

Annales des Mines de Belgique

COMITE DIRECTEUR

- MM. J. LEBACQZ, Directeur général des Mines, à Bruxelles, *Président*.
G. RAVEN, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, à Bruxelles, *Secrétaire*.
J. SWOLFS, s/Directeur à l'Administration centrale des Mines, *Secrétaire adjoint*.
M. DELBROUCK, Inspecteur général des Mines, à Liège.
Ed. LIBOTTE, Inspecteur général des Mines, à Mons.
L. LEGRAND, Inspecteur général des Mines, Professeur à l'Université de Liège.
A. HALEUX, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, Professeur à l'Ecole des Mines et de Métallurgie (Faculté technique du Hainaut) et à l'Université de Bruxelles.
V. FIRKET, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, à Liège.
L. DENOËL, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, Professeur d'exploitation des Mines à l'Université de Liège.
EM. LEMAIRE, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, Directeur de l'Institut National des Mines, à Frameries, Professeur à l'Université de Louvain.
L. LEBENS, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, à Namur.
P. FOURMARIER, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, Professeur à l'Université de Liège, Membre correspondant de l'Académie royale des Sciences et Lettres de Belgique, Membre du Conseil géologique de Belgique.
A. RENIER, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, Chef du service géologique de Belgique, Chargé de cours à l'Université de Liège.
Ad. BREYRE, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, Chargé de cours à l'Université de Liège.
A. DELMER, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, Professeur à l'Université de Liège.

La collaboration aux *Annales des Mines de Belgique* est accessible à toutes personnes compétentes.

Les mémoires ne peuvent être insérés qu'après approbation du Comité Directeur. En décidant l'insertion d'un mémoire, le Comité n'assume aucune responsabilité sur les opinions ou des appréciations émises par l'auteur.
Les mémoires doivent être inédits.

Les *Annales* paraissent en 4 livraisons respectivement dans le courant des premiers, deuxième, troisième et quatrième trimestres de chaque année.

Abonnement pour 1926 } pour la Belgique : 50 fr. par an.
pour l'Étranger : 60 fr. par an.

Pour tout ce qui regarde les abonnements, les annonces et l'administration générale, s'adresser à l'Éditeur, IMPRIMERIE ROBERT LOUIS, chaussée d'Ixelles, 34 à Ixelles-Bruxelles.

Pour tout ce qui concerne la rédaction, s'adresser au Secrétaire du Comité Directeur, rue Guimard, 16, à Bruxelles.

INSTITUT NATIONAL DES MINES
A FRAMERIES

ÉTUDE

SUR LE

Problème de l'explosif de sûreté

PAR

EMMANUEL LEMAIRE,

Ingénieur en Chef au Corps des Mines,
Directeur de l'Institut National des Mines,
Professeur à l'Université de Louvain.



Les explosifs de sûreté ont donné lieu à des mécomptes et d'aucuns, se basant soit sur ces mécomptes, soit sur le fait que la réaction explosive n'est pas complète au passage de l'onde explosive et qu'une partie des réactions se fait en arrière du front de l'onde, déclarent qu'il n'existe pas d'explosifs de sûreté.

Les Stations d'essais n'ont jamais prétendu qu'il existait à ce jour, des explosifs spécifiquement inaptes à allumer le grisou ou les poussières de charbon, et la Station de Frameries, notamment, déclare depuis longtemps que les explosifs de sûreté actuels doivent simplement être considérés comme des explosifs moins dangereux que d'autres. La réglementation sur l'emploi des explosifs dans les mines en fait foi, ainsi que les recherches faites sur les moyens d'améliorer la sécurité du tir, tels que le bourrage extérieur ou les gaines de sûreté.

La Station de Frameries insiste depuis longtemps sur l'existence de réactions en arrière du front de l'onde explosive et elle a déjà énoncé ce fait dans une publica-

tion de 1914 (1), en basant son opinion sur l'examen de nombreuses photographies de flammes d'explosifs, obtenues en plaçant un appareil photographique face au canon dans la galerie d'essais. L'interprétation de ces photographies est impossible dans l'hypothèse de réactions terminées à l'instant même du passage de l'onde explosive.

