



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Mines

Option : Exploitation Minière

Présenté par

LARBI Abdelghani

Thème

**L'influence des tirs à l'explosif sur la stabilité des
terrains miniers
-cas de la mine de Boukhadra (Tébessa) site BK II-**

Soutenu le 27 / 06 /2016 devant le jury composé de:

Président : Mr. SAADOUN.A

Promotrice : Mme. KAMLIO

Examineur : Mr. MAZARI.M

Année Universitaire: 2015-2016

Remerciements

On rend grâce à ALLAH le tout puissant pour avoir donné la force, la santé et la patience pour arriver là où je suis.

Le grand merci à ma promotrice M^{me} KAMLI pour ses conseils et son aide et qui a mis à ma disposition tous le nécessaires pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier les membres jury qui ont bien voulu accepté d'examiner ce mémoire et à cet égard, je leur présente mon profond respect, et ma grande gratitude.

Je rends grâce à tous les enseignants du département des mines et géologie qui je suivis durant mon cursus, à ce que ce travail penne forme.

J'exprime aussi mes remerciements à tous les personnels de la mine de Boukhadra.

Je tiens à remercier : ma famille pour leur pensé et leur soutien, et tous les enseignants pour l'aide et leurs patience tout le temps de travail et leurs orientation afin d'accéder à l'objectif tracé.

Dédicace

Je dédier ce modeste de travail à :

Ma très chère Mère TASSADIT et à mon Père AMAR

A mes frères : Farid, Marzouk, Karim et Mohamed.

A mes sœurs : Fatiha, Ghnima et Louiza

A tout la famille LARBI

A tous mes amis

A mes collègues et leurs familles

A tous les professeurs qui m'aide durant les années d'étude

*A tous ceux qui de loin ou de près n'ont pas cessé m'apporter
leur soutien pendant mes années d'étude*

ABDELGHANI

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier et analyser l'effet des tirs sur la stabilité de la mine de Boukhadra (BK II) et sur la région même ; ainsi que sur les habitants.

Les tirs de production réalisés d'une manière répétitive peuvent influencer sur la stabilité de terrain : d'une part en raison des forces des pressions de choc déstabilisatrice qu'ils peuvent engendrer, et d'autre part parce qu'ils dégradent à long terme les propriétés mécaniques de massif, ceux-ci peuvent contribuer à diminuer sa résistance au cisaillement.

Les problèmes liés à l'utilisation des explosifs ont été observés concernant les effets arrière des tirs de production, ces effets arrière affectant souvent de manière importante une partie du massif située en arrière de tir réalisé, dans ce cas les fronts de taille deviennent irréguliers et fracturés, ce qui peut même modifier tous les plans de tirs à réaliser.

Il a été utilisé un logiciel de calcul bien adapté aux problèmes d'effet de tir, pour comprendre les vibrations sismiques et leurs caractéristiques (vitesse transversale, vitesse radiale, vitesse particulière, vitesse verticale, fréquence) ; et les vibrations acoustiques.

Les résultats obtenus du coefficient de site indiquent que les mesures de vibrations effectuées en mine de fer de Boukhadra wilaya de Tébessa dans le cadre de la réglementation sur les nuisances vibratoires et acoustiques des tirs ont permis de :

- ❖ Les niveaux de vibrations sismiques et acoustiques générées par le tir dans l'environnement du site sont largement en dessous des seuils réglementaires 10mm/s.
- ❖ Confirmer que les valeurs enregistrées sont loin des limites de dégâts dont la valeur de référence est de 10mm/s pour les vibrations sismiques et 125Db pour les vibrations acoustiques.

Les résultats de déplacement et d'accélération des ondes sismiques obtenus par logiciel Delta Seis 4.4 sont largement en dessous des seuils de la réglementation (320µm).

Mots clés

Fragmentation, explosion, propagation, Confinement, vibration sismique, vibration acoustiques, effet sismique, effet acoustique, plan de tir.

Summary

The objective of this work is to study and analyze the effect of the shootings on the stability of the mine of Boukhadra (BK II) and on the area same; like on the inhabitants.

The shootings of production carried out in a repetitive way can influence on the stability of terrain: on the one hand because of the forces of the pressures of shock dèstabilatrice which they can generate, and on the other hand because they degrade in the long run the mechanical properties of solid mass, those can contribute to decrease its shear strength.

The problems involved in the use of the explosives were observed relate to the back effects of the shootings of production, these back effects often affecting in a significant way part of the solid mass locates shooting carried out behind, in this case the coal faces become irregular and fractured, which can even modify all the shot-firing patterns to be carried out.

It was used a computation software adapted well to the problems of effect of shooting, to include/understand the seismic vibrations and at the time characteristics (transverse speed, radial speed, particulate speed, vertical speed, frequency); and acoustic vibrations.

Results obtained of the coefficient safety to indicate that measurements of vibrations carried out in iron mine of Boukhadra wilaya of Tébessa within the framework of the regulation on the vibratory and acoustic harmful effects of the shootings allowed of:

- ❖ Levels of the seismic and acoustic vibrations generated by the shooting in the environment of the site are largely below the lawful thresholds 10mm/s.
- ❖ Confirmer that the recorded values are far from the limits from damage whose value of reference is of 10mm/s for the seismic vibrations and 125Db for the vibrations acoustic.

The results of displacement and acceleration of the seismic waves obtained by software Delta Seis 4.4 are largely below the thresholds of the regulation (320 μ m).

Word Key

Fragmentation, explosion, propagation, Containment, vibration seismic, vibration acoustics, effect seismic, effect acoustic, shot-firing pattern.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste d'abréviations

Introduction générale..... 1

Chapitre I : généralité sur l'effet du tir sur la stabilité de terrain

Introduction 3

I.1.Mécanisme de tir à l'explosif..... 3

 I.1.1Principe de tir à l'explosif 3

 I.1.2. L'abattage à l'explosif..... 5

 I.1.2.1. L'abattage de minerai et la roche encaissante 6

I.2.Les explosifs 7

 I.2.1.Définition..... 7

 I.2.2.Déflagration et détonation 8

 I.2.2.1.Déflagration 8

 I.2.2.2Détonation..... 9

I.3.Compositions et types d'explosifs 10

 I.3.1.Constituant des explosifs..... 10

 I.3.2.Types d'explosif..... 11

 I.3.2.1.Les dynamites..... 11

 I.3.2.2.Les explosifs nitrates 11

 I.3.2.3.Nitrate fuels 11

 I.3.2.4.Explosif bouillis..... 11

 I.3.2.5.Les émulsions 12

 I.3.2.6.Nitrates fuels alourdis..... 12

I.4.Caractéristiques pratique des explosifs 12

 I.4.1.Densité..... 13

 I.4.2.Diamètre critique de détonation 13

 I.4.3.Sensibilité d'amorçage 14

 I.4.4.Sensibilité à l'onde d'explosive 14

 I.4.5.Résistance aux sollicitations climatiques 15

 I.4.6. Performances des explosifs 15

I.4.6.1. Vitesse de détonation.....	15
I.4.6.2. énergie des explosifs.....	16
A. Coefficient d'utilisation pratique(C.U.P).....	16
B. Travail au mortier balistique (T.M.B)	17
C. Mesure de l'énergie de détonation sous l'eau	18
D. Indice d'énergie	19
E. La brisance	20
I.5. Vibration des ondes sismiques et acoustiques	21
I.5.1. Types d'ondes.....	21
I.5.1.1. Ondes mécaniques	21
I.5.1.2. Ondes électromagnétiques	21
I.5.2. Propagation des ondes sismiques	21
I.5.2.1. Types d'ondes sismiques	22
1. onde de volume	22
2. onde de surface	24
I.5.3. Propagation des ondes acoustiques	25
I.5.3.1. L'acoustique	25
I.5.3.2. Vibration acoustique	25
I.5.3.3. Définition.....	25
I.5.4. Caractéristiques des ondes.....	27
I.5.4.1. Le déplacement.....	27
I.5.4.2. Vitesse particulière	28
I.5.4.3. Vitesse radiale	29
I.5.4.4. Vitesse transversale	29
I.5.4.5. Vitesse longitudinale	29
I.5.4.6. Fréquence	29
I.6. Effets des tirs dans les mines et carrières.....	29
I.6.1. L'effet sismique.....	29
I.6.1.1. Zone de broyage	30
I.6.1.2. Zone de fissuration radiale	32
I.6.1.3. Zone sismique.....	32
I.6.1.4. Effet d'onde réfléchie	32
I.6.1.5. Effet de la fragmentation finale	33
I.6.1.6. Effet de la présence d'une face libre	33

I.6.1.7.Effet des gaz libérées	33
I.6.1.8.Effet arrière de tir	34
I.6.2.Effet acoustique	35
I.6.2.1.Effet d’ondes sonores	36
I.6.2.2.Bruit	37
I.6.2.3.Projections excessives	37
Conclusion.....	38

Chapitre II : description de la mine de Boukhadra

Introduction	39
II.1.Historique de la mine.....	39
II.2.La géologie de la mine.....	41
II.2.1.Situation géographique	41
II.2.2.Stratigraphie	42
II.2.2.1.Trias.....	42
II.2.2.2.Crétacé.....	42
II.2.2.3.Le tertiaire	42
II.2.2.4.Le quaternaire.....	42
II.3.Tectnique	43
II.4.Géomorphligie	43
II.5.Hydrogéologie	43
II.6.La minéralisation	44
II.6.1.Gite principale.....	44
II.6.2.Gite sud	44
II.7.Description de la mine de Boukhadra.....	45
II.7.1.Nature du minerai exploité.....	45
II.7.2.L’exploitation du minerai.....	46
II.7.2.1.L’exploitation à ciel ouvert	46
A. Ouverture de champ de carrière.....	46
A.1. choix de mode d’ouverture	46
A.2. creusement de la demi-tranchée d’accès.....	47
A.3. Paramètres de la méthode d’exploitation	47
A.4. travaux de forage et de tir	47
B. Paramètres technique de la méthode d’exploitation à ciel ouvert.....	48

C. Plan de tir à ciel ouvert.....	49
II.7.2.2.Exploitation souterraine	51
1. Mode d'ouverture	51
A. Situation de la galerie principale	54
B. Importance de la galerie principale.....	54
C. Description de la galerie principale	54
D. Paramètres de plan de tir en souterraine	57
Conclusion.....	58

Chapitre III : Analyse des vibrations sismiques et acoustiques

Introduction	59
III.1.Reglementations concernant les vibrations sismiques et acoustiques.....	59
III.1.1.Reglementations concernant les vibrations	59
III.1.2.Reglementations concernant la surpression aérienne	60
III.1.3.Loi de chapot	61
III.1.3.1.Formule de la loi de chapot.....	61
III.1.4.Evaluation d'impact des tirs de mines	62
III.2.Mesure des vibrations sismiques et acoustiques	62
III.2.1.Methodologie pour étude des vibrations sismiques et acoustiques	62
III.2.1.1.Définition des structures à étudier	62
III.2.1.2.Positionnement des capteurs.....	63
III.2.1.3.L'implantation des forages et des tirs	63
III.2.1.4.Définition des charges d'explosifs.....	64
A. L'abattage	64
B. Tir de mine.....	64
C. Tir souterraine.....	64
III.2.1.5.Enregistrement et analyse des vibrations sismiques et acoustiques.....	64
III.2.1.6.Estimation prévisionnel des charges	64
III.2.1.7.Controle pendant les travaux	65
III.2.2.Appareillage de mesure	65
III.3.Présentation des résultats des tirs	67
III.3.1.Structure étudié.....	67
III.3.2.Positionnement des capteurs.....	67
III.3.3.Plan de tir en souterraine et à ciel ouvert.....	68

III.3.4.Enregistrement et analyse des vibrations sismiques et acoustiques	70
III.3.4.1.L'interprétation des résultats	71
III.3.5.Estimation prévisionnel des charges.....	72
III.3.5.1.Calcul coefficient de site K.....	72
III.3.6. Contrôle pendant les travaux	74
Conclusion.....	74

Chapitre IV : Simulation avec logiciel analyse sismique Delta seis 4.4

Introduction	75
IV.1. Simulation des tirs.....	75
IV.2. Matériels de mesure	75
IV.2.1. Delta Seis1 (enregistreur sismique et acoustique)	75
IV.2.2. Mode opératoire.....	76
IV.4. Résultats de simulation	77
Conclusion.....	79
Conclusion générale	80

Références bibliographiques

Annexes

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : propagation d'onde de détonation	8
Figure I.2 : propagation d'onde de choc	9
Figure I.3 : expansion de pression de gaz	10
Figure I.4 : diamètre critique de détonation	14
Figure I.5 : schéma d'un bloc de plomb.....	17
Figure I.6 : onde primaire P	23
Figure I.7 : onde secondaire S	23
Figure I.8 : onde de love.....	24
Figure I.9 : onde de Rayleigh R	25
Figure I.10 : Courbes de mesure de bruit de choc et bruit d'explosion	27
Figure I.11 : développement de la fissuration et de la fracturation.....	31
Figure I.12 : effet arrière constaté pour les essais mono-trous	34
Figure I.13 : effet arrière constaté pour les essais bi-trous et multi-trous.....	35
Figure I.14 : nuisances générale de tir à l'explosif	38

Chapitre II

Figure II.1. Plan topographique de la mine de Boukhadra.....	40
Figure II.2. Coupe transversale dans l'anticlinale du Boukhadra	40
Figure II.3. Situation géographique de la ville de Boukhadra	41
Figure II.4. Schéma de plan de tir à ciel ouvert	50
Figure II.5. Coupe schématique du mode d'ouverture en souterraine	52
Figure II.6. Méthode d'exploitation sous niveau abattu.....	53
Figure II.7. Présentation le tracer de l'ouvrage (niveau 1105m)	55

Figure II.8. Schéma d'un plan de tir en éventail 58

Chapitre III

Figure III.1. Vibration de tir norme française 60

Figure III.2. Appareillage de mesure DELTA SEIS 1 67

Figure III.3. Fiche technique d'un plan de tir à ciel ouvert 68

Figure III.4. Fiche technique d'un plan de tir en souterraine..... 69

Figure III.5. Fiche technique des résultats de tir..... 70

Chapitre IV

Figure IV.1. Logiciel d'analyse sismique Delta Seis 4.4 77

Liste des tableaux

Tableau I.1. Paramètres de plan de tir.....	6
Tableau I.2. Caractéristiques des explosifs fabriqués en Algérie (ONEX)	20
Tableau I.3. Effets de vibrations sismiques en fonction de la vitesse particulière	30
Tableau I.4. Effets de vibrations acoustiques en fonction de la vitesse particulière.....	36
Tableau II.1. Eléments chimiques constitutifs de la minéralisation du gite	45
Tableau II.2. Profondeurs moyennes et angles de pendages du gite souterraine.....	45
Tableau II.3. Paramètres techniques de la méthode d'exploitation à ciel ouvert (minerai) ..	48
Tableau II.4. Paramètres techniques de la méthode d'exploitation à ciel ouvert (stérile).....	49
Tableau II.5. Paramètres techniques de la méthode d'exploitation en souterraine (SNA)....	53
Tableau II.6. Dimension de la galerie principale (niveau 1105m)	55
Tableau II.7. Failles et fissures existantes dans la galerie principale (1105m)	56
Tableau II.8. Paramètres de plan de tir pour le minerai.....	57
Tableau II.9. Paramètres de plan de tir pour le stérile	57
Tableau III.1. Caractéristiques techniques du DELTA SEIS 1(tri directionnel).....	66
Tableau III.2. Paramètres techniques de plan de tir à ciel ouvert.....	68
Tableau III.3. Paramètres techniques de plan de tir en souterraine	69
Tableau III.4. Les résultats des tirs.....	71
Tableau III.5. Calcul la vitesse particulière et le coefficient du site K.....	73
Tableau IV.1. Résultats de déplacement et d'accélération obtenue par Delta Seis 4.4	78

Table des notations

Notation	Unité	signification
V	m/s	Vitesse de déplacement
T ₀	°c	Température
P ₀	Mpa	Pression
V ₀	M ³	Volume massique
Z ₁	/	Zone 1
Z ₂	/	Zone 2
Z ₃	/	Zone 3
C.S.E	cm	Coefficient de self excitation
C.U.P	%	Coefficient d'utilisation pratique
T.M.B	%	Travail au mortier balistique
α	°	Angle obtenu avec 100g d'explosif
α ₀	°	Angle formé par effet 100g d'explosif
E _c	kJ	Energie de choc
R	m	Distance charge-capteur
P _w	g/cm ³	Masse volumique de l'eau
C _s	m/s	Vitesse de son dans l'eau
K _m	/	Coefficient lié à la chaine de la mesure
μ	/	Coefficient d'absorption de l'énergie de choc par l'eau
K _f	/	Coefficient lié à la forme de la charge
e _g	kJ	Energie de la bulle de gaz
t	s	La durée de la première oscillation de la bulle de gaz
C	/	Coefficient de correction de dimension
p _h	/	Pression hydrostatique totale
Q ₀	Kcal/kg	La chaleur
V ₀	l/kg	Volume de gaz
P	/	Onde primaire
S	/	Onde secondaire
L	/	Onde de love
R	/	Onde de Rayleigh
D	/	Elongation maximale

Table des notations

W	°	Pulsation du mouvement
F	Hz	Fréquence
T	ms	Période de vibration
a	m/s ²	L'accélération
Rc	Mpa	Résistance à la compression
C.I.E.U	/	Centre Interdisciplinaire d'Etude Urbaine
Cu	/	Cuivre
p-f	/	Phosphore-fluor
Mn	/	Manganèse
Ca O	/	Oxyde de calcium
Mg O	/	Oxyde de magnésium
S	/	Soufre
A ₂ O ₃	/	Oxyde d'aluminium
P	/	Phosphore
Si O ₂	/	Oxyde de silicium
H ₂ O	/	Humidité
Pb	/	Plomb
Zn	/	Zinc
Fe O ₃	/	Hématite rouge
Hg	m	Hauteur de gradin
Ltr	m	Longueur de trou
α _{gr}	°	Inclinaison de gradin
α _{tr}	°	Inclinaison de trou
Lb	m	Longueur de bourrage
Dtr	mm	Diamètre de trou
Lf	m	Longueur de sous forage
w	m	Ligne de moindre résistance
Qu	Kg	Charge unitaire d'explosif
a	m	Distance entre les trous
b	m	Distance entre les rangés
D.E.I	/	Détonateur électrique instantanée
Lex	m	L'excès de forage
Lch	m	Longueur de la charge d'explosif

Table des notations

C	m	Distance de sécurité
L_{bl}	m	Longueur de bloc
lbl	m	Largeur de bloc
He	m	Hauteur d'étage
Hfb	m	Hauteur de fond de bloc
Hse	m	Hauteur de sous étage
Lcm	m	La longueur de corps minéralisés
α	°	Angle de pendage
L_p	m	Longueur de pilier
L_{mch}	m	Longueur moyenne de la chambre
l_{pp}	m	La largeur de pilier provisoire
Ecor	m	Epaisseur de la couronne
Dr	m	Distance entre les recoupes
L_{trp}	m	Longueur des trous profonds
S_g	m^2	Section de la galerie
D_{trp}	mm	Diamètre des trous profonds
Q	t/m^3	Rendement du minerai par trou
Q_p	g/t	Consommation spécifique d'explosif
V_{pon}	mm/s	Vitesse pondérée
V_{mes}	mm/s	Vitesse mesuré
F	Hz	Fréquence
V_p	mm/S	Vitesse particulière
D	m	Distance tir-capteur
K	/	Coefficient de site
V_v	mm/s	Vitesse verticale
V_r	mm/s	Vitesse radiale
V_t	mm/s	Vitesse transversale
Vac	dB	Vitesse acoustique

Introduction générale

« Servez la lumière et la lumière vous servira »

Introduction générale

L'exploitation des mines et des carrières sont des sources potentielles des richesses dans le développement des pays, par contre elle a des effets très visibles sur la stabilité de la mine et sur la région même.

La fragmentation joue un rôle important dans une grande variété de processus industriels dans laquelle on désire causer la fragmentation de la manière la plus efficace et la plus contrôlée.

Ainsi, l'élaboration de méthodes efficaces et sûres pour l'abattage des roches à l'explosif est d'intérêt considérable pour l'industrie minière. Les opérations d'abattage réussies peuvent mener à réaliser la distribution la plus appropriée des fragments de roches avec un coût de production minimum. Néanmoins, jusqu'à aujourd'hui, la fragmentation à l'explosif avait été en dehors de la province des méthodes théoriques générales et a été étudié principalement avec l'utilisation de méthodes basées sur une variété d'hypothèses **non contrôlables** et parfois mutuellement contradictoires.

Le fonctionnement d'un produit explosif est une réaction chimique déclenchée par une « mise à feu », tributaire des conditions dans laquelle elle se produit. Une part importante du travail de mise en œuvre consiste à adapter les produits (et leurs limites de fonctionnement) aux prévisions des conditions de l'utilisation : choix de type d'explosif, détermination d'une quantité suffisante d'énergie explosive, définition de la nature et de l'état des matériaux.

L'utilisation de l'énergie explosive pour l'abattage des roches en mines ou en carrières est une technique très largement employée, on sait, tout fois, que seule une partie libérée par la charge explosif est utilisée effectivement dans le processus de fragmentation ; le reste représente diverses nuisances ressenties tant que sur le site qu'en dehors de ses limites.

L'abattage à l'explosif, doit permettre d'atteindre les objectifs de productions tout en garantissant la stabilité de notre mine, les vibrations ainsi que le bruit généré par les tirs constituent un point particulièrement sensible pour les populations avoisinantes.

Le problème de tir sur la stabilité dans les mines souterraines ou à ciel ouvert et la stabilité des terrains en général constitue l'une des préoccupations majeures des géotechniciens et des gestionnaires d'ouvrages d'art et miniers.

Dans les terrains miniers, ce problème est d'une importance capitale pour :

- assurer la continuité de la production.
- sauvegarder les vies humaines et les engins de production.

La présente étude se propose d'étudier la stabilité de la mine de fer de boukhadra (Wilaya de Tébessa).

Les différents chapitres de ce mémoire sont organisés comme suit :

- ❖ Le premier chapitre nous permettra d'aborder le principe de l'abattage des roches dues aux tirs à l'explosif, ainsi que les enregistrements des vibrations sismiques et acoustiques lors de tir à l'explosif.
- ❖ Le deuxième chapitre est porté sur la description du contexte géologique et des conditions de la mine de fer de Boukhadra (BK II en souterraine et à ciel ouvert), et on a élaboré les plans de tirs en souterraine et à ciel ouvert.
- ❖ Le troisième chapitre traite l'étude d'effets de tir sur la stabilité de la mine de fer de Boukhadra en se servant des données disponibles nécessaire à la réalisation de cette étude pour vérifier la stabilité de terrain étudier.
- ❖ Le quatrième chapitre on a fait la simulation pour cette étude avec le logiciel d'analyse sismique Delta Seis 4.4 et la détermination de la zone dangereuse.

*Chapitre I : Généralité sur le
phénomène du tir à l'explosif et son
effet par rapport à la stabilité des
terrains*

« Chercher à jamais commettre une erreur, c'est ça la grande erreur, car il n'y a point de progrès sans erreur »

Introduction

L'activité minière est un élément essentiel dans l'économie de plusieurs pays, elle porte sur l'extraction des substances minérales de l'écorce terrestre soit en ciel ouvert soit en souterraine, et leurs traitement afin de les utilisées dans divers domaines.

Le principal objectif des tirs dans l'activité minière est d'avoir une fragmentation optimale de la roche. Le degré de fragmentation de la roche joue un rôle très important dans le but de contrôler et de minimiser le coût global de production et le volume de la roche à abattre tout en augmentant la sélectivité minérale, (le choix de types d'explosif utilise, la quantité d'explosif, et la planification de tir).

Le processus de tir à l'explosif comporte plusieurs risques principalement par rapport à la stabilité de terrain, la sécurité de la mine ainsi que le site environnant.

I.1. Mécanisme de tir à l'explosif

I.1.1.Principe de tir à l'explosif (fragmentation des roches)

Point central du processus minier de tir à l'explosif n'est un procédé technique incontrôlable pour détacher et réduire les roches d'un massif en place lorsque leur résistance est trop élevée pour permettre une excavation mécanique (rentable).

Les activités de tir dans une exploitation minière sont à la fois un centre de coût et un levier de performance pour l'ensemble du cycle extractif, L'optimisation d'un tir de production minière se résume à la recherche des trois objectifs principaux suivants:

- Quantité maximale de roche abattue .
- taille des fragments obtenus.
- impacts environnementaux minimaux.

Les impératifs de sécurité sont :

- ❖ les impératifs internes : toutes conditions qui doivent permettre le travail préparatoire détira, ainsi que les opérations de reprise, dans des conditions totales de sécurité : bonne rupture du parement, pas de surplomb, pas d'effet arrière, bon étalement du tas abattu;
- ❖ les impératifs externes : absence de projection, ébranlement minimum, bruit maîtrisé, sont autant des facteurs appréciés par l'environnement et qui conditionnent bien souvent l'autorisation d'exploiter.

L'explosion d'une charge est une réaction de décomposition extrêmement rapide et puissante qui résulte de la production d'un important volume de gaz au cours d'une durée très réduite. Selon la conception largement acceptée dans la littérature, les gaz de réaction produits se détendent dans le trou de mine et forcent sur la paroi jusqu'à ce qu'un équilibre quasi-statique entre pression de gaz et niveau de contrainte accepté par la roche environnante soit atteint.

Pendant cette phase de montée en pression, la puissance mécanique fournie au matériau par les gaz est plus importante que sa capacité de dissipation acoustique, ce qui a pour l'effet la création d'une onde de choc. Suite à cette phase, l'équilibre quasi-statique à la paroi est atteint et les gaz d'explosion exercent une pression dans le trou et le réseau de fissures créés par l'onde de choc, ou existant précédemment dans le massif.

La rapidité de réaction de l'explosif (vitesse de détonation), ainsi que la nature de la décomposition chimique, influencent donc les deux phases précédemment citées.

Lors du tir à l'explosif, une quantité importante d'énergie est libérée dans les terrains pendant une très courte durée, cette énergie est compte tenu de la rapidité des phénomènes, transmise à un milieu rocheux non homogène, anisotrope, et non continu.

Par suite l'impossibilité à maîtriser complètement les phénomènes, on reçoit qu'une partie non négligeable de l'énergie explosive mis en jeu dans un chantier soit dispersée dans des phénomènes inutiles comme la déperdition de chaleur dans la roche, les vibrations, le bruit, les projections de bloc, et les glissements de terrains. Donc les nuisances dues aux tirs à l'explosif sont inévitables.

Sources des plaintes les plus fréquentes, les vibrations du sol peuvent être ressenties jusqu'à plusieurs kilomètres, elles constituent le principal risque de dommage aux constructions, elles participent à un sentiment de gêne, d'insécurité et de l'instabilité de terrain et de la région même.

Lors de tirs à l'explosif, les vibrations peuvent être définies comme étant un mouvement oscillatoire d'une particule ou d'un corps (massif rocheux) à partir de sa position de référence, la surface qui constitue la limite entre les particules de matrice au repos et les particules en mouvement constituent le front d'ondes.

A partir de la source, cette surface se déplace à une certaine vitesse : il s'agit de la vitesse de propagation de front d'ondes (célérité d'onde), cette vitesse est comprise entre 1000m/s et 6000m/s.

Les fonctions qui caractérisant le phénomène de vibration lors de tirs à l'explosif sont :

- Le déplacement : est la distance parcourue par un élément de matière depuis sa position neutre.
- La vitesse : est la rapidité à laquelle se déplace l'élément de matière.
- L'accélération : variation de vitesse avec le temps.

Le choix d'explosif influence sur la fragmentation des roches ainsi que sur la stabilité de terrain.

I.1.2. L'abattage à l'explosif

La méthode d'abattage à l'explosif est en général utilisée dans les carrières et mines de roches massives et dures. En effet, dans le cas de roches dures, les procédés d'extraction continus ne sont pas possibles, l'abattage à l'explosif est alors une alternative qui présente l'avantage de fragmenter des volumes de roche importants, et ce avec des moyens limités en termes d'engins (foreuse et engins de chantiers pour la reprise) et une mise en œuvre assez restreinte. De plus, l'étendue actuelle des possibilités en termes d'explosifs et les compétences qui existent aujourd'hui dans le domaine ont contribué à la banalisation de ce procédé.

A partir d'une succession d'opérations a priori simples, implantation et foration de trous, chargement et amorçage des explosifs, l'abattage à l'explosif va avoir différents objectifs :

- Assurer la sécurité, c'est à dire pas de projections et pas de tirs bloqués ou pans non abattus.
- Abattre un grand volume de roche avec :
 - une granulométrie adaptée aux installations, avec une proportion de blocs et de fines la plus réduite possible.
 - un épanchement du tas et un foisonnement adapté aux engins de reprise du tas.

Assurer une bonne géométrie des fronts sur le chantier avec :

- une bonne sortie du pied.
- un bon alignement des fronts et de la plateforme.
- des effets arrière réduits.

L'abattage des roches et des minerais (travaux miniers) est effectué presque exclusivement à l'aide d'explosif. Il faut pour cela, dans la plupart des cas exécuter un ou plusieurs trous de dimensions convenables dans la masse rocheuse ou dans le filon minier, où l'on place l'explosif que l'on fera exploser. Ces trous sont pratiqués au moyen de perforatrices de roche, généralement alimentées par l'air comprimé (perforatrices ou marteaux perforateurs manuels, crawler et foreuses).

I.1.2.1. L'abattage de minerai et la roche encaissante

Le principe d'abattage à l'explosif est de fragmenter des volumes très importants avec une granulométrie adaptée ; des effets de tir réduits ; réduction des dimensions des blocs hors gabarit.

L'abattage de minerai ou stériles est d'une façon différente selon les paramètres de plan de tir (tableau ci-dessous)

Tableau I.1. Paramètres de plan de tir.

contrôlables	incontrôlable
<p>Paramètres géométriques :</p> <ul style="list-style-type: none"> -diamètre du trou. -longueur de foration. -sur profondeur de foration. -inclinaison de trou. -longueur de bourrage. -matériels de bourrage. -.hauteur de gradin. -inclinaison de gradin. -rapport espacement/banquette. 	<p>Paramètres du massif en place :</p> <ul style="list-style-type: none"> -géologie. -résistances et propriétés de matériaux. -discontinuité préexistantes dans le massif.

<ul style="list-style-type: none"> -direction de tir. -nombres de faces libres. -tailles de vollée. 	
<p>Paramètres liés à l'énergie explosive :</p> <ul style="list-style-type: none"> -type d'explosif utilisé. -énergie (choc, gaz). -Configuration de chargement. -Méthode de chargement. -Type d'amorçage. -Séquence d'initiation. 	<p>Paramètres hydrogéologiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> -La présence des eaux.

I.2.les explosifs

I.2.1 définition

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 pouvant 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, produisant un travail mécanique et engendrant dans le milieu environnant des ondes de choc (d'explosif), ce phénomène se produit lorsqu'un explosif subit une détonation.

La détonation se propage dans l'explosif avec une vitesse supérieure à celle du son. Initialement l'explosif se trouve dans les conditions de température élevé. Pression et onde de détonation volume massique T_0 , P_0 , V_0 . A la fin de réaction, les produits de réaction

sont aux conditions T1, V1. Dans la zone Z3 (figure I.1). Les gaz de décomposition se détendent et participent aux effets mécaniques de l'explosion.

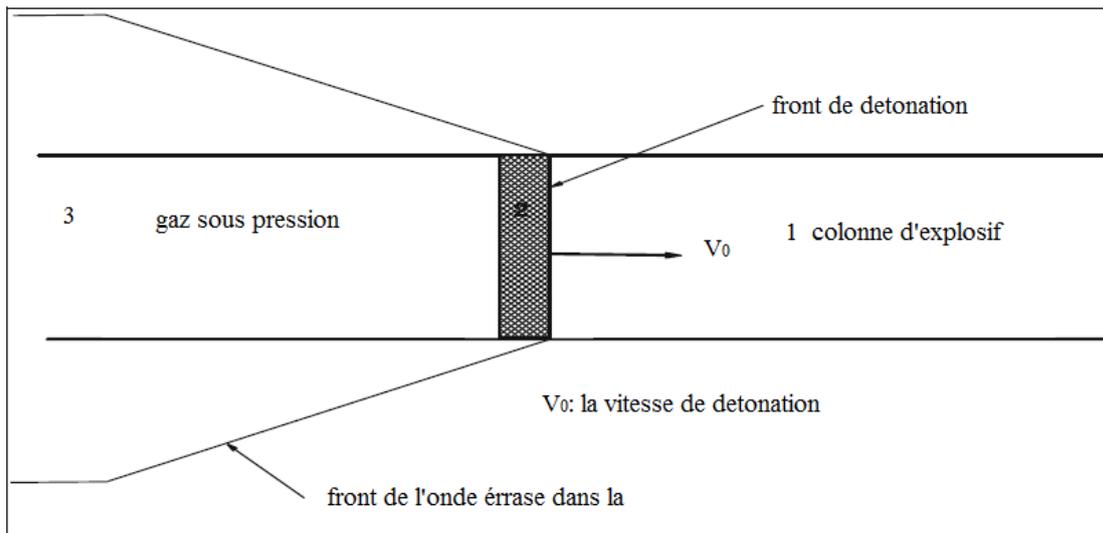


Figure I.1. propagation d'onde de détonation.[3]

Zone 1: l'explosif avant réaction.

Zone 2 : zone de réaction chimique.

Zone 3 : zone des produits de réaction.

I.2.2 déflagration et détonation

I.2.2.1 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.

Les vitesses de propagation de la déflagration s'établissent de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres par seconde. Les vitesses dépendent de nombreux facteurs comme la nature de la substance, le mode d'amorçage, le confinement, les conditions ambiantes, etc.

Les substances explosives solides dont le régime normal de décomposition est la déflagration sont appelées des poudres.

Elles sont très utilisées sous forme de propergol liquide pour la propulsion des fusées ou de poudre dans les armes à feu à usage militaire ou civil. Le seul explosif industriel autorisé pour le traitement des roches est la poudre noire comprimée. [1]

I.2.2.2 Détonation

La détonation est une réaction chimique extrêmement rapide, exothermique, cette réaction s'accompagne d'un dégagement en un temps très court d'un grand volume de gaz chaud couplé à une onde de choc, cette onde qui assure la propagation de la réaction chimique par effet point chaud, la vitesse de la détonation comprise entre 2000 et 7000 m/s, La détonation d'un explosif engendre un choc et une poussée utilisés principalement dans les travaux d'abattage et de démolition. [2]

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 fissuration radiale, zone sismique, zone de broyage).
- 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.
- Etalement, sous l'effet de la poussée exercée par les gaz résiduels, des roches fragmentées.

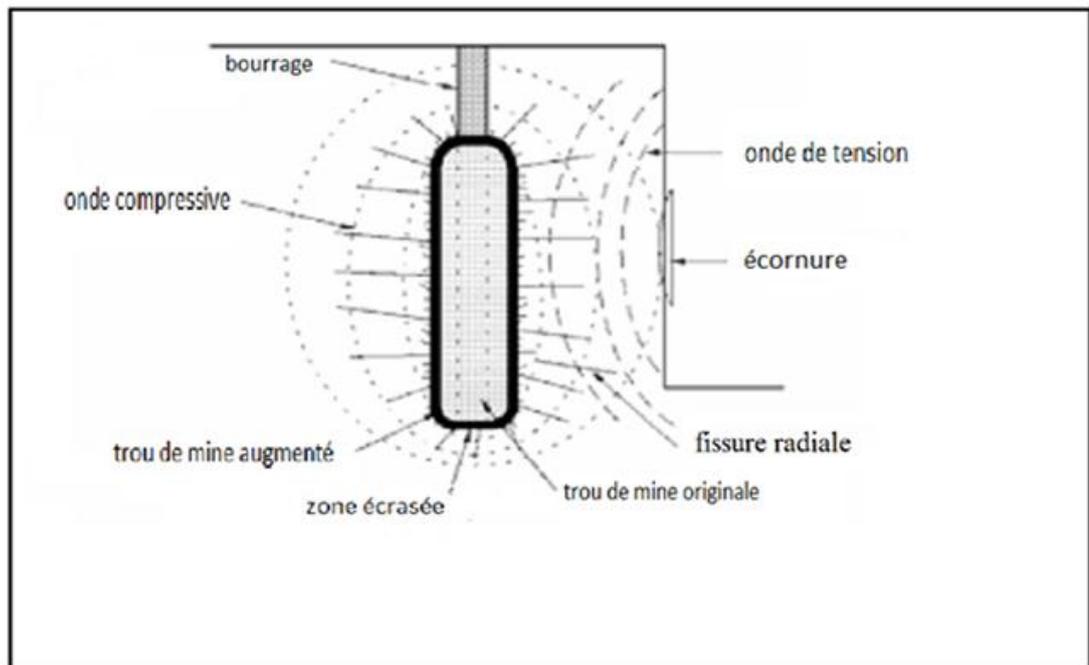


Figure I.2. Propagation d'onde de choc [1]

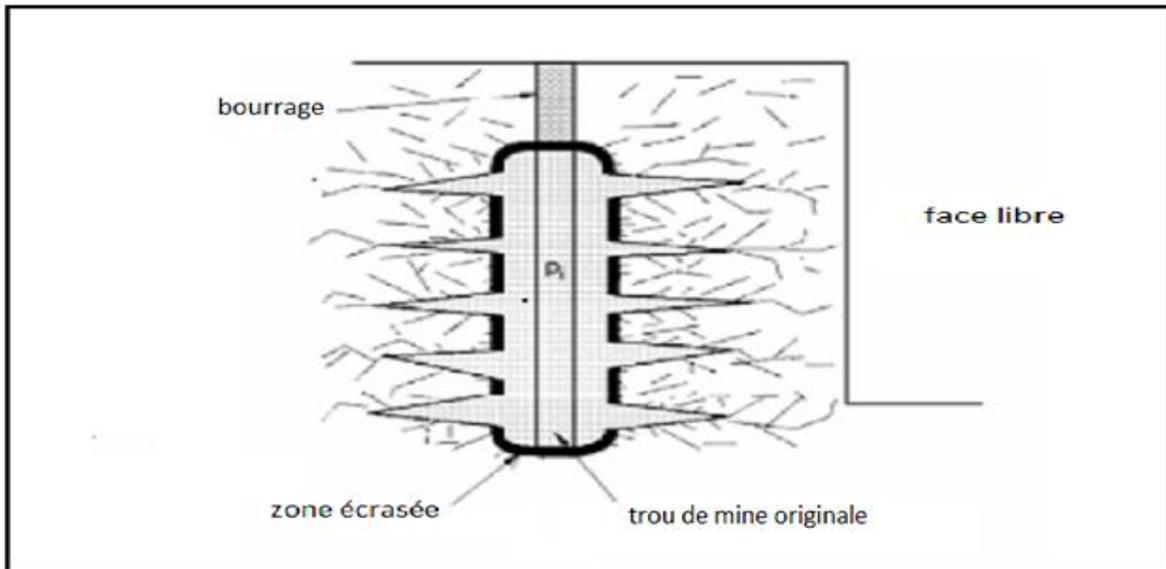


Figure I.3. Expansion de pression de gaz [1]

I.3. Composition et types d'explosifs

I.3.1. Constituants des explosifs

Certains explosifs sont des corps purs, correspondant à une formule chimique bien précise (ex: penthrite, trinitrotoluène), mais en général les explosifs industriels sont des mélanges dont les constituants peuvent être :

- ❖ Des composés chimiques explosifs : obtenus en fixant sur une molécule organique des groupements nitrés contenant de l'oxygène, qui sert à brûler le carbone et l'hydrogène de la molécule : nitroglycérine, dinitroglycol, coton azotique.
- ❖ Des comburants : dont le rôle est d'apporter de l'oxygène pour permettre la combustion complète des composés organiques explosifs présents, et la combustion des ingrédients non explosif : il s'agit, en général, de nitrates de minéraux comme le nitrate d'ammonium ou le nitrate de soude;
- ❖ Des combustibles : tourbe, farine de bois, aluminium, gomme de guar,...

