

A PROPOS DE LA TOXICITE DES FUMÉES DE TIRS D'EXPLOSIFS EN SPELEOLOGIE

France GUILLAUME, Thierry MIGUET, Albert OYHANCABAL

Des analyses de gaz toxiques avec enregistrement continu ont été effectuées avec la collaboration du L.E.S.I. Le cordeau détonant utilisé comme charge, c'est-à-dire bourré dans le trou de mine, dégage le moins de vapeurs nitreuses et d'oxyde de carbone mais l'acide chlorhydrique dégagé par la combustion de la gaine en limite la quantité utilisable dans une cavité non ventilée. Viennent ensuite, dans l'ordre de toxicité croissante: Gomme A, Titagel 1000 Titadyn 25. Il n'y a pas d'explosif dépourvu de toxicité; la technique des minicharges permet de limiter la quantité de gaz. Lors d'une opération de secours nécessitant des tirs répétés, dans une cavité parcourue par un courant d'air insuffisant, il nous semble indispensable de ventiler la grotte et de vérifier à l'aide d'un détecteur Draeger le taux de gaz toxiques

INTRODUCTION

Les spéléologues utilisent de plus en plus les explosifs, que ce soit pour la désobstruction ou pour l'élargissement des passages lors des secours. Il circule dans notre milieu un certain nombre d'idées reçues dont le bien fondé laisse à désirer. Il nous a donc paru utile d'effectuer une mise au point sur la toxicité des fumées de tir. Avec la collaboration d'un laboratoire du Commissariat à l'énergie atomique, le Laboratoire d'études et sécurité industrielle de Grenoble (L.E.S.I.), nous avons effectué des analyses de gaz en continu et sur le terrain. Ces recherches ont été conduites grâce à des crédits obtenus par la Commission médicale de la F.F.S., et avec l'aide technique du Spéleo secours français.

LES PRODUCTIONS DE GAZ TOXIQUES PAR LES EXPLOSIFS

L'explosif est un composé chimique qui se transforme très rapidement en une grande quantité de gaz (600 fois le volume de la

cartouche), à haute température (3000°) en produisant ou non une onde de choc. Dans l'industrie, les gaz dégagés créent peu de soucis en raison de la mise en route de systèmes d'aération et du respect des consignes de sécurité. Néanmoins, dans les chantiers souterrains, les explosifs sont soumis à un agrément. La méthode de mesure utilisée depuis 1979 (il n'est pas sûr que les explosifs agréés avant cette date obtiendraient l'agrément avec les conditions actuelles) consiste à mettre 0,75 kg d'explosif dans l'âme d'un mortier en acier obturé par un bourrage, dans une chambre étanche de 15 m³. Les gaz sont analysés après refroidissement des fumées et condensation de la vapeur d'eau.

On obtient 300 à 450 l de gaz par kilo d'explosif; ces gaz se répartissent en:

- azote,
- gaz carbonique,
- gaz toxiques (oxyde de carbone CO: 10 à 40 l/kg, vapeurs nitreuses NO_x = NO + NO₂: 0,1 à 3 l/kg). Pour obtenir l'agrément rocher, il faut que CO + (5 x NO_x) soit inférieur à 50 l/kg. Pour la plupart des explosifs agréés, cette valeur oscille de 15 à 35 l/kg. Il n'y a pas à notre connaissance d'autres méthodes de dosage des gaz toxiques.

Qu'en est-il des symptômes observés ?

1. Les vapeurs nitreuses ou oxydes d'azote

Les symptômes immédiats peuvent se limiter à quelques troubles irritatifs: toux, picotements, larmolements, irritation oculaire et pharyngée; ces symptômes s'arrêtent dès que l'intoxiqué est mis à l'air libre. Il peut alors reprendre son exploration malgré une légère lassitude mais 2 à 36 h plus tard, il risque de présenter des troubles graves signant un oedème pulmonaire aigu: toux, cyanose, expectoration rosée ou jaune saumonée, anxiété, sueurs froides, forte soif. La mort survient dans la plupart des cas en 24 à 48 h. A signaler que les vapeurs nitreuses sont solubles dans l'eau.

