

Les explosifs de très haute sûreté à ions échangés (*)

(suite)

par P.-R. GOFFART,

Ingénieur au Corps des Mines,
Docteur en Sciences appliquées.

31. DEFINITION

L'étude de la détonation exposée au chapitre 2 se rapporte uniquement à des charges sans solution de continuité, constituées d'une substance explosive présente, à densité d'encartouchage en principe constante, tout au long du parcours suivant lequel la détonation se propage en régime stable.

Le présent chapitre s'intéresse au cas où la charge est interrompue sur une certaine longueur par un intervalle de matière étrangère, qui peut être gazeuse, solide ou liquide. On dit qu'il y a transmission de la détonation lorsque celle-ci, s'étant propagée à partir du détonateur amorçant la charge dite initiatrice, se développe au-delà de l'intervalle dans la charge non amorcée dite réceptrice.

Nous limitons notre étude aux cas de l'intervalle de matière solide inerte ou d'air aux conditions normales.

32. TECHNOLOGIE DE L'ENCARTOUCHAGE

Industriellement, l'explosif est présenté en cartouches. Dans une file de cartouches disposées bout à bout, il y a propagation de la détonation dans la substance explosive constituant chaque cartouche, et transmission à l'endroit des jointures entre cartouches.

Il est indispensable, en vue de l'étude de la transmission, de donner quelques précisions technologiques sur l'encartouchage des explosifs à ions échangés. L'élément de départ est généralement un étui

cylindrique en papier fermé à une extrémité par un fond concave obtenu par pliage mécanique du papier. Ce fond constitue le bout de cartouche désigné H dans la suite de l'exposé (H est l'initiale du nom de la machine à confectionner les étuis en papier). Après remplissage à densité apparente aussi constante que possible, la fermeture de l'orifice libre s'opère soit à la main (par quatre plis superposés dont la plus grande dimension peut correspondre au diamètre de la cartouche) et donne un bout plan M. Elle peut aussi être réalisée mécaniquement par plis serrés dont la plus grande dimension correspond au rayon de la cartouche (fermeture en rosace) ; dans ce cas, les plis s'ordonnent suivant une surface légèrement concave, donnant ainsi un bout B (initiale du nom de la machine reproduisant l'opération manuelle du chargement de l'étui par bourroir). La photographie (fig. 23) montre les différents bouts de cartouches. On y voit aussi le bout N (initiale de nu) obtenu par sectionnement trans-

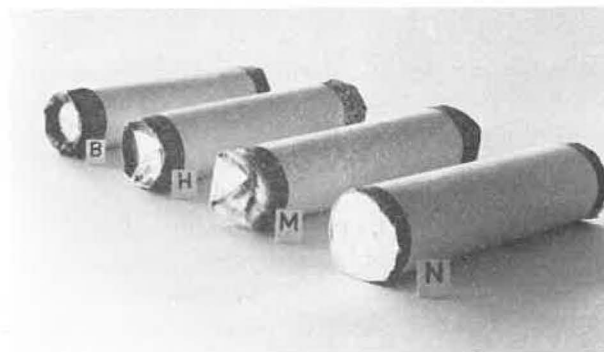


Fig. 23.

versal bien net d'une cartouche à environ 1 cm d'une extrémité, de façon à mettre à nu la substance explosive dans sa densité d'encartouchage.

De tous, le bout H est le plus ferme et le plus robuste. Il peut se charger abondamment au paraffinage, surtout si, pour l'égouttage, les cartouches sont placées verticalement. Le bout M, quoique plan, est solide en raison de la large superposition des plis ; il peut également se charger de beaucoup de paraffine. Quant au bout B, il est ferme si le fonctionnement de la machine est réglé en conséquence ; dans ce cas, les plis très serrés sont moins susceptibles de capter la paraffine.

33. CONNAISSANCES ACQUISES EN 1962

Rappelons d'abord les connaissances accumulées depuis la Neuvième Conférence internationale des directeurs de stations d'essais (1956) jusqu'à 1962, année de la troisième Réunion de la Commission européenne de normalisation des essais d'explosifs, ceci par une synthèse que nous illustrerons de quelques expérimentations originales.

Au terme de ce tour d'horizon, il nous apparaîtra que les mécanismes de transmission sont bien connus lorsque l'explosion se passe à l'air libre ou en confinement léger, mais que la question reste obscure dans le cas du confinement épais. Nous nous efforcerons alors d'élucider ce dernier problème qui, en définitive, est seul à présenter un intérêt pratique.

331. Eventualités fixant les mécanismes de transmission.

Les précisions apportées par le chapitre 2 vont nous être d'un grand secours. Nous savons en effet qu'en matière d'explosifs à ions échangés de très haute sélectivité, la décomposition exothermique à grande vitesse concerne peu la masse saline, de sorte que le support énergétique de la détonation n'est, dans tous les cas, qu'une fraction très limitée du potentiel global de la formule. La réaction secondaire (gazéification profonde des sels) ne se produit qu'en vase clos ; elle fait défaut à l'air libre. Le confinement léger ne peut non plus déclencher la réaction complète. On peut déjà logiquement augurer le fait en raison de l'expansion latérale des fumées qui, en tube de carton ou d'acétate de cellulose à paroi mince, prend cours dès la zone de réaction, comme à l'air libre. Voici en outre deux preuves que seule la réaction primaire (décomposition rapide de la nitroglycérine et libérations additionnelles d'énergie) a lieu en confinement léger :

1^o) D'essais menés avec son pendule de choc, Roth conclut que, même en tuyau de matière plastique de 3 mm d'épaisseur de paroi, les constituants salins ne contribuent aucunement au renforcement

de l'impulsion de choc en raison du défaut de réaction secondaire [19].

2^o) Dans la partie « examen théorique » du dernier ouvrage en date publié sur la matière, Fossé, opérant en tube mince d'acétate de cellulose, calcule les propriétés des gaz de détonation et compare deux valeurs de la pression dans l'onde [21] :

$$p \text{ théorique} = 34.000 \text{ kg/cm}^2 ;$$

$$p \text{ semi-expérimental} = 8880 \pm 280 \text{ kg/cm}^2.$$

Selon l'estimation de l'auteur, ces résultats « montrent bien que l'explosif à ions échangés est loin de libérer toute l'énergie chimique qu'il contient lorsque le tir est effectué dans les conditions de nos essais. Ceci est dû au fait que l'explosion a lieu sous confinement peu résistant et également que les cartouches se présentent sous un diamètre qui est nettement plus faible que le diamètre-limite, au-delà duquel la vitesse de détonation reste constante ».

Or, le chapitre 2 nous a appris que le diamètre de 30 mm se place déjà dans le palier permanent de sélectivité, lequel contient le régime maximal (Fossé a étudié un explosif analogue à B₁, mais dont le palier se situe vers 1700 m/s). Donc, il ne reste principalement que le peu de résistance du confinement pour expliquer la valcur réduite de la pression.

En conclusion, nous sommes amenés à retenir deux grandes éventualités de tir :

- celle donnant lieu à la réaction primaire seule, qu'il s'agisse de tir à l'air libre ou de tir en confinement léger ;
- le confinement résistant, seul capable de provoquer la réaction complète.

332. Influences de l'encartouchage sur la transmission.

La détonation de la charge initiatrice produit en fin de charge (bout initiateur) l'émission d'un front de choc, de fumées contenant éventuellement des sels très fins non gazéifiés ou issus de la gazéification (sels naissants), mais également, ainsi que l'ont révélé des enregistrements photographiques, un jet de particules solides relativement grosses, présentes uniquement dans le cas où le bout initiateur est une extrémité de cartouche intacte (B, H ou M, et non N). Ces particules proviennent du bout paraffiné et des dernières tranches d'explosif directement en contact avec les plis de papier [21].

3321. Nous pouvons nous rendre compte du mécanisme de formation du jet de particules. Considérons à cet effet une cartouche d'explosif à ions échangés, c'est-à-dire un étui en papier chargé, à la densité apparente de 1.2 g/cm³, d'une composition à 10 % d'huile explosive répartie dans une masse saline de surface spécifique élevée, de sorte que la substance se présente comme un sable fin à peine humide. Si nous ouvrons une quelconque des fer-

metures d'extrémité, nous constatons toujours la présence en bout de cartouche d'une quantité de composition qui s'est détachée de la masse à forte densité et qui flotte à l'état de poudre libre sous la fermeture. Celle-ci peut en outre receler des nodules de paraffine solidifiée, particulièrement dans les plis un peu lâches du papier. Imaginons à présent l'onde de détonation se propageant dans la cartouche, à l'approche d'une extrémité. Le front de choc initie la décomposition rapide du sensibilisateur aux points de contact intercrystallins qui, par effet de compression brusque, se muent en points chauds (hot spots theory). Mais de telles compressions ne sont possibles que dans la masse compacte ayant la densité apparente recherchée par l'encartouchage. Dans la poudre libre flottant en bout de cartouche, les contacts préalables sont insuffisants et ne peuvent être le siège d'élévations locales de température. Par conséquent, ces quantités de composition explosive ne sont pas atteintes par la détonation.

C'est sans doute pour une raison de cette espèce qu'il est possible de recueillir de la nitroglycérine provenant du bout initiateur sur une plaque de plomb placée à 2 cm de distance [22].

En l'absence d'obstacle à proximité du bout initiateur, la poudre libre qui ne détone pas est, comme les débris de la fermeture, soumise à entraînement visqueux dans la détente des fumées vers l'avant et donne des projectiles à vitesse supersonique.

Le flux solide est absent lorsque l'extrémité de la charge consiste en un bout N. En effet, dans ce cas, la détonation gagne jusqu'aux dernières tranches d'explosif car il n'y a ni poudre libre, ni plis de papier, ni paraffine.

Remarquons que le raisonnement que nous venons d'élaborer sur des bases relevant de la physique de la détonation, s'applique dans tous les cas, c'est-à-dire en confinement ou non, pour autant que l'explosif concerné soit un pulvérulent ou un semi-pulvérulent. Des particules de dimensions appréciables, sans rapport aucun avec la texture de l'explosif, sont entraînées dans les gaz de la détonation et y subsistent si elles sont constituées de matières suffisamment lentes à réagir et si les pression et température du milieu sont suffisamment basses. Ces conditions se trouvent précisément réunies au mieux dans les explosifs à ions échangés très sélectifs, spécialement lorsque l'explosion se passe à l'air libre ou en confinement léger.

3322. Effectivement, dans ce cas, il y a persistance des particules sur les plus longues distances, ainsi que l'ont montré des enregistrements photographiques faisant appel à des techniques spéciales [23]. En confinement léger transparent, on peut même voir, en plus des particules, la propagation d'une onde plane aussi longtemps que le tube confinant est continu, onde qui, à l'extrémité du tube, s'épa-

nouit en un front de compression quasi-sphérique ; ce dernier peut très aisément être devancé par des particules ayant leur propre onde de Mach dans le milieu aérien non perturbé [24].

Nous avons confirmé la présence ou l'absence de particules, suivant le cas, par l'expérimentation simple suivante, exécutée à l'air libre.

Une charge d'explosif C₁, de 30 mm de diamètre et 25 cm de longueur, d'une seule venue, est suspendue horizontalement et orientée perpendiculairement à une feuille de zinc de 0,5 mm d'épaisseur, pendant à la verticale (fig. 24). La distance entre la feuille et l'extrémité la plus proche de la charge est de l'ordre d'un mètre. On opère une visée de façon à pointer l'axe de la charge vers une croix marquée sur la feuille.

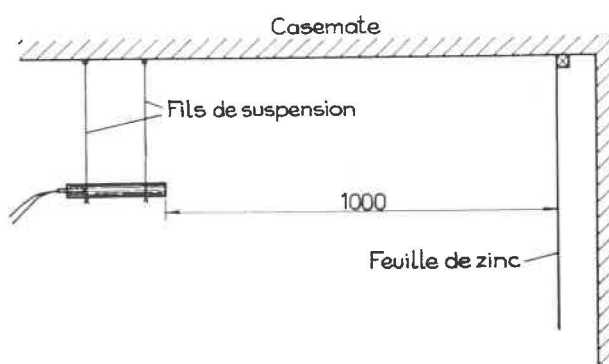


Fig. 24.

— Lorsque l'extrémité de la charge orientée vers la cible est un bout H, B ou M, on enregistre sur la feuille un ternissement général et un percement de quelque 5 mm de diamètre, pouvant être dévié d'environ un décimètre par rapport au repère de pointage. Si, de plus, il s'agit de cartouches paraffinées, la feuille porte en outre les impacts des grains de paraffine, dispersés dans un rayon de l'ordre de 5 cm et imprimés dans le zinc sans percement.

— Lorsque l'extrémité de la charge orientée vers la cible est un bout N, la feuille de zinc reste intacte. Elle est simplement ternie par une multitude de traces minuscules, qui sont vraisemblablement les impacts des cristaux salins non décomposés par la détonation et entraînés dans les fumées primaires.

Le ternissement de la cible, observé dans les deux cas, peut être dit macroscopique et très dense.

Il est clair que le percement, observé dans le premier cas uniquement, est dû au jet de particules à grande vitesse.

3323. Notre raisonnement différencie le bout N des bouts industriels H, B ou M en ce sens que le premier peut seul être atteint par la détonation lorsqu'il termine une charge initiatrice. Réciproquement, si N est, dans une charge réceptrice, le bout exposé à l'action des agents d'initiation (front de choc, fu-

mées, particules), il constitue un récepteur plus sensible à l'initiation directe qu'un bout H, B ou M. En effet, dans ces dernières éventualités, il faut compter avec la présence de plis de papier, de poudre libre, voire d'amas de paraffine, c'est-à-dire avec autant d'éléments formant obstacle devant la masse à forte densité apparente, seule susceptible de détoner par choc. Aussi choisirons-nous souvent, pour nos essais, le bout N comme récepteur de référence.

En définitive, on constate que les caractéristiques d'encartouchage influent sur les agents d'initiation puisqu'elles sont à l'origine de la formation d'un jet de particules, mais aussi, comme nous le confirmerons expérimentalement dans la suite, qu'elles agissent sur la capacité réceptive de la cartouche exposée à l'action de la charge initiatrice.

333. Constatations de base relatives à l'impulsion de choc.

Dans une charge d'une seule venue constituée d'un explosif à ions échangés très sélectif, la réaction primaire est le moteur d'un front de choc d'énergie relativement réduite, mais capable de provoquer une impulsion d'intensité et de raideur à la fois suffisantes pour déclencher, de tranche en tranche au sein de la substance explosive, la décomposition à haut régime du sensibilisateur, de sorte que la propagation de la détonation est assurée. Nous allons montrer que les caractéristiques d'impulsion de choc ne sont cependant pas fort éloignées des conditions critiques d'initiation par front d'onde de la substance explosive en cause.

3331. La méthode d'essai la plus simple pour se rendre expérimentalement compte du phénomène est celle dite S.P.H.F. ou « Shock pass heat filter method », qui consiste à placer une matière solide dans l'intervalle où la transmission de la détonation à l'air libre est étudiée. A noter que, de part et d'autre de la barrière inerte d'épaisseur e , la tranche de l'explosif à sa densité apparente d'encartouchage (bout N) se trouve en contact intime avec les faces planes du solide (fig. 25).

En utilisant le plexiglas comme barrière entre charges d'un explosif proche de B_1 , encartouché en 30 mm de diamètre, Fossé a montré que la probabi-

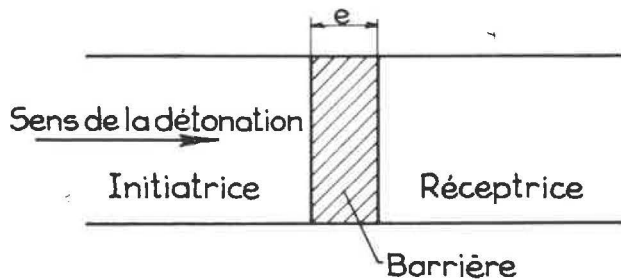


Fig. 25.

lité de transmission vaut 1 pour $e = 10$ mm et descend à 0,33 pour $e = 15$ mm [21].

En opérant sur l'explosif C_1 en charges de même diamètre, nous avons enregistré le raté systématique de transmission à partir d'une barrière de :

- 5 mm d'acier ;
- 10 mm d'argile comprimée ;
- 15 mm de charbon menu ou de sable gros très tassé.

Des résultats analogues ont déjà été signalés [25, 26].

Ils établissent qu'une dissipation même limitée de l'énergie présente dans le front de choc, en modifiant quelque peu les caractéristiques d'impulsion, suffit pour compromettre l'induction de la réaction chimique dans la charge réceptrice par effet de compression brusque (la barrière mettant obstacle au passage des autres agents d'initiation). C'est d'une telle particularité que nous avons fait usage dans nos considérations sur la propagation de la détonation utilisées à la fin du chapitre précédent (cf. 2122).