Certains combustibles ont un rôle annexe particulier comme par exemple:

L'absorption de la sensibilité au choc de l'explosif : cas de la tourbe ou de la farine de bois dans les dynamites pulvérulentes.

l'apport d'énergie complémentaire à l'explosif : cas de l'aluminium.

- ❖ Des matières internes et des additifs : pour conférer à l'explosif tel ou telle autre propriété particulière, ou pour faciliter la fabrication, par exemple :
- ❖ le stéarate de calcium, produit hydrofuge améliorant la résistance à l'eau de l'explosif.
- ❖ les allégeants, mouillants, gélifiants utilisés dans les bouillies.
- ❖ l'eau associée à un gélifiant, qui assure une bonne résistance à l'humidité, des bouillies. [2]

I.3.2. Types d'explosifs

Actuellement on utilise six grands types d'explosifs industriels

I.3.2.1. Les dynamite

Les dynamites contiennent de 10 à 90% de nitroglycéroglycol (NGL), mélange de nitroglycérine et de dinitroglycol. C'est la proportion de dinitroglycol qui assure la qualité antigel d'une dynamite (le point de congélation de la nitroglycérine pure est de $-15,4\text{ }^{\circ}\text{C}$), Les autres composants sont des combustibles et des comburants. Selon le taux de NGL, on distingue :

Les dynamites plastiques, contenant plus de 20% en masse de NGL dans une gangue de coton azotique.

Les dynamites pulvérulentes, contenant 10 à 20% de NGL. [3, 4]

I.3.2.2. Les explosifs nitrates

Les explosifs nitrates sont à base de nitrate d'ammonium (80% environ en masse) et d'un explosif pur (TNT, pentrite). [3, 4]

I.3.2.3. Les nitrate fuels

Les nitrates fuels sont constitués de nitrate d'ammonium et d'huiles minérales, en général du fuel domestique, dans une proportion voisine de 5 à 6%. Dans certains cas, les nitrates fuels peuvent contenir une quantité plus ou moins importante de poudre d'aluminium.[3, 4]

I.3.2.4. Les explosifs bouillis

Les explosifs de type bouillie sont constitués par un mélange de combustible (aluminium, huiles minérales, etc), de comburants (nitrates organiques, nitrate d'ammonium) et de matière inerte, pouvant contenir un composé chimique explosif, mais

contenant au moins 5% d'eau. Ces explosifs sont utilisés sous deux formes distinctes : les gels à consistance pâteuse, qui sont généralement encartouchés. [3, 4]

I.3.2.5. Les émulsions

Les émulsions sont des mélanges de nitrate d'ammonium en solution aqueuse sous forme de gouttelettes microscopiques emprisonnées dans une matrice liquide à base d'huile contenant une faible proportion d'émulsifiant.

Les bouillies pompables, dont la consistance liquide permet le chargement en vrac par pompage. [3, 4]

I.3.2.6. Les nitrate fuels alourdis

Les nitrates fuels alourdis sont constitués par du nitrate fuel (25 à 75%) enrobé dans une matrice d'explosif bouillie ou d'émulsion (25 à 75%) dont le rôle est d'améliorer les performances et la résistance à l'eau du nitrate fuel sans en accroître la sensibilité.

Les nitrates fuels alourdis sont surtout utilisés en vrac. Ils se présentent sous la forme :

- ❖ De produits granulaires plus ou moins collants lorsque la proportion de nitrate fuel est supérieure à 40%. Dans ce cas, leur chargement en vrac s'effectue par gravité.
- ❖ De pâtes plus ou moins visqueuses contenant des granulés épars de nitrate fuel lorsque la proportion de celui-ci est inférieure à 40%. Dans ce cas, leur chargement en vrac s'effectue par pompage. [3, 4]

I.4. Caractéristiques pratiques des explosifs et critères de choix

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

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

Les principales caractéristiques des explosifs industriels sont les suivantes :

I.4.1.Densité

Il s'agit de la caractéristique physico-chimique qui a beaucoup d'influence sur leur comportement explosif (vitesse de détonation, énergie volumique...).

La densité commerciale des explosifs encartouchés est obtenue en mesurant et en pesant l'explosif contenu par une cartouche commerciale.

En pratique pour la définition du plan de tir on utilise la densité réelle de chargement des explosifs dans les trous de mine, et qui dépend du comportement mécanique de l'explosif en fonction du mode de chargement. [4]

I.4.2.Diamètre critique de détonation

C'est le plus petit diamètre à partir duquel la détonation d'un explosif est possible à l'air libre.

Bien que l'utilisation dans un trou de mine puisse du fait du **confinement** exercé par les terrains, abaisser la valeur du diamètre critique de détonation de l'explosif, il est évidemment souhaitable que le diamètre du trou soit supérieur au diamètre critique de détonation mesuré à l'air libre.

Le diamètre critique de détonation conditionne le type de chantier ou l'explosif peut être utilisé :

Les explosifs destinés à une utilisation en travaux souterrains doivent avoir un diamètre critique de détonation relativement faible, compte tenu des valeurs usuelles des diamètres de foration en travaux souterrains (moins de 50 mm).

À ciel ouvert où les diamètres de foration sont plus importants, peut utiliser des explosifs à diamètre critique de détonation élevé.

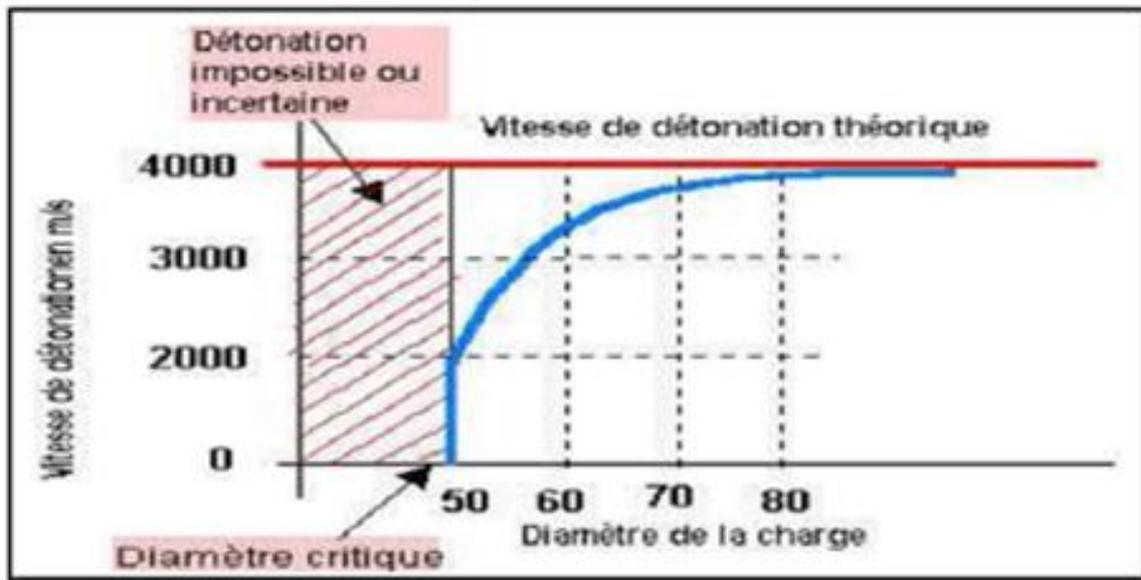


Figure I.4. Diamètre critique de détonation. [2]

I.4.3.Sensibilité à l'amorçage

Toute onde de choc n'est pas capable d'amorcer la détonation de l'explosif considéré. Il existe une pression minimale pour cet amorçage.

Dans la pratique, on distingue:

- ❖ Les explosifs «sensibles au détonateur» (c'est le cas de la plupart des explosifs industriels encartouchés).
- ❖ Les explosifs qui, pour leur amorçage, nécessitent soit un cordeau détonant, soit un «bousteur».

Pour qu'une molécule d'explosif se décompose il faut lui apporter un minimum d'énergie, dite énergie d'activation. De plus cette énergie doit être apportée par unité de volume. Plus cette énergie sera faible et plus on pourra dire que l'explosif considéré est sensible.

En conséquence, la facilité de mise en œuvre des explosifs et le prix de revient d'un tir sont modifiés si l'amorçage des explosifs nécessite des artifices particuliers.

I.4.4.Sensibilité à l'onde explosive

Au cours du chargement d'un trou de mine avec un explosif encartouché, il peut se produire que file de cartouches soit interrompue par un intervalle d'air ou par la présence

de fines de foration. La limitation des risques de ratés impose à l'explosif qu'il ait une certaine aptitude à transmettre la détonation entre cartouches non jointives.

Cette aptitude est caractérisée par le Coefficient de Self Excitation (C.S.E.) de l'explosif considéré.

Le **C.S.E** exprime numériquement la faculté que possède la détonation de se transmettre d'une charge à une autre charge et particulièrement d'une cartouche à une autre.

Cette transmission de la détonation dépend : de l'onde de choc et de la réception de la cartouche au voisinage de celle qui explose.

Il est défini comme étant la distance, en cm entre deux cartouches identiques à laquelle la détonation de l'une des cartouches se transmet à la seconde avec probabilité de 50%. Le C.S.E est mesuré à l'air libre avec des cartouches de diamètre 30 mm et de masse 50 g, l'explosif étant encartouché à densité déterminée.

L'aptitude d'un explosif à transmettre la détonation entre cartouches non jointives peut être accrue, en pratique, du fait du confinement exercé par le trou de mine, et de la plus grande importance du diamètre des charges utilisées. [4]

I.4.5. Résistance aux sollicitations climatiques

On peut attendre des explosifs qu'ils aient certaines aptitudes à supporter les sollicitations climatiques comme l'humidité, le gel ou les températures atmosphériques élevées.

L'humidité réduit la sensibilité à l'amorce et l'aptitude à la transmission de la détonation. Il en est de même pour les basses températures.

La chaleur peut provoquer une exsudation de nitroglycérine qui est très dangereuse. Cependant l'effet le plus courant d'une élévation de la température (30 à 40 °C), sera un ramollissement de la cartouche et une accélération du vieillissement de l'explosif.

I.4.6. Performances des explosifs

I.4.6.1. Vitesse de détonation

Il s'agit de la vitesse de propagation de l'onde de choc dans le matériau explosif, elle conditionne le pouvoir brisant de l'explosif et de l'état de fracturation à attendre du tir.

La vitesse de détonation est fortement influencée par les conditions du tir. Elle croit notamment avec le confinement et le diamètre de la charge jusqu'à un optimum.

La vitesse de détonation d'un explosif détermine l'effet de brisance sur le matériau. Plus la vitesse de détonation est élevée plus l'explosif est brisant et les déblais obtenus sont plus fragmentés.

Pour la plupart des explosifs, la vitesse de détonation croît avec la densité de l'explosif jusqu'à une certaine valeur ou elle présente un maximum au-delà duquel la détonation peut devenir impossible. Cette valeur de la densité ne peut être atteinte en pratique que si les explosifs sont comprimés accidentellement et de manière excessive au cours de tir.

La vitesse de détonation croît aussi avec le diamètre de la charge jusqu'à une certaine valeur, dite vitesse idéale, qui n'est pas atteinte avec les diamètres usuels.

La vitesse de détonation croît avec le confinement, c'est-à-dire avec la résistance du matériau entourant la charge.

I.4.6.2.Énergie des explosifs

Par définition, l'énergie d'un explosif correspond à la quantité de chaleur qu'il dégage à volume constant.

Il s'agit de l'énergie totale disponible qui serait libérée dans un cas idéal. Or, au cours d'un tir, l'énergie explosive réellement utilisée ne représente qu'une faible part de l'énergie chimique théorique.

Une grande partie de l'énergie disponible est perdue dans le trou de mine sous forme d'onde sismique (vibration), d'onde aérienne (bruit) et de chaleur.

En pratique, on aura plutôt recours aux énergies de choc et de gaz qui sont respectivement fonctions de l'amplitude de l'onde de choc transmise dans le milieu connexe et du volume de gaz produits sous pression.

En laboratoire, l'énergie des explosifs peut être appréciée de différentes manières :

A. Le coefficient d'utilisation pratique (C.U.P)

Cette méthode dite "bloc de plomb", une charge de 10 à 20 grammes est placée dans un cylindre aménagé dans un bloc de plomb, après explosion on apprécie le travail en étudiant l'évasement du bloc de plomb, le C.U.P est exprimé en valeur relative, c'est le rapport des masses de l'explosif étudié et de l'explosif de référence (acide picrique) qui fournit le même travail.

Les procédés de mesure varie d'un pays à un autre par exemple en France le CPU se détermine par l'expression suivante :

$$CUP\% = \left(\frac{m_0}{m}\right) * 100 \quad (\%) \quad (I.01)$$

Où m est la masse en g qui produit le même volume d'évasement que celle d'une masse m₀ égale 10 à 15 g.

On note que l'appréciation de l'énergie d'un explosif par cette méthode ne renseigne aucunement sur les énergies de choc et de gaz.

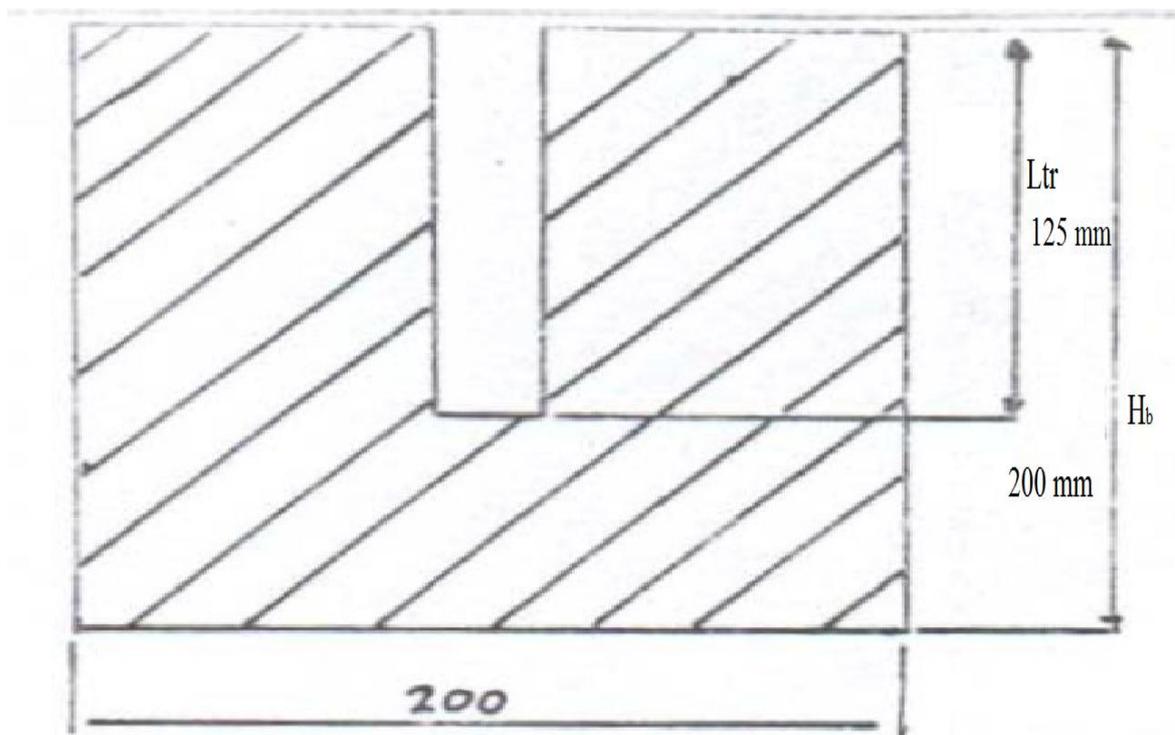


Figure I.5. Schéma d'un bloc de plomb.[4]

B. Travail au mortier balistique (T.M.B)

L'essai porte sur une charge d'une dizaine de grammes d'explosif tiré sous étui d'étain dans un mortier d'acier monté en pendule balistique et qui reçoit, comme bourrage, un boulet en acier. Lors du tir les gaz provenant de la décomposition de l'explosif se détendent en propulsant le boulet et en faisant reculer le mortier pendule. On enregistre le recul sur un secteur gradué. Le travail correspondant est rapporté au travail fourni par une charge d'acide picrique de même masse tirée dans les mêmes conditions.

En effet le TMB est déterminée par l'expression suivante:

$$TMB = (1 - \cos(\alpha) / 1 - \cos(\alpha_0)) * 100 \quad (I.02)$$

Ou:

α : angle obtenu avec 100g d'explosif.

α_0 : angle formée par l'effet de 100g d'explosif de référence.

Le tir au mortier balistique donne une idée sur l'énergie des gaz.

On peut remarquer que les principaux défauts de ces deux méthodes sont :

Charge réduite en diamètre et masse, très éloignée des conditions réelles de tir.

Diamètre de la charge proche ou même inférieur au diamètre critique des explosifs.

C. Mesure de l'énergie par détonation sous l'eau

Lorsqu'une charge est tirée dans l'eau elle génère une onde de choc qui se propage dans l'eau et un volume de gaz qui oscille autour de sa position d'équilibre.

❖ Énergie de choc

L'énergie de choc au capteur est donnée par :

$$E_c = (km * 4\pi R^2) / ((\rho_w * c_s) * \int (P(t))^2 dt) \quad (Kj) \quad (I.03)$$

Ou :

E_c : énergie de choc au capteur.

R : distance charge-capteur.

ρ_w : masse volumique de l'eau.

c_s : vitesse du son dans l'eau.

$P(t)$: relation pression temps.

Km : coefficient lié à la chaîne de mesure.

L'énergie de choc libéré par l'explosif est obtenue par :

$$E_c = \mu * k_f * e_c \quad (Kj) \quad (I.04)$$

Ou :

E_c : énergie de choc de l'explosif;

μ : coefficient d'absorption de l'énergie de choc par l'eau de la piscine (fonction de la densité et de la vitesse de détonation);

k_f : coefficient lié à la forme de la charge.

❖ Énergie de gaz

L'énergie de la bulle de gaz est obtenue par la relation :

$$t = k_1 * eg^{1/3} + cc * (k_1 * eg^{1/3})^2 \quad (Kj) \quad (I.05)$$

eg : énergie de la bulle de gaz;

t : durée de la première oscillation de la bulle de gaz;

$$K_1 = 1,135 * cs^{1/2} / ph^{5/2} \quad (I.06)$$

c : coefficient de correction de dimension de la piscine (en pleine mer $cc=0$);

ph : pression hydrostatique totale.

L'énergie des gaz à la détonation est donnée par :

$$E_g = k_f * eg \quad (Kj) \quad (I.07)$$

❖ Énergie totale

L'énergie totale E_t est :

$$E_t = E_c + E_g = K_f * (\mu * e_c + eg) \quad (Kj) \quad (I.08)$$

Donc l'enregistrement des valeurs de pression en fonction du temps permet la mesure des énergies de choc et de gaz.

D. Indice d'énergie (Weight Strength)

La définition de l'indice d'énergie comme étant la somme respective des rapports de la chaleur d'explosif Q et de volume de gaz V (en prenant comme référence une dynamite dont les caractéristiques sont les suivantes $Q = 1160$ kcal/kg, $v_0 = 650$ l/kg), son expression est comme suit :

$$S = 5/6 * (Q/Q_0) + 1/6 * (v/v_0) \quad (I.09)$$

Où Q_0 , v_0 représentent la chaleur et le volume de gaz dégagés d'un explosif de référence.

[2]

E. La brisance

La brisance d'un explosif est son aptitude à fragmenter un matériau placé en son voisinage, la grandeur importante caractérisant cette dernière : c'est la pression de détonation. Certains auteurs ont proposé de prendre comme valeur de la brisance l'expression :

$$B = \rho * \delta^2 \quad (I.10)$$

Où représente la densité de chargement de l'explosif et sa vitesse de détonation.

Les méthodes expérimentales les plus couramment utilisées pour déterminer la brisance sont : la méthode de KAST et celle de HESS.

La méthode de HESS est basée sur l'écrasement d'un petit cylindre en plomb (normalisé) et la méthode de KAST est basée sur l'écrasement d'un petit cylindre (normalisé) en cuivre. Dans les deux cas on mesure à l'aide d'un micromètre la diminution de la hauteur du cylindre qui est comparé par la suite à l'effet d'un explosif de référence (en France l'explosif de référence choisie est l'acide picrique). Ce rapport qualifie bien la puissance d'un explosif par rapport à un autre.

Tableau I.2. Caractéristiques des explosifs fabriqués en Algérie (O.N.E.X) [5].

Désignation commerciale	Résistance à l'eau	Densité (t/m ³)	La vitesse de détonation (m/s)	Puissance C.U.P	C.S.E (cm)	Volume de gaz (l/kg)	utilisation
Geonit	Très bonne	1.50	5800	1.15	18	733	Roche dure
Geonit I	Bonne	1.40	6300	1.33	8	865	Roche dure
Geonit II	Bonne	4.45	6000	1.27	6	808	Roche dure (mine souterraine)
Carrinit	Médiocre	1.00	4500	1.27	10	892	Roche dure à mi-dure
Marmanit I	Médiocre	0.95	4000	1.28	5	842	Roche de dureté moyenne

Marmanit II	Médiocre	0.98	4100	1.27	2	868	Roche de dureté moyenne
Marmanit III	Médiocre	0.95	3800	1.18	2	907	Roche tendre
N.18bis	Médiocre	0.95	2500	1.16	4.5	–	Région sismique sèche, roche tendre.
Anfomil	médiocre	0.90	3000	1.15	0	975	Roche tendre

I.5. Vibrations sismiques et acoustiques

Le terme onde est signifiant eau courante, une onde est définie comme étant la propagation d'une déformation, d'un ébranlement ou une vibration dont l'élongation est une fonction périodique des variables de temps et d'espace (célérité, fréquence ou période).

I.5.1. Les types d'ondes

On distingue deux types :

I.5.1.1. Les ondes mécaniques

Propagation d'une déformation mécanique dans un milieu, la perturbation se transmet de proche en proche dans le milieu, Elle transfère de l'énergie sans transfert de matière, ce sont les ondes sonores, les ondes sismiques, les vagues, etc.

I.5.1.2. Les ondes électromagnétiques

Propagation d'un champ électromagnétique, ce sont les ondes hertziennes, les ondes lumineuses, les ondes ultraviolettes, les rayons X et les rayons gamma, ces ondes transfèrent de l'énergie.

I.5.2. Propagation des ondes sismiques

Les ondes sismiques se propagent à partir du foyer(ou hypocentre) dans toutes les directions qui leur sont offertes, l'énergie est propagée sous forme de trains d'ondes à l'origine du soit de tremblement de terre ou par travaux de tir à l'explosif dans les mines ou les carriers(à ciel ouvert ou souterraine), l'onde sismique provoque un déplacement

minime de chaque particule minérale qui oscille autour de sa position d'équilibre, l'énergie se transmet de proche sur de très longues, la surface séparant les particules en mouvement de celles qui ne le sont pas encore correspond au front d'onde, la surface formée par les particules vibrant en phase est la surface d'onde.

On matérialise la direction de propagation de l'énergie par les rais sismiques qui ont dans un milieu isotope est perpendiculaire à la surface d'onde, dans un milieu homogène, le rai sismique est droit.

I.5.2.1. Types d'ondes sismiques

Les vibrations lors d'un tir à l'explosif se propagent dans toutes les directions. On distingue deux types d'ondes sismiques, les ondes de volume qui traversent les couches géologiques et les ondes de surface qui se propagent à la surface sur les enregistrements des sismographes, elles se succèdent ou superposent, leur vitesse de propagation et leur amplitude sont modifiées par les structures géologiques qu'elles traversent.

Les signaux enregistrés sont la combinaison d'effets liés à la source, aux milieux traversés et aux instruments de mesure.

1. Onde de volume

Elles se propagent à l'intérieur de globe terrestre ; leur vitesse de propagation dépend du matériau traverses, la vitesse augment avec la profondeur car le matériau traverses devient plus dense.

On distingue :

- ❖ **Les ondes p ou ondes primaires** : appelées aussi ondes de compression ou ondes longitudinale, le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par dilatation et compression successive, parallèlement à la direction de l'onde, ce sont les plus rapides et sont enregistrées en premier sur sismogramme, elles sont responsable de grondement sourd que l'on peut entendre au début d'une vibration lors de tir à l'explosif.

$V_p = 6.5 \text{ à } 13.8 \text{ km/s}$

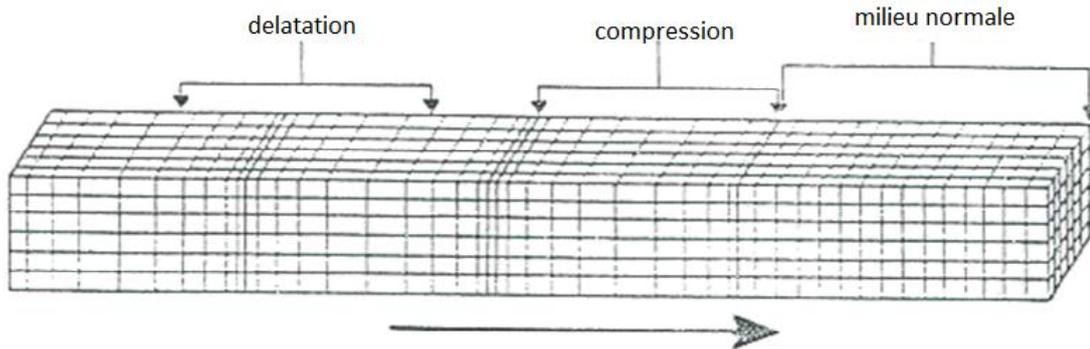


Figure I.6. Onde primaire P [6]

❖ **Les ondes S ou ondes secondaire** : appelées aussi ondes cisaillement ou ondes transversales, à leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde, ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides, les ondes secondaires à cause des propriétés élastiques des roches, elles apparaissent en seconde sur les sismogrammes.

La différence de temps d'arrivées des ondes S et P suffit à donner une indication sur l'éloignement vibration en connaissant leur vitesse de propagation.

Les ondes de volumes se propagent comme toutes les ondes, et en particulier comme les rayons lumineux, elles peuvent réfléchies ou réfractées.

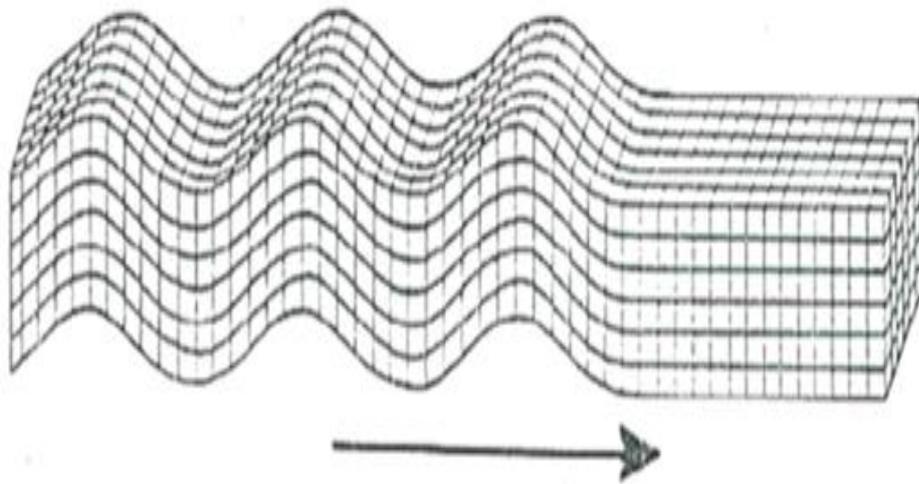


Figure I.7. Onde secondaire S [6]

2. ondes de surfaces

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 volumes mais leur amplitude est généralement plus forte.

On peut distinguer :

- ❖ **L'onde de love (L) :** c'est un anglais Augustus Edward Haugh Love qui découvre son existence en 1911, son déplacement est comparable à celui des ondes S sans le mouvement verticale, les ondes de love provoquant un ébranlement horizontal qui la cause de nombreux dégâts aux fondations d'un édifice qui n'est pas une construction parasismique, les ondes de love se propagent à environ de $4\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. [7]

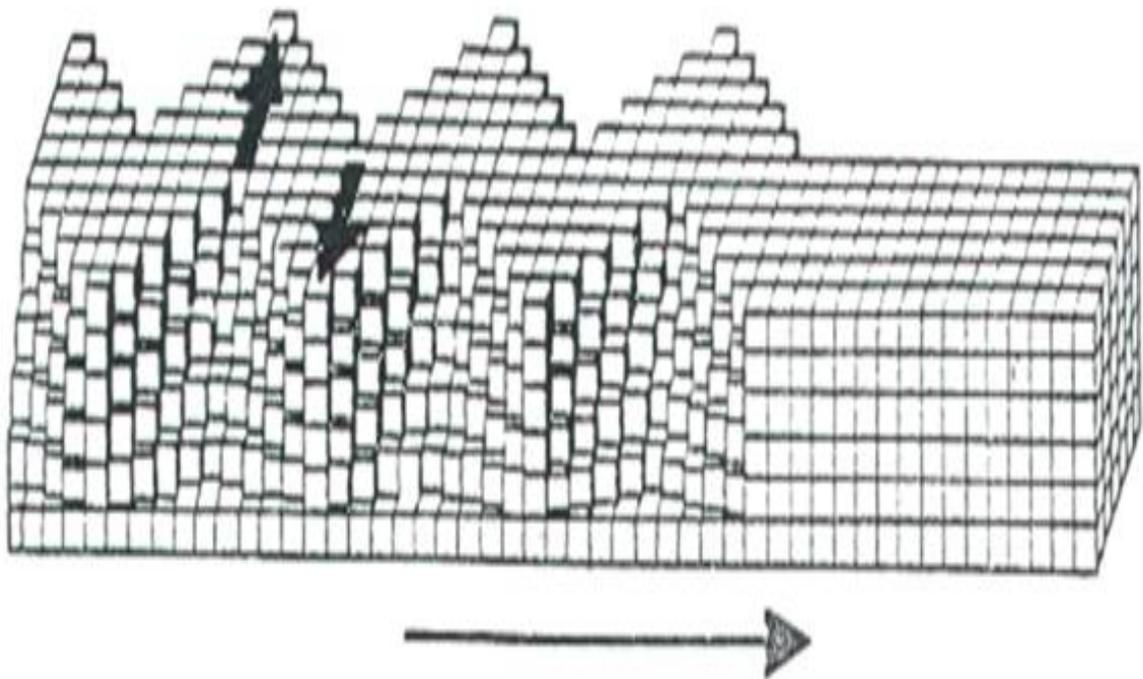


Figure I.8. Onde de love L [6]

- ❖ **L'onde de Rayleigh (R) :** elle a été découverte par John William Rayleigh en 1885, son déplacement est complexe, assez semblable à celui d'une poussière portée par une vague, constituant un mouvement à la fois horizontal et verticale.

Pour caractériser une onde, on indique sa direction de propagation et sa vitesse de propagation ou célérité. [7]

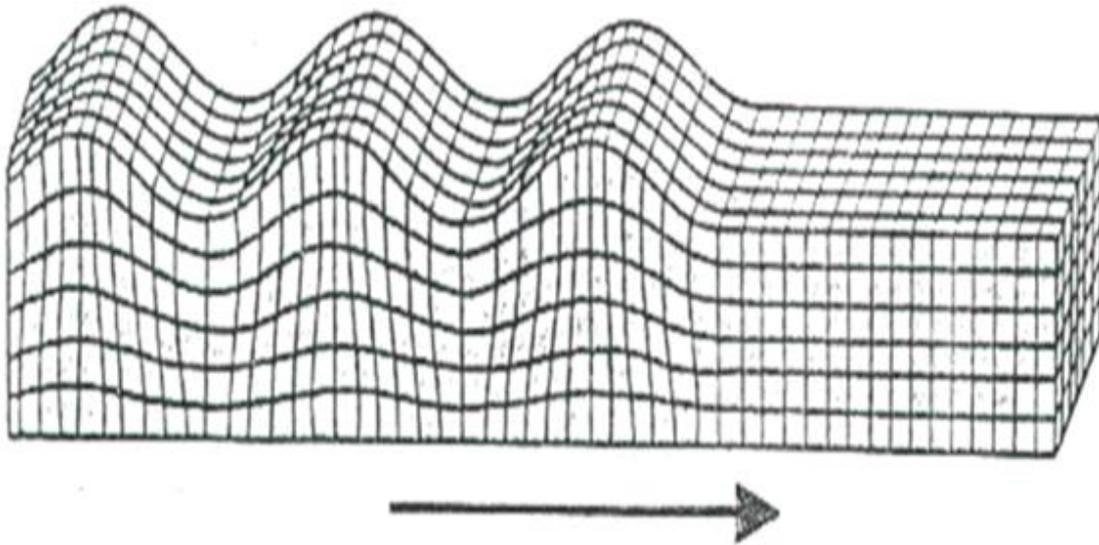


Figure I.9. Onde de Rayleigh R [6]

I.5.3. Propagation des ondes acoustiques

I.5.3.1. l'acoustique

Partie de la physique qui traite des sons et des ondes sonores (nature, production propagation et réception du son), cette science fait appel aux phénomènes ondulatoire et à la mécanique vibratoire, les champs d'investigation qu'elle propose regroupent plusieurs domaines : la propagation des ondes sonores, l'acoustique des salles, la physiologie de l'audition, l'acoustique environnementale, le traitement du signal audio, les sciences des communications, tirs à l'explosif.

I.5.3.2. Vibration acoustiques

Une vibration acoustique est constituée par le mouvement des particules d'un milieu élastique à la suite d'un ébranlement initial. La propagation des vibrations sonores se fait à vitesse variable selon les milieux. Elle est d'autant plus rapide que le milieu présente une bonne cohésion. La vitesse du son dans l'air (célérité) est de 340 à 360 m/s suivant la température et l'hygrométrie. Elle atteint 1420 m/s dans l'eau et 5600 m/s dans l'acier.

I.5.3.3. Définition

Les ondes acoustiques sont des ondes élastiques qui se propagent dans les fluides, milieu gazeux, milieu solide.

Une onde sonore est également générée, elle se transmet par l'air et peut parfois faire vibrer.

Perturbation d'un milieu qui se propagent dans le milieu éventuellement en se déforment avec une vitesse mesurable, la propagation de la perturbation n'implique pas la propagation de la matière, il faut différencier la vitesse de l'onde, de celle de l'élément matériel, propagation de l'énergie continue dans la perturbation généralement pas de la matière, dont les déplacements nets sont en moyenne nuls, en première approximation.

Les ondes en besoin d'un milieu matériel pour se propager, une exception provient de la lumière, l'onde modéliser un champ de déformation, défini en tout point de l'espace, à chaque instant l'onde est irréductible au corpuscule. (Il ne faut pas confondre bruit et son).

- **Le son** est une vibration acoustique régulière agréable à l'oreille de l'homme.
- **Le bruit** est une vibration acoustique erratique, intermittente qui constitue une sensation auditive désagréable ou gênante pour l'homme. On en distingue :
 - ❖ Les bruits entretenus : concasseur, moteur.
 - ❖ Les bruits impulsionnels qui sont caractérisés par un pic de pression très bref : coup de feu, tir de mine.

La courbe de mesure de bruit impulsionnel dû à un choc présente une montée rapide en pression et une décroissance erratique (Figure I.11.A).

La courbe de mesure bruit impulsionnel dû à une explosion à l'air libre (cordeau détonant) (Figure I.10.B), présente une montée rapide en pression (surpression de crête) et une décroissance régulière. Cette surpression est suivie d'une dépression qui s'égalise dans le temps en deux ou trois oscillations. Ash et Al (1986).

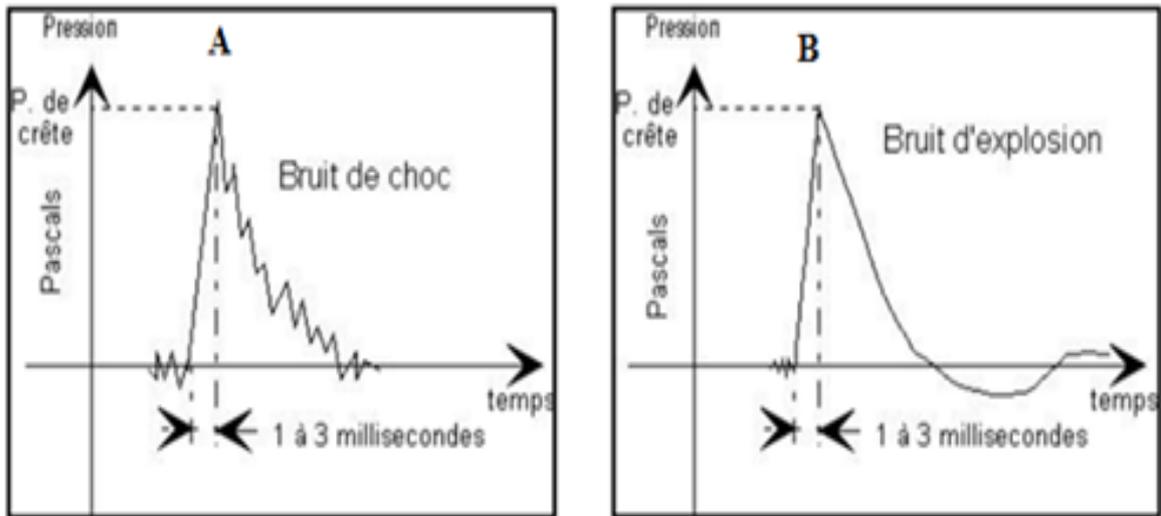


Figure I.10. A. Courbe de mesure de bruit de choc.

B. Courbe de mesure de bruit d'explosion.

Dans le cas d'une explosion en milieu confiné :

- Les gaz de tir à haute pression (9000 à 10000 bars) et à vitesse élevée (2000 m/s) vont produire un bruit d'impact en entrant en contact avec la roche (Energie de choc de l'explosif).
- La détente rapide des gaz du milieu confiné vers le milieu extérieur va induire une forte surpression aérienne (bruit d'explosion) en liaison avec l'énergie de gaz de l'explosif.

On remarquera que pour tout explosif utilisé en milieu non confiné, tir en charges appliquées par exemple, la majeure partie de l'énergie potentielle des gaz est transformée en onde de pression aérienne. Ces méthodes et dispositifs sont à proscrire en site sensible.

I.5.4. Caractéristique des ondes

I.5.4.1. Le déplacement

Est la distance parcourue par un élément de matière depuis sa position neutre.

Dans le cas d'un mouvement périodique sinusoïdal, l'expression de mouvement en fonction de temps peut s'inscrire :

$$d = D \sin(wt) \quad (\text{I.11})$$

$$w = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{I.12})$$

D : Elongation maximale.

W : pulsation du mouvement.

F : fréquence de la vibration (Hz).

T : période de la vibration (s).

I.5.4.2.la vitesse particulaire

Est la rapidité à laquelle se déplace l'élément de matière qui traduisant les oscillations autour de leur point d'équilibre.