2. Le monoxyde de carbone (CO).

Le monoxyde de carbone est la cause d'intoxications très fréquentes responsables actuellement de centaines de morts en France (appareillages défectueux provoquant une combustion incomplète). Ce gaz est d'autant plus redoutable qu'il est incolore, inodore, sans saveur et non irritant. Ses effets toxiques sont dus à l'hypoxie tis-

sulaire (c'est-à-dire le manque d'oxygène des tissus). L'affinité de l'hémoglobine (notre principal transporteur d'oxygène dans le sang) pour l'oxyde de carbone est 200 fois supérieure à celle de l'oxygène.

3. L'acide chlorhydrique (HCL).

Les vapeurs acides du gaz sont toxiques; l'action nocive se caractérise par une irritation des muqueuses: irritation de la

conjonctive, de la muqueuse nasale et du pharynx.

4. L'association oxyde de carbone-vapeurs nitreuses:

La toxicité totale est supérieure à celle de chacun des constituants.

LES EXPERIMENTATIONS EFFECTUEES

1. Moyens mis en oeuvre

La préparation a constitué à effectuer des trous de mines de 22 mm de diamètre, 40 cm de profondeur, à raison de 10 trous par cavité, dans 4 cavités différentes: ventilée avec écoulement d'eau, ventilée sans écoulement d'eau, sans ventilation avec écoulement d'eau, sans ventilation sans écoulement d'eau.

La technique utilisée: Les charges mesurées à 0,1 g près étaient conditionnées dans du papier aluminium ménager (à noter le caractère "coulant" du titigel). Le bourrage était effectué avec du papier journal préalablement humidifié. Dans le bourrage était introduit systématiquement une ampoule de 5 ml de gaz traceur (hexafluorure de soufre). Les tirs, amorcés par un détonateur électrique de moyenne intensité situé dans la charge étaient déclenchés à une dizaine de mètres du trou de mine grâce à un explosif à condensateur. Une liaison téléphonique avec la surface permettait une mise en route des appareils d'analyse. Les prélèvements de gaz se faisaient en continu, à 1 m du tir dans un premier temps puis à 5 m en raison de concentrations trop importantes. Les analyses de gaz ont été effectuées grâce à des appareils fonctionnant sur groupe électrogène.

- L'oxyde de carbone a été mesuré avec un appareil Cosma Rubis 3000 ayant une cellule CO permettant une gamme de concentration de 0 à 0,5 pour mille.

- Le dioxyde de carbone a été mesuré avec un appareil Cosma Rubis 3000 ayant une cellule CO₂ permettant une gamme de concentration de 0 à 10%.

- Les oxydes d'azote ont été mesurés par un appareil de chimiluminescence Monitor Lab ayant une gamme de mesures de 0 à 5 ppm maximum; cet appareil ayant été fait pour des mesures dans l'environnement lorsque la concentration est supérieure à 5 ppm, nous ne pouvons qu'estimer la teneur en NO et NO_x par le temps où l'appareil reste saturé. En ce qui concerne la gaine du cordeau détonant, un calcul de la quantité d'acide chlorhydrique émis a été fait en connaissant le volume de la cavité (grâce au gaz traceur) et le poids de PVC au mètre (17,6 g pour un cordeau). La concentration calculée est de 35 ppm d'HCl. Initialement il était prévu 10 tirs dans 4 cavités différentes avec ou sans courant d'air, avec ou sans eau. Les cavités sans courant d'air ne peuvent faire l'objet que d'un seul tir; ceci nous a amené à arrêter les manipulations le deuxième jour en raison de la saturation en gaz. Nous avons donc effectué une série de manipulations dans une petite salle sans courant d'air; entre deux tirs la cavité était ventilée en air frais jusqu'au retour à 0 de la concentration en gaz et ceci grâce à un ventilateur à turbine (6600 m³/h).