Il est établi également depuis longtemps que la durée de la réaction explosive dépasse la durée du retard à l'inflammation du grisou, et que, malgré la durée de la flamme, certains explosifs n'allument ni le grisou ni les poussières de charbon.

Il semble donc que la sécurité du tir ne dépende pas du rapport entre la durée du retard à l'inflammation du grisou et la durée de la flamme de l'explosif.

Dès lors, la question de savoir s'il existe des explosifs de sûreté reste entière et nous manquons d'éléments pour lui donner une réponse négative. Par contre, les essais des Stations d'Expériences démontrent à l'évidence qu'il existe des circonstances de tir dans lesquelles l'inflammation du grisou ou des poussières de charbon ne se produit pas. On ne peut pas affirmer que l'étude de ces circonstances ne conduira pas un jour à l'explosif de sûreté.

Dans l'état actuel de nos connaissances, il semble que ce soit compliquer le problème que d'exiger d'un explosif de sûreté qu'il soit spécifiquement inapte à allumer le grisou ou les poussières de charbon. Il existe des lampes de sûreté et cependant aucune d'elles n'est spécifiquement inapte à allumer le grisou. Les lampes peuvent être considérées comme sûres quand les circonstances qui les mettent en défaut ne se rencontrent pas dans la pratique des mines ou quand, moyennant certaines précautions élé-

(1) E. LEMAIRE. — Aspect des flammes au tir au mortier. *Annales des Mines de Belgique*, tome XIX (année 1914), 1^{re} livraison.

mentaires et faciles à prendre, elles ne risquent pas de laisser passer la flamme à l'extérieur.

Il n'y a aucune raison d'être plus sévère pour l'explosif de sûreté.

Malheureusement, nous connaissons beaucoup mieux les circonstances qui mettent les lampes en défaut que les circonstances qui rendent l'explosif dangereux. Il ne reste rien ou guère de la théorie de l'explosif de sûreté et il faut chercher des voies nouvelles pour sortir de l'empirisme dans lequel l'écroulement des théories a replongé la question.

Un fait domine le débat, c'est que les Stations d'essais ont tiré et tirent encore tous les jours des charges d'explosifs sans allumer ni le grisou ni les poussières de charbon, et cela bien que les flammes qui s'échappent du mortier, aient une durée supérieure à celle du retard à l'inflammation du grisou, qui est inappréciable à la température de ces flammes.

Il est à désirer que des explications de ce phénomène soient formulées. Qu'il me soit permis d'en exposer une.

La Station de Frameries a tout spécialement attiré l'attention sur un fait qui paraît fondamental, à savoir que le même mélange grisouteux peut donner lieu, suivant les circonstances du tir et l'explosif employé, à des explosions que l'on peut classer en très fortes, fortes, moyennes, faibles ou très faibles. Les inflammations très faibles ou faibles ne se propagent pas ou guère (2).

Les choses se passent donc comme si, au moment du tir, on ajoutait à l'air grisouteux des gaz qui en modifient les propriétés.

Il semble que le milieu grisouteux ne reste pas homogène au moment du tir, mais qu'il soit pénétré de toutes

(2) E. LEMAIRE. — Inflammation du grisou par les lampes et les explosifs. *Annales des Mines de Belgique*, tome XXV (année 1924), 1^{re} livraison.

parts et avec violence par les gaz d'explosifs, qui s'y mêlent presque instantanément en formant avec lui des mélanges plus ou moins inflammables.

Il semble donc que dès le début de l'échappement des gaz d'explosifs, le milieu grisouteux et les gaz enflammés qui s'échappent du mortier, soient séparés par une zone de mélange, qui s'étend rapidement en isolant de plus en plus les gaz enflammés. Il en résulte qu'une flamme d'explosif d'assez longue durée ne doit pas allumer nécessairement le grisou. Si le barrage gazeux qui tend à s'établir est ininflammable, la flamme de l'explosif est incapable d'allumer le grisou, quelle que soit sa durée. La possibilité d'inflammation dépend de l'aptitude à la combustion du mélange réalisé par les gaz d'explosifs avec l'air grisouteux dans le voisinage du fourneau, c'est-à-dire de la composition de ce mélange, de sa température et de sa pression.

