibrations induites par un tir de mines représente un double objectif :

- minimiser l'énergie sismique dans l'environnement,
- optimiser le résultat qualitatif du tir.

Dans la pratique, moyennant certaines hypothèses, la modélisation sismique hybride permet, à partir de l'enregistrement in - situ des signatures sismiques, d'une ou plusieurs charges types, de modéliser un tir de production. Cet outil se révèle être particulièrement bien adapté à l'optimisation de la séquence de mise à feu.

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 à la propagation du signal dans le massif.

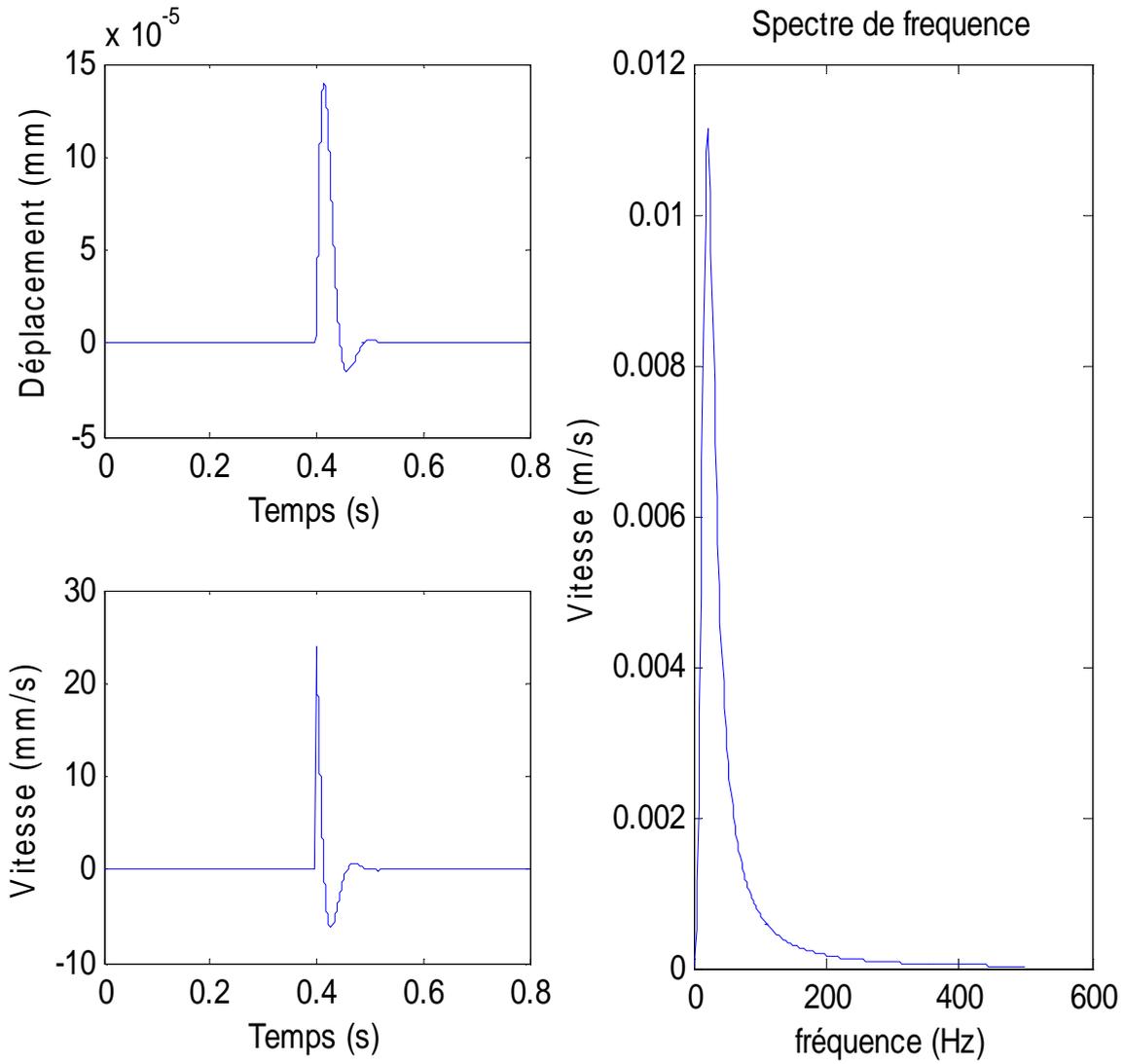
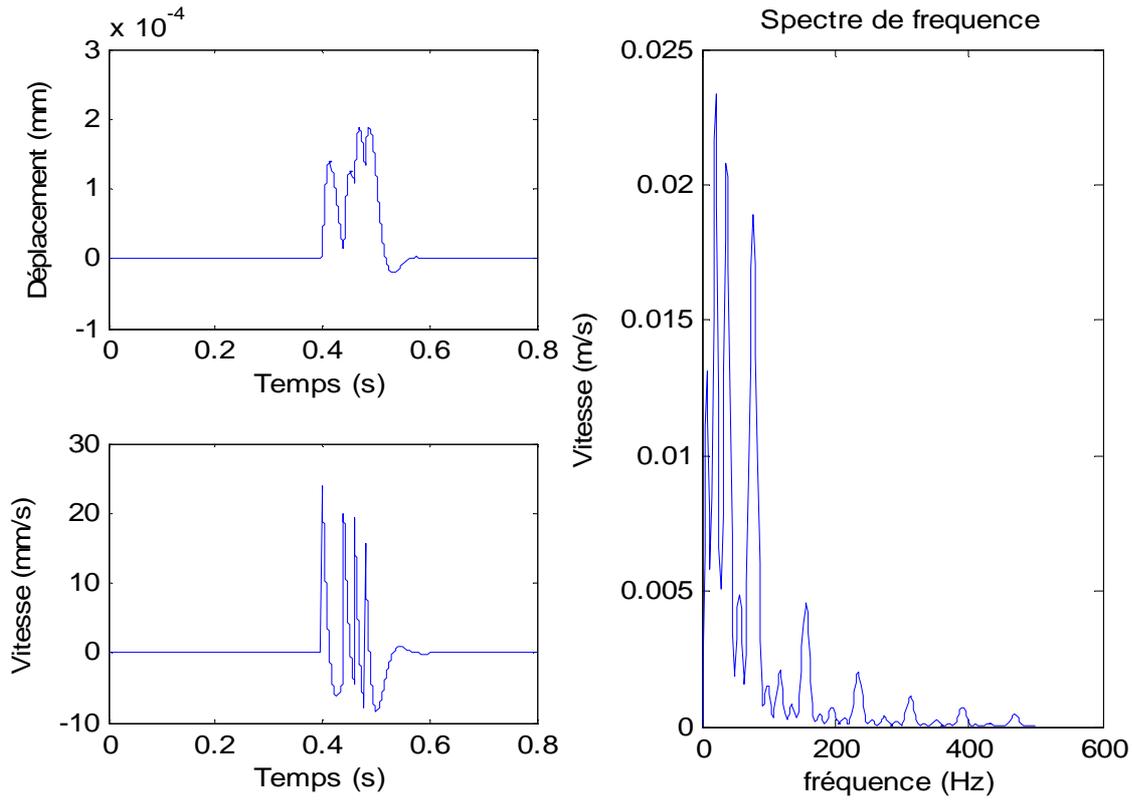
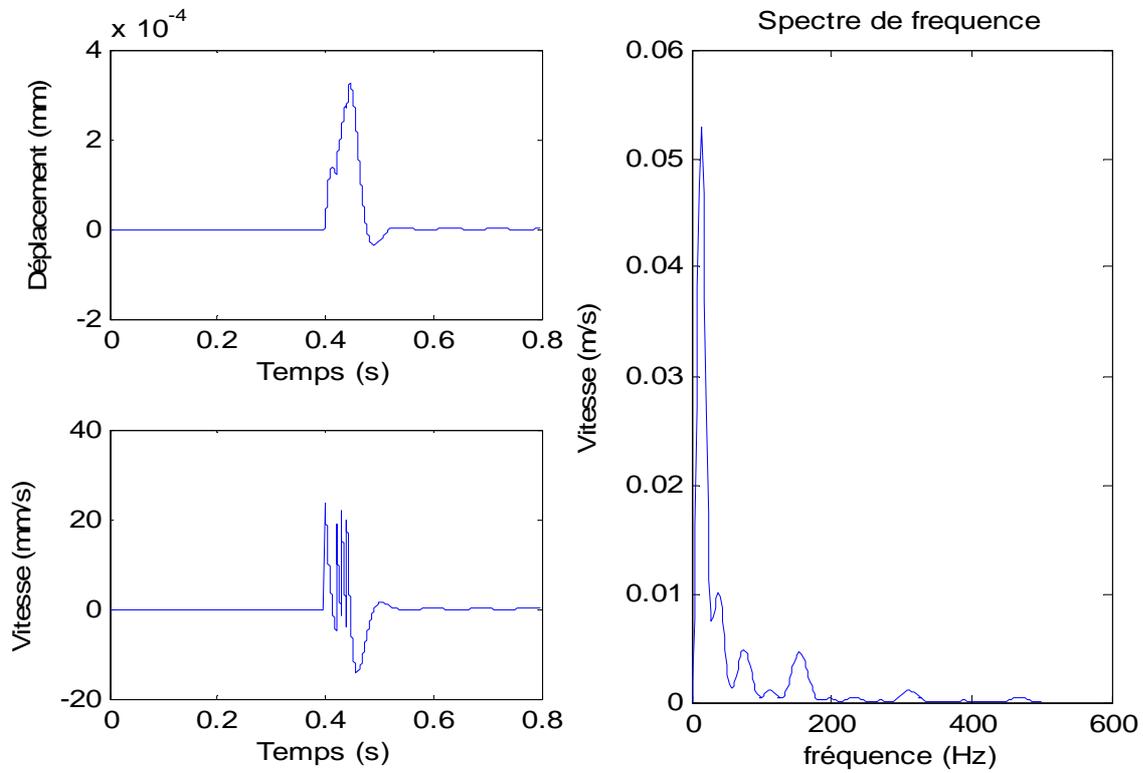