Tableau des différents symptômes en fonction de la concentration dans l'air et de la durée d'exposition .

Parties par million (cm ³ /m ³)	Durée d'exposition	Symptômes et risques
0,1 0,5 5		seuil de l'odorat odeur caractéristique concentration maximale admissible dans l'air en industrie faible irritation
10 à 40 80 90 100 à 200 250	3 à 5 minutes 30 minutes 30 à 60 minutes quelques minutes	oppression au niveau du thorax oedème pulmonaire très dangereux mort
LES VAPEURS NITREUSES OU OXYDES D'AZOTE		

Tableau des différents symptômes observés en fonction de la concentration dans l'air et de la durée d'exposition .

Parties par million (cm ³ /m ³)	Durée d'exposition	Symptômes et risques
50 100 200	8 h 2 h	néant sans danger occasionnellement nausées, céphalées, vertiges difficultés respiratoires
1000 2000 4000 5000 10000	4 à 5 h 1 h 20 minutes 1 minute	intoxications graves mort mort mort mort
LE MONOXYDE DE CARBONE		

Tableau des différents symptômes observés en fonction de la concentration dans l'air et de la durée d'exposition .

Parties par million (cm ³ /m ³)	Durée d'exposition	Symptômes et risques
5	8 heures/jour	aucun; concentration maximale admise dans l'industrie
5 à 35 50 à 100 1000 à 2000	10 à 15 minutes >1 heure très brève	toux et irritation de la gorge oedème aigu pulmonaire mort
L'ACIDE CHLORHYDRIQUE		

2. Résultats

Date: 28 juillet 1987

Lieu: Les Eymards (Lans-en-Vercors, Isère)

Secteur de la cavité: Méandre avant P30

Température: Paramètre non mesuré

Hygrométrie: Paramètre non mesuré

Vitesse de l'air: Nulle

Météo: Très couvert, pluvieux, variable l'après-midi

Commentaires

Nous remarquons:

1 - Le temps de transfert dans la ligne de prélèvement entre le point d'échantillonnage et l'appareil de mesure est d'environ 20 secondes.

2 - Une montée rapide de la concentration qui est l'éjection de la bulle de gaz de l'explosion.

