

série de piles de bois, tandis que son opposée reposera directement sur le mur de la veine. Les étançons en bois peuvent également être remplacés par des étançons métalliques constitués par un tronçon de rail, surmonté d'un soulier Moll pour l'appui de la longrine.

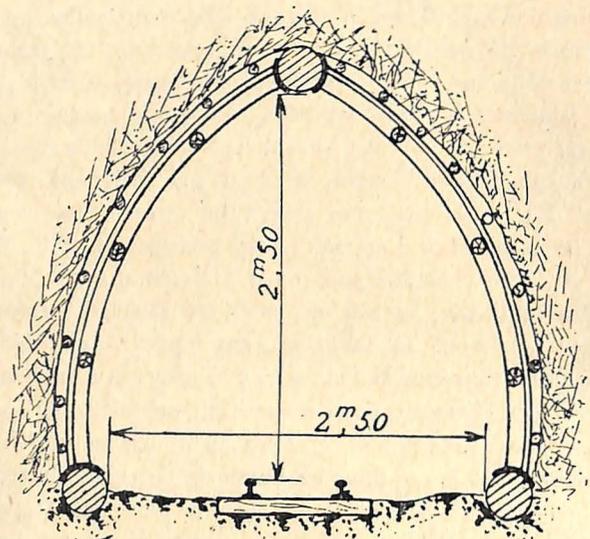


Fig. 2.

Pour résister aux soufflages du mur, on peut aussi adopter diverses formes polygonales complètes, mais ces variantes n'ont pas encore été appliquées en Campine.

Pour des retours d'air ou pour des galeries à roulage unique, on peut supprimer les étançons et poser directement les longrines sur le mur (fig. 2); on obtient ainsi une ogive de 2<sup>m</sup>,50 à 3<sup>m</sup>,20 de largeur au pied et 2<sup>m</sup>,50 de hauteur au centre. C'est peut-être le système le plus rationnel. J'en donne un croquis séparé.

Sans discuter les avantages et les inconvénients que peuvent présenter ces diverses modalités d'application, on peut conclure de l'expérience acquise jusqu'à présent, là où les essais se poursuivent sur des centaines de mètres de galerie, tant en roche qu'en veine, que la combinaison des deux éléments, bois et acier, réalisée d'après le système Moll, présente, malgré son coût encore relativement élevé, de sérieux avantages se traduisant par une diminution très importante des recarrages et par conséquent du prix de revient final.

## Explosifs à l'Oxygène Liquide

Bulletin 349 du Bureau of Mines de Washington 1932.

PAR

G. ST PERROTT et N. A. TOLCH,

Ingénieurs associés (1).

### INTRODUCTION.

*Un absorbant combustible saturé par l'oxygène liquide entre en réaction sous l'action d'un détonateur et produit un énorme volume de gaz à haute pression. L'effet explosif peut être gradué en faisant varier la nature et la densité de l'absorbant. A cause de la grande différence de température entre le liquide ( $-183^{\circ}$ ) et le milieu ambiant, l'évaporation de l'oxygène se produit dès qu'on retire la cartouche du vase de trempage, la puissance de l'explosif diminue progressivement, la combustion peut être incomplète et le temps disponible pour la mise à feu est limité, c'est là l'inconvénient spécifique de cet explosif. On vante d'autre part la sécurité qui résulte du fait que la cartouche n'est explosive qu'après le trempage et cesse de l'être après évaporation de l'oxygène. Cependant, l'expérience des nombreuses mines métalliques et carrières qui font usage de cet explosif, montre que le risque d'accident n'est pas nul et même qu'il est du même ordre que celui des autres explosifs brisants. La présente étude a pour but de rechercher les conditions de fabrication et d'emploi qui procurent le maximum d'économie et de sécurité; elle comporte une série d'essais de laboratoire sur la constitution des cartouches, leurs propriétés, leurs variations en fonction du temps et de diverses circonstances du milieu. Ces recherches ont été faites par les auteurs au laboratoire du Bureau of Mines sous la direction*

(1) Note de L. DENOEL, Inspecteur Général des Mines, Professeur à l'Université de Liège.

de *M. G. Rice* qui avait déjà, en 1917, pris l'initiative de cette étude. En 1930, on a pu étudier sur les chantiers de la *Chile Exploration Cy* la sensibilité au choc, les détonations par influence et diverses mesures concernant les manipulations.

Vu l'importance de ce mémoire, qui embrasse toute la technique de l'explosif à l'air liquide (*E. O. L.*), nous en ferons de larges extraits.

### I. — RAPPEL HISTORIQUE.

Le premier explosif à l'air liquide, l'*oxyliquite*, a été inventé par Linde en 1897, et les premiers essais ont été faits dans la mine de lignite de Pensberg (Haute-Bavière) pour le creusement d'un travers-bancs.

En 1898, essais de Schleich montrant que cet explosif allume le grisou et les poussières de houille. En 1899, tunnel du Simplon, cartouches de Kieselguhr et de pétrole brut, emploi momentané. Jusqu'en 1914, nombreux brevets ayant pour objet la substitution de l'oxygène à l'air liquide, la nature de l'absorbant (à base de charbon, d'hydrocarbures, d'aluminium ou magnésium, de carbure de calcium, etc.), l'enveloppe des cartouches, le trempage. *Baldas* et *Kowatch* proposent l'absorption dans le trou de mine même, en foulant l'oxygène liquide par un tube mince. *Otto Simonis*, en Angleterre, propose une cartouche en deux compartiments, l'un pour le combustible, l'autre pour l'oxygène.

En 1904, *Sir James Dewar* obtient un grand degré de vide en plaçant du charbon de bois dans la double enveloppe des réservoirs.

Pendant la guerre, l'explosif à l'air liquide s'implante en Europe par suite de la raréfaction des autres substances explosives. En 1917, 160 mines (houille, fer, potasse) en font usage. A partir de 1919, l'*E. O. L.* se substitue progressivement à la poudre dans les minières de Lorraine.

Dans l'Amérique du Nord, *M. G. Rice* procède, en 1917, à des recherches sur diverses compositions comparables à la dynamite à 40 % de nitroglycérine. On en fait une première explication.

En 1920, la *Real del Monte Co*, Pachura, Mexique, fait procéder à des essais au Bureau of Mines et introduit le procédé dans ses mines de Pachuca.

En 1922, l'*Ingersoll Rand Co* (New-York), avec l'*Air Reduction Co*, fait une installation dans une mine de magnétite à Minneville et dans des carrières de calcaire. *M. G. B. Holderer*, l'ingénieur de l'*Air Reduction Co*, se fait le pionnier du procédé dans les découverts.

De 1922 à 1924, la *Purox Co*, Denver, Colo. effectue des ouvrages très importants dans la mine souterraine de White Cap (Leadville) et quelques essais dans les mines de fer de l'Alabama.

De 1923 à 1925, nouvelles recherches suivies au Bureau of Mines.

En 1926, l'*Enos Coal Mining Co* achète les appareils d'essai de l'*Air Reduction Co* pour faire le découvert d'une grande mine en Indiana. L'installation, en service depuis lors, produit 4.000 kilogrammes d'oxygène liquide par journée (production de charbon, 4.500 tonnes). D'autres installations se succèdent en Illinois, Indiana et Kentucky.

En 1930, les houillères à ciel ouvert fabriquent 5.364.000 livres d'oxygène liquide, 339.000 cartouches d'un poids total de 4 millions 435.000 livres, elles déblaient 26.316.000 mètres cubes de stériles recouvrant 3.890.000 tonnes de houille.

Dans l'Amérique du Sud, en 1924 et 1925, premiers essais aux mines de cuivre de Cerro de Pasco. En 1926, la *Chile Exploration Co* installe une fabrique d'oxygène liquide de 75 litres/heure et entreprend le minage sur une vaste échelle (200.000 tonnes de minerai par mois). Certains sautages isolés déblaient 80.000 tonnes. Ces tirs concentrés exigent l'emménagement dans des réservoirs de 1.000 gallons de capacité. Le procédé est entré définitivement dans la pratique des exploitations à ciel ouvert et trouve aussi un champ, mais beaucoup plus restreint, dans les travaux souterrains.

### II. — PRODUCTION ET EMMAGASINAGE DE L'OXYGÈNE LIQUIDE.

L'oxygène a été liquéfié pour la première fois en 1877 par *Louis Calletet* en France et par *R. Pictet* en Suisse. En 1895, Linde a commencé les applications industrielles. La méthode de *Claude* est la même en principe. La différence consiste en ce que la détente partielle de l'air par laquelle on atteint les basses

températures, se fait dans un moteur; elle n'exige pas de si hautes pressions ni autant d'énergie. L'air doit être pur de poussières, de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique.

Le succès du procédé de minage dépend en grande partie du soin apporté aux réservoirs d'emmagasinage, de transport, de trempage et de manipulation. Tous les récipients doivent être de construction robuste et parfaitement isolés pour réduire au minimum l'évaporation de l'oxygène.

Les grands réservoirs actuels ont une capacité de 3.500 à 12.000 litres. A titre d'exemple, à Chuquicamata, Chili, trois réservoirs de 1.000 gallons servent à emmagasiner l'O. L. produit par un appareil de 75 litres/heure. Ils sont remplis en une semaine. Ils sont placés en sous-sol et le liquide s'écoule par la gravité. La double paroi en acier a 16 millimètres d'épaisseur et est recouverte d'une mince feuille de cuivre polie comme un miroir. Le vide est maintenu à moins de 0,003 millimètre de mercure et la perte par 24 heures est de 6,3 % et se réduit à 2,2 pour le vide le plus parfait. Une pompe à vide doit être en action d'une manière continue quand le réservoir est plein.

Les **réservoirs d'alimentation** ont une capacité de 5 à 100 litres; ils servent au transport au chantier. Le verre serait le meilleur des matériaux pour construire des vases isolants, mais sa fragilité ne permet de l'employer que dans les laboratoires. Un réservoir métallique consiste en deux enveloppes sphériques de cuivre ou laiton; l'espace intermédiaire doit être maintenu vide, mais les meilleurs sont encore perméables à l'air. L'emploi d'une pompe à vide n'est pas économique. Pour cette raison, l'enveloppe intérieure est garnie d'une petite quantité de charbon de bois activé. La perte par radiation étant plus grande que celle par conductibilité, le poli de la surface a une très grande importance. Le vide est obtenu en faisant agir la pompe sur une tubulure en plomb qu'on pince et soude à la fin de l'opération. Lorsqu'on remplit le réservoir d'air liquide, le charbon refroidi absorbe l'air qui est resté dans le récipient. L'enveloppe extérieure est emballée avec un calorifuge ordinaire (fig. 1). Les diagrammes renseignent les pertes constatées par *O'Neil* et *Fleet* sur des récipients en repos. On constate qu'il est préférable d'employer un réservoir de grande capacité, la perte étant proportionnellement moindre que dans plusieurs petits. Dans le transport par chemin de

fer ou par automobile, la perte augmente de 30 %. L'expérience prouve que les pertes importantes sont dues généralement au contact entre les enveloppes intérieure et extérieure, ce qui arrive à la suite de maniement brutal. Après un an, sur 55 appareils

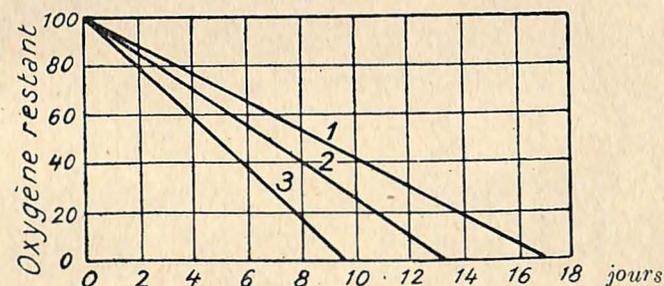
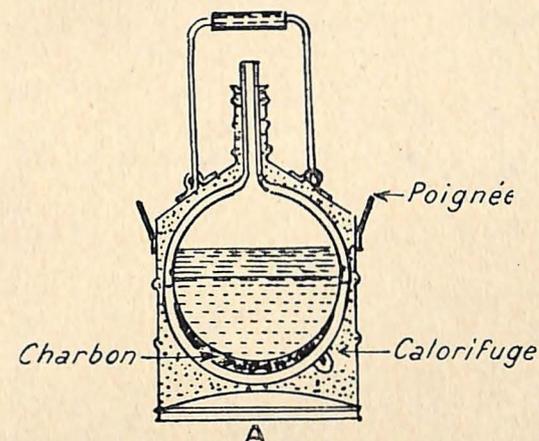


Fig. 1.

A. — Réservoir à double paroi.  
 B. — Résultats d'essais d'évaporation.  
 Capacité : no 1 38,5 livres  
           no 2 35,5 »  
           no 3 14,0 »

de 15 litres, quinze ont du repasser à la pompe à vide. La réparation comporte le démontage, le remplissage et le renouvellement du charbon. On s'assure de l'étanchéité en soumettant le récipient à un vide de 0,0001 millimètre de mercure et en surveillant la perte en 24 heures.

Les **réipients de trempage** sont du type de la figure 2; ils sont construits d'après les mêmes règles que les précédents; ils sont cylindriques au lieu d'être sphériques. Leur contenance est de 20 litres. Les réipients isolés par le vide souffrent beaucoup dans les exploitations à ciel ouvert des manipulations brutales et des ébranlements. On y a substitué, pour le transport des cartouches trempées, de grandes boîtes à doubles parois, l'une en acier,

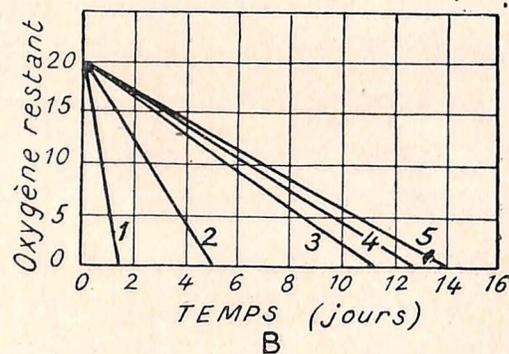
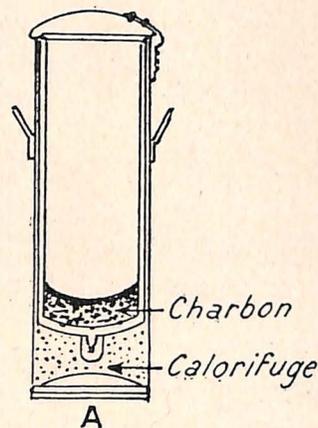


Fig. 2.

A. — Réipient de trempage.

B. — Essais d'évaporation.

1. Seau en cuivre non isolé.
2. Isolement en liège comprimé.
3. Feutre après 2 mois de service.
4. Idem, état neuf.
5. Isolement par le vide.

l'autre en cuivre, avec interposition de calorifuge en feutre ou en liège de 38 millimètres d'épaisseur.