La vitesse particulaire caractérise par :

- ❖ la période T (ms) correspond à une oscillation complète à partir de la position initiale de repos, elle est inversement proportionnelle à la fréquence ($f = 1/T$ en Hz).
- ❖ l'amplitude du déplacement (μm) est la distance parcourue par un élément de matière depuis sa position initiale.
- ❖ l'amplitude de la vitesse d'une onde (mm/s) est la vitesse à laquelle se déplace la particule élémentaire de matière.
- ❖ l'accélération (m/s^2) est la variation de la vitesse dans le temps, l'expression de l'accélération peut s'inscrire :

$$a(t) = Dw^2 \sin(wt) \quad (\text{mm/s}^2) \quad (\text{I.13})$$

Mesure de l'accélération avec des captures de types accéléromètres.

L'expression de la vitesse particulaire peut s'inscrire :

$$V(t) = Dw \cos(wt) \quad (\text{mm/s}) \quad (\text{I.14})$$

$$Dmax = Dw = D \frac{2\pi}{T} = D2\pi f \quad (\mu\text{m}) \quad (\text{I.15})$$

Mesure de la vitesse de déplacement du sol (vitesse particulaire) avec des capteurs de type géophones.

I.5.4.3.vitesse radiale

La vitesse radiale est vitesse d'un objet mesurée dans la direction du rayon (ou la ligne de visée) vers ou depuis le point d'observation. La mesure de la vitesse radiale se fait de plusieurs façons et ce concept est utilisé dans de nombreux domaines dont la mesure par des capteurs géophones, radar Doppler, les sonars, les échographies.

Le mouvement d'un objet par rapport à un observateur peut être décomposé en deux axes orthogonaux : radial et tangentiel. La vitesse radiale (V_r) ne donne pas la valeur du vecteur vitesse de l'objet (V_s), mais uniquement la composante de celui-ci sur la ligne de visée. La vitesse radiale est donc :

$$V_r = V_s \cos\theta \quad (\text{mm/s}) \quad (\text{I.16})$$

, θ l'angle formé par la ligne de visée vers le mobile et la trajectoire de celui-ci.

Pour connaître les autres composantes, c'est-à-dire les composantes tangentielles à la ligne de visée verticalement et horizontalement, il faut en général observer le mouvement propre de l'objet, et connaître sa distance.

I.5.4.4. Vitesse transversale

Une vitesse est transversale quand la direction de la perturbation est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

I.5.4.5. Vitesse longitudinale

Une vitesse est longitudinale quand la direction de la perturbation est parallèle à la direction de propagation de l'onde.

I.5.4.6. Fréquence

Nombres d'oscillations pendant une seconde.

I.6.Effets des tirs dans les mines et carrières

I.6.1. Effets sismiques

La maîtrise de la sismicité produite par les tirs se résume donc essentiellement à limiter ce dernier type est indésirable, à tous points de vue, les ondes à basse fréquences sont les plus néfastes, étant à la fois plus nocives pour les infrastructures de surface et plus facilement ressenties par l'être humain.

Le tableau ci-dessous donne la relation entre la vitesse de vibration et les dommages causés à des immeubles fondés sur rocher.

Tableau I.3. La relation entre la vitesse de vibration et les dommages causés. [8]

V (mm/s)	Fréquence (Hz)	Déplacement (μm)	L'accélération (m/s^2)	Description des dégâts
0.5	>80	<1	251.2	Pas de fissuration
3	80	6	1507.2	Pas de fissures apparentes
5	30	26.5	942	Fissurations visible
10	5	320	312.5	Fissures importantes
>10	1	1560	>62.8	Chute des pierres dans les galeries

Lors de la détonation d'une charge, s'accompagne de phénomènes irréversibles qui permettent de définir les zones :

- ❖ La zone de broyage.
- ❖ La zone de fissuration radiale.
- ❖ La zone sismique.

I.6.1.1. Zone de broyage

Les contraintes de compression subies à proximité de la paroi du trou dans les premiers temps de la propagation, les contraintes subies par la roche sont très élevées de pression. Les contraintes en général excèdent dans un temps très court la résistance à la compression de la roche R_c qu'elles broient en fines particules.

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

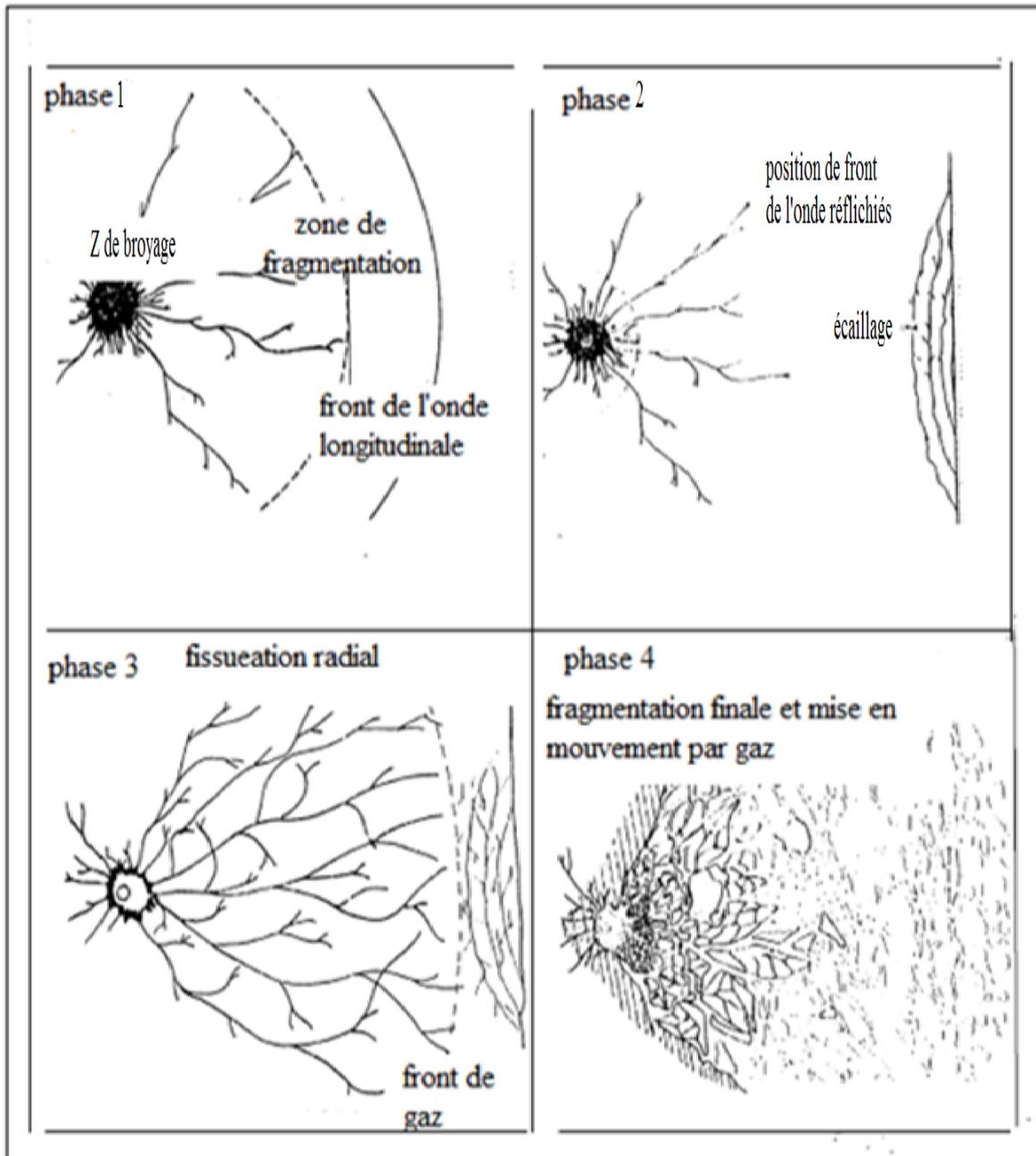


Figure I.11. Développement de la fissuration et de la fracturation, (phase 1 à 4) [9]

La décroissance des contraintes varie d'une façon continue en fonction de la résistance à la compression de la roche.

L'épaisseur de la zone de broyage dépend essentiellement de la pression maximale à la paroi du trou et des propriétés dynamique de la roche. Les roches cristallines à porosité faible offrent une résistance plus importante au broyage que le roches tendres et /ou poreuses. La pression à la paroi du trou dépend de la densité de l'explosif. Par conséquent, l'épaisseur de la zone broyée peut être modifiée en variant la densité du chargement. [9]

I.6.1.2. La zone de fissuration radiale (zone transitoire)

La roche subit de la contrainte de compression radiale une contrainte tangentielle de traction, une décroissance dans la zone de broyage; elle demeure supérieure à la résistance à la traction (de la roche) sur une distance importante.

La contrainte tangentielle est responsable de la rupture (en traction) mais cette phase reste en particulier caractérisée par des fissures radiales.

La fissuration radiale se développe à une distance comprise entre 20 et 50 rc.

Le mécanisme de la propagation de ces fissures n'est pas aussi clair, d'après des essais au laboratoire des tirs (sur modèle physique) et en utilisant la méthode photographique, a conclu que ces fissures sont initiées et propagées à partir des fractures préexistantes dans le massif rocheux. Cela peut indiquer que les contraintes résiduelles jouent un rôle important dans la propagation de ces fissures. [10]

I.6.1.3. Zone sismique

Cette zone, aucune fissuration marquante n'apparaît, il y a réapparition des vibrations qui affaiblissent le massif, ce dernier suit un modèle classique de comportement élastique.

I.6.1.4. Effet des ondes réfléchies

Dans les zones sismiques, les tirs généralement réalisent près d'une face libre dans un massif qui contient une discontinuité important.

En effet, dès qu'elle rencontre une discontinuité, l'onde de contrainte émise se scinde en une onde transmise et une onde réaffectées. [3]

Dans le cas de l'interface roche/ air pris dans cet ordre, la réflexion est presque totale. L'onde de compression (longitudinal) se réfléchit en une onde de traction et elle 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 (micro fissures) induit deux effets sur l'onde qui se propage:

- Affaiblissement du maximum de contraintes.
- 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.

I.6.1.5. Effet de la fragmentation finale et mise en mouvement

Si l'onde émise et l'onde réfléchi sur la surface libre, ont pu pré fissuré ou, affaiblis suffisamment le massif entre cette surface libre et le diamètre du trou, les gaz emprisonnés va pouvoir poursuivre leur propagation et leur action. Ils s'infiltrer dans les fissures, complétant éventuellement la fissuration et mettent les blocs formés en mouvement.

I.6.1.6. Effet de la présence d'une face libre

Lorsque l'onde de choc rencontre une discontinuité, elle se scinde en une onde transmise et une onde réfléchi. La répartition entre l'énergie transmise et l'énergie réfléchi dépend du rapport des impédances des matériaux de part et d'autre de la discontinuité. Dans le cas de l'interface roche/air, la réflexion est presque total [4]. L'onde de compression se réfléchit alors en une onde de traction qui est responsable de la formation d'une fissuration parallèle au plan d'onde; Ce phénomène bien connu est appelé écaillage (figure.10, phase 2 et 3).

I 6.1.7. Effet de gaz libérés

La fissuration générée par l'onde émise et l'onde réfléchi permet aux gaz libérés de poursuivre leur propagation et d'affaiblir davantage le massif; Ils filtrent dans les fissures, prolongeant éventuellement la fissuration et mettent en mouvement les blocs obtenus (figure I.10. phase 4). Jaeger et Cook (1979) prétendent que les gaz libérés sont les facteurs principaux de la fragmentation. La génération de la fissuration radiale ne peut pas être le résultat de l'onde de choc émise, selon eux, car la vitesse de la propagation des ondes est bien plus élevée que la vitesse de la propagation de ces fissures. C'est alors la pression quasi-statique créés par les gaz libérés qui engendre des contraintes compressives radiales et des tractions tangentielles, lesquelles génèrent ces fissures. Elles sont par la suite prolongées par les gaz sous pression responsables de la fragmentation finale. [13]

I.6.1.8. Effet arrière de tir

Les résultats d'effets arrière obtenus sont très variables d'un essai à l'autre dans une même catégorie d'essais. (La Figure I.11, 12 compare les croquis des effets arrière obtenus pour deux essais mono-trou déferents (R1T6 et R2T4), et montre les photographies de la plate-forme supérieure réalisées après tir. La Figure I.12 montre de même les résultats d'effets arrière obtenus pour un essai bi-trou à amorçage retardé (R7B3), un essai bi-trou à amorçage simultané (R8B2), et un essai multi-trous.

Les fissures observables après tir sur la plate-forme supérieure sont majoritairement en arcs par rapport aux trous abattus pour les essais mono-trou et, sauf rare exception, sensiblement parallèles au front abattu pour les essais multi-trous. [12]



Figure I.12. Effet arrière constaté pour les essais mono-trous, la fissure radiale pour l'essai. [12]



Figure I.13. Effet arrière constaté pour les essais bi-trous et multi-trous. [12]

Lors d'un tir d'abattage toute l'énergie transmise au massif et qui ne sert pas à abattre ou à fragmenter la roche se retrouve sous forme de nuisances.

I.6.2. Effets acoustiques

Les vibrations acoustiques de l'explosion transmise par l'air (onde aérienne), proviennent surtout de la libération des gaz de tir des cordons détonant placés sur le sol, et dans une moindre mesure, des charges des Fournaux à travers les fissurations du massif ou à travers le haut du trou, de forage après expulsion du bourrage.

L'onde acoustiques ainsi provoquées présente une crête de surpression d'air très brève, suivi par une série d'oscillations de pression, les conditions météorologiques affectant l'onde aérienne (plafond de nuage, pluie, humidité, brouillard, vent), de sorte qu'il peut se dérouler des phénomènes de réflexions, de déviation ou de concentration de l'onde aérienne engendrant des effets sonores imprévisibles en des zones données.

Tableau I.4. Effets de vibration en fonction de la vitesse particulaire [8]

Dégâts (dB)	Fr (Hz)	Description des dégâts
<50	0.5	Non détecter par l'oreille
90	1	Imperceptible
112	8	Apparition des premières plaintes isolées
120	20	Probabilité de plainte élevée, vibration des vitrages
125	35	Seuil conseillé par l'arrête du 22/09/1994
130	63	Seuil de dommages préconise aux USA pour les constrictions sensibles, vibration sensible des planchées.
135	112	Première dommage superficiel, fissuration du plâtre et d'enduit (vibrations répétitives).
140	200	Bris de vitres les plus fragiles.
145	350	Seuil d'exposition des personnes, conseillé dans les publications.
170	6000	Bris tous les vitrages non traité spécifiquement.

I.6.2.1. Effet d'onde sonore

Dans l'exploitation en ciel ouvert ou souterraine, lorsque les gaz d'expulsion se détonant dans la masse d'air ambiante, une onde de surpression acoustique et générée, avec du bruit associé, l'exposition à une surpression aérienne trop élevée peut causer des dommages auditifs, et peut endommager notamment.

Les fenêtres des bâtiments environnent, lors de désastre industriel de l'ancienne usine AZF à Toulouse(sud-ouest de le France) en 2001,ou un stock de 300 tonnes de nitrates d'ammonium a explosé en banlieue de la ville, les fenêtres des habitations ont été endommagées dans un rayon de 4 kilomètres autour de lieu de l'explosion, le bruit associés a été entendu jusqu'à 80km de distance d'après une publication du centre interdisciplinaire d'Etude Urbaines(CIEU,2002).

I.6.2.2. Bruit

Les vibrations acoustiques de l'explosion transmises par l'air (ondes aériennes) proviennent surtout de la libération des gaz de tir des cordeaux détonants placés sur le sol, dans une moindre mesure, des charges des fourneaux à travers les fissurations du massif ou à travers le haut du trou de forage après expulsion du bourrage.

Les mesures des niveaux sonores faites lors de l'élaboration de ce dossier mais aussi celles du contrôle continu montrent que les émergences réglementaires sont respectées. [8]

Les valeurs mesurées au niveau des habitations les plus proches du site ne sont pas préjudiciable pour la santé de leurs occupants.

I.6.2.3. Projections excessives

A cause de la pression de gaz d'explosion, outre les effets de surpression aérienne précédemment cités, des fragments de roche peuvent être projetés au niveau de la zone de bourrage (verticalement) ou dans les directions du tir (horizontalement), pour cette raison, un périmètre de sécurité est défini autour du tir, évacué et contrôlé le boute-feu en chef avant la mise à feu, de protéger les personnes et équipements, il arrive toutefois dans des cas rares que des projections exceptionnellement vives se produisent_ celles-ci pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres de portée, ce type de risque environnemental est d'autant plus prononcé lorsque l'opération de tir a lieu à proximité de zone urbaine ou d'infrastructures publiques, parmi les facteurs pouvant favoriser cet effet secondaire néfaste, on peut citer de manière exhaustive : une banquette faible ; une banquette trop forte favorisant l'éjection verticale des roches dans la zone de bourrage ; des trous de mine anormalement convergents à proximité du front.

La présence d'une zone de résistance particulièrement faible au niveau du front indépendamment du danger que représentent les projections excessives, un étalement trop important du tas abattu par un tir n'est pas techniquement souhaitable, car les engins de déblayages sont de ce cas forcés de ratisser la plate-forme inférieure afin de récupérer les déblais, ce scénario est d'autant plus problématique dans le cas où le déblayage se fait avec des pelles hydrauliques, et la finesse de la fragmentation devient alors même un désavantage. [14]

D'une manière générale, les projections peuvent provenir, soit de la surface supérieure du tir (projection issues des têtes de trous de mines), soit de la surface de dégagement verticales (projections issues du front) comme c'est le cas en particulier pour les tirs en

gradins, les projections issues des têtes de trous de mines sont des projections en cloches qui peuvent intervenir dans toutes les directions, elles ont cependant une portée relativement faible pour des tirs réalisés conformément aux règles de l'art, les projections issues du front ont des trajectoires tendues elles sont orientées vers l'avant du front (demi-espace face au tir) et ont une portée relativement élevée pour des tirs en gradins réalisées conformément aux règles de l'art. [13]

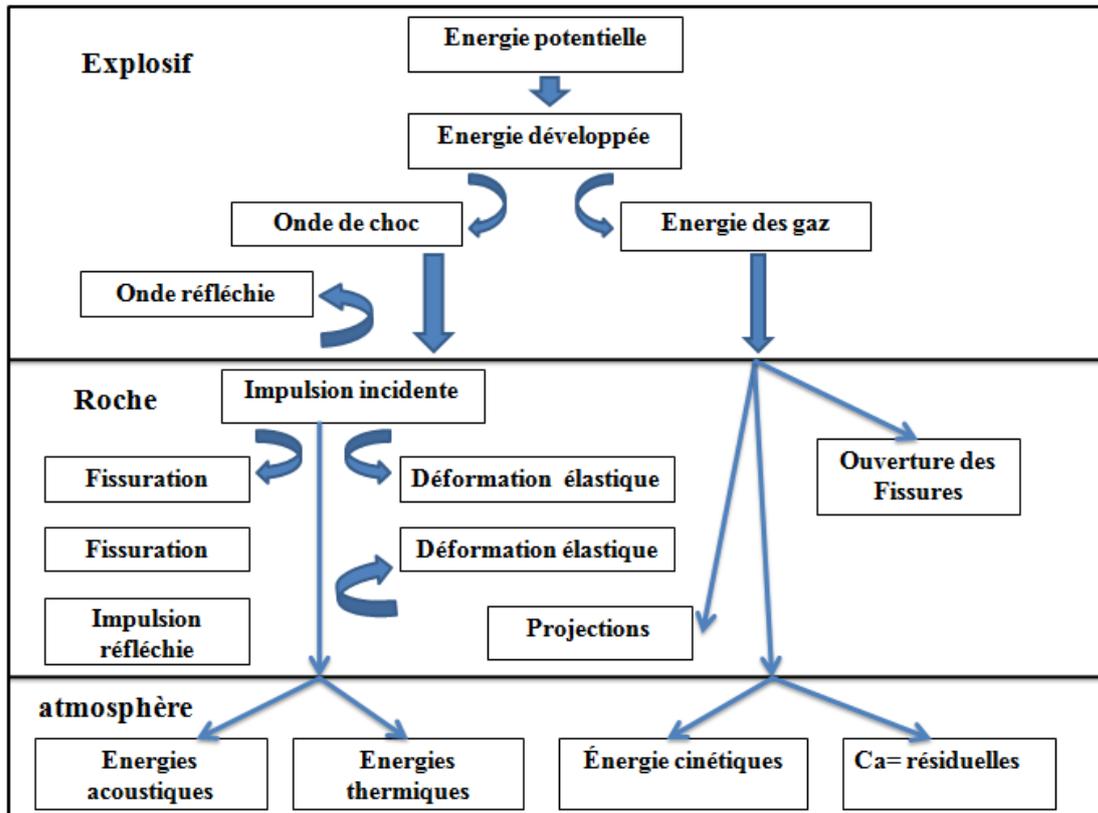


Figure I.14. Nuisances générale de tir à l'explosif. [15]

Conclusion

Les effets de tir sur la stabilité de terrain sont des événements soudains qui se réalisent à cause l'empilage de plusieurs facteurs cités dans ce chapitre, et non seulement une seule cause d'eux peut conduire à une catastrophe naturelle.

Le passage de l'état de stabilité à l'état d'instabilité d'un versant relève de causes nombreuses et variées, on cite : la nature de terrain (géologie, morphologie caractéristiques physico-chimiques), les actions de l'eau.

Chapitre II : Présentation de gisement de Boukhadra

« Quand on veut on peut, qui veut peut, qui veut la fin
veut les moyens »

Introduction

Compte tenu de la position géographique de la montagne de la mine de Boukhadra par rapport à la ville, celle-ci est confrontée à un grand risque sur la mine et la région même, ce risque dû au tir à l'explosif

L'étude de l'influence de tir sur la stabilité de la mine de Boukhadra tient en compte de la stratigraphie et de la lithologie de site à étudier, la morphologie ainsi que la tectonique de gisement.

II.1. Historique de la mine

L'exploitation de la mine de Boukhadra fut entamée durant l'époque Romaine pour l'extraction du cuivre dans la zone du pic, par la suite l'exploitation a porté sur le zinc et autres poly-métaux par la concession de Boukhadra (Mr TADRO). De 1903 à 1926, la concession de Moktal El Hadid avait entrepris des travaux de Recherches systématiques par des galeries entre les niveaux 845-1225. De 1926 à 1966, date de nationalisation des mines, c'était la société de Ouenza qui exploitait le gîte de Boukhadra. Cette dernière avait effectuée de la recherche systématique Par des travaux miniers et par des sondages sur le gisement de Boukhadra.

Durant la période de 1967 à 1984, la Sonaram était chargée de l'exploitation et des recherches sur les gîtes ferrifères d'Ouenza et Boukhadra. Après la restructuration des entreprises (1983 - 1984), c'était Ferphos qui gérait, exploitait et développait ces recherches sur l'ensemble des gîtes ferrifères existants sur le territoire national. Depuis la date du 18/10/2001, et dans le cadre de partenariat avec l'étranger, le holding L.N.M.N.V. a signé l'accord de partenariat avec Hadid Ouenza - Boukhadra filiale FERPHOS avec 70% pour ISPAT Tébessa, qui est devenue MittalSteel Tébessa et aujourd'hui ArcelorMittal Tébessa.

[16]

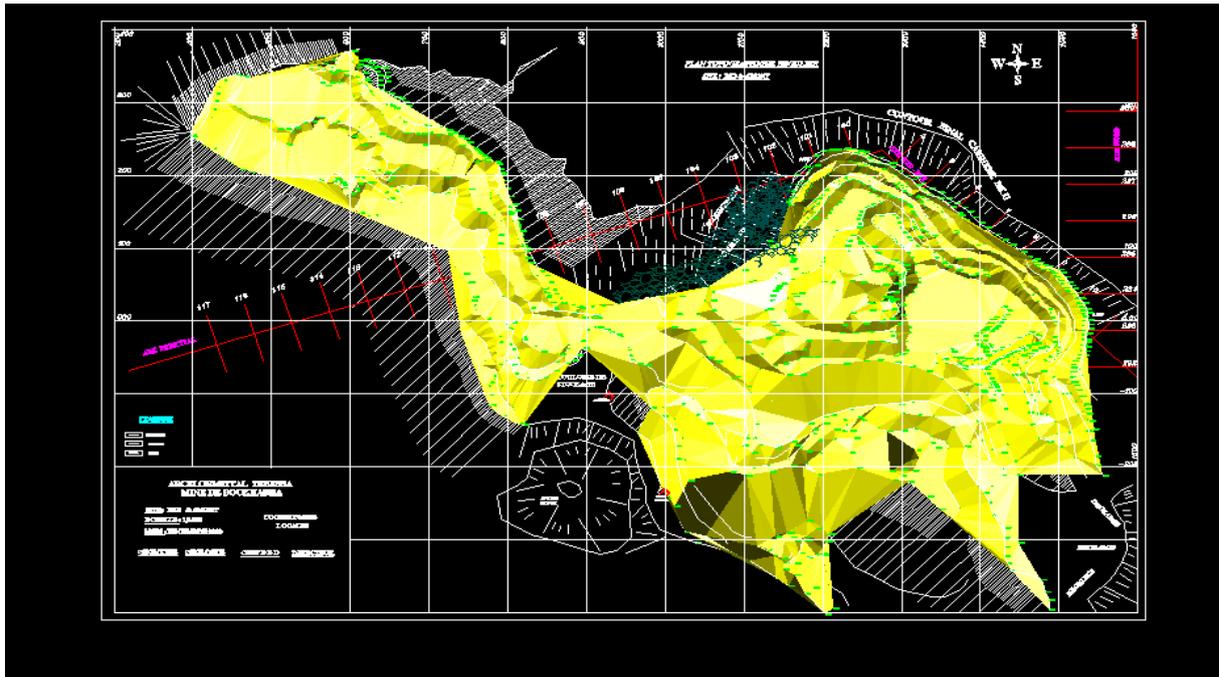


Figure II.1 : Plan topographique de la mine de Boukhadra. [16]

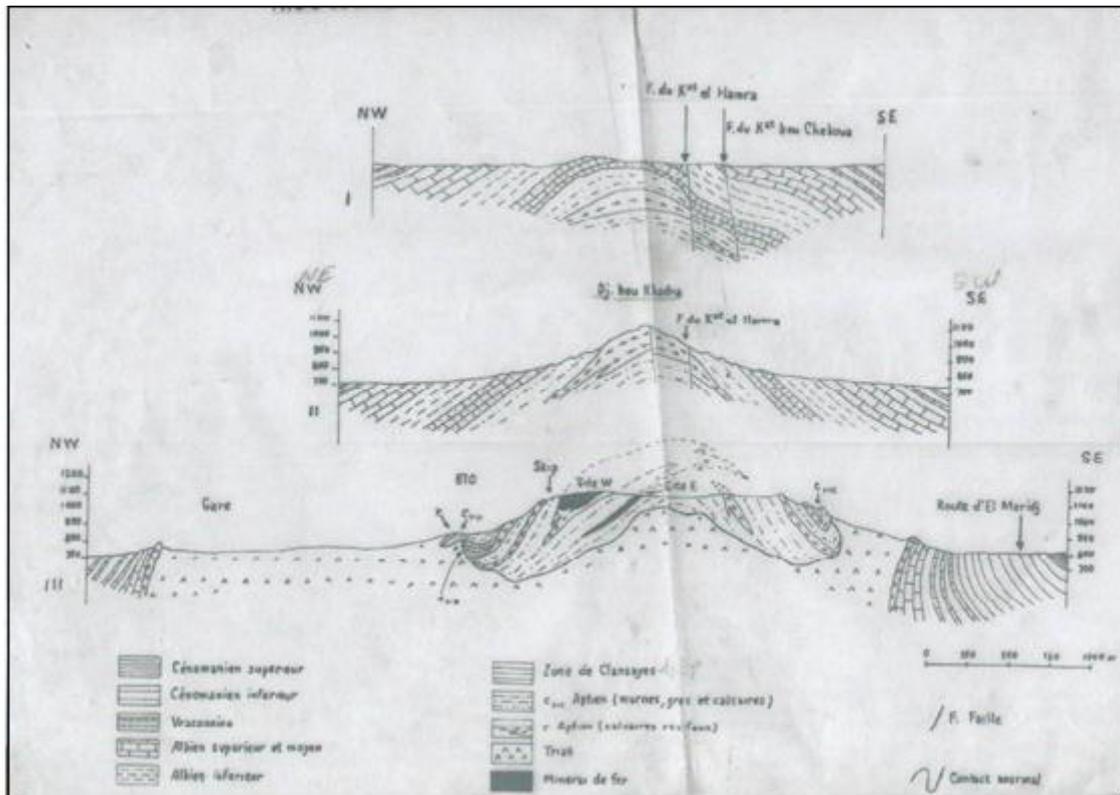


Figure II.2. Coupes transversales dans l'anticline du Boukhadra. [16]

II.2.la géologie de la mine

II.2.1. La situation géographique

Le Djebel de Boukhadra se situe sur l'Atlas saharien, à l'Est Algérien. L'unité de Boukhadra se trouve à une altitude de 850 m, le point culminant du Djebel est de 1463 mètres. La ville de Boukhadra fait partie de la Wilaya de Tébessa. Elle se situe à 45Km au Nord – Est de cette wilaya, à 200Km au sud de la ville côtière de Annaba, et à 18Km de la frontière Tunisienne. Elle est reliée à Annaba par une voie ferrée qui assure le transport du minerai de fer au complexe d'El-Hadjar.

Le climat est continental et sec, les températures varient entre 40° c en été et 0°c en hiver, la Pluviométrie est faible avec parfois de faibles chutes de neige. [16]

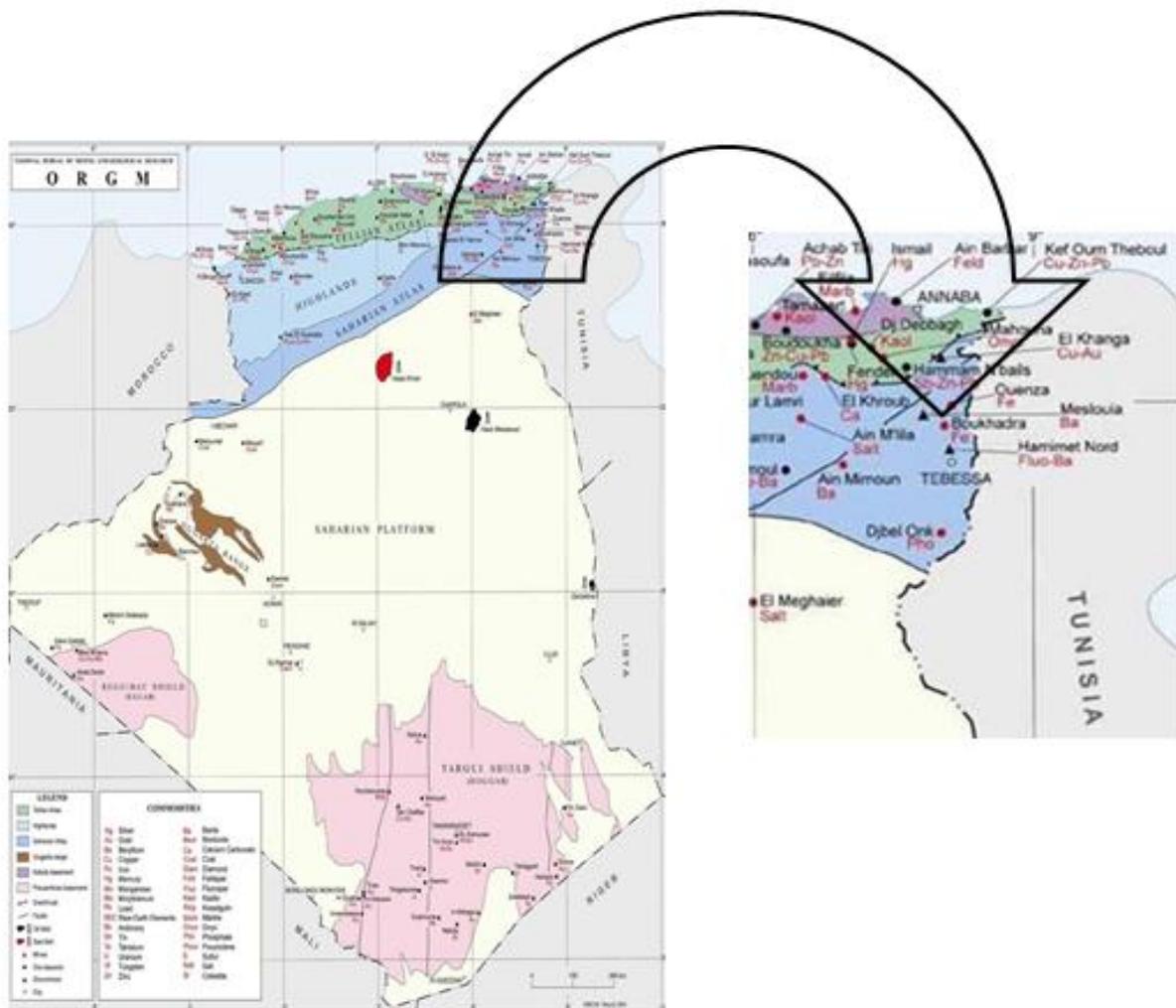


Figure II.3 : Situation géographique de la ville du Boukhadra. [16]

II.2.2. Stratigraphie

Les terrains du secteur de Boukhadra sont formés par des sédiments du Mésozoïque et une partie du Tertiaire et du Quaternaire pour le Mésozoïque, les formations sont formées par les sédiments du Trias et du Crétacé. [16]

II.2.2 .1. Trias

Les dépôts Triasiques rencontrés dans la région de Boukhadra sont représentés par les marnes bariolées, gypses, dolomies, débris de calcaires et de grés. Les roches du Trias se développent dans les parties Ouest, Sud et Sud Est et en contact anormal avec les dépôts aptiens du crétacé (Diapirisme). [16]

II. 2.2.2. Le Crétacé

Dans le profil du crétacé, nous retrouvons le Cénomaniens, l'Aptien, l'Albien, le Coniacien, et le Cénomaniens où on a la série Aptienne, porteuse de la minéralisation est caractérisée par des marnes et des calcaires constituant la partie inférieure qui encaisse le gîte Sud, des calcaires récifaux construits, à organismes fossiles (rudistes) qui constituent le niveau porteur de la minéralisation principale et des grés et calcaires de la partie supérieure de l'Aptien non productif et on a :

- ❖ **L'Aptien** : qui contient le calcaire et le Terrigène (marno-grésocalcaire).
- ❖ **L'Albien** : qui contient la marne et le calcaire.
- ❖ **Vraconien** : qui contient la marne, l'argile marneuse, le calcaire marno-argileux.
- ❖ **Le Cénomaniens** : contient la marne avec intercalation de calcaire.
- ❖ **Coniacien** : contient les marnes argileuses avec intercalation d'argile marneuse et par endroit de calcaire marneux. [16]

II.2.2.3.Le Tertiaire

Les dépôts classés comme Tertiaire (miocène) sont observés seulement dans la partie occidentale du domaine étudié et sont représentés par des conglomérats à éléments variés, cimentés par une matrice carbonatée et des intercalations de roches gréseuses. [16]

II.2.2.4. Le Quaternaire

Les dépôts récents du Quaternaire sont formés par un matériel caillouteux, blocs de calcaires, grés, débris de minerais et de conglomérats. Ils sont répandus aux flancs de la montagne et dans les parties basses du relief. [16]

II.3. Tectonique

La région de Boukhadra est marquée par deux phases tectoniques ; la phase de plissement et la phase de tectonique cassante. Dans la structure anticlinale de Boukhadra, on observe deux grandes dislocations tectoniques :

- La 1^{ère} se prolonge presque parallèlement à l'axe de l'anticlinal à partir du pic vers la terminaison périclinale.
- La 2^{ème} zone de dislocation tectonique de direction WNW-ESE coupe la structure dans sa partie centrale en deux parts, l'amplitude de cette dislocation peut arriver jusqu'à 1000 mètres.
- D'autres failles, sans importance majeure sont à signaler.

Le Diapirisme Triasique avait une contribution principale dans la formation de la structure du Djebel Boukhadra. [16]

II.4. Géomorphologie

Le gisement ferrugineux de Boukhadra, appartenant au domaine de l'Atlas saharien est localisé dans le massif montagneux de Djebel Boukhadra, caractérisé par une structure anticlinale très simple de direction NE-SO avec une terminaison périclinale au NE. Le Djebel Boukhadra s'étend sur une longueur de 7 à 8 Km et une largeur variant de 3 à 5 Km, suivant une direction NE-SO. Les côtes absolues dans les limites de la concession minière variant de 750Km au pied de la montagne à 1463m au point culminant, localisé au niveau du pic de Boukhadra.

La région de Boukhadra est constituée par les roches du Mésozoïque (Secondaire), Cénozoïque (Tertiaire) et du Quaternaire. [16]

II.5. Hydrogéologie

D'après les études hydrogéologiques il n'y a aucune nappe aquifère en eau potable dans la région minière de Boukhadra mais il existe une nappe aquifère d'eau non potable qui est caractérisée par un niveau hydrostatique égale à 818m.

Le réseau hydrographique dans la région de la mine de Boukhadra est faible, à l'exception des multiples petits chéneaux d'écoulement pluviaux sans importance majeure qui parsème de Djebel Boukhadra. [16]

II.6. La minéralisation

L'allure générale des corps minéralisés et leurs dimensions sont très variables. Ils sont représentés par quatre grands corps et quelques petites veines de moindre importance, qui se joignent dans la partie occidentale, pour former un seul corps minier

Sur la base des travaux d'exploitations de la mine, on distingue deux principaux gîtes dans le gisement du "Boukhadra". [16]

II.6.1. Gîte principal

Le gîte principal est constitué de deux grands filons : Nord et médian et deux petites veines qui se joignent ensemble en un grand corps c'est le corps principal.

Il est caractérisé par une longueur de 250 à 300 m, une largeur de 100 m, allant vraisemblablement jusqu'au niveau sidéritique qui se trouverait à une altitude de 820 m, Soit à Quelques mètres sous le niveau le plus bas de la carrière.

Ce corps, stratoïde, représente la racine des autres corps minéralisés, et est situé dans la partie W du gisement et c'est celui qui a été concerné par l'exploitation à ciel ouvert. La concordance des corps minéralisés n'est apparente qu'à une échelle hectométrique, dans le détail les limites du minerai sont sécantes et discordant sur les strates aptiennes.

II.6.2. Gîte Sud

Le gîte Sud se présente sous la forme d'un filon. Il change de direction trois Fois, et rejoignant le gîte principal dans sa partie centrale.

Ce gîte fait l'objet d'une Exploitation souterraine dans sa partie NW et fait aussi objet d'une exploitation Combinée (souterraine à ciel ouvert) dans cette même dernière partie.

La position de ces corps (principal, Nord, médian et Sud) par rapport à l'encaissant est Particulièrement bien visible au niveau de la carrière principale.

Le minerai exploité est constitué principalement d'hématite, le constituant majeur du Minerai, goethite et autres ocres limnétiques. Il est issu de l'oxydation du minerai carbonaté, maintenant restreint à la zone située sous le niveau hydrostatique.

Tableau II.1. Eléments chimiques constitutifs de la minéralisation du gisement de Boukhadra.

