



TOTAL

Réau 12

D7043

Pau, le 11 juillet 2006

Exploration & Production

DGEP/GSR/MTS/INNO 06-164

Didier RAPPIN

CONFIDENTIEL

**Estimation de charge explosive
par calibration expérimentale.**

Cas de l'explosion d'AZF 21/09/2001 et
calibration par l'expérimentation sismique
de 2004.

*

N° Archives : *

La reproduction partielle ou totale et la diffusion, sans l'autorisation écrite de Total, sont strictement interdites.

Adresses postales

Signalétique

Titre	: Estimation de charge explosive par calibration expérimentale. Cas de l'explosion d'AZF 21/09/2001 et calibration par l'expérimentation sismique de 2004.		
Auteur(s)	: Didier RAPPIN		
Direction	: GEOSCIENCES		
Date	: Pau, le 12 juillet 2006		
N° Affaire (RFS, etc)	:		
N° Référence chrono	Document vérifié par	: Yannick KERDRAON	
DGEP/GSR/MTS/INNO 06-164	Document validé par	: *	
N° Archives	: *		
Domaines (thèmes généraux) :	1 - Sismologie	2 - Amplitude	3 - Atténuation
Mots clefs (thèmes spécifiques) :	1 - Amplitude	2 - Son	3 - Explosion
	4 - Atténuation	5 - Chapot	6 - Calibration
Pays ⁽¹⁾ :	France	Champ ⁽¹⁾ :	*
Région ⁽¹⁾ :	Midi-Pyrénées	Puits ⁽¹⁾ :	*
Bassin ⁽¹⁾ :	Toulouse	Campagne géophysique ⁽¹⁾ :	2004
Permis/Bloc ⁽¹⁾ :	AZF		<i>⁽¹⁾ plusieurs noms si nécessaire</i>
Commentaires (descripteurs libres) :	*		

Liste de diffusion

Destinataires du rapport complet

2 ex	DGEP/GSR/ASI/GDM (Archives)	1 ex papier + 1 ex format PDF
3 ex	Grande Paroisse DI/DSER	Henri FOURNET
1 ex	DGEP/GSR/TG/EM	Henri CLEMENCON
1 ex	DGEP/GSR/TG/MTS/EM	Yannick KERDRAON

Résumé/Conclusion

La présente étude vise, à partir de l'enregistrement réalisé par l'OMP en 2001 de l'explosion du hangar 221 d'AZF à Toulouse et des mesures réalisées en 2004 lors de la campagne d'acquisition sismologie-sismique, à estimer la charge explosive de 2001 la plus probable, équivalente aux conditions de l'expérimentation de 2004.

Ce travail requiert une mesure précise de l'amplitude sur les signaux enregistrés en 2004 à l'OMP.

Pour réaliser cette estimation, la méthode de calibration des ébranlements mise en œuvre dans le génie civil (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) est utilisée. Elle est basée sur la mesure de l'amplitude en fonction de la distance et de la charge explosive. Les paramètres caractéristiques expérimentaux sont ainsi définis pour le site de l'OMP.

A partir de cette calibration expérimentale, la charge 2001 est estimée en masse d'explosif dans les conditions d'explosion 2004.

En outre, il faut tenir compte de la géométrie, allongée, des sources explosives et notamment de la différence d'orientation de la charge entre 2001 (horizontale) et 2004 (verticale). Sur la base d'un modèle cylindrique d'explosion, le rapport probable de l'amplitude émise entre une source horizontale (2001) et verticale (2004) est affecté au résultat précédent pour affiner l'estimation.

Au final, le calcul conduit à la charge équivalente 2001 estimée comprise entre 110 et 150 kg de charge de TNT enterré.

Sommaire

1	Introduction	2
2	Protocole de travail.	3
3	Mise en œuvre.	4
3.1	Pointé et diagramme expérimental.	4
3.2	Diagramme et loi de Chapot.	5
3.3	Estimation de la charge 2001 équivalente.	10
3.4	Influence de l'orientation de la source.	12
3.5	Correctif d'estimation en équivalent TNT.	14
4	Conclusion.	15
	Liste des Figures	16
	Liste des Tableaux	16
	Références bibliographiques	17
	Liste des fichiers numériques utilisés dans l'étude	18

1 Introduction

L'objectif de ce rapport technique est de proposer, en exploitant conjointement le signal OMP2001 et les enregistrements réalisés à l'OMP en août et septembre 2004, un moyen d'estimer la charge qui, dans les conditions de 2004, aurait explosé en 2001.

Pour réaliser ce travail, on suppose que :

- l'amplitude des ondes sismiques émises à partir d'une source explosive s'atténue en fonction de la distance
- l'amplitude est reliée mathématiquement à la charge ayant explosé
- l'atténuation de l'amplitude peut être représentée par une loi caractérisée par au plus deux paramètres associés aux conditions locales.

Cette description a été proposée par Pierre Chapot en 1981 [1].

2 Protocole de travail.

Le protocole de travail consiste en trois phases successives :

- 1- Sur les signaux numériques correspondant à l'enregistrement de la vitesse du sol, les valeurs maximales des signaux sismiques sont pointées. Celles-ci sont reportées sur un diagramme reportant la vitesse du sol en fonction d'une grandeur nommée "distance réduite" obtenue en divisant la distance par la racine carrée de la charge explosive.
- 2- Des paramètres sont estimés pour décrire des lois de type loi de Chapot qui ajustent les valeurs mesurées de vitesse particulaire. Les lois applicables au site de l'OMP sont ainsi précisées. Ces lois comportent deux paramètres. Ceux-ci sont estimés par une analyse de minimisation de l'écart entre la mesure de vitesse particulaire réalisée au point 1 et la prédiction de cette même vitesse du sol en fonction d'une charge et d'une distance connues et des paramètres. La loi de Chapot pouvant s'exprimer par une simple combinaison linéaire, le calcul de l'écart sur une surface de variation des deux paramètres constitutif permet d'estimer le couple optimal et la précision qui y est associée.
- 3- Avec les lois précisées au point 2, la charge équivalente pour l'enregistrement de 2001 est calculée.
- 4- La précision de l'estimation est contrainte par les incertitudes sur les grandeurs utilisées. En outre, est ajoutée la contribution associée à la différence d'orientation de la source entre 2001 (allongement horizontal) et les sources 2004 (allongement vertical). Ceci nécessite au préalable une mesure de l'angle d'incidence des ondes sur les capteurs.

3 Mise en œuvre.

3.1 Pointé et diagramme expérimental.

Le pointé sur les signaux de la phase de calibration d'août 2004 et d'expérimentation de septembre 2004 de l'amplitude maximale des signaux enregistrés à l'OMP est réalisé pour toutes les sources disponibles [2].

La mesure est faite sur l'enveloppe des signaux (module du signal analytique) de façon à s'affranchir de l'influence de l'échantillonnage des mouvements du sol.

Les données sont portées dans le **tableau 1**. Les amplitudes sont données en millimètres par seconde (mm/s). Certaines valeurs sont absentes et correspondent à des signaux dont l'amplitude du signal est trop faible par rapport au niveau du bruit ambiant (signaux parasites d'origines inconnues) au moment de l'enregistrement.