Ex. a) *Enos Coal Co.* Une grande boîte mesurant 0,75 × 1 × 0,50 mètre, en bois doublé de cuivre, reçoit 54 ou 66 cartouches, puis on y introduit 300 litres d'oxygène liquide que l'on transvase des grands réservoirs par l'action de l'air comprimé. Des cartouches de 6 kilogrammes peuvent y séjourner 8 heures sans perdre plus d'un quart de kilogramme.

Ex. b) *Chuquicamata*, Chili. Boîtes de 0,90 × 1,80 × 0,55 mètre. Charge : 50 cartouches de 7 pouces sur 20 ou 125 cartouches de 5 × 12. La cartouche de 7 pouces peut absorber 3,4 fois son poids d'oxygène en 40 minutes, mais en pratique on se contente de 2,9 fois. L'excès de liquide nécessaire pour arriver à la saturation reste dans le fond de la boîte après enlèvement des cartouches et son prix n'est pas compensé par un meilleur rendement de l'explosif. Le tableau I donne le bilan de la dépense d'oxygène d'après *Schulz et Hunter* pour un tir effectué 1 heure 1/4 après l'ouverture des boîtes de cartouches.

TABLEAU I.

<i>Perte au tuyau de remplissage</i> (3,97 l./heure) . . . . .	5,1
<i>Réservoir d'alimentation :</i>	
Pendant le remplissage (48 heures à 3,65 l./heure) . . . . .	4,7
En dehors du remplissage (85 heures à 4,2 l.) . . . . .	9,5
Refroidissement du réservoir . . . . .	5,2
Vidange incomplète due au fond bombé . . . . .	3,2
	22,6
<i>Chargement :</i> Refroidir les boîtes isolées au feutre. Refroidir les cartouches. Evaporation pendant le trempage et le transport (2 heures) . . . . .	
	16,7
Perte pendant le chargement des fourneaux et le tir . . . . .	16,5
Liquide restant dans les cartouches lors du tir (rapport de l'oxygène au carbone, 1,88) . . . . .	30,2
Liquide décanté au fond des boîtes pour refroidir les pompes à vide . . . . .	2,0
Liquide sale perdu dans les boîtes de trempage . . . . .	6,9
	100
Total (oxygène liquide fabriqué) . . . . .	100

### III. — ESSAIS SUR L'EVAPORATION DES CARTOUCHES.

#### Vie des cartouches.

La condition la plus importante à laquelle doit satisfaire la cartouche est de détoner avec une grande puissance un temps appréciable après le trempage. Dans bien des cas, il est essentiel aussi que la combustion ne produise pas d'oxyde de carbone en proportion toxique. On appelle communément *vie* d'une cartouche, le temps qui s'écoule entre le trempage et le moment où il reste encore juste assez d'oxygène pour brûler le combustible en  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ . Mais la cartouche est encore susceptible de faire explosion un certain temps après en formant de l'oxyde de carbone. Il y a donc lieu de distinguer entre la période de *vie utile* et celle de la *vie explosive*. Pour une cartouche au noir de fumée de  $5/4 \times 8$  pouces, contenant 0,23 gramme de combustible par centimètre cube, la vie utile est de 10 minutes, la vie explosive de 25 minutes. La force explosive est maximum quand la cartouche est retirée du vase de trempage et renferme de l'oxygène en excès, elle décroît lentement et presque linéairement pendant 20 minutes; après ce temps, elle tombe rapidement. Pendant les 20 premières minutes, la force explosive décroît bien moins rapidement que l'oxygène. Si on emploie une plus grande densité de combustible (par exemple 0,38), après une minute, il n'y a plus assez d'oxygène pour la combustion complète et cependant, après 25 minutes, la force explosive sera encore la même que celle de la cartouche à faible densité. Quand on ne redoute pas l'oxyde de carbone, il peut donc y avoir avantage pour obtenir un meilleur effet utile à accroître la densité de chargement.

Le temps requis, pour l'évaporation de l'oxygène jusqu'au point de saturation exacte du combustible, dépend : *a*) de la quantité initiale absorbée; *b*) de la quantité nécessaire pour la combustion complète; *c*) de la vitesse d'évaporation. Le premier facteur dépend de la portion du volume total qui est imperméable à l'oxygène liquide. Le poids maximum d'O. L. que peut absorber la cartouche est donné par

$$f_a = \frac{\rho - d}{\rho d} \times 1,13$$

où  $\rho$  est la densité réelle du combustible,  $d$  la densité gravimétri-

que de la cartouche, 1,13 la densité de l'oxygène liquide. Le facteur  $b$  dépend du poids de la cartouche et du rapport de l'oxygène au combustible. Le facteur  $c$  dépend de la nature de l'absorbant, du diamètre de la cartouche, des circonstances extérieures (température, pression, air libre ou espace confiné). On a recherché comment ces facteurs influencent la vitesse d'évaporation.

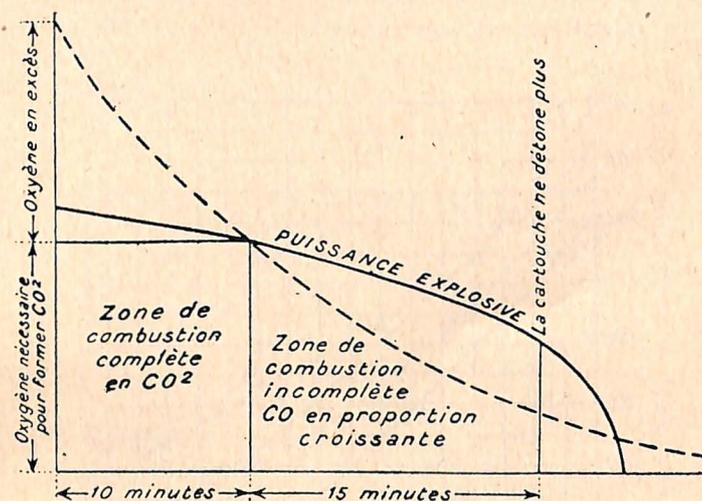


Fig. 3. — Relation entre la puissance explosive, la proportion d'oxygène et le temps d'évaporation.

#### Absorbant combustible.

La particularité la plus importante est la grosseur des particules. Si elles sont très fines, comme celles du noir de fumée, la surface exposée par unité de volume est si grande qu'une très petite partie seulement du liquide échappe à l'action des forces de surface. Il n'y a donc pas de liquide perdu en gouttelettes dans les cartouches saturées, et lorsque l'évaporation se produit, le liquide n'est pas attiré par la capillarité de l'intérieur à l'extérieur. Il en est autrement avec un absorbant de particules grossières, comme la sciure de bois. Une partie du liquide s'égoutte immédiatement au sortir du récipient et l'évaporation se fait, par l'effet de la capillarité, à une allure beaucoup plus rapide

que dans une cartouche de noir de fumée. Les cartouches de sciure de bois sont froides au toucher et leur enveloppe de papier reste humide quelque temps, tandis que celle de suie sèche d'un coup.

L'analyse chimique d'un certain nombre de matières usuelles montre que la proportion de carbone fixe dans les noirs de fumée varie entre 84 et 99 %, l'hydrogène n'intervient dans les matières volatiles qu'en assez faible proportion, 0,2 à 1,7 %. Le pouvoir calorifique est compris entre 7.100 et 8.061 calories.

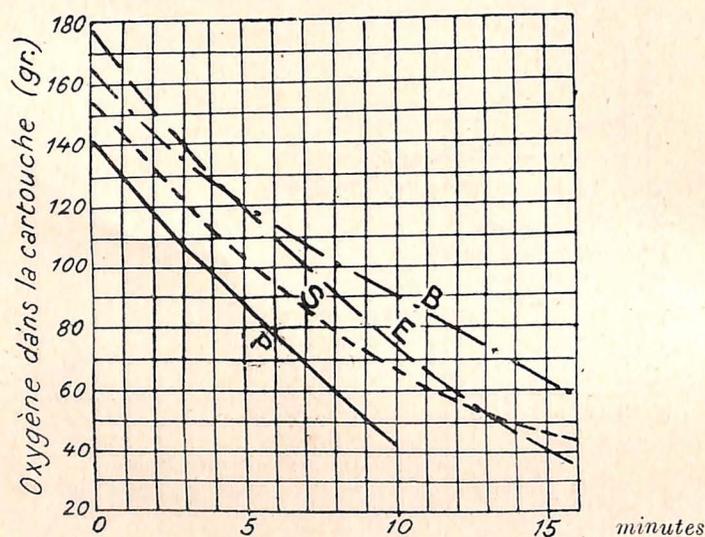


Fig. 4. — Vitesse d'évaporation des cartouches de 1 1/4 x 8 pouces.

B, E, S : suie. P : farine de bois.

L'oxygène nécessaire à la combustion complète est compris entre 2,35 et 2,59 grammes par gramme de combustible. Ce coefficient est de 2,39 pour la poussière de houille, 1,34 pour le bois, 3,4 pour le pétrole brut. Il est tenu compte de la cartouche de papier. Le bois donne 4.000 calories, le brai 4.972.

La vitesse d'évaporation de trois sortes de suies et de la sciure de bois est représentée par le diagramme n° 4. Le noir de lampe B est boursoufflé, difficile à tasser, le noir E est facile à tasser, le

noir de gaz S a été comprimé à la fabrique, est facile à tasser. On voit que l'évaporation est beaucoup plus lente en B qu'en E. Cette allure est caractéristique des noirs de fumée qui se contractent à mesure que l'oxygène s'évapore; le gaz froid se loge entre l'enveloppe et le carbone et il agit comme isolant. On n'observe pas de relation entre la composition chimique et la compressibilité des noirs de fumée. Malgré l'avantage que présente le type B sous le rapport de la lenteur d'évaporation, les auteurs estiment que les autres sont préférables à l'usage parce qu'étant plus faciles à tasser, ils donnent une cartouche plus ferme et d'ailleurs les effets explosifs sont beaucoup plus réguliers que ceux du type B.

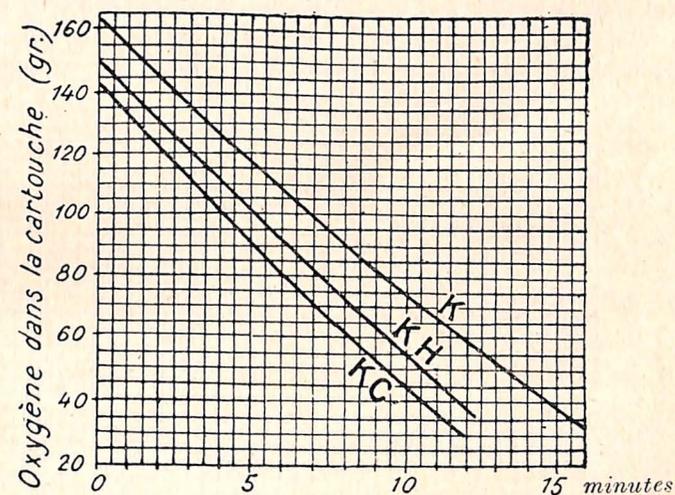


Fig. 5. — Vitesse d'évaporation.

K. Kieselguhr.

KH. Kieselguhr (60) + Huile (40 %).

KC. Kieselguhr (50) + Charbon (50).

La Kieselguhr est d'un effet comparable au type E. En mélange avec le poussier de charbon ou l'huile, elle absorbe moins d'oxygène et l'évaporation est plus rapide. La pulpe de bois absorbe moins d'oxygène, à densité égale, que le noir de fumée et l'évaporation est plus rapide.

### Diamètre des cartouches.

L'évaporation est proportionnelle à la surface et le poids d'oxygène est proportionnel au volume. Le temps requis pour passer du degré de saturation complète à un rapport d'oxygène quelconque est donc théoriquement proportionnel au rayon des cartouches de même longueur et de même densité. En réalité, s'il en est ainsi au début, la vitesse d'évaporation diminue moins rapidement que ne l'indique cette relation simple, ce qui s'explique parce que, dans une cartouche de grand diamètre, la partie interne est isolée par une couche de matière combustible d'épaisseur croissante et par une gaine d'oxygène gazeux, ce qui empêche l'action de conductibilité du milieu. Les figures 6 et 7 montrent que la vie utile d'une cartouche de 2 pouces est le double de celle d'une cartouche de 1 pouce 1/4, tandis que celle d'une cartouche de 4 pouces est 2,5 à 3 fois celle d'une cartouche de

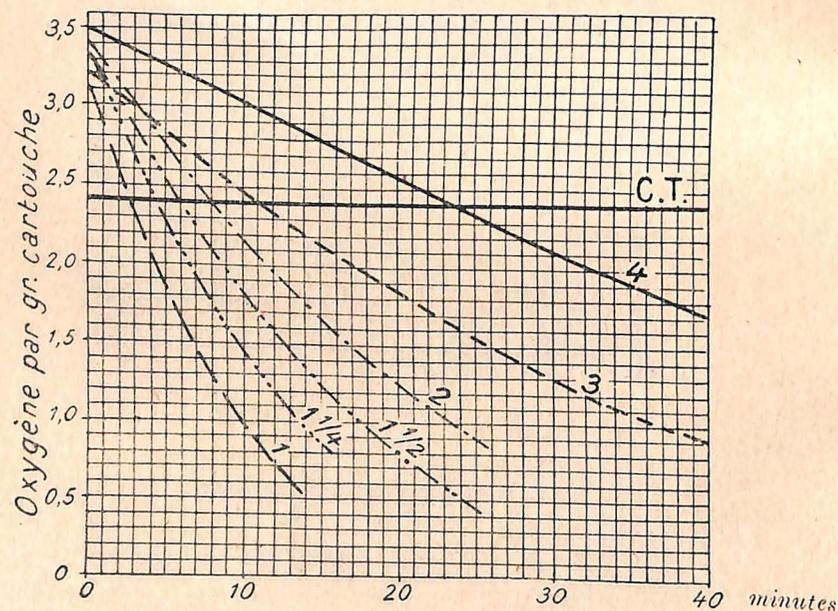


Fig. 6. — Influence du diamètre des cartouches sur la vitesse d'évaporation.

Cartouches de suie C.

C.T. Oxygène répondant à la combustion totale.  
Les chiffres indiquent les diamètres en pouces.

2 pouces. Toutes les cartouches à base d'un absorbant donné n'ont pas rigoureusement la même densité, les plus grosses sont un peu moins denses, mais les diagrammes indiquent les résultats sur lesquels on peut compter en pratique.