Remarque : L'énergie au front de choc dépend uniquement du régime de détonation qui caractérise le palier permanent de sélectivité, puisque les domaines des petits et gros diamètres (inférieurs à 25 mm et supérieurs à 40 mm) sont sans intérêt pratique. Cette énergie est indépendante des conditions de confinement, puisque ledit régime de détonation est pratiquement indépendant des conditions extérieures (cf. 213).

3332. Nous venons de voir quelles sont les barrières de matière solide capables d'empêcher la transmission par choc. Déterminons maintenant la barrière d'air suffisante pour arriver au même résultat, c'est-à-dire abaisser les caractéristiques d'impulsion de choc en dessous des conditions critiques.

En opérant avec un bout initiateur N, les agents d'initiation à prendre en considération sont le front de choc puis les fumées, le premier précédant nécessairement les secondes et les particules n'existant pas ; l'extrémité réceptrice est le bout N de référence (cf. 3323). L'explosif C_1 donne les résultats suivants (tableau XVIII).

Comme on le constate, il suffit d'une barrière d'air de moins de 10 mm d'épaisseur pour obtenir l'amortissement critique de l'impulsion de choc.

En effet, lorsqu'il y a transmission, nous ne pouvons distinguer si l'initiation est le fait de l'impulsion de choc ou des fumées. Mais en cas de raté, on est certain de l'incapacité du front de choc, qui est le premier à toucher le bout N sensible n'ayant subi aucune espèce d'action perturbatrice. Nous sommes

TABLEAU XVIII.

Intervalle d'air <i>e</i> mm	Résultat N/N
25	—
20	—
15	—
10	— —
5	+ + + + + +

Le signe — signifie raté de transmission, à l'inverse du signe +

ainsi en mesure d'avancer que, à partir d'un intervalle d'air de l'ordre d'un centimètre entre charges, le front de choc n'est plus capable que de comprimer le bout récepteur sans l'initier. On reconnaît dans cette particularité la compression entravante repérée antérieurement par des procédés radiographiques ou photographiques [26, 27, 22, 21].

3333. Les résultats précédents se rapportent à l'air libre.

Examinons à présent les effets d'un confinement sur l'impulsion de choc. Nous savons que l'accomplissement de la réaction secondaire ne modifie pas la vitesse de détonation (cf. 213). L'énergie au front d'onde et en conséquence la raideur de l'impulsion de choc ne se trouvent pas augmentées par rapport au cas d'explosion à l'air libre. Par contre, le niveau d'impulsion est plus élevé parce que, dans un confinement, la zone de choc est plus large que la zone

de détonation [28]. Déjà pour un confinement léger, l'impulsion globale est plus forte qu'à l'air libre en raison d'un allongement de la zone de choc, sans aucune réaction secondaire cependant. Mais en confinement résistant capable de déclencher la gazéification complète, l'occasion est donnée aux produits gazeux abondants qui poussent en arrière du plan C-J de contribuer au maximum à l'impulsion, la zone de choc acquiert une grande largeur, l'impulsion totale s'enrichit de nouvelles composantes tardives qui se manifestent dans les derniers délais du temps de choc.

Nous empruntons à Roth les résultats suivants du mesurage de l'impulsion spécifique d'un explosif à ions échangés très sélectif, en fonction de l'enveloppe de la charge dont l'extrémité est, pour les mesures, appliquée contre l'enclume du pendule de choc [19] :

Explosif Wetter- Carbonit B ₁	Enveloppe de papier	Tuyau en matière plastique	Tube d'acier
Impulsion spécifique <i>I_s</i> (kg.m.s ⁻¹ /cm ²)	0,23-0,57	0,65-1,20	1,6-2,3-2,8

Sans prétendre pouvoir distinguer des impulsions comme cela est possible avec l'appareil de Roth, on peut toutefois se rendre compte de l'évolution des phénomènes en tirant à l'appareil de Kast une charge d'explosif C₁ de 18 cm de longueur et 30 mm de diamètre à l'air libre et dans divers confinements. Les résultats mentionnés ci-après n'ont évidemment rien de commun avec des évaluations de la brisance dès qu'il s'agit de charges en confinement (tableau XIX).

TABLEAU XIX.

Explosif C ₁ 180 × 30 Ø	Air libre	Tube d'acier 31,2/35 Ø	Tube d'acier 31,5/38,2 Ø	Tube d'acier 31,5/41,5 Ø	Tube d'acier 34/70 Ø
Ecrasement du crusher 10,5 × 7 Ø	1,35	2,70	5,85	8,05	maximum
Remarque	—	Tube déchiré	Tube déchiré	Tube expansé non déchiré	Tube intact

3334. D'autre part, il est très intéressant de suivre l'affaiblissement d'impulsion dans l'air à mesure que l'on s'écarte du bout initiateur. Cet affaiblissement est moindre en confinement, même léger, qu'à l'air libre. Pour l'explosif Wetter-Carbonit B₁ à la den-

sité 1,25 g/cm³, contenu dans un tube en matière plastique de diamètres 32,5/39 mm, l'impulsion spécifique à 4 cm du bout initiateur n'atteint plus que 0,35 kg.m.s⁻¹/cm² en moyenne lorsque le confinement léger ne se prolonge pas au-delà du bout initia-

teur, mais, lorsque le tube se prolonge jusqu'à l'enclosure du pendule de choc, elle s'élève encore à

$$0,75 \text{ kg.m.s}^{-1}/\text{cm}^2 \text{ à } 4 \text{ cm et à } 0,628 \text{ kg.m.s}^{-1}/\text{cm}^2 \text{ à } 30 \text{ cm} \quad [19]$$

Les phénomènes évoluent dans le même sens lorsque le confinement est résistant, avec en plus le fait que la dégression de l'impulsion produite par la charge d'explosif à ions échangés sera moins rapide, puisque l'effet de piston dû aux fumées sera plus soutenu.

Remarquons d'ailleurs que la meilleure conservation de l'impulsion à partir du bout initiateur va de pair, en confinement, avec le maintien de la vitesse du front de choc dans le tube.

Les vitesses moyennes de l'onde émise par une dynamite et un explosif à ions échangés de sélectivité transitoire, pour un parcours de 25 cm [29], sont données au tableau XX.

TABLEAU XX.

Explosif	Air libre	Tube de carton	Tube d'acier
Dynamite 3	1673 m/s	2648 m/s	2675 m/s
Charbrite 39 G	1097 m/s	1245 m/s	1644 m/s

Comme il n'existe pas de pendule de choc en Belgique, nous n'avons pu procéder à des mesures d'impulsion. Mais nous aurons l'occasion, dans la suite, de prouver le maintien de la vitesse du front de choc engendré en tube d'acier par la détonation de l'explosif C₁.

334. Transmission de la détonation à l'air libre.

L'essai normalisé de transmission à l'air libre consiste à déterminer la plus grande distance à laquelle la détonation se transmet à travers l'air dans les conditions suivantes : une charge initiatrice de 12 cm au moins de longueur contient le détonateur de mise à feu et est ligaturée contre une baguette rigide en fer doux ou en bois ; une charge réceptrice est également ligaturée à la baguette de façon à se présenter dans le prolongement de la charge initiatrice, mais avec un intervalle représentant un nombre entier de centimètres entre le bout initiateur *i* et le bout récepteur *r* (fig. 26). La baguette ainsi équipée est suspendue dans l'air à 50 cm au moins des parois de l'enclos d'essais, au moyen de fils métalliques minces. Il a été montré, grâce à des enregistrements par éclairs de rayons X, que la baguette n'a aucun rôle perturbateur [30].

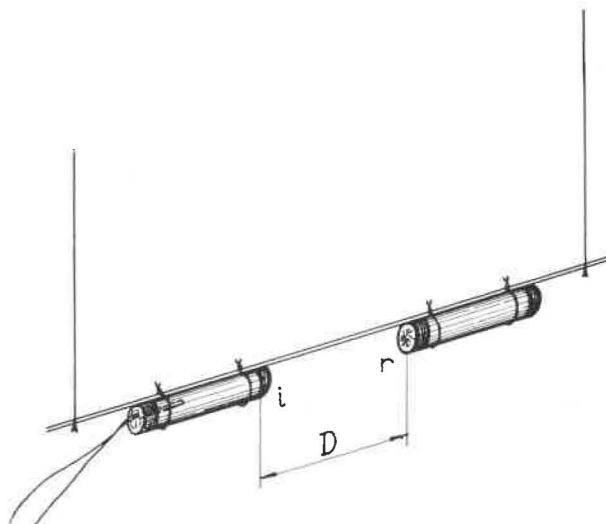


Fig. 26.

On appelle seuil de transmission *D* l'intervalle maximal, exprimé en centimètres, pour lequel on obtient, pendant six tirs successifs, l'explosion de la charge réceptrice.

Lorsqu'on applique l'essai normalisé aux explosifs à ions échangés présentés en cartouches industrielles, on a bien de la peine à déterminer le seuil *D*, tant les résultats sont dispersés. Ils peuvent atteindre plusieurs décimètres, comme cela a été aussi observé dans l'essai allemand sur lit de sable [31, 25]. En 1961, à la 2^e réunion de la Commission, nous avons signalé qu'il fallait distinguer les bouts *i* et *r* selon leur nature (H, B ou M) et que, pour un même explosif, on obtient diverses valeurs du seuil suivant les orientations adoptées [32]. Le tableau XXI a été établi à l'époque pour un explosif proche de B₁.

TABLEAU XXI.

Nature du bout initiateur <i>i</i>	Nature du bout récepteur <i>r</i>	Seuil <i>D</i> (cm)
H	B	24
H	H	19
B	B	7
B	H	3

Le seuil de 24 cm obtenu dans l'orientation H - B signifie que la transmission est assurée pour toute valeur de l'intervalle qui ne dépasse pas 24 cm. Comme nous allons le voir, le mécanisme assurant la transmission n'est pas unique quelle que soit la valeur de l'intervalle inférieure au seuil.

3341. Position relative des agents d'initiation [21].

A faible distance du bout initiateur, les fumées suivent immédiatement le front de choc et, si elles ne proviennent pas d'un bout N, contiennent des particules auxquelles elles impartissent leur vitesse par entraînement visqueux. La vitesse moyenne d'expansion axiale passe de 1580 m/s (bout B) ou 1950 m/s (bout N) sur 1,5 cm à 1100 m/s (bout B) ou 1450 m/s (bout N) sur 5-6 cm en ce qui concerne les deux premiers agents d'initiation. A 6 cm du bout initiateur, les particules, lorsqu'elles existent, continuent sur leur lancée et peuvent déjà devancer le front de choc ; à 20 cm de distance, elles ont encore une vitesse de 800 à 1000 m/s. Des deux agents retardataires, le front de choc se décolle progressivement des fumées et accroît son avance d'autant plus qu'il s'écarte du bout initiateur.

3342. Mécanismes de transmission.

Afin de débrouiller les influences diverses, nous allons partir du cas le plus simple pour aboutir au plus compliqué.

Il est logique de prendre d'abord le bout N de référence comme récepteur (cf. 3325), d'envisager sur lui en premier lieu les attaques par deux agents d'initiation (bout initiateur N) puis en second lieu par le système complet front de choc-fumées-particules, enfin d'en venir aux effets des systèmes à trois agents sur bouts récepteurs autres que N.

33421. Bout récepteur N de référence.

— S'il n'y a que deux agents d'initiation (cas N/N), on est reporté à un cas examiné (cf. 3332). Le seuil se limite à moins d'un centimètre pour l'explosif C₁, aussi bien en 40 qu'en 30 mm diamètre. Il est de 2 cm pour un explosif analogue à B₁. A ces distances, fronts de choc et de fumées attaquent le bout récepteur en même temps. Il est difficile de distinguer l'influence de l'un et de l'autre. En tout cas, pour des intervalles de quelques millimètres, le temps d'initiation est extrêmement court, ainsi qu'il résulte d'enregistrements de la détonation d'une file de cartouches pris au miroir tournant. On peut alors dire à bon droit qu'il s'agit d'une initiation par choc. Peut-être au seuil, l'effet des fumées est-il déjà nécessaire. Au-delà du seuil, le front de choc comprime le bout récepteur et le désensibilise en construisant un obstacle à forte densité devant les fumées ; celles-ci, ne provenant que de la réaction primaire et connaissant une expansion libre tridimensionnelle, perdent tellement d'énergie interne que leur attaque frontale ne peut venir à bout de l'obstacle. Plus l'intervalle *i-r* est grand, et plus les circonstances sont défavorables à l'initiation par les fumées. En définitive, seuil limité à 1-2 cm, sans autres possibilités de transmission.

Remarque : Il est possible de donner artificiellement aux fumées une plus grande force de pénétration dans l'axe des charges. Il suffit de donner au bout N initiateur une forme concave telle que, par effet de charge creuse, le front de fumées comporte un dard central s'imprimant dans le front de choc [26]. Avec la disposition N concave/N plan (fig. 27), on obtient alors pour l'explosif C₁ (tableau XXII).

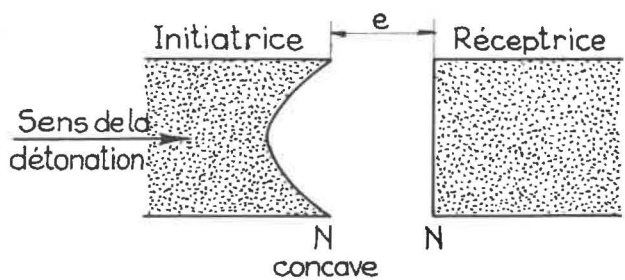


Fig. 27.

TABLEAU XXII.

Intervalle d'air <i>e</i> mm	Résultat
30	— —
25	+ —
20	— +



On constate, par rapport aux tirs du tableau XVIII, une nette augmentation de la probabilité de transmission.

— Si l'on prend comme bout initiateur *i* une extrémité d'origine H, B ou M, il faut compter avec la présence de particules, ce qui porte à trois le nombre des agents d'initiation. On observe alors des transmissions pour toute valeur de l'intervalle ne dépassant pas un seuil qui dépend de la nature du bout initiateur. Pour un même explosif, on obtient par exemple les résultats suivants (tableau XXIII).

TABLEAU XXIII.

Nature du bout <i>i</i> initiateur	Nature du bout <i>r</i> récepteur	Seuil (cm)	Nombre d'agents d'initiation
H	N	58	3
B	N	36	3
N	N	2	2

Pour les intervalles compris entre 2 et 6 cm, les particules, toujours englobées dans les fumées, aident celles-ci à percer l'obstacle à haute densité construit sur le bout récepteur par le front d'onde qui les précède (cf. 3341). Pour les intervalles supérieurs à 5 - 6 cm, les particules dépassent le front de choc et sont les premières à frapper le bout récepteur non désensibilisé. Une énergie se situant dans l'ordre de grandeur de 2 - 3 calories suffit pour l'initiation, qui est quasi instantanée [21].

On peut dire que les seuils de plus d'un décimètre résultent d'un véritable tir à la cible.

33422. Bout récepteur d'origine H, B ou M.

Le tir à deux agents d'initiation n'apporte rien de nouveau par rapport au cas où le bout récepteur est N, sinon que la transmission est encore plus mauvaise (un explosif ayant un seuil de 2 cm dans la disposition N/N, ne donne plus que 1 cm dans les dispositions N/H ou N/B). Les bouts H, B ou M opposent plus spécialement à l'attaque des particules, une résistance qui dépend de leur constitution (nombre de plis de papier, etc.). Le temps d'initiation est, dans l'orientation B - H, compris entre 10 et 15 microsecondes pour les petits intervalles (voisins de 4 cm). Il décroît pour les plus grands intervalles jusqu'à descendre à 2 microsecondes et moins vers 15 cm. En tout état de cause, il est supérieur au temps d'initiation avec bout récepteur N.

33423. Conclusions.

Il est clair maintenant qu'en combinant les effets dus à la nature des bouts initiateur et récepteur suivant toutes les orientations de cartouches possibles, de façon à tenir compte du fait que H est un meilleur initiateur mais un moins bon récepteur que B par exemple (cf. 32) en raison de sa solidité, on doit obtenir des seuils différents tels que ceux signalés au tableau XXI.

Il faut souligner le rôle important des particules, surtout lorsqu'elles dépassent le front de choc. Ceci se produit déjà à une distance de l'ordre de 5 - 6 cm comptée à partir du bout initiateur. Le seuil n'a d'ailleurs plus alors de signification qu'en fonction de la précision du tir à la cible. C'est ainsi que les 58 cm signalés au tableau XXIII résultent de la déviation du jet de particules sur grandes distances, comme le montre l'essai suivant : même dispositif expérimental qu'en 3322, avec bout initiateur H, mais en visant, au lieu d'une feuille de zinc, une boîte de 24 cartouches constituant une cible de bouts N d'environ 20 cm de diamètre, placée à 75 cm du bout initiateur. Avec un tel dispositif, le pointage correct assure l'explosion de la cible.

On constate ainsi la sensibilité à l'initiation par particules, sensibilité qui n'est certainement pas étrangère à la présence du chlorure d'ammonium en

granulométrie assez grossière ; ce sel très dur permet en effet d'atteindre à l'air libre de grandes distances de transmission [33].