Connaissant les positions des sources et du récepteur [3], il est possible de calculer précisément la distance source-récepteur, à mieux que le mètre, le positionnement ayant été réalisé par la méthode DGPS du service topographique de la Compagnie Générale de Géophysique.

Les mesures réalisées pour la composante verticale des capteurs (composante Z) sont ensuite portées dans un diagramme représentant le logarithme népérien de la vitesse particulière (mesure) en fonction du logarithme népérien de la distance réduite (**voir figure 1**). La notion de distance réduite est communément utilisée pour les explosions de carrière et correspond à la distance source-récepteur (exprimée en mètre) divisée par la racine carrée de la charge explosive exprimée en kilogramme (kg).

OMP	Distance ext	Z ext	L ext	T ext	Distance int	Z int	L int	T int	Charge
AZF-7	4161,7	0,0084	0,0040	0,0028	4123,9				5,00
AZF-4	4170,0	0,0156	0,0048	0,0035	4132,2	0,0148	0,0045	0,0051	10,00
AZF-10	4149,7	0,0019			4111,9				1,00
AZF-8	4153,6	0,0271	0,0038	0,0098	4115,9	0,0351	0,0065	0,0041	20,00
AZF-1	4191,6	0,0397	0,0093	0,0067	4153,9	0,0474	0,0064	0,0061	25,00
402	4217,8	0,0146	0,0033	0,0029	4186,3				10,00
404	4142,2	0,0586	0,0164	0,0092	4110,7	0,0599	0,0126		35,00
406	4081,4	0,0657	0,0209	0,0110	4049,9	0,0698	0,0149	0,0006	35,00
408	3953,2	0,0237	0,0820	0,0028	3921,7	0,0309			16,00
410	4128,2	0,0032			4096,7				5,00
412	4129,0	0,0256	0,0061	0,0039	4097,6	0,0306	0,0076	0,0002	20,00

Tableau 1: Mesure des amplitudes (vitesse particulière en mm/s) maximales pour les tirs d'août 2004 (fond jaune) et de septembre 2004 (fond vert), pour les composante Z, L et T des capteurs extérieur (suffixe ext) et intérieur (suffixe int) situés à l'OMP. Les distances sont calculées avec la base topographique [3] et la charge est exprimée en kg d'explosif.

3.2 Diagramme et loi de Chapot.

Parmi les phénomènes d'atténuation, la majeure partie de l'atténuation effective est liée à l'expansion géométrique du front d'onde émis, qui augmente au fur et à mesure de sa propagation ([4], [5] et [6]). Il découle de ce phénomène géométrique que le logarithme de l'amplitude sismique A est proportionnelle au logarithme d'une puissance γ de la distance D parcourue par le front d'onde :

$$A \propto 1 / D^\gamma \Rightarrow A = a_0 \cdot D^{-\gamma}$$

qui peut s'écrire : $\ln(A) = a + b \cdot \ln(D)$; $a = \ln(a_0)$ et $b = -\gamma$

Les deux paramètres a et b sont donc à estimer et la relation est valable pour une charge donnée.

Dans sa synthèse sur l'étude des vibrations lors d'explosions en carrière, P. Chapot [1] propose une loi qui intègre la charge explicitement comme facteur de proportionnalité, gardant deux autres paramètres pour quantifier le comportement local de l'atténuation. Il décrit la relation par l'équation suivante :

$$V = k \cdot (D / \sqrt{Q})^e = k \cdot D^e$$

" k " et " e " étant les paramètres à estimer, V la vitesse particulaire, Q la charge explosive et D la distance d'observation (distance entre le point d'émission et le point de réception).

En synthétisant de nombreux travaux réalisés dans différents contextes (carrières, chantiers routiers, tirs en forage), il observe un paramètre " e " global voisin de 1.8, ce qui a été confirmé lors de la phase de calibration de 2004 (figure 1). Toutefois, des tirs en forages donnent lieu à des mesures d'amplitude plus forte que pour d'autres sources et les paramètres de la loi peuvent être ajustés avec des valeurs différentes. La courbe qui ajuste mieux les données d'août 2004 est obtenue pour une valeur du paramètre " e " de -1.87. La loi de comportement limite de la phase de calibration peut par contre bien s'exprimer avec un paramètre de -1.8, l'expérience pouvant venir compléter de façon cohérente la synthèse de P. Chapot (figure 2). Ce dernier signale en outre que pour un travail local, ce sont des paramètres ajustant une loi locale qu'il faut estimer, car ils tiennent compte des conditions réelles de la géologie qui influe sur le comportement de l'atténuation.

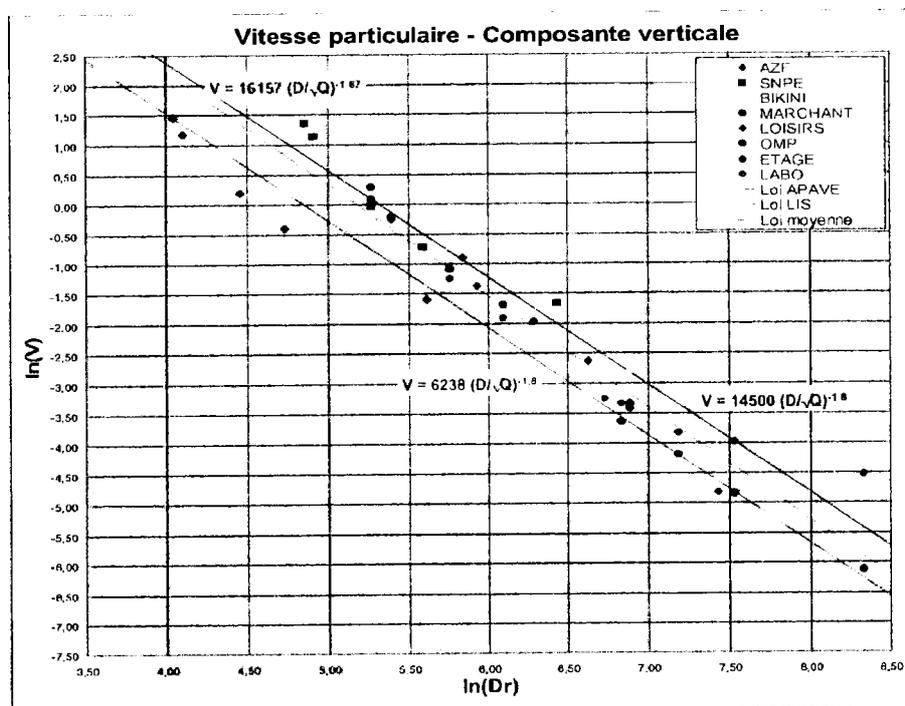


Figure 1 : Diagramme expérimental de la phase de calibration d'août 2004. Les mesures de vitesse particulaire (APAVE) sont reportées ainsi que trois lois de type "loi de Chapot".