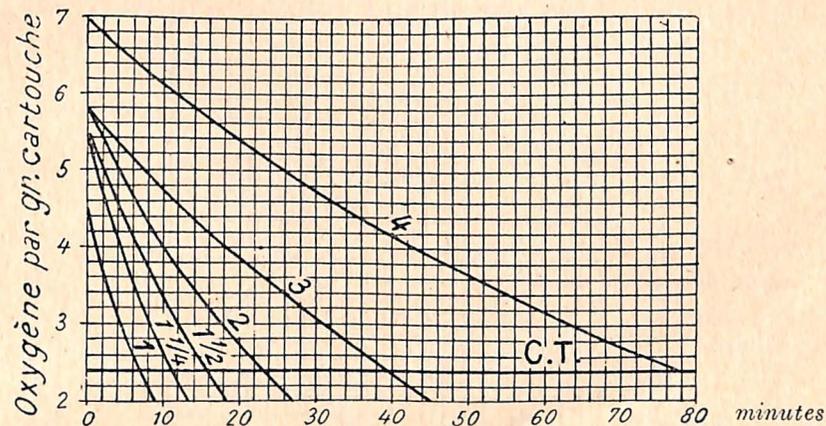


Fig. 7. — Influence du diamètre des cartouches sur la vitesse d'évaporation.

Cartouches de suie L.

### Confinement.

L'évaporation dans un trou de mine est moins rapide qu'à l'air libre. Le diagramme n° 8 donne les résultats obtenus avec un fourneau de 1 pouce 1/2 de diamètre et de 8 pieds de longueur foré dans du béton, et ce sont les moyennes de 5 cartouches placées dans ce trou. La vie utile est augmentée d'environ 20 %, ce qui est dû encore à l'enveloppe de gaz froids entourant la cartouche. En air agité, l'évaporation est plus rapide qu'en air calme.

### Papier des enveloppes.

Ce papier doit absorber facilement l'oxygène liquide, avoir une grande résistance après le trempage et être isolant. Un gros papier de fibres de coton (0,115 mm. d'épaisseur) a été employé pour les essais. Des papiers minces, non absorbants, sont employés avec succès par divers fabricants. Ils ont l'avantage d'être bon marché. Mais les cartouches de cette espèce demandent plus de

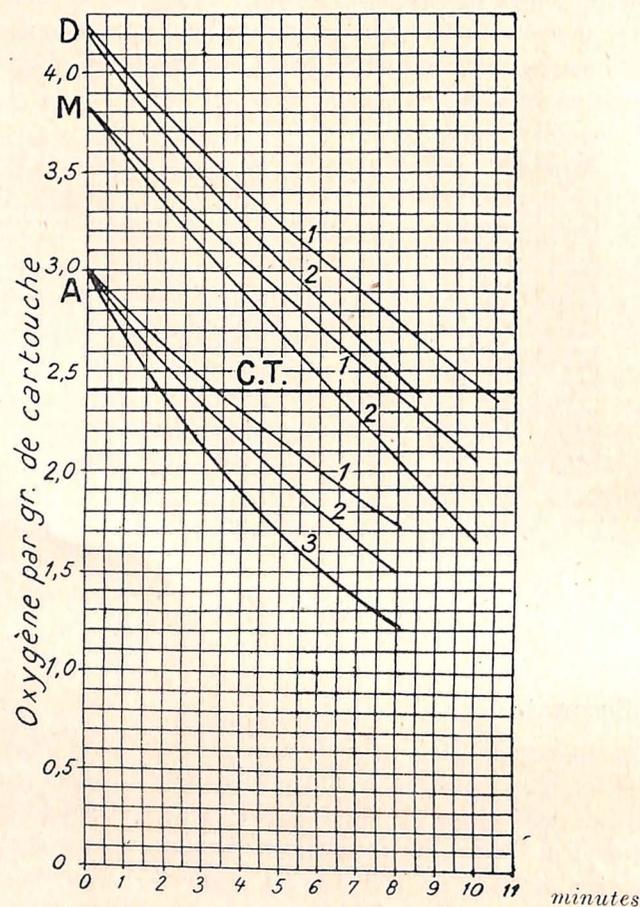


Fig. 8. — Vitesse d'évaporation dans le trou de mine (1), dans l'air en repos (2), dans le vent (3).  
 A. Suie de gaz, densité 0,335.  
 M. Suie de lampe, densité 0,254.  
 D. Idem, densité 0,224.

temps pour le trempage. Les papiers absorbants sont un peu plus efficaces sous le rapport de l'évaporation. Des papiers isolants ont été proposés, mais ils ont tous l'inconvénient de prendre beaucoup de place et de diminuer la puissance explosive par unité de volume.

### Pression atmosphérique.

On peut croire que l'évaporation se fait plus rapidement aux grandes altitudes qu'au niveau de la mer; en réalité, c'est le contraire qui a lieu. L'effet de la pression a été déterminé au laboratoire en suspendant les cartouches dans une bombe de 15 litres et en les repesant après 10 minutes d'évaporation. La perte en poids d'une cartouche de 214 grammes a été de 62 grammes à la pression ambiante (737 mm.) et de 48 grammes à la pression de 65 millimètres. La vitesse d'évaporation est déterminée par l'apport de chaleur à la cartouche et le calorique spécifique de l'atmosphère augmente avec la pression.

L'effet de la pression est moins évident, si l'on place la cartouche de manière qu'elle remplisse exactement un trou de mine foré dans un bloc de béton. Dans ces conditions, la chaleur est fournie par les parois du solide et est indépendante de la pression.

### IV. — PROPRIETES EXPLOSIVES DE L'OXYGENE LIQUIDE.

#### Considérations théoriques.

La pression produite par un explosif dans un trou de mine dépend de l'énergie et du volume de gaz développés, de la densité de chargement et de la vitesse de détonation. L'énergie libérée dépend essentiellement du rapport de l'oxygène au combustible ou de la densité en carbone de la cartouche, c'est-à-dire d'une quantité qui varie rapidement. Il paraît rationnel, en vue d'établir des comparaisons, d'admettre que les cartouches seront toutes tassées à une densité telle qu'il y ait à l'origine une même quantité d'oxygène en excès sur l'oxygène nécessaire à la combustion complète. Ainsi on disposera du même temps pour le chargement et, à vitesse d'évaporation égale, la vie des cartouches jusqu'à la détonation sera la même.

Pour calculer l'énergie produite, on admettra que la cartouche est tirée tout de suite après le trempage.

Prenons comme exemple la cartouche formée de carbone très divisé et exactement saturée d'oxygène. Il faut 2,67 grammes d'O pour brûler un gramme de C en CO<sup>2</sup>. Si le carbone a une

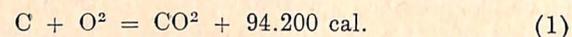
densité 2, celle de l'oxygène liquide étant 1,13, le volume de l'explosif sera :

$$\frac{1}{2} + \frac{2,67}{1,13} = 2,86 \text{ cm}^3$$

La densité apparente du carbone dans cette cartouche sera :

$$1 : 2,86 = 0,350 \text{ (gr. par cm}^3\text{)}$$

L'équation de combustion est :



Ceci suppose que la combustion se fait par l'oxygène gazeux, à la pression atmosphérique et à la température ordinaire. Pour appliquer cette équation à l'explosif, il faut admettre que la vaporisation de l'O se fait à la température constante de  $-183^\circ$  et à volume constant et que la réaction commence quand le combustible et le gaz sont à la température de  $0^\circ \text{C}$ . La chaleur nécessaire pour que l'explosion se fasse se compose de :

1°) Echauffement du carbone :  $12 \times 0,0595 \times 183 = 211 \text{ cal.}$

2°) Echauffement de l'oxygène :  $32 \times 0,1540 \times 183 = 902 \text{ cal.}$

3°) Chaleur latente de vaporisation :  $32 \times 50,9 = 1.628 \text{ cal.}$

---

Total : 2.741 cal.

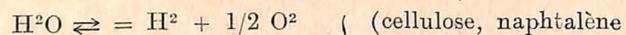
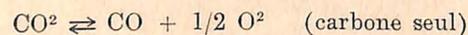
La chaleur dégagée par l'explosion est donc :

$$94.200 - 2.741 = 91.459 \text{ cal.}$$

La température de détonation est donnée par :

$$T = \frac{\text{Chaleur dégagée}}{\text{Calorifique spécifique}}$$

Elle dépend de la nature des produits de la réaction. D'après une étude de Jones, Lewis, Bernard et Friauf (1931, *Journ. Am. Chem. Soc.*), la combustion correspondrait aux équilibres suivants :



La température correspondant à la combustion complète du C est de  $3.542^\circ \text{C}$ . On trouvera dans le tableau II les résultats des calculs dans d'autres hypothèses.

La force théorique de l'explosif calculée par la formule connue  $1,033 V_0 T$

273

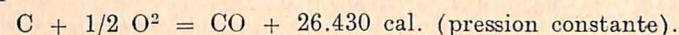
y figure aussi.

On n'a pas essayé de calculer les pressions effectives par la formule de van der Waals ou une autre, tenant compte du co-volume et de la densité de chargement, parce que, aux hautes températures développées, les causes d'incertitudes sont d'un ordre dépassant celui de ces corrections. A titre d'exemple, un litre d'explosif contenant 350 grammes de carbone développe 653 litres de  $\text{CO}^2$  (à  $0^\circ \text{C}$  et 760 mm.), s'il n'y a pas de dissociation. En fait, à la température de l'explosion, le  $\text{CO}^2$  est dissocié et le mélange en équilibre contient 110 litres de  $\text{CO}^2$ , 543 litres de CO et 272 litres d' $\text{O}^2$ , c'est-à-dire un total de 925 litres.

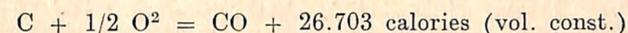
La pression est donc :

$$1.033 \times 925 \times \frac{3.815}{273} = 13.320.$$

Si la cartouche est évaporée et qu'au moment de la mise à feu, il reste juste assez de gaz pour former l'oxyde de carbone, l'équation s'écrit :



Le calcul est le même que dans le premier cas, avec cette exception que le volume gazeux s'est accru de 1/2 vol. et que la réaction ayant lieu à volume constant, la chaleur dégagée doit être augmenté de 545 calories par mol. gr. La réaction exacte est donc :



et en décomptant le réchauffement et la vaporisation de l'oxygène liquide (1.476 cal.), il reste 25.227 calories. La température de détonation est de  $3.961^\circ \text{C}$  et la force théorique 15.500. Elle est plus élevée que dans le cas de la combustion complète, parce que le volume des gaz est moindre (et aussi le calorifique spécifique).

La force variant avec la densité de la cartouche et la quantité d'oxygène disponible, la comparaison doit se faire entre cartouches qui ont le même poids de combustible, et dont l'oxygène diffère par suite de l'évaporation. Mais si l'on compare une cartouche brûlant en  $\text{CO}^2$  avec une autre plus riche en carbone

TABLEAU II. — Propriétés théoriques des Explosifs O. L.

MATIÈRE ABSORBANTE	Densité gravimétrique		Rapport Oxygène à combustible			Chaleur dégagée (grandes calories)		Volume des gaz		Température de détonation	Force théorique	Force relative	
	Combustible gr./cm <sup>3</sup>	Explosif gr./cm <sup>3</sup>	Saturation	Combustion complète	Lors de l'emploi	par k./mole	par kg. de combustible	par litre d'explosif	par kg. de combustible				par litre d'explosif
CARBONE Poids spécifique : 2,0	0,595	1,386	1,33	2,67	1,33	25,227	2,102	1,251	1,867	1,111	3,971	17,850	134
	0,350 (*)	1,285	2,67	2,67	2,67	36,430	3,035	1,082	2,645	925	3,542	13,320	100
	0,350	0,816	3,20	2,67	1,33	25,227	2,102	736	1,867	654	3,971	10,500	79
	0,300	0,984	3,83	2,67	2,28	33,350	2,780	834	2,473	724	3,617	10,660	80
	0,257 (**)	1,241	3,83	2,67	3,83	44,140	3,680	946	3,345	860	3,332	11,720	88
0,257 (**)	0,943	3,83	2,67	2,67	36,430	3,035	780	2,635	678	3,542	9,720	92	
0,257 (**)	0,599	3,83	2,67	1,33	25,227	2,102	540	1,867	480	3,971	7,710	58	
CELLULOSE Poids spécifique : 1,40	0,568 (*)	1,244	1,19	1,19	1,19	314,380	1,941	1,103	1,825	1,036	2,852	12,250	92
	0,417 (**)	0,913	1,90	1,19	1,19	314,380	1,941	810	1,825	761	2,852	9,010	68
NAPHTALENE Poids spécifique : 1,15	0,284 (*)	1,136	3,00	3,00	3,00	494,630	3,863	1,098	3,315	942	3,602	13,820	104
	0,209 (**)	0,836	4,43	3,00	3,00	494,630	3,863	808	3,315	693	3,602	10,160	76
CARBÈNE Poids spécifique : 1,3	0,295 (*)	1,158	2,96	2,96	2,96	399,385	3,916	1,155	3,282	969	3,627	14,310	107
	0,217 (**)	0,859	4,34	2,96	2,96	399,385	3,916	850	3,282	712	3,627	10,520	79

(\*) Oxygène ré pondant à la combustion complète.

(\*\*) Complètement saturés de liquide, ces explosifs ont un excès d'oxygène de 0,3 gr. par cm<sup>3</sup> de cartouche.

et ne pouvant brûler qu'en CO, cette dernière développera une pression beaucoup plus considérable (134 au lieu de 100). Voir les deux premières lignes du tableau II.

Pour conclure cette étude théorique, on remarquera en outre que :

1°) Si la proportion d'oxygène au carbone dans des cartouches de même densité gravimétrique diminue par l'évaporation, la combustion en CO produit une force inférieure de 22 % à celle de la combustion en CO<sup>2</sup>, tandis qu'un excès d'oxygène dépassant de 43 % la quantité nécessaire pour la combustion en CO<sup>2</sup> accroît la force de 19 % ;

2°) Le carbène ne produit qu'une force égale à 1,07 de celle du carbone, bien que la chaleur de combustion et le volume spécifique des gaz soient notablement supérieurs. Cela tient à la différence de densité réelle (1,3 au lieu de 2,0) et à ce qu'il faut 2,96 d'O pour brûler le carbène au lieu de 2,67 pour le charbon. Par suite de la première cause, la cartouche au carbène absorbe beaucoup moins d'O. L. qu'une cartouche au noir de fumée de même volume. L'effet des deux causes combinées est de nécessiter une quantité de carbène moindre que celle du charbon si l'on veut avoir la même réserve pour l'évaporation ;

3°) La cellulose développe une pression moindre que le carbone et le naphthalène, une pression légèrement supérieure ;

4°) On ne connaît aucun combustible qui retienne l'O. L. aussi énergiquement que le noir de fumée, ce qui ajoute encore aux avantages qui découlent des calculs théoriques. Le naphthalène ne peut être employé seul à la confection des explosifs parce qu'il est incapable d'absorber assez d'oxygène pour sa combustion complète.

Comme tous les calculs relatifs aux explosifs, ceux-ci sont approximatifs, vu notamment l'incertitude des constantes physiques aux très hautes températures. De plus, nous négligeons certains phénomènes (pertes de chaleur par rayonnement, convection, détente des gaz) qui doivent avoir une influence sur la température et la pression.