Eléments majeurs	%
Manganèse(Mn)	2.0-3.0
Phosphore Fluor) P.F)	6-10
Cuivre(Cu)	Trace
oxyde de calcium(Cao)	3.5-8
Oxyde de magnésium(MgO)	0,2 – 0,40
(S) Soufre	0,04-0,10
Oxyde de d'aluminium (A ₂ O ₃)	0.5 -0.3
Oxyde de sodium et potassium (Na ₂ O) +(K ₂ O)	0,05 - 0,3
(P) Phosphore	0,002 - 0,01
Oxyde de silicium(SiO ₂)	6-9
Humidité(H ₂ O)	2-6
plomb(Pb)	0,005 - 0,02
zinc(Zn)	<0,01

II.7. Description du la mine de Boukhadra

II.7.1.Nature du minerai exploité

Le minerai exploité est du fer sous forme d'oxyde de fer montré par l'hématite rouge (Fe₂O₃) présente en abondance dans ce gisement avec une teneur moyenne de 54% de fer.

Le gisement est de forme ventriculaire, dont la genèse est hydrothermale ou sédimentaire, d'une longueur de 900 à 2200m et d'une puissance variant de 10 à 15m.

Le tableauII.2. Profondeurs moyennes et angle de pendage du gîte exploité en souterrain

axes	Profondeur (m)	Angle de pendage (°)
Axe Nord2	391	60
Axe Sud Est	320	54
Axe Principal	215	54

II.7.2. L'exploitation du minerai de Boukhadra

Le minerai est exploité par deux méthodes d'exploitation :

- Exploitation à ciel ouvert.
- Exploitation souterraine.

II.7.2.1. Exploitation à ciel ouvert

Appliquée sur trois sites :

- Carrière Pic : épuisée.
- Carrière Principale : les travaux d'exploitation sont arrêtés et ils ont procédé à des travaux de développement.
- Carrière BKII : elle est en développement.

A. Ouverture du champ de carrière

L'ouverture du champs de la carrière consiste au creusement d'excavation à ciel ouvert appelée , demi-tranchée, afin de permettre l'accès au gîte à partir de la surface et assurer le lien de transport entre les horizons en activité de la carrière et les points de déchargements à la surface en d'autre terme réalisation des demi-tranchées d'accès de découpage qui constituent le point de départ de la formation des gradins.

A.1. Choix du mode d'ouverture

Le choix du mode d'ouverture d'un gîte dépend de plusieurs facteurs tels que :

- Relief de la surface.
- Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques.
- Dimensions du champ de la carrière.
- Méthode d'exploitation appliquée.
- Mécanisation des travaux miniers.
- Production annuelle de la carrière.
- Emplacement du terril etc.

Il faut choisir le mode d'ouverture du gîte qui assure le fonctionnement des engins, au régime favorable et l'exploitation du gisement, la plus rentable.

A.2. Creusement de la demi-tranchée d'accès

Pour les gîtes de Boukhadra qui est un relief montagneux, la tranchée d'accès est disposée sur le flanc de coteau représentant une demi-tranchée, d'après les caractéristiques du gisement (roches dures relief montagneux). Les travaux de forage et de tir sont réalisés à l'aide d'un marteau perforateur où l'on procède au chargement des trous par l'explosif, en suite on passe au déchargement des roches abattues par bulldozer afin de créer une plate-forme (3 à 4 m) pour l'installation du chariot de forage.

A.3. Paramètres de la méthode d'exploitation

Après l'ouverture de la carrière par tranchées principales (demi-tranchée d'accès dans notre cas), on creuse une demi-tranchée de découpage sur toute la longueur du panneau à exploiter,

à partir de celle-ci on attaque l'exploitation par avancement de la demi-tranchée dans les morts terrains puis par enlèvement progressif de la couche ainsi découverte.

A.4. Travaux de forage et de tir

Le forage des trous dans le massif s'effectue à l'aide des outils spéciaux ayant différents types d'actions.

Le mode de forage est choisi est en fonction des propriétés de la roche forée, La composition des équipements de forage s'effectue sur la base de la liaison technologique organisationnelle de processus de forage et de tir avec les travaux d'extraction et de chargement permettant de réduire au maximum les problèmes provenant après les tirs et atteindre la qualité exigée de fragmentation des roches avec les dépenses minimales.

La sondeuse est choisie suivant les caractéristiques des roches.

➤ Exigences technologiques des travaux de forage et de tir

Les travaux de forage et de tir dans la carrière doivent assurés :

- Une bonne et régulière fragmentation des roches.
- Une surface plate.
- Dimension rationnelle du tas des roches abattus.
- Effet sismique réduit.
- Dépense minimale et grande sécurité de travail.

Cette méthode possède les inconvénients suivants:

- Grand prix de revient d'extraction du minerai.
- Difficulté de réglage de la fragmentation des roches jusqu'aux dimensions nécessaires.
- Temps morts des engins miniers lors de la réalisation de tir.
- Faible sécurité lors de la réalisation des travaux de tir.

B. Les paramètres techniques de la méthode d'exploitation à ciel ouvert

Tableau II.3. Paramètres techniques de la méthode d'exploitation à ciel ouvert (minerai)

Désignations	Quantités	unités
Hauteur du gradin (Hg)	7.5	m
Longueur du trou (L_{tr})	8.5	m
Inclinaison du gradin (α_{tr})	80° à 85°	Degré
Diamètre de trou (D_{tr})	165	mm
Longueur du sous forage (L_f)	0.5 -01	m
Longueur de bourrage (Lb)	03	m
Ligne de moindre résistance (W)	04	m
Tonnage abattu théorique stérile	12000	t
Tonnage abattu théorique minerai	13200	t
Charge d'un trou (Q_u)	125	kg
Quantité globale des explosifs	5000	kg
Distance entre les trous (a)	04	m
Longueur de série de tir	76	m
Nombre de trous	40	Unité
Nombre de séries	02	Unité
Largeur de la banquette	04	m
Consommation spécifique minerai	189	g/t
Type de tir(Electrique)	-	-
Volume à tirer par trou	300	m ³
Volume à tirer par trou	810	t

Tableau II.4. Paramètres techniques de la méthode d'exploitation à ciel ouvert (stérile)

Désignations	Quantités	unités
Longueur de trou	03	m
Diamètre de trou	65	mm
Distance entre les trous	1.25	m
Nombres des trous	80	Unité
Longueur de bourrage	1.8	m
Quantité d'explosif par trou	2.5	Kg
Quantité globale des explosifs	200	Kg
Tonnage abattu globale	950	T
Consommation spécifique	210	g/t
Type de tir(Electrique)	-	-
D.E.I	10 à 20	U
Cordeau détonateur 12g	250	m
Marmanit/gélanit D50/65/30	200	Kg

C. plan de tir à ciel ouvert

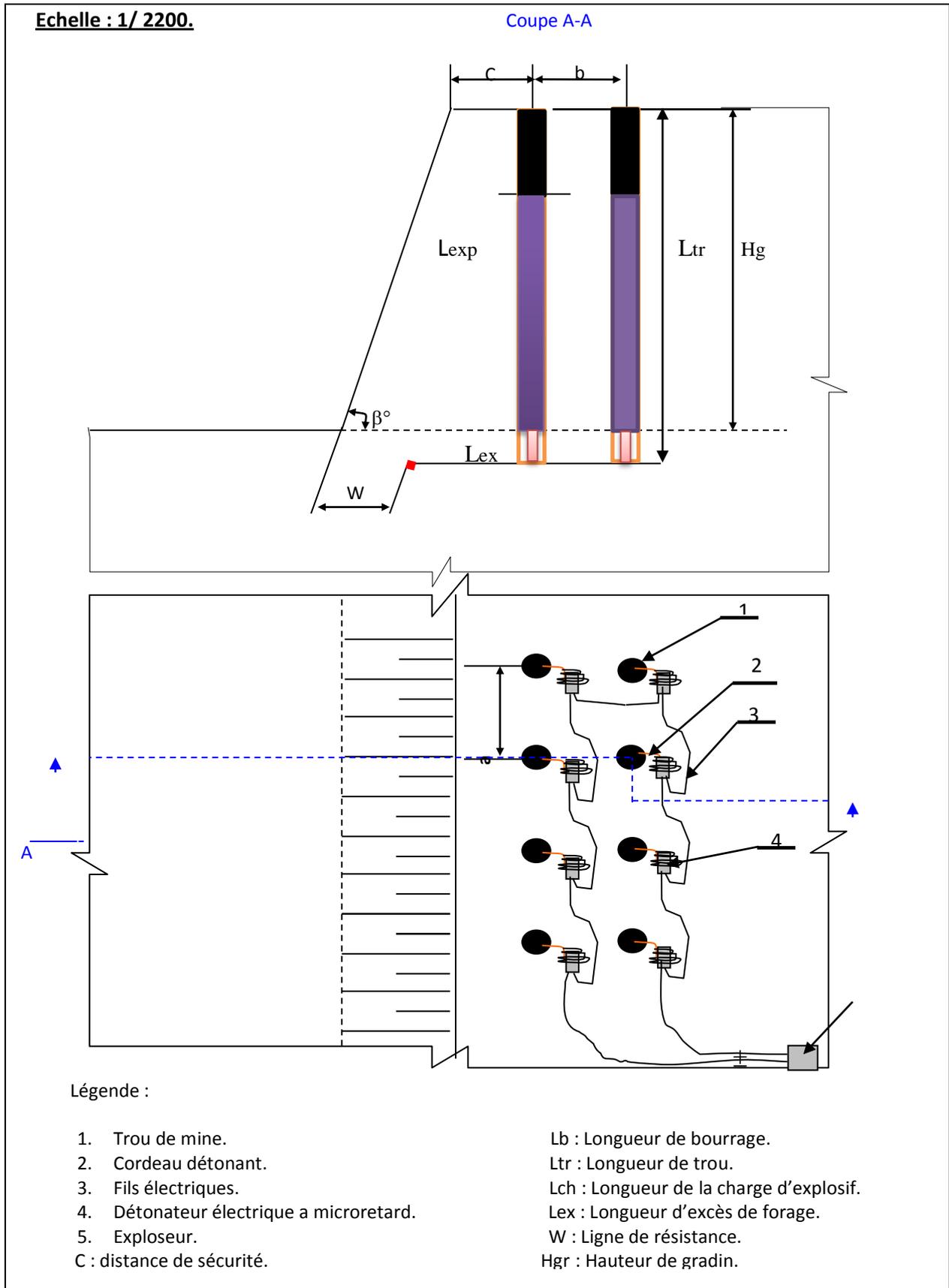


Figure II.4. Schéma de plan de tir à ciel ouvert

II.7.2.2. Exploitation souterraine

Le quartier souterrain englobe plus de 60% des réserves globales de la mine. L'exploitation souterraine est concentrée actuellement sur l'axe principale du 3ème étage (1105/1165), tandis que les travaux de développement se réalisent au l'axe Sud Est.

Au niveau du souterrain, différentes phases sont engagées :

- 1^{ère} phase (épuisée).
- 2^{ème} phase (épuisée).
- 3^{ème} phase (en exploitation et en développement).
- 4^{ème} phase (en projet).

1. Mode d'ouverture

L'ouverture est le creusement des ouvrages miniers donnant l'accès au gîte à partir du jour. Principalement, ces ouvrages doivent assurer dans les meilleures conditions techniques et économiques les processus suivants :

- La circulation d'air (aéragé)
- Le transport :
- ❖ des charges (minerai et roches stérile).
- ❖ du personnel ainsi que du matériel.

Le mode d'ouverture dépend essentiellement des facteurs :

- ❖ Forme et disposition du gîte.
- ❖ Conditions géographiques, géologiques et topographiques du gisement.

Le gisement de Boukhadra est considéré comme dressant, il est situé dans un relief montagneux, par conséquent le mode d'ouverture convenant est galerie au jour.

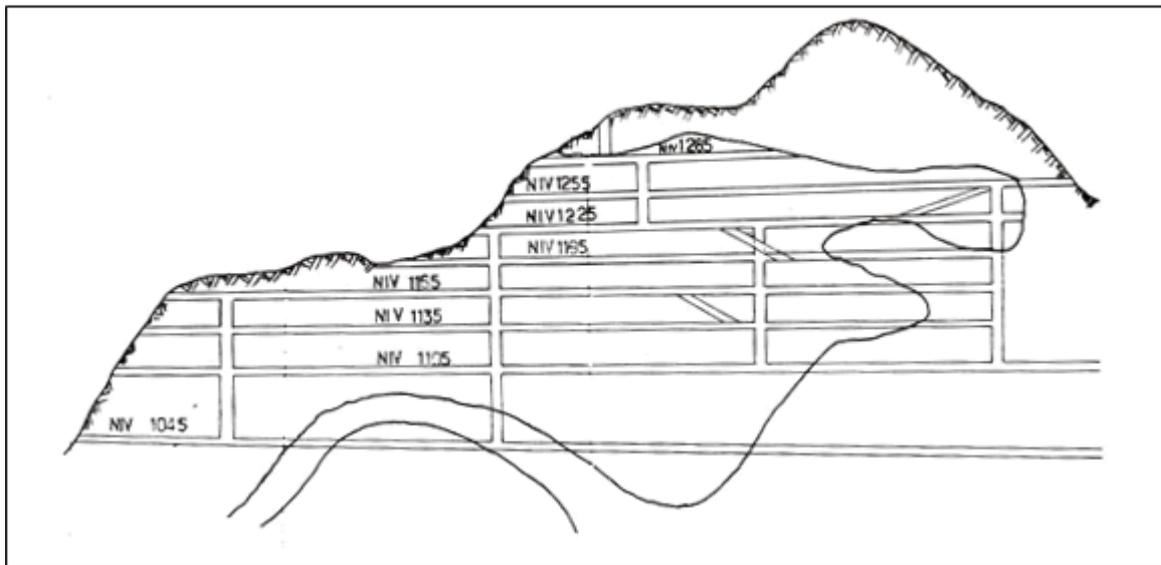


Figure II.5. Coupe schématique du mode d'ouverture en souterraine. [16]

La méthode appliquée est la méthode du sous niveau abattu dont l'ouverture est faite par des galeries au jour.

L'exploitation souterraine est effectuée suivant trois axes : axe Nord, axe Principale et axe Sud Est.

Où on a cinq phase d'exploitation qui contiennent plusieurs types d'ouvrages souterrains verticaux (cheminées), inclinés (montages, descenderies), horizontaux (galeries), dont on s'est intéressé à la galerie principale de la 3^{ème} phase d'exploitation.

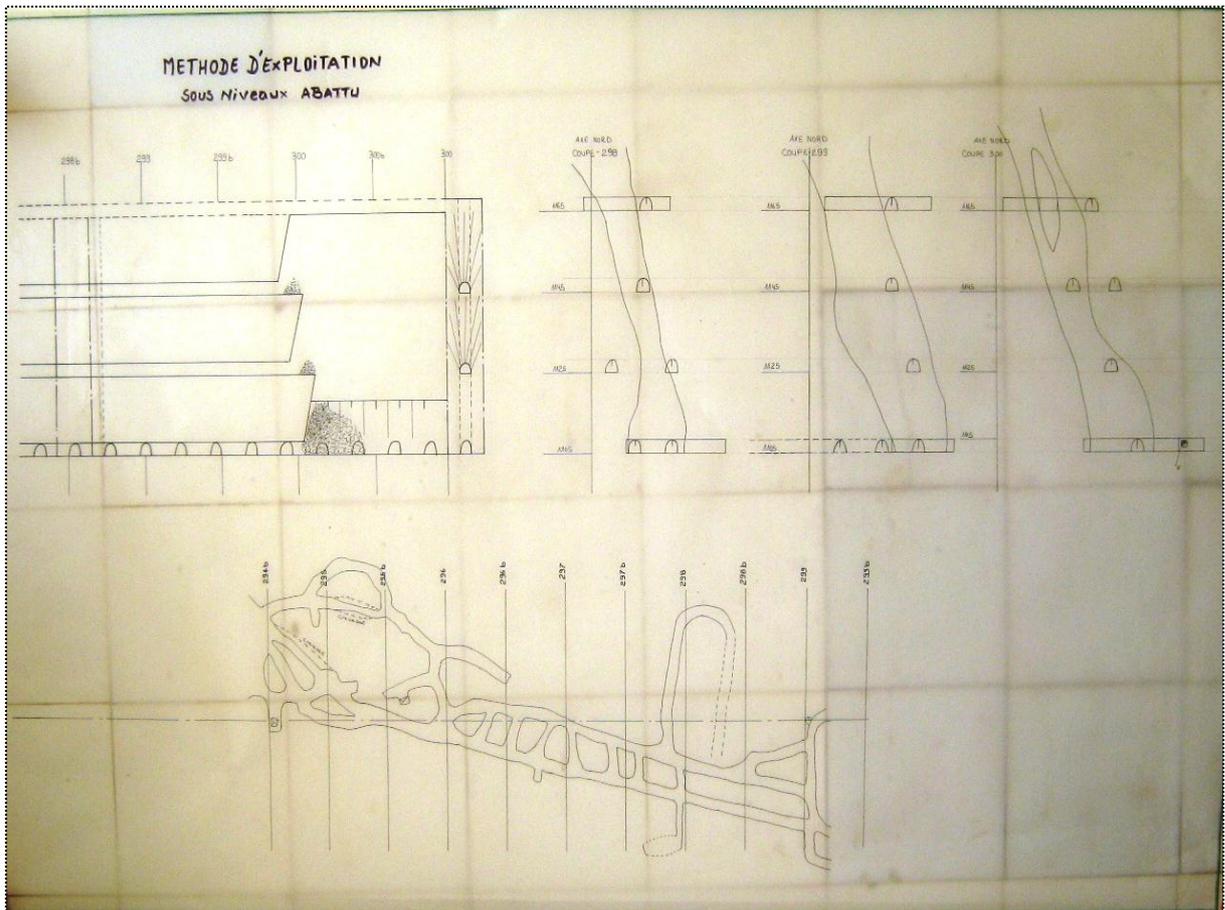


Figure II.6. Méthode d'exploitation sous niveaux abattu.

Tableau II.5. Les paramètres techniques de la méthode d'exploitation en souterraine (sous niveau abattu)

Paramètres techniques de SNA	Quantité	unité
Longueur de bloc (L_{bl})	10	m
largeur de bloc (l_{bl})	5	m
Hauteur d'étage (H_e)	60	m
Hauteur de fond de bloc(SNA)	10	m
Hauteur de sous étage (H_{se})	20à30	m
Longueur de corps minier en direction (L_{cm})	500	m
Puissance de corps minier	5 à 35	m
Angle de pendage (α)	50à 60	$^{\circ}$
Longueur moyenne de la chambre (L_{mch})	40	m
Largeur de pilier provisoire (l_{pp})	10	m
Epaisseur de la couronne (E_{cr})	8 à 10	m

Distance entre les recoupes (Dr)	7.5 à 10	m
Section des galeries et des recoupes (Sg)	10	m ²
Longueur des trous profonds (Ltrp)	10 à 25	m
Diamètre des trous profonds (Dtr p)	65	mm
Distance entre les bouts des trous profonds	1.8 à 2	m
Rendement du minerai par 1m des trous profonds (Q)	6.5	t/m ³
Distance de charge des trous profonds	1000 à 1100	Kg/m ³

A. Situation de la galerie principale

Cette galerie est située à l'axe Nord, au niveau 1105m et elle constitue le niveau de base de la 3^{ème} phase et le niveau de tête de la 4^{ème} phase.

B. Importance de la galerie principale

La galerie principale du niveau 1105 comme son nom l'indique est utilisée pour le roulage (le transport du minerai exploité), l'aération, la circulation des ouvriers et du matériel nécessaire pour les différents travaux de mine et elle constitue aussi le seul accès à la 3^{ème} phase au niveau des trois axes.

C. Description de la galerie principale

La galerie principale 1105 est creusée au stérile, c'est une galerie au jour horizontale et elle a la forme d'une voûte.

La galerie du niveau 1105 m, traverse un terrain présentant une stratification subverticale avec différentes épaisseurs des couches, présentée par la figure II.7.

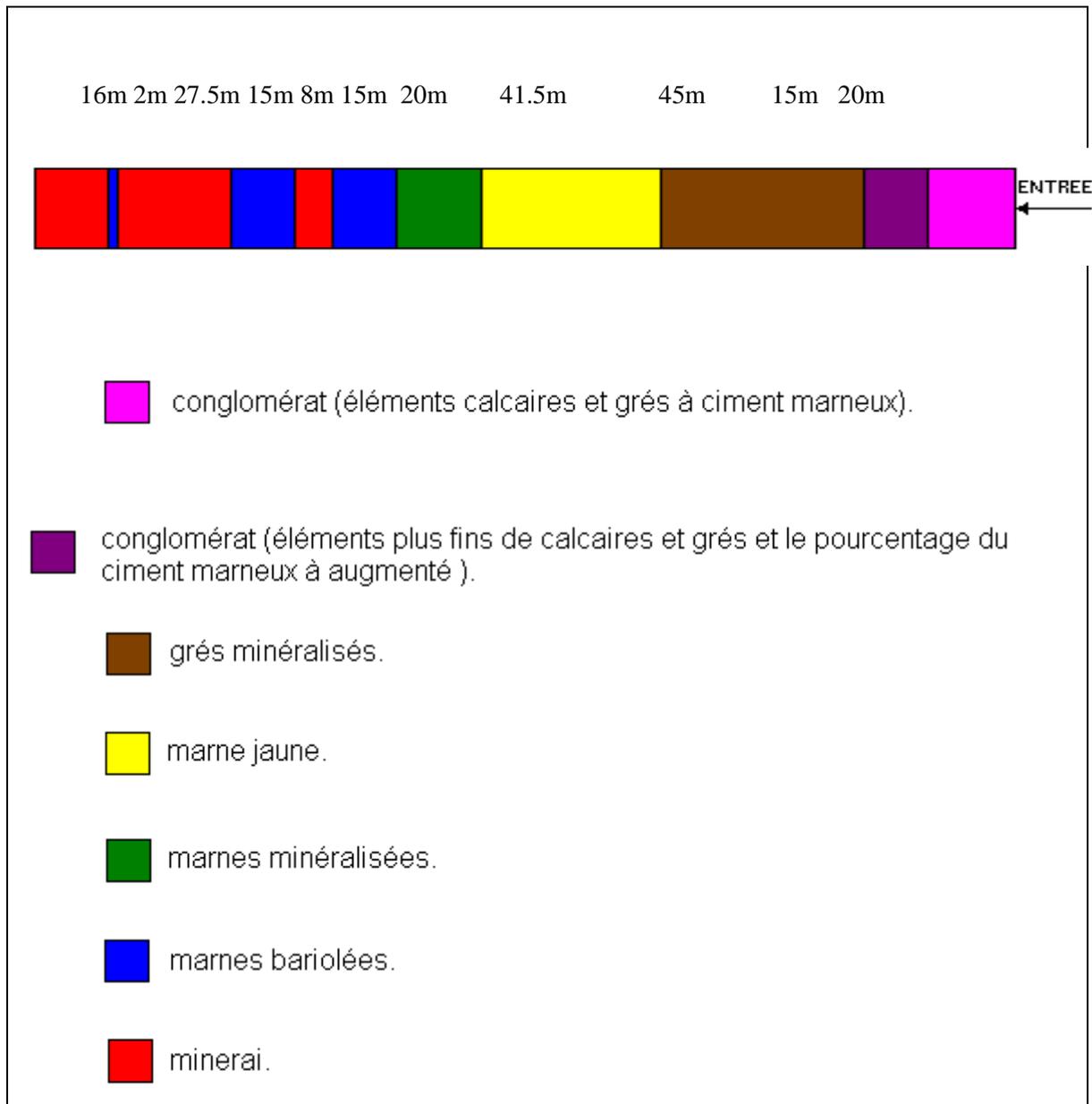


Figure II.7. : Présentation le tracé de l'ouvrage. (La galerie principale du niveau 1105 m).

Tableau. II.6. les dimensions de la galerie principale du niveau 1105 m

Hauteur moyenne (m)	3.5
Largeur moyenne (m)	4
Section (m ²)	12-13
Longueur (m)	850

Le tableau.3 donne une quantification des discontinuités (failles, fissures) dans le tronçon étudié (la galerie principale du niveau 1105 m).

Tableau. II.7. failles et fissures existantes dans la galerie principale du niveau 1105 m [17]

Discontinuités	Direction (grade)	Pendage (°)	Ouverture (cm)	Remplissage	Distance de l'entrée (m)
-Faille	310 nord	-	-	calcite	39
-Faille	280 nord	-	-	calcite	40.5
-Faille	Nord sud	-	-	calcite	69
-Faille	180 nord	-	-	calcite	74.5
-Des petits fissures	Différentes directions	-	-	calcite	-
-Faille	350 nord	10°ouest	4	Calcite	77
-Des petits fissures	Différentes directions	-	-	Calcite	-
-Faille	330 nord	45°	40	calcite	91
-Des petits fissures	Différentes directions	-	-	Calcite	-
-Faille	330 nord	-	-	calcite	99
-Faille	330 nord	-	-	Calcite	107
-Faille	330 nord	-	-	calcite	115
-Faille	330 nord	-	-	Calcite	123
-Faille	330 nord	45°	40	Calcite	126
-Faille	Nord sud	70°	-	Calcite	156

D. Paramètres de plan de tir primaire (niveau 1105)**Tableau II.8.** Paramètres de plan de tir pour le minerais

Paramètres techniques de tir	quantités	unité
Hauteur du niveau	20	m
Longueur de trou	1.6 à 3	m
Longueur totale du trou	32 à 60	m
Nombre de trous	20	Tous
Nombre de séries	1	-
Diamètre de trou	64	mm
Longueur du bourrage	0.5 à 01	m
Tonnage abattu théorique	1650	T
Ligne de moindre résistance	02	m
Puissance de gisement	15-20	m
Charge d'un trou	70 à 100	Kg
Quantité global d'anfomil	1200	Kg
Quantité global de la marmanite	200	Kg
Consommation spécifique d'explosif	275	g /t
Longueur du cordeau détonateur	250	m
Nombre des amorces (D.E.R et D.E.I)	22	Pièces

Tableau II.9. Paramètres de plan de tir pour le stérile

Paramètres techniques de tir	quantités	unité
Section de la galerie	12	m ²
Diamètre du trou	40	mm
Longueur du trou	1.6	m
Distance d'avancement	1.5	m
Nombres des trous par front	25	Trou
Tonnage abattu théorique	52	T
Quantité d'explosif par front	25	Kg
Consommation spécifique d'explosif (Qp)	450 à 500	g/t
Nombre de D.E.R	25	Pièce
Nombre de front	05	Front
Gélanit/marmanit	150	Kg
D.E.R	150	Pièce
D.E.I	02	pièce

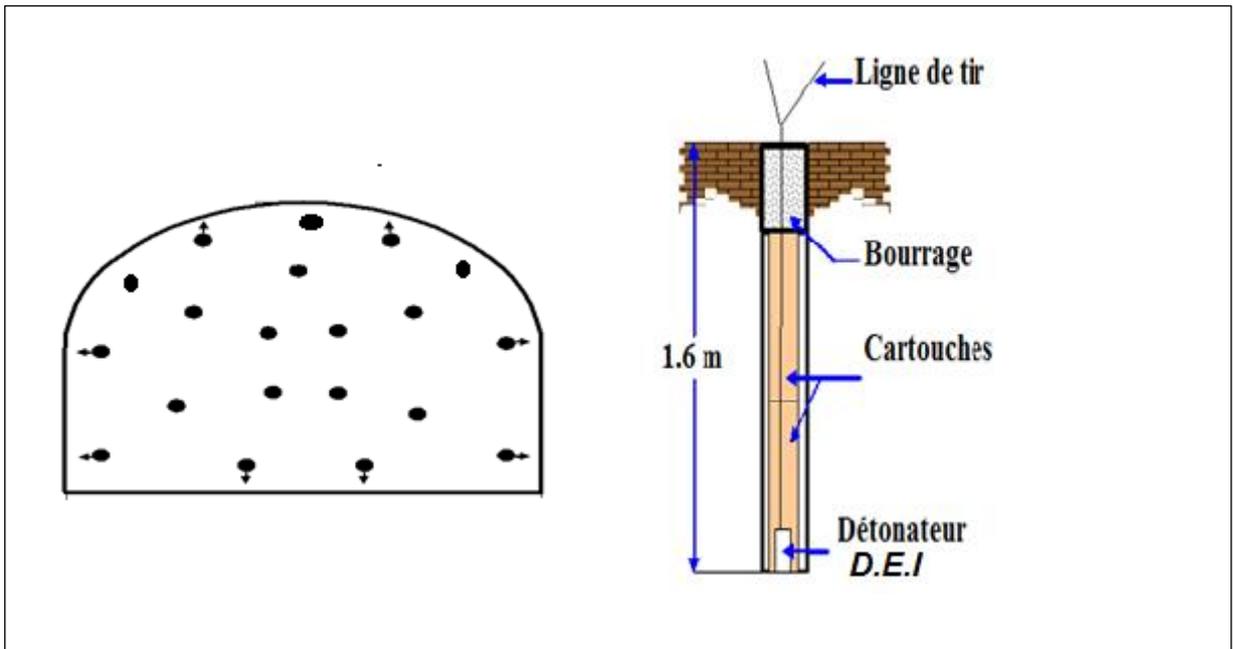


Figure II.8.schéma d'un plan de tir souterrain en éventail.

Conclusion

Le gisement de Boukhadra est exploité en souterrain et à ciel ouvert.

Pour la partie souterraine permet d'étudier la galerie de niveau 1105 m et les niveaux supérieurs, l'exploitation dans ce niveau est faite par méthode de sous niveau abattu avec l'ouverture par galerie aux jours. Le chargement et le transport des minéraux utiles sont assurés par des chargeuses transporteuses.

Pour la partie à ciel ouvert l'ouverture du gisement par des demi-tranchées avec des gradins de hauteurs 7.5m et un angle de talus de 80-85.

***Chapitre III : Analyse des vibrations
sismiques et acoustiques du tir***

« Qui va lentement va surement »

Introduction

L'exploitation des carrières et mines de roche massive et le besoins d'abattage lors des chantiers de travaux public, font souvent appel à l'utilisation d'explosif.

L'énergie délivrée par l'explosif, afin d'extraire et de fragmenter la roche ou les matériaux, s'accompagne de phénomène induits, tels que les vibrations dans le sol et des surpressions aériennes, qu'ils une influence sur les populations et constructions proches.

Le mineur doit donc optimiser l'extraction et la fragmentation des matériaux, tout en limitant les nuisances, en respectant les textes réglementaires et les cahiers des charges.

Ce chapitre présente : les mesures des vibrations sismiques et acoustiques provoquées par les tirs de mines et leurs effets sur les personnes et les constructions dans plusieurs cas de configuration de plans de tirs.

III.1. Réglementation concernant les vibrations sismiques et acoustiques

Les mines et les carrières sont soumises à une réglementation sur les vibrations sismiques et acoustiques produit par les tirs de mine, cette réglementation comprend des textes réglementaires comme l'arrêt du 22 septembre 1994, des recommandations et des normes.

III.1.1. Réglementation concernant les vibrations

Pour les valeurs de nuisances sismiques, nous avons retenu, les valeurs de vibrations données par la réglementation internationale, et en particulier celles plus sévères de la circulaire française de l'arrêt du 22/09/1994 relatif aux exploitations des carrières et mines qui dans son annexe II précise la méthode de mesure des vibrations dues aux tirs de mine et l'utilisation d'un abaque de fonction de pondération et comparaison à la limite de 10mm/s.

La vitesse particulière pondérée des vibrations dues aux tirs mesurées selon les lois axes de la construction, ne doivent pas dépasser 10 millimètres par seconde dans les constructions avoisinantes.

L'application des seuils doit se faire sur le signale probablement pondéré, ceci est généralement réalisé par des logiciels de traitement des signaux fournis avec les appareils de mesure.

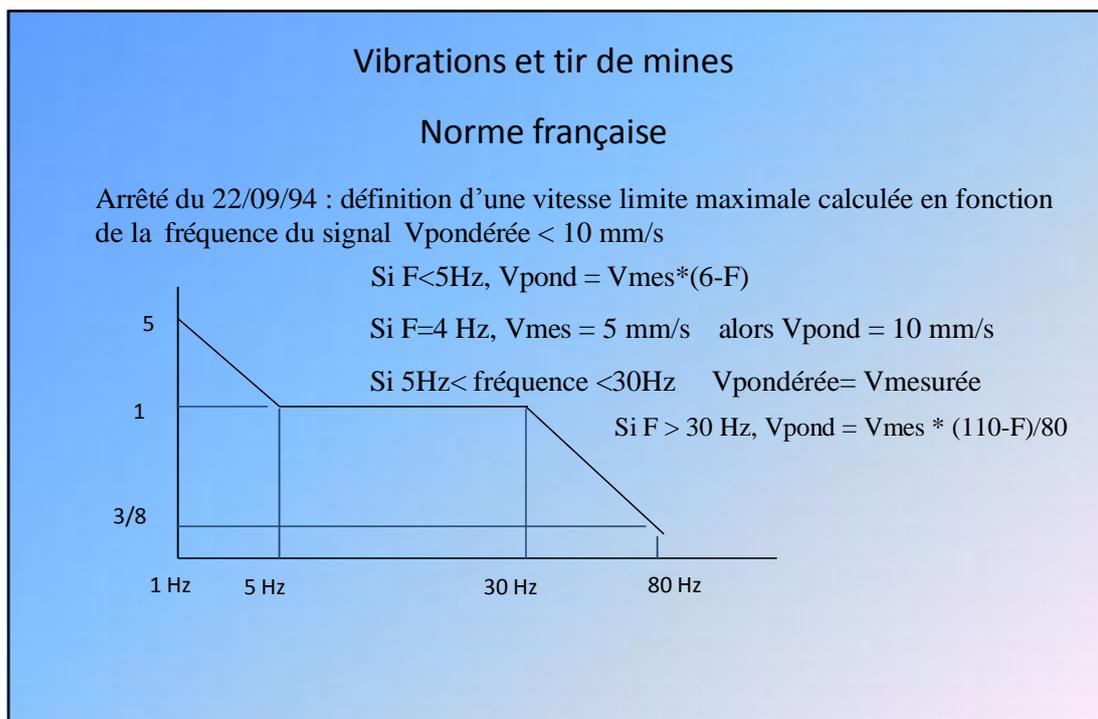


Figure III.1. vibration de tir de mine norme française. [19]

III.1.2. Réglementation concernant la surpression aérienne

D'après le texte réglementaire Algérienne spécifique, et après consultation puis recommandation des divers organismes de tutelle, nous avons retenu les valeurs limites communément admises dans la réglementation internationales, et en particulier, celles prises en compte dans les documents techniques de références tels que le fascicule du CETU << Environnement du dossier pilote des tunnels >>, et le GFEE, gestion des plaintes de riverains lors de tir de mine.

Ces valeurs sont rappelées dans la circulaire de juillet 1996 pour les carrières, qui préconise un seuil de surpression de 125 dB pour les habitations et de 145 dB pour les personnes, valeurs retenues également dans le guide technique CFRT de 2002 (terrassément à l'explosif dans les travaux rentières).

Il est recommandé de respecter un niveau limité de pression acoustique crête de 125 dB.

En règle générale, ce seuil est une amplitude de vitesse de vibration V (mm/s) associée d'une gamme de fréquence d'auscultation f (Hz).

- ❖ Pour une galerie sans soutènement $V < 50 \text{ mm/s}$ et $f > 150 \text{ Hz}$.
- ❖ Pour une galerie avec soutènement $V < 15 \text{ mm/s}$ et $20 \text{ Hz} \leq f \leq 50 \text{ Hz}$.

Il peut s'exprimer également accélération (m/s^2) pour les équipements fixes ou en première analyse, on s'inspirera des recommandations de l'AFTES qu'intéressent essentiellement les constructions courantes à usage d'habitation :

- ❖ $V < 10\text{mm/s}$ faible probabilité de dommage.
- ❖ $10\text{mm/s} < V < 30\text{mm/s}$ nécessité d'un bon contrôle probabilité accrue de réclamations.
- ❖ $V > 30\text{mm/s}$ non recommandé en zone habitée.

Ces seuils peuvent être modulés en fréquence si la gamme en fréquence de coupure usuelle est de 10 Hz et 100 Hz.

Pour les moyens de terrassement mécanique autre que l'explosif, il n'est pas d'usage de réaliser des essais préalables, car ces matériels résultent bien souvent d'un choix de l'entreprise chargée de la réalisation des travaux. Les fréquences émises par ces matériels sont généralement plus basses et plus nocives pour l'environnement et à ce titre les seuils de vitesse admissible sont inférieurs.

III.1.3. Loi de Chapot

Pierre Chapot, grâce à l'exploitation de nombreuses mesures in situ, a écrit une loi de propagation des ondes dans le sol, mettant en relation la puissance des charges d'explosifs avec les vitesses particulières mesurée sur les structures. Cette loi très utile permet de prédire l'intensité des vibrations à un endroit situé à une certaine distance de la source de vibration. Cette loi très vite représenté des intérêts évidents pour la conduite des travaux en toute sécurité pour l'environnement. [18]

III.1.3.1. Formule de la loi de Chapot

Pierre Chapot a largement contribué au développement des connaissances dans le domaine de la géophysique appliquée aux travaux publics avec une participation remarquable de ses travaux de recherches dans le domaine de propagation des vibrations dans le sol, grâce à l'écriture d'une équation mettant en relation la vitesse de vibration mesurée à une distance D et l'énergie d'un tir d'explosif.

La loi de Chapot s'écrit ainsi :

$$V = K \left[\left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right) \right]^{-1.8} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

V : la vitesse de vibration en mm/s.

D : la distance tir- capteur en m.

Q : la charge unitaire instantanée d'explosif en kg.

K : Le coefficient de site, varie de 300 à 6000 avec une valeur moyenne de 2500.

Cette loi, fondatrice pour la connaissance de la propagation des vibrations dans le sol se transmettant aux bâtiments ou aux ouvrages tels que les monuments historiques, demeure l'outil de prédiction et de gestion des vibrations de référence pour les tirs de mine.

Elle-même pu trouver des déclinaisons pratiques pour la prédiction des vibrations liées aux travaux utilisant des brise-roches hydrauliques, des captures vibrants, des batteurs de palplanche ou même des vibrations liés à la circulation routière. Aujourd'hui, la connaissance sur les vibrations s'est affinée. Elle trouve même des applications dans le domaine de la protection de la biodiversité animale, car les animaux sont également très sensibles aux ondes.

III.1.4.Évaluation d'impact vibratoire des tirs de mines

Le niveau génère par un tir de mine et mesure sur les fondations d'un immeuble dépend de trois facteurs principaux globalement être résumés ainsi :

- ❖ La distance entre le tir et l'ouvrage.
- ❖ La quantité d'explosif mis à feu simultanément.
- ❖ Le rendement de tir.

En route, en plus de ces trois facteurs, le niveau de vibration dépendra ainsi de :

- ❖ La nature des terrains.
- ❖ La structure géologique.
- ❖ La géomorphologie du site.

III.2.Mesure des vibrations sismiques et acoustiques

III.2.1. Méthodologie pour étude des vibrations sismiques et acoustiques

III.2.1.1. Définition des structures à étudier

Les structures à étudier et à expertiser seront définies en fonction de leur nature (type de construction) et de leur rapport au projet.

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

Les ouvrages pour lesquels des problèmes de vibrations peuvent se poser sont nombreux et variés :

- ❖ Les maisons d'habitations.
- ❖ Les ponts, viaducs et passerelles.
- ❖ Les murs de soutènements.
- ❖ Les barrages.
- ❖ Les galeries souterraines. [20]

III.2.1.2. Positionnement des capteurs

Les capteurs placés sur les structures à étudier des géophones tri directionnels (2 horizontaux et 1 verticale).

Le conditionnement des géophones (voir tableau des paramètres techniques de l'appareillage), permettre de placer les géophones sur toutes les formes de support (verticale et horizontale).

Les géophones utilisés ont des sensibilités de quelques de dizaine de mV (mm/s).