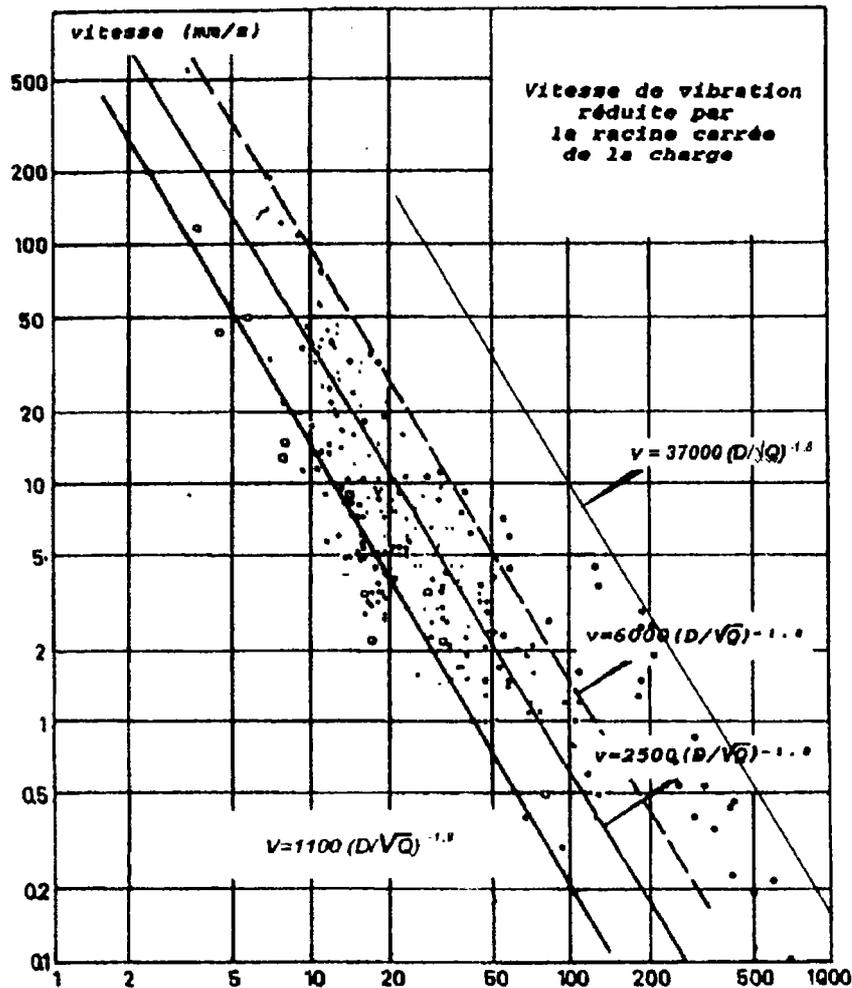


Figure 2: Diagramme de Chapot original (1981) avec les points expérimentaux en noir et les courbes d'ajustement en noir (trait continu : $k=2500$, $e=-1.8$; trait tireté : $k=6000$, $e=-1.8$) et magenta ($k=1100$; $e=-1.8$). Les points expérimentaux d'août 2004 sont reportés en points rouges et la limite comportementale est donnée par la droite bleue ($k=37000$, $e=-1.8$). Les valeurs de k obtenues en 2004 varient selon les sites de 9000 à 37000.

Une estimation des paramètres locaux pour un paramètre "e" fixé à -1.8 conduit à des valeurs du paramètre "k" qui varient de 9000 à 37000 montrant qu'il est nécessaire de travailler avec une estimation locale des paramètres afin de mener une étude quantitative.

Pour estimer les paramètres optimaux "k" et "e", la loi de Chapot est utilisée à partir des paramètres minimalistes ($k=9000$, $e=-1.8$) pour obtenir des amplitudes calculées V_{cal} avec la charge nominale Q_{nom} . Ces valeurs diffèrent des mesures V_{mes} obtenues. Pour chaque valeur V_{mes} , une charge Q_{cal} est calculée pour obtenir une amplitude V_{cal} . Par dichotomie à deux paramètres (gradients conjugués), les paramètres sont ajustés afin de minimiser la moyenne des écarts entre Q_{nom} et Q_{cal} :

$$k \text{ et } e \text{ tels que } |(Q_{cal} - Q_{nom})| \text{ est minimum}$$

La précision de l'estimation est prise comme l'écart maximal existant entre Q_{cal} et Q_{nom} .

Ces grandeurs (Q_{nom} , Q_{cal} , écarts bruts et écart moyens) sont reportées dans le **tableau 2** pour les paramètres optimaux. La recherche du point optimal qui donne l'écart en fonction des valeurs des deux paramètres est représentée sur la **figure 3**. Cette figure montre clairement que la fonction "écart" ne présente pas de minima secondaire mais une tendance de décroissance avec minimum unique pour chaque paramètre.

Indicatif de tir	MESURE					ESTIMATION - ECART							
	Distance champ libre	V-Z ext mesure	Distance labo	V-Z int mesure	Charge Q nominale	V-Z ext évaluée	Ecart mesure	V-Z int évaluée	Ecart mesure	Q ext calculée	Ecart Q ext	Q int calculée	Ecart Q int
AZF-7	4161,7	0,0084	4123,9		5	0,0081	-3,1			5,16	3,21		
AZF-4	4170,0	0,0156	4132,2	0,0148	10	0,0160	2,7	0,0163	10,2	9,73	2,68	8,50	15,00
AZF-10	4149,7	0,0019	4111,9		1	0,0017	-11,3			1,13	12,93		
AZF-8	4153,6	0,0271	4115,9	0,0351	20	0,0319	17,7	0,0325	-7,5	16,94	15,28	20,00	0,00
AZF-1	4191,6	0,0397	4153,9	0,0474	25	0,0390	-1,8	0,0397	-16,2	25,46	1,82	27,51	10,04
402	4217,8	0,0146	4236,1		10,0	0,0157	7,3			9,31	6,93		
404	4142,2	0,0588	4160,5	0,0599	35,0	0,0558	-5,2	0,0551	-8,1	36,98	5,59	34,87	0,36
406	4081,4	0,0657	4099,6	0,0698	35,0	0,0572	-13,0	0,0567	-18,8	40,31	15,17	39,48	12,74
408	3953,2	0,0237	3971,5	0,0309	16,0	0,0282	19,1	0,0280	-9,5	13,39	16,31	16,39	2,46
410	4128,2	0,0032	4146,0		5,0	0,0083	158,5			1,90			
412	4129,0	0,0256	4147,6	0,0308	20,0	0,0323	26,0	0,0320	4,5	15,80	21,00	17,71	11,47
										Moyenne	10,09		7,44

Tableau 2 : Calcul de l'amplitude et de Q_{cal} pour ajuster les paramètres expérimentaux.

Il ressort de l'analyse une précision de la régression de 10,09% pour le capteur extérieur et de 7,44% pour le capteur intérieur. La précision de la charge estimée varie par contre jusqu'à 21,0% pour le capteur extérieur et 15,0% à l'intérieur.

On notera en outre que le tir de 5kg de septembre est totalement en dehors de la tendance. Après vérification, la mesure est correcte sur les sismogrammes. Par contre, il s'agit du tir pour lequel des échappements de gaz d'explosion ont pu être observés assez loin de la position du tir, laissant penser que le milieu dans ce secteur est perturbé et donc susceptible d'induire une distorsion dans l'amplitude propagée (très faible) comme le suggère la comparaison avec le tir de 5 kg du mois d'août, localisé plus au Sud (voisinage du cratère). Ce point pour la charge de 5 kg en septembre n'est pas conservé pour les calculs qui suivent.