Il est un autre fait qui tend à confirmer ce qui vient d'être dit. Il est d'observation courante que dans des conditions de tir identiques, certains explosifs allument plus facilement les poussières de charbon que le grisou et réciproquement. Il est d'observation courante, notamment, que les explosifs qui donnent de fortes lueurs, donc de grandes flammes, allument facilement les poussières, alors qu'ils n'allument pas nécessairement le grisou.

Pour l'inflammation des poussières, il faut que l'atmosphère qui entoure les poussières et qui se charge de gaz combustibles par la distillation de celles-ci, devienne inflammable dans les conditions de l'expérience. Il faut donc admettre qu'en faisant distiller les poussières, les gaz de certains explosifs réalisent un mélange inflammable en s'ajoutant à l'air et aux produits de la distillation, alors qu'un tel mélange inflammable n'est pas réalisé par les mêmes gaz d'explosifs additionnés d'air grisouteux.

Dans l'étude de l'explosif de sûreté, il faut donc tenir compte de l'afflux de gaz d'explosifs qui se mêlent au milieu ambiant dans le voisinage du fourneau en agissant sur ses propriétés.

De là à conclure que l'explosif est de sûreté quand ses gaz forment avec le milieu ambiant un mélange ininflammable, il n'y a qu'un pas.

Si on admet, comme il vient d'être dit, que le danger d'inflammation dépend de la composition, de la température et de la pression du mélange réalisé par les gaz d'explosifs avec le milieu ambiant, toutes les observations faites en galerie d'essais s'expliquent facilement. La composition, la température et la pression de ces mélanges dépendent évidemment de la nature des explosifs, de la charge, de la disposition de la charge dans le mortier, de la densité de chargement, de la section des galeries, de la composition du milieu ambiant, qui sont les circonstances qui font varier les charges-limites.

L'explosif n'allume pas le grisou quand le mélange formé par ses gaz avec le milieu ambiant est ininflammable dans les conditions de l'expérience. Le retard à l'inflammation du grisou ne semble jouer aucun rôle dans l'inflammabilité d'un tel mélange. Ce n'est pas simplement le contact plus ou moins prolongé d'une flamme ou de gaz chauds avec le milieu grisouteux qu'il faut considérer. Ce qui importe au point de vue de la sécurité du tir, c'est la composition, la température et la pression du mélange réalisé par les gaz d'explosifs avec l'air grisouteux. Un mélange peut être ininflammable à une température et à une pression donnée, et devenir inflammable dans d'autres conditions de température et de pression. Les limites d'inflammabilité de tels mélanges sont vraisemblablement aussi sous la dépendance des mêmes facteurs: pression et température.

Le problème de l'explosif de sûreté reviendrait donc à trouver des explosifs dont les gaz formeraient toujours des mélanges ininflammables avec le milieu ambiant, dans les conditions où on les emploie dans les mines.

On peut d'abord les aider à former ces mélanges ininflammables en y incorporant des chlorures alcalins, en les plaçant dans des gaines de sûreté contenant les mêmes chlorures ou des fluorures alcalins, ou en employant le bourrage extérieur, ou encore en schistifiant abondamment les environs du fourneau de mine et la roche elle-même.

On peut également agir sur la composition des explosifs en vue d'obtenir rapidement une forte proportion de gaz aptes à former des mélanges ininflammables avec le milieu ambiant.

On peut aussi agir sur les conditions d'emploi des explosifs en retardant le moment où les gaz se répandent dans le milieu ambiant, de manière à donner à l'acide carbonique, à l'azote moléculaires et à la vapeur d'eau le temps de se former. La Station de Frameries a déjà insisté sur l'importance de ce retard (3).

Un moyen simple de retarder le moment où les gaz se répandent dans le milieu ambiant, est le bourrage ordinaire. On sait que le bourrage ordinaire relève les charges limites dans les tirs au mortier, ce qui peut être attribué à ce retard. Toutefois, les mécomptes auxquels les explosifs de sûreté ont donné lieu dans la pratique des mines, montrent que ce moyen n'est pas toujours suffisant. Il résulte, d'autre part, d'observations faites, que les mines bourrées donnent encore des flammes. Il semble donc que les réactions ne soient pas encore terminées au moment de la sortie des gaz.