Un modèle des processus de transmission à l'air libre s'établit comme suit :

- pour les très petits intervalles, depuis la jointure entre cartouches contiguës d'une file jusqu'à quelques millimètres, initiation presque immédiate par le front de choc ;
- pour les intervalles petits, mais qui compromettent déjà le pouvoir initiateur de l'impulsion de choc et jusqu'à 6 cm, initiation par les fumées et les particules y incluses, en un temps ne dépassant pas 20 microsecondes ;
- de 6 cm jusqu'à un seuil d'ailleurs tributaire des natures des bouts de cartouche et de la précision du « tir à la cible », initiation par les particules en un temps d'autant plus court que le seuil est élevé (2 microsecondes et moins).

335. Transmission de la détonation en confinement léger.

L'essai se pratique de la même façon qu'à l'air libre, sauf que les charges sont logées dans un tube mince en carton ou en acétate de cellulose, ce dernier ayant l'avantage d'être transparent. Nous savons que le bout initiateur émet dans le tube une onde plane, dont la vitesse et l'énergie se conservent mieux qu'à l'air libre (cf. 3334). Quant aux fumées, elles connaissent toujours une expansion tridimensionnelle hâtive, c'est-à-dire peu à l'aval de l'onde de détonation.

Très tôt a été signalé le fait que, pour un intervalle d'air de quelques centimètres seulement, il peut ne plus y avoir transmission de la détonation [31]. On a ensuite constaté que, pour les intervalles de plusieurs décimètres, et même de préférence pour 80 à 100 cm, il apparaît un nouveau domaine de transmissions, celles-ci étant par ailleurs favorisées lorsque le confinement comporte, de préférence à proximité du bout récepteur, une solution de continuité entre charges initiateur et récepteur [22].

3351. Position relative des agents d'initiation [21].

Les fumées ne collent plus au front de choc que sur 3 cm seulement de distance à partir du bout initiateur. Ensuite, le front d'onde augmente progressivement son avance. Sa vitesse passe de 1300 à 1100 m/s entre 5 et 20 cm ; elle est encore de 850 à 1000 m/s à 60 cm du bout initiateur. Une zone d'air comprimé de plus en plus large sépare le front de choc des fumées (3 cm de zone aérienne à 10 cm du bout initiateur et 6 cm d'épaisseur à 20 cm de distance). Si le bout initiateur est une extrémité

d'origine (autre que N), des particules sortent des fumées et apparaissent dans la zone aérienne dès 10 cm de distance. Elles se rapprochent de plus en plus du front de choc, que certaines peuvent rattraper à 60 cm du bout initiateur, alors que la zone aérienne a 15 cm d'épaisseur. Leur vitesse est encore de 750 à 1100 m/s.

3352. Mécanismes de transmission.

En partant des phénomènes se passant à l'air libre, et en tenant compte des positions relatives, sans perdre de vue que l'impulsion de choc conserve en tube mince une action désensibilisante plus marquée sur grandes distances, il est aisé de se représenter les mécanismes de transmission, à condition de distinguer le confinement continu de celui présentant une solution de continuité.

33521. Confinement continu.

Pour les très petits intervalles et jusqu'à la distance de 3 cm environ à laquelle les fumées (et éventuellement les particules y incluses) suivent encore le front de choc de près, le processus est le même que celui observé à l'air libre jusqu'à 6 cm, distance à laquelle, dans ce dernier cas, le front de choc se décolle seulement des fumées. En raison de l'impulsion de choc plus élevée, la désensibilisation du bout r est plus profonde (2 à 3 mm, et même 4 à 5 mm lorsque le front de choc a dépassé le bout r de 5 cm) et le temps d'initiation est plus long (35 à 45 microsecondes) [21]. Lorsque le front de choc prend de l'avance sur les fumées, le temps disponible pour la désensibilisation du bout r devient de plus en plus long : l'obstacle dressé devant fumées et particules est alors trop important et il apparaît une faible probabilité de transmission. Mais l'action désensibilisante diminue d'intensité lorsque l'intervalle compte plusieurs décimètres, tandis que le front de choc est progressivement rattrapé par des particules (si celles-ci n'existent pas, il n'y a plus aucune possibilité de transmission).

Ces particules agissent suffisamment tôt après l'impact du front de choc sur le bout r , d'où une nouvelle probabilité de transmission qui grandit jusqu'à 1 pratiquement, lorsque les particules rattrapent, voire dépassent le front de choc (intervalles de 60 cm et plus).

A remarquer qu'en confinement léger continu, les particules initient aisément sur très grandes distances, précisément parce que le tube guide infailliblement leur trajectoire vers la cible.

33522. Confinement interrompu.

Si le tube présente une solution de continuité dans l'intervalle de transmission, spécialement à proximité du bout r , le guidage des particules est tout aussi sûr. De plus, le front de choc s'est épanoui

en sphéroïde dès l'interruption et a été immédiatement, du fait de sa progression axiale plus lente, dépassé par des particules continuant sur leur lancée dans le milieu aérien non encore perturbé. En définitive, ces particules frappent un bout r non désensibilisé et la mise en détonation est aisée.

33523. Conclusions.

En confinement léger comme à l'air libre, les particules jouent un rôle primordial, spécialement sur très grandes distances. Le rôle des fumées reste très limité alors que les désensibilisations par choc sont nettement plus marquées qu'à l'air libre.

De ce fait, le temps d'initiation peut prendre des valeurs très élevées dans les intervalles moyens (60 microsecondes à 20 cm de distance avec H comme bout récepteur [21]) et il apparaît un domaine de ratés fréquents.

Le fait marquant réside dans une évolution de la probabilité de transmission en fonction de l'intervalle, pour autant que le bout initiateur émette des particules. Ces dernières initient le plus aisément lorsque le confinement léger présente une interruption entre les charges.

336. Etat des connaissances sur la transmission en confinement fort.

Depuis longtemps, on a remarqué que la transmission en confinement résistant n'est assurée que pour des intervalles réduits, plus élevés cependant que les petits intervalles observés en tube mince [31]. On a opéré en fourneau réel au rocher ou au charbon, en mortier d'acier à fourneau cylindrique de 40 mm de diamètre, en tube d'acier de 40 mm de diamètre intérieur et 2,5 mm d'épaisseur de paroi, en tube de charbon-ciment de 40 mm de diamètre intérieur et 50 mm d'épaisseur de paroi, dont on fait varier la dureté par la proportion de liant entrant dans la composition [25, 26].

La constatation générale est que, contrairement à ce qui se passe à l'air libre, la transmission n'est assurée que pour des intervalles réduits, que ces derniers soient d'ailleurs constitués de matière solide ou d'air.

3361. Les renseignements disponibles se rapportent d'une part à la valeur de l'impulsion de choc en confinement (cf. 3333), d'autre part aux temps de destruction de divers tubes de confinement : le tube d'acier de 40 mm de diamètre intérieur et 2,5 mm d'épaisseur de paroi ne cède sur son pourtour et ne laisse échapper les gaz latéralement que 40 microsecondes après passage du front de détonation, de sorte que la section où l'expansion latérale commence se trouve 8 cm en arrière de la section de détonation ; le tube en charbon-ciment de 40 mm de diamètre intérieur et 5 cm d'épaisseur de paroi

donne un temps de confinement des fumées particulièrement long, savoir 130 microsecondes sans fissures dans la surface extérieure, qui montre cependant un gonflement, et 370 microsecondes sans émission de fumées à travers les fissures qui découpent un gonflement très accusé [22].

A la 3^e réunion de la Commission de normalisation, nous avons défendu l'opinion qu'à l'air libre et en confinement léger, le principal du pouvoir initiateur est le fait des particules, tandis qu'en confinement fort, le rôle important est dévolu aux fumées [34].

3362. On pourrait s'étonner du fait que les précisions techniques sont, d'une part, si abondantes et précises pour les conditions de tir à l'air libre et en confinement léger, d'autre part, si parcellaires en matière de transmission en confinement fort.

Ceci est dû à l'impossibilité qu'il y a d'enregistrer, par voie photographique ou radiographique, des phénomènes explosifs se déroulant entre des parois opaques et épaisses. Or, précisément, seul le confinement résistant a un rapport étroit avec le minage réel ; il est d'ailleurs le seul à déclencher la réaction secondaire des explosifs à ions échangés (cf. 331).

L'air libre et le confinement léger ne présentent qu'un intérêt de laboratoire ; l'étude des mécanismes intervenant dans ces conditions très lointaines du tir pratiqué industriellement, nous a néanmoins familiarisés avec les particularités des explosifs à ions échangés et constitue un excellent exercice de préparation à l'étude du confinement fort, que nous allons aborder.

34. TRANSMISSION DE LA DETONATION EN CONFINEMENT FORT

Nous avons remarqué que des tubes en acier de 31,5 mm de diamètre intérieur et 5 mm d'épaisseur de paroi pouvaient résister à la détonation de l'explosif C₁ en charges de 30 mm de diamètre pouvant atteindre 40 cm de longueur. Nous avons cependant préféré des tubes d'acier sans soudure répondant à la norme DIN 2448/1629, ayant 34 ou 40 mm de diamètre intérieur et 18 mm d'épaisseur de paroi. De tels tubes d'acier nous assurent, aussi bien que les tubes en charbon-ciment, la réaction complète de l'explosif, c'est-à-dire la gazéification des constituants salins.

Tirant profit de l'expérience acquise par l'étude des phénomènes se passant à l'air libre ou en confinement léger, nous allons d'abord nous inquiéter des effets du confinement fort sur chacun des agents d'initiation pris en particulier, ensuite sur leur position relative depuis leur départ du bout initiateur jusqu'à de grandes distances. Puis, toujours en nous basant sur l'expérience acquise, nous construirons une véritable supputation du mécanisme, et par consé-

quent de la probabilité de transmission. Enfin, nous passerons à l'établissement de la probabilité par voie expérimentale, afin de pouvoir explorer les diverses nuances de la question.

341. Effet du confinement résistant sur les agents d'initiation.

— L'effet sur l'impulsion de choc nous est déjà connu par le rappel des connaissances acquises en 1962 (cf. 333). Nous nous sommes réservé de montrer que, si l'explosif C₁ détone en confinement fort, le bout initiateur émet une onde plane dont la vitesse, parallèlement à la bonne conservation de l'impulsion de choc, se maintient à un niveau élevé sur un parcours appréciable. Ceci apparaîtra lorsque nous solutionnerons la question de la position relative des agents d'initiation.

— En ce qui concerne les fumées, la réaction complète les rend très abondantes et énergétiques au maximum des possibilités de l'explosif. Cependant, leur vitesse au plan C-J n'est pas augmentée par rapport à la détonation à l'air libre, en raison de la relation

$$D = W + c$$

dans laquelle D, vitesse de détonation, ne dépend pratiquement pas des conditions de l'explosion (cf. 213) est constante, ainsi que c, vitesse du son dans les fumées considérées dans les conditions thermodynamiques existant au plan C-J, conditions qui sont fixes en raison de l'immuabilité de la détonation. Par conséquent, les fumées conservent un front identique, mais nourri abondamment sur ses arrières par la réaction secondaire. Elles sont donc plus énergétiques qu'à l'air libre, mais tardivement, par un effet de sommation dans le sens de propagation de la détonation, effet d'autant plus accusé que l'expansion est unidimensionnelle suivant l'axe du tube et que les pertes par détente latérale sont réduites au minimum lorsque le confinement résiste à l'explosion. L'énergie interne des fumées se conservera mieux au cours d'une telle expansion, et leur effet sera concentré à l'intérieur du confinement.

— Quant aux particules, nous avons montré suivant quel mécanisme elles ont pour origine la fermeture d'extrémité de la charge initiateur et les dernières tranches d'explosif directement en contact avec les plis de papier (cf. 3321). Rien dans ce raisonnement ne repose sur l'existence ou l'absence de la réaction secondaire. Par conséquent, en confinement fort également, il faut s'attendre à ce que le front des fumées contienne aussi un dard de poudre libre, des débris de papier et des nodules de paraffine éventuellement.

La question se pose de savoir si ces particules persistent dans le front de fumées, ou bien si, au contraire, le niveau thermodynamique élevé du mi-

lieu qui les contient n'en provoque pas la gazéification. Pour déterminer s'il y a persistance ou disparition des projectiles, nous avons recouru à l'expérimentation simple suivante.

Une charge de 30 mm de diamètre et 20 cm de longueur, d'une seule venue et non paraffinée, est placée dans un tube d'acier de 31,5 mm de diamètre intérieur et 5 mm d'épaisseur de paroi. Un tel tube résiste à l'explosion d'une charge courte ; sa paroi interne se polit par les tirs successifs jusqu'à donner une âme lisse nécessaire aux essais. La charge affleure à un des orifices du tube, où elle est amorcée par cordeau détonant (l'amorçage par détonateur dans ces conditions donnerait lieu à projection de débris de laiton à travers le tube). L'équipage ainsi constitué est suspendu horizontalement et orienté perpendiculairement à une feuille de zinc de 0,3 mm d'épaisseur pendant à la verticale contre une paroi en bois, de façon telle que la distance entre la feuille et l'orifice libre du tube soit de l'ordre d'un mètre (fig. 28). On opère une visée de façon à pointer l'axe de la charge vers une croix marquée sur la feuille.

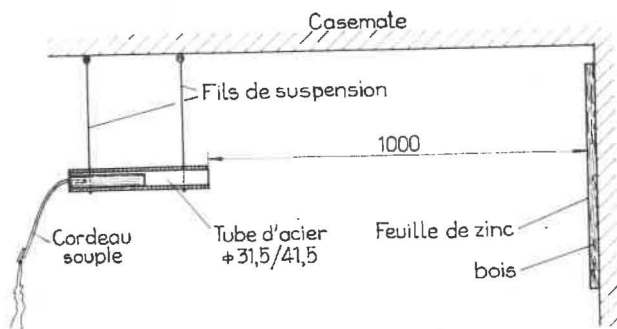


Fig. 28.

— Lorsque l'extrémité de la cartouche orientée vers la cible est un bout H, B ou M, on enregistre un ternissement léger et dispersé de la feuille, un percement de 5 mm de diamètre légèrement dévié, quelques impacts assez groupés autour de la cible et légèrement imprimés dans le zinc.

Le ternissement est peu marqué, bien que la feuille doive être nettoyée et débarrassée par endroits d'une pellicule blanchâtre, irrégulière et granuleuse y adhérente.

— Lorsque l'extrémité de la cartouche orientée vers la cible est un bout N, il y a aussi un léger ternissement, mais pas de percement. Il subsiste cependant des impacts dispersés, petits et profondément marqués, qui se sont maintenus en dépit d'un mode opératoire très soigné.

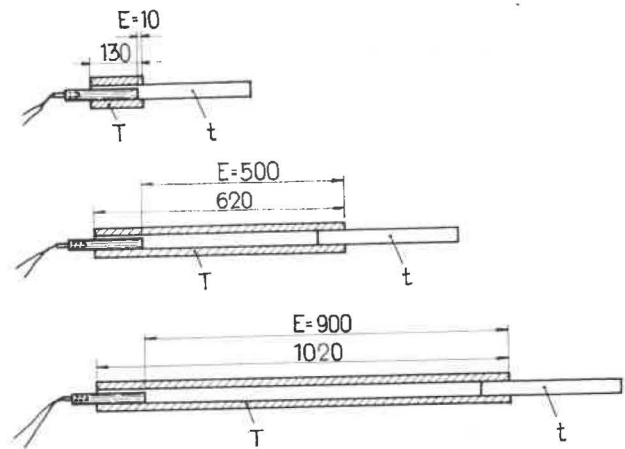
Dans les deux cas, le ternissement est microscopique et inégalement réparti ; il se limite aux plages qui étaient marquées par une pellicule blanchâtre adhérent au zinc.

Nous pensons que cette pellicule de surface irrégulière, par endroits assez épaisse, est constituée de chlorure alcalin (sel naissant en grains de 10-20 microns, selon Kuhn et Roth), provenant de la réaction secondaire et dispersé en phase colloïdale dans la détente des fumées. Une telle phase de corps solide tend à donner des agrégats, cette tendance ne pouvant être freinée que par une électrisation préalable, de sorte qu'il se forme très rapidement quelques grains de masse déjà appréciable [9]. Les petits projectiles que donne un bout N seraient donc nés de la réaction secondaire.

342. Effet du confinement résistant sur la position relative des agents d'initiation.

Comme nous l'avons rappelé, il est impossible d'observer le déroulement des phénomènes à l'intérieur d'un tube d'acier résistant à l'explosion (cf. 3362). Pour déterminer la position relative du front de choc, du front de fumées et des particules en fonction de la distance à partir du bout initiateur, il faut donc recourir à une astuce d'expérimentateur. A cet effet, nous avons imaginé le dispositif suivant.