Figure N°14 : Simulation d'un tir unitaire.

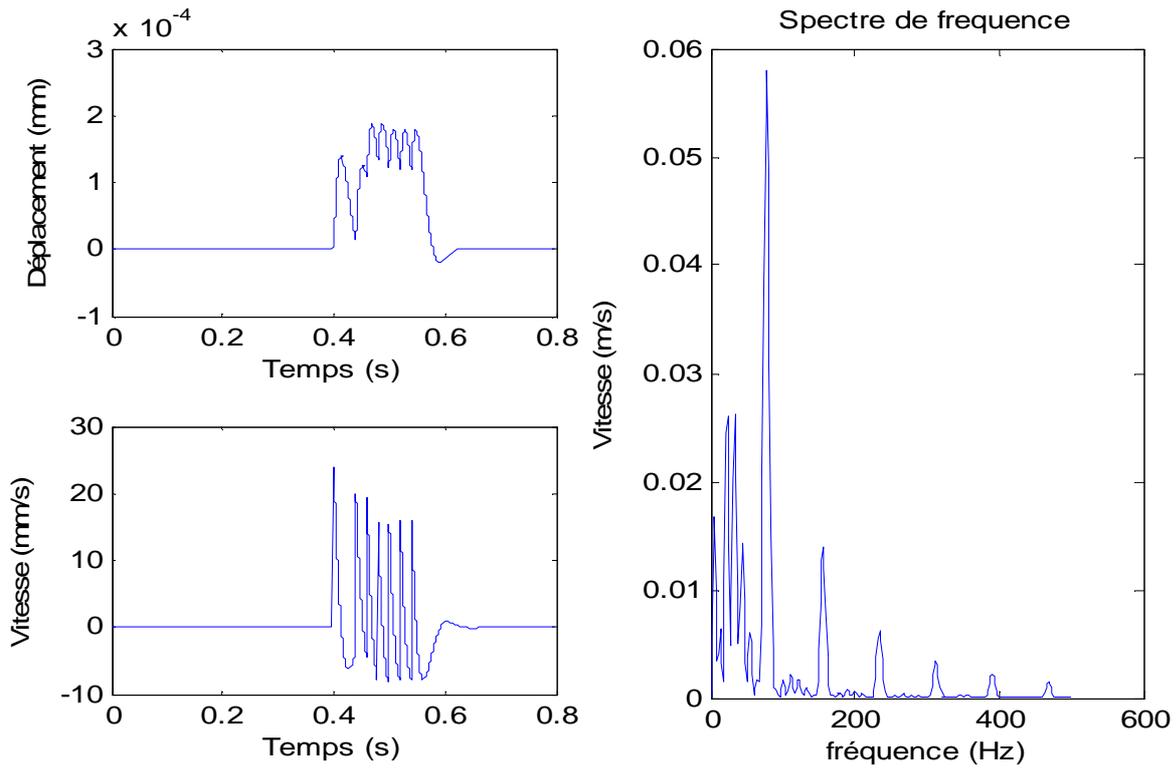


A) Retard entre les tirs de 0.02 s

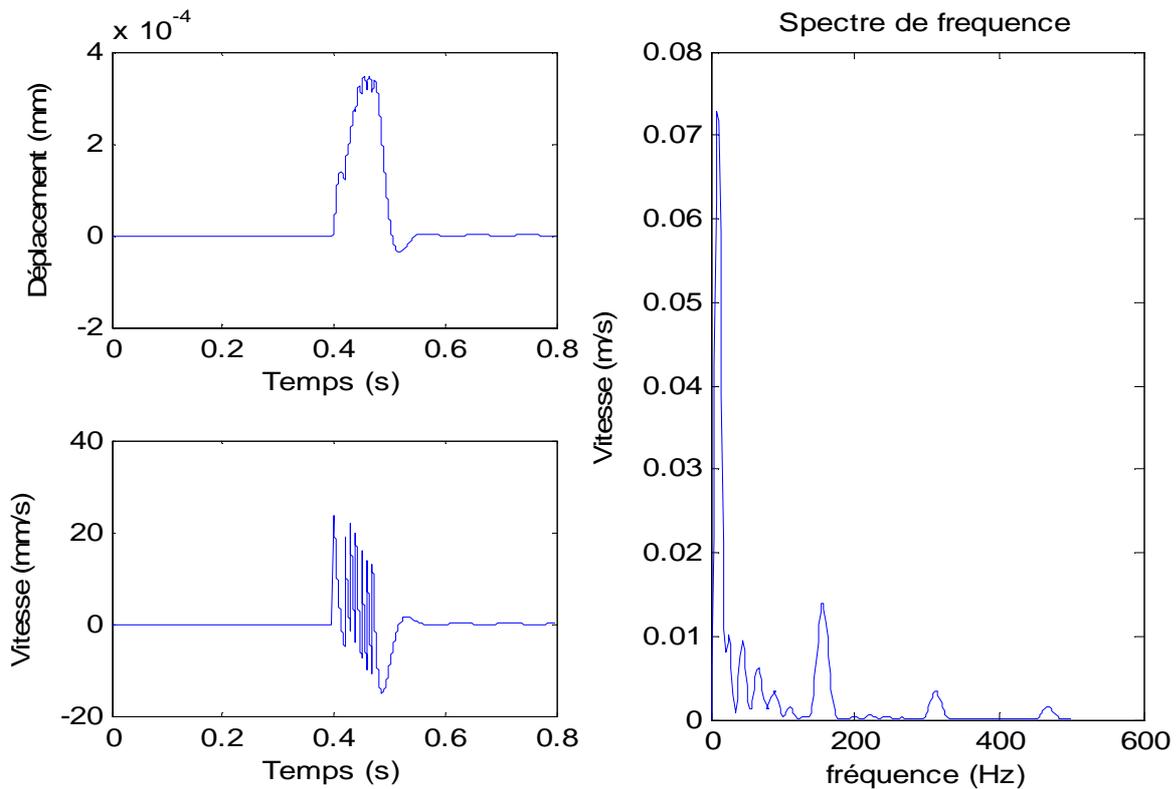


B) Retard entre les tirs de 0.01 s

Figure N°15 : Simulation pour 4 tirs.