Cependant, ces calculs permettent de se faire une idée assez juste, comme on le verra d'après les résultats d'essais, de la valeur relative des divers combustibles et de l'importance de la proportion d'oxygène.

## V. — RECHERCHES EXPERIMENTALES.

Les procédés d'essai du Bureau of Mines U.S.A. sont connus par d'autres publications. Ils consistent dans la détermination de la puissance propulsive de l'explosif par le pendule balistique, de la vitesse de détonation par la méthode Dautriche, de la sensibilité au choc, à la friction et à la chaleur, enfin dans l'analyse des gaz de la détonation. Les auteurs donnent quelques indications sur les appareils et sur les procédés suivis.

L'état particulier des cartouches à l'air liquide a nécessité certains tâtonnements et des artifices appropriés qui seront signalés ci-dessous.

**Essais au pendule balistique.**

L'explosif est chargé dans un canon et bourré avec une livre d'argile sèche. L'unité de comparaison est le déplacement du pendule sous l'action d'une charge de 22 grammes de dynamite à 40 % de nitroglycérine et la force relative d'un autre explosif s'obtient en cherchant la charge qui produit exactement le même déplacement.

Ce mode de comparaison est illusoire dans le cas des E. O. L., parce que la perte par évaporation dépend trop des manipulations et des conditions momentanées, et la perte de puissance n'est pas exactement proportionnelle à la perte d'oxygène. Pour en donner une idée, les auteurs rapportent des essais sur des cartouches au noir de fumée de 172 cm<sup>3</sup>, pesant 40 grammes et tirées respectivement 5, 10, 15 et 20 minutes après leur sortie du bac de trempage. Leur poids total varie de 171 à 73 grammes. La valeur absolue de l'élongation du pendule décroît de 3,38 à 2,40 pouces, mais rapportée à l'unité de poids de cartouche, elle serait d'autant plus grande que l'évaporation est plus avancée. Etant donné que ce n'est pas le poids de la cartouche au moment du tir qui conditionne en pratique la dépense de minage, on ne voit pas d'intérêt à rapporter les mesures de puissance au poids réel et *il paraît plus utile de les rapporter au volume primitif de la cartouche.*

Les calculs qui suivent ont été faits sur cette base. La densité de la cartouche de dynamite standard est de 1,32, le volume de 227 grammes est donc de 172 cm<sup>3</sup>.

Les essais avec l'explosif à l'oxygène liquide montrent que

pour produire le même déplacement du pendule, la charge devrait occuper un volume de 168 cm<sup>3</sup>, si on tire après 5 minutes, et de 237 cm<sup>3</sup> si on tire après 20 minutes.

La puissance relative est donc :

$$\frac{172}{168} = 102 \% \text{ après 5 minutes}$$

$$\text{et } \frac{172}{237} = 73 \% \text{ après 20 minutes.}$$

Une série d'essais a été faite avec divers combustibles en faisant varier la densité entre 0,17 et 0,58 et la durée d'évaporation de 5 à 25 minutes. Nous reproduisons deux diagrammes caractéristiques de cette série (fig. 9 et 10). L'enveloppe des cartouches était faite du papier spécifié ci-dessus, leur diamètre 1 pouce 1/4 et leur volume était juste égal à celui de la cartouche standard de dynamite.

**Puissance relative des divers explosifs.**

Les essais ont porté sur 23 explosifs. Les tableaux de détail relatent les compositions, densités, proportions d'oxygène, vie des cartouches, déplacements du pendule (absolus et par unité de poids et de volume), les volumes équivalents à la cartouche standard et la puissance relative. On en déduit les conclusions suivantes :

1) Pour les explosifs au noir de fumée, en cartouches de 5/4 pouce, la densité optimum est de 0,3 gramme par centimètre cube. Ces cartouches ont une vie utile jusqu'au point de combustion complète de 5 minutes et à ce moment une puissance égale à 115 % à celle de la dynamite standard. Après 25 minutes, cette puissance n'est plus que 65 %.

2) Si l'on doit éviter la formation de CO dans les fumées et si le chargement doit durer plus de 5 minutes, il est désirable de réduire la densité. Ainsi une cartouche pesant 0,27 gramme par centimètre cube contiendra assez d'O pour 8 minutes et sa puissance explosive sera 97; une cartouche de 0,23 aura une puissance de 87 après 10 minutes et une cartouche pesant 0,175 vaudra encore 70 % de la dynamite après 14 minutes.

3) La puissance décroît à mesure que l'oxygène s'évapore, mais pas proportionnellement. Si l'on considère des cartouches de mê-

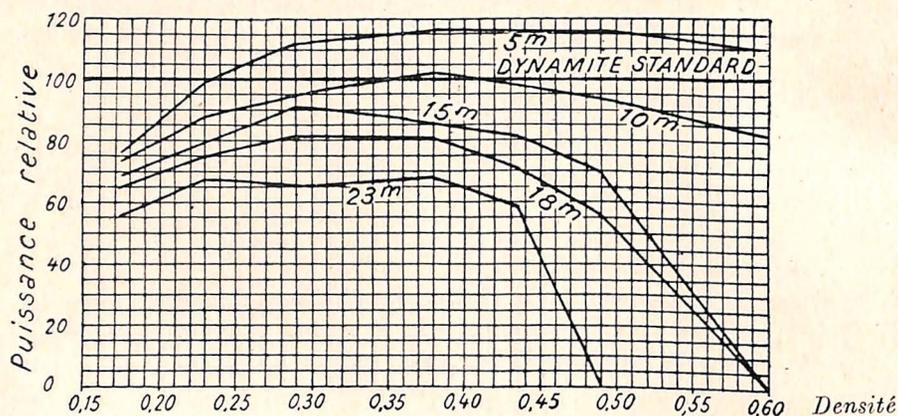


Fig. 9. — Puissance relative des cartouches de suie en fonction de la densité des cartouches sèches.

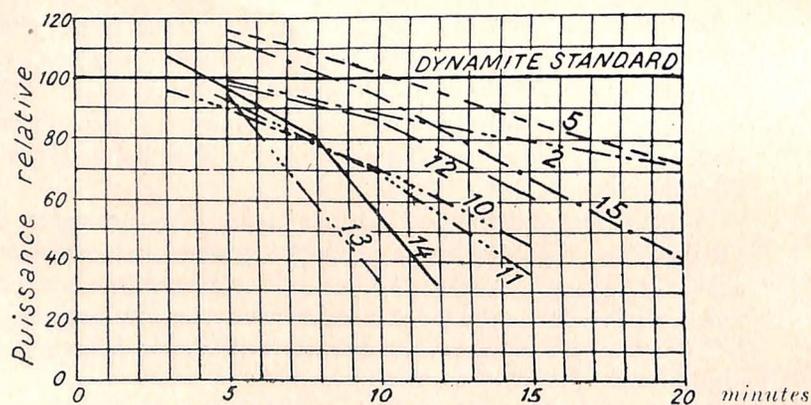


Fig. 10. — Puissance relative de divers absorbants.

- 2. Suie de lampe, 0,23 gr. par cm<sup>3</sup>.
- 5. Suie de gaz, 0,38 gr. par cm<sup>3</sup>.
- 10. Pétrole brut (40) + Kieselguhr (60).
- 11. Pétrole (15) + sciure de bois (85).
- 12. Suie (20) + sciure de bois (80).
- 13. Poussière de houille (55) + Kieselguhr (45).
- 14. Brai (78) + Kieselguhr (22).
- 15. Carbène.

me poids, la différence de puissance quand la proportion d'oxygène tombe de 2,4 à 1,3 n'est que de 15 à 20 %.

4) Comme la chaleur latente de vaporisation de l'oxygène liquide est relativement faible, un excès d'oxygène a pour effet une augmentation de puissance. Ainsi une cartouche tirée avec 3,5 d'O a une puissance par unité de poids qui dépasse de 12 % celle d'une cartouche semblable tirée quand elle ne contient plus que 2,5 d'O.

5) La puissance par unité de poids d'une cartouche décroît quand la densité augmente (fig. 9).

6) Le carbène a une puissance initiale supérieure de 8 % à celle des suies, mais il a le désavantage d'une chute beaucoup plus rapide résultant de l'évaporation de l'oxygène.

7) Les mélanges d'huile et kieselguhr ont une puissance initiale satisfaisante, mais qui se perd très rapidement. Ainsi le mélange à 40 % d'huile lourde donne après 5 minutes une puissance de 90 et au bout de 15 minutes, 45 % seulement.

8) D'autres mélanges sans noir de fumée, tels que ceux d'huile et sciure de bois, poussière de houille-kieselguhr, brai-kieselguhr, ont une puissance initiale de 95 à 107 %, mais qui tombe à 33 en 10 ou 12 minutes.

9) L'addition de 20 % de noir de fumée à la pulpe de bois accroît notablement la rétention de l'oxygène, de sorte que l'effet après 10 minutes est le même que celui d'une cartouche à la suie de lampe d'une densité 0,23.

10) L'aluminium et le ferrosilicium ajoutés au noir de fumée n'en modifient guère la puissance explosive.

11) Une cartouche de 91 % d'aluminium pulvérisé et 9 de Kieselguhr vaut après 8 minutes une cartouche de noir de densité 0,23. Les gaz provenant de l'enveloppe de papier n'interviennent que très faiblement dans l'énergie de l'explosion. Le point d'ébullition de l'alumine est de 2.210° C et il est probable qu'il y a de l'alumine volatilisée au moment de l'explosion.

**Relation entre la puissance et la proportion d'oxygène.**

Les résultats moyens des essais ci-dessus permettent d'établir une relation entre l'oxygène et la puissance explosive exprimée en unités de la dynamite standard de la station de Pittsburgh.

Elle est représentée par un arc parabolique (1). Les valeurs sont indépendantes du diamètre, mais elles sont influencées par la densité. Cependant, le diagramme peut être utilisé dans un but pratique pour toutes cartouches de noir de fumées (lampes ou gaz) ou d'une autre forme de carbone.

Pour faciliter la comparaison des E. O. L. avec les explosifs industriels d'usage courant, on a dressé des tableaux donnant les poids équivalant à un gramme de carbone contenu dans l'E.O.L. Nous en extrayons le tableau suivant.

TABLEAU III.  
Rapport entre l'oxygène et la puissance de E. O. L.

Oxygène par gr. de matière sèche	Poids de dynamite équivalent à 1 gr. de matière sèche					
	NG. 20 %	40 %	60 %	80 %	100 % dyna- mite gomme	Standad B. of Mines 40%
3,5	6,5 à 7,3	5,7 à 6,3	5 à 5,7	4,6 — 5,2	3,8	5,5
3,0	6,1 à 6,9	5,4 à 6,0	4,7 à 5,4	4,4 — 5,0	3,6	5,2
2,5	5,6 à 6,3	5,0 à 5,5	4,4 à 5,0	4,1 — 4,6	3,3	4,8
2,0	5,1 à 5,7	4,5 à 5,0	3,9 à 4,5	3,6 — 4,1	3,0	4,3
1,5	4,4 à 4,9	3,8 à 4,3	3,4 à 3,8	3,1 — 3,5	2,6	3,7
1,0	3,6 à 4,0	3,1 à 3,5	2,7 à 3,1	2,5 — 2,9	2,1	3,0
0,5	2,4 à 2,6	2,1 à 2,3	1,8 à 2,1	1,7 — 1,9	1,4	2,0

Exemple d'application de ces tableaux : Une mine à ciel ouvert a l'intention de remplacer la dynamite gélatine à 40 % par l'oxygène liquide. On se propose d'employer des cartouches

(1) A part la chute brusque entre les teneurs en O de 0,5 à 1 qui n'ont pratiquement pas d'intérêt, on voit que la relation entre le poids équivalent en dynamite standard ( $y$ ) et la proportion d'oxygène ( $x$ ) s'exprime par la loi :

$$y = 1,3 + 1,9x - 0,20x^2.$$

De même l'équivalent en dynamite gomme serait donné par :

$$y = 0,73 + 1,5x - 0,17x^2.$$

(L. D.)

au carbone pesant 8 livres à sec, 35 livres après trempage et 28 livres au moment du tir.

La proportion d'O sera  $\frac{28 - 8}{8} = 2,5$ . A ce rapport, 1 livre

de cartouche sèche vaut 5,5 livres de dynamite gélatine à 40 %. Donc une cartouche d'O. L. remplacera 44 livres de dynamite.

### Cartouches de gros calibre.

En se rappelant ce qui a été dit au chapitre III de l'influence favorable des gros diamètres sur la lenteur de l'évaporation, on est porté à croire que si les tirs ont lieu dans un intervalle de temps imposé, les coefficients de puissance relative seront beaucoup plus élevés avec de grosses cartouches que les chiffres ci-dessus résultant d'essais sur des cartouches de 1 pouce 1/4. Cette question présente un intérêt particulier dans les exploitations à ciel ouvert, où l'on emploie des cartouches dont le diamètre atteint 7 pouces, ce qui permet de les confectionner avec des matériaux à bas prix tout en assurant une durée et une force explosive suffisantes.

Quelques essais ont été faits sur la *solidité des enveloppes* et sur la *variation de puissance en fonction du temps*.

Les enveloppes en papier ne conviennent pas. Il faut employer une toile assez solide pour ne pas se déchirer quand on l'introduit dans le fourneau et assez serrée pour ne pas laisser filtrer le liquide pendant les manipulations. Les tissus deviennent cassants aux basses températures. Les essais rapportés montrent que la charge de rupture des toiles imprégnées d'air liquide et l'allongement final, comparés à ceux d'une toile sèche, tombent très fortement. Le coton est le meilleur des matériaux à cause de la longueur des fibres et de la chute modérée de résistance après imprégnation d'oxygène liquide (27 % dans le sens de la chaîne, 30 % suivant la trame), tandis que les toiles de sac communes (jute, canevas), perdent 30 à 60 %. *Holderer* recommande une toile de coton de 8 onces par mètre carré telle qu'on l'emploie à Chuquicamata pour la confection des cartouches de 7 x 20 pouces, pesant après imprégnation 33 livres. Quand les sacs sont remplis de carbone, on les fait passer par un calibre pour régulariser le diamètre. Les sacs renflés occasionnent des ancrages et les efforts

qu'on exerce pour enfoncer les cartouches ont été la cause d'accidents.

Ces grosses cartouches ont une vie d'environ 5 heures et leur supériorité est énorme. Le diagramme n° 11 le démontre. Le point de départ n'est pas le même pour toutes les cartouches, parce qu'elles n'ont pas exactement la même densité en combustible, mais dans l'intervalle indiqué (0,29 à 0,33), les figures montrent bien la force relative des divers grossseurs des cartouches. On en déduit que la puissance est exactement la même que celle de la dynamite standard après les temps d'évaporation suivants :

Diamètre	: 1 1/4 pouce	. . . . .	5 minutes
	2 pouces	. . . . .	16 »
	3 »	. . . . .	20 »
	4 »	. . . . .	27 »
	5 »	. . . . .	47 »
	7 »	. . . . .	120 »

**Vitesse de détonation.**

C'est un critérium de la brisance des explosifs; elle a été déterminée par la méthode Dautriche pour 25 explosifs de composition différentes pris au sortir du bain d'oxygène liquide (2 à 8 minutes d'évaporation). On a recherché ensuite l'effet de l'évaporation prolongée sur l'explosif au noir de fumée en cartouches de 1 1/2 x 8 pouces.