(3) E. LEMAIRE. — Considérations sur les explosifs de sûreté et sur leurs essais en galerie. *Annales des Mines de Belgique*, tome XXIII (année 1922), 3^e livraison.

Un autre moyen de retarder la sortie des gaz serait de placer les explosifs dans des fourneaux de mine d'un diamètre supérieur à celui des cartouches ou, en d'autres termes, de diminuer la densité de chargement. La pression nécessaire pour faire céder la roche ne serait réalisée qu'après un temps réglable à volonté et qui serait éminemment favorable à l'achèvement de la réaction explosive, et à la formation des gaz vers lesquels tend cette réaction et qui sont l'acide carbonique, la vapeur d'eau et l'azote moléculaire.

On sait que dans les tirs au mortier, il suffit déjà de diminuer la densité de chargement pour relever les charges-limites de beaucoup d'explosifs, ce qui confirme l'utilité de laisser un vide dans les fourneaux de mine pour permettre aux réactions d'être plus avancées au moment de la sortie des gaz.

On sait également que pour chaque explosif, il existe une densité optima qui donne la plus grande vitesse de détonation et que l'effet utile obtenu est maximum dans les conditions qui donnent la vitesse de détonation maxima. Il n'en résulte pas nécessairement que la densité optima de l'explosif doive être obtenue en comprimant les cartouches au degré voulu dans le fourneau de mine, de manière à leur faire occuper toute la section de celui-ci. On peut obtenir la densité optima de l'explosif dans l'enveloppe même des cartouches et placer les explosifs ainsi comprimés dans des fourneaux d'un diamètre supérieur à celui des cartouches. En d'autres termes, la densité de chargement, qui est le rapport entre le poids de l'explosif et le volume de la chambre dans lequel il explose, ne doit pas nécessairement avoir la même valeur que la densité optima de l'explosif pour obtenir un bon effet utile.

Pour certains explosifs, le rendement au bloc de plomb augmente quand, avec ces explosifs comprimés à la den-

sité 1, on passe de la densité de chargement 1 à la densité 0,75 par exemple, c'est-à-dire quand on laisse un certain vide entre la charge et la paroi du fourneau. Le rendement diminue par contre avec d'autres explosifs et il diminue avec tous les explosifs quand on exagère le vide. Il est bien entendu qu'il faut se montrer très réservé au sujet de conclusions tirées d'essais au bloc de plomb, c'est-à-dire d'essais effectués sur des charges d'explosifs de poids minimales, comparables au poids du détonateur employé pour les faire sauter. Les dislocations moléculaires produites à l'endroit du détonateur ne sont pas nécessairement les mêmes que celles qui se produisent plus loin dans la file de cartouches. D'autre part, la proportion élevée de corps étrangers divers apportés par le détonateur et par son inflammateur, l'influence physique et chimique de la paroi de plomb peuvent fausser les résultats. Les photographies de flammes d'explosifs publiées par Frameries (2), montrent nettement que la cartouche amorcée détone toujours autrement que les autres cartouches de la file et que la différence est surtout marquée pour la partie de la cartouche qui renferme le détonateur.

Enfin, le bourrage du bloc de plomb n'a pas toujours la résistance voulue pour permettre un achèvement convenable des réactions.

Néanmoins, si on admet que des réactions se font en arrière du front de l'onde explosive, on peut concevoir que pour tous les explosifs, il existe à la fois une densité optima de l'explosif et une densité de chargement optima, qui n'ont pas nécessairement la même valeur. Il semble que pour obtenir un bon rendement, il faut réaliser à la fois la densité de l'explosif qui donne aux réactions leur maximum de vitesse et une densité de chargement qui donne à ces réactions le temps de s'achever à suffisance avant que la roche ou le bourrage ne cède.

Si on admet, d'autre part, que la sécurité du tir dépend en partie du degré d'achèvement des réactions au moment de la sortie des gaz, l'étude de la densité de chargement optima s'impose également au point de vue de la sécurité.