Les types des géophones seront définis en fonction de leur fréquence propre qui correspond à la limite inférieure des fréquences directement mesurables. [20]

III.2.1.3. L'implantation des forages et des tirs expérimentaux

L'implantation des forages destinés à recevoir les charges explosives sera en fonction de :

- ❖ La nature des terrains traversés par le projet.
- ❖ La structure géologique et géomorphologique du site.
- ❖ La vulnérabilité des constructions.
- ❖ La proximité des structures.

Un facteur important de fiabilité des essais est de représentativité des forages dans lesquels les tirs selon réalisés, il convient donc de réaliser les forages en nombre suffisant pour prendre compte toutes les anomalies structurales susceptibles de perturber la propagation des ondes sismiques. [20]

III.2.1.4. Définition des charges d'explosifs

- A. **Abattage** : tir avec présence d'une surface verticale de dégagement (front de taille), consommation d'explosif de 250 à 600 g/m³.
- B. **Tir de mine** : absence de surface de dégagement verticale, tir sur des hauteurs limites (10m) et sur une surface (découverture, travaux public, tranchées), consommation d'explosif de 350 à 800 g/m³ (140 à 320 g/t).
- C. **Tir souterraine** : surface de dégagement au minimum, nécessité de créer de surface libre lors de la foration, consommation d'explosif de 800 à 3000 g/m³ (320 à 900g/t).

Le positionnement des charges d'explosifs dans les forages sera en fonction des caractéristiques du massif identifiées par une mesure de vitesse micro-sismique.

La quantité d'explosif à mettre en œuvre sera en fonction :

- ❖ Des niveaux prévisionnels de vibrations admissibles sur les structures plus sensibles en fonction de leur nature et leur distance.
- ❖ Des connaissances obtenues par des statiques établies sur des opérations antérieures.

III.2.1.5. Enregistrement et analyse des vibrations sismiques et acoustiques

Les études et contrôle des vibrations que nous préconisons dans l'environnement des chantiers d'abattage à l'explosif nécessitent des appareillages technologiquement adaptés, pour réaliser des études rigoureuses.

Les mesures de vibrations dans l'environnement des chantiers d'abattage à l'explosif sont réalisées avec des capteurs de vitesse de vibrations constitués par des géophones qui restituent un signal sur une plage de fréquence relativement large entre quelque Hertz et centaine Hertz.

Le critère de vibration utilisé est la vitesse de vibration zéro-crête, ce critère est apparu très rapidement insuffisant pour évaluer le niveau de risque quant aux dommages sur les constructions.

III.2.1.6. Estimation prévisionnels des charges

Expérimentalement on constate que le niveau zéro-crête de vibration est donné par la relation suivante :

$$V = K \left[\left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right) \right]^{-1.8} \quad (\text{mm/S}) \quad (\text{I.02})$$

V : vitesse de vibration (mm/s).

D : distance tir-capteur en m.

Q : charge unitaire instantanée d'explosif en Kg.

K : coefficient de site (300 à 6000). [20]

III.2.1.7. Contrôle pendant les travaux

Les contrôles réalisés sur le chantier des travaux d'abattages ont pour objectif :

- ❖ Assurer que les critères de vibrations proposés par l'entrepreneur, en conformité avec les prescriptions contractuelles et acceptées par le maître d'œuvre sont respectés.
- ❖ Permettre à adapter les plans de tirs pour optimiser la productivité du chantier.
- ❖ Présenter des résultats de contrôle inattaquable sur le plan de la fiabilité.

Les contrôles sont réalisés à partir d'installations fixes en fonctionnement permanent, afin de détecter toutes les vibrations susceptibles d'affecter la construction (vibration engendrée par les tirs du chantier ou vibrations dont l'origine ne serait pas les tirs de mines).

Les résultats de mesures sont immédiatement disponibles après chaque tir avec prise en compte des fonctions de pondérations, l'information fournie immédiatement permet d'une part au mineur de faire un diagnostic sur l'adaptation éventuelle à prendre en compte pour le tir suivant, d'autre part de garantir des tiers que les résultats fournis ne peuvent en aucun cas être falsifiés pour masquer une dérive éventuelle.

Les résultats sont imprimés sur un support papier qui permet de laisser une trace non contestable de résultat.

III.2.2. Appareillage de mesure

Les mesures ont été réalisées avec un enregistreur DELTA SEIS 1 (N° de série 112), équipé de capteur de vibration sismique types géophone tri directionnels et de capteur de surpression aérienne, calibrage homologué NE et de moins de 12 mois.

Tableau III.1. Les caractéristiques techniques du DELTA SEIS 1

Paramètres	Performances
N° de série	DELTA SEIS 1 n° 112
Gamme de mesure sismique	De 0 à 30 mm/s, réglage par pas de 0.1 mm/s.
Seuil de déclenchement	0.5 mm/s
Capteur sismique	Géophone tridimensionnels 4.5 Hz corrigée électriquement à 2Hz.
Gamme de mesure acoustique	110 à 147 dB, réglable par pas de 1 dB, 0.06 mbar
Seuil de déclenchement acoustique	115 dB
Durée d'acquisition des mesures	2 à 14s réglable par pas de 2s
Acquisition	2048 informations/voie/seconde, (Hz)
poids	-Delta seis 1 : 5 Kg. -Delta seis 2 : 9 Kg.
Température d'utilisation	-10 c à 40 c.
Alimentation	-Par chargeur externe pour Delta seis 1. -Directement sur secteur pour Delta seis 2.
Logiciel d'exploitation des données.	Logiciel Delta seis ou White 2003 (affichage des signaux, calcul de pondération selon l'arrêt du 22/09/1994

Paramètres retenus pour ces tirs :

- ❖ Durée d'acquisition 06s.
- ❖ Seuil de déclenchement sismique : 0.5mm/s.
- ❖ Seuil de déclenchement : 115 dB.



Figure III.2. Appareil de mesure DELTA SEIS 1 (géophone tri directionnels) [19].

III.3. Présentation des résultats des tirs

III.3.1. Structure étudié

Notre étude permet d'étudier l'effet de tir sur la stabilité de la mine de Boukhara, cas de BK II qui contient deux parties :

- ❖ Partie souterraine : l'étude de niveau 1105 et les niveaux supérieurs et les niveaux inférieurs (BK II).
- ❖ Partie à ciel ouvert : les gradins de niveau (1075, 1090, 1105, 1120).

III.3.2. Positionnement des capteurs

Les capteurs sont placés :

- ❖ Station air comprimé.
- ❖ Château d'eau.
- ❖ Galeries souterraines (niveaux 1105 et les niveaux supérieurs).

Les caractéristiques des capteurs est présentent par tableau ci-dessus (voir tableau III.1).

III.3.3. plans des tirs en souterraine et à ciel ouvert

Tableau III.2. Paramètres techniques de tir à ciel ouvert.

Désignation	Quantités	Unité
Hauteur du gradin	7.5	m
Longueur du trou	8.5	m
Inclinaison du gradin	80 à 85	Degré
Inclinaison du trou	90	Degré
Diamètre du trou	165	mm
Longueur de bourrage	3	m
Nombre de trous	40	Unité
Charge d'un trou	125	Kg
Quantité globale d'explosif	5000	kg

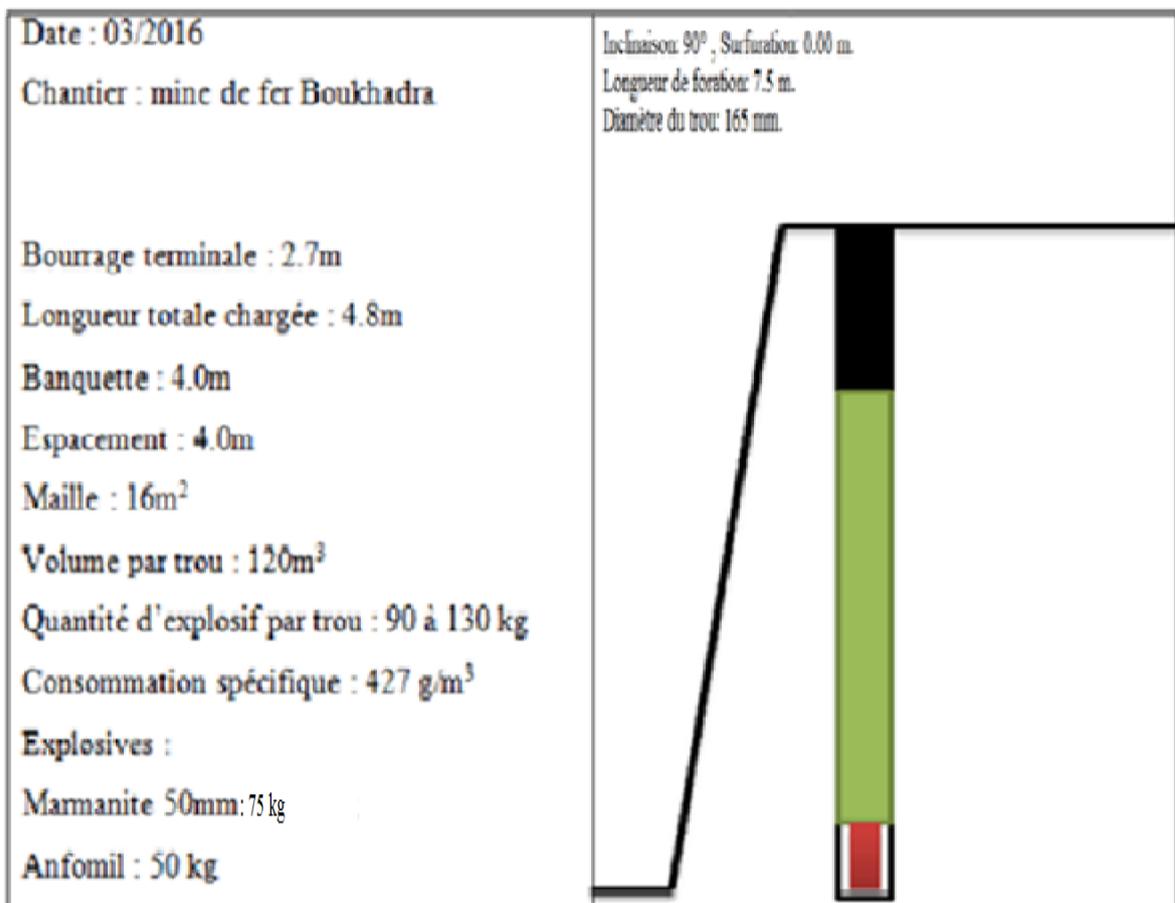


Figure III.3.Fiche technique d'un plan de tir à ciel ouvert

Tableau III.3. Paramètres techniques de plan de tir en souterraine

Désignation	quantité	Unité
Nombre du trou	20	Trous
Diamètre du trou	64	mm
Longueur du trou	1.6 à 3	m
Longueur du bourrage	0.5 à 1	m
Charge d'un trou	70 à 100 kg	Kg
Charge globale d'explosif	1400	Kg
Anfomil	1200	Kg
Marmanit	200	kg

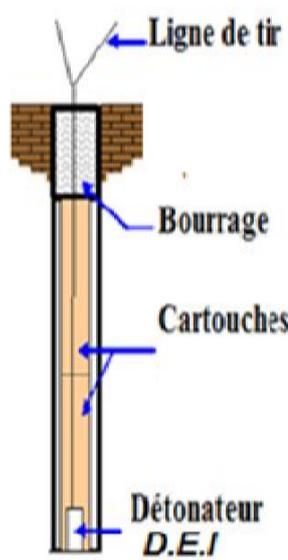
<p>Date : 03/2016</p> <p>Chantier : mine de fer Boukhadra.</p> <p>Bourrage terminale : 0.8 m</p> <p>Longueur totale chargée : 44 m</p> <p>Banquette : 4.0 m</p> <p>Espacement : 4.0 m</p> <p>Quantité d'explosif par trou : 70 à 100 kg</p> <p>Consommation spécifique : 189 g/m³</p> <p>Explosives :</p> <p>Marmanite 50mm:10 kg</p> <p>Anfomile : 60 kg</p>	<p>Inclination: 90°, Surforation: 0.00m</p> <p>Longueur de foration: .</p> <p>Diamètre : 64mm</p> 
--	--

Figure III.4. Fiche technique de plan de tir en souterraine.

III.3.4. Enregistrement et analyse des vibrations sismiques et acoustique

Les résultats des vibrations sismiques et acoustiques qui ont été obtenus par les enregistrements sont présentés dans une fiche technique (Figure ci-dessous).

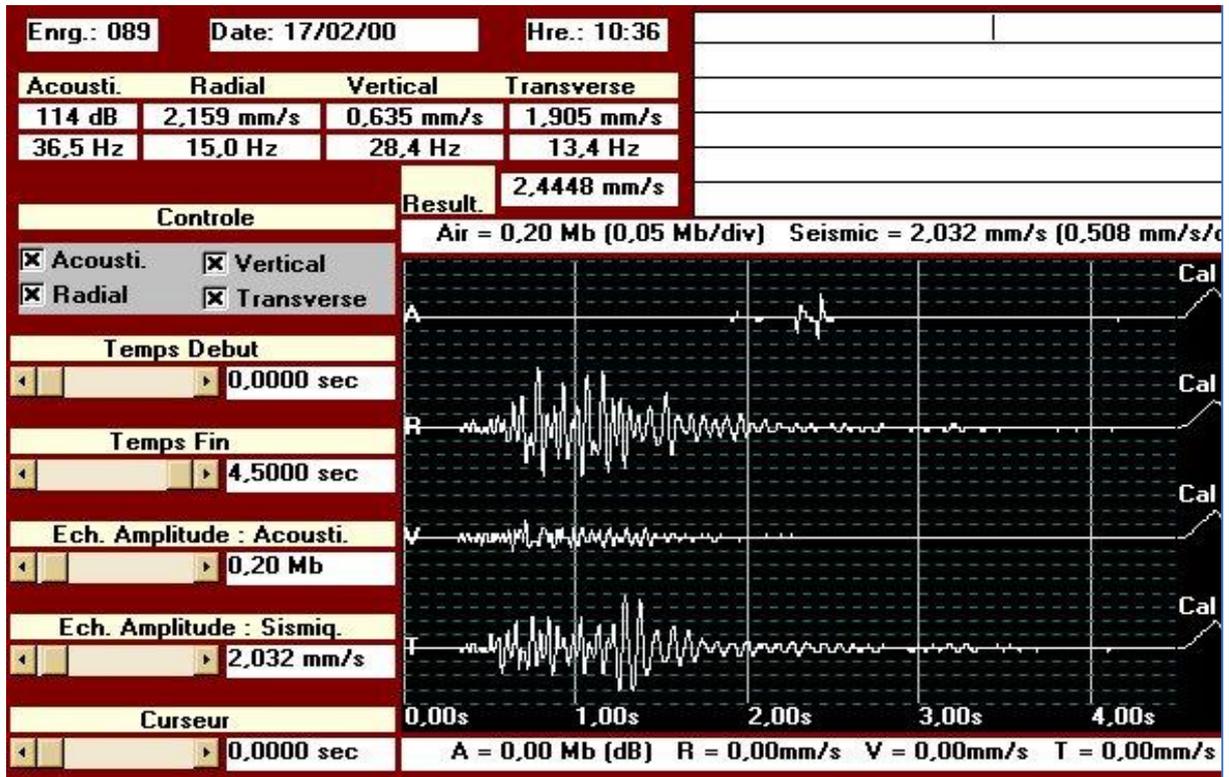


Figure III.5. Fiche technique des résultats du tir [19]

Selon les modèles de sismographes, il existe plusieurs façons de visualiser le résultat d'enregistrement :

- ❖ Sous forme de ticket imprimé par l'appareil, suite à l'enregistrement d'un événement ou sur demande, le capteur imprime un papier de format inférieur à A₅, il s'agit des valeurs maximales enregistrées sur chaque voie (ou direction).

L'utilisation ne peut pas voir la forme de signal sismique.

- ❖ Sous forme de représentation graphique du signal.

Tableau III.4. Les résultats des vibrations sismiques et acoustiques

Essai	Référence appareil	Lieu de mesure	Charge Instantanés (Kg)	Distance(m)	Vr(mm/s)	Vv(mm/s)	Vt (mm/s)	Acoustiques (dB)
1	112b T063	BK 1090	77.5	281	3.35	1.94	2.90	144
2	112b T064	BK 1120	82.5	125	2.03	1.56	2.38	115
3	112b T065	BK 1090	130	177	16.33	9.57	8.78	131
4	112b T066	Transfo(1090)	120	690	1.06	1.17	1.11	136
5	112b T067	Transfo (1105)	120	690	1.08	1.19	1.11	136
6	112b T068	Chat d'eau (1105)	82.5	710	0.24	0.22	0.22	122
7	112b T069	Chat d'eau (1090)	82.5	730	1.03	0.54	0.79	108
8	112b T070	Chat d'eau(1120)	77.5	678	1.48	0.92	0.67	131
9	112b T071	S.A.C (1105)	93.75	708	1.43	0.97	1.22	127
10	112b T072	S.A.C (1090)	77.5	695	0.38	0.78	0.27	108
11	112b T073	S.A.C (1120)	120	700	0.29	0.49	0.25	127
12	112b T074	S.A.C (1095)	156.25	700	1.08	1.05	2.54	106
13	112b T075	S.A.C (1135)	77.5	700	1.14	0.37	0.70	106
14	112b T076	S.A.C (1075)	152.5	700	0.21	0.51	0.14	106
15	112b T077	S.A.C (1120)	152.5	700	0.84	0.54	1.60	116
16	112b T078	S.A.C (1135)	77.5	700	0.33	0.83	0.44	108

Les résultats des vibrations sismiques mesurées à proximité de la maison habitée la plus proche, c'est-à-dire à plus de 700m des endroits de tir d'abattage ou de terrassement, ont tous été inférieurs à 10mm/s, valeur limite définie par l'arrêt de 22/09/1994 pour les tirs de mines réalisés dans les carrières et les mines de roche massive pour une bande de fréquence de 5 à 30 Hz.

Les résultats des vibrations sismiques et acoustiques mesurées au niveau des gradins de BK II sont tous loin au seuil de réglementation (10mm/s pour les vibrations sismiques et 125dB pour les vibrations acoustiques).

En effet, toutes les valeurs maximales des vibrations sismiques sont comprises entre 0.14 et 3.35 mm/s, et donc très loin des valeurs minimales des valeurs admises dans la construction (selon la courbe norme françaises).

La surpression acoustique est généralement inférieure à 125 dB, c'est-à-dire en dessous de la valeur limite admise pour les tirs de mines réalisés dans les carrières et mines de roche massive (125dB).

Les mesures les plus élevées pour un même tir, (1.48mm/s et 131 dB) ont été enregistrées à une distance de 678m du tir d'abattage primaire effectué sur le front BK Amont 1120, ces mesures restent toutefois bien en dessous des valeurs réglementaires.

Des points de mesures à des distances d'enregistrement inférieur à 300m ont été sélectionnés durant les tirs.

Seul le 3^{ème} tir avec une charge unitaire de 130 kg distant de 177 m a atteint la limite réglementaire pour les risques de dommages sur bâtiments (enregistrement 112 T63 et 112 T65), cet enregistrement n'est présent qu'à titre illustratif, puisque la distance d'enregistrement sort des conditions réglementaires.

En conclusion, toutes les valeurs mesurées sont dans la bande des limites de dégât même de celles des structures en pierres sèches pour lesquelles la valeur de référence est de 10mm/s pour les vibrations sismiques et 125 dB pour les vibrations acoustiques.

III.3.5. Estimation prévisionnelles des charges

III.3.5.1. Calcul le coefficient du site K

L'étude pratique des vibrations dans le cas des tirs des mines se fait par la mesure de la vitesse particulière à une distance donnée, on dispose trois géophones orthogonaux (deux horizontaux : un longitudinal et l'autre transversale, et un verticale), pour mesurer les trois composantes de la vitesse particulière, on calcule ensuite la vitesse particulière suivant la formule :

$$V_p = \sqrt{V_l^2 + V_t^2 + V_v^2} \quad (\text{mm/s}) \quad (\text{III.03})$$

La méthode qui consiste à utiliser pour résultante la racine carré de la somme des vitesses maximales mesurés sur les trois composantes est erronée car ces vitesses ne sont pas maximales au même instant, Donc il faut utiliser la valeur maximales de la composante définit à l'instant t par la formule ci-dessus. [15]

La vitesse particulière calcule suivant la formule :

$$V = K \left[\left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right) \right]^{-1.8} \quad (\text{mm/s}) \quad (\text{III.04})$$

$$K = V \left[\left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right) \right]^{-1.8} \quad (\text{III.05})$$

V : vitesse de vibration en mm/s.

D : distance capteur-tir en m.

Q : charge instantané d'explosif en Kg.

Tableau III.5. Calcul le coefficient de site K.

mesure	Distance (m)	Charge instantanés (kg)	Vitesse particulaire (mm/s)	K
112b T063	281	77.5	3.35	1709.18
112b T064	125	82.5	2.38	266.82
112b T065	177	130	16.33	2274.37
112b T066	690	120	1.17	2027.73
112b T067	690	120	1.19	2062.39
112b T068	710	82.5	0.24	613.81
112b T069	730	82.5	1.03	2768.82
112b T070	678	77.5	1.48	3681.59
112b T071	708	93.75	1.43	3242.6
112b T072	695	77.5	0.78	2029.14
112b T073	690	120	0.49	849.22
112b T074	700	156.25	2.54	3562.41
112b T075	700	77.5	1.14	3007.92
112b T076	700	152.5	0.51	730.65
112b T077	700	152.5	1.60	2292.26
112b T078	700	77.5	0.83	2189.97

Pour les tirs (112b T063, 112b T070, 112b T072, 112b T075, 112b T078), on a fixé la charge instantané d'explosif avec la variation des distances tirs-capteur et des vitesses particulières, à chaque fois on augmente la distance le coefficient de site augmente.

Pour les tirs (112b T074, 112b T075, 112b T076, 112b T077, 112b T078), on a fixé la distance tir-capteur avec la variation de charges instantanées et les vitesses particulières, lorsqu'on augmente la charge unitaire, le coefficient de site diminué.

En conclusion, la relation entre la différence de la charge d'explosif et la distance tir-capteur est réversible, car lorsque la charge d'explosif augmente le coefficient de site diminué, par contre lorsqu'on augmente la distance le coefficient de site augmente.

III.3.6. Contrôle pendant les travaux

Les contrôles réalisés sur le chantier des travaux d'abattage est d'assuré que les résultats des tirs obtenus sont bien préciser avec la détection de toutes les vibrations susceptibles d'affecter la contraction.

Conclusion

Les mesures de vibrations effectuées sur tirs dans la mine de fer de Boukhadra wilaya de Tébessa dans le cadre de la réglementation sur les nuisances vibratoires et acoustiques des tirs minier ont permis de déduire que :

- ❖ les niveaux de vibrations sismiques et acoustiques générées par les tirs dans l'environnement du site sont largement en dessous des seuils réglementaires.
- ❖ Les niveaux de vibrations sismiques et acoustiques génèrent par les tirs au niveau des gradins et des galeries de BK II sont aussi largement en dessous des seuils réglementaires.
- ❖ Confirmer que les valeurs enregistrées sont loin des limites de dégât dont la valeur de référence est de 10mm/s pour les vibrations sismiques et 125 dB pour les vibrations acoustique.

***Chapitre IV : Simulation avec logiciel
Analyse sismique Delta Seis 4.4***

« Patience et longueur de temps font plus que force ni
que rage »

Introduction

L'assistance informatique à la conception des tirs à été mise au point, s'appuyant sur les outils de la sismologie, des codes de calculs permettant de modéliser l'efficacité des processus complexes intervenant les tirs de mine et de simuler leur effets sismiques et acoustiques dans l'environnement, il est ainsi possible d'optimiser l'influence des interactions entre les divers paramètres de tirs sur les résultats recherchés.

L'utilisation du logiciel analyse sismique deltaseis 4.4 permet de faire de nombreuses simulations en variant les paramètres d'entrées (vitesse particulaire, vitesse radiale, vitesse transversale, vitesse verticale, vitesse acoustique, etc) de façon à limiter la zone dangereuse.

IV.1. Simulation des tirs

La simulation des tirs à ciel ouvert ou souterraine continue de présenter les zones dangereuses, ainsi d'avoir une visualisation du mouvement de la matrice rocheuse à la suite de l'explosion dans une mine ou dans une carrière.

IV.2. Matériel de mesure

Les vibrations quelle que soit leurs provenance (géologie, engins mécaniques, extraction à l'explosif), sont mesurés grâce à des sismographes, appelées également dans la profession capteurs sismiques, il existe une multitude de types, en fonction de leur mouvement du sol et l'enregistre sur un rapport visuel. Telle est la fonction d'un sismographe des tirs de mines ; l'étude des sols, en terme scientifique, le support visuel évoqué plus haut est appelé sismogramme.

IV.2.1. Delta seis 1 (enregistreur sismiques et acoustiques des tirs de mines)

Développés par les sociétés Air systèmes et SIM le enregistreur DELTA SETS 1 est un sismographe de dernière génération destiné au contrôle des vibrations sismiques et acoustique de tirs de mines.

Cette appareil est conforme à la norme AFNOR NF E90 20 relative aux caractéristiques des appareillages de mesure de ces phénomènes.

Cette appareil est doté d'un écran graphique tactile permettant :

Le réglage aisé des paramètres de déhanchement et d'informations sur les enregistrements effectués (emplacement de tir, distance, charge unitaire et totale du tir).

IV.2.2. Mode opératoire

Permet d'aborder plus en détail la méthodologie de mesure, telle qu'elle figure dans la réglementation, cependant nous pouvons déjà dire que la mesure consiste à poser un sismographe sur la surface d'un élément à contrôler à une proximité relative d'un tir de mines, l'onde vibratoire se diffuse dans le sol et atteint le capteur qui vibre au même temps que son support. Nous pouvons dire que le sismographe enregistre et mesure sa propre vibration, soit la vitesse particulière.

Afin de nous permettre d'analyser des données concrètes et de vérifier l'intensité (vitesse particulière) de vibration par rapport à la réglementation en vigueur, le capteur va mesurer les ondes sismiques de sol (ou ondes solides) selon trois directions : verticale, radiale et transversale. Ces enregistrements sont rendus possibles grâce à trois composants, orientés dans les trois directions.

Un géophone est un cylindre composé d'un aimant placé sur ressort et d'une bobine. Lors du passage de l'onde sismique, il vibre et convertit le mouvement du sol en tension électrique.

Le courant ainsi créé est transmis au processus du sismographe en vitesse et en fréquence, l'événement enregistré peut être consulté par l'utilisateur.

IV.3. L'interprétation des valeurs

Selon les modèles de sismographes, il existe plusieurs façons de visualiser le résultat d'enregistrement :

- ❖ Sous forme de ticket imprimé par l'appareil, suite à l'enregistrement d'un événement ou sur demande, le capteur imprime un papier de format inférieur à A5, il s'agit des valeurs maximales enregistrées sur chaque voie (ou direction).

L'utilisation ne peut pas voir la forme de signal sismique.

- ❖ Sous forme de représentation graphique du signal, suite à l'enregistrement d'un événement par le capteur, les données sont transférées par câble, modem (ligne téléphonique ou GSM) ou encore par clé USB intégrée à l'appareil vers un ordinateur, l'utilisation peut alors, via un logiciel de traitement spécifique (analyse sismique Deltaseis 4.4), ce dernier visualiser le signal et, la plupart du temps, effectuer les analyses complémentaires, cette méthode est la seule permettant de confirmer l'imputabilité du signal à un tir de mine.

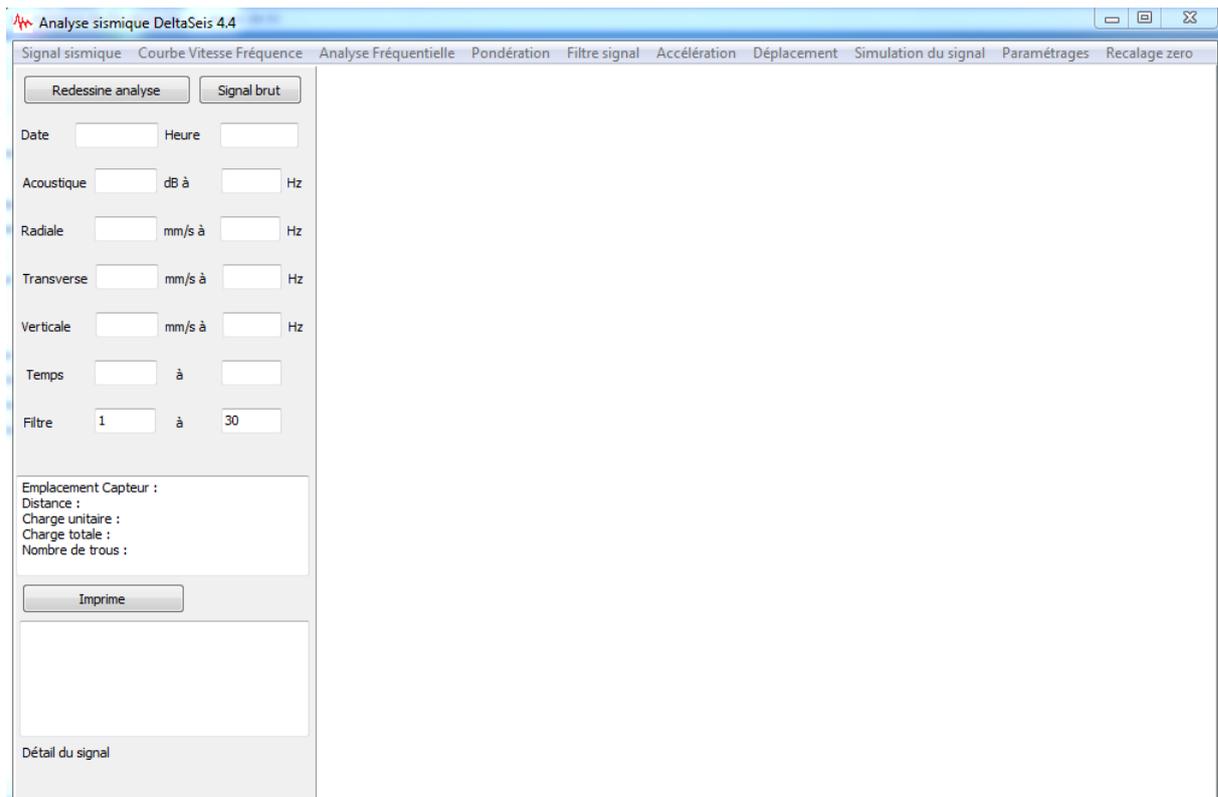


Figure IV.1. Logiciel d'analyse sismique Delta seis 4.4.

IV.4. Résultats de simulation

La mise en œuvre des tirs s'effectue en respectant la réglementation en vigueur. La réalisation et l'analyse des résultats porte sur :

- ❖ Présentation des fiche techniques pour chaque tir (une fiche technique courbe fréquence-vitesse particulière, une fiche technique de déplacement, et une fiche technique d'accélération), (voir les annexes).
- ❖ L'analyse des résultats permet de comparé par rapport à la réglementation (voir tableaux de références I.3 et I.4).

Les résultats de déplacement et d'accélération des ondes sismiques obtenus par logiciel d'analyse sismique Delta Seis 4.4 sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.1. Résultats de déplacement et d'accélération obtenue par logiciel Delta Seis 4.4

Essai	Référence d'appareil	Vitesse particulière (mm/s)	L'accélération max (mm/s ²)	Déplacement max (microns)
1	112b T063	3.35	371	29
2	112b T064	2.38	291.60	20
3	112b T065	16.33	442.10	12
4	112b T066	1.18	438.10	18
5	112b T067	1.19	477.60	17
6	112b T068	0.24	45.45	5
7	112b T069	1.03	31.48	20
8	112b T070	1.48	185.80	10
9	112b T071	1.43	72.18	40
10	112b T072	0.78	295.40	4
11	112b T073	0.49	67.79	6
12	112b T074	2.54	74.76	91
13	112b T075	1.14	127.50	2
14	112b T076	0.51	65.10	32
15	112b T077	1.60	53.90	66
16	112b T078	0.83	143.80	2

Les résultats de déplacement obtenus sont tous loin aux seuils de la réglementation (320 μ m) car les accélérations sont plus élevées.

Toutes les valeurs maximales de déplacement entre 2 μ m et 91 μ m. Donc sont très loin des valeurs minimales des valeurs admises dans la réglementation.

Pour les tirs essais ayant faible fréquence (112b T069, 112b T071, 112b T074, 112b T077), ils ont des seuils de déplacements élevés avec des basses accélérations.

Pour les autres essais ayant fort fréquences, ils ont des seuils de déplacements faibles avec les accélérations plus élevés.

En conclusion, les niveaux de déplacements aux basses fréquences induits par les vibrations dues aux tirs à l'explosif sont estimés plutôt en rapport avec les niveaux d'accélération.

Conclusion

De nombreux chercheurs ont étudié et établie des logiciels dont le but est la modélisation et d'avoir un bon résultat de tir. La compréhension d'abattage peut être améliorée dans un proche avenir et concevoir une technique de tir pour fournir les résultats visés afin de réduire les vibrations sismiques et acoustiques.

Il existe plusieurs logiciels pour la simulation des effets de tirs. Ils ne cessent d'augmenter en nombre et en complexité, la raison d'être de ces logiciels est simuler les résultats de tir. Cela permet de trouver les différents paramètres influençant sur les résultats (charge unitaire, distance tir-capteur, type de massif traversé, etc.).

Le logiciel analyse sismique Delta seis 4.4 permet d'analyser des données concrètes et de vérifier l'intensité de vibration par rapport à la réglementation, les résultats représenter par des graphes (signal sismique, courbe vitesse fréquence, analyse fréquentielle, pondération, filtre signal, accélération, déplacement, etc.).

Les résultats de déplacement obtenus par logiciel d'analyse sismique Delta Seis 4.4 sont tous loin aux seuils de la réglementation ($320\mu\text{m}$), aucun effet détecte ni sur la stabilité de la mine ni sur les habitations.

Conclusion générale

« Les dernières mètres sont toujours les plus difficiles »

Conclusion générale et recommandations

La fragmentation des roches est une notion complexe dans le contexte de l'exploitation des carrières et des mines, elle dépend de plusieurs facteurs tels que :

- ❖ Les propriétés mécaniques du massif rocheux.
- ❖ La consommation spécifique de l'explosif.
- ❖ L'inclinaison du sondage.
- ❖ La construction de la charge à l'intérieur du trou ;
- ❖ Mode d'initiation des charges.

Il est important que le concepteur d'un plan de tir s'attache à obtenir le meilleur rendement possible tant sur le plan économique que de la protection de l'environnement.

Lors d'un tir d'abattage tout l'énergie transmise au massif et qui ne sert pas à abattre ou à fragmenter la roche se trouve sous forme de nuisance.

Les principales nuisances liées au tir de mine sont :

- ❖ Les vibrations, liées à la déformation élastiques des matériaux.
- ❖ Les projections.
- ❖ Le bruit ou énergie acoustique.
- ❖ La production de gaz résiduel toxique.

Les tirs des mines provoquent un ébranlement de sol qui se propage à partir de ce point sous forme de déformation élastique, les vibrations peuvent avoir des effets sur les structures et les habitations, cet effet est plus ou moins important selon les caractéristiques de l'environnement vibratoire et le temps d'exposition.

Les vibrations des tirs de mine s'atténuant avec la distance, le niveau des vibrations résulte de plusieurs facteurs est principalement :

- ❖ De la nature des explosifs.
- ❖ De la charge instantanée.
- ❖ De la distance au lieu d'explosion.

Les tirs de mines permettent de fragmenter une roche trop dure, ou trop compacte pour être exploité directement.

Les tirs de mine généraient autre fois d'importances nuisances, aujourd'hui, des techniques sophistiquées permettent de maîtriser parfaitement le plan de tir.

Les experts se sont donné des seuils de tolérances, en matière de vibration et de bruit, bien inférieur au seuil réglementaire.

Ils s'attachent à démontrer qu'un tir de mine optimisé, économe en explosifs, est préférable pour trous.

Le principe est de générer une onde de choc qui fissure le matériau, suivie d'un dégagement de gaz assez important pour s'engouffrer dans ces fissures et abattre la roche par effondrement des fragments.

Les principaux résultats ressortant des sites étudiés :

- ❖ La propagation des vibrations à travers un massif fracturé dépend de la fréquence du signal et de déplacement particulaire associé, le signal vibratoire en s'amortissant se retrouve soit coupé ou atténué en fréquence.
- ❖ Les vibrations se propagent préférentiellement dans la direction parallèle aux plans des discontinuités (milieu continu) plutôt que leur direction perpendiculaire (milieu discontinu).

Après l'étude et l'analyse, nous pouvons conclure que aucune influence des tirs ni sur la stabilité de la mine ; ni sur les habitants.

Suivant les réglementations des vibrations sismiques et acoustiques ; les résultats qui ont obtenu sont largement en dessous des seuils réglementaires (125 dB pour les vibrations acoustiques et 10mm/s pour les vibrations sismiques).

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] : Mouloud Nefis, « modèle d'un plan de tir », mémoire de magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2010.
- [2] : Saadoun Abderrezak, la contribution à l'analyse des effets de tirs d'abattage, mémoire de magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2012.
- [3] : Berdoudi Said, étude de la mécanique de tirs des roches par utilisation des modèles réduits dans les conditions algérienne, thèse de doctorat en mine, Université Badji Mokhtar Annaba.
- [4] : Gharbi kouider sur l'adaptation du plan de tir à la blocométrie, mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [5] : O.N.E.X, guide technique des explosifs et accessoire de tir.
- [6] : Ecole observatoire des sciences de la terre(EOST), les ondes sismiques.
- [7] : Bougressi ALI, « application du concept des réseaux acoustiques à bandes interdites pour l'isolation sismique d'un site, mémoire de magister.
- [8] : S.C.A.Carriere du Hainaut, Etude d'incidences sur l'environnement, « tirs de mines et vibrations ».
- [9] : Hadjadj Aoul Elias, « prédiction et analyse de la fragmentation des roches dans les conditions Algérienne », thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba.
- [10]: Founey et al, fragmentation by blasting, the first international symposium on rock fragmentation august 1983, page (22-26).
- [11] : Blanchier et al, théorie de travail d'explosif.ind.mine et carrieres, les techniques, mai-juin 1988, page 17-22.
- [12] : Florent Delille ; recherche d'une prédiction de fragmentation charge par charge pour les tirs à ciel ouvert, l'Ecole Nationale Supérieur Des Mines De Paris, 2012.

[13]: Jaeger, j.c.and cook.N.G.W.fundamental of rock mechanics, chapter 2, 13 and 18 champan hall ltd., London 1975.

[14] : Guintoli SAS, « demande d'autorisation d'exploiter une carrière et une installation de traitement de matériaux lieu-dit (bois de Saint-Laurent) », commune de Saint-Laurent, la vemedé (30), étude d'impact.

[15]: Tayeb Serradj, « les nuisances de tir », institut Algérien des mines.

[16] : documents fournie par l'entreprise, « les plans topographiques et géologiques de la mine, la géologie de la mine ».

[17] : Gadri Larbi, « étude de la déformation et de la rupture des massifs fissurés par la méthode des éléments finis, thèse doctorat en exploitation minier, université de Tébessa, juin 2012.