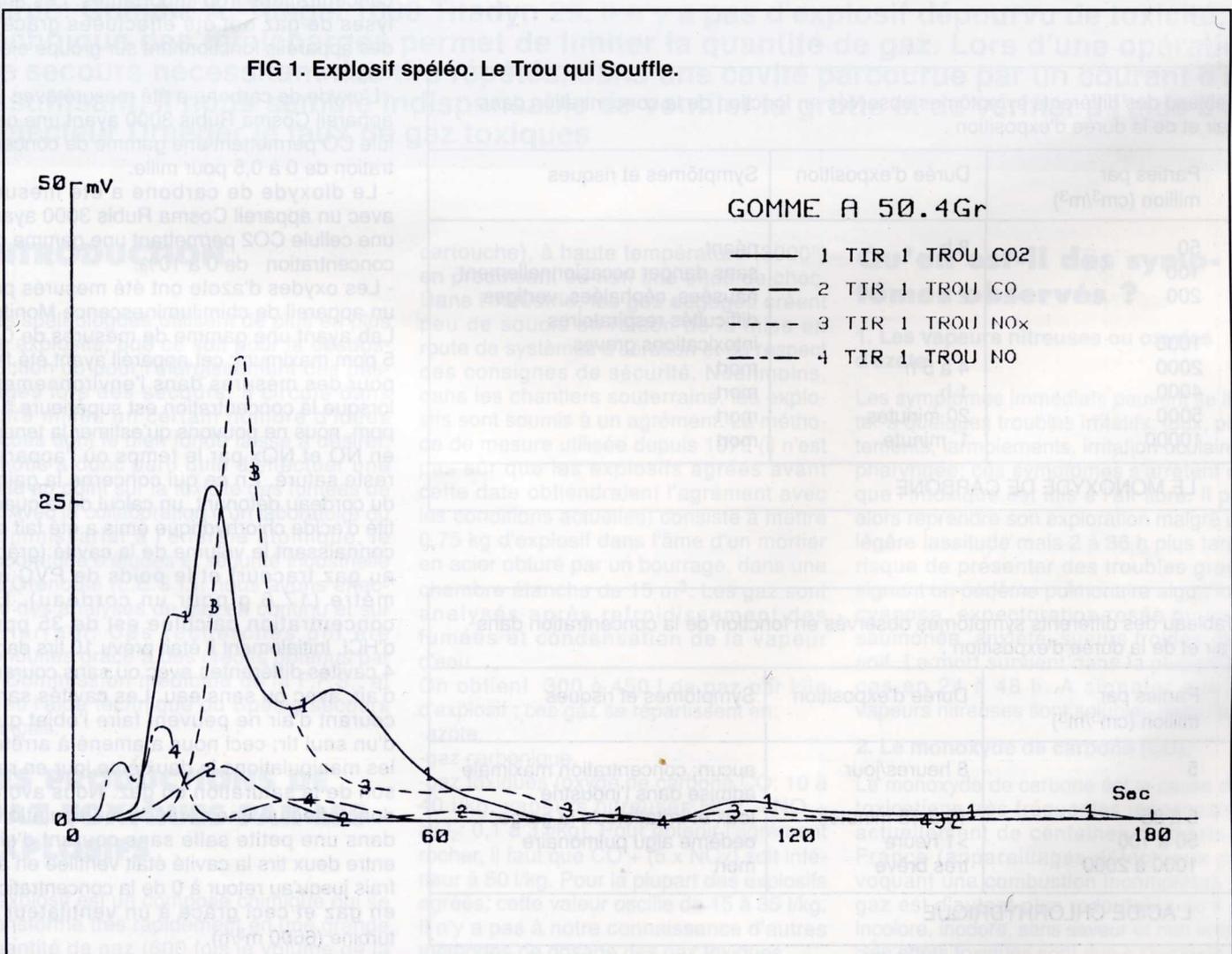
3 - Une décroissance de la concentration qui correspond à la dilution du gaz dans la cavité.

4 - Un palier de concentration d'où l'on peut déduire le volume de la cavité du fait que l'on connaît la quantité de SF6 injecté (5 ml).

5 - Une nouvelle décroissance qui, elle, correspond à la mise en marche d'une turbine de soufflage pour ventiler la cavité.

Tir	Explosif	Quantité	Conditionnement	Bourrage	Valeurs au palier				
					SF6 ppb	CO2 %	CO %	NOx ppm	NO ppm
1	gomme A	84,9 g	aluminium	journal					
2	gomme A	37,0 g	aluminium	journal		1	0,05	0,4	0,5
3	gomme A	34,0 g	aluminium	journal		3,5	0,15	3,3	0,15
4	titadyne 25	47,8 g	aluminium	journal		1	0,04	Z	Z
5	titadyne 25	24,0 g	aluminium	journal		0,6	0,03	Z	Z
6	titagel	29,5 g	aluminium	journal				Z	Z
7	cord. dét.	50 cm	PVC	journal		1	0,08	0,1	0,1
8	cord. dét.	50 cm	PVC	dans le trou de mine		2,5	0,03	0	0
9	cord. dét.	100 cm	PVC	dans le trou de mine		3,8	0,03	0,1	0,1
10	cord. dét.	50 cm	PVC	à l'air libre		1,5	0,06	1,5	1,5

FIG 1. Explosif spéléo. Le Trou qui Souffle.