Une cartouche paraffinée d'explosif C₁ ayant 30 mm de diamètre et 18 cm de longueur est introduite sur 12 cm de sa longueur dans un tube d'acier de 34 mm de diamètre et 18 mm d'épaisseur de paroi (fig. 29). Son extrémité libre émerge ainsi de



T: tube d'acier ϕ 34/70 mm.
t: tube mince en acétate de cellulose

Fig. 29.

6 cm et est amorcée par détonateur électrique n° 8, dont les débris ne seront en conséquence pas entraînés à l'intérieur du tube d'acier. Ce dernier est d'autre part prolongé par un tube transparent en acétate de cellulose bien adapté au diamètre intérieur du tube d'acier et de 0,25 mm d'épaisseur de paroi, ceci afin d'éviter l'épanouissement du front de choc en onde sphéroïdale au débouché du tube d'acier. Il reste à effectuer, au moment adéquat, des

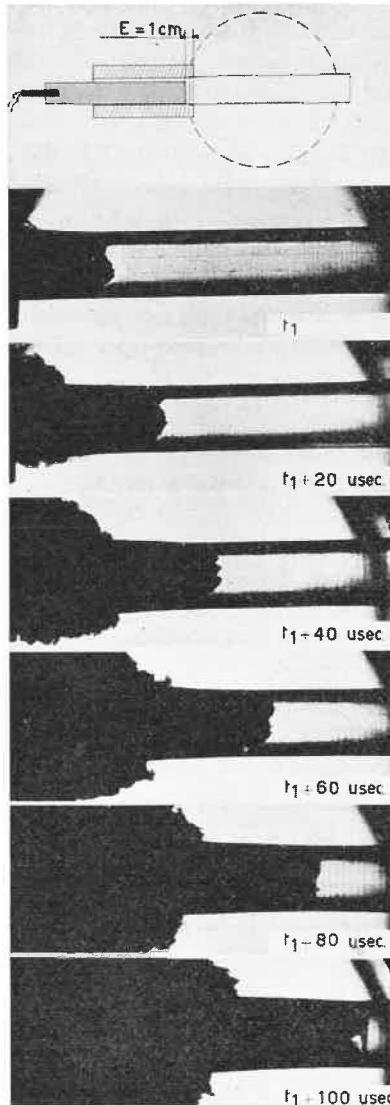


Fig. 30.

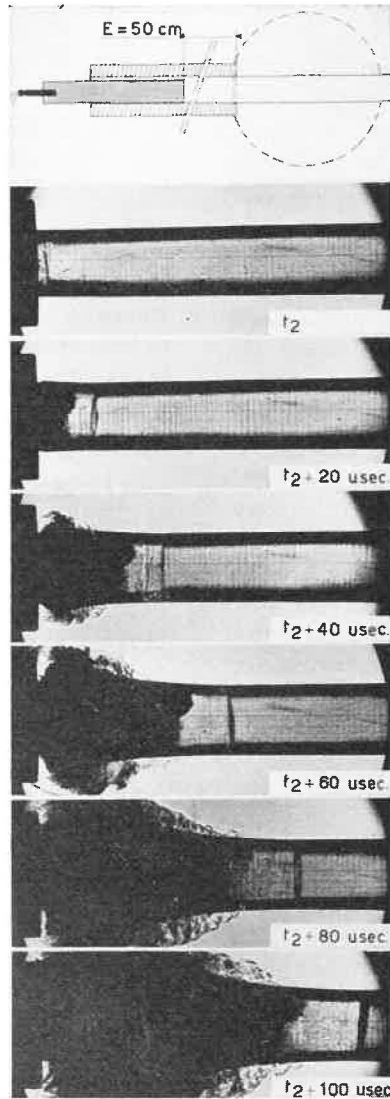


Fig. 31.

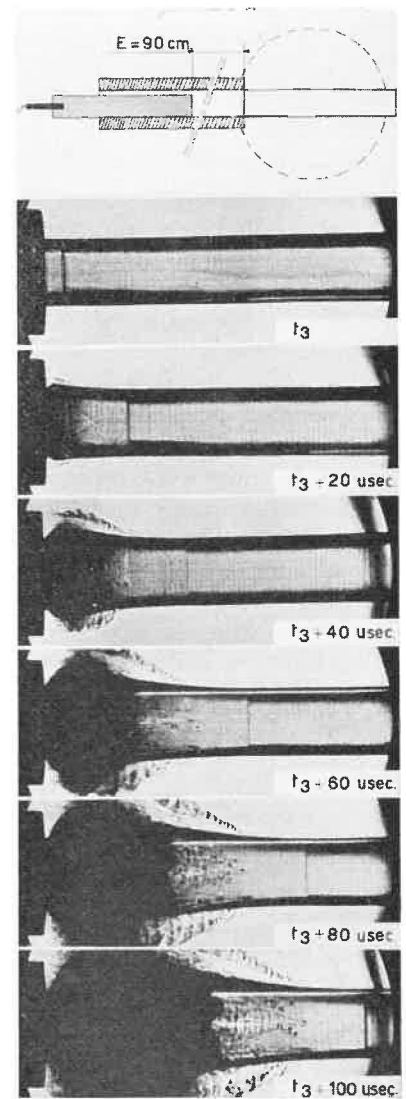


Fig. 32.

prises de vue dans un champ couvrant le tube d'acétate dès son raccord au tube d'acier, de façon à enregistrer, par les techniques en usage au C.R.I.P.E. [24, 35, 36], le passage des divers agents d'initiation (*). Ceci a été fait dans trois cas (fig. 29), pour $L = 13$, ou 62 , ou 102 cm respectivement, de façon que le bout H de la charge se trouve à une distance $E = 1$ cm, 50 cm ou 90 cm du débouché du tube d'acier dans celui en acétate. Les figures 30, 31 et 32 reproduisent les trois séries d'enregistrements, deux prises de vue d'une même série étant séparées par un temps de 20 microsecondes. Elles permettent de dresser les tableaux suivants, en désignant par :

(*) Nous tenons à remercier spécialement Monsieur R. Vanden Berghe, Technicien attaché au Centre de Recherches scientifiques et techniques pour l'Industrie des Produits explosifs, qui s'est chargé des prises de vue avec sa compétence habituelle.

X_i , l'avancement du front de choc à partir du débouché du tube d'acier, relevé sur la i -ème prise de vue d'une série ;

x_i , l'avancement du front de fumées à partir du débouché du tube d'acier, relevé sur la i -ème prise de vue d'une série ;

V_i , la vitesse moyenne du front de choc sur la distance $X_i - X_{i-1}$;

v_i , la vitesse moyenne du front de fumées sur la distance $x_i - x_{i-1}$;

t_j , le moment de la première prise de vue de la j -ème série.

En groupant les résultats contenus dans les tableaux XXIV, XXV et XXVI, nous pouvons supputer la vitesse instantanée du front de choc, celle du front de fumées, et l'avance instantanée du premier front sur le second, lorsqu'il s'agit de la perturbation lancée dans un tube continu en acier épais

TABLEAU XXIV.

$E = 1 \text{ cm}$

Temps $t_1 + 20(i-1)$ (microsecondes)	X_1 (mm)	x_1 (mm)	$X_1 - x_1$ (mm)	V_1 (m/s)	v_1 (m/s)
t_1	50	50	0	—	—
$t_1 + 20$	81	81	0	1550	1550
$t_1 + 40$	112	112	0	1550	1550
$t_1 + 60$	142	142	0	1500	1500
$t_1 + 80$	173	173	0	1550	1550
$t_1 + 100$	204	203	1	1550	1500

TABLEAU XXV.

$E = 50 \text{ cm}$

Temps $t_2 + 20(i-1)$ (microsecondes)	X_1 (mm)	x_1 (mm)	$X_1 - x_1$ (mm)	V_1 (m/s)	v_1 (m/s)
t_2	5	—	—	—	—
$t_2 + 20$	33	21	12	1400	—
$t_2 + 40$	70	54	16	1850	1650
$t_2 + 60$	107	86	21	1850	1600
$t_2 + 80$	144	115	29	1850	1450
$t_2 + 100$	180	140	40	1800	1250

TABLEAU XXVI.

$E = 90 \text{ cm}$

Temps $t_3 + 20(i-1)$ (microsecondes)	X_1 (mm)	x_1 (mm)	$X_1 - x_1$ (mm)	V_1 (m/s)	v_1 (m/s)
t_3	10	—	—	—	—
$t_3 + 20$	46	—	—	1800	—
$t_3 + 40$	81	20	61	1750	—
$t_3 + 60$	115	45	70	1700	1250
$t_3 + 80$	147	70	77	1600	1250
$t_3 + 100$	179	95	84	1600	1250

par la détonation d'une cartouche à ions échangés, en fonction de la distance à partir du bout initiateur.

TABLEAU XXVII.

Distance à partir du bout initiateur	Vitesse instantanée du front de choc	Vitesse instantanée du front de fumées	Avance instantanée
1 cm	1550 m/s	1550 m/s	0
50 cm	1750 m/s	1650 m/s	10 - 15 mm
90 cm	1750 m/s	1250 m/s	60 mm

Les résultats ainsi enregistrés se caractérisent par les particularités suivantes :

1°) Le front de choc conserve sa vitesse sur de longues distances, sans freinage.

2°) Le front de fumées perd de sa vitesse, mais de façon très progressive et seulement après un parcours de plusieurs décimètres.

3°) L'avance du front de choc sur le front des fumées reste en conséquence toujours très modérée.

4°) Les particules ne dépassent jamais le front de choc et, pour autant qu'en témoignent les enregistrements, n'apparaissent même pas dans la zone aérienne séparant les deux fronts. Elles restent donc toujours englobées dans les fumées, ce qui est normal puisque, d'une part, ces dernières conservent leur vitesse d'avancement et que, d'autre part, les particules n'acquièrent leur vitesse matérielle que par entraînement visqueux au sein des fumées.

En définitive, la position relative des agents d'initiation en confinement résistant, jusqu'à un mètre au moins de distance du bout initiateur, reste telle qu'elle est définie au moment de l'émission. Rappelons qu'à l'air libre ou en confinement léger, tel n'était le cas que sur une distance de quelques centimètres seulement (cf. 3341 et 3351).

343. Supputation des mécanismes de transmission.

Du fait que le front de choc est, pour tout intervalle entre charges, le premier agent d'initiation à atteindre le bout récepteur, et que l'impulsion de choc se maintient, également pour tout intervalle, à un niveau élevé sans renforcement cependant, par rapport au cas d'explosion à l'air libre, de la raideur au front de choc, il faut s'attendre :

1°) à une initiation directe à l'impact du front de choc pour de petits intervalles, comme cela a été constaté à l'air libre ou en confinement léger (quelques millimètres) ;

2°) à une action entravante très prononcée du front de choc dès que celui-ci n'est pas capable d'initier directement la charge réceptrice (intervalle de l'ordre de 1 cm).

Du fait du haut potentiel thermodynamique des fumées issues de la réaction complète et concentrées vers la charge réceptrice, il y a lieu de retenir un pouvoir initiateur élevé des gaz de la détonation, avec collaboration possible des particules éventuellement y incluses. Ce pouvoir initiateur diminue évidemment avec la distance, c'est-à-dire avec la détente axiale croissante et la baisse du potentiel thermodynamique y attachée. Il faut aussi tenir compte du léger retard qu'éventuellement le front des fumées peut avoir sur le front de choc (cf. tableau XXVII), ainsi que de l'action plutôt tardive des fumées secondaires (cf. 341).

On peut de la sorte supputer des transmissions dans une gamme continue d'intervalles, dont l'étendue dépend du maintien du pouvoir initiateur des fumées (et peut-être des particules y incluses) à un niveau suffisant comparativement à la conservation de l'action désensibilisante par impulsion de choc.

Si une interruption existe dans le confinement résistant, le front de choc et les fumées y connaissent une expansion tridimensionnelle et peuvent alors être dépassés par les particules qui, si elles existent, continuent leur trajectoire grâce à l'énergie cinétique acquise. Une initiation par particule comme premier agent d'initiation atteignant la charge réceptrice placée au-delà de l'interruption du confinement n'est alors pas exclue, que la charge réceptrice se trouve d'ailleurs elle-même en ou hors confinement.

344. Etablissement de la probabilité de transmission à travers l'air en confinement continu.

Pour déterminer les intervalles auxquels il y a transmission, nous avons utilisé le dispositif expérimental représenté à la figure 33. On reconnaît la charge initiatrice et son détonateur n° 8 d'amorçage, la cartouche réceptrice munie d'un cordeau détonant souple à la penthrite, utilisé comme témoin de détonation. De part et d'autre de l'ensemble constitué par les charges, il y a un bourrage de 3 cm d'argile principalement destiné au maintien en due place des divers éléments du dispositif.

Nous nous sommes assurés de la fidélité du témoin de détonation que constitue un cordeau détonant souple à la penthrite inséré dans la charge réceptrice, en procédant simultanément d'une part selon la figure 33 et d'autre part en prolongeant cette dernière charge à l'extérieur du tube par une file de cartouches de 40 cm de longueur, reposant sur une plaque de plomb (fig. 34). Avec ce dernier dispositif, en cas de détonation de la charge récep-

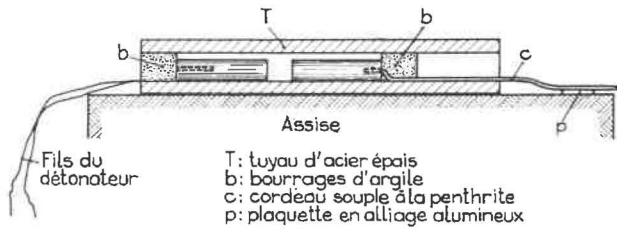


Fig. 33.

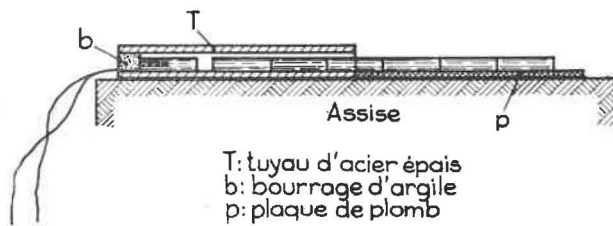


Fig. 34.

trice, on enregistre une trace sur le plomb, tandis qu'en cas de non-détonation, la trace fait défaut et on retrouve des débris de cartouches non explosées : c'est là un enregistrement sûr et indiscutable du comportement de la charge réceptrice. En comparant des résultats obtenus avec les deux systèmes appliqués à un même échantillon d'explosif, on constate que le cordeau détonant utilisé est un fidèle témoin de la détonation, au même titre que le dispositif de la figure 34.

Les charges utilisées consistent en explosif C_1 encartouché en 30 ou 40 mm de diamètre. La charge initiatrice est caractérisée par son poids et la nature du bout initiateur (p. ex. N 100 g, H 200 g). La charge réceptrice pèse toujours 100 g et on indique la nature du bout récepteur (p. ex. B, M, H ou N). Le tube d'essai a soit 34, soit 40 mm de diamètre intérieur et, dans tous les cas, résiste à l'explosion.

L'explosif étudié possède une très haute sélectivité. En l'occurrence, il s'agit de C_1 , caractérisé par une vitesse de détonation de 1400 ± 75 m/s, et dont la transmission par impulsion de choc seule n'est pas assurée pour un intervalle de 10 mm d'air, ainsi qu'il résulte du tableau XXVIII relatif à des tirs effectués à l'air libre, avec bout initiateur N ne donnant que deux agents d'initiation (choc et fumées) et bout récepteur N le plus apte à la mise en détonation (cf. 3323).

Comme c'est le cas pour les résultats ci-dessus, les cartouches des diamètres 30 et 40 mm ont été confectionnées à partir d'une composition provenant d'un même lot de fabrication. Les tirs ont été effectués dans un délai suffisamment court que pour exclure l'influence du vieillissement.

TABLEAU XXVIII.

Intervalle d'air e mm	\varnothing 30 mm	\varnothing 30 mm	\varnothing 40 mm
	N 200 g/N	N 100 g/N	N 200 g/N
30			—
20			—
15	— —		—
10	+ — —		— + — —
5	+ + +	+ + +	+ + +

Au sujet de l'explosif C_1 , nous savons ainsi qu'un intervalle d'air supérieur à 5 mm suffit pour compromettre la raideur au front de choc et abaisser les caractéristiques d'impulsion en dessous des valeurs critiques d'initiation par choc. Celui-ci ne produit plus qu'une compression entravante du bout récepteur, qu'il désensibilise assez pour faire obstacle à l'initiation frontale par les fumées primaires, seules présentes dans le tir à l'air libre (cf. 3332).

En tube d'acier à paroi épaisse, le confinement détermine la réaction secondaire, c'est-à-dire la gazéification des économiseurs. Il s'agit de voir comment s'établit alors la probabilité de transmission.

3441. Essais avec deux agents d'initiation.

Il suffit d'opérer avec un bout initiateur N pour que la présence de particules soit exclue (cf. 341).