Voici les principaux résultats de ces essais :

1°) La vitesse de détonation des cartouches au noir de gaz varie entre 4.900 et 6.200 mètres par seconde;

2°) La vitesse de détonation au noir de pétrole varie entre 4.200 et 6.000 m./sec.;

3°) Les cartouches non tassées détonent très irrégulièrement, la vitesse varie entre 1.000 et 5.000 m./sec.;

4°) Les mélanges de Kieselguhr et d'huile donnent environ 3.200 m./sec.; ceux de carbonate de magnésium et d'huile (40 %), environ 4.000 m./sec.; ceux qui renferment une plus grande quantité d'huile, 3.200 m./sec.;

5°) La vitesse de détonation dépend du constituant le plus finement divisé. Ainsi un mélange de 20 % de noir et de 80 %

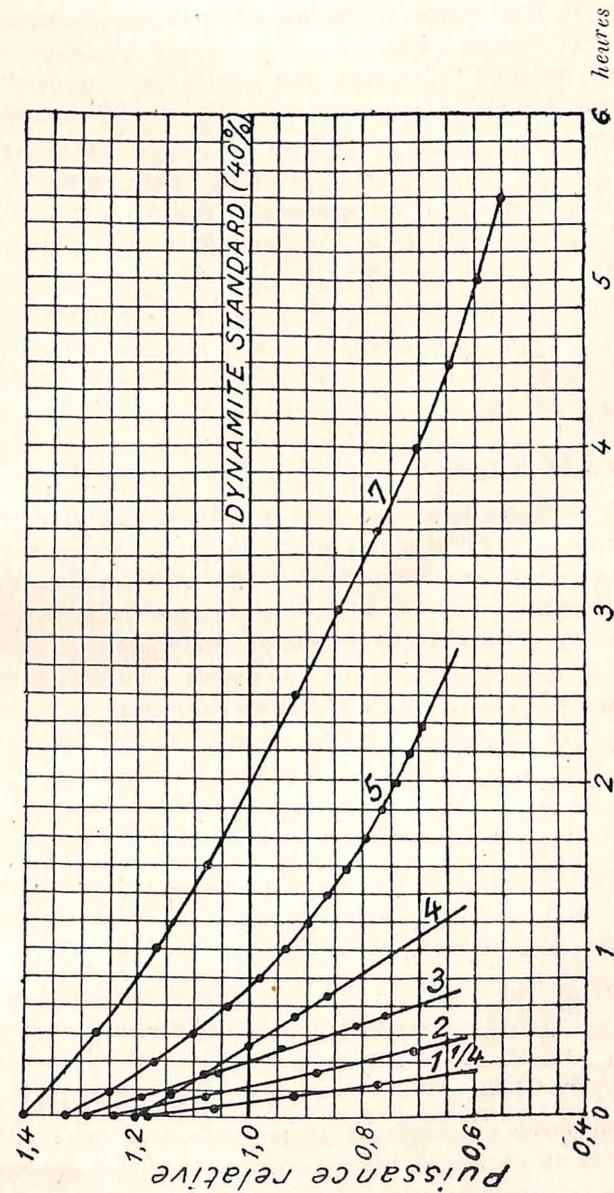


Fig. 11. — Influence du diamètre des cartouches sur la puissance de l'explosif.

de pulpe de bois a une vitesse de 4.800 m./sec., sensiblement égale à celle du noir pur;

6°) Les mélanges contenant des particules grossières, non absorbantes, comme la poussière de houille, ont des vitesses de détonation faibles et très irrégulières (1.000 à 3.500 m./sec.);

7°) L'addition d'aluminium au noir de fumée ne modifie pas sensiblement la vitesse de détonation (20 % d'Al, v. = 4.800 m.);

8°) L'addition de 20 % de Kieselguhr abaisse la vitesse d'environ 500 mètres par seconde;

9°) La vitesse des cartouches de suie décroît lentement à mesure que se fait l'évaporation (5.350 m. après 4 minutes, 4.670 m. après 30 minutes; la proportion d'oxygène étant tombée de 2,68 à 0,56).

#### Aptitude à la détonation.

Quand plusieurs cartouches sont placées en file, elles cessent de transmettre l'explosion si l'intervalle qui les sépare est trop grand. Les essais ont été faits en enfermant deux cartouches dans une même enveloppe de deux épaisseurs de papier et en amorçant la première après 3 minutes d'évaporation. On augmente la distance jusqu'à ce que la seconde ne détone plus. La transmission certaine a lieu aux distances suivantes :

Suie de gaz . . . . .	70 cm.
» de pétrole . . . . .	30 »
» d'acétylène . . . . .	50 »
» de carbène . . . . .	80 »
Charbon de bois (fabriqué de pâte à papier) . . . . .	25 »
40 % huile + 60 % Kieselguhr . . . . .	48 »
Dynamite à 40 % . . . . .	35 »

Tous les mélanges d'O. L. ont donc une bonne aptitude à la détonation, du même ordre que celle des dynamites.

#### Sensibilité au choc.

Le maniement des explosifs exige qu'ils aient une certaine insensibilité au choc et à la friction. La rapidité d'évaporation de l'oxygène rend les essais difficiles. Le procédé employé avec les explosifs ordinaires pour déterminer la résistance à la friction consiste à étendre l'explosif sur un enclume sur lequel vient frot-

ter un pendule; il n'a pas donné de résultat dans le cas présent et on n'en a pas trouvé d'autre mieux approprié.

L'essai au choc se fait d'ordinaire en intercalant l'explosif entre deux disques de métal; le disque supérieur est surmonté d'une tige sur laquelle on fait agir le choc d'un mouton de 200 kilogrammes tombant d'une hauteur mesurable. En ce qui concerne les E. O. L., on a été amené au procédé suivant. On coupe une longueur d'un pouce d'une cartouche fraîche de 1 pouce 1/4 de diamètre; on place l'éprouvette sur la tige du disque qui joue le rôle d'enclume; le mouton pèse 26 kilogrammes et est muni d'une tige centrée de 1 3/8 de diamètre qui vient heurter l'explosif. La durée d'évaporation est de 30 secondes. On détermine : 1° la hauteur maximum pour laquelle il ne se produit aucune explosion dans 10 essais successifs; 2° la hauteur minimum à laquelle il y a 3 explosions sur 3 essais. Entre ces deux limites existe une zone de ratés et d'explosions de probabilité variable.

Les chiffres cités varient extrêmement dans chaque catégorie (2,5 à 250 cm.). Il en résulte cependant que le choc du poids de 26 kilogrammes tombant de 2,5 centimètres est dangereux par les E. O. L. à base de suie.

Ces essais indiquent que les E. O. L. sont assez sensibles au choc, beaucoup plus que la dynamite standard. Le combustible le moins sensible est le charbon obtenu par carbonisation des résidus des cuves de pâte à papier; il est particulièrement insensible quand il contient 12 à 14 % d'humidité. Par l'addition de 10 % d'aluminium ou de ferrosilicium, ce produit devient particulièrement sensible.

La conclusion, c'est que les manipulations et le bourrage exigent des précautions.

L'influence de la proportion d'oxygène a été recherchée par deux moyens : 1° par des mélanges d'O et d'Az et une évaporation de 30 secondes; 2° par l'emploi de l'O. L. industriel à 98 %, mais en prolongeant l'évaporation entre 1/2 et 7 minutes.

Dans les deux cas, la sensibilité diminue et plus par l'addition d'azote que par l'évaporation.

D'autres auteurs qui ont fait des expériences à la suite d'explosions prématurées, bien que n'étant pas d'accord sur tous les points, indiquent cependant que la plupart des suies sont très

sensibles au choc, tandis que la sciure de bois, le liège et autres dérivés du bois le sont beaucoup moins. L'huile et les substances sableuses augmentent la sensibilité. Les essais du Bureau of Mines confirment ce fait. Le sable, l'émeri, le ferrosilicium, les sels cristallisés, l'aluminium, l'huile, la stéarine et le graphite sont des excitants.

### Inflammabilité.

Les essais ont été faits en dirigeant sur la cartouche le jet d'un chalumeau oxyhydrique.

Le temps nécessaire pour allumer l'E. O. L. est du même ordre que le temps requis pour allumer la dynamite. Cependant, le danger en pratique paraît plus grand pour les explosifs O. L. Dans l'essai, la flamme du chalumeau est alimentée par le mélange oxyhydrique formé dans le brûleur et sa température n'est pas influencée par la nature de l'atmosphère extérieure. En pratique, une source de chaleur ordinaire, telle qu'un charbon en ignition, sera notablement activée au contact d'une cartouche E. O. L. par suite de l'enrichissement de l'atmosphère en oxygène, et le danger en est accru.

### Pureté de l'oxygène liquide.

Le rendement d'un appareil de liquéfaction est plus grand et les frais de fabrication sont moindres si au lieu de s'astreindre à un produit contenant 99 % d'oxygène, on se contente d'un degré de pureté disons de 85 %. Si ce liquide impur pouvait être employé à la confection des cartouches sans grande altération des propriétés explosives, il en résulterait une économie notable. La présence de l'azote diminue la puissance de l'explosif, mais l'évaporation jusqu'au moment du tir constitue une distillation fractionnée et un enrichissement de la cartouche, parce que le point d'ébullition de l'azote est inférieur à celui de l'oxygène. Il pourrait donc se faire qu'au moment de l'emploi, il n'y ait guère de différence entre deux cartouches saturées, l'une d'oxygène à 99 %, l'autre d'oxygène à 85 %. Il a donc paru intéressant de vérifier les propriétés explosives et la richesse réelle en oxygène après un certain temps d'évaporation de ces dernières cartouches.

Des mélanges d'oxygène et d'azote en proportions déterminées

ont pu être réalisés facilement dans un récipient de trempage, de même que la prise d'essai des gaz au-dessus du liquide dans ce récipient. Tous les essais ont été faits avec des cartouches au noir de fumée (0,36 gr./cm<sup>3</sup>) de 1 1/2 x 8 pouces et la prise de gaz a lieu immédiatement avant de retirer la cartouche. La proportion en poids de l'oxygène dans le liquide a varié entre 99 et 46 %. Pour déterminer l'effet de l'évaporation, la cartouche était placée dans une boîte hermétique, sauf un petit évent pour la prise d'essai des gaz. Ce récipient, placé sur un des plateaux d'une balance, est équilibré toutes les 5 minutes et l'on fait une prise d'essai des gaz, et de l'analyse on déduit la proportion d'oxygène et d'azote dans la cartouche.

Les résultats de ces essais sont les suivants :

1°) Lorsque la richesse primitive en oxygène varie de 99 à 70 %, la puissance explosive décroît progressivement, mais assez lentement (fig. 12), tant que la durée d'évaporation ne dépasse pas 10 minutes. L'effet de distillation fractionnée est plus marqué à mesure que l'évaporation progresse. Au bout de 15 minutes, une cartouche trempée dans l'oxygène à 99 % et une cartouche saturée d'oxygène à 84 % sont sensiblement équivalentes;

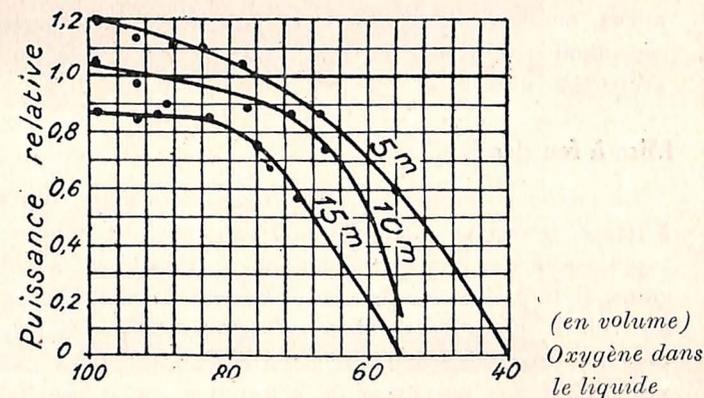


Fig. 12. — Influence de la pureté de l'oxygène liquide sur la puissance explosive.  
Densité 0,36.  
Cartouches de suie Si 1 1/2 x 8 pouces.

2°) En dessous d'une certaine teneur comprise entre 70 et 80 %, la puissance de l'explosif tombe notablement; une cartouche trempée dans un liquide ne contenant que 38 % d'oxygène

ne détone plus; une cartouche trempée dans un liquide à 56 % a perdu son énergie après 10 minutes;

3°) A mesure que se fait l'évaporation, la perte est plus considérable en azote qu'en oxygène; cependant, le pourcentage d'oxygène trouvé dans le gaz est beaucoup plus grand que ne l'indiquent les conditions d'équilibre et la purification de l'air liquide dans la cartouche semble faible. Ainsi après 15 minutes, la teneur en O primitivement de 68, était montée à 70 dans l'essai le plus marquant;

4°) L'effet utile mesuré au pendule balistique et correspondant à un rapport donné du poids de l'oxygène à celui du carbone diminue par l'addition d'azote. C'est la conséquence du froid produit par l'évaporation de l'azote liquide. La chute de puissance est de 10 % si l'on compare les liquides à 89 et à 99 % d'O; cette chute est de 45 % lorsque la proportion d'O est réduite à 67 %;

5°) La vitesse de détonation décroît progressivement, en moyenne, de 5.380 mètres (99 % d'oxygène) à 5.240 mètres (89,6 d'O) et à 4.340 mètres (67,3 d'O).

En conclusion, pour obtenir le maximum d'effet utile, il vaut mieux employer l'oxygène pur. La perte de puissance n'est cependant pas proportionnelle au degré de pureté tant que la proportion d'oxygène reste supérieure à 70 ou 80 %.

#### Mise à feu des E. O. L.

La mèche Bickford, les détonateurs électriques, ordinaires ou à temps, le cordeau détonant sont employés. Les moyens les plus rapides sont les plus recommandables. Dans les travaux souterrains, il faut disposer de 4 à 7 minutes, suivant la profondeur du trou de mine. Du point de vue sûreté et efficacité, le cordeau détonant est recommandé; la basse température des E. O. L. n'a pas d'effet sur sa vitesse de détonation ou sa sensibilité, non plus que sur la fragilité du tube de plomb. Dans le tir par volée, les cordeaux dérivés partant d'un maître-cordeau descendent dans les trous mine et sont en contact avec la charge sur toute sa longueur. Ce procédé est plus efficace pour garantir la détonation complète de toutes les mines que ne le serait un simple détonateur électrique enfoncé dans chaque charge. La détonation

est provoquée par un détonateur électrique placé en bout du maître-cordeau et qui, n'étant pas en contact avec l'air liquide, garde toutes ses propriétés explosives.