L'estimation des paramètres conduit à ajuster les mesures réalisées à l'OMP par deux lois représentées sur la figure 3.

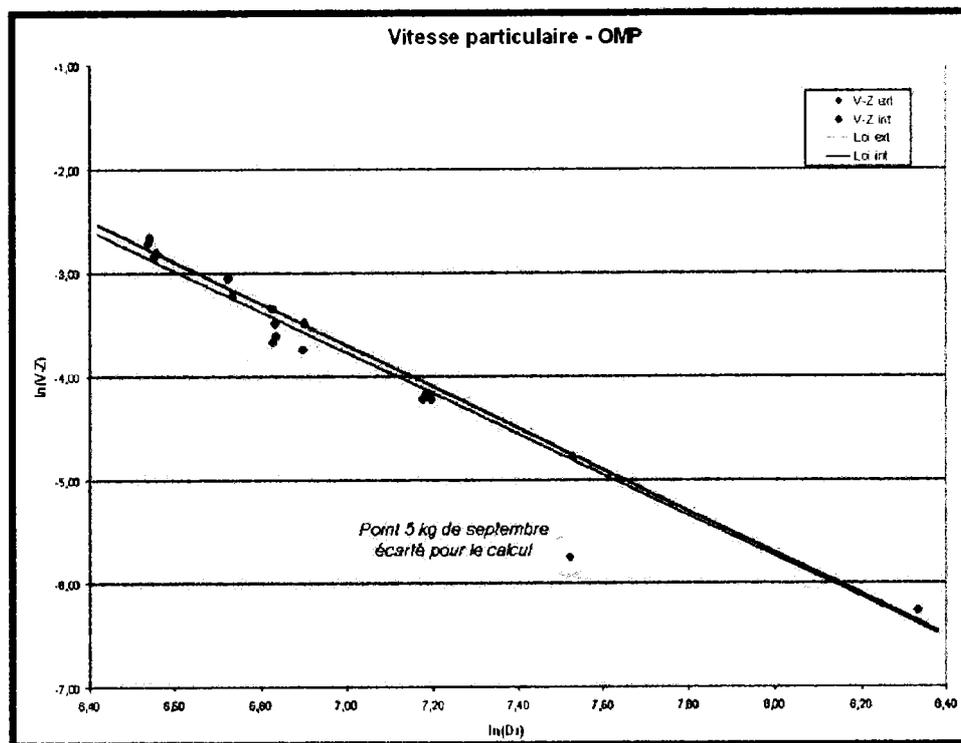


Figure 3 : Diagramme de Chapot pour les mesures expérimentales de 2004 réalisées à l'OMP, avec le capteur extérieur (losanges rouges) et dans le laboratoire de sismologie de l'OMP (losanges bleus). Les lois de régression sont estimées avec les paramètres suivants :

- extérieur : $k = 21511 \pm 1$; $e = -1.964 \pm 0.001$
- intérieur : $k = 29731 \pm 1$; $e = -2.000 \pm 0.001$

La précision de l'estimation des deux paramètres peut être estimée en analysant la répartition de la moyenne des écarts en fonction des valeurs pouvant être prises par les deux paramètres, valeurs centrées autour de celles précisées à la figure 3. Cette variation est présentée en figure 4 et montre bien une surface présentant un seul minimum (porté vers le haut pour une meilleure lisibilité).

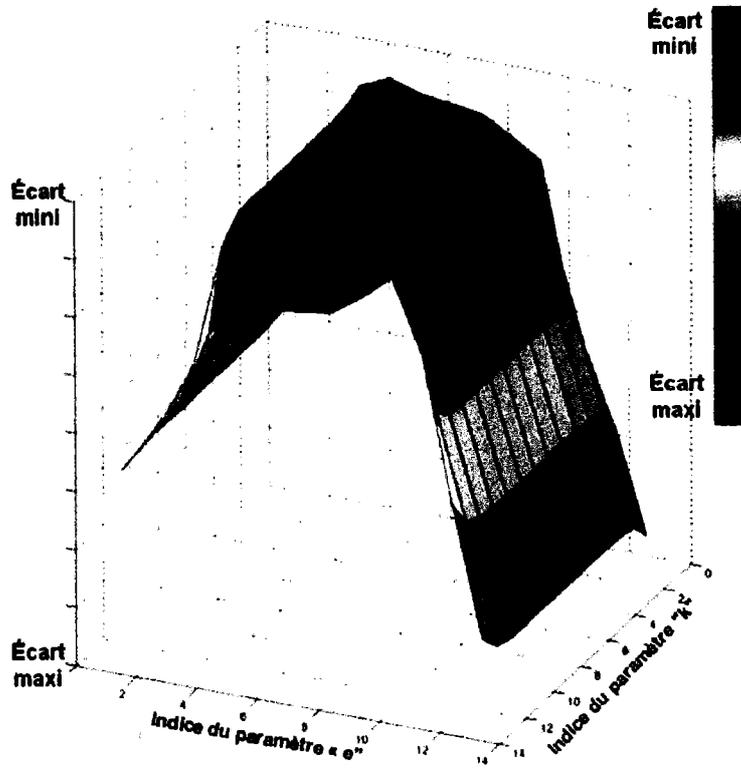


Figure 4 : Variation de l'écart entre charge calculée par loi de Chapot et charge nominale valable pour le laboratoire du RSSP de l'OMP. (Écart relatif au minimum, porté vers le haut ; 14 valeurs différentes de "k" et de "e").

Cette fonction à deux paramètres montre un seul extremum ce qui permet d'extraire deux courbes se croisant à ce point et présentant la variation de l'écart en fonction de chaque paramètre séparément. Les courbes pour les mesures intérieures sont représentées sur les figures 5a et 5b.

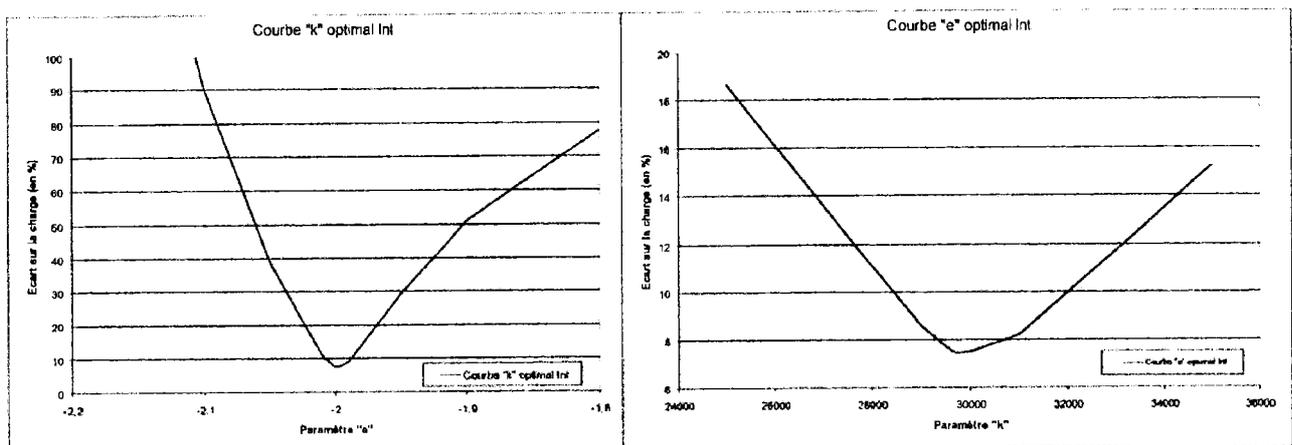


Figure 5 : Variation (en %) de l'écart de charge calculée et de la charge nominale en fonction des paramètres de la loi de Chapot valable pour le laboratoire du RSSP de l'OMP, a) pour la valeur optimale de "k"; b) pour la valeur optimale de "e". La résolution est bonne car la variation de l'écart avec la variation des valeurs des paramètres est forte.