L'impulsion de choc suivie de l'impulsion de fumées sont les seuls agents d'initiation, dont nous allons examiner l'effet d'abord sur un bout N (cf. 3323), ensuite sur un bout industriel d'origine.

34411. Bout récepteur N — Les résultats enregistrés figurent au tableau XXIX.

Son examen livre les conclusions suivantes :

1°) Le seuil de transmission en confinement ne dépasse pas le seuil à l'air libre (5 mm) si le rapport r de la section explosive à la section du confinement est inférieur à 0,6 (charge de diamètre 30 mm dans tube de diamètre 40 mm).

2°) Le seuil en confinement dépasse celui à l'air libre lorsque le rapport r est supérieur à 0,75 (charge de diamètre 30 mm dans tube de diamètre 34 mm ou charge de diamètre 40 mm dans tube de même diamètre).

TABLEAU XXIX.

Intervalle d'air <i>e</i> mm	En tube \varnothing 34 mm		En tube \varnothing 40 mm			
	$r = 0,778$		$r = 0,563$		$r = 1$	
	\varnothing 30 mm N 100 g/N	\varnothing 30 mm N 200 g/N	\varnothing 30 mm N 100 g/N	\varnothing 30 mm N 200 g/N	\varnothing 40 mm N 100 g/N	\varnothing 40 mm N 200 g/N
200						—
150						+ — —
140						—
135						—
130						+
125						+ —
100		—		—		+ + +
100 *						+ + +
90		+ —				
80		—		—		
75		+ + +				+
75 *		+ + +				
70				—		+
70 *		+ + +				
60				—		
50	—	+		+ —		+
45	—					
40	+ —			—		
35	+ + + —			—		+
30	+ + —	+		—	— + —	
25	+ + + —			—	—	
25 *	+ — —				—	
20			—	—	+ + + +	
20 *	+ + + + + +				— + — —	
15		+	—	—		
15 *					+ + +	
10		+	+ — — — +	—		
5			+ + + + + +	+ + +		
Seuil D mm	20	75	5	5	15	100

NB — Le signe * repère les tirs effectués sans bourrages.

3^o) Lorsque le rapport est supérieur à 0,75, le seuil augmente en fonction directe de l'importance de la charge initiatrice, et l'augmentation est d'autant plus marquée qu'il s'agit de charges de diamètre élevé.

4^o) Le bourrage n'a pas d'effet sur le seuil de transmission, celui-ci ayant dans chaque cas une valeur déterminée à 5 mm près.

34412. Bout récepteur M — Nous avons déterminé expérimentalement la valeur du seuil pour certaines des éventualités figurant au tableau précédent.

Les résultats sont donnés au tableau XXX.

On constate, par comparaison avec le tableau XXIX, que :

1^o) Le seuil obtenu dans les tirs avec deux agents d'initiation agissant sur un bout récepteur M est au moins équivalent à celui obtenu dans les mêmes conditions avec un bout récepteur N.

2^o) Le renforcement éventuel du seuil que procure l'essai N/M par rapport à l'essai N/N, est plus sensible lorsque le seuil N/N est très réduit.

3^o) Les conclusions des tirs effectués suivant l'essai N/N sont confirmées (influences du facteur r , du poids de la charge initiatrice et du bourrage).

Le bout M récepteur présente donc une détonabilité au moins équivalente, en confinement fort, à celle du bout N.

Nous attribuons cette particularité au fait que les plis de fermeture de l'étui en papier et les vides qui constituent un bout M, sont susceptibles de dissiper

TABLEAU XXX.

Intervalle d'air <i>e</i> mm	En tube \varnothing 34 mm		En tube \varnothing 40 mm	
	$r = 0,778$		$r = 0,563$	$r = 1$
	\varnothing 30 mm N 100 g/M	\varnothing 30 mm N 200 g/M	\varnothing 30 mm N 100 g/M	\varnothing 40 mm N 100 g/M
100 *		—		
90 *		—		
80		— +		
80 *		+ + +		
75		+ + +		
70 *		+		
60 *	—			
50 *	+ —			
40 *	+ —			—
35 *				+ —
30 *	+ + —			+ —
25	+ + + —			
25 *	+ + —			+ + + + +
20			— —	
20 *	+ + +			+
15			— + —	
10			+ + + + +	
Seuil D mm	20	75	10	25

par déformation une partie de l'impulsion de choc tout en protégeant partiellement de la compression les couches plus profondes, dans lesquelles l'impulsion de fumées déclenche alors plus aisément la détonation.

3442. Essais avec trois agents d'initiation.

On opère ici avec un bout initiateur M d'origine, qui donne un jet de particules (cf. 341). A noter

que ces dernières sont toujours incluses dans les fumées (cf. 342).

Les résultats du paragraphe précédent nous dispensent d'envisager le bout N comme récepteur; nous retiendrons uniquement le bout M d'origine, et le tube de 40 mm de diamètre intérieur (tableau XXXI).

En comparant avec les tableaux XXIX et XXX, on se rend compte que :

TABLEAU XXXI.

Intervalle d'air <i>e</i> mm	En tube \varnothing 40 mm			
	$r = 0,563$		$r = 1$	
	\varnothing 30 mm M 100 g/M	\varnothing 30 mm M 200 g/M	\varnothing 40 mm M 100 g/M	\varnothing 40 mm M 200 g/M
100				—
90				+ + +
80				+ + +
80 *				+ + +
60			— + —	+
50	—	— —	+ — + + +	
40	+ + +	— + + — —	+ + +	
35		+ + +		
Seuil D mm	40	35	40	90

TABLEAU XXXII.

Intervalle d'air <i>e</i> mm	En tube \varnothing 40 mm			
	$r = 0,563$		$r = 1$	
	\varnothing 30 mm N plan 100 g/N	\varnothing 30 mm N concave 100 g/N	\varnothing 40 mm N plan 100 g/N	\varnothing 40 mm N concave 100 g/N
50				—
40				+ + —
30			— + —	+ + +
25			—	
20	—		+ + + +	
15	—	+ + —		
10	+ — — — +	+ + +		
5	+ + + + + +			
Seuil D mm	5	10	20	30

1°) Si le seuil obtenu dans l'orientation N/N a une valeur élevée, cette valeur, qui par parenthèse apparaît dans l'essai N/M, se conserve également avec la disposition M/M.

2°) Si le seuil N/N est de valeur réduite, il y a un renforcement important avec la disposition M/M, renforcement plus apparent qu'avec l'orientation N/M et d'autant plus fort d'ailleurs que le seuil N/N est petit.

3°) Les autres résultats précédemment acquis sont confirmés.

Nous estimons que le jet de particules présent dans les fumées est susceptible de renforcer le pouvoir initiateur de ces dernières lorsque l'impulsion de fumées ne suffit que difficilement à assurer la transmission, ceci grâce sans doute à une destruction mécanique des couches peu sensibles ou désensibilisées du bout récepteur.

Si, par contre, les conditions sont telles que les fumées possèdent déjà un pouvoir d'initiation qui s'exerce positivement sur des intervalles de plusieurs centimètres, le rôle des particules est alors inapparent.

3443. Essais de confirmation.

Il est possible de confirmer par des essais comparatifs que l'impulsion de fumées est la responsable principale de l'initiation de la charge réceptrice, et que le seuil de transmission est le plus important lorsque le bout récepteur est une extrémité d'origine, non seulement M mais aussi B ou H.

1°) Comme nous l'avons fait précédemment (cf. 33421), on peut donner au bout initiateur N une for-

me concave dont l'effet de charge creuse accélère les fumées suivant un dard central. On obtient ainsi avec un même lot d'explosifs, les seuils de transmission donnés au tableau XXXII.

Il est clair que le fait de hâter et concentrer l'attaque des fumées sur le bout récepteur, augmente la probabilité de transmission.

2°) Les résultats du tableau XXXIII parlent d'eux-mêmes :

On voit entre autres que le remplacement du bout N récepteur par un bout H ou B augmente la probabilité de transmission. Nous complétons les résultats du tableau XXXIII en signalant que les seuils B 100 g/B et H 100 g/H sont tous deux de 30 mm. On conclut que la performance enregistrée avec les diverses orientations de bouts industriels est pratiquement constante.

3444. Essais spéciaux.

Afin d'épuiser la question de la probabilité de transmission entre cartouches mises en œuvre dans leur état d'origine, nous avons refait une série d'essais en ne distinguant plus les orientations des cartouches (bouts H et B fournis par l'encartouchage mécanique), afin d'établir le seuil des six transmissions successives ainsi que la probabilité de transmission pour des intervalles d'air supérieurs au seuil. Nous avons trouvé (tableau XXXIV) :

Donc, dès un intervalle un peu supérieur au seuil, la probabilité de transmission est nulle.

Pour nous rendre compte de l'effet que pourrait éventuellement avoir un confinement plus étendu latéralement que celui du tube d'acier de diamètres

TABLEAU XXXIII.

Intervalle d'air <i>e</i> mm	En tube \varnothing 40 mm, avec $r = 0,563$				
	\varnothing 30 mm N 100 g/N	\varnothing 30 mm B 100 g/N	\varnothing 30 mm H 100 g/N	\varnothing 30 mm B 100 g/H	\varnothing 30 mm H 100 g/B
70					—
60					+ + — —
50				—	+ + — + —
40				+ — — —	+ + + + —
35			—		+ + + + + +
30		—	+ + +	+ + + + + +	
25		+ —			
20		+ — —			
15	—	+ + +			
10	— — +				
5	+ + +				
Seuil D mm	5	15	30	30	35



TABLEAU XXXIV.

Intervalle d'air <i>e</i> cm	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	35	40
En tube \varnothing 40 mm $r = 0,563$ \varnothing 30 mm 100 g/100 g	+ + — — — — — — — — — — — — —	+ — —	+ +											

intérieur 40 et extérieur 76 mm, soit de 18 mm d'épaisseur de paroi, nous avons effectué des essais de transmission pour l'exécution desquels le tube

est enterré dans une fosse sous 25 cm de sable damé au lieu d'être simplement posé sur le sol. Les performances enregistrées sont données au tableau XXXV.

TABLEAU XXXV.

Intervalle d'air <i>e</i> cm	En tube \varnothing 40 mm			
	$r = 0,563$		$r = 1$	
	Tube posé \varnothing 30 mm 100 g/100 g	Tube enterré \varnothing 30 mm 100 g/100 g	Tube posé \varnothing 40 mm 100 g/100 g	Tube enterré \varnothing 40 mm 100 g/100 g
7	—	—		—
6	—	+ + —	— + —	+ + +
5	— —	+ + + + — —	+ — + + +	+
4	+ — +		+ + +	
3	+ + + + + +			
Seuil D cm	3	4 max.	4	6 max.

Il semble donc y avoir une légère augmentation de la probabilité de transmission, sans que l'ordre de grandeur du seuil soit pour autant fondamentalement modifié.

3445. Conclusions.

Des essais qui précèdent, il résulte qu'en confinement fort réalisé sans solution de continuité, la transmission de la détonation à travers un intervalle d'air entre charges initiatrice et réceptrice est principalement assurée par l'impulsion des fumées provenant de la réaction complète.

Le pouvoir initiateur des fumées peut, en cas de déficience, être soutenu par l'effet mécanique des particules y incluses. Quant à l'impulsion de choc, à partir d'un intervalle de l'ordre du centimètre, elle ne parvient plus à initier les tranches explosives atteintes, mais au contraire elle exerce une action désensibilisante par compression du bout récepteur. Ce dernier, selon sa nature, est plus sensible à l'initiation par les fumées lorsqu'il comporte les plis en papier de la fermeture d'origine, au point de procurer des distances de transmission nettement plus élevées, notamment lorsque l'impulsion des fumées est sans cela peu efficace.

Le facteur principal déterminant le seuil de transmission est le rapport r de la section explosive à la section du confinement : r doit atteindre au moins 0,75 pour que la détonation puisse se transmettre à travers de forts intervalles. Viennent ensuite, dans l'ordre des influences décroissantes, le diamètre des charges et l'importance de la charge initiatrice.

Dans le cas le plus favorable, la détonation peut se réinitier au delà d'un intervalle d'un décimètre. Des transmissions sur plus grandes distances n'ont pas été constatées.

345. Transmission à travers l'air en confinement interrompu.

La charge réceptrice est placée au-delà de l'interruption du confinement.

Le dispositif expérimental est celui représenté à la figure 28, sauf que la cible, au lieu d'une feuille de zinc, est constituée d'une botte de 24 cartouches présentant des bouts N juxtaposés. Parallèlement aux constatations expérimentales sur la présence ou l'absence des particules (cf. 341), lorsque l'extrémité de la charge initiatrice orientée vers la cible est un bout H, la botte de cartouches réceptrices explose si le pointage est correct. Il n'y a pas d'explosion de la cible lorsque le bout initiateur est un bout N.

On reconnaît ici la sensibilité à l'initiation par particules, lorsque ces dernières devancent le front de choc et les fumées dans leur progression suivant l'axe de la charge initiatrice (cf. 343, dernier alinéa).

Un tel phénomène ne présente évidemment, au point de vue pratique, qu'un intérêt très secondaire.

346. Transmission à travers un intercalaire solide.

L'intervalle entre les charges initiatrice et réceptrice est occupé par de la matière solide (barrière). Le dispositif expérimental est le même que celui représenté à la figure 25, placé en outre dans un confinement fort (résistant à l'explosion).

Rappelons qu'à l'air libre, on enregistre avec l'explosif C₁ le raté systématique de transmission à partir d'une barrière de (cf. 3351) :

- 5 mm d'acier ;
- 10 mm d'argile comprimée ;
- 15 mm de charbon menu ou de sable gros très tassé.

En tube d'acier de 34 mm de diamètre intérieur et 18 mm d'épaisseur de paroi, contenant entièrement une charge de 30 mm de diamètre et 50 cm de longueur séparée en deux parties égales par l'intercalaire solide (200 g/200 g), ces barrières s'établissent respectivement à :

- 5 mm d'acier ;
- 10 mm d'argile comprimée ;
- 50 mm de charbon menu ou sable gros très tassé.

La barrière de matière inerte pulvérulente s'établit également à 50 mm lorsque les essais sont menés dans un fourneau d'acier à parois très épaisses (25 cm), avec longs bourrages d'argile de part et d'autre des charges.

On conclut de ces essais qu'il convient de distinguer la barrière de matière cohérente de celle qui est pulvérulente. La première ne subit que de très petites déformations de façon telle qu'elle répartit la compression sur le bout récepteur, sans guère absorber l'impulsion de choc : d'où désensibilisation profonde de la charge réceptrice, dans laquelle se développent par compression des couches denses non activables. La désensibilisation est plus accusée avec l'acier qu'avec l'argile comprimée, malgré tout plus déformable. Les barrières de 5 et 10 mm respectivement sont les mêmes qu'à l'air libre, c'est-à-dire que l'impulsion de fumées ne peut prendre la relève d'une impulsion de choc rendue insuffisante au niveau du bout récepteur. La barrière de matière pulvérulente est quant à elle capable d'absorber par déformation assez du travail de compression que pour garantir suffisamment le bout récepteur d'une désensibilisation trop avancée par effet de choc. Les fumées peuvent alors exercer plus favorablement leur pouvoir initiateur. En somme, l'intercalaire pulvérulent protège le bout récepteur N de la compression, au même titre que les plis de papier fermant la cartouche (bout H, B ou M), d'où une transmission

possible à travers un intercalaire du même ordre de grandeur que le seuil d'intervalle d'air (transmission assurée pour 30-40 mm d'air ou de pulvérulent inerte entre charges de 30 mm de diamètre, placées dans un confinement fort de 40 mm de diamètre intérieur).

347. Conclusions.

L'étude de la transmission en confinement fort montre la différence entre les processus de transmission intervenant d'une part à l'air libre ou en confinement léger, et d'autre part sous confinement résistant à l'explosion (chambre restant à volume constant pendant un délai suffisamment long).

Cette différence provient d'abord de ce que, dans ce dernier cas, la réaction des explosifs à ions échan-

gés très sélectifs est plus complète, alors qu'elle n'est que très partielle à l'air libre ou en confinement léger ; ensuite de l'influence du confinement sur la position relative des agents d'initiation : le front de choc précède toujours le front de fumées, dans lesquelles les particules solides restent englobées. En confinement résistant, les transmissions sur longue distance n'apparaissent qu'en cas de solution de continuité dans le corps confinant, à l'endroit de l'intervalle entre charges : dans ce cas uniquement, les particules peuvent devancer les autres agents d'initiation, dont la progression est freinée. Pour obtenir une bonne performance de transmission en confinement continu, il y a intérêt à opérer avec des charges de fort diamètre remplissant aussi bien que possible la section du cylindre confinant.