*Lisse* prétend que le fulminate de mercure devient insensible à basse température et qu'il est altéré par l'humidité après un temps assez court. Le détonateur au résorcinate serait le meilleur pour l'amorçage de l'air liquide.

*Clark* a montré que les détonateurs électriques ne développent plus leur pleine force après un séjour de 3 minutes dans l'air liquide. Cela résulte des impressions marquées sur les plaques de plomb. On a observé également que le détonateur exposé à une basse température, puis placé dans des charges d'E. O. L. contenant un absorbant inerte, donnait lieu à des ratés ou des détonations incomplètes à l'air libre. Plus tard, il fut démontré que dans un trou de mine bourré, il n'y avait pas de détonation incomplète, bien que le détonateur ne développe pas tout son effet normal.

L'étude d'un certain nombre d'opérations de tir n'a pas révélé de ratés en nombre anormal. Les auteurs sont donc d'avis que les détonateurs électriques, de préférence le n° 8, peuvent être employés en toute sûreté avec les E. O. L., sauf peut-être avec ceux qui sont formés principalement d'un absorbant inerte.

Le détonateur à retard, qui comprend un bout de mèche caoutchoutée, ne convient pas aux E. O. L. Il doit être modifié pour éviter que des explosions surviennent simultanément ou dans un ordre aberrant. Cet effet défavorable résulte du crachement de la mèche qui se produit dès qu'on ferme le circuit électrique.

La mèche et le détonateur ordinaire ont beaucoup d'inconvénients. L'enveloppe extérieure de la mèche tend à brûler dans l'atmosphère d'oxygène à l'orifice du fourneau et la flamme se propage par l'extérieur plus vite que par l'âme en pulvérin et la charge explose prématurément. Les étincelles des déchirures latérales ont le même effet. Plusieurs espèces de mèches brûlent au ralenti dans l'oxygène liquide; d'autre part, dans les longues charges fortement bourrées, la pression est suffisante pour accroître la vitesse de combustion. Il n'est donc pas possible d'employer le tir simultané avec quelque précision.

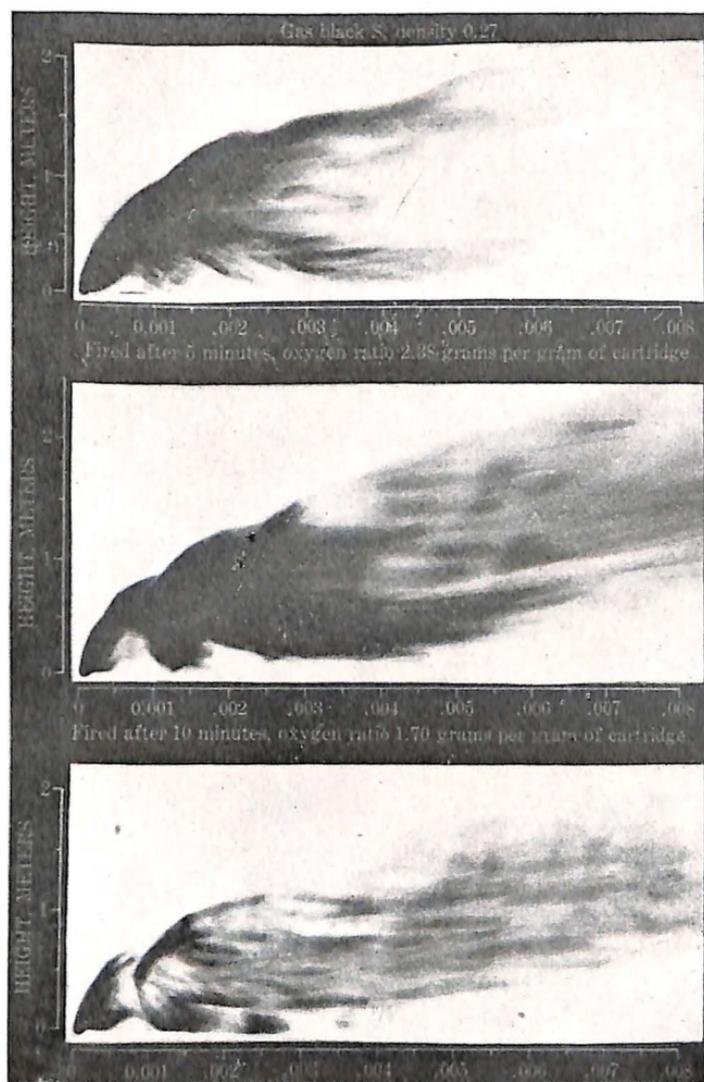


Fig. 13. — Photographie des flammes.  
produites par les E. O. L.

### Gaz de la détonation.

Dans les travaux à ciel ouvert, la nature des gaz n'a guère d'importance; dans les travaux souterrains, les gaz provenant d'une combustion incomplète peuvent occasionner l'asphyxie des mineurs. Il est donc intéressant de procéder à des analyses de gaz aussi bien au laboratoire qu'au front du tir.

Les essais de la première espèce ont été faits à la bombe Bichel. Le procédé ordinaire consiste à faire le vide avant l'explosion. La chose étant irréalisable avec l'oxygène liquide, on a placé les cartouches dans la bombe quelque temps avant la mise à feu, de façon à déplacer l'air par l'oxygène provenant de l'évaporation. Cet oxygène participe donc à la réaction. On a recherché spécialement l'effet du temps de vaporisation sur des cartouches de noir de fumée et l'effet de quelques absorbants typiques.

Les résultats sont rapportés dans le tableau n° IV.

La proportion de CO et de H<sup>2</sup> augmente à mesure de l'évaporation. La cartouche contenant 15 % d'oxygène en excès donne 0,3 % de CO dans les gaz, 85 % de CO<sup>2</sup> et 12 % d'O. Celles qui répondent théoriquement à la combustion complète développent 79,3 à 87 % de CO<sup>2</sup> et 9 à 16,5 % de CO. Après 15 minutes, la proportion d'O dans la cartouche est réduite de moitié, les gaz renfermant 21 de CO<sup>2</sup>, 68,4 de CO et 9,6 % de H<sup>2</sup>.

Passons aux essais dans les mines :

*Mine Whitecap Leadville, Co.* — Voie de niveau dans un dike de porphyre. Tir par volées de 8 ou 9 mines de 1<sup>m</sup>,20 de profondeur, charge totale : 17 à 21 cartouches. Pour enfermer les gaz de l'explosion, une cloison en bois a été montée à 30 mètres en arrière du front et un rideau de toile a été disposé de manière à la recouvrir immédiatement après le tir. Des observateurs munis de masques pénètrent dans la galerie et prélèvent des échantillons à intervalles de 6 mètres. La pression barométrique est de 515 millimètres de mercure et la température de 8° C.

La proportion de CO trouvée dans l'air a varié de 0,09 à 1,41 %, celle du CO<sup>2</sup> entre 1,49 et 1,70 %, celle de l'oxygène entre 20,81 et 23,20 %. Les chiffres correspondant à la dynamite à 40 % de nitroglycérine sont de 0,11 de CO, 0,85 de CO<sup>2</sup> et 20,81 % de O<sup>2</sup>.

CO

Le rapport  $\frac{\text{CO}}{\text{CO} + \text{CO}^2}$  est de 0,15 avec la dynamite, il a varié entre 0,06 et 0,50 avec les cartouches O. L.

TABLEAU IV. — Analyses des gaz recueillis dans la bombe Bichel.

EXPLOSIF	Poids en gr.		Poids d'oxygène lors de l'explosion gr.	Temps d'évaporation (minutes)	Volume des gaz O <sub>c</sub> et 760 m/m	Composition des gaz					
	Sec	Tempé				CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sup>4</sup>	N <sub>2</sub>
Noir de fumée S. . .	52	214	93	10	92,8	66,3	0	28,2	4,0	0,4	1,1
Pulpe de bois . . .	52	214	72	14	94,9	34,8	0	56,1	7,5	0,3	1,3
Carbène . . .	61	215	98	5	66,9	84,2	13	0,4	0,1	0	23,
Suie (50) + Naphthaline (30) + Kieselguhr (20).	42	210	63	14	76,2	43,5	0	45,3	9,7	0,2	1,3
Suie (80) + Aluminium (20)	70	220	63	14	118,0	6,0	0	72,7	19,5	0,5	1,3
Suie (80) + Ferrosilicium (20).	57	215	72	14	87,8	35,3	0	54,6	8,5	0,3	1,3
Aluminium (85) + Kieselguhr (15).	60	220	75	14	94,5	21,9	0	73,7	3,9	0,5	—
	110	247	80	6	17,5	43,5	0,04	28,0	19,3	0,13	9,03

On remarque que les cartouches E. O. L. ayant une densité de 0,21 à 0,24 et tirées après 8 minutes, dégagent moins de CO que la dynamite (36 ou lieu de 46 cm<sup>3</sup>). Mais si l'on emploie de plus fortes densités, par exemple 0,3 gramme de C, la quantité de CO produite est 147 cm<sup>3</sup>, c'est-à-dire 3 fois plus qu'avec la dynamite. Un mélange de noir et de brai a donné 195 cm<sup>3</sup> et un mélange de noir et d'aluminium, 102 grammes de CO.

Il est évident, d'après cela, que les cartouches d'oxygène liquide doivent être tirées quand elles contiennent encore un excès notable d'oxygène. Pour éviter la formation de CO, on ne doit pas dépasser la densité de 0,24 gramme de C par centimètre cube, ce qui correspond à 90 % de la puissance de la dynamite standard si l'on tire après 5 minutes, et à 80 % si l'on tire après 10 minutes.

Si l'on désire un effet utile plus grand, on peut employer la densité 0,30 (effet utile : 110 après 5 minutes, 88 après 10 minutes) à condition qu'une large ventilation dilue les gaz produits par l'explosion.

*Cerro de Pasco, Pérou.* — Dans le creusement du tunnel Clo-rinda, en tuff tendre, et par le même procédé de prise d'essai, on a obtenu des résultats analogues aux précédents. Notons deux observations spéciales :

a) la cartouche formée de carbène 70, liège 25, aluminium 5, au diamètre de 1 pouce 1/2 et de densité 0,29, tirée après 12 minutes, a produit 122 cm<sup>3</sup> de CO. Dans ces mêmes conditions, la cartouche au noir de fumée en produit 62 cm<sup>3</sup>, c'est-à-dire la moitié de la cartouche au carbène;

b) la quantité de CO est en fonction inverse du diamètre des cartouches.

A la mine Diamant, la roche est un calcaire altéré et facile à sauter. En travers-bancs, le déchaussement se fait par deux mines convergentes chargées de 3 cartouches; l'effet est satisfaisant et il n'y a presque pas de CO dans l'atmosphère. L'excavation formée à front est assez profonde pour qu'on puisse y faire une prise d'essai de gaz concentrés. Cet échantillon donne 24,96 % de CO<sup>2</sup> et 1,10 % de CO. Ce tir ne dure pas plus de 5 minutes.

Dans une voie en direction, dans une pyrite très dure, le minage à la dynamite exige 60 cartouches pour 14 mines. Il a été possible de faire le même avancement avec 42 cartouches de

1 pouce 7/16 d'E. O. L. de densité 0,27. Avec deux hommes pour charger, la volée peut être tirée 8 minutes après qu'on a retiré la première cartouche du récipient. La quantité de CO est faible (0,15 %), mais on a trouvé une forte proportion de SO<sup>2</sup> (0,15 à 0,94 %) provenant évidemment de la réaction de la pyrite sur l'oxygène des cartouches et un peu de H<sup>2</sup>S (0,025 %). La gélatine dynamite ne donne pas de SO<sup>2</sup>, mais elle donne plus de CO que les E. O. L.

La présence d'anhydride sulfureux est un inconvénient sérieux, mais ne semble pas devoir faire proscrire l'emploi de l'oxygène liquide, si l'on a soin de ventiler énergiquement et assez longtemps avant le retour des hommes au front de la galerie. On sait que ce gaz est très irritant à faible dose, de sorte que les hommes ne s'exposent guère à le respirer, mais une situation très critique serait celle d'ouvriers enfermés dans un espace restreint et incapables de gagner la voie d'entrée d'air.

Dans la galerie Excelsior, en schistes siliceux imprégnés de pyrite en faible proportion, le travail ordinaire exige 4 volées et 120 cartouches de dynamite (gélatine à 62 % de NG pour le déchaussement, 14 mines de déblai à la dynamite à 35 %). Avec les E. O. L., on a pu faire le tir en deux volées (4 mines nécessitant 5 1/2 minutes + 14 nécessitant 11 minutes).

Ici encore, il y avait assez d'anhydride sulfureux pour obliger les expérimentateurs à se munir de masques et de lunettes pour prendre des échantillons à front immédiatement après l'explosion (0,15 % de SO<sup>2</sup>). Après la prise d'essai, l'air a été soufflé à front pendant une demi-heure, temps nécessaire pour diluer les gaz jusqu'à la proportion inoffensive et pour permettre aux hommes de retourner au front.

*Pachuca, Mexique.* — Le procédé habituel de ventilation est d'ouvrir la canalisation d'air comprimé après avoir amorcé la dernière mine. On n'y a rien changé et on s'est contenté de prendre les échantillons de gaz dans les fumées à quelque distance au front.

Malgré la dilution, on a observé dans la plupart des échantillons une forte proportion de CO (rapport  $\frac{\text{CO}}{\text{CO} + \text{CO}^2}$  = 0,13 à 0,43) et dans la galerie, il y en avait 0,35 à 0,40 %, c'est-à-dire assez pour provoquer des maux de tête violents en un temps assez court.

Un fait intéressant, c'est la faible teneur en CO des mines non bourrées. Deux essais ont donné une proportion de 0,03 et 0,15 % dans l'air, ce qui correspond à un rapport  $\frac{\text{CO}}{\text{CO} + \text{CO}^2}$  = 0,04 et 0,25 respectivement. La combustion retardée de l'oxyde de carbone au contact de l'air extérieur est invoquée pour expliquer cette particularité des mines sans bourrage.

## VI. — DANGER DE L'EXPLOSIF

### A L'OXYGENE LIQUIDE DANS LES HOUILLERES.

Les auteurs rappellent un mémoire du *Safety in Mines Research Board* de la Grande-Bretagne, dont les conclusions s'appliquent aussi aux conditions des mines américaines.