Les courbes pour les mesures extérieures sont représentées sur les figures 6a et 6b.

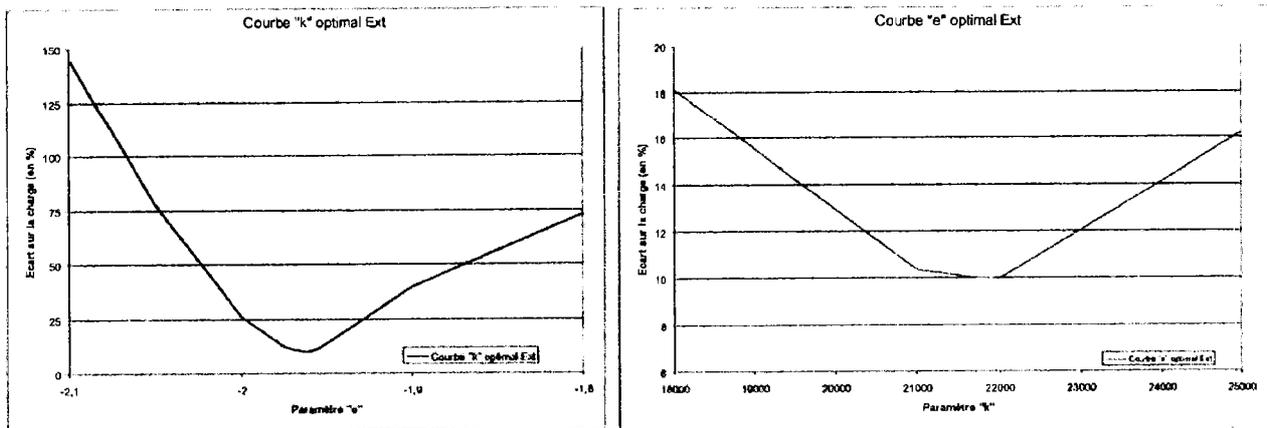


Figure 6 : Variation (en %) de l'écart de charge calculée et de la charge nominale en fonction des paramètres de la loi de Chapot valable pour à l'extérieur du laboratoire du RSSP de l'OMP, a) pour la valeur optimale de "k" ; b) pour la valeur optimale de "e". La résolution est bonne car la variation de l'écart avec la variation des valeurs des paramètres est forte.

En prenant les extrema associés à ces grandeurs diminuées ou augmentées des incertitudes ci-dessus, l'estimation des deux paramètres des lois de Chapot évolue. Seule l'incertitude sur les valeurs de "k" est augmentée (à ± 7), l'influence sur le paramètre "e" étant inférieure d'au moins un ordre de grandeur à l'incertitude déjà énoncée, pour devenir :

- laboratoire du RSSP :
 - o "k" = 29731 ± 8
 - o "e" = -2.000 ± 0.001
- champ libre de l'OMP à proximité du laboratoire du RSSP :
 - o "k" = 21511 ± 8
 - o "e" = -1.964 ± 0.001

3.3 Estimation de la charge 2001 équivalente.

A présent que les paramètres sont calibrés, il faut se reporter au sismogramme de l'OMP 2001. Ce dernier est pris dans sa version du signal 2005, faisant l'objet de la pièce judiciaire dite TITAN2 du 14 avril 2005.

Les échantillons de cet enregistrement bénéficient en effet, par rapport à la pièce originale saisie, d'avoir été corrigés par le laboratoire de sismologie de l'OMP des réponses instrumentales de chaque composante et d'être exprimés dans une unité physique (m/s), exploitant pour cela un facteur de calibration qui permet d'exprimer les valeurs de numérisation en échantillons représentant une unité physique de vitesse particulière.

Dans son état, tel qu'utilisé pour le Compte Rendu de l'Académie des Sciences de 2002 [7], le signal est calibré avec un coefficient de $2,67 \cdot 10^{-9}$ m/s/unité. La mesure de la vitesse maximale est de 0,49 mm/s. Mais dans un document adjoint au fichier saisi, M^{me} Souriau signale qu'il aurait fallu utiliser un coefficient plus faible, de $5,5 \cdot 10^{-10}$ m/s/unité, ce qui conduirait à une amplitude maximale de 0,101 mm/s, soit moins de 2 fois l'amplitude maximale enregistrée en 2004. Pour cette raison, entre autres, la première calibration est préservée sur la composante Z au moins. Ce coefficient plus faible peut par contre s'appliquer à la composante radiale. Ce problème de calibration est repris plus explicitement dans [8].

Dans ces conditions, l'estimation de la charge équivalente 2001 conduit aux résultats suivants :

- avec les paramètres du capteur extérieur : 328,19 kg,
- avec les paramètres du capteur intérieur : 288,85 kg.

Les erreurs sur l'estimation de ces charges résultant des écarts obtenus avec les mesures et tirs de 2004 ne dépassent pas 21,0% (extérieur) et 15,0% (intérieur). Les estimations des paramètres "k" et "e" sont précises à 7 et 0,001 respectivement, les incertitudes sur les distances et la charge étant incluses. De ce fait, l'incertitude globale est comprise dans l'intervalle d'erreur précité.

Contrairement à l'expérimentation de 2004 pour laquelle la distance est connue précisément, le lieu d'émission en 2001 n'est pas connu. Afin de tenir compte de cette inconnue, l'estimation de la charge est menée en considérant les points caractéristiques du cratère (figure 7) comme sources possibles. En outre ne disposant pas de signal enregistré en champ libre l'intervalle probable de la charge équivalente 2001 est donc de 241 à 516 kg dans les conditions équivalentes des tirs 2004, toutes sources mesurable d'erreur incluses.

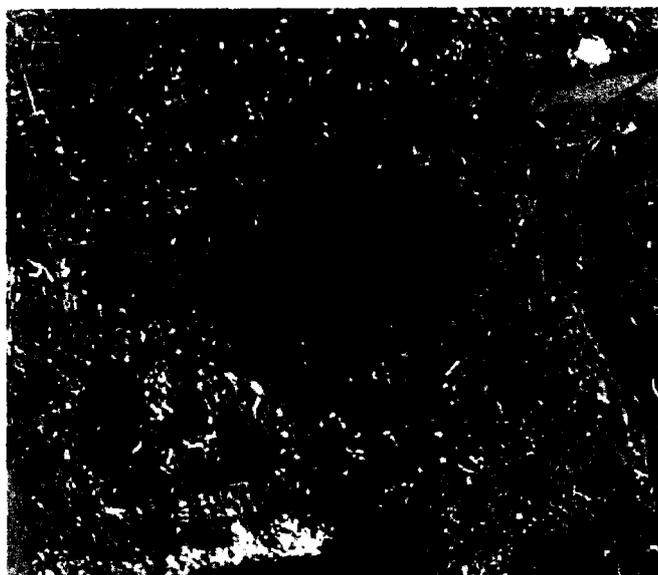


Figure 7 : Cratère d'AZF et localisation des points pris pour définir l'extension maximale de la localisation du point source.