A) Retard entre les tirs de 0.02 s



B) Retard entre les tirs de 0.01 s

Figure N°16 : Simulation pour 7 tirs

## **4-Observations :**

La modélisation doit être utilisée avec rigueur. La mesure in - situ est irremplaçable car si le massif n'est jamais homogène et élastique ce qui altère sensiblement le contenu fréquentiel du signal considéré, la plupart des modèles considèrent des fonctions de Green prises dans des conditions idéales de propagation.

Le choix de la technique d'initiation doit prendre en compte les aspects liés à leur sécurité, leur précision et la simplicité de leur mise en oeuvre.

Les résultats issus du calcul d'optimisation permettent d'imaginer des conceptions de tirs à plusieurs rangs de plusieurs trous et fournissent des couples de valeurs d'intervalles théoriques à régler entre trous d'un rang et entre rangs.

Les cas déjà étudiés jusqu'à ce jour ont permis d'établir qu'une sensible réduction du niveau des vibrations est obtenue à la condition que les dates de détonation de la séquence de tir soient réalisées avec précision.

La charge unitaire et ses variations ont des conséquences sur les amplitudes des vibrations plus que sur les fréquences elles-mêmes plutôt influencées par des contrastes géologiques.

La vibration d'un tir de production optimisé est de l'ordre de grandeur d'un tir d'une charge unitaire.

L'observation montre, pour un tir de production dont l'énergie sismique induite est minimisée par MSH, qu'il en résulte une bonne fragmentation.

Dans les différents cas étudiés la charge unitaire était comprise entre 3 et 225 kg. (Bernasconi et al,1996))

Les hypothèses prises pour la MSH sont généralement suffisantes à l'exception d'une seule, l'imprécision des détonateurs pyrotechniques, difficile à évaluer dans le calcul théorique. Les problèmes liés à la précision des détonateurs sont difficiles à intégrer dans un modèle probabiliste. Néanmoins cette technique alourdit le calcul et reste de toute manière insuffisante pour représenter la réalité des tirs. C'est pourquoi il est proposé de minimiser ce problème par un choix judicieux du système d'initiation.

Plusieurs solutions existent pour améliorer la précision:

- le pilotage par exploseur séquentiel ou détonateurs électroniques de détonateurs pyrotechniques (tir en mode séquentiel électrique ou séquentiel mixte),
- le moins possible de microretards différents, par exemple: le même microretard au fond de toutes les charges dans le cas d'un système non électrique,
- deux détonateurs de même retard au fond de toutes les charges pour diminuer l'écart type autour de la valeur nominale du retard et améliorer la sécurité en réduisant sensiblement le risque de ratés.

### Conclusion :

Un des problèmes environnementaux posés par l'exploitation des mines et celui lié à l'utilisation des explosifs. Cette technique engendre dans la zone qui entoure l'exploitation des vibrations responsables de la gêne que peuvent ressentir les riverains.

Dans les années 70, les grandeurs telles que charge et distance entre la source explosive et l'enregistreur de vibrations permettent d'approcher la notion de vitesse particulaire caractérisée par une amplitude de vibration de l'ordre de quelques mm/s et de très courte période, de l'ordre de quelques hertz à quelques dizaines de hertz. En première approximation, à partir de ces deux paramètres, on a coutume d'utiliser, une "loi" empirique d'amortissement; cette méthode devrait, pour le moins, être considérée selon une approche probabiliste pour représenter d'une façon réaliste le processus d'amortissement de la vitesse particulaire d'une charge représentative des tirs.

Ces formules empiriques utilisées pour contrôler le niveau des vibrations sont insuffisantes car elles proviennent de l'analyse de données enregistrées dans d'autres pays et donc relatifs à des terrains généralement différents de celui d'une exploitation donnée. Par ailleurs elles sont associées à des types de construction qui ne sont pas forcément identiques à celles que l'on peut rencontrer dans l'environnement immédiat de l'exploitation.