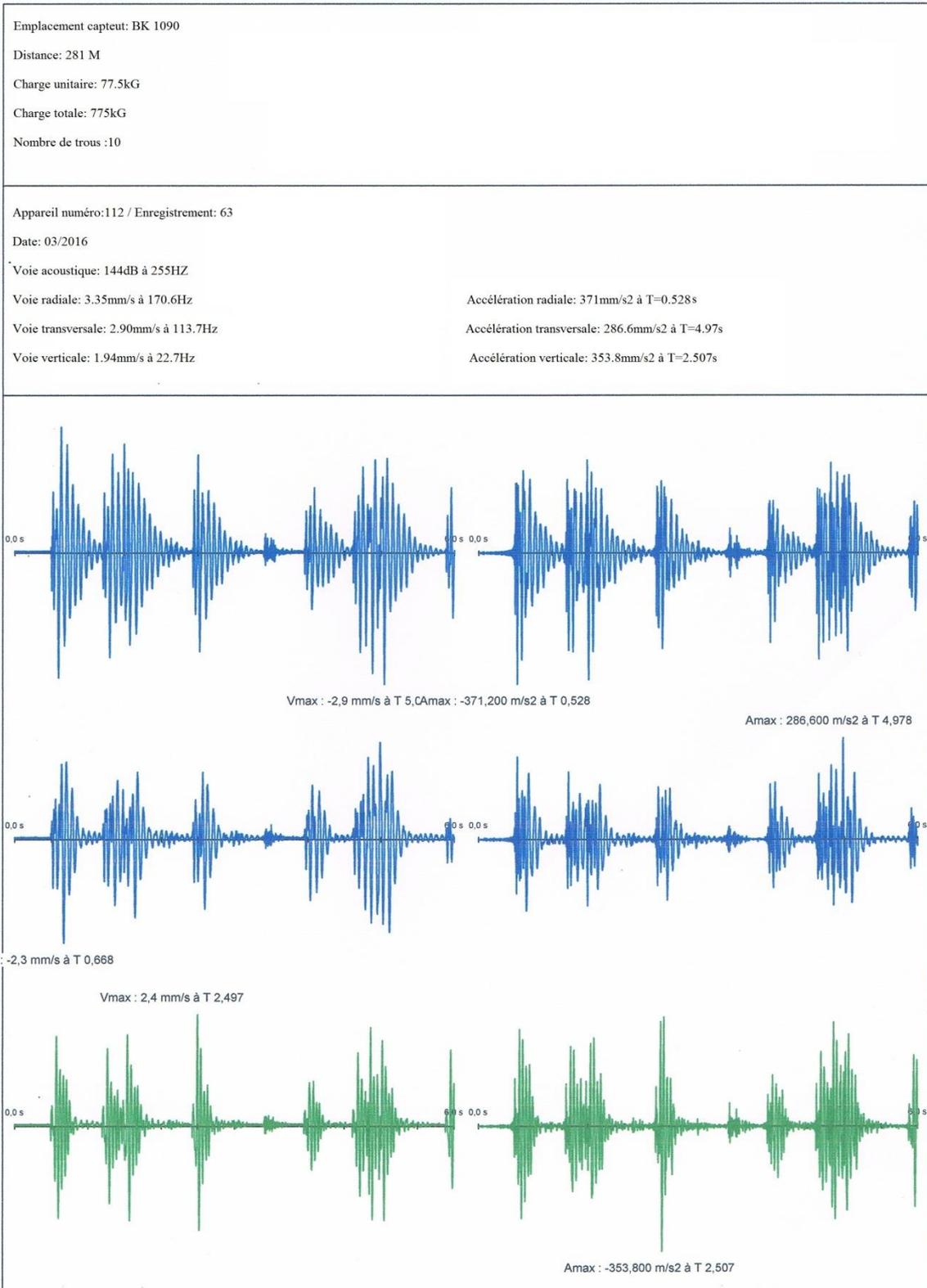
[18] : pierre Chapot, « Etude des vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux », ministère de l'urbanisme et du logement ministère des transports, 15 janvier 1981.

[19] : Yannick Bleuzen, « ingénieur des mines, nuisances sismiques et acoustiques ».

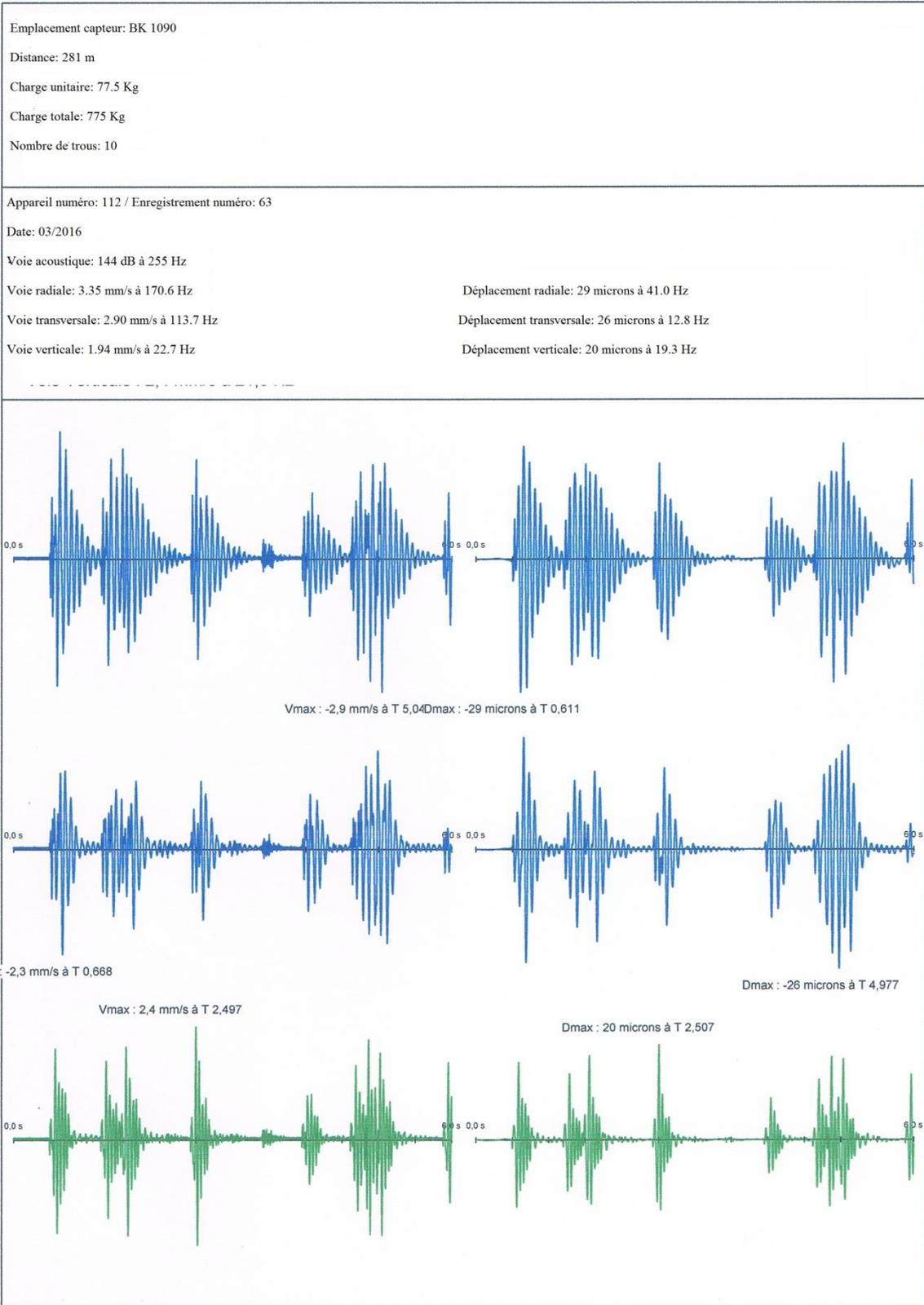
[20] : Pierre Allard, « notions générales sur les vibrations », juin 2002.

Annexes

Annexe 02 : Essai N° :01 Accélération



Annexe 03 : Essai N° :01 Déplacement



Annexe 05 : Essai N° :02 Accélération

Emplacement capteur: BK 1120.

Distance: 125 M.

Charge unitaire: 82.5 Kg.

Charge totale: 1650 Kg.

Nombre de trou: 20.

Appareil numéro: 112 / Enregistrement numéro: 64

Date Heure

Voie acoustique: 115 dB à 73 Hz

Voie radiale: 2.03 Mm/s à 256 Hz

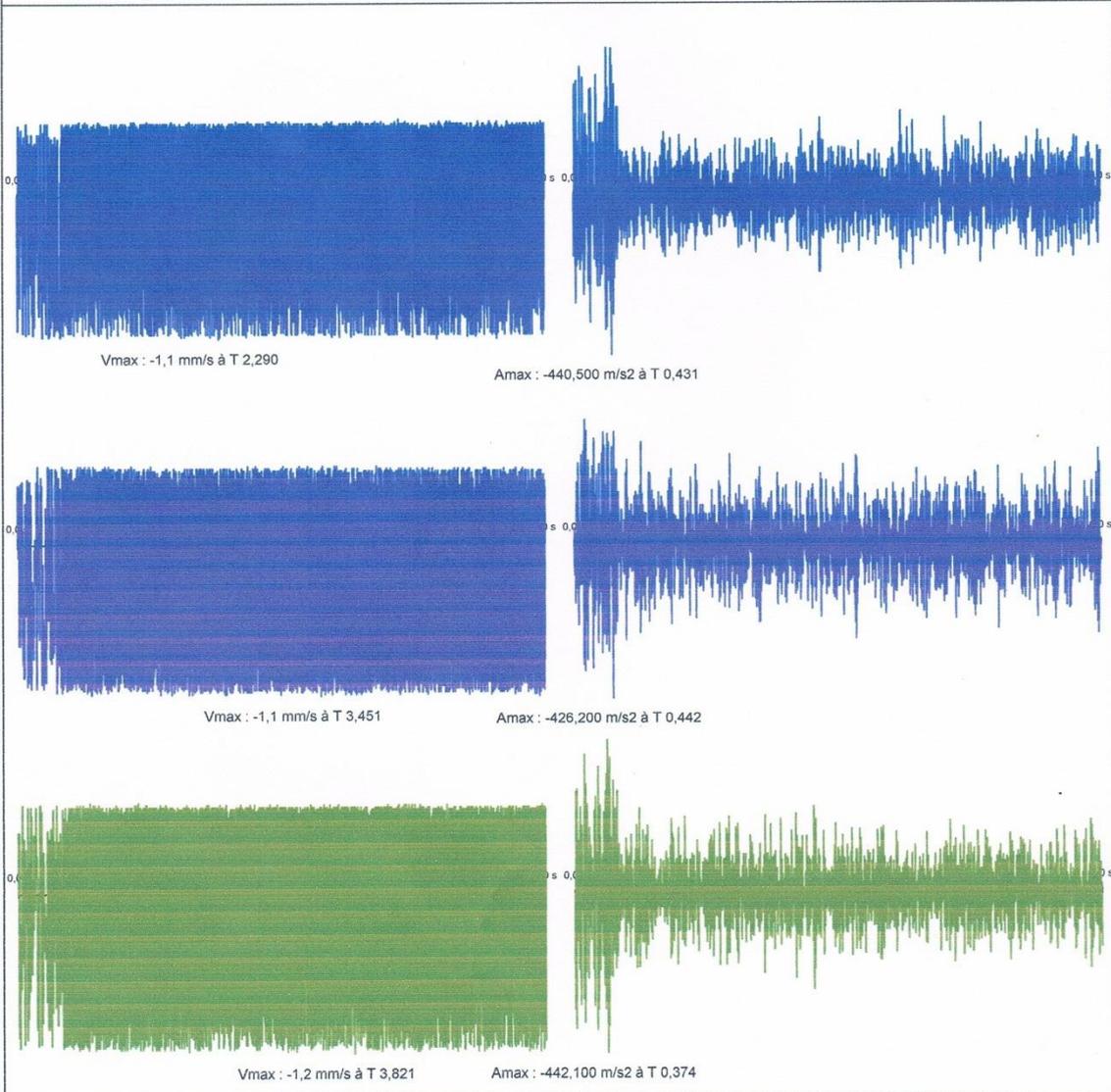
Voie transverse: 2.38 Mm/s à 256 Hz

Voie verticale: 1.56 Mm/s à 53.3 Hz

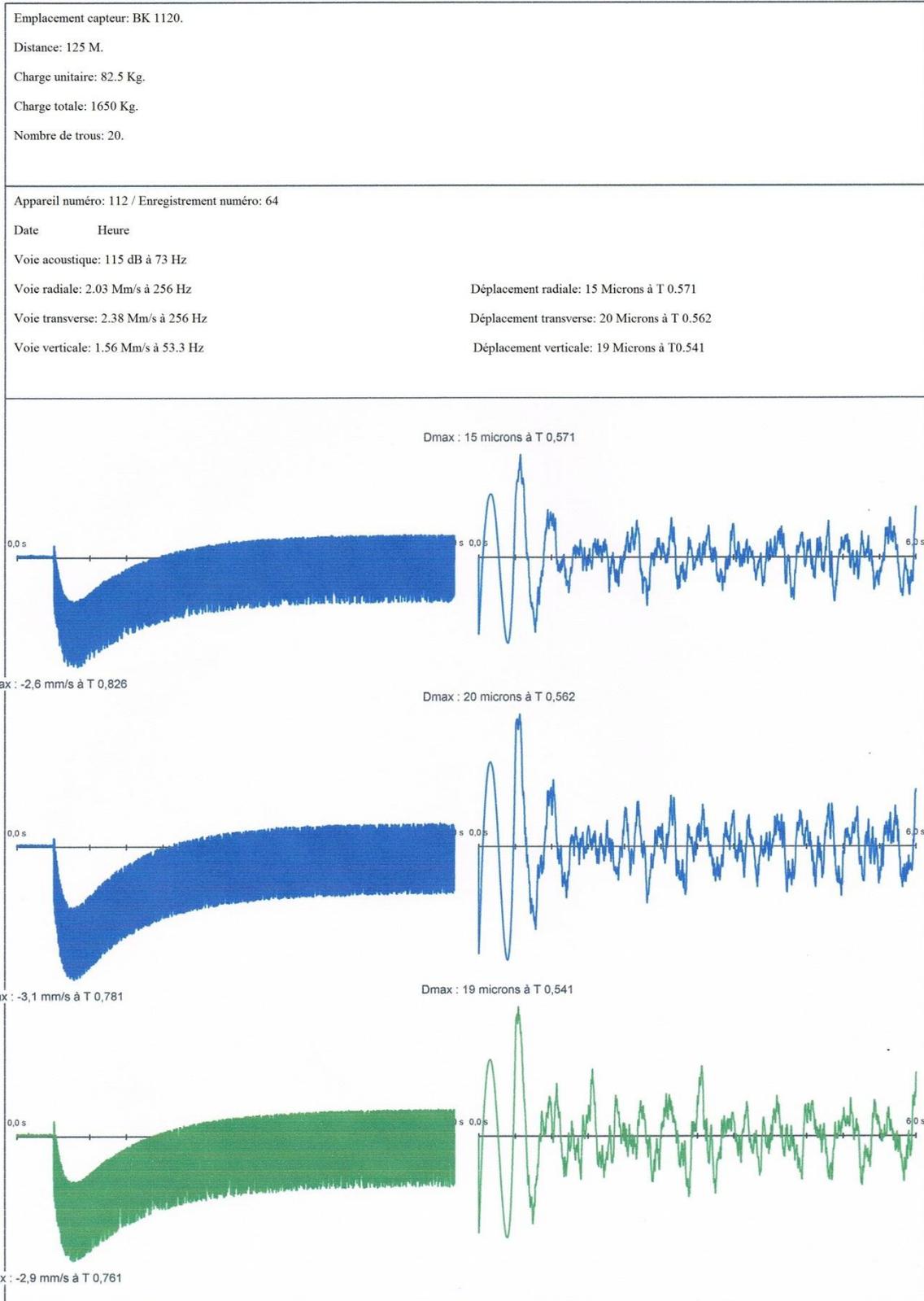
Accélération radiale: 253.7 M/s² à T 4.577

Accélération transverse: 291.6 M/s² à T 5.2

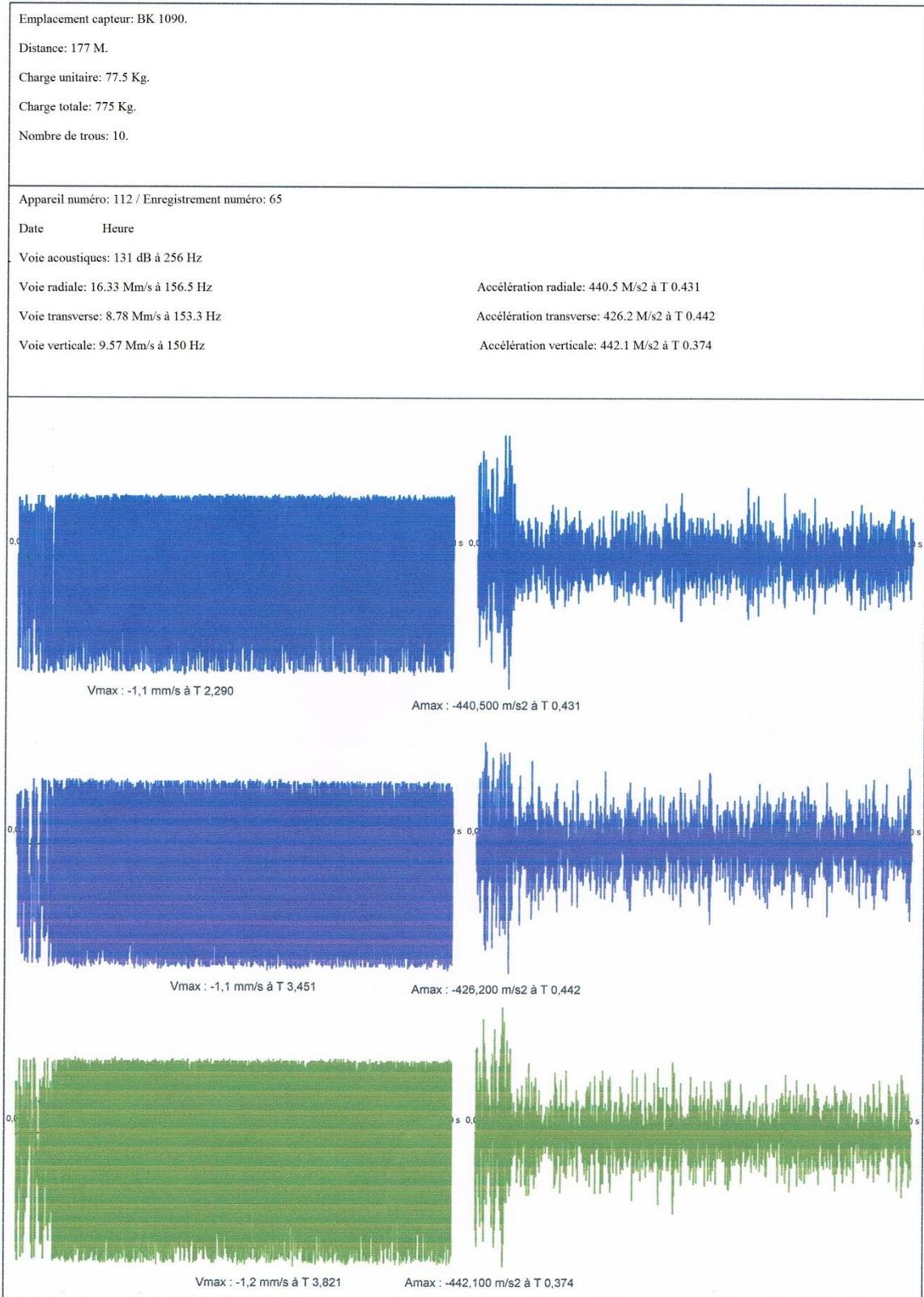
Accélération verticale: 231.9 M/s² à T 43.316



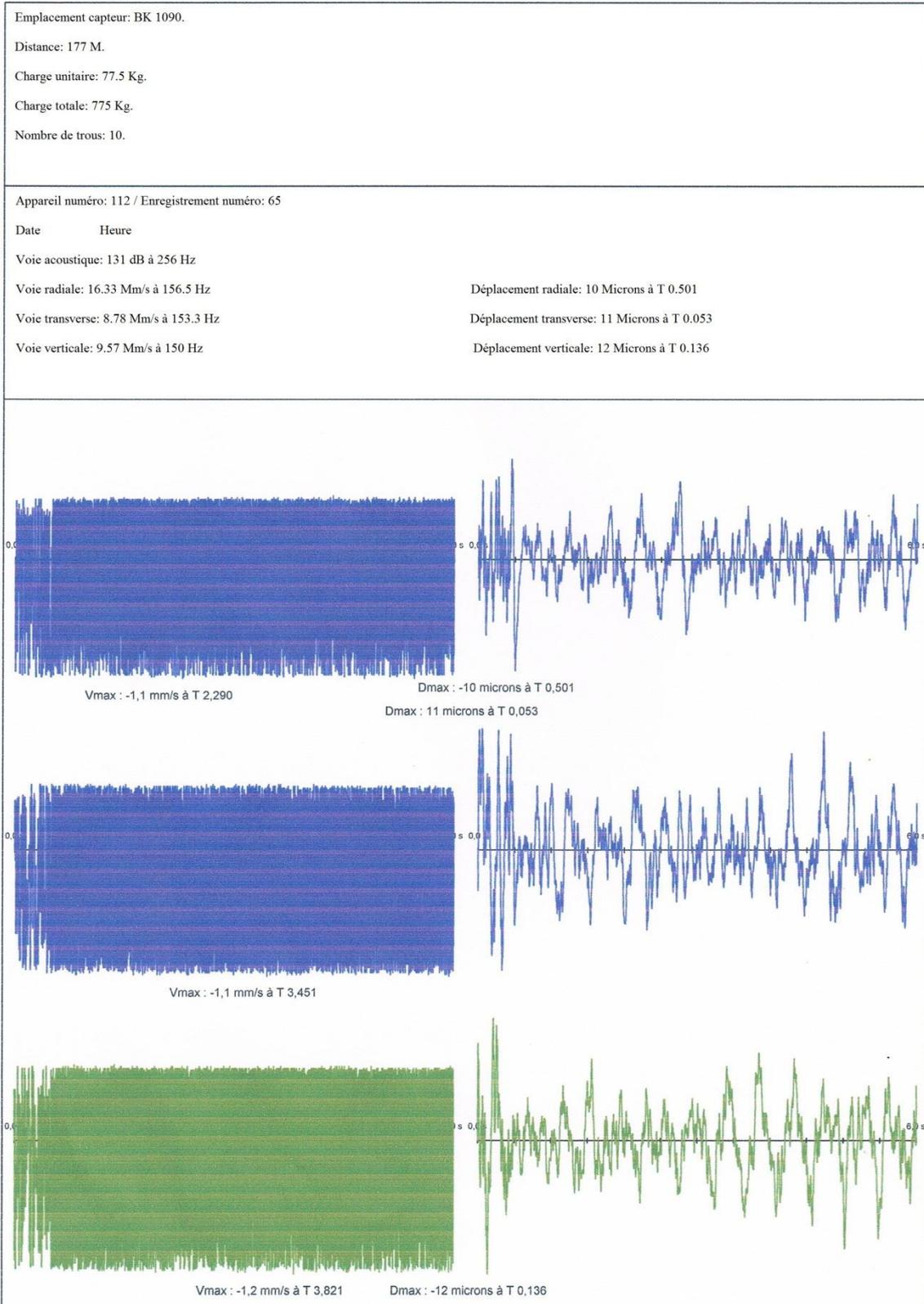
Annexe 06 : Essai N° :02 Déplacement.



Annexe 08 : Essai N° :03 Accélération



Annexe 09 : Essai N° :03 Déplacement



Annexe 11 : Essai N° :04 Accélération

Emplacement capteur: transfo(1090).

Distance: 690 M.

Charge unitaire: 120 Kg.

Charge totale: 1200 Kg.

Nombre de trous: 10.

Appareil numéro: 112 / Enregistrement numéro: 66

Date Heure

Voie acoustique: 136 dB à 73.1 Hz

Voie radiale: 1.06 Mm/s à 53.8 Hz

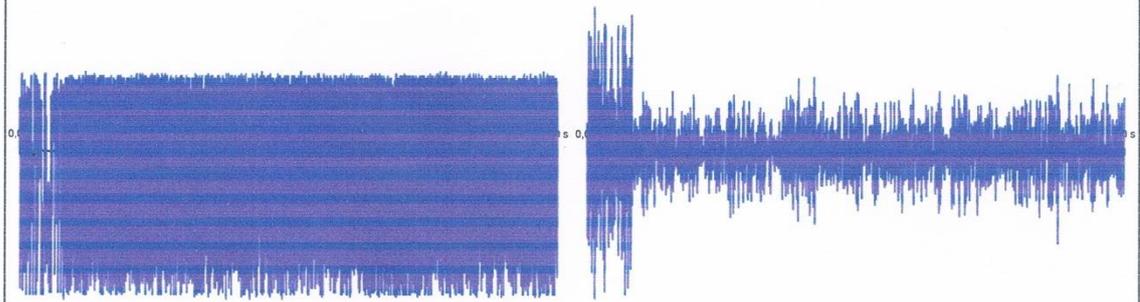
Voie transverse: 1.11 Mm/s à 256 Hz

Voie verticale: 1.17 Mm/s à 256 Hz

Accélération radiale: 394.2 M/s² à T 0.088

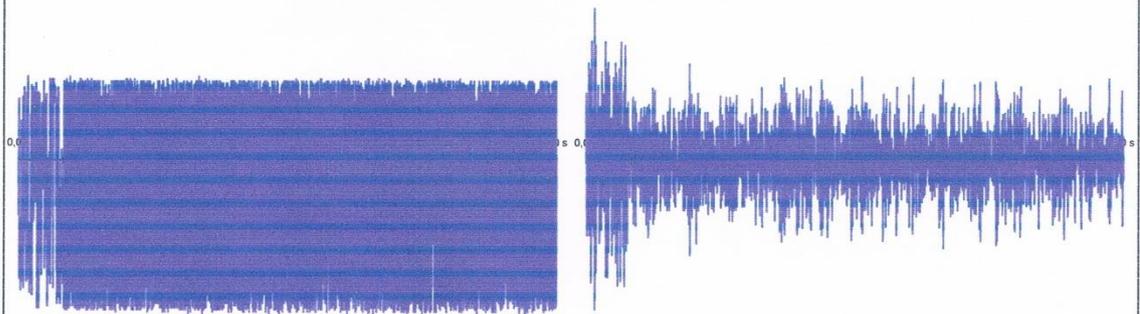
Accélération transverse: 408.3 M/s² à T 0.090