4. SECURITE AU GRISOU ET AUX POUSSIÈRES

41. SECURITE AU GRISOU

L'explosif est éprouvé en atmosphère grisouteuse dans une galerie métallique de forme cylindrique ayant 1,60 m de diamètre intérieur et comportant une chambre d'explosion de 5 m de longueur, limitée d'un côté au moyen d'un solide fond d'acier, et de l'autre par une paroi en papier renouvelée à chaque tir (cf. figure 35 donnant, pour la galerie d'épreuve en service à l'Institut National des Mines, à Paturages, telle qu'elle est équipée depuis 1960 [37], une vue schématique de la chambre, avec coupe longitudinale partielle à partir du fond d'acier). Les tirs que nous rapportons sont aussi effectués dans la galerie expérimentale que la S.A.

Poudreries Réunies de Belgique a établie à sa dynamiterie de Balen, sur le modèle des installations en service à la station d'essais de Dortmund-Derne [38]. De cette façon, nous disposons de résultats obtenus, en application d'un même principe d'épreuve, dans des galeries différentes et par des opérateurs distincts.

La chambre d'explosion limite un volume de quelque 10 m³, empli d'un mélange homogène air-grisou à 9 % environ de gaz de mine. A noter que l'atmosphère inflammable est contenue entre parois maintenues propres et sèches, ceci notamment grâce au chauffage de la chambre et aux inflammations de grisou provoquées entre les tirs (flambages). Sont également bien propres et sèches toutes les parois

COUPE TRANSVERSALE A-B

COUPE LONGITUDINALE SUIVANT C-D

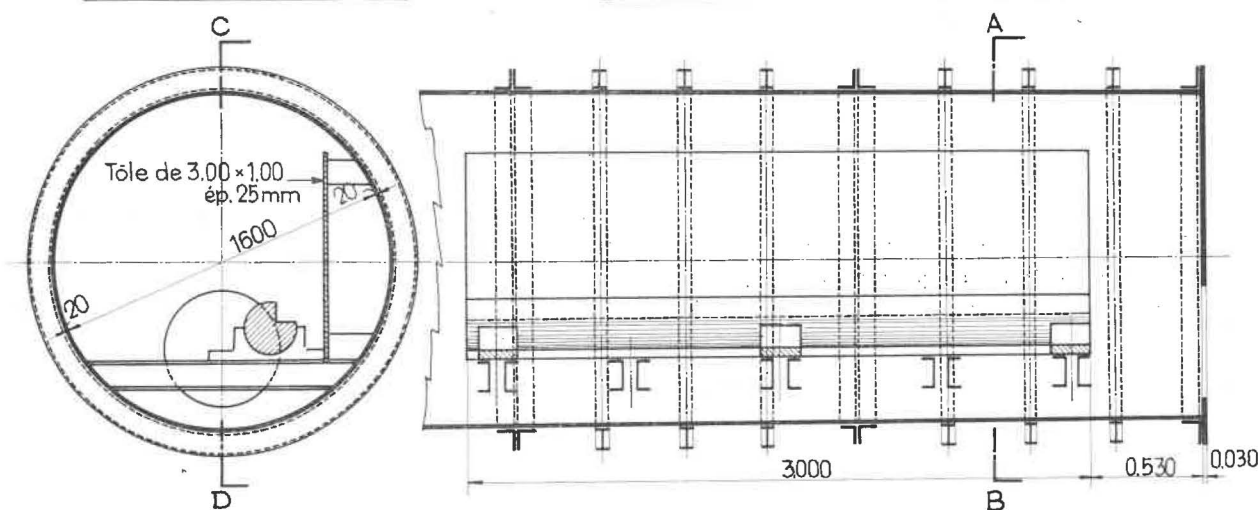


Fig. 35.

en contact avec le mélange gazeux contenu dans la chambre d'explosion (plaque de choc, faces du mortier d'angle, etc.).

411. Tir d'angle.

Il s'agit du dispositif expérimental dont il a déjà été question (cf. 12 et fig. 1).

Le détail de la réalisation est repris à la figure 35 également : mortier d'angle de 3 m de longueur reposant sur un poutrellage transversal auquel il est boulonné, en vis-à-vis d'une paroi de choc en acier de 3 m de longueur et 1 m de hauteur, solidement maintenue en position verticale. La distance d à la paroi de choc est réglée à 20 cm.

Les cartouches à éprouver ont, sauf indication contraire, 30 mm de diamètre nominal et sont disposées dans la rainure ouverte à 90°, en file simple continue commençant et finissant à égale distance

des extrémités du mortier d'angle. Le détonateur n° 8 d'amorçage est généralement placé dans la cartouche la plus proche du fond d'acier.

Pour chaque tir, on donne le poids P et la longueur L de la charge. On appelle charge-limite CHL la charge à partir de laquelle toute augmentation de la quantité d'explosif mise en œuvre est susceptible de déclencher une inflammation, étant entendu que rien de défavorable n'est observé en cas de diminution à partir de CHL. D'autre part, si aucune inflammation n'a été enregistrée quelle que soit la charge, CHL désigne alors la plus haute charge essayée.

4111. Premiers résultats expérimentaux.

Nous avons soumis à l'épreuve du tir d'angle en grisou les divers explosifs étudiés au chapitre 2, et avons enregistré les résultats suivants (tableau XXXVI).

TABLEAU XXXVI.

Explosif		A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂	C ₃	A _{1b}
CHL	P	200 g	2200 g	2200 g	2200 g	2200 g	2200 g	2200 g	2200 g	2200 g
	L	24 cm	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m

Rappelons qu'au point de vue de la détonation, A₁ ne possède qu'une sélectivité transitoire, tandis que A_{1b} bénéficie d'une sélectivité quasi permanente, la sélectivité permanente étant l'apanage de A₂, A₃ ainsi que des formules des groupes B et C.

On constate que les explosifs à sélectivité permanente ou quasi permanente sont de sécurité, tandis que A₁ à sélectivité transitoire donne aisément des inflammations au tir d'angle.

4112. Interprétation des premiers résultats.

Les résultats consignés au tableau XXXVI trouvent leur explication dans la connaissance de la détonation développée au chapitre 2, y compris en ce qui concerne le mécanisme d'inflammation du grisou par un explosif de sélectivité insuffisante.

Déterminons ce qui peut différencier A₁ des autres formules :

1°) Le sensibilisateur, malgré sa grande puissance explosive, ne peut être mis en cause, puisque B₁ possède, au même titre que A₁, un taux de nitroglycéroglycol égal à 10 %.

On ne peut valablement prétendre que l'onde de détonation provoque à elle seule l'inflammation du grisou, car il existe des bicarbites de sécurité au tir d'angle dont la vitesse de détonation en 30 mm de diamètre atteint 1900 m/s. Une onde de choc pure est susceptible d'allumer le grisou en se réfléchissant sur une paroi plane dans un espace confiné, lorsque sa vitesse dépasse 800 m/s [39], mais, en conclusion de ses travaux expérimentaux, Giltaire fait lui-même remarquer qu'il n'en va pas nécessairement ainsi dans le cas d'une onde de détonation. L'expérience acquise avec les bicarbites, ainsi que la possibilité de réaliser des explosifs à ions échangés sûrs au grisou alors que leur vitesse de détonation se situe vers 1850 m/s (explosif S non mentionné précédemment), corroborent cette opinion.

En conclusion, avec le taux de 10 % de sensibilisateur, on ne dépasse pas la limite G₂ de concentration d'énergie en deçà de laquelle est assurée une sécurité absolue [5].

2°) Cependant, il ne suffit pas de considérer le taux de sensibilisateur seul. L'étude relatée au chapitre 2 montre qu'il faut y associer les taux d'additifs hydrofuges et tenir compte des natures respec-

tives de ces substances qui, parmi les économiseurs, sont en position privilégiée pour renforcer les effets du sensibilisateur. Un additif à haut potentiel d'oxydation est en fait capable de jouer un rôle identique à celui d'une teneur de quelques dixièmes pour cent de nitroglycérine.

Il est alors indispensable de diminuer le taux d'huile explosive si l'on veut maintenir l'énergie libérée par la détonation (énergie primaire) sous le niveau G_2 . Sinon, en conservant les 10 % de sensibilisateur liquide en présence d'un additif tel que celui désigné *u*, la concentration d'énergie est supérieure à G_2 et peut même franchir une limite G_1 au-delà de laquelle l'inflammation est inévitable.

3°) Dans le domaine compris entre G_1 et G_2 , le comportement au grisou est particulièrement influencé par l'absorption de chaleur que, par conduction et compression, les noyaux salins inertes soustraient au détriment de la chaleur de détonation effective. Un tel effet physique est capable d'éviter le dépassement de G_1 par appropriation granulométrique : c'est en cela uniquement que A_{1b} se différencie de A_1 .

4°) Il importe de déterminer le processus suivant lequel s'accomplit en tir d'angle le franchissement de G_1 , autrement dit de préciser comment, soumis à ces conditions de tir, l'explosif A_1 libère, à l'inverse des autres formules étudiées, le quantum énergétique critique pour l'inflammation du grisou. A cet effet, il est particulièrement intéressant de comparer cet explosif aux autres formules, et spécialement à A_{1b} , sous le rapport des produits gazeux de la détonation et des grains solides y englobés.

En 30 mm de diamètre, les ondes de détonation de A_1 et A_{1b} ont des caractéristiques très voisines, puisque :

- pour tous les explosifs étudiés, le rayon R_s à partir duquel est assuré le plein emploi des ressources énergétiques du sensibilisateur au bénéfice de la détonation, vaut $9 \pm 0,5$ mm ;
- les vitesses de détonation de 1970 et 1750 m/s qui distinguent A_1 et A_{1b} respectivement sont relativement proches, la différence étant encore moins sensible entre A_1 et l'explosif S cité au 1° ci-dessus, sûr au grisou et ayant en 30 mm de diamètre une vitesse de quelque 1850 m/s.

Evidemment, la zone de réaction de l'explosif A_1 possède indiscutablement les caractéristiques thermodynamiques les plus élevées de la série étudiée. Mais, surtout entre A_1 et A_{1b} ou S, les différences sont nécessairement limitées, de sorte que leurs répercussions sur les fumées, notamment au point de vue de la température, se nivellent rapidement par expansion avant impact sur la paroi de choc. D'ailleurs se poursuit pendant la détente un transfert d'énergie au détriment des fumées et au bénéfice

des grains solides soumis à entraînement visqueux. Selon l'explosif, ces grains se différencient sous deux aspects : leur énergie cinétique et leur état thermo-chimique. La vitesse des particules leur est impartie par les fumées, de sorte qu'elle se trouve vraisemblablement, par l'intermédiaire de la phase gazeuse, sous la dépendance des caractéristiques de la zone de réaction. Les mesures la situent généralement dans un ordre de grandeur de 700-900 m/s pour des formules de très haute sûreté [40, 41, 42]. Deffet et Vanden Berghe signalent néanmoins qu'une formule peut donner des particules de vitesse suffisamment limitée, sans pour cela posséder la charge-limite qui distingue la très haute sûreté. Dans ces conditions, on n'est pas certain que la limitation de la vitesse des particules, si elle est une condition nécessaire, puisse constituer aussi un critère suffisant de sécurité. Il reste à envisager l'état thermo-chimique et, sous ce rapport, nous sommes en mesure de souligner, compte tenu de l'étude de la détonation que nous avons faite au chapitre 2, combien A_1 se distingue fondamentalement de A_{1b} ainsi que de toutes les autres formules étudiées. Nous savons en effet (cf. 2111) que si le niveau partiel d'énergie E_p est suffisamment bas que pour obtenir la sélectivité quasi permanente, et mieux encore la sélectivité permanente, les activations déclenchées à la surface des grains salins en arrivent à être réduites à l'extrême, et qu'à ce stade ultime il est encore possible de régler le niveau thermique de l'échange de chaleur qui détermine un échauffement des grains, englobés un court moment dans la zone de réaction sans avoir à subir de décomposition profonde (cf. 21123). On conçoit que des particules trop activées et trop chaudes engendrent un risque d'inflammation du grisou, tandis que des grains salins presque indécomposés et suffisamment froids ne présentent aucun danger.

C'est dans ce sens que les résultats repris au tableau XXXVI établissent un parallélisme rigoureux entre l'activation des sels telle qu'elle résulte de la détonation et leur pouvoir inflammatoire vis-à-vis du grisou. Une activation profonde se reflète dans la capacité de donner lieu à des réactions susceptibles de renforcer la détonation (formule de sélectivité transitoire capable de fortes augmentations de vitesse de détonation en très gros diamètres), d'où, lors de la détonation avec expansion libre en milieu grisouteux, possibilité de réactions tardives encore dangereuses. Dès que, en raison d'une activation toute superficielle, les économiseurs ne peuvent renforcer la détonation que dans une mesure très modérée, voire presque nulle, la sécurité au grisou est assurée : sélectivité permanente ou quasi permanente et endiguement suffisant des réactions tardives, même dans les conditions du tir d'angle en grisou. On constate que le parallélisme dans les effets relève d'une identité de la cause.

4113. Confirmations expérimentales de l'interprétation.

1°) Concentrons notre attention sur un explosif à sélectivité permanente, par exemple sur la formule C_1 . Sa courbe de détonation (cf. fig. 14 et 15) nous indique un régime maximal atteint déjà en diamètre de 30 mm. Par conséquent, en 35 ou 40 mm par exemple, la détonation s'établit identiquement au dit régime maximal et il est possible que la sécurité au grisou se maintienne, pour autant qu'une augmentation de 16,65 % ou 33,33 % du diamètre ne provoque déjà une trop forte concentration d'énergie dans la rainure du mortier d'angle.

On est passé à l'épreuve expérimentale et on a constaté qu'effectivement, la charge limite CHL tant en 35 qu'en 40 mm de diamètre, est supérieure à $L = 3$ m (supérieure à $P = 2600$ g en 35 mm et 3200 g en 40 mm). Afin de rechercher le diamètre à partir duquel la concentration d'énergie devient dangereuse, nous avons effectué quelques tirs au moyen de cartouches ayant 60 mm de diamètre, c'est-à-dire un très gros diamètre qu'il n'est pas question d'utiliser en exploitation minière. On a opéré avec des charges pesant 2100, 2800, 3000 et 3500 g.

Sur sept tirs, on a obtenu une inflammation qui s'est produite à 3000 g.

Ces essais montrent la grande marge de sécurité qui est liée à la mise en œuvre de l'explosif C_1 en diamètres industriels (25 à 40 mm). Ils établissent également une propriété particulière de l'explosif, que nous avons augurée par l'étude de la détonation, à savoir le comportement au grisou bien défini dans toute la gamme des diamètres industriels.

Ce dernier résultat est d'autant plus intéressant que, généralement, les explosifs classiques ont hors confinement une tenue au grisou très variable avec le diamètre de la charge [43].

2°) Le parallélisme remarquable constaté entre le phénomène de détonation à sélectivité permanente et la sécurité au grisou, associé à nos conclusions quant à la nature des agents d'inflammation, va nous permettre d'élucider une question qui était jusqu'ici restée pendante.

Dans une très intéressante publication relative aux explosifs à ions échangés [44], Lebrun et Waterlot exposent les grandes lignes du travail par lequel le Service des Etudes de la S.A. Poudreries Réunies de Belgique est arrivé à mettre au point et développer un type de formule possédant les caractéristiques de la très haute sûreté. Ces expérimentateurs se sont trouvés confrontés avec une double difficulté : d'abord débrouiller les facteurs propres à assurer des tirs d'épreuve constituant un critère reproductible de haute sûreté, ensuite déterminer un type de formule satisfaisant au dit critère.

Le premier point a été réglé en décelant l'importance des facteurs h , p et t en ce qui concerne la sévérité de l'épreuve (cf. fig. 36), les conditions $h = 80$ cm, $p = 65$ cm et $t = 4,5$ cm étant plus sévères que lorsque h et t ont des valeurs supérieures à celles citées.

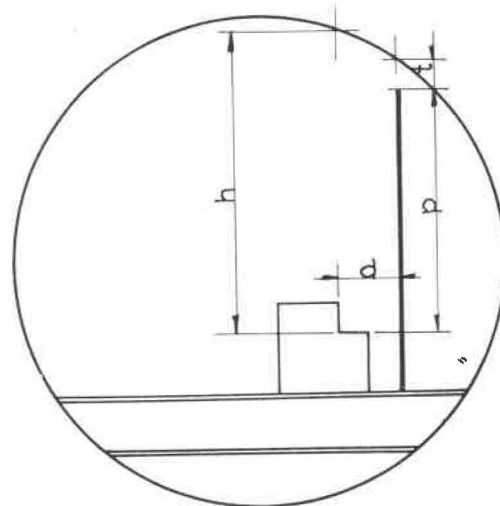


Fig. 36.

Dans la galerie type Derne qui existe à Balen (cf. 31), on a : $h = 100$ cm, $p = 75$ cm, $t = 12$ cm. À Paturages, les caractéristiques sont : $h = 100$ cm, $p = 80$ cm, $t = 11$ cm.