Pour pouvoir exploiter les mesures extérieures de 2004, un coefficient d'amplification est estimé entre les mesures dans le laboratoire et les mesures à l'extérieur. Il est égal à 1,14 avec un écart type de 0,12. Ces grandeurs sont intégrées comme source d'incertitude dans l'estimation à partir de ces mesures, incertitude qui pousse l'intervalle de charge probable vers les valeurs fortes.

L'intervalle obtenu à partir des mesures dans le laboratoire est de 241 à 340 kg.

L'intervalle obtenu à partir des mesures extérieures est de 260 à 515 kg.

Le tableau 3 résume les différents résultats intégrant les grandeurs et leurs incertitudes.

Paramètres de la loi de Chapot

	Extérieur	Intérieur	Incertain
e	-1,984	-2,000	0,001
k	21511	29731	7

	Extérieur			Intérieur		
	Mini	Moyenne	Maxi	Mini	Moyenne	Maxi
e	-1,985	-1,984	-1,983	-2,001	-2,000	-1,999
k	21504	21511	21518	29724	29731	29738

Q maxi Q mini

Coordonnées topographiques

Site	Station	X	Y	Incertain
OMP	Labo	530690,2	140858,3	0,50
Cratère	Barocentre	529584,0	141208,0	0,50
	Point 1	528533,0	141208,0	0,50
	Point 2	528586,0	141220,0	0,50
	Point 3	529644,0	141208,0	0,50
	Point 4	528570,0	141193,0	0,50
	Point 5	529546,0	141187,0	0,50

Distances explosion - capteur		
Dmini	Dmoy	Dmaxi
4185,45	4186,45	4187,45
4207,13	4208,13	4209,13
4178,28	4177,28	4178,28
4158,59	4157,59	4158,59
4188,10	4189,10	4170,10
4191,91	4192,91	4193,91

Estimation Q - Mesure int		
Mini	Moyenne	Maxi
288,47	290,33	292,20
291,46	293,34	295,23
287,20	289,05	290,02
284,50	286,34	288,18
288,08	287,93	289,78
289,36	291,22	293,10
284,50		295,23

Estimation Q - Mesure ext		
Mini	Moyenne	Maxi
336,83	379,01	421,74
340,33	382,95	426,12
335,35	377,35	419,89
332,20	373,80	415,95
334,04	375,88	418,26
337,87	380,16	423,04
332,20		426,12

Vitesse particulaire

	V part	Incertain
OMP	0,4925	0,0001
	Coef amplif	1,1460 0,1190
	Extérieur	0,5644 0,0586

-15%	241,83	15%	338,51	-21%	262,44	21%	515,60
------	--------	-----	--------	------	--------	-----	--------

Tableau 3 : Synthèse des estimations de la charge 2001 équivalente aux conditions 2004 à partir des grandeurs mesurées et des incertitudes associées.

3.4 Influence de l'orientation de la source.

Le dernier point à considérer concerne la géométrie de la source. En effet, les tirs de 2004 en forage ont une géométrie verticale très prononcée, avec un rapport hauteur sur rayon de source très important. Les valeurs extrêmes vont de 78 pour une charge de 5 kg à 550 pour une charge de 35 kg.

La géométrie du tas présent en 2001 lors de l'explosion a une orientation préférentiellement horizontale, avec un rapport longueur sur diamètre pour la partie source qui ne peut pas être évalué à ce jour, mais qui est forcément égal ou plus important que le rapport des dimensions géométriques ($60 / 20 \text{ m} = 3$).

Or la radiation d'énergie par explosion d'une charge assimilée cylindrique montre une dissymétrie forte entre l'énergie rayonnée vers la profondeur et celle rayonnée le long de la surface. Afin de tenir compte de cette caractéristique, le modèle de source cylindrique peut être utilisé. Le formalisme de Felher et Pearson [9] permet une modélisation simple fidèle aux observations in situ.

Ainsi pour une source verticale, l'énergie rayonnée vers la profondeur est environ 2 fois inférieure à l'énergie rayonnée horizontalement.

On mesure expérimentalement un angle d'incidence à l'enregistrement de l'ordre de 10° par rapport à la verticale, variant de 4° à 14° au maximum (figure 8). Par réciprocity, le même angle est à considérer à l'émission. L'outil d'analyse utilisé est un logiciel interne Total basé sur une méthode classique d'analyse des moments d'inertie d'un signal à trois composantes. A partir des trois composantes, le logiciel calcule pour chaque groupe de composantes, et par fenêtre de longueur adaptée à la fréquence dominante des signaux utiles, une polarisation et un angle qui décrivent la géométrie de l'arrivée des ondes sismiques, ainsi qu'un coefficient de linéarité qui permet d'estimer la qualité du résultat. Un coefficient supérieur à 0,95 correspond à un très bon résultat. La polarisation verticale est quantifiée par une valeur nulle de polarisation, tout comme la polarisation radiale qui est quantifiée par un azimuth nul.

La figure 8a montre la mesure de polarisation et conduit à des valeurs de $10^\circ \pm 2$ pour les tirs de 35 et 20 kg, de 4° à 14° au maximum pour les autres tirs. La figure 8b montre l'azimut de polarisation, voisin de 0 dans tous les cas, indiquant une arrivée radiale, sauf pour le tir le plus à l'Est (16 kg). L'analyse du coefficient de linéarité (figure 8c) montre une valeur proche de 1 sauf pour le tir de 16 kg et de 5 kg (coefficient = 0,70), indiquant que les résultats de ces deux tirs ne sont pas de bonne qualité, et donc à rejeter.