Accélération verticale: 438.1 M/s² à T 0.235

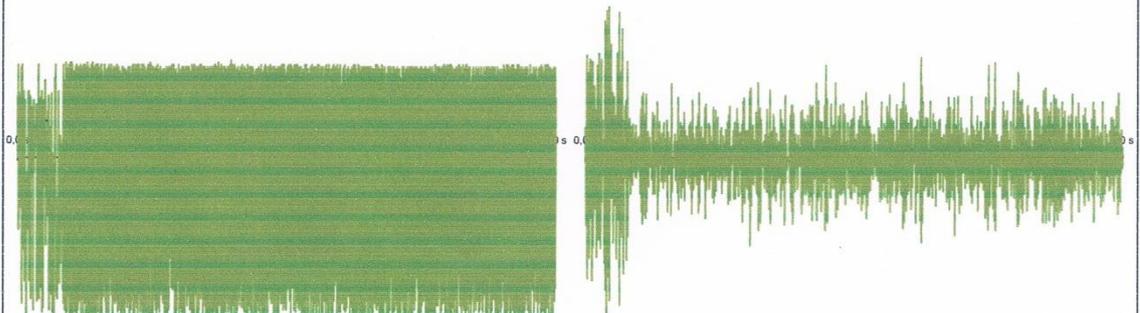


Vmax : -1,1 mm/s à T 0,491

Amax : -394,200 m/s² à T 0,088
Amax : 408,300 m/s² à T 0,090



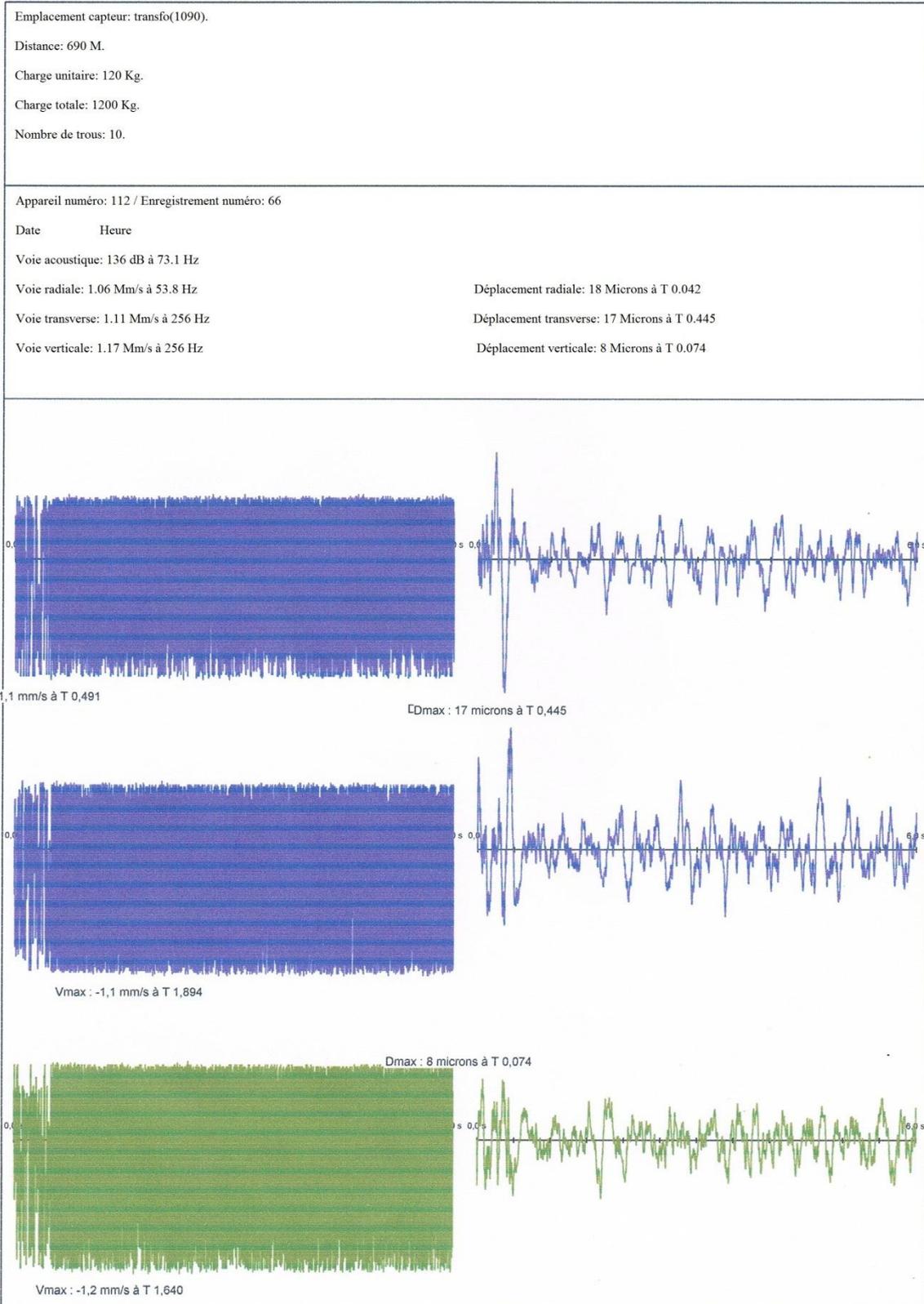
Vmax : -1,1 mm/s à T 1,894



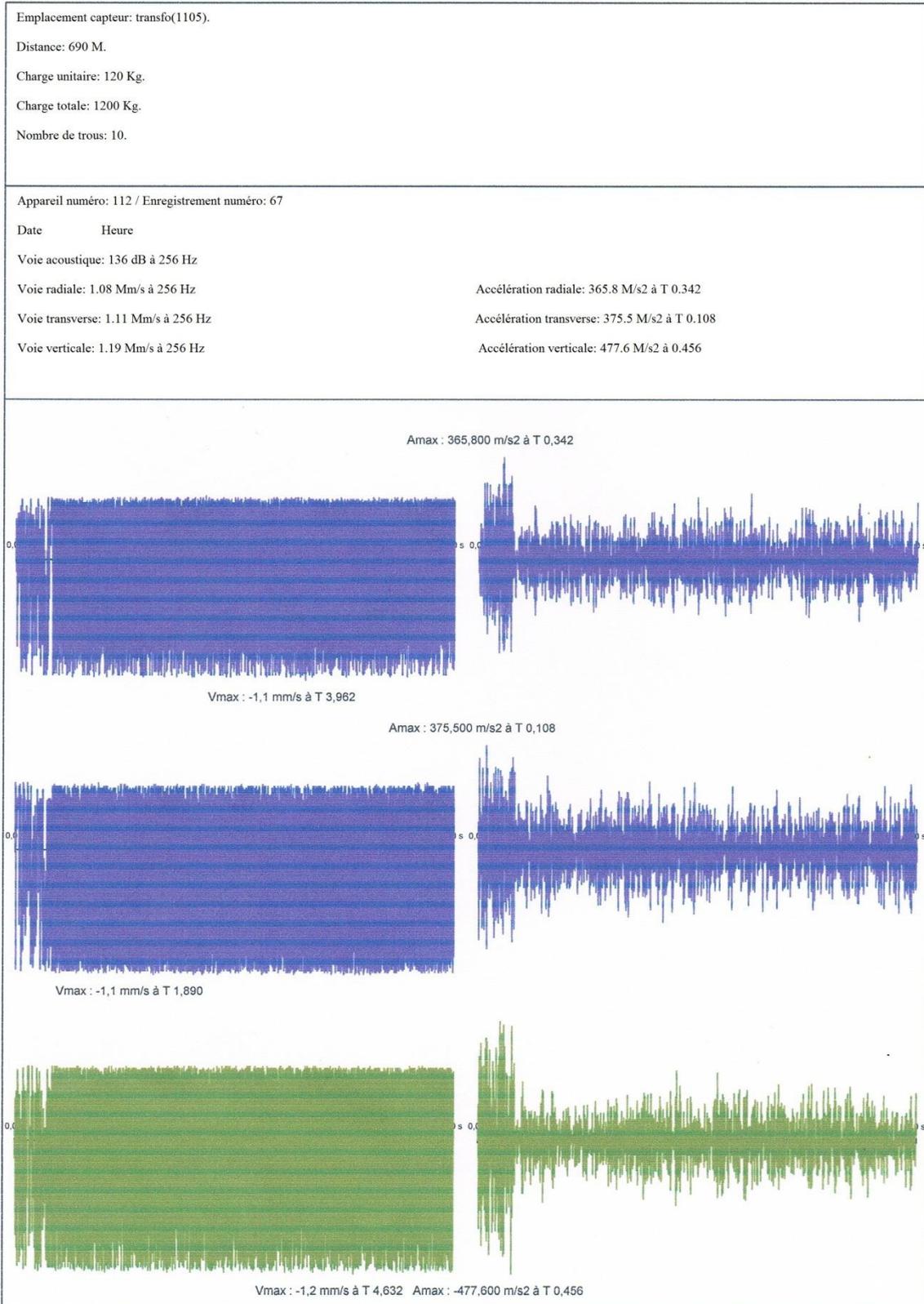
Vmax : -1,2 mm/s à T 1,640

Amax : -438,100 m/s² à T 0,235

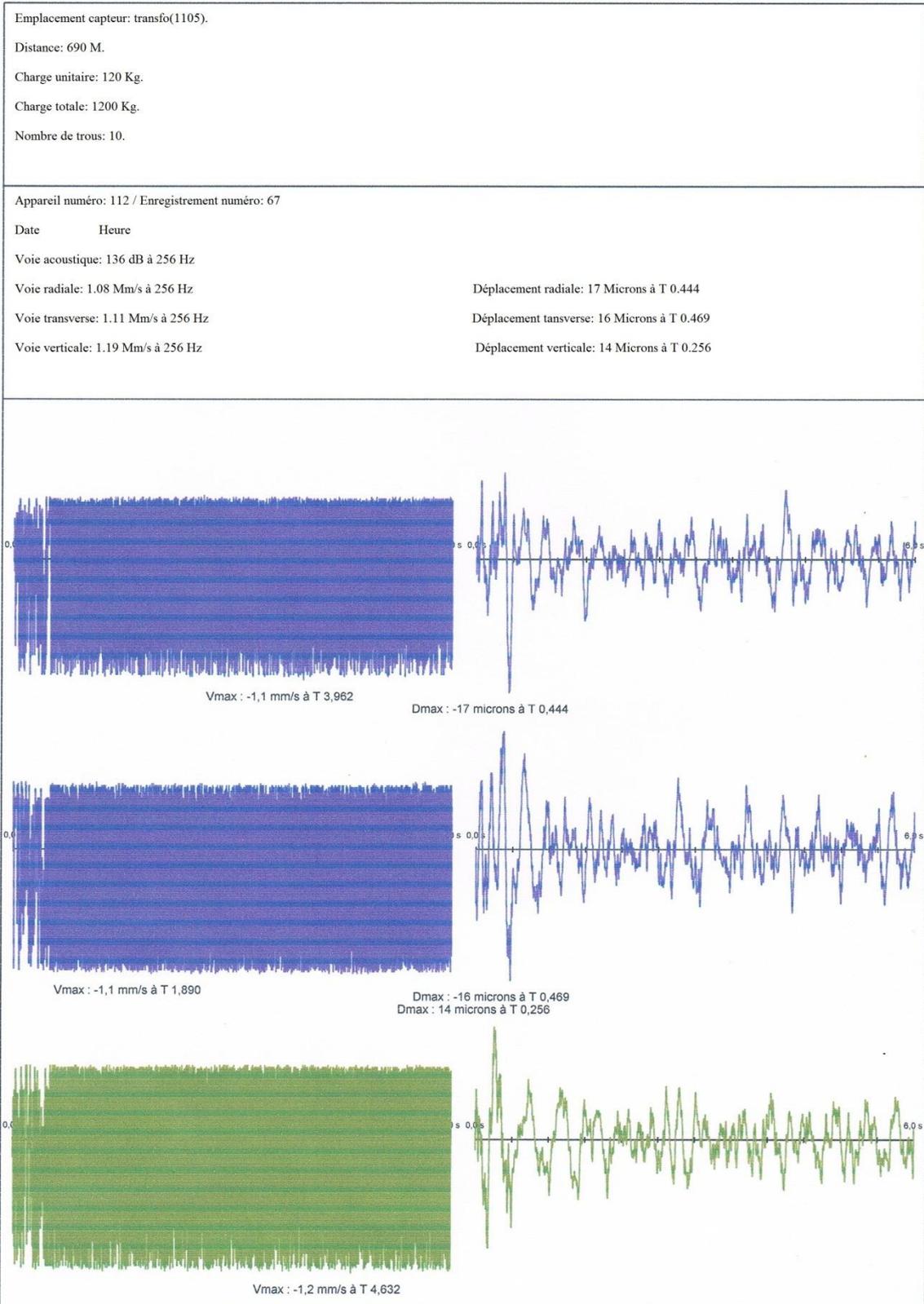
Annexe 12 : Essai N° :04 Déplacement



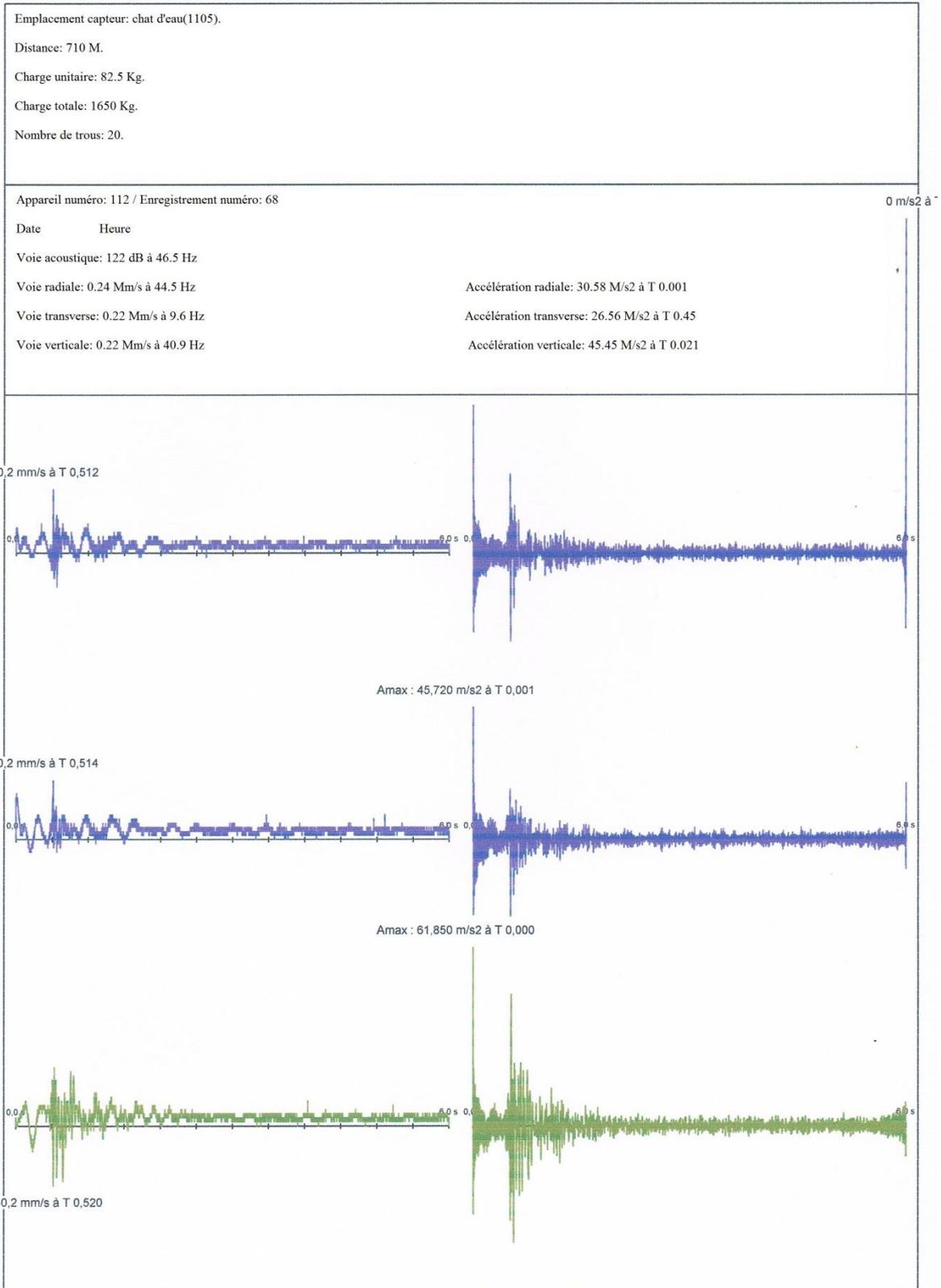
Annexe 14 : Essai N° :05 Accélération



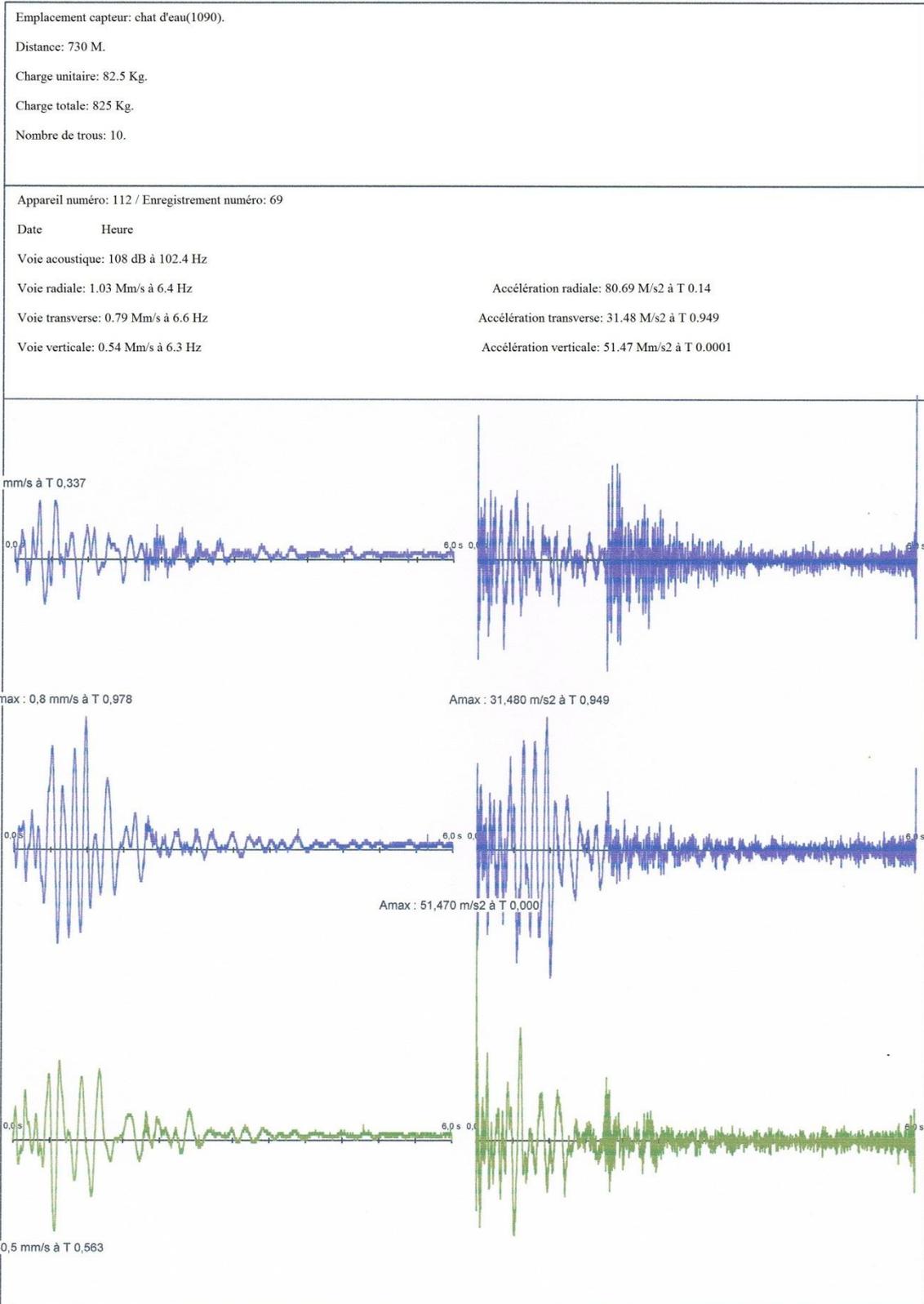
Annexe 15 : Essai N° :05 Déplacement



Annexe 17 : Essai N° :06 Accélération



Annexe 20 : Essai N° :07 Accélération



Annexe 21 : Essai N°:07 Déplacement

Emplacement capteur: chat d'eau(1090).

Distance: 730 M.

Charge unitaire: 82.5 Kg.

Charge totale: 825 Kg.

Nombre de trous: 10.

Appareil numéro: 112 / Enregistrement numéro: 69

Date Heure

Voie acoustique: 108 dB à 102.4 Hz

Voie radiale: 1.03 dB à 6.4 Hz

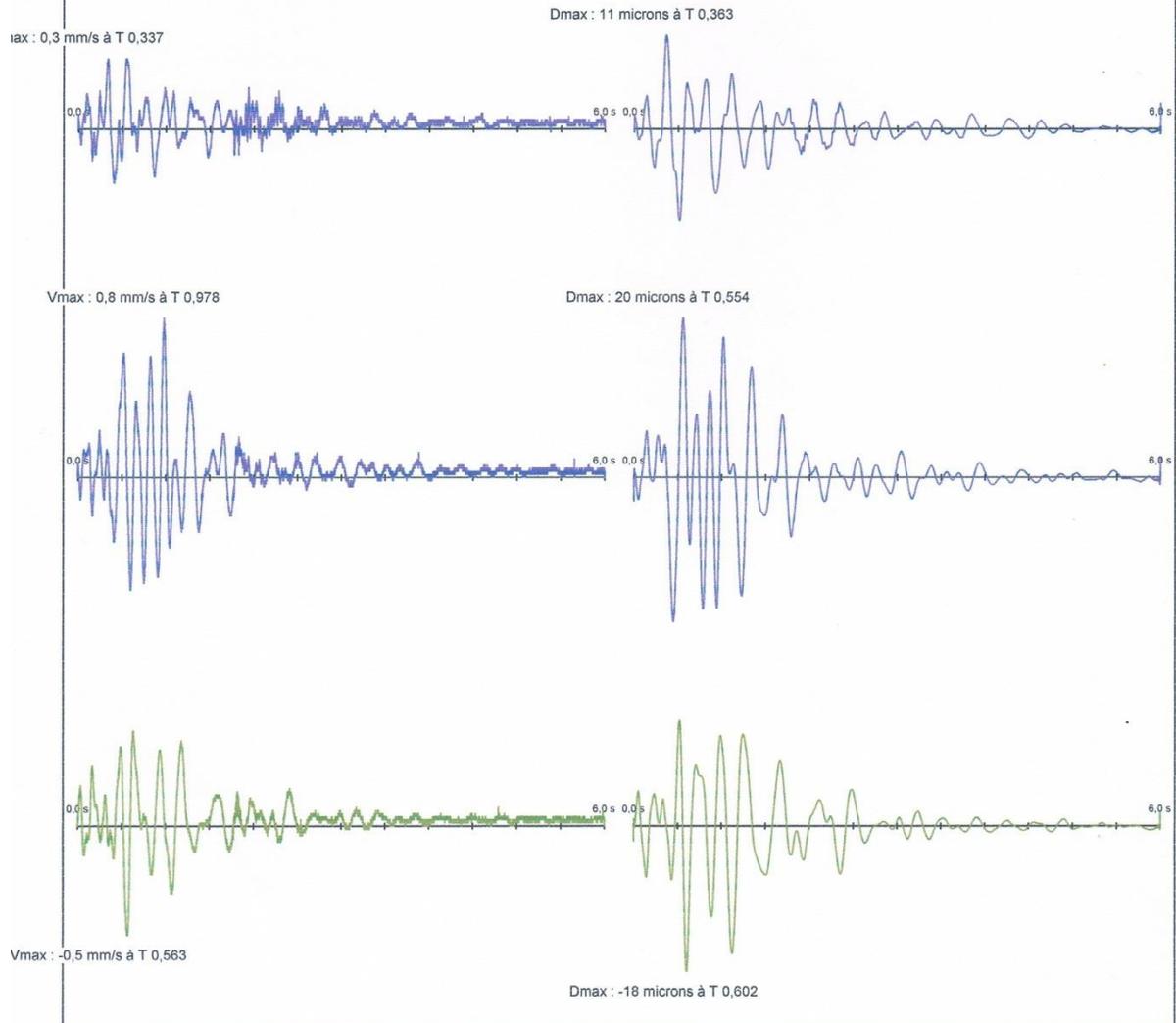
Voie transverse: 0.79 Mm/s à 6.6 Hz

Voie verticale: 0.54 Mm/s à 6.3 Hz

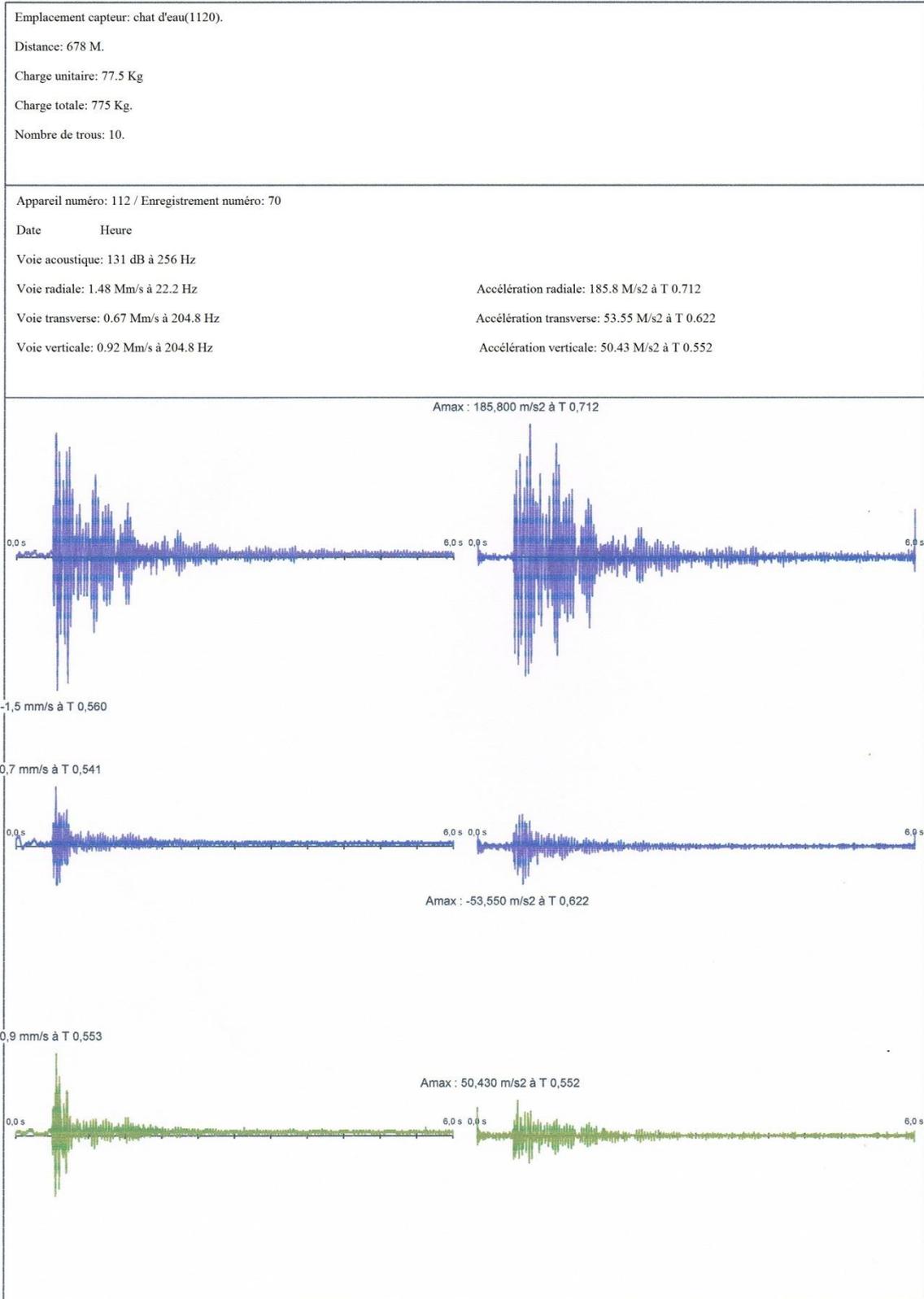
Déplacement radiale: 11 Microns à T 0.363

Déplacement transverse: 20 Microns à T 0.554

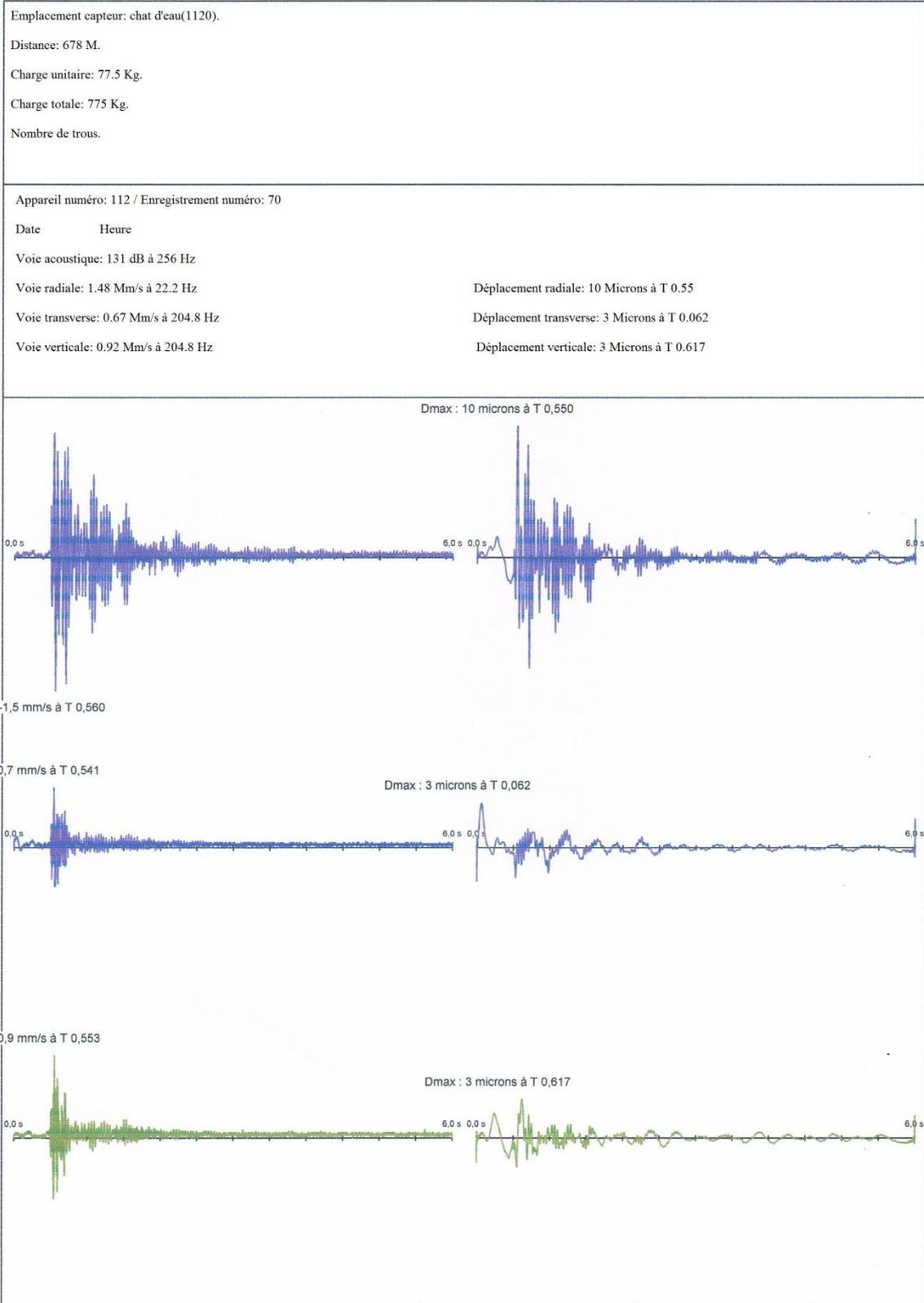
Déplacement verticale: 18 Microns à T 0.602



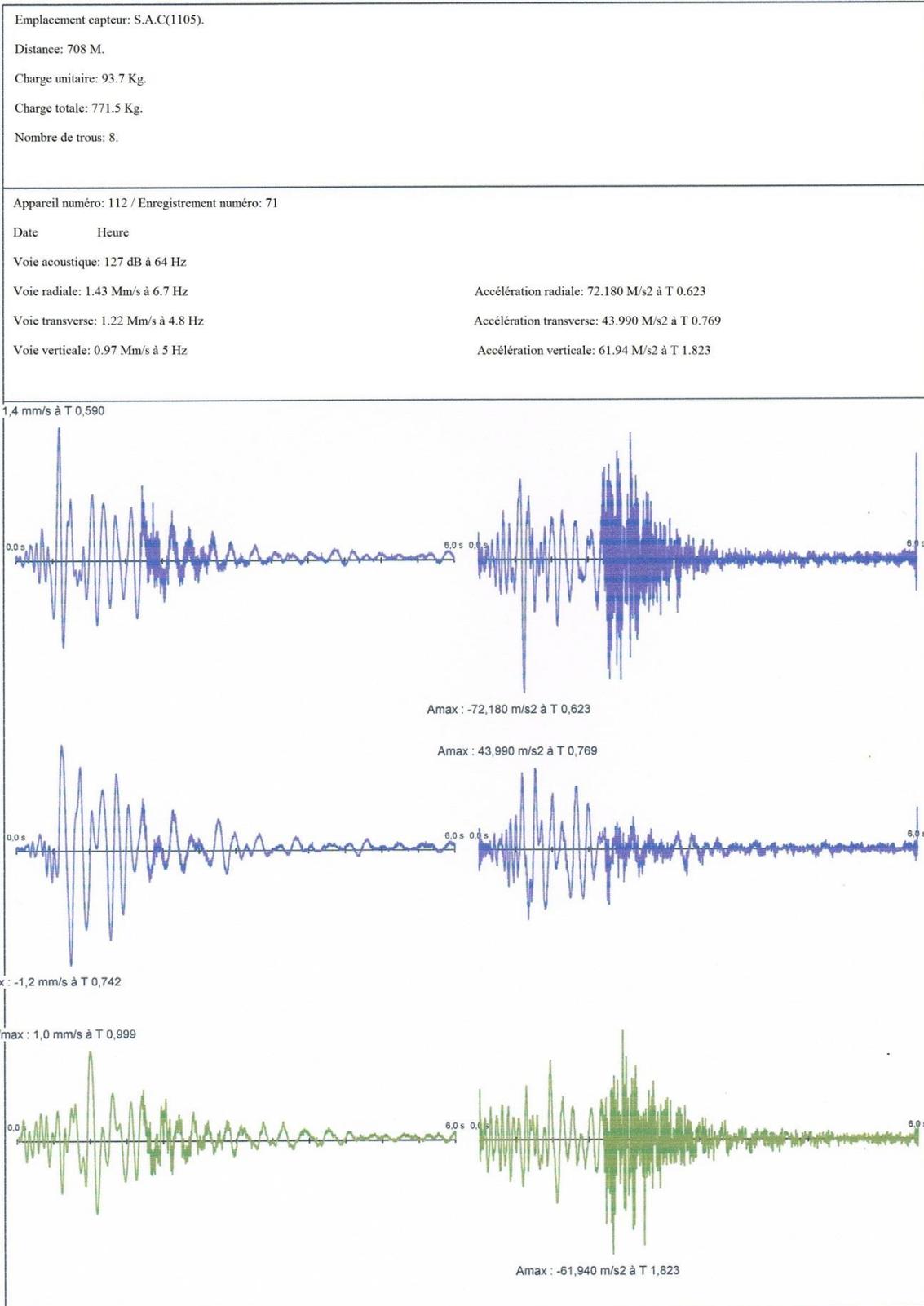
Annexe 23 : Essai N° :08 Accélération



Annexe 24 : Essai N°:08 Déplacement



Annexe 26 : Essai N° :09 Accélération



Annexe 27 : Essai N° :09 Déplacement

Emplacement capteur: S.A.C(1105).

Distance: 708 M.

Charge unitaire: 93.7 Kg.

Charge totale: 771.5 Kg.

Nombre de trous: 8.

Appareil numéro: 112 / Enregistrement numéro: 71

Date Heure

Voie acoustique: 127 dB à 6.7 Hz

Voie radiale: 1.43 Mm/s à 6.7 Hz

Voie transverse: 1.22 Mm/s à 4.8 Hz

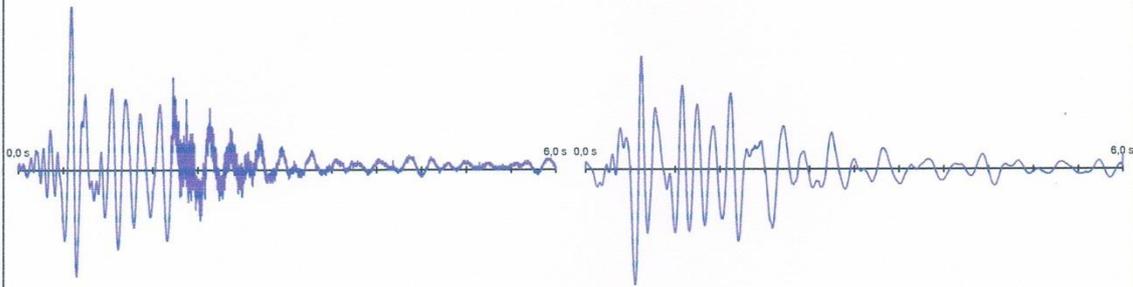
Voie verticale: 0.97 Mm/s à 5 Hz

Déplacement radiale: 28 Microns à T 0.551

Déplacement transverse: 40 Microns à T 0.679

Déplacement verticale: 33 Microns à T 1.058

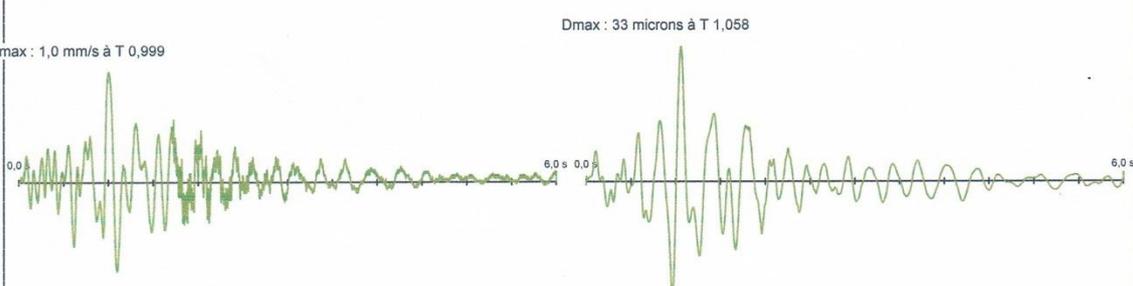
Vmax : 1,4 mm/s à T 0,590



Dmax : -28 microns à T 0,551

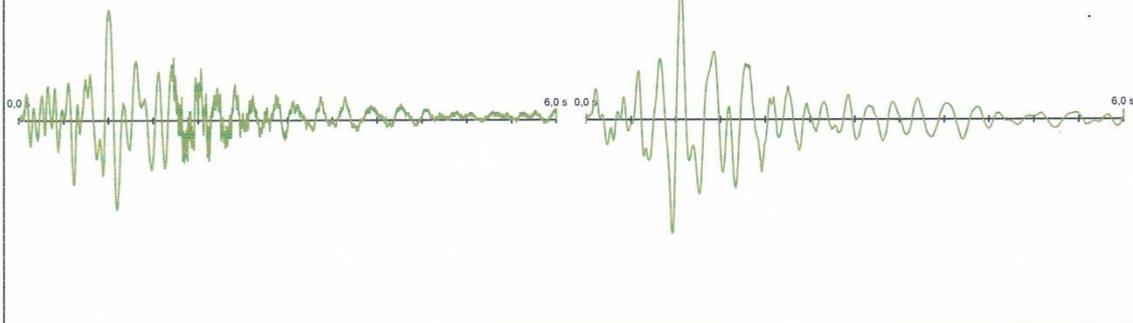
Dmax : 40 microns à T 0,679

Vmax : -1,2 mm/s à T 0,742



Dmax : 33 microns à T 1,058

Vmax : 1,0 mm/s à T 0,999



Annexe 29 : Essai N° :10 Accélération

Emplacement capteur: S.A.C(1090).
 Distance: 695 M.
 Charge unitaire: 77.5 Kg.
 Charge totale: 775 Kg.
 Nombre de trous: 10.

Appareil numéro: 112 / Enregistrement numéro: 72

Date Heure

Voie acoustique: 108 dB à 64 Hz

Voie radiale: 0.38 Mm/s à 16.7 Hz

Voie transverse: 0.27 Mm/s à 128 Hz

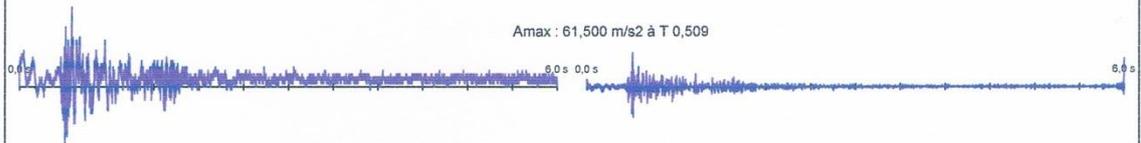
Voie verticale: 0.78 Mm/s à 85.3 Hz

Accélération radiale: 61.5 M/s² à T 0.509

Accélération transverse: 52.59 M/s² à T 0.511

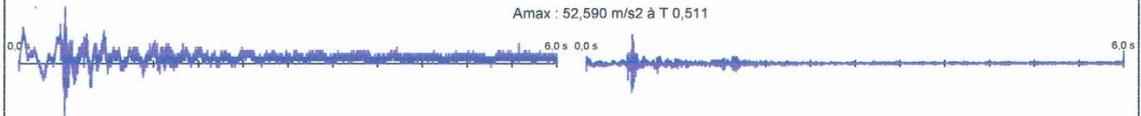
Accélération verticale: 295.4 M/s² à T 0.505

Vmax : 0,4 mm/s à T 0,582

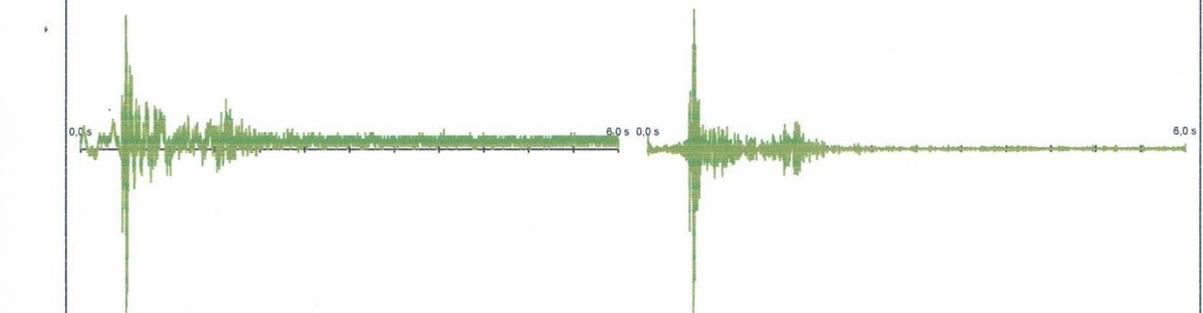


Amax : 61,500 m/s² à T 0,509

Vmax : 0,3 mm/s à T 0,514



Amax : 52,590 m/s² à T 0,511



Vmax : -0,8 mm/s à T 0,508

Amax : -295,400 m/s² à T 0,505

Annexe 30 : Essai N° :10 Déplacement

Emplacement capteur: S.A.C(1090).

Distance: 695 M.

Charge unitaire: 77.5 Kg.

Charge totale: 775 Kg.

Nombre de trous: 10.

Appareil numéro: 112 / Enregistrement numéro: 72

Date Heure

Voie acoustique: 108 dB à 64 Hz

Voie radiale: 0.38 Mm/s à 16.7 Hz

Voie transverse: 0.27 Mm/s à 128 Hz

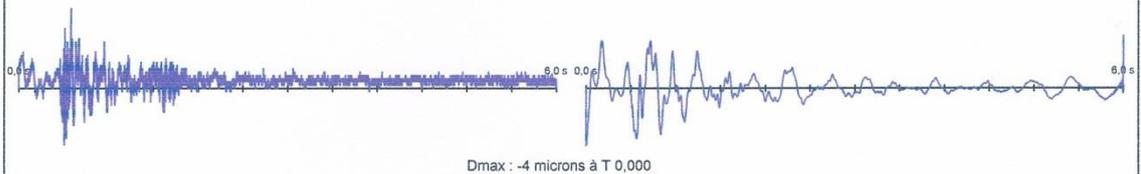
Voie verticale: 0.78 Mm/s à 85.3 Hz

Déplacement radiale: 3 Microns à T 0.00

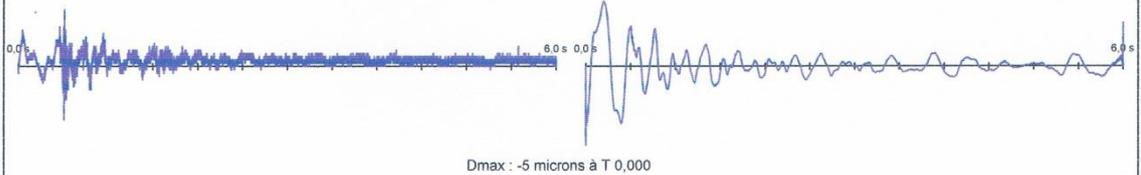
Deplacement transverse: 4 Microns à T 0.00

Déplacement verticale: 4 Microns à T 0.535

Vmax : 0,4 mm/s à T 0,582



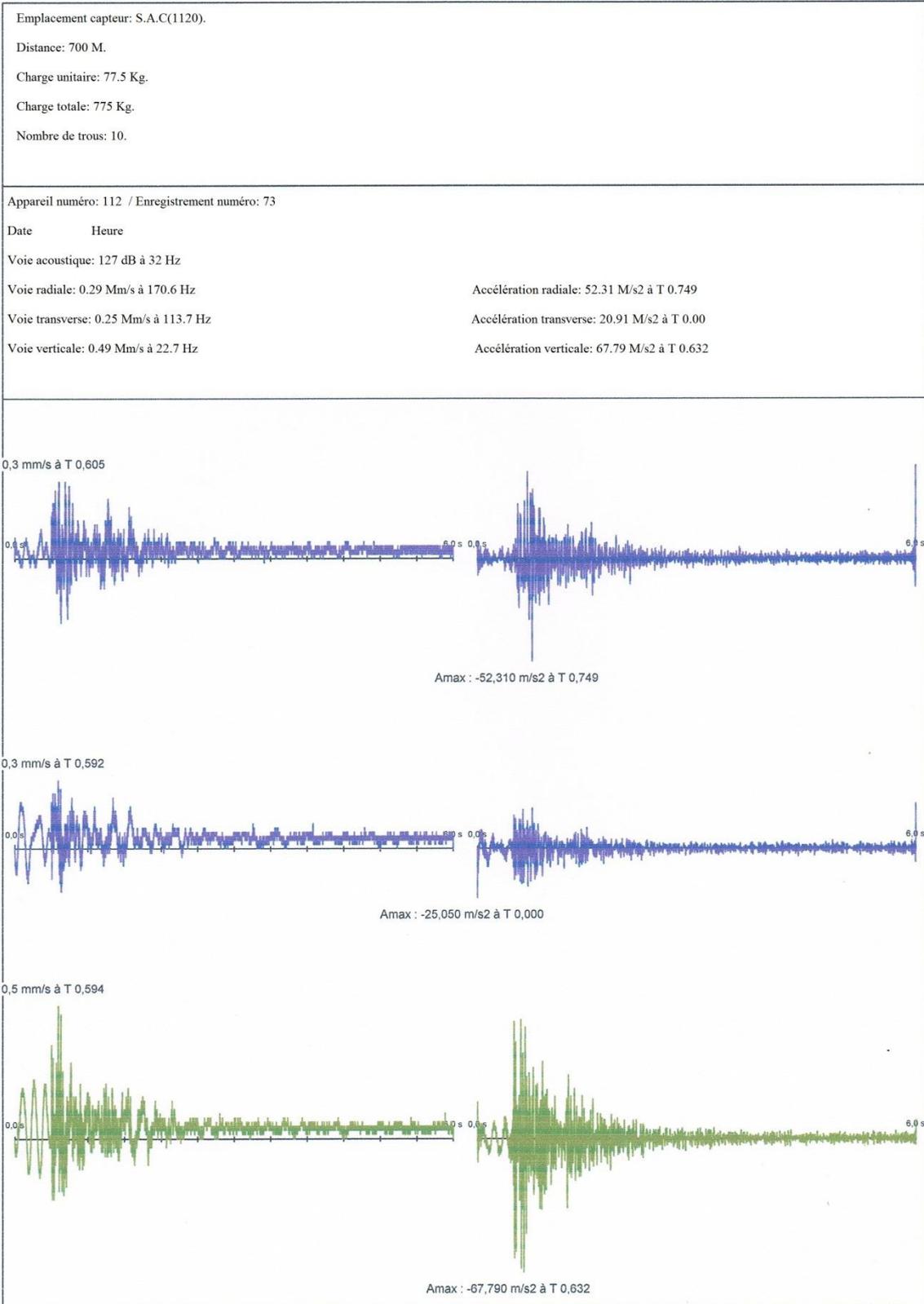
Vmax : 0,3 mm/s à T 0,514



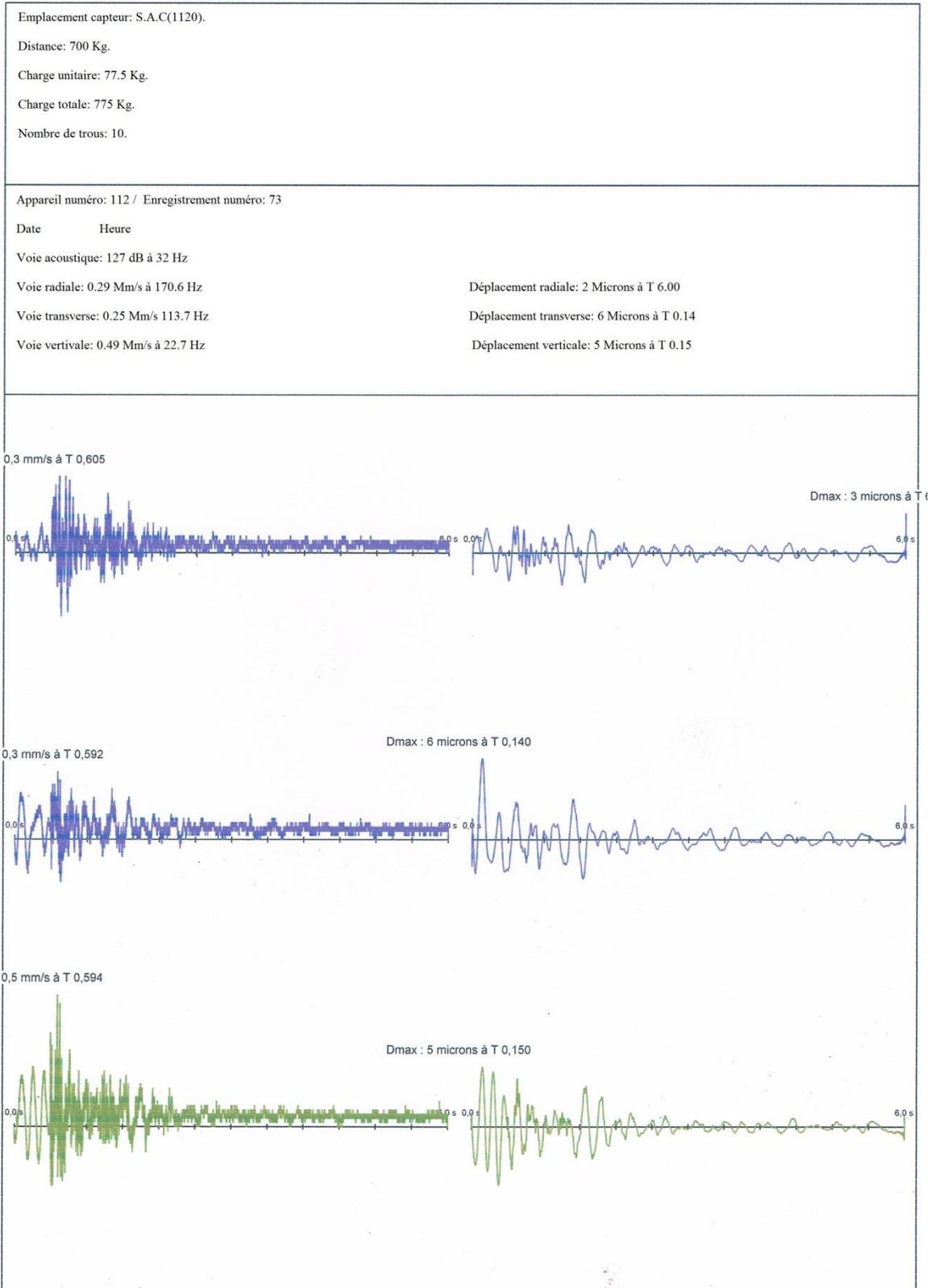
Vmax : -0,8 mm/s à T 0,508



Annexe 32 : Essai N° :11 Accélération



Annexe 33 : Essai N° :11 Déplacement



Annexe 35 : Essai N° :12 Accélération

Emplacement capteur: S.A.C(1095).