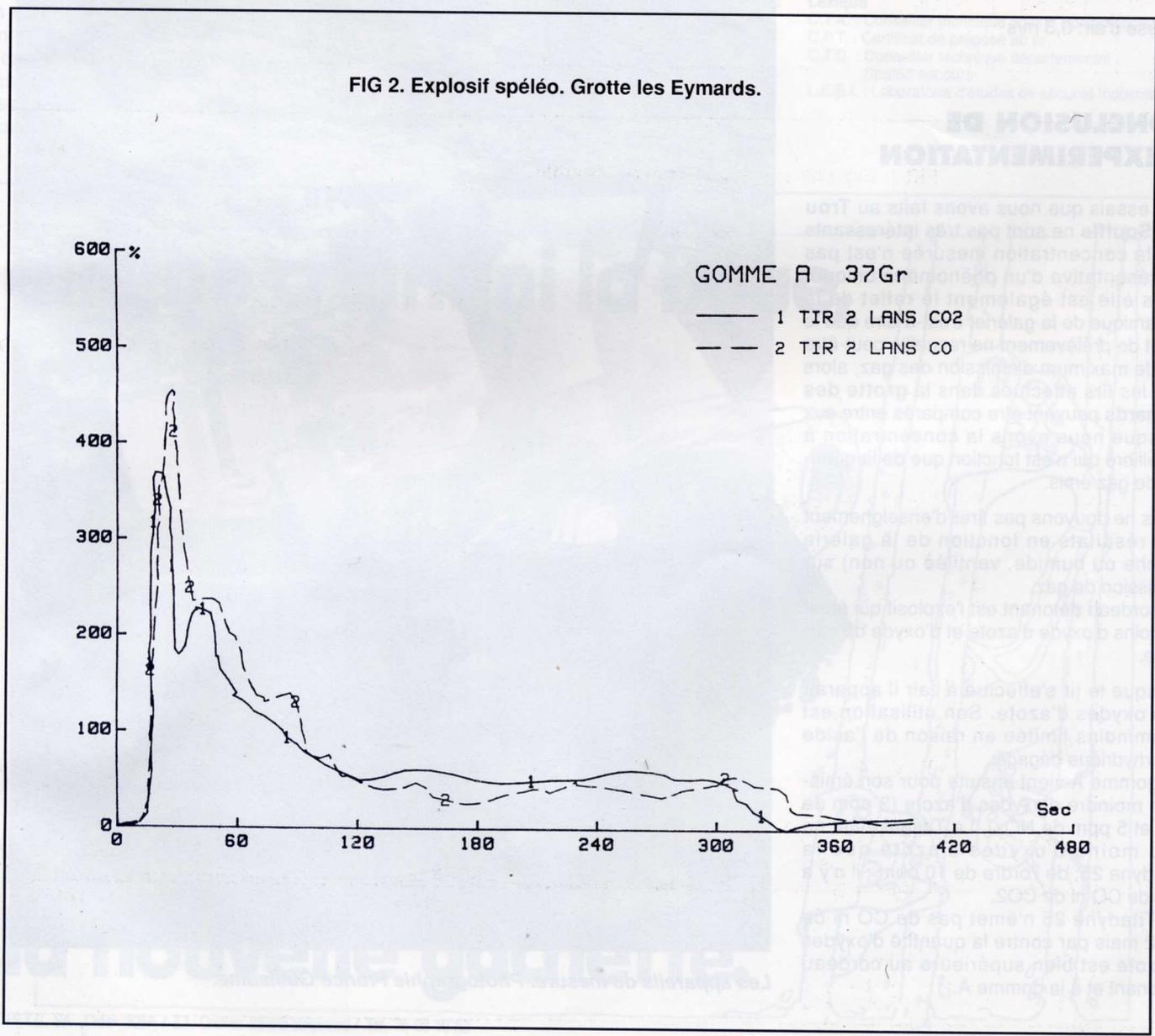
Date: 28 juillet 1987
 Lieu: Les Eymards (Lans-en-Vercors, Isère)
 Secteur de la cavité: Méandre avant P30
 Température: Paramètre non mesuré

Hygrométrie: Paramètre non mesuré
 Vitesse de l'air: Nulle
 Météorologie: Très couvert, pluvieux, variable l'après-midi

Z signifie que l'enregistrement ne peut être mesuré car l'appareil est saturé et que l'on a mis la turbine de ventilation en fonctionnement avant d'avoir désaturé.