Sous les fortes densités de chargement, le covolume des gaz intervient pour donner des pressions extrêmement élevées et très brutales qui tendent à disloquer la roche avant l'achèvement des réactions, et cet effet est d'autant plus à craindre qu'en général toutes les mines sont surchargées. De ce chef également, une certaine diminution de la densité de chargement présente de l'intérêt au point de vue de la sécurité.

La recherche de la densité de chargement optima, tant au point de vue du rendement que de la sécurité du tir, doit se faire à plus grande échelle qu'au bloc de plomb. La Station de Frameries termine en ce moment l'équipement d'une de ses galeries au rocher pour l'étude de cette question. Les résultats obtenus seront publiés ultérieurement.

La question d'agir sur la composition des explosifs en vue d'obtenir dans les gaz une forte proportion de corps aptes à la formation de mélanges ininflammables avec le milieu ambiant est fort peu avancée, mais poser le problème est déjà faire un pas vers sa solution.

Jusqu'à présent, on ne s'est guère préoccupé de la nature des gaz d'explosifs. On a simplement donné, comme indication générale, qu'il fallait éviter la présence de gaz combustibles, mais ces gaz se produisent même avec les explosifs suroxydés. On s'en est remis surtout à des additions de chlorure de sodium pour assurer la sécurité du tir. Il faudrait se préoccuper davantage de la formation rapide d'acide carbonique, d'azote moléculaire et de vapeur d'eau.

On a déjà cherché à obtenir une forte proportion d'azote dans les gaz en vue d'abaisser la température de

détonation. Bien que le but poursuivi ne soit pas le même, la question n'est pas absolument neuve pour l'azote. Il serait à désirer qu'on se préoccupât surtout de la formation rapide d'une forte proportion d'acide carbonique.

Malheureusement, avec les explosifs usuels, il ne semble pas que l'acide carbonique soit un des corps qui se forment en tout premier lieu lors de l'explosion. Nous connaissons fort peu de chose du processus de la réaction explosive, mais, si nous la ramenons à une combustion, on peut admettre qu'elle débute par des réactions entre les atomes qui se trouvent sur le bord des molécules réagissantes, c'est-à-dire par des réactions entre les atomes d'hydrogène qui se trouvent sur les bords des molécules des matières organiques, et les atomes d'oxygène des groupements NO_2 qui sont fixés également à bordure des molécules nitrées.

On admet ordinairement, d'ailleurs, que dans la combustion des matières organiques, l'hydrogène brûle avant le carbone.

Dans ces conditions, que la combustion se fasse par suite du rapprochement de molécules voisines, ou qu'elle se fasse dans les molécules mêmes, ou, en d'autres termes, que la réaction explosive soit intermoléculaire ou intramoléculaire, il semble que les premiers corps à se former soient des groupements OH momentanément libres.

D'autre part, il semble que le choc qui propage la réaction explosive, doit rapprocher d'abord les molécules les unes des autres, avant de rapprocher les atomes dans les molécules, ce qui augmente encore les chances de formation de groupements OH comme tous premiers produits de réaction.

Les réactions subséquentes sont plus difficiles à prévoir. Si la réaction explosive se propage de la périphérie

vers le centre des molécules, on peut prévoir la présence dans les gaz, pendant une partie de la réaction, de radicaux, de débris de molécules et peut-être même d'atomes momentanément libres.

Il se pourrait que les réactions qui se font à la périphérie des molécules, suffisent à l'entretien de l'onde explosive et que les réactions en arrière du front de l'onde intéressassent les régions plus centrales des molécules, donc la région des atomes de carbone.

Il semble donc qu'il faut éviter l'échappement prématuré des gaz, si on veut qu'ils renferment une forte proportion d'acide carbonique.

La forte pression en arrière du front de l'onde nécessaire à sa propagation rapide, pourrait provenir de la présence en ce point de débris de molécules résultant de leur dégradation périphérique. La présence possible de tels corps est un motif de plus de se prémunir contre l'échappement prématuré des gaz.