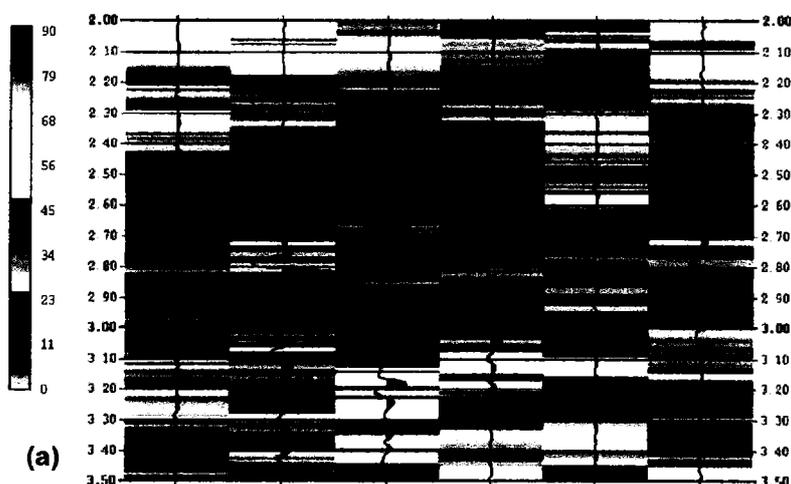
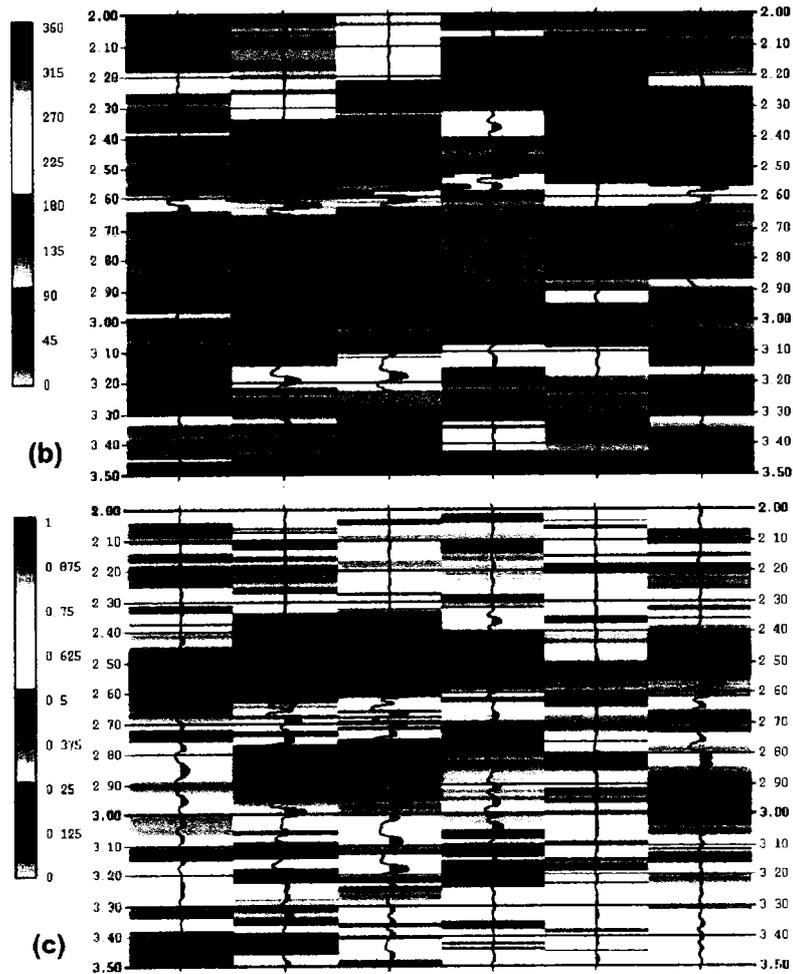


Figure 8 : Diagrammes de polarisation des tirs unitaires des 13, 14 et 15 septembre 2004. La figure (a) montre la mesure de polarisation. La figure (b) montre l'azimut de polarisation. La figure (c) montre le coefficient de linéarité. (figures b et c ci-dessous).



Pour le cas des sources explosives de 2004 (figure 9), le rapport à 10° varie ainsi de 1,91 pour une charge de 5 kg à 1,94 pour une charge de 35 kg.

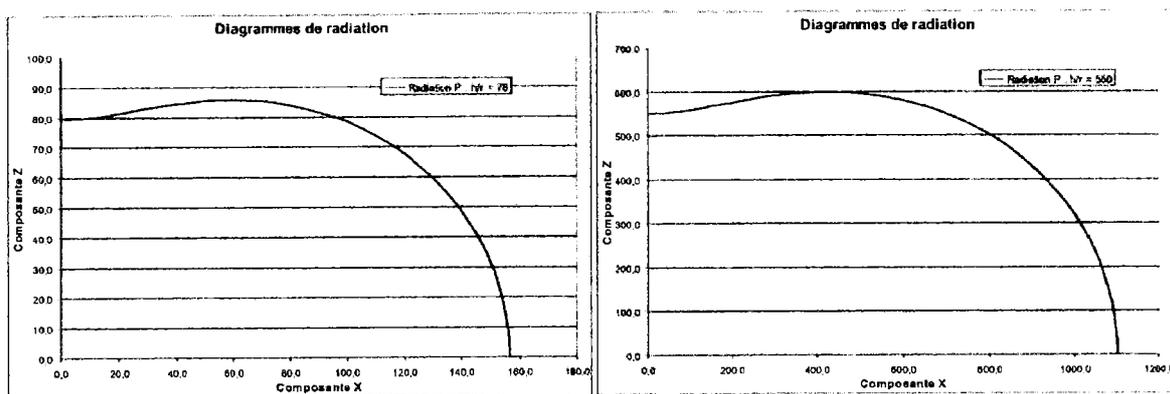


Figure 9 : Diagrammes de radiation par une source explosive cylindrique verticale pour un rapport hauteur sur rayon de : a) 78 (cas des tirs de 5 kg) b) 550 (cas des tirs de 35 kg).

A titre de comparaison, le rapport 3 atteint pour la charge de 2001, avec une orientation horizontale (figure 10), à 10° est de 1.43

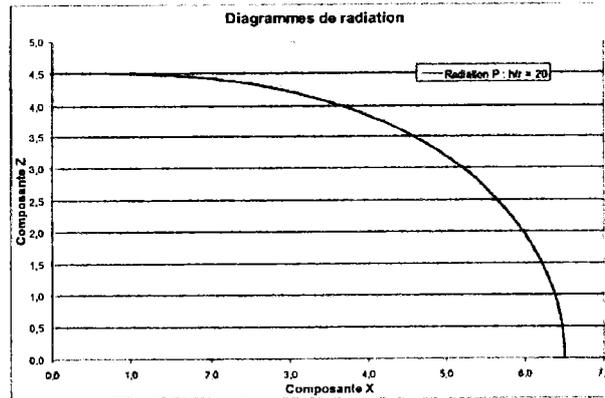


Figure 10 : Diagrammes de radiation par une source explosive cylindrique verticale pour un rapport hauteur sur rayon de 3.

De cette modélisation il vient qu'en 2004, par rapport aux conditions 2001, un effet de réduction d'un facteur 1,94 a été introduit par le cours aux charges explosives très longues devant leur diamètre disposées verticalement.

Il faut donc appliquer ce facteur d'amplification sur les valeurs mesurées en 2004, ou inversement, appliquer la réduction de l'amplitude du signal 2001 dans le même rapport. Ceci conduit aux résultats du **tableau 4**, avec pour conclusion les estimations suivantes :

Distances explosion - capteur			Estimation Q - Mesure int			Estimation Q - Mesure ext				
Dmini	Dmoy	Dmaxi	Mini	Moyenne	Maxi	Mini	Moyenne	Maxi		
4185,45	4186,45	4187,45	148,62	149,65	150,70	171,47	193,01	214,84		
4207,13	4208,13	4209,13	150,16	151,21	152,26	173,25	195,01	217,07		
4176,26	4177,26	4178,26	147,97	149,00	150,04	170,72	192,16	213,90		
4156,59	4157,59	4158,59	146,58	147,60	148,63	169,11	190,36	211,89		
4168,10	4169,10	4170,10	147,39	148,42	149,45	170,05	191,41	213,07		
4191,91	4192,91	4193,91	149,08	150,12	151,16	172,00	193,60	215,50		
			146,58		152,26	169,11		217,07		
			-15%	124,59	15%	175,10	-21%	133,60	21%	262,66

Tableau 4 : Synthèse des estimations de la charge 2001 équivalente aux conditions 2004 à partir des grandeurs mesurées et des incertitudes associées, après correction de l'effet d'orientation différentielle entre 2001 et 2004.