L'explosif D dont question dans la publication citée ci-dessus, enflamme à la galerie de Derne ($h = 100$ cm, $p = 80$ cm, $t = 8$ cm) déjà à la charge de 300 g. Avec t petit (4,5 cm), il n'enflammait à Balen à faible charge que si $h = 80$ cm ; pour $h = 100$ cm, la charge-limite était plus élevée : 800 g dans un cas, 1500 g dans un autre, voire même 2200 g (cf. tableau 5, p. 93 de l'ouvrage cité 44).

Quelle est la cause de pareille anomalie ?

Nous avons été mis sur la voie de la solution à ce problème par la réponse que les auteurs ont faite à une de nos questions, nous permettant ainsi de concevoir, puis de vérifier la cause des non-inflammations anormales. M. Waterlot nous a assurés que les essais relatés avaient été effectués pour la plupart à l'ancienne galerie de Balen, le mortier d'angle reposant non sur un poutrellage (cf. 411) mais sur un plancher métallique occupant toute la largeur de la galerie (berceau). Ce dispositif ancien a depuis lors été enlevé à Balen, ainsi qu'en témoignent les photographies [44], de même qu'à Paturages en 1960 [37].

Devant cette révélation, nous avons tenu le raisonnement suivant :

1°) Si l'explosif est peu sélectif, sa détonation au mortier d'angle envoie, dans toutes les directions

radiales comprises dans le dièdre de la rainure, des particules activées susceptibles de réagir exothermiquement au hasard des rencontres entre combustibles et combustibles. Les réflexions sur la paroi de choc sont dangereuses quel que soit l'angle d'incidence, même après une trajectoire relativement longue. Des germes d'inflammation peuvent naître dans n'importe quelle zone de la chambre d'explosion, d'où une grande probabilité de voir se développer une inflammation généralisée.

2°) Si on considère un explosif de haute sélectivité, quelle que soit la direction radiale considérée à partir de la file de cartouches, les particules projetées ne possèdent pas à l'origine une activation suffisante que pour donner lieu à réactions tardives, y compris au terme des trajectoires frappant la paroi de choc à incidence normale ou quasi normale. C'est cependant dans la zone des réflexions normales sur la paroi de choc, c'est-à-dire dans l'entrefer mortier-paroi, que la probabilité de rencontres entre grains activés est maximale, et que risque d'être franchie le plus facilement, par accumulation locale de réactions tardives, la concentration G_1 d'énergie incompatible avec la sécurité au grisou.

3°) Quant aux explosifs à sélectivité transitoire tel que A_1 , dont la charge-limite est actuellement à Balen, aussi bien en ancienne qu'en nouvelle galerie, de 200 g maximum pour $h = 100$ cm et t petit lorsque les mortiers d'angle reposent sur poutrelles, on a vu (cf. 4112, 4°) que la libération d'énergie primaire liée à la détonation en tir d'angle ne déclenche pas l'inflammation directe du grisou, mais que les réactions tardives dues aux particules entrent en ligne de compte. L'activation résultant de la détonation est intermédiaire entre les cas de l'explosif non sélectif et de la formule très sélective envisagés aux 1° et 2° ci-dessus. En conséquence, les grains envoyés sur les trajectoires les plus longues, frappant la paroi de choc et y rebondissant sous un angle plus ou moins aigu, peuvent ne pas donner lieu à d'importantes libérations d'énergie dans leur domaine d'action, qui se situe plutôt dans la moitié supérieure de la chambre d'explosion. Par contre, les grains frappant la paroi sous un angle proche de 90° sont les plus susceptibles, compte tenu de la géométrie du dispositif de tir, de développer plus que le quorum G_1 nécessaire à l'inflammation, et ce uniquement en des points de l'entrefer.

Mais, comme il s'agit de réactions tardives, le franchissement de G_1 se trouve déphasé par rapport au moment de la détonation, qui dure au plus deux millisecondes, et ce franchissement n'est atteint que dans une zone à coup sûr balayée par les fumées primaires en expansion. Vu l'orientation de la rainure, ces fumées sont plutôt dirigées vers le haut et brassent le mélange grisouteux inflammable en formant momentanément, dans l'entrefer, écran entre le haut et le bas de la chambre d'explosion. Si l'en-

trefer est fermé vers le bas par une paroi métallique (berceau), les réactions tardives s'y accomplissent en espace clos à l'abri de l'écran de fumées et, en cas d'inflammation locale, celle-ci peut ne pas gagner la masse grisouteuse.

Si l'entrefer est ouvert en direction du bas (poutrelles), il est constamment alimenté en mélange inflammable et tout germe d'inflammation peut se développer et s'étendre à la masse grisouteuse. Ce qui précède est compatible avec les enregistrements filmés du Docteur Eitz [45, 46] ; cependant, pour confirmer notre façon de voir, nous avons tiré l'explosif A_1 en ancienne galerie, le mortier de section carrée reposant cette fois sur berceau. Pour $h = 100$ cm, la charge-limite est montée jusqu'à 1200 g (1,50 m), au lieu donc de 200 g en mortier sur poutrelles. Pour $h = 80$ cm, elle n'a pas dépassé 300 g (37,5 cm).

Ces essais confirment du même coup l'inflammation par réactions tardives, à l'exclusion d'autres agents, et la sévérité des conditions $h = 80$ cm avec t petit (quelques centimètres), telle qu'elle avait été décelée par Lebrun et Waterlot.

4114. Autres résultats expérimentaux.

Compte tenu de l'importance des facteurs h et t au point de vue de la sévérité du tir d'angle, nous sommes préoccupés de savoir si, pour un explosif à sélectivité permanente tel que C_1 , la rigueur de l'épreuve ne pouvait être renforcée au point d'en arriver à des inflammations du grisou.

A cet effet, nous avons opéré avec deux parois de choc, formant un dièdre droit à faces parallèles à celles de la rainure du mortier d'angle (cf. fig. 37). Les faces verticales sont distantes de $d = 20$ cm, tandis que les faces horizontales sont écartées de $h' = 34$ ou 54 cm, suivant réglage à deux positions.

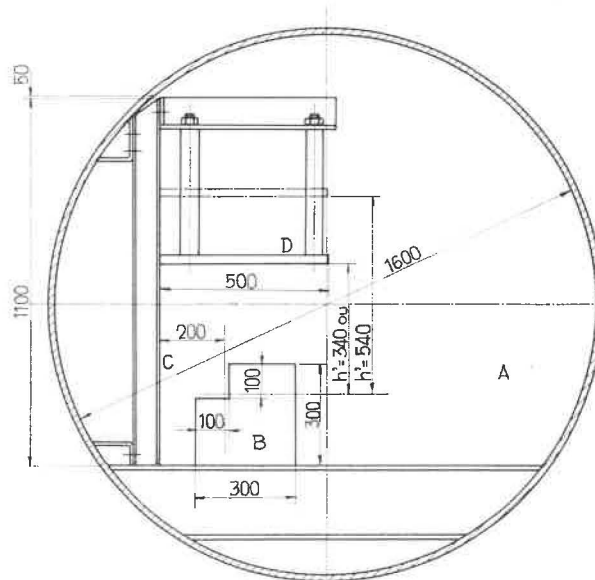


Fig. 37.

On conçoit que ces conditions de tir soient particulièrement favorables au développement des réactions tardives, puisque d'une part la détonation sera déclenchée dans un semi-confinement plus marqué que dans le cas d'une simple paroi de choc, et que d'autre part la quasi-totalité des particules frappera les parois sous une incidence normale.

L'explosif C_1 , tiré en charges de 30, 35 et 40 mm de diamètres respectifs, n'a provoqué aucune inflammation, même à la charge de 2200 g, en dépit du soin apporté à la réalisation de l'épreuve la plus sévère.

412. Tir débouillant.

Comme nous l'avons déjà rappelé (cf. 16), le coup de mine qui fait canon ne doit pas laisser place à un risque apparent d'inflammation.

Il ne manque pas d'explosifs classiques capables d'une intéressante performance lorsqu'ils sont tirés au mortier cylindrique en acier comportant axialement un fourneau dont la gueule débouche dans la chambre à grisou, grâce à un orifice ménagé dans le fond d'acier de la galerie expérimentale (cf. fig. 35 et 38).

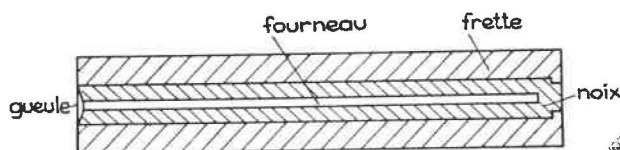


Fig. 38.

Pour un tel essai, on dit que l'amorçage est antérieur lorsque le détonateur inséré dans une des extrémités de la charge explosive, se trouve au plus près de la gueule du fourneau expérimental ; lorsque le détonateur se trouve au plus profond du mortier cylindrique, l'amorçage est dit postérieur.

Un explosif tel que C_1 , tiré en cartouches de 30 mm de diamètre dans le fourneau de 2 m de profondeur et 40 mm de diamètre, ne provoque pas d'inflammation jusqu'à la charge maximale de 1400 g y compris, que l'amorçage soit antérieur ou postérieur [47].

Une sécurité ainsi affirmée également dans le cas de la réaction complète déclenchée par le confinement résistant en acier, est due à l'importante formation de sel naissant à pouvoir refroidissant optimal (cf. 16). On verra en effet au chapitre 5 qu'il se forme à l'état moléculaire, dans les fumées, environ 400 g de chlorure alcalin par kilogramme d'explosif mis en œuvre.

Ceci signifie également que la mine non bourrée faisant canon ne projette pas dans la chambre à grisou de particules en réaction susceptibles de constituer des germes inflammatoires sur grandes distan-

ces, comme cela se produit dans le cas d'explosifs de sûreté relative [48]. A ce propos, rappelons notre remarque (cf. 21124) au sujet du fait que les explosifs à ions échangés conservent leur détonabilité nonobstant la grande finesse des sels minéraux. Cette particularité est d'un grand avantage en cas de tir débouillant consécutif à la réaction complète de l'explosif, car des grains fins sont susceptibles de se gazéifier rapidement dans le confinement du fourneau. On conçoit ainsi que, par un heureux concours de circonstances, la granulométrie indispensable à la sélectivité permanente de la détonation et à la sécurité au tir d'angle, est également favorable à la sécurité au tir débouillant. Il s'agit ici d'un processus de décomposition conforme aux idées de Beyling et Schultze-Rhonhof, qui en pareille matière recommandent une gazéification aussi rapide que possible de tous les constituants de l'explosif, sans imbrûlés [49].

On sait qu'un coup de mine débouillant est davantage susceptible d'enflammer le grisou si la bouche du fourneau comporte un léger bourrage, ceci par rapport aux cas du bourrage important ou de l'absence de bourrage. L'épreuve française des explosifs de sûreté consiste à tirer en mortier court (fourneau de 34 cm de longueur et 38 mm de diamètre) une cartouche de 30 cm de longueur et 30 mm de diamètre, amorcée postérieurement, avec bourrage au moyen d'une plaquette d'acier de 1 à 3 mm d'épaisseur [50].

Le processus d'inflammation qui peut être favorisé dans ce cas est bien connu : dans le cas des tirs sans bourrage, si une quelconque inflammation peut avoir lieu, il doit y avoir, dans le dard de gaz chauds craché par le fourneau, un ou plusieurs points inflammatoires échappant à l'action extinctrice des produits gazeux déjà refroidis par expansion. La persistance d'un ou plusieurs points chauds dans le dard est la condition nécessaire de croissance d'une inflammation jusqu'au stade ultime de sa généralisation. L'efficacité des gaz sombres refroidis par expansion, dans leur course pour rattraper et englober le volume à haute température siège des réactions, détermine s'il y aura ou non inflammation généralisée. Dans le cas des tirs avec bourrage, il se développe à la bouche du fourneau un aspect géométrique similaire, avec la différence que la présence du bourrage accentue la formation du dard. En général cependant, un accroissement du poids du bourrage augmente l'effet de masse refroidissante et donc renforce l'action extinctrice. Un bourrage mince constitue un cas spécial, car il se produit, sans renforcement des agents extincteurs, un effet d'orifice accusé au moment du percement, de sorte que la vitesse de translation du dard s'en trouve augmentée. Cette quantité supplémentaire de vitesse impartie au dard rend celui-ci capable d'échapper hors de portée des gaz subséquents refroidis par ex-

pansion. De ce fait, le dard porteur de germes d'inflammation, animé d'une grande vitesse, peut esquiver l'extinction, si bien qu'en conclusion, un léger bourrage présente plus de risques que l'absence de bourrage [51].

Nous avons tiré en cartouches de 30 mm de diamètre dans un fourneau de 60 cm de profondeur et 32 mm de diamètre, la charge étant amorcée postérieurement et affleurant à 2 cm de la bouche du

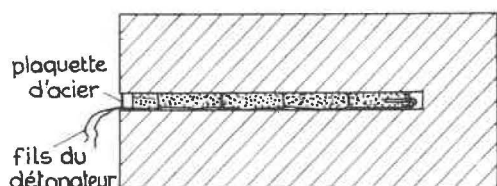


Fig. 39.

mortier, laquelle est obturée, sans calage ni frottement dur, par une plaquette d'acier de 1 mm d'épaisseur (cf. fig. 39), un explosif tel que A_{1b} ou B₁, sans obtenir d'inflammation à la charge maximale de 450 g pouvant être utilisée dans ces conditions [37].

Nous avons alors soumis l'explosif C₁ à des épreuves analogues, effectuées cette fois en mortier long ayant un fourneau de 1,90 m de profondeur et 32 mm de diamètre.

Nous avons pu ainsi opérer sur des charges atteignant 1500 g, en ménageant toujours un espace de 2 cm entre la charge et la plaquette (d'acier, de schiste ou d'argile - cf. fig. 38).

Le tableau XXXVII rend compte des résultats obtenus.

TABLEAU XXXVII.

Charge	Plaquette	Cartouches paraffinées	Cartouches non paraffinées
900 g	acier 1 mm	o o o o o o o o o o	— —
900 g	schiste 4 mm	o o o o o o o o o o	— —
200 g	argile 8 mm	o o	o o
300 g	»	o o	o o
400 g	»	o o	o o
500 g	»	o o	o o
600 g	»	o o	o o
700 g	»	o o	o o
800 g	»	o o	o o
900 g	»	o o o + o o o o o o	o o
1000 g	»	o o + o o	o o
1100 g	»	+ o o o	o o
1200 g	»	+ + o o o o o	o o o o
1300 g	»	o o	o o o o o
1400 g	»	o o	o o
1500 g	»	+ + o o o o o o + o	o o o o o o o o o o

N.B. — Le signe + signifie inflammation, le signe 0 non-inflammation.
 Les cartouches non paraffinées ne comportent que l'enveloppe en papier, les paraffinées ont en outre été trempées un court moment dans un bain de paraffine en fusion.

Les inflammations constatées sont dues à la paraffine qui ne trouve pas dans le fourneau de 32 mm de diamètre, surtout lorsqu'il est occupé par une charge suffisamment longue, assez d'oxygène disponible que pour brûler complètement et rapidement. D'où la persistance de points chauds dans le dard qui se forme au percement de la plaquette.

En tirant les cartouches paraffinées dans un mortier long ayant un fourneau de 40 mm de diamètre, les inflammations ne se produisent plus, y compris

à la charge maximale de 1500 g, en raison de la quantité d'air présente dans le fourneau.

Des essais complémentaires, effectués au mortier de 40 mm de diamètre au moyen d'explosif C₁ encartouché cette fois en diamètres de 35 et 40 mm, n'ont provoqué aucune inflammation, y compris à la charge maximale de 2200 g possible sur une longueur de 1,88 m avec des cartouches de 40 mm de diamètre, étant entendu que les cartouches ne sont pas paraffinées.

Nous avons ainsi établi expérimentalement qu'en ce qui concerne l'épreuve au grisou des explosifs à ions échangés, le tir débouillant voit sa sévérité renforcée par la présence d'une plaquette à la bouche du fourneau, notamment lorsqu'il s'agit d'une pastille d'argile ne dépassant pas 8 mm d'épaisseur.

La sévérité est maximale lorsque les cartouches occupent toute la section du fourneau, à tel point qu'en ce cas la présence de paraffine sur l'enveloppe des cartouches suffit pour déclencher des inflammations.

L'explosif C₁ en cartouches non paraffinées ne provoque pas d'inflammation, y compris à la charge maximale de 2200 g pouvant trouver place dans le mortier.

Remarque : Un explosif analogue à B₁ mais dont on a, par appropriation granulométrique, fixé la vitesse de détonation en 30 mm de diamètre au niveau de 1700 m/s environ, conserve une probabilité d'inflammation en cartouches non paraffinées, pour des charges supérieures à 1200 g, lorsque les cartouches occupent toute la section du fourneau d'épreuve.

Il faut comprendre que, dans ce cas, la granulométrie sensiblement plus grossière ne permet pas une gazéification assez rapide des constituants les plus lents à réagir, et qu'au percement de la plaquette, le dard peut parfois comporter assez de points chauds issus de l'explosif lui-même.