Il paraît très difficile d'étudier la réaction explosive à la lumière des seules données de la chimie classique. La connaissance plus complète des chaleurs de formation des liaisons entre atomes ou, en d'autres termes, la connaissance plus complète de l'énergie des valences serait d'une très grande utilité. Il en serait de même d'une connaissance plus complète des positions relatives des atomes dans les molécules.

Si cette conception de la combustion marchant de la périphérie vers le centre des molécules, répond à la réalité, il y aurait lieu d'en tenir compte dans la composition à donner aux explosifs de sûreté, en vue d'obtenir une formation rapide d'acide carbonique, d'azote moléculaire et de vapeur d'eau. Au point de vue de la formation rapide de ces gaz, les corps du groupe des amides et notamment la dicyandiamide, qu'on commence à intro-

duire dans la composition des explosifs, pourraient présenter de l'intérêt.

Comme conclusion de ce qui précède, on peut dire que nous sommes loin de devoir envisager une capitulation dans la question de l'explosif de sûreté. Mais pour arriver à cet explosif, sans addition de sels alcalins ou sans emploi de moyens de sécurité extérieurs à l'explosif, il paraît nécessaire de faire l'étude préalable des conditions d'inflammation des mélanges d'air grisouteux et de gaz d'explosifs. Cette étude des conditions d'inflammation de l'air grisouteux additionné d'acide carbonique, d'azote et de vapeur d'eau surchauffée, devrait se faire sous pressions et températures diverses. De cette étude et de l'étude du processus de la réaction explosive à la lumière des données de la chimie moderne, il paraît possible de déduire des indications sur la composition à donner aux explosifs en vue d'arriver à l'ininflammabilité des mélanges de leurs gaz avec le milieu ambiant.

En étudiant à la pression et à la température ordinaires, l'influence que peuvent avoir sur les limites d'inflammabilité des mélanges grisouteux, les gaz que l'on rencontre le plus souvent dans le grisou naturel ou dans l'air des vieux travaux et qui sont l'azote et l'acide carbonique, Coward et Hartwell ont montré (4) que la présence de ces gaz avait pour effet de rapprocher l'une de l'autre les limites inférieure et supérieure d'inflammabilité et que les mélanges qui renferment plus de 25 % d'acide carbonique ou plus de 38,5 % d'azote sont ininflammables. D'autre part, des essais de Frameries montrent que des additions d'azote et d'acide carbonique au grisou naturel font monter les charges-limites. Il semble donc qu'on peut

(4) COWARD et HARTWELL. — The Limits of Inflammability of Firedamp in Atmospheres which contain Blackdamp. Safety in Mines Research Board. Paper n° 19.

envisager la possibilité de rendre les mélanges grisouteux ininflammables par addition de gaz d'explosifs.

Dans ces conditions, il est prématuré de considérer comme une impossibilité l'explosif spécifiquement inapte à allumer le grisou. L'étude semble pouvoir être continuée avec l'espoir fondé d'arriver à assurer la sécurité du tir en présence du grisou ou des poussières de charbon.

En tout état de cause, étant donné la rapidité du phénomène explosif, le moindre retard dans l'échappement des gaz peut suffire pour permettre la formation d'une proportion suffisante de gaz extincteurs et les moyens d'obtenir ce retard constitue une réserve de sécurité. Il en est de même de l'addition de sels alcalins aux explosifs et de l'emploi des gaines de sûreté et du bourrage extérieur.

RÉSUMÉ

Le danger du tir en milieu inflammable semble dépendre principalement de la composition, de la pression et de la température du mélange que les gaz d'explosif forment avec le milieu ambiant.

Dans ces conditions, le problème de la sécurité du tir en milieu inflammable revient :

1° à trouver des explosifs dont les gaz forment des mélanges ininflammables avec le milieu ambiant ;

2° à retarder par une diminution convenable de la densité de chargement, le moment où les gaz d'explosifs se répandent dans l'atmosphère, de manière à permettre à la réaction explosive de s'achever à suffisance ;

3° à aider les gaz d'explosifs à former des mélanges ininflammables avec le milieu ambiant en incorporant aux explosifs des chlorures alcalins ou en employant les gaines de sûreté et le bourrage extérieur.

Frameries, mai 1926.