Distance: 700 M.

Charge unitaire: 156.25 Kg.

Charge totale: 625 Kg.

nombre de trous: 4.

Appareil numéro: 112 / Enregistrement numéro: 74

Date Heure

Voie acoustique: 106 dB à 85.3 Hz

Voie radiale: 1.08 Mm/s à 5.9 Hz

Voie transverse: 2.54 Mm/s à 4.8 Hz

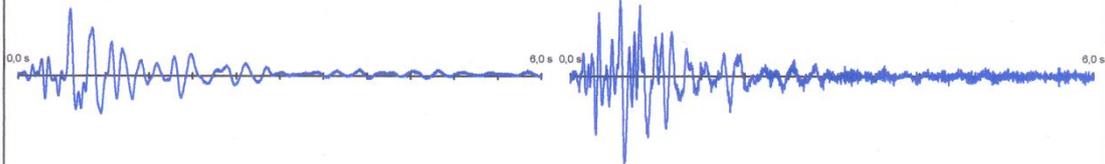
Voie verticale: 1.05 Mm/s à 5.3 Hz

Accélération radiale: 40.56 M/s² à T 0.618

Accélération transverse: 74.76 M/s² à T 0.797

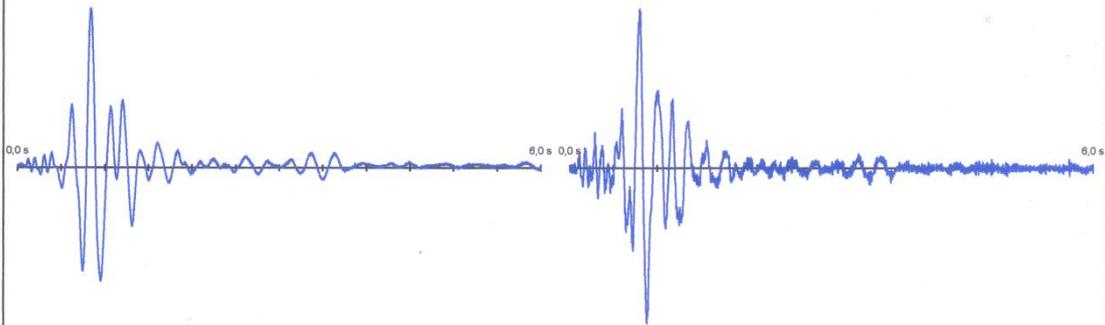
Accélération verticale: 38.97 M/s² à T 0.882

Vmax : 1,1 mm/s à T 0,596



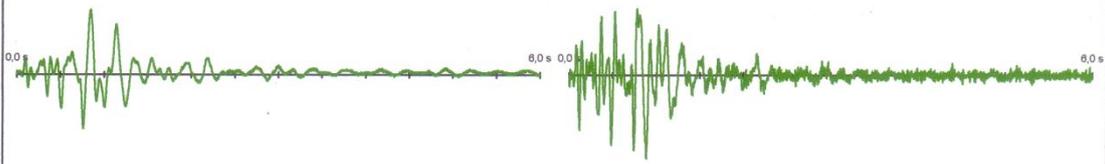
Amax : -40,560 m/s² à T 0,618

Vmax : 2,5 mm/s à T 0,834



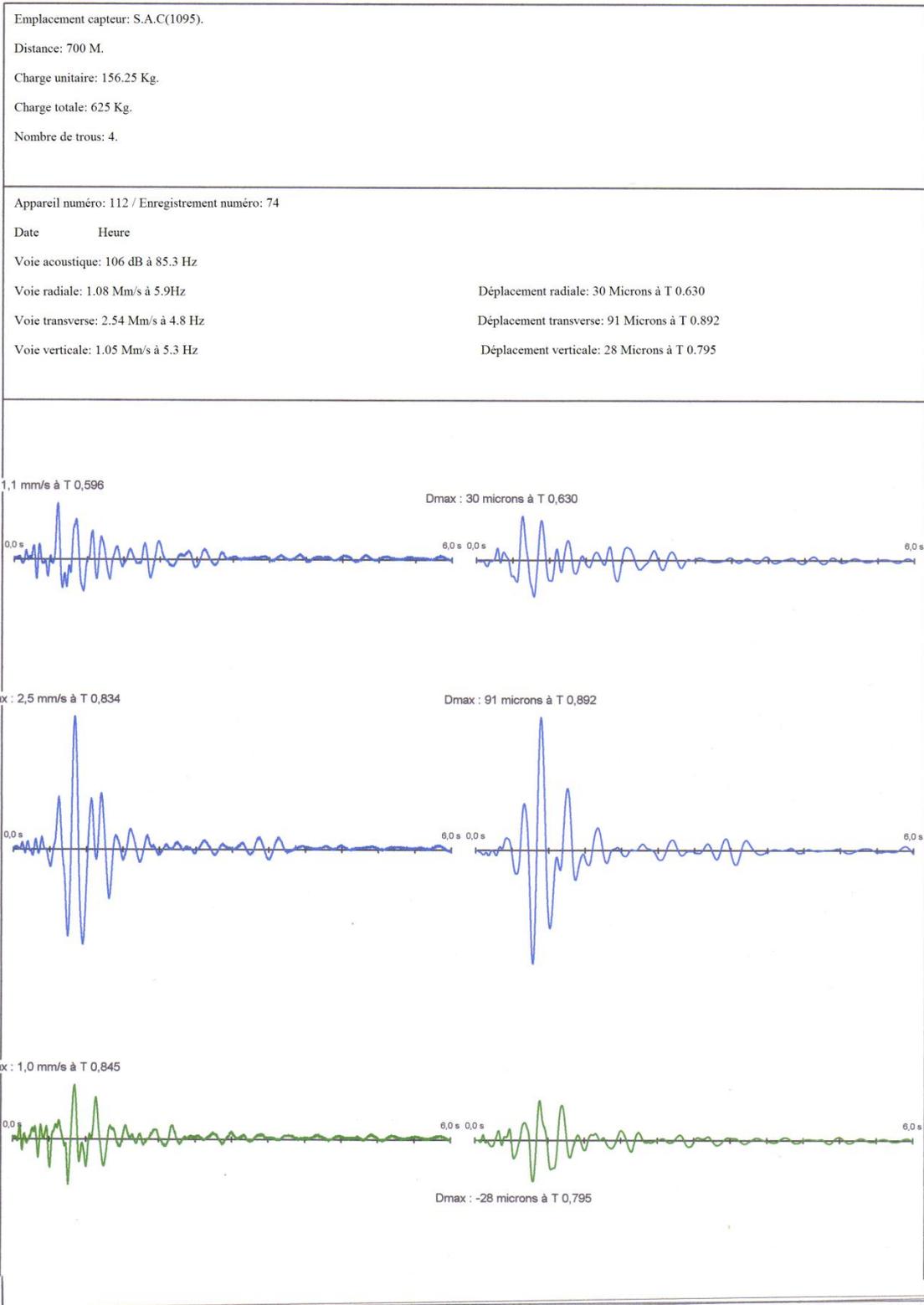
Amax : 74,760 m/s² à T 0,797

Vmax : 1,0 mm/s à T 0,845

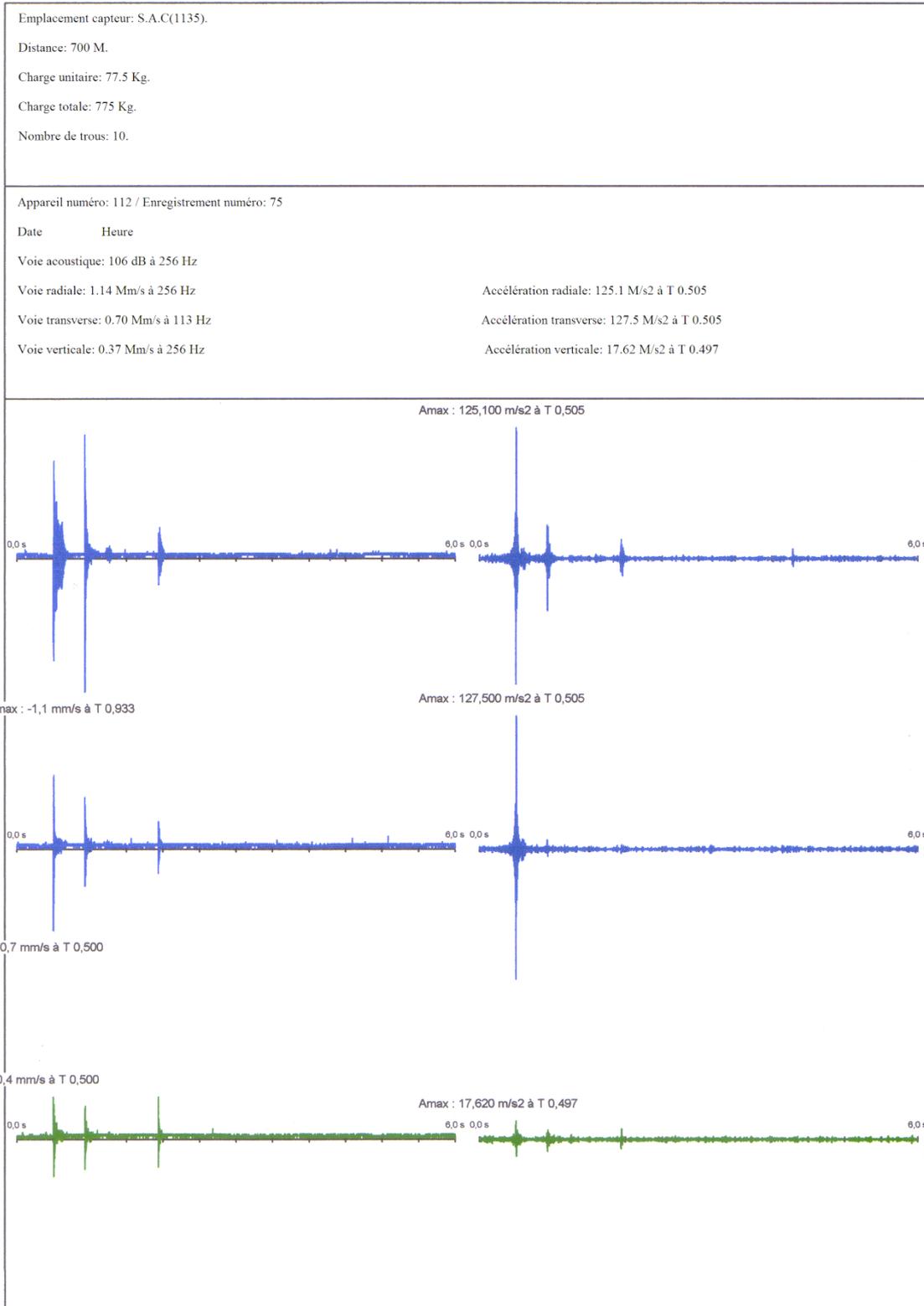


Amax : -38,970 m/s² à T 0,882

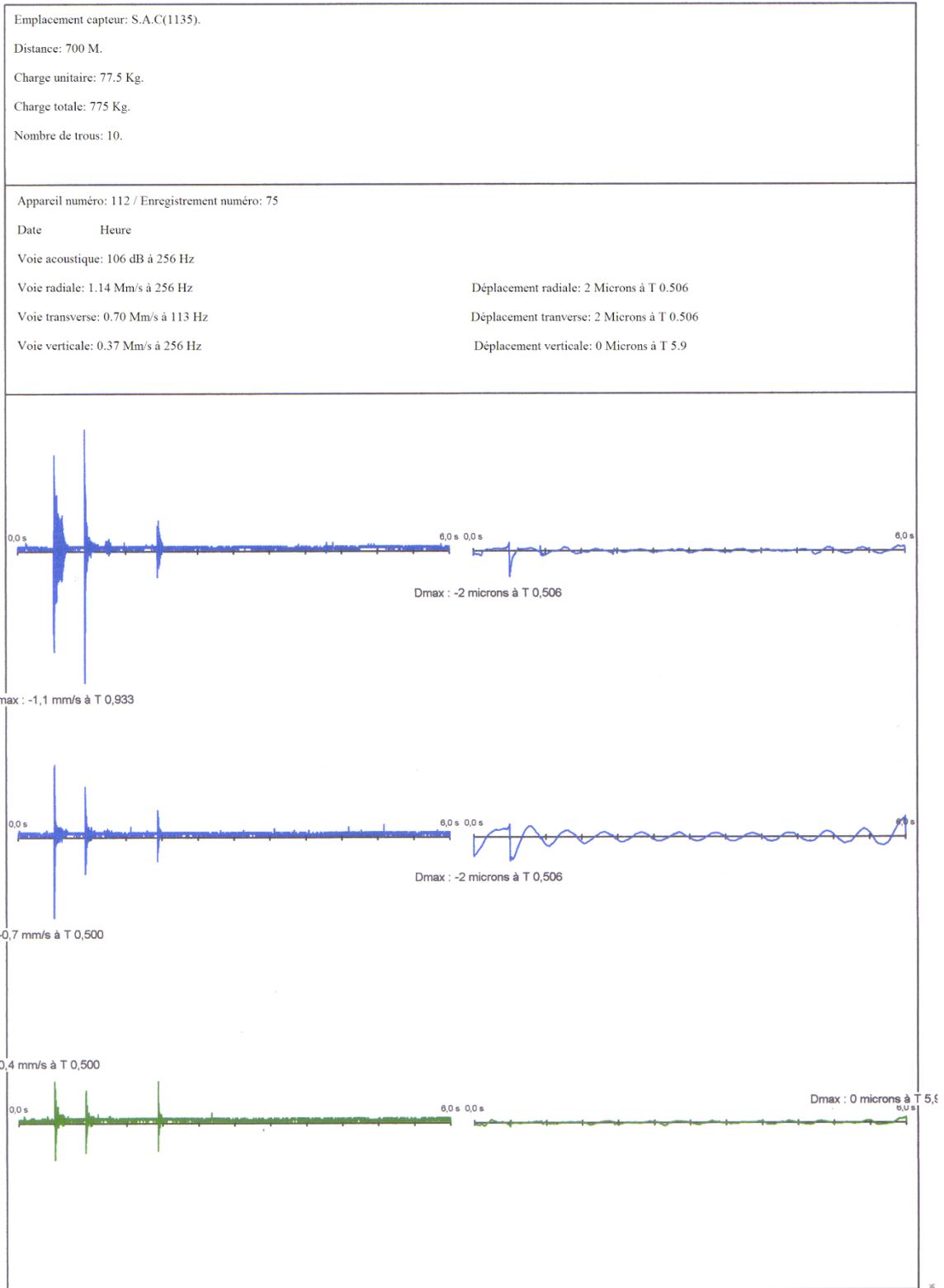
Annexe 36 : Essai N° :12 Déplacement



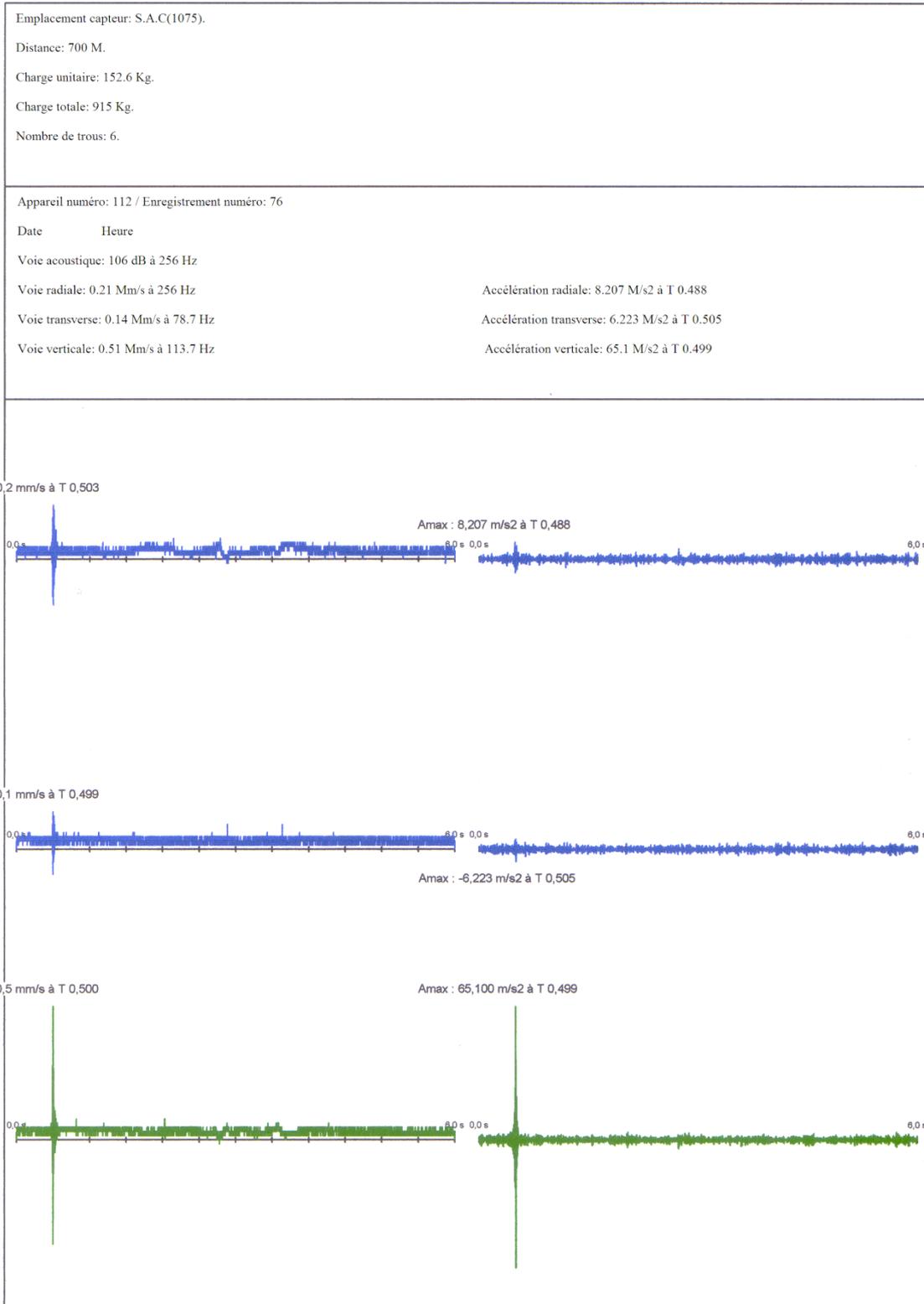
Annexe 38 : Essai N° :13 Accélération



Annexe 39 : Essai N° :13 Déplacement



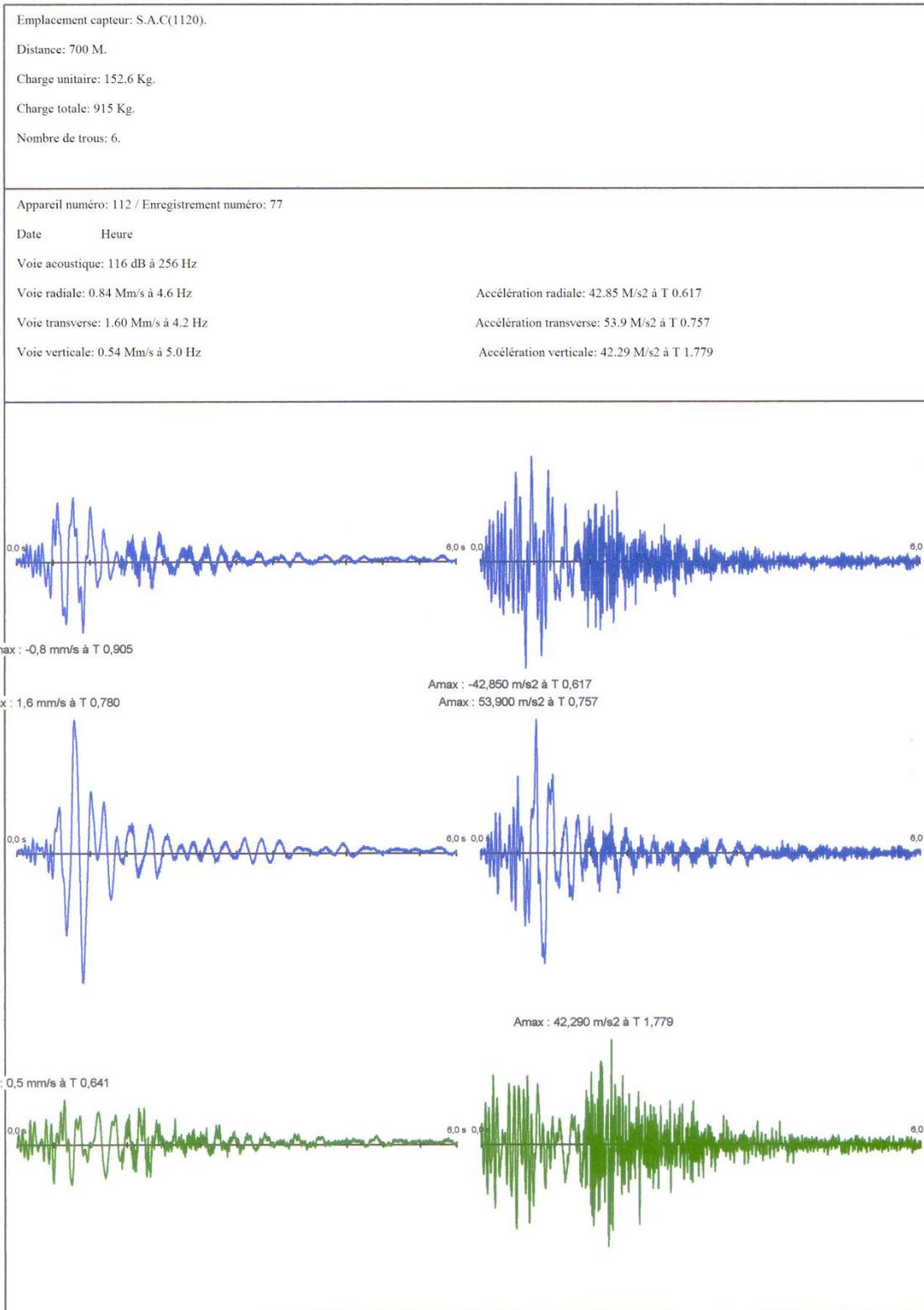
Annexe 41 : Essai N° :14 Accélération



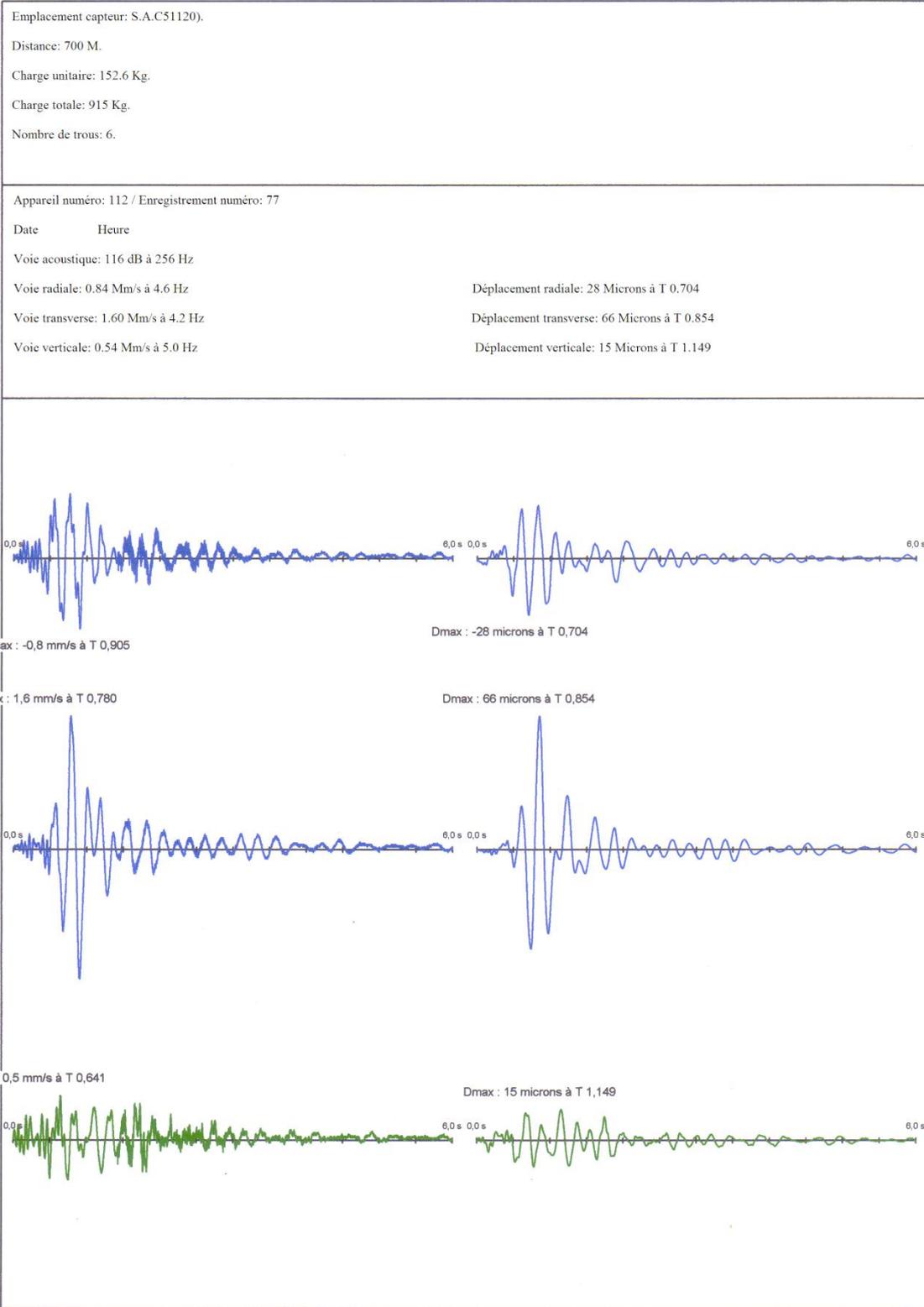
Annexe 42 : Essai N° :14 Déplacement



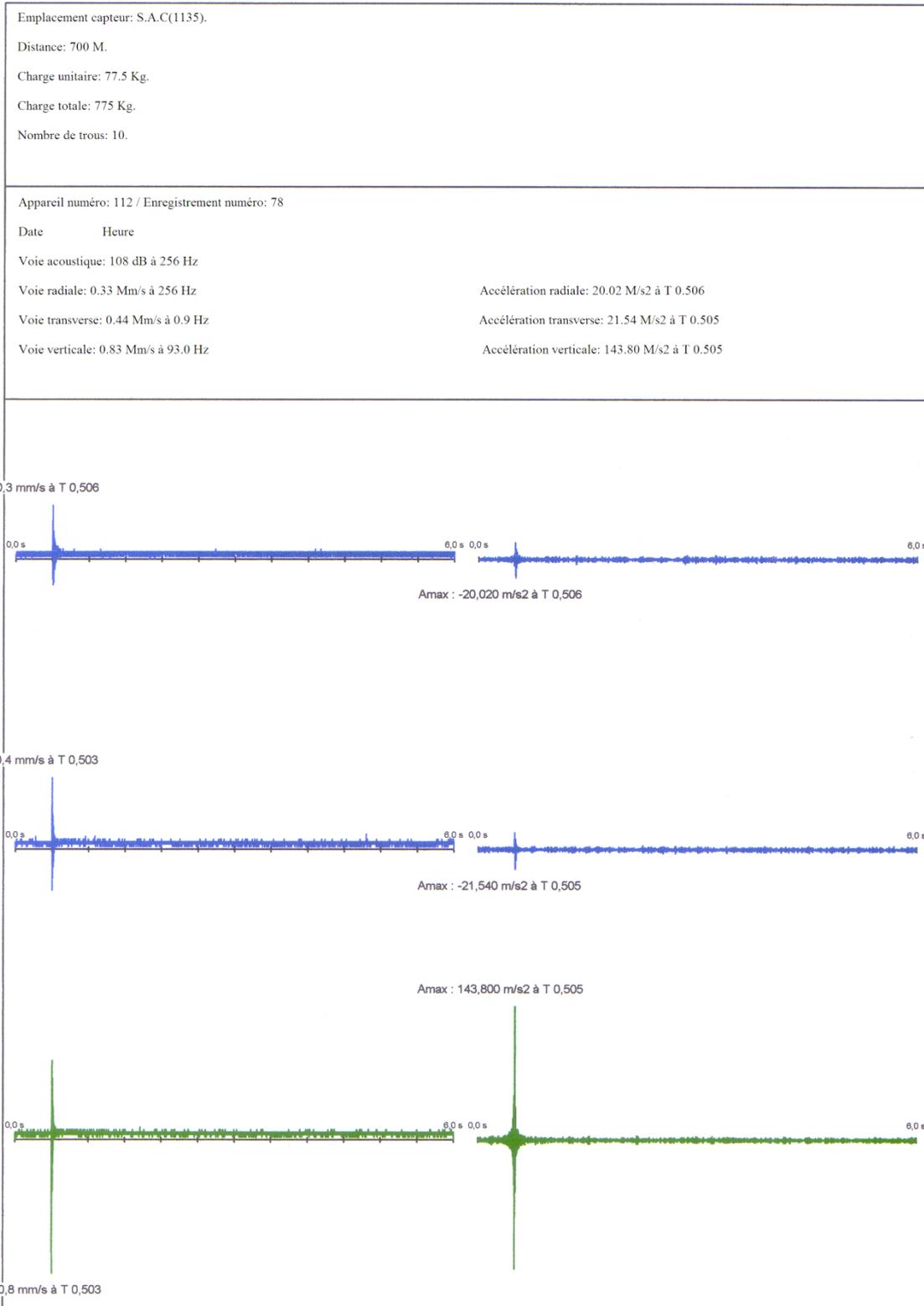
Annexe 44 : Essai N°:15 Accélération



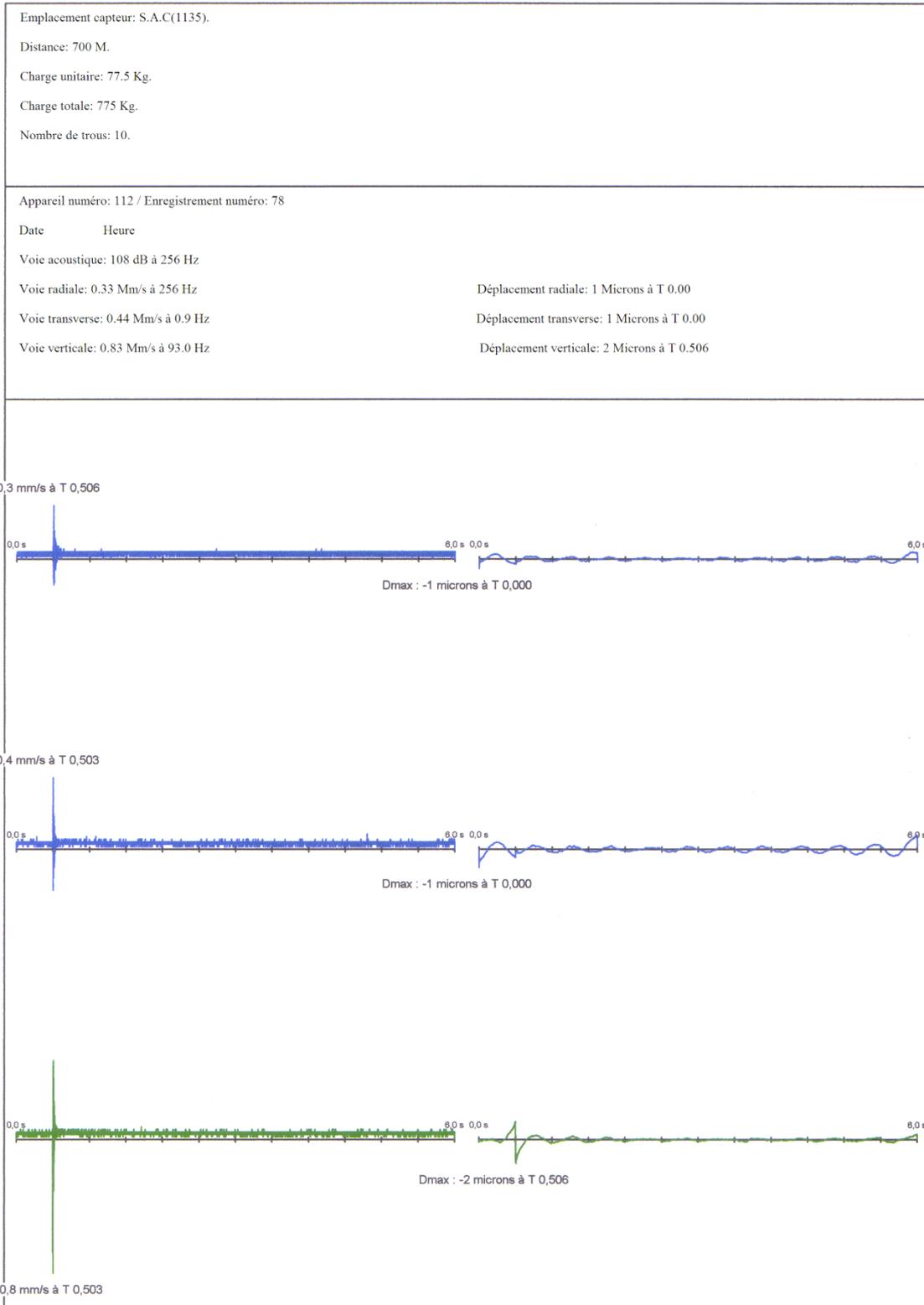
Annexe 45 : Essai N°: 15 Déplacement



Annexe 47 : Essai N° :16 Accélération



Annexe 48 : Essai N° :16 Déplacement



Définitions

Mine (à ciel ouvert ou souterraine) : d'où l'on extrait de matériaux stratégique et concessible par l'état (métaux tels le fer, or, cuivre, uranium, et les combustibles tels le charbon, pétrole et le gaz naturel).

Carrière (à ciel ouvert ou souterraine) : qui exploitent des matériaux concessible par le propriétaire du sol (calcaire, gravais, roche massive, etc.).

Dégagement (surface de) : surface totale permettant aux matériaux d'être expulsés sous les actions combinés de l'onde de choc et de l'effet de gaz, le rendement de l'explosif dépend du développement de cette surface.

Déplacement : c'est la distance parcourue par une particule depuis sa position d'origine sous le passage de l'onde de choc.

Explosif : c'est un composé chimique susceptible de se décomposé rapidement en dégageant une grande quantité d'énergie.

Fragmentation : réduction de la taille des blocs par action de l'explosif.

Front d'ondes : limite entre les particules de matrice au repos et les particules en mouvement.

Fréquence : d'oscillation d'une particule par unité de temps.

Gaz (énergie de) : provient de la détente des gaz enfermés à haut pression dans la cavité d'explosion.

Pyrotechnique (chaîne) : assemblage des différents éléments permettant de transmettre et de provoquer la détonation ou la déflagration.

Retard : délai obtenu par adjonction d'un composé retardateur entre la perle d'allumage et les charges pyrotechniques.

Séquence : ordre dans lequel s'effectue le départ des mines.

Sismique : la détonation d'une charge d'explosif dans le sol produit des contraintes de traction et de compression qui se propagent rapidement, la sismique est l'étude de ces phénomènes dans le massif rocheux.

Unitaire (charge) : charge qui détonne dans un intervalle de temps compris entre 0 et 3 millisecondes, elle peut être unique (une seule charge) ou composée (plusieurs charges qui sont initiées simultanément entre 0 et 3 millisecondes).

Vibration : ébranlement consécutif à un tir d'explosif dans le sol, cet ébranlement s'atténue rapidement.

Vitesse particulière : vitesse de déplacement du sol en mm/s enregistrée au passage de l'onde de choc, cette mesure se fait avec un sismographe.

Vitesse de propagation : c'est la vitesse de déplacement des ondes dans le sol, elle dépend de la nature de terrain rencontré.

Volée : c'est l'ensemble de mines qui sont mises à feu au cours d'un même tir.

Produit explosif : de la matière explosive ou un objet en contenant.

Trou de mine : un trou obtenu par forage et destiné à recevoir une charge.

Charge : un ensemble de produits explosifs destinés à être amorcés par le même accessoire pyrotechnique de tir.

Charge : terme générique désignant la quantité d'explosif placée dans un ou plusieurs trous de mine, cette charge peut être **instantanée** (charge qui détonne au temps 0), **retardée** (charge qui détonne à un instant t), **unitaire** (charge qui détonne dans un intervalle de temps compris entre 0 et 3 millisecondes), **totale** (ensemble des charges de volée), **spécifique** (charge rapportée à l'unité d'abattage).

Charge-amorce : une cartouche d'explosif ou un buteur munis d'un détonateur.

Buteur : un produit explosif dont le conditionnement spécial est conçu pour constituer une charge-amorce et pour assurer la protection de détonateur dans le cas de chargement en chute libre de cartouche.

Fond de trou : ce qui reste de l'extrémité arrière d'un trou de mine après la mise à feu.

Raté : l'absence d'explosion ou la présence d'une ou plusieurs charges apparemment intactes ou amputées à la suite de la mise à feu.

Charge superficielle : une charge placée hors d'un trou de mine au contact de matériaux.

Mine verticale : un trou de mine incliné à plus de 65 degrés par rapport à l'horizontale.

Amorçage : dispositif pyrotechnique qui initié la détonation ou la déflagration de l'explosif (peut être antérieur, postérieur ou latérale).

Accélération : c'est la variation de vitesse de déplacement d'une particule depuis son point d'origine.

Banquette : épaisseur de la tranche à abattre mesurée suivant la plus court distance.

Bourrage : éléments sableux ou argileux ou débris de forage de faible granulométrie servant à isoler les charges situées dans un même trou ou à obturer la mine chargée.

Choc (énergie de) : effet mécanique lié à la détonation ou à la déflagration d'un explosif dans un milieu résistant, il résulte de la détente des gaz lancés à haut vitesse (1500 à 2000 m/s) sous très haute pression avec les parois d'un trou.