Par ailleurs le seul critère de zéro - crête pour la vitesse particulaire paraît insuffisant. Un autre paramètre important, la fréquence, doit être également considéré à travers le spectre de fréquence dans l'estimation des risques.

Enfin, l'estimation des vibrations par la modélisation, et cela avant la mise en exploitation de la mine permet de déterminer le meilleur plan de tir qui assure à la fois la réduction des niveaux de vibrations et un bon rendement. On peut également, grâce à la modélisation, adapter le plan de tir à la zone en cours d'exploitation.

Cependant la modélisation n'exclut pas les mesures in - situ qui permettent non seulement de valider le modèle, mais aussi d'estimer les fonctions de Green, qui deviennent très vite difficiles à déterminer numériquement dès lors que la géologie du terrain ainsi que la géométrie du site considérés deviennent réalistes.

La combinaison de la modélisation et des mesures constitue ce que l'on connaît sous le terme de **modélisation sismique hybride**. La méthodologie consiste à simuler des milliers de tirs sur ordinateur, à partir de signaux caractéristiques de charges unitaires, enregistrées dans les conditions géologiques et d'environnement.

## **Bibliographie :**

**Allard.P, (1988).** Optimisation des contrôles de vibrations, critères avec spectres de surveillance. Mines et carrières, Mai-Juin 1988.

**Bernasconi.P.** Tirs de mines et séismes. Fiches techniques .Mines et carrières.

**Bernasconi.P, (2001).** Approche probabiliste d'une loi empirique d'amortissement de la vitesse particulaire crête générée par des tirs de charges unitaires. Mines et carrières, le dossier.

**Bernasconi.P, Bequet.B, Sifre.Y.** Exemple de l'ingénierie du minage. Colloque international sur les terrassements en Europe, YSO consultants.

**Bernasconi.P , Blanchier.A ,Sifre.Y,(2006).** L'ingénierie des tirs de mines : optimisation des tirs par l'utilisation de la modélisation sismique et l'amorçage électronique.

**Bernasconi.P, Sifre.Y, (1996).** La modélisation sismique hybride : Théorie et pratique, YSO consultants.

**Bernard.T:** New DNA blast software.

**Blanchier.A, Thiard,R ,Weber.P,(1988).** Théorie du travail à l'explosif. Mines et carrières, Mai-Juin 1988.

**Bullen.K.E, Bolt.B.A,(1985).** An introduction to the theory of seismology. Cambridge university press.

**Chapot.P, (1988).** Vibrations: Critères de dommages et prédiction. Mines et carrières, Mai-Juin 1988.

**Comeau.W, (1986).** L'environnement et l'utilisation des explosifs. Annales des mines, Janv\_fev 1986.

**Dangreux.J, Gagniere,C,(1981).** Quelques aspects des méthodes d'exploitation des carrières. Annales des mines, Mars-Avril 1981.

**Gharbi.K,(2007).** L'adaptation du plan de tir à la blocométrie : un enjeu capital pour un haut rendement minier, Mémoire de fin d'études,Ecole nationale polytechnique.

**International consulting bureau, (2001).** Etude d'impact sur l'environnement de la carrière d'agrégats de Keddara (Boumerdes).

**Nicolas.C, (2003).** Sismologie-S1.

**Rapport de l'ENOF, (2008).**Inédit Keddara.

**Rapport d'exploitation de l'ENOF, (2008).** Inédit Keddara.

**Sherrif.R.E, Geldart.L.P, (1981).** Traité de prospection sismique, Tome 1 .ERG édition.

**Sánchez.L.E, (1995).** Control de vibraciones .Aspectos geológicos de protección ambiental, Volumen 1.UNESCO.

**Telford.W.M, Geldart.L.P, Sherrif.R.E, (1976).** Prospection sismique, Tome 1 .ERG édition.

**Pascual de Blas .J.A, (2002).** Problemática de las vibraciones en las voladuras: Medición, control y regulación legal. Unión Española de los explosivos.