42. SECURITE AUX POUSSIERES CHARBONNEUSES

Les essais ont lieu avec le même matériel d'épreuve, la chambre d'explosion contenant une atmosphère inflammable constituée par la mise en suspension dans l'air de 2 kg de poussières de charbon titrant 30 % de matières volatiles et traversant le tamis de 6400 mailles/cm² (le tas de 2 kg est dispersé une seconde avant l'épreuve, par le tir d'une cartouche de 50 g d'explosif de sûreté y enfoncée).

Les mêmes précautions opératoires sont prises que pour les essais en grisou.

421. Tir d'angle.

Nous nous sommes évidemment bornés à éprouver en poussières les explosifs de sécurité au grisou.

Dans ces conditions, nous avons constaté que tous les explosifs au nitrate de sodium sont sûrs aux poussières, tandis que, parmi les formules au nitrate de potassium, seul C₁ ne donne pas d'inflammation. C₃ allume les poussières avec une fréquence élevée.

Force nous est d'admettre que, pour les formules au nitrate de potassium, le niveau partiel d'énergie

E_p suffisant pour la sécurité au grisou (limite supérieure repérée par une vitesse de détonation en 30 mm de diamètre de l'ordre de 1700 - 1800 m/s) n'est plus assez bas pour la sécurité aux poussières. Il faut en plus ne pas dépasser une limite E'_p, repérée par une vitesse de détonation en 30 mm de diamètre qui doit se situer vers 1500 m/s.

La recherche des causes d'une telle particularité est d'autant plus difficile que les caractéristiques thermochimiques des deux nitrates (sodium et potassium) sont très voisines. Cependant, il est bien connu que les mélanges nitrate de potassium-soufre-charbon de bois constituent les poudres noires les plus vives, tandis que le remplacement du salpêtre par le nitrate de sodium donne des poudres plus puissantes mais plus lentes [52]. Dans ces conditions, les grains activés de nitrate émis par le tir des explosifs à ions échangés en mortier rainuré, peuvent avoir une propension à entrer en réaction de combustion avec des grains de charbon ultra-fin, plus marquée dans le cas du potassium que dans le cas du sodium. Avec ce dernier, le niveau partiel E_p repéré, comme pour le grisou, par la vitesse de détonation de 1700 - 1800 m/s, est suffisant, tandis que dans le cas du potassium, le niveau partiel E'_p marquant la limite supérieure doit être repéré par la vitesse de 1500 m/s.

Nous avons construit de diverses manières des formules à ions échangés dont le niveau partiel d'énergie était réglé en vue d'un comportement prévu au grisou et aux poussières charbonneuses, et avons vérifié ce comportement en galerie expérimentale. Nous avons confirmé ainsi que, dans le cas d'une formule à sélectivité permanente ou quasi permanente dont le niveau partiel d'énergie est caractérisé par une vitesse de détonation à l'air libre ne dépassant pas ou ne dépassant guère 1800 m/s en cartouches de 30 mm de diamètre, la sécurité au tir d'angle en grisou est assurée, mais qu'en poussières, il convient de distinguer si la formule contient du nitrate de sodium ou du nitrate de potassium.

Dans la première éventualité, le risque d'inflammation des poussières n'existe pas. Dans la seconde, la probabilité d'inflammation vaut :

- 0,5 pour E_p repéré par 1700 m/s (4 tirs)
- 0,3 pour E_p repéré par 1600 m/s (10 tirs)
- 0,2 pour E_p repéré par 1540 m/s (10 tirs)
- 0 pour E_p repéré par 1400 ± 75 m/s (225 tirs).

La formule C₁, qui n'enflamme pas les poussières au tir d'angle lorsqu'elle est tirée en cartouches de 30 mm de diamètre jusqu'à la charge de 2200 g y compris, conserve cette performance en diamètres de 35 et 40 mm.

422. Tir débouillant.

Nous avons éprouvé dans ces conditions non seulement les formules de sécurité au tir d'angle, mais

encore celles qui, comme C_3 , sont de sécurité au grisou mais donnent au tir d'angle en poussières une probabilité d'inflammation de 0,3 en raison de la présence du nitrate de potassium et d'une détonation s'établissant en 30 mm de diamètre, vers 1600 m/s.

Il s'agit du coup débouillant simple tiré au mortier cylindrique en acier comportant un fourneau de 1,90 m de profondeur et 40 mm de diamètre. En plus de l'atmosphère poussiéreuse préparée comme dit ci-dessus (cf. 42), de la poussière de charbon est déposée dans le fourneau sur et devant la charge explosive.

Dans ces conditions, aucun tir n'a donné lieu à inflammation, pas même avec l'explosif C_3 . Ceci est dû au fait qu'en confinement, le nitrate de potassium réagit avec son partenaire salin le chlorure d'ammonium et n'est plus, à l'extérieur du fourneau, disponible pour oxyder les fines particules charbonneuses.

43. REMARQUE

Ce sont donc bien les particules émises par la détonation des explosifs à ions échangés qui sont principalement responsables des inflammations, notamment en tir d'angle. Cependant, comme nous l'avons rappelé au chapitre 3, une extrémité de cartouche se trouvant dans son état d'origine émet un jet de particules (cf. 332). On pourrait donc se demander si, dans ces conditions, il y a compatibilité entre le fait que, d'une part, un bout de cartouche d'explosif C_1 par exemple projeté, en tir d'angle notamment, beaucoup de grosses particules et, d'autre part, la constatation que ledit explosif C_1 se révèle intrinsèquement de très haute sécurité. Les deux phénomènes ne sont en réalité pas contradictoires. En effet, si l'on se réfère au mécanisme de formation du jet de particules en bout de cartouche (cf. 3321), on se rend compte que les projectiles proviennent des dernières couches d'explosif pulvérisé non atteint par la détonation et sont de ce fait des particules « froides ». Par contre, les grains salins émis latéralement ont, quant à eux, été passagèrement englobés dans la zone de réaction et constituent des particules « chaudes », susceptibles de réagir, surtout si leur énergie cinétique se transforme brutalement en chaleur dans une région d'accumulation où se trouve disponible, en tant que partenaire d'éventuelles réactions de combustion, du grisou ou de la poussière de charbon.

44. CONCLUSIONS

La sécurité au tir d'angle en grisou se concrétise très simplement dans le diagramme synthétisant l'étude de la détonation des explosifs à ions échangés (cf. fig. 22) : le domaine de la sélectivité per-

manente ainsi que la zone de transition caractérisant les formules à sélectivité quasi permanente, ont ensemble le privilège de contenir les formules de très haute sécurité.

Le même critère vaut pour la sécurité au tir d'angle en poussières lorsque l'explosif ne contient que du nitrate de sodium. Si le nitrate de potassium est introduit dans la formule, le domaine de sécurité totale se restreint à la sélectivité permanente avec niveau partiel d'énergie limité à E'_p , repéré par une vitesse de détonation maximale à l'air libre de l'ordre de 1500 m/s.

La sécurité au tir débouillant, élevée dans tous les cas, n'est totalement atteinte que par les formules dont la granulométrie assez fine, est favorable à une combustion complète aussi rapide que possible.

En conclusion, nous croyons particulièrement opportun de rappeler l'opinion formulée il y a plus de quarante ans par Emmanuel Lemaire : « La possibilité de réactions en arrière de l'onde avec ou sans l'intervention de l'oxygène de l'air, domine toute la question de l'explosif de sûreté » ; opinion complétée par l'aveu suivant : « Nous n'avons à ce jour que des indications très vagues sur la composition à donner à un explosif pour diminuer la durée des réactions en arrière de l'onde avec ou sans intervention de l'oxygène de l'air. Il y a là matière à d'intéressantes recherches. La suppression complète de ces réactions paraît impossible [53] ».

On se rend compte actuellement que le principe des ions échangés, prôné par Ahrens depuis bientôt trois lustres en vue précisément de la suppression des réactions tardives, a orienté la recherche vers la réalisation d'explosifs présentant simultanément deux caractéristiques en apparence peu conciliables : enraiment très marqué de la réaction des sels en cas d'explosion hors confinement, et gazéification aussi rapide que possible en vase clos.

Dans les deux cas extrêmes et par leur combinaison, dans les éventualités intermédiaires, la durée des réactions en arrière de l'onde est donc la plus courte possible, ainsi que Lemaire en avait prévu la nécessité.

L'explosif C_1 sur lequel nous avons fait porter le principal de notre attention, peut à bon droit être réputé de très haute sûreté, même lorsqu'il est amené à détoner dans les grandes éventualités de danger que la pratique minière a révélées au prix d'expériences souvent meurtrières.

Nul ne contestera cependant qu'il est néanmoins possible, en laboratoire, d'échafauder des conditions de tir susceptibles de mettre un tel explosif en défaut. Ainsi par exemple, le tir avec laminage des fumées (Schuss mit Schwadeneinengung) déjà cité comme très dangereux [38, 54]. Mais il s'agit là de circonstances extrêmes dont la probabilité pratique apparaît comme très réduite, et qui en tout cas n'ont jusqu'à présent pas été observées en chantier minier.

5. EFFET UTILE

51. CRITERE DE L'EFFET UTILE

Après avoir montré comment un explosif à ions échangés peut être rendu très sélectif et pourquoi sa détonation ne présente plus alors qu'un risque minimal d'inflammation du grisou ou des poussières charbonneuses, il reste à prouver que les formules de l'espèce ont un effet utile suffisant.

Selon Naoum [55], la puissance d'un explosif s'estime par son énergie spécifique f , laquelle, en tant que mesure thermodynamique de l'énergie du mouvement moléculaire dans les fumées de l'explosion, est une mesure de leur force d'expansion et par le fait même de la puissance explosive prévisible. On obtient alors aisément le niveau d'énergie E , c'est-à-dire l'énergie théoriquement disponible par unité de volume, en multipliant l'énergie spécifique par la densité apparente de la substance explosive. Pour les besoins de l'exploitation minière, le minimum requis est, ainsi que nous l'avons vu (cf. 12), de 33 m.t./litre.

Le calcul théorique se base ici sur les considérations suivantes : comme il ne s'agit pas d'explosifs sous-oxygénés, on peut admettre avec une bonne approximation que les produits d'explosion consistent entièrement en anhydride carbonique, vapeur d'eau et azote, la partie solide étant constituée de chlorure alcalin à l'état naissant [56, 57]. Au point de vue thermo-chimique, la réaction complète s'identifie à une combustion impliquant les seuls constituants de l'explosif, la chaleur dégagée servant à échauffer les produits de combustion à volume constant. L'annexe XI donne le détail des calculs pour deux formules, l'une au nitrate de potassium, l'autre au nitrate de sodium, sans additifs hydrofuges, la teneur en sensibilisateur liquide étant dans chaque case de 10 % en poids. Les chaleurs de formation utilisées sont celles données par Médard [58].

Le tableau XXXVIII résume les principales caractéristiques thermo-chimiques.

TABLEAU XXXVIII.

Caractéristiques (par kg d'explosif)	Formule avec K	Formule avec Na
Produits d'explosion (en moles)		
CO ₂	1,317	1,317
H ₂ O	12,901	14,251
N ₂	6,484	7,158
O ₂	2,916	3,283
chlorure alcalin	5,825	6,5
Balance-oxygène (en % du poids)	+ 9,3	+ 10,5
Chaleur d'explosion (en kcal)	299,9	310,6
Volume des gaz (en m ³ , aux conditions normales)	0,529	0,5826
Température d'explosion (°K)	1427	1369
Quantité de sel naissant (g)	434	380
Energie spécifique f (kg.m)	28564	30179

L'explosif étant encartouché à la densité apparente de 1,2 g/cm³, le niveau d'énergie s'établit à 34 m.t./litre pour la formule au potassium et 36 m.t./litre pour celle au sodium (d'après $E = f \cdot \Delta$).

Pour l'explosif C₁, on obtient de la même manière $E = 36,5$ m.t./litre, qui est aussi le niveau énergé-

tique global de C₂ et C₃, tous deux de même formule chimique que C₁, mais qui s'en différencient au point de vue de la détonation (cf. 21113 et 2112) par des niveaux partiels E_p plus élevés en raison des granulométries plus grossières de leurs constituants salins. Rappelons les vitesses de détonation en

30 mm de diamètre, lesquelles, ainsi que nous l'avons expliqué (cf. 214), permettent de repérer le palier de sélectivité permanente et le niveau partiel d'énergie :

C ₃	1615 m/s
C ₂	1525 m/s
C ₁	1470 m/s

Comme nous l'avons signalé précédemment (cf. 421), la formule C₁ a, selon l'échantillon de fabrication, une vitesse de détonation à l'air libre de 1400 ± 75 m/s. Dans la suite de l'exposé, nous allons plus spécialement comparer l'explosif C₂ à un échantillon C₁ détonant à 1400 m/s. Pour chacun d'eux, l'énergie spécifique est de 30,5 m.t/kg et le niveau d'énergie, comme dit plus haut, de 36,5 m.t/litre.

A titre de comparaison, signalons les caractéristiques suivantes de quelques explosifs :

Blasting 93/7	$f = 134$	m.t/kg
Aquadex 30	48,5	»
C ₁ , C ₂	30,5	»
Poudre noire	28	»
Bicarbite	13	»

52. ESSAIS CLASSIQUES DE PUISSANCE

Les fabricants d'explosifs ont l'habitude de déterminer la puissance de leurs produits au bloc de plomb (essai Trauzl) et au pendule balistique (*).

La méthode souvent utilisée pour le tir au bloc de plomb est celle à poids constant (10 g). Le détail des essais pratiqués sur les explosifs C₁ et C₂ est consigné à l'annexe XII.

Par rapport à l'acide picrique, on a trouvé :

0,23 pour C₁
et 0,24 pour C₂.

Au pendule balistique, l'estimation est faite par rapport à l'acide picrique et à la blasting-gelatine ; dans ce dernier cas, le résultat est indiqué RWS (relative weight strength). On a obtenu :

pour C₁, par rapport à l'acide picrique, 44,5 % et RWS = 32,8 % ;
pour C₂, par rapport à l'acide picrique, 73 % et RWS = 53,8 %.

On voit que l'essai Trauzl, plutôt défavorable, comme on sait, aux explosifs pulvérulents, ne différencie pratiquement pas C₁ de C₂.

Par contre, le pendule balistique donne des valeurs nettement différentes, à l'avantage de C₂ qui est de granulométrie plus grossière que C₁, et, de ce fait, possède une vitesse de détonation plus élevée (1525 contre 1400 m/s).

A notre avis, les épreuves au bloc de plomb et au pendule ne caractérisent pas d'une façon suffisamment précise l'effet utile des explosifs à ions échangés tels C₁ et C₂, parce qu'avec les modes opératoires imposés, les résultats enregistrés ne sauraient témoigner des possibilités énergétiques réelles de la réaction secondaire.

En effet, dans l'essai au bloc de plomb, le peu d'efficacité du bourrage de sable (simplement versé et non tassé) ne permet guère à l'explosion de s'achever à volume constant, de sorte qu'une mise à l'air prématurée de la chambre de réaction peut enrayer la gazéification des sels. C'est ainsi que pour C₁ et C₂, on obtient un évaseement net corrigé de 70 cm³ environ, assez proche du résultat fourni par la règle empirique suivant laquelle 1 % en poids de nitroglycérine assure 6 cm³ d'évasement ($6 \times 9,5 = 57$ cm³). Avec les explosifs très sélectifs, le bloc de plomb rend surtout compte de l'énergie libérée par la réaction primaire et n'enregistre qu'une partie réduite de la libération secondaire.

Au pendule balistique, le temps de confinement est de l'ordre de 7 millisecondes lorsqu'on opère avec un explosif à ions échangés très sélectif [8], mais par contre le degré de chargement (rapport du volume de la charge à celui de la chambre de tir) est vraiment petit (environ 5 %). Cette circonstance est très défavorable à la cinétique de la réaction secondaire en raison du fait que la pression thermo-chimique résultant de la réaction primaire est fort affaiblie par la détente inévitable dans une aussi grande chambre de tir. Dans ces conditions, l'épreuve avantage l'explosif dont le niveau partiel d'énergie est le plus élevé puisqu'alors une réaction primaire plus riche instaure de plus hautes températures et pressions et peut accélérer la réaction secondaire. C'est ainsi que C₂ est susceptible de libérer plus d'énergie que C₁ entre le moment de la mise à feu et celui de l'expulsion du boulet hors de la chambre de tir du pendule.

53. TIRS REELS

La mise en œuvre rationnelle de l'explosif C₁ doit à notre avis tenir particulièrement compte du mode de libération de l'énergie.

D'un point de vue général, on distingue trois modes principaux, bien illustrés par la représentation schématique du profil des pressions (fig. 40), due à Berthmann [59] :

1°) L'énergie est libérée presque complètement dans la zone de réaction, c'est-à-dire entre le front

(*) Les tirs ont été effectués au Centre de Recherches scientifiques et techniques pour l'Industrie des Produits explosifs, à Sterrebeek, par les soins de M. Crassaerts, préparateur-technicien, que nous remercions.