Tir	Explosif	Quantité	Conditionnement	Bourrage	Valeurs des pics de concentration				
					SF6 ppb	CO2 %	CO %	NOx ppm	NO ppm
1	gomme A	84,9 g	aluminium	journal	60				
2	gomme A	37,0 g	aluminium	journal	50	7,4	0,46	>5	>5
3	gomme A	34,0 g	aluminium	journal	50	5,2	0,3	>5	>5
4	titadyne 25	47,8 g	aluminium	journal	40	1,2	0,06	Z	Z
5	titadyne 25	24,0 g	aluminium	journal	14	0,6	0,03	Z	Z
6	titagel	29,5 g	aluminium	journal	44			Z	Z
7	cord. dét.	50 cm	PVC	journal	20	2,8	0,1	0,3	0,3
8	cord. dét.	50 cm	PVC	dans le trou de mine	20	3,6	0,05	0	0
9	cord. dét.	100 cm	PVC	dans le trou de mine	18	5,6	0,05	0,3	0,3
10	cord. dét.	50 cm	PVC	à l'air libre	26	2,1	0,11	>5	>5

FIG 2. Explosif spéléo. Grotte les Eymards.



Tir	Explosif	Quantité	Conditionnement	Bourrage	Valeurs au palier				
					SF6 ppb	CO2 %	CO %	NOx ppm	NO ppm
1	gomme A	50,4 g	aluminium	journal			0,05	1,6	0,4
2	gomme A	50,4 g	aluminium	journal		2,6	0,01	3,5	4
3	titadyne 25	51,3 g	aluminium	journal		1,3	0,008	>5	>5
4	titadyne 25	45,9 g	aluminium	journal		1,8	0,012	>5	0,6
5	titagel	49,3 g	aluminium	journal		0,25	0	>5	0,5
6	titagel	53,4 cm	aluminium	journal		0	0	>5	
7	cord. dét.	110 cm	PVC	dans le trou de mine		0,2	0,01	0,3	0,2
8	cord. dét.	110 cm	PVC	dans le trou de mine		0,2	0,01	0,1	0,1
9	titagel			journal		0	0	>5	1

Date: 16 juillet 1987

Lieu: Le Trou qui Souffle (Méaudre, Isère)

Secteur de la cavité: Méandre d'entrée

Température: 5,6° C

Hygrométrie: 88%

Vitesse d'air: 0,3 m/s

CONCLUSION DE L'EXPERIMENTATION

Les essais que nous avons faits au **Trou qui Souffle** ne sont pas très intéressants car la concentration mesurée n'est pas représentative d'un phénomène unique, mais elle est également le reflet de la dynamique de la galerie; c'est-à-dire que le point de prélèvement ne recueille peut-être pas le maximum d'émission des gaz, alors que les tirs effectués dans la **grotte des Eymards** peuvent être comparés entre eux puisque nous avons la concentration à l'équilibre qui n'est fonction que de la quantité de gaz émis.

Nous ne pouvons pas tirer d'enseignement des résultats en fonction de la galerie (sèche ou humide, ventilée ou non) sur l'émission de gaz.

Le cordeau détonant est l'explosif qui émet le moins d'oxyde d'azote et d'oxyde de carbone.

Lorsque le tir s'effectue à l'air il apparaît des oxydes d'azote. Son utilisation est néanmoins limitée en raison de l'acide chlorhydrique dégagé.

La gomme A vient ensuite pour son émission moindre d'oxydes d'azote (3 ppm de NO et 5 ppm de NOx). Le Titagel émet un peu moins d'oxydes d'azote que la Titadyne 25; de l'ordre de 10 ppm; il n'y a pas de CO ni de CO2.

La Titadyne 25 n'émet pas de CO ni de CO2 mais par contre la quantité d'oxydes d'azote est bien supérieure au cordeau détonant et à la gomme A.



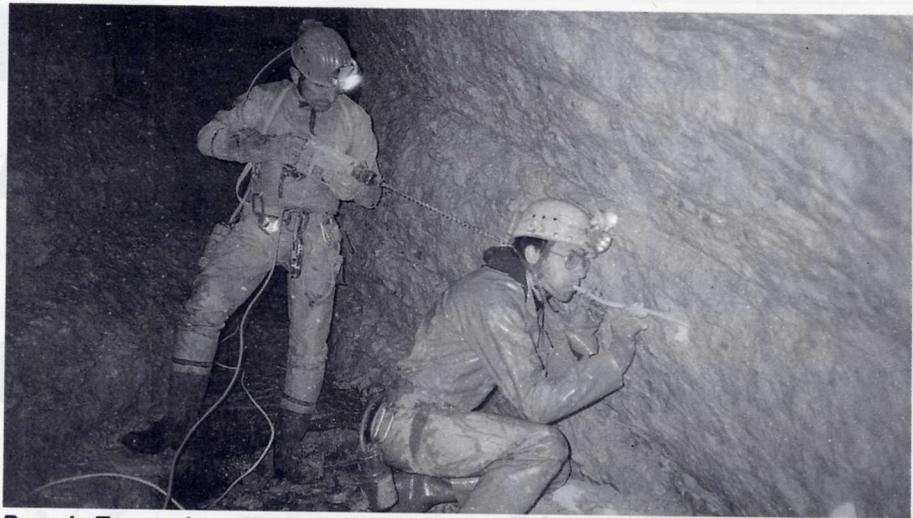
Les appareils de mesure. Photographie France Guillaume.

QUE FAUT-IL EN RETIRER EN PRATIQUE ?

Dans tous les cas: - Il n'y a pas d'explosif non toxique. - La technique des mini-charges avec bourrage soigneux permet de diminuer la quantité des gaz toxiques. - Proscrire les charges anglaises. - Limiter la quantité de cordeau détonant à l'air libre. - Manipuler les explosifs avec des gants. En cas de travaux de désobstruction: - Savoir attendre et signaler le chantier par un panneau: Tir de mines - Attention gaz - Eventuellement, ventiler la cavité en air frais. En cas de secours: - Travailler avec le détonateur directement dans la charge en proscrivant le cordeau détonant à l'air libre. - Ne pas hésiter à vérifier le taux de gaz toxiques avec un détecteur Draeger et les ampoules appropriées.

En cas de trou non ventilé avec tirs répétés, mettre en place un système de ventilation en air frais, le tuyau d'arrivée d'air placé au ras du sol pour augmenter les phénomènes de convection car les gaz explosifs sont très chauds. La bouche d'aspiration de l'air frais doit être placée loin des échappements des moteurs à explosion.

En cas de trou ventilé: Si possible mettre le poste de tir en amont du courant d'air et s'assurer que le blessé se trouve hors du passage du bouchon de gaz. Cet article



**Dans le Trou qui souffle, préparation des trous de mines.
Photographie France Guillaume.**

précède la rédaction d'un opuscule sur l'aspect technique de la manipulation des explosifs adaptés à la spéléologie. Il serait utile que les techniciens intéressés prennent contact avec les auteurs afin que tous les spéléologues puissent profiter de leur expérience.

France GUILLAUME, Commission Médicale de la F.F.S., C.T.A. de l'Isère, C.P.T.

Thierry MIGUET, Groupe spéléologique de Fontaine la Tronche (F.L.T.), chimiste, C.P.T.

Albert OYHANCABAL, C.T.D. Isère, C.P.T.

Lexique

C.T.A. : Conseiller technique adjoint Spéleo-secours

C.P.T. : Certificat de préposé au tir

C.T.D. : Conseiller technique départemental Spéleo-secours

L.E.S.I. : Laboratoire d'études de sécurité industrielle