L'intervalle obtenu à partir des mesures dans le laboratoire s'étend de 124 à 175 kg, alors que pour les mesures extérieures il s'étend de 133 à 263 kg.

3.5 Correctif d'estimation en équivalent TNT.

Selon les indications de la société NitroBickford [10] qui a fourni les explosifs utilisés lors de l'expérimentation de 2004, la puissance de charge (cartouche Dynaroc6A) est de 4.10^6 J par kilogramme. Selon les références usuelles (par exemple [11]), l'unité d'équivalent en masse de TNT représente $4,613.10^6$ J par kilogramme. La puissance de l'explosif utilisé est donc au plus 13% inférieure à celle du TNT, un coefficient d'efficacité de l'explosif, inférieur à 100%, pouvant encore s'ajouter et minimiser les charges finales. Il faut donc appliquer un facteur multiplicatif de 0,867 aux charges précédemment obtenues afin de les exprimer en équivalent TNT dans les conditions 2004.

L'intervalle obtenu après correction s'étend alors de :

- 108 à 152 kg à partir des mesures dans le laboratoire
- 124 à 228 kg à partir des mesures à l'extérieur du laboratoire.

4 Conclusion.

Prenant en compte le signal OMP 2001 dit "Titan 2" et l'ensemble des explosions unitaires réalisées lors de la campagne de sismique-sismologie d'août et septembre 2004, il est possible de construire une loi comportementale liant l'amplitude de la vitesse particulière mesurée et la charge explosive ayant provoquée cette amplitude en relation avec la distance entre la source sismique et le capteur.

Les paramètres estimés pour le site d'enregistrement de l'OMP sont très précis et seules les incertitudes de localisation de la source 2001 sont significatives dans l'incertitude finale de l'estimation réalisée de la charge équivalente 2001.

En outre, l'orientation des charges compte tenu de leur géométrie (allongement grand devant le rayon) nécessite de considérer le taux de radiation en fonction de l'angle d'émergence de l'information sismique. Ceci a une influence très significative sur l'estimation (facteur voisin de 2).

De même, avant d'exprimer l'équivalence en charge de TNT, il convient de corriger l'estimation du fait que les sources utilisées en 2004 étaient de 7% plus puissantes que le TNT.

Au final, le calcul conduit à la charge équivalente 2001 estimée comprise entre 110 et 150 kg de charge de TNT enterré.

Liste des Figures

- Figure 1 : Diagramme expérimental de la phase de calibrage d'août 2004.
- Figure 2 : Diagramme de Chapot original (1981)..
- Figure 3 : Diagramme de Chapot pour les mesures expérimentales de 2004 réalisées à l'OMP.
- Figure 5 : Variation (en %) de l'écart de charge calculée et de la charge nominale en fonction des paramètres de la loi de Chapot valable pour le laboratoire du RSSP de l'OMP.
- Figure 6 : Variation (en %) de l'écart de charge calculée et de la charge nominale en fonction des paramètres de la loi de Chapot valable pour à l'extérieur du laboratoire du RSSP de l'OMP.
- Figure 7 : Cratère d'AZF et localisation des points pris pour définir l'extension maximale de la localisation du point source.
- Figure 8 : Diagrammes de polarisation des tirs unitaires des 13, 14 et 15 septembre 2004. La figure (a) montre la mesure de polarisation. La figure (b) montre l'azimut de polarisation. La figure (c) montre le coefficient de linéarité. (figures b et c ci-dessous).
- Figure 9 : Diagrammes de radiation par une source explosive cylindrique verticale pour un rapport hauteur sur rayon de : a) 78 (cas des tirs de 5 kg) b) 550 (cas des tirs de 35 kg).
- Figure 10 : Diagrammes de radiation par une source explosive cylindrique verticale pour un rapport hauteur sur rayon de 3.

Liste des Tableaux

- Tableau 1 : Mesure des amplitudes maximales pour les tirs d'août 2004.
- Tableau 2 : Calcul de l'amplitude et de Q_{cal} pour ajuster les paramètres expérimentaux.
- Tableau 3 : Synthèse des estimations de la charge 2001 équivalente aux conditions 2004 à partir des grandeurs mesurées et des incertitudes associées.
- Tableau 4 : Synthèse des estimations de la charge 2001 équivalente aux conditions 2004 à partir des grandeurs mesurées et des incertitudes associées, après correction de l'effet d'orientation différentielle entre 2001 et 2004.

Références bibliographiques

- [1] **Chapot, P., 1981.** Etude des vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Rapport de Recherche n°105. pp 1-54.*
- [2] **CGG, 2005.** Rapport de synthèse de la campagne sismique – Site de l'usine AZF de Toulouse. *Compagnie Générale de Géophysique, 22/03/2005.*
- [3] **Rappin, D., 2006.** Rapport de synthèse sur les relevés topographiques de la phase géophysique AZF Toulouse. *Rapport TOTAL EP/GSR/TG/MTS 06-*
- [4] **O'Doherty, R.F., and Anstey, N.A., 1971.** Reflections on amplitudes. *Geophysical Prospecting, vol. 19, pp 430-458.*
- [5] **Rappin, D., 1991.** Apport des analyses d'amplitudes et temps-fréquence à l'exploitation de données de sismique profonde. *Thèse de Docteur, Université Louis pasteur Strasbourg, Ecole et Observatoire de Physique du Globe.*
- [6] **Sylvander, M. and Mogos, D., 2005.** The sounds of small earthquakes: quantitative results from a study of regional macroseismic bulletins. *Bulletin of Seismological Society of America. Vol 95, n°4, pp 1510-1515.*
- [7] **Souriau, A., Sylvander, M., Maupin, V., Fels, J.-F., et Rigo, A., 2002.** Enregistrements sismologiques de l'explosion sur le site de l'usine d'AZF (Toulouse, France). *Compte Rendu de l'Académie des Sciences. Vol.334, pp 155-161.*
- [8] **Camerlynck, C., et Galibert, P.Y., 2005.** Etude de la source sismique associée à l'explosion du hangar 221 sur le site de l'usine AZF de Toulouse le 21 septembre 2001 : synthèse des travaux. *Rapport UMR Sisyphé, mai 2006.*
- [9] **Fehler, M., and Pearson, C., 1984.** Cross-hole seismic surveys: Applications for studying subsurface fracture systems at a hot dry rock geothermal site. *Geophysics, vol. 49, n°1, pp 37-45.*
- [10] **Nitro-Bickford, 2005.** Dynamites : Caractéristiques techniques mesurées. *Notice Commerciale Nitro-Bickford.*
- [11] **Wikipédia L'encyclopédie libre, 2006.** Le Trinitrotoluène. Explosif, convention de conversion. *Site internet fr.wikipedia.org.*

Liste des fichiers numériques utilisés dans l'étude

Liste des bases de données et applicatifs utilisés dans l'étude

Nom fichier	Format/Type du fichier	Logiciel version	Auteur/Entité	Date
Analyse_V_part_Ajustement_OMP_final.xls	Binaire Excel	MS Excel	D. RAPPIN	Mai 2006