L'oxygène liquide est incontestablement dangereux dans les mines de combustible et il est douteux que son emploi y procure un avantage économique. En voici les raisons :

« 1°) Sous le rapport de la sécurité :

» a) Les explosifs à l'oxygène liquide produisent une flamme très chaude et persistante, susceptible d'allumer un mélange explosif (fig. 13). L'addition de sels inertes rend l'explosif un peu moins dangereux, mais au prix d'une grande perte d'énergie;

» b) Pendant le transport et le trempage des cartouches, l'air s'enrichit en oxygène au front de taille et le danger d'explosion du grisou ou de la poussière de houille en est fortement accru;

» c) L'oxygène liquide répandu accidentellement sur le sol produit avec la poussière un mélange très inflammable;

» d) Les cartouches elles-mêmes sont très inflammables;

» e) L'oxyde de carbone existe en grande quantité dans les fumées si l'évaporation dure plus de 8 minutes;

» f) Si la mine est tirée avec quelque retard (20 à 30 minutes), la cartouche déflagre au lieu de détoner.

» 2°) L'efficacité dépendant du temps de l'évaporation sera excessivement variable et les manipulations de cet explosif exigent beaucoup d'attention et de minutie, ce qui complique le rôle du bote-feu.

» 3°) L'économie de l'oxygène liquide est certaine dans les opérations de tir de grande envergure, mais très douteuse dans le tir ordinaire par mines isolées. La dépense de premier établissement est considérable et le prix de revient dépend en grande partie du facteur d'utilisation. Une installation produisant moins de 25 litres à l'heure n'est pas avantageuse et cette capacité de 25 litres correspond à environ 500 kilogrammes d'explosifs antigrisouteux. La dépense journalière en frais de fabrication et amortissement est de 20 livres sterling ou 97 dollars. Pour soutenir la concurrence économiquement, l'installation d'O. L. devrait marcher 24 heures; si elle ne marche que 8 heures, tous les frais en sont notablement accrus. La consommation d'explosif étant en moyenne en Grande-Bretagne d'une livre par 9 tonnes de houille, il serait nécessaire qu'une fabrique d'oxygène liquide puisse alimenter une mine ou un groupe de mines produisant 9.000 tonnes par jour. »

Diverses tentatives ont été faites pour fabriquer des explosifs à l'oxygène liquide d'une sûreté équivalente à celle des explosifs autorisés dans les mines de houille. Howell, Paul et Sherrick ont proposé des absorbants contenant 55 à 80 % de carbonate sodique cristallisé ( $\text{N}^2\text{a CO}^3$ ,  $10 \text{ H}^2\text{O}$ ) qui ont subi l'essai n° 1 dans la galerie de Pittsburg (Bulletin n° 15 du Bureau of Mines, 1912).

Mathias a fait des essais pour déterminer la durée et la longueur des flammes de divers mélanges à base de bois, farine, craie, Kieselguhr et sels d'ammoniaque. Des charges de 120 grammes ont été tirées avec un bourrage de 200 grammes de poussières de houille et les flammes ont été photographiées sur des films fixes ou mobiles. Toutes les photographies montrent que les E. O. L. enflamment le nuage de poussières et donnent des flammes de plusieurs mètres de hauteur. Sans bourrage, ces explosifs donnent encore des flammes beaucoup plus longues et plus durables que celles des explosifs autorisés en Allemagne.

Bunge donne les formules de deux explosifs allemands dénommés : K. S. 7 (20,7 liège + 28,9 craie + 50,5 sulfate d'Am) et K. S. 0 (48,3 sciure de bois + 32,6 craie + 19,1 sulfate d'Am), et il exprime l'opinion que les initiales K. S. signifient « Keine Sicherheit ».

D'un autre côté, d'après Stebacher, on aurait consommé par mois 100.000 de ces cartouches K. S. à partir d'avril 1925 dans le charbonnage Hohenzollern, en Haute-Silésie, sans donner lieu à aucun accident.

Les auteurs concluent que si même on trouvait des E. O. L. satisfaisant aux épreuves obligatoires dans la galerie d'essai, leur emploi présente pratiquement de tels risques qu'on doit les interdire dans les mines grisouteuses et poussiéreuses.

#### VII. — CHAMP D'APPLICATION DES E. O. L.

Au début, ces explosifs ont été essayés en Amérique dans toutes les opérations d'abatage, tunnels, chantiers souterrains des mines métalliques, carrières, découvert des mines de houille ou autres. Dans ces derniers temps, l'emploi dans les travaux souterrains a cessé. Dans les Etats-Unis, on applique les E. O. L. au découvert des mines de houille; dans l'Amérique du Sud, aux exploitations à ciel ouvert. Dans la région des minettes, en Lorraine, l'emploi de ces explosifs s'est généralisé.

L'un des auteurs résumait ainsi la situation en 1926 :

« 1°) Il est probable que les E. O. L. trouveront une application dans les travaux souterrains : *a)* en roche tendre, où l'on peut employer des cartouches de puissance inférieure à celle de la dynamite à 40 %, ces cartouches d'E. O. L. donnant moins de CO que les plus fortes; *b)* dans les travaux parfaitement ventilés où le dégagement de CO n'a pas de conséquence; *c)* dans les opérations requérant des explosifs de forte puissance, mais où le travail est organisé de telle sorte qu'on ne tire que peu de mines à la fois et que le tir puisse s'effectuer en un temps de 6 minutes ou moins. Tel est par exemple le cas des mines de fer de Lorraine.

« 2°) Dans l'état actuel, il n'y a pas lieu de recommander les E. O. L. d'une façon générale pour l'abatage souterrain : *a)* les cartouches d'une puissance égale à celle de la dynamite produisent beaucoup plus de CO que la gélatine, à moins que le tir n'ait lieu en 6 ou 7 minutes, ce qui est difficilement réalisable dans le cas de grandes volées; *b)* dans les gîtes de sulfures, il y a production de SO<sup>2</sup>, gaz irritant, moins dangereux certes que le CO, mais donnant lieu quand même à cer-

» tains risques; *c)* les cartouches d'O. L. sont très inflammables et ne devraient pas être employées dans les mines où l'éclairage se fait par lampes à feu nu; *d)* il n'est pas pratique de les employer dans des endroits d'accès difficile ou dans les trous de mine humides; *e)* les E. O. L. ne peuvent pas remplacer les explosifs plus brisants que la dynamite à 40 %.

» 3°) Il est important qu'un exploitant voulant essayer les E. O. L. dans les travaux du fond se rende compte que leur emploi exige la connaissance des facteurs influençant les propriétés explosives et la production de CO, ensuite un apprentissage des ouvriers et un soin minutieux dans toutes les manipulations depuis la fabrication des cartouches jusqu'à la mise à feu.

» 4°) Le minage à ciel ouvert offre un champ très favorable aux E. O. L., pourvu que l'abatage soit assez intensif et assez régulier pour absorber la production de 24 heures de la fabrication que d'oxygène liquide. »

La situation n'a guère changé depuis 1926. C'est dans les travaux à ciel ouvert que des progrès ont été réalisés. L'introduction de réservoirs de grandes capacités (1.000 gallons) a rendu possible le tir en masse à intervalles plus espacés et a étendu le champ des applications. Les principaux avantages consistent dans le coût moins élevé de la tonne abattue et l'élimination du danger des ratés qui subsiste avec les dynamites. Les prix de revient, rapportés à une livre de dynamite remplacée par l'O. L., varient entre 4 et 9,5 cents.

Le rapport passe ensuite en revue un certain nombre d'exemples d'application et il entre dans les divers détails de la production et de l'emploi de l'oxygène liquide, des résultats et des prix de revient. Nous condensons ici les données relatives à quelques cas typiques :

*Mines de houille, Enos, Oakland City, Ind.* — La couche exploitée a 1<sup>m</sup>,50 d'épaisseur et produit 4.500 tonnes par jour. Le découvert varie entre 3 et 18 mètres; il comprend un petit toit de schiste, puis un calcaire de 1 à 4<sup>m</sup>,50 d'épaisseur, suivi de schiste, grès et argile.

Capacité de l'usine à O. L. : 4.000 kilogrammes par 24 heures.

Réservoir de 100 litres. Cartouches fabriquées dans un petit local attenant à l'usine. Encartouchage mécanique. Cartouches

au noir de fumée de  $4 \frac{1}{4} \times 19$  pouces. La partie supérieure n'est pas remplie en vue de faciliter les manipulations. Poids à sec : 3 livres  $\frac{1}{4}$ , trempées : 12 livres. Les cartouches sont placées jointives et debout dans des boîtes de trempage, qui sont de deux types, l'une de 44, l'autre de 66 cartouches. L'oxygène liquide est transvasé des grands réservoirs par l'action de l'air comprimé. Les boîtes chargées sont levées par une chaîne et un treuil, déposées dans un truc automobile, puis conduites au front d'abatage. En hiver, quand le sol est boueux, le transport se fait par rail.

Forage par perforatrices électriques à rodage, opérant par groupe de trois, se déplaçant parallèlement au front et creusant chacune une ligne de trous (diamètre, 6 pouces; distance en ligne,  $6^m,30$ ; d'une ligne à l'autre,  $5^m,70$ ). En règle générale, les déblais d'un tir sont laissés en place et servent de parapet pour amortir les projections du tir suivant.

L'équipe de minage comprend quatre hommes : le chef, deux aides et le conducteur du camion. Pour des tirs exceptionnels, l'équipe comprend 5 ou 6 hommes. Chaque trou est vérifié; on y descend un calibre cylindrique en bois un peu plus gros que les cartouches. Les trous voisins du dernier tir exigent souvent un curage qui se fait à la tarière. Chaque trou est d'abord chargé tout au fond d'une cartouche de dynamite de  $2 \times 8$  pouces qui expulse l'eau et la boue. Les cartouches d'oxygène liquide sont alors descendues directement dans les trous non endommagés; dans les autres, elles sont suspendues à un fil de cuivre ou à une sorte de harpon. Un léger bourrage est fait avec le limon extrait à la bêche au bord du trou. Les détonateurs (n° 6) sont connectés en série. Durée normale du chargement : 30 minutes; exceptionnellement 45 minutes.

Consommation : 6.863 cartouches par mois. Prix de la cartouche, 60 cents. Une cartouche remplace un baril de 25 livres de poudre noire à 7 cents ou 15 livres de dynamite à 40 % à 13,5 cents la livre. Oxygène liquide fabriqué : 102.827 livres à 1,68 cent la livre.

*Pyramid Coal Corporation, Ill.* — Découvert de 10 à 12 mètres d'épaisseur en schiste et calcaire. Les trous de mine ont 6 pouces de diamètre, sont espacés de 6 mètres et en quinconce d'une ligne à l'autre. Le tir par grandes salves a rencontré de grandes diffi-

cultés, parce que les trous de mine s'éboulent dans l'intervalle entre le poste de forage et le poste de minage. On a donc adopté le tir par mines isolées. Les perforatrices sont encore placées suivant des lignes parallèles au front, mais au lieu d'être contiguës, elles se suivent à 15 mètres de décalage d'une ligne à l'autre. Dès qu'un trou est fini, on recule la perforatrice, on charge et on tire.

Dépense équivalente à celle de la dynamite à 40 %, mais la fragmentation est meilleure et le chargement des pelles à vapeur plus facile.

*Mine de cuivre, Chuquicamata, Chili.* — La dureté très variable des roches a nécessité l'emploi de divers modes de minage. La partie supérieure (ou découvert) est tendre et s'abat à l'aide d'une poudre noire fabriquée sur place. Le gîte métallifère est beaucoup plus dur, exige un explosif très brisant et très puissant, en l'espèce une gélatine à l'ammoniaque à 65 % de N. G. On procède par tirs en grande masse : 250.000 tonnes à la poudre noire, 80.000 tonnes à la dynamite. Celle-ci étant particulièrement coûteuse, la Compagnie a décidé de la remplacer par l'oxygène liquide.

Capacité de l'usine : 75 l./heure; ordinairement 73,5 litres. Marche continue en 24 heures.

Réservoirs de 1.000 gallons mentionnés au début de la présente étude.

Cartouches : 65 % de charbon de bois grené et 35 de noir de fumée. Enveloppe en tissu de coton. Dimensions :  $7 \times 20$  pouces, poids : 8 livres, ou  $5 \frac{1}{4} \times 12$  pouces, poids : 3,5 livres. Les absorbants sont mélangés dans un malaxeur mécanique, puis transportés par chaîne à godets à la trémie de la machine à cartouches. Trois Chiliens peuvent fabriquer 1.000 cartouches en 8 heures.

Les boîtes de trempage contiennent 50 grosses cartouches ou 125 petites. Le chargement de 12 boîtes absorbe 10.000 litres d'air du réservoir.

Le piquetage des trous de mine est fait par les ingénieurs qui relèvent par après leur position exacte et la ligne du front, calculent le cube à abattre et les charges à employer. Comme on connaît aussi approximativement le temps nécessaire pour un tir et les diagrammes de la vitesse d'évaporation des cartouches, on

détermine le poids d'oxygène liquide nécessaire pour une opération. On continue à employer la dynamite pour les pétards, parce que, vu la petite quantité et l'irrégularité de cette consommation, le transport et l'emmagasinage de l'oxygène liquide reviendraient trop cher. Les trous sont vérifiés, ceux qui sont déviés ou rétrécis sont repérés et chargés à l'avance de dynamite. Les cordeaux sont déroulés et placés avant l'arrivée du train des explosifs. Le bourrage et les connections des cordeaux se font à quelque distance derrière le chargement. En moyenne, la longueur du front est 120 mètres, le nombre de mines 100 et le déblai de chaque mine 55 tonnes (en plan  $3^m,60 \times 3^m,60$ ). Cartouches de 7 pouces.

Dans le tir en charge concentrée, la longueur du front est de 105 mètres, le nombre de trous 35 et le déblai par mine 1.450 tonnes (en plan  $5^m,10 \times 6$  m.). Cartouches de 5 pouces.

Les prix de revient sont de 15,6 cents par livre de cartouche sèche, 7,16 cents par litre de liquide, 8,5 cents par livre de dynamite capable du même travail. Des tableaux détaillés donnent la décomposition de ces prix de revient.

*Real del Monte, Pachuca (Mexique).* — Capacité de l'usine : 25 l./heure. Marche continue (24 h.), 6 jours par semaine. Prix de revient sans amortissements : 6,16 cents par litre. Noir de fumée provenant du pétrole mexicain. Cartouches de  $37 \times 300$  millimètres dans les galeries et de  $30 \times 300$  millimètres dans les chantiers. Des essais comparatifs ont été faits dans une galerie de  $2^m,50 \times 2^m,50$  et dans les tailles à gradins. L'effet des explosifs O. L. en cube de roche par longueur forée ou par cartouche est moindre que celui de la dynamite (50 à 60 %). Des graphiques relatifs à une série de travaux à divers niveaux permettent de comparer la proportion de culots de mines (3 % à la dynamite et 10 % à l'O. L.), le cube abattu par pouce foré (0,08 à 0,18 pied cube) ou par cartouche (0,11 à 0,31), etc.

La statistique d'un mois renseigne une production de 8.400 tonnes à une mine, 9.790 tonnes à l'autre; des dépenses d'oxygène respectivement de 5.600 et 11.000 litres; le nombre de cartouches (7.328 et 20.725) correspondant à 2,6 et 2,9 par trou de mine et à 1,238 et 1,981 kilogramme de dynamite.

*Mines de fer de Lorraine.* — La Revue de l'Industrie Minière a publié en décembre 1927 un mémoire très détaillé du

Comité Technique des Minières d'Alsace-Lorraine, dont il est donné des extraits.

Il suffira d'en rappeler ici quelques données à rapprocher des autres exemples cités :

Vingt-sept fabriques d'O. L. produisent 1.005 litres d'O par heure. Capacité individuelle : 20 à 145 litres.

On n'emploie que les récipients à double paroi et vide. Perte horaire au laboratoire : 0,5 % pour les petits réservoirs; 0,1 à 0,2 % pour les grands. En pratique, le transport et les manipulations brutales occasionnent des pertes plus sensibles. Perte par évaporation pendant le transport de l'usine souterraine au point de distribution : 23 %.

Consommation d'énergie par litre d'oxygène mesuré à la machine frigorifique : 2,3 à 3,5 kilowattheures.

Dépenses de salaires et d'entretien : 0 fr. 20 à 0 fr. 35.

Prix de revient direct par litre : 1 fr. 10 à 1 fr. 60; moyen : 1 fr. 45.

Premier établissement pour une mine moyenne à 1.000 tonnes par jour : 230.000 francs.

Amortissement (3 ans pour les réservoirs, 10 ans pour le reste) : 0 fr. 48 par litre.

Prix de revient total : 1 fr. 93 à l'usine et 2 fr. 50 au chantier.

Cartouches : 125 grammes d'absorbant valant 0 fr. 20 + 0,43 litre d'O. L. valant 1 fr. 07 (sans la taxe).

Les E. O. L. sont employés dans les minettes en concurrence avec les poudres, principalement la poudre brune (75 % de nitrate de sodium, 10 de soufre, 15 de lignite) dont le prix de revient est de 4 fr. 50 le kilogramme, inclus 0 fr. 60 de taxe. Il faut y ajouter 0 fr. 15 pour frais de magasin, surveillance, etc. Le prix de l'E. O. L. équivalent en travail serait de 3 fr. 56 sans la taxe. Il y aurait donc une économie de 0 fr. 50 par kilogramme de poudre brune remplacé.

D'après un article de Stettbacher (1929, Zeits. für Sprengstofftechnik), la consommation de cartouches Weber en France a monté progressivement jusqu'à 8.041.231 en 1927 et le tonnage abattu atteint 15 millions de tonnes de minette. Dans les

mines de potasse, 30 % de la production sont abattus à l'oxygène liquide (1).

### VIII. — ACCIDENTS.

Les avantages des E. O. L., quant à la sécurité, sont : 1° suppression des risques inhérents aux dépôts d'explosifs; 2° sécurité pendant le transport des deux constituants séparés; 3° diminution du risque résultant de ce que la durée de la cartouche est très limitée, tandis que le risque est permanent dans le cas des explosifs solides; 4° possibilité de débourrer ou de reforer les ratés après que l'oxygène est complètement évaporé (le temps requis peut aller de 30 minutes à plusieurs heures); 5° risque à peu près

(1) A ces sources citées par le Bulletin du Bureau of Mines, nous croyons intéressant d'ajouter un mémoire de M. C. Benoist dans la Revue de l'Industrie Minière, n° 63. Il donne une description détaillée du mode d'emploi des cartouches Weber et en fait ressortir les avantages et notamment l'accroissement de sécurité. Il discute ensuite les conclusions du rapport de l'Association Minière d'Alsace-Lorraine et montre par l'étude de deux cas concrets que l'on peut arriver à des résultats plus avantageux.

Voici quelques données que nous extrayons de ce mémoire en les mettant dans l'ordre adopté par les auteurs américains :

Utilisation de l'air liquide : par mètre de cartouche, on fabrique 1 l. 89 d'O. L.

Perte pendant la conservation (12 heures) :	7 %
» pendant le transport :	21 »
» pendant le trempage :	35,3 »
» dans le trou de mine :	13,1 »
O utilisé pour la combustion complète :	23,6 »

100 %

Un mètre de cartouche emporte 0 l. 70 d'O. L. dont 0 l. 25 en excès représentant l'évaporation pendant les manipulations.

Evaporation horaire dans les bidons de 5, 10 ou 25 litres sensiblement la même (0,8 à 0,9 l.) d'où avantage considérable des gros bidons pour le transport. En outre, les gros coûtent moins et l'entretien est le même.

Perte dans les bidons de trempage : 10 % à l'heure.

Cartouches de 37 millimètres; 10 degrés de brisance (7 explosifs déflagrants et 3 détonants) obtenus en changeant l'absorbant; l'échelle d'équivalence va de 400 grammes de poudre brune à 500 grammes de dynamite. Amorçage à la mèche. Tir par volée de trois mines et exceptionnellement six. Durée des cartouches : 20 minutes.

Prix de revient du litre : 1 fr. 45 (production : 7.000 l. par mois) et 1 fr. 12 (production : 20.000 l. par mois) se décomposant comme suit : force motrice et produits chimiques : 62 et 70 %; main-d'œuvre et entretien : 17,2 et 20,5 %; amortissement : 10,5 et 7 %.

Proportion de l'explosif dans les frais d'abatage à la tonne : 49 et 52 %.

Le prix du kilowatt relativement élevé et l'impôt qui triple le prix de la cartouche sèche sont des éléments qui relèvent ce prix de revient. Néanmoins, l'économie sur le prix de la tonne de minerai, comparative-ment aux explosifs solides, est suivant les conditions locales de 17 à 30 %.

L. D.

nul d'explosion des cartouches projetées avec les déblais; 6° dans les climats rigoureux, la gelée n'a aucune influence sur les E. O. L. (1).

Par contre, les E. O. L. ont aussi certains inconvénients : 1° ils sont sensibles au choc et à la friction, mais pas plus que certaines qualités de dynamite; 2° ils sont inflammables et ce risque est particulier; il tient à la rapidité de la combustion dans une atmosphère riche en oxygène; 3° la rapidité de l'évaporation provoque une hâte exagérée dans les manipulations, ce qui est une cause d'accidents; 4° production de CO et SO<sup>2</sup> dangereux dans les endroits faiblement ventilés; 5° dans les mines grisouteuses ou poussiéreuses, danger d'inflammation lors de l'emploi ou d'épanchement accidentel sur la poussière de houille.

La statistique des accidents ne fait ressortir ni supériorité, ni infériorité des E. O. L. sur les autres explosifs, mais il importe de remarquer que les observations ne sont pas en très grand nombre.

Les auteurs relèvent dans les mines américaines 7 cas d'explosions intempestives, dont 5 attribuées à des chocs de bourroirs sur les cartouches calées dans le trou de mine, une autre à un incendie couvant dans le découvert d'une mine de houille, une dernière à cause inconnue. Celle-ci a tué 9 hommes, les six autres ont fait 13 victimes, 7 tués et 6 blessés.

En Prusse, la statistique des accidents dus aux explosifs de 1921 à 1928 indique que la consommation annuelle d'explosifs solides a été de 17.197 à 25.994 tonnes et celle d'oxygène liquide fabriqué a été de 1.141 à 1.703 tonnes. Le nombre d'accidents par an est de 13,3 à 17,50 par 1.000 tonnes d'explosif solide et de 7,4 à 25,6 par tonne d'O. L. La moyenne de la période est la même : 14,8 pour chaque catégorie. Ce procédé de comparaison est à l'avantage des E. O. L. parce qu'il faut beaucoup plus d'une tonne d'O. L. mesuré à l'usine pour remplacer une tonne d'explosif usuel. Dans diverses applications, le rapport est compris entre 1,6 et 2,1 kilogrammes d'oxygène par kilogramme d'explosif ancien.

(1) On peut ajouter : 7° possibilité d'emporter au chantier des cartouches sèches de brisance très différente, à adapter aux conditions momentanées du front, ce qui n'est pas possible sans complications et formalités réglementaires quand on emploie les explosifs solides.

L. D.

De 1925 à 1928 inclus, il n'y a eu que 6 accidents graves dus à l'oxygène liquide sur un total de 84 cas relevés et de 171 blessures. Les causes principales sont les explosions intempestives de mines chargées (41 %), les longs feux (26 %), le trempage des cartouches (11 %) et la préparation des charges (6 %). Il n'y a pas eu d'accident résultant du débouillage des E. O. L. après raté, tandis que cette pratique occasionne 11 % des accidents dus aux autres explosifs.

Dans les minières de Lorraine, on a relevé de 1919 à 1921 les accidents suivants :

	Avec l'O.L.	Avec la poudre.
Brûlures par l'oxygène liquide pendant le transport . . . . .	10	—
Inflammations par contact d'une flamme	2	34
Explosions retardées ou retours hâtifs au front . . . . .	3	14
Explosions prématurées des mines . .	11	7
Divers . . . . .	0	8
<b>Total . . . . .</b>	<b>26</b>	<b>63</b>

Ce tableau donne le nombre de victimes, pas celui des accidents.

Par mètre cube d'oxygène liquide, la moyenne annuelle est de 0,018 et par tonne de poudre noire, elle est de 0,029; mais il faut 1 l. 56 d'O. L. pour valoir un kilogramme de poudre (Sprengsalpeter). On voit donc que rapporté au tonnage abattu, le risque d'accident est sensiblement le même pour les deux sortes d'explosifs.

#### Précautions à prendre dans l'emploi des explosifs à l'oxygène liquide.

En conclusion des essais de laboratoire et de la pratique du minage, spécialement dans les travaux à ciel ouvert, les recommandations suivantes s'imposent :

- 1°) Dans la fabrication, le transport ou l'emmagasinement des absorbants et des cartouches, éviter toute contamination par la rouille, morceaux de métal, huile et substances rugueuses;
- 2°) L'enveloppe de la cartouche doit être assez solide pour empêcher toute rupture quand on laisse tomber les cartouches

dans le trou de mine. Le tissu doit être assez serré pour que le combustible ne filtre pas lors des manipulations. Le bout de la cartouche doit être fermé efficacement pour empêcher l'épandage du contenu;

3°) L'usage de substances oléagineuses, de ferrosilicium, fer, sable, sels cristallins et autres matériaux rugueux comme constituants des cartouches n'est pas sûr en pratique;

4°) Le diamètre de la cartouche doit être vérifié pour écarter les cartouches renflées qui pourraient se caler dans le trou de mine. La vérification peut se faire en passant la cartouche dans un calibre d'un diamètre légèrement moindre que celui du trou de mine;

5°) Etant donné la nature inflammable de l'E. O. L., il doit être protégé en tout temps contre les flammes découvertes, les étincelles électriques, les particules en ignition ou en incandescence qui pourraient lancer des flammes dans une atmosphère enrichie en oxygène.

Sous ce rapport, il y a lieu d'interdire de fumer dans la zone du tir, au moins pendant un certain temps avant le tir, et de préférence toujours. Les récipients et boîtes chargés de cartouches doivent être protégés par une couverture. Le moteur du camion de transport sera arrêté quand on ouvre les boîtes. Sur les voies publiques, le véhicule sera muni d'une pancarte avec la mention « Explosif ».

Toute machine alimentée au charbon (locomotive, pelle à vapeur) sera écartée d'une distance suffisante pour empêcher les charbons incandescents et les étincelles d'atteindre la zone de tir. Tout foyer sera éteint et humecté convenablement.

Le trempage des cartouches doit se faire de préférence dans un local fermé;

6°) Il est recommandé de tirer les E. O. L. au cordeau détonant, à cause de sa sécurité et de son efficacité aux basses températures. L'usage simultané du cordeau et de détonateurs électriques est une pratique mauvaise.

Les cordeaux en dérivation ne doivent être connectés au maître-cordeau qu'après que toutes les mines ont été chargées et bourrées;

7°) Si l'on fait usage de détonateurs électriques, le détonateur ne doit être inséré dans la cartouche-amorce qu'au moment même

de charger la mine. La cartouche-amorce doit être chargée la dernière et descendue avec précaution. Les fils du détonateur seront d'abord reliés en court-circuit et les connexions ne seront établies qu'après chargement et bourrage de toutes les mines et quand tout est prêt pour le tir;

8°) Il n'est pas permis de laisser des détonateurs à découvert dans la zone de tir, particulièrement au voisinage de la gueule des fourneaux;

9°) Le câble électrique de tir ne peut passer au-dessus ni venir au contact de lignes d'éclairage ou de force motrice, non plus que de tuyauteries. Les extrémités de la ligne de tir seront mises en court-circuit jusqu'au moment de les raccorder à l'exploseur ou à la prise de courant;

10°) Les outils nécessaires au chargement des E. O. L. seront en bois de préférence, ou en cuivre, laiton ou autre matière ne donnant pas d'étincelles;

11°) Avant de charger, on inspectera tous les trous de mine et on y descendra un calibre en bois légèrement plus gros que la cartouche pour être sûr que celle-ci pourra passer librement;

12°) Si le surveillant a des doutes, il descendra la cartouche à la main au moyen d'un crochet en cuivre attaché à une ficelle ou au moyen de fil de cuivre souple;

13°) La première cartouche de toute mine devrait être introduite à la main et non en la laissant tomber; il est plus sûr d'engager toutes les cartouches à la main;

14°) En aucun cas, une cartouche calée ou restant suspendue ne doit être forcée, damée ou piquée avec effort pour dégager le trou de mine. Une cartouche ancrée sera abandonnée jusqu'à évaporation complète de l'oxygène.

Un bourrage trop énergique de la charge est à éviter dans tous les cas;

15°) En cas de raté, on attendra sans intervenir jusqu'à ce que l'oxygène soit évaporé. Le temps minimum requis varie de 5 à 48 heures; il dépendra de la profondeur et des caractéristiques de la charge (diamètre et longueur) (1);

(1) Dans les minières de Lorraine, on autorise la rentrée au chantier après une demi-heure d'attente.

Le tir à la mèche a fait l'objet d'une étude par une Commission spéciale dont le rapport a paru en 1934. Un extrait de ce travail fait suite à la présente note.

L. D.

16°) Les tas de cartouches à l'orifice du fourneau sont une pratique mauvaise. L'équipe de transport doit apporter les cartouches au fur et à mesure que le chargement avance;

17°) Les hommes nécessaires au chargement seront seuls au front de tir. Les autres s'écarteront comme s'il s'agissait du tir. Les hommes de l'équipe de tir éviteront de se grouper tout près d'un trou de mine;

18°) L'équipe du tir sera instruite des propriétés et des caractéristiques des E. O. L. de manière à bien se rendre compte de la signification des mesures de sûreté imposées;

19°) Le travail de chargement des mines sera conduit systématiquement d'après un plan imposé. Même avec les E. O. L., toute hâte exagérée doit être évitée.

#### Bibliographie.

Le mémoire se termine par une liste de 43 publications, presque toutes en anglais et en allemand, et un index analytique de 4 pages qui facilitera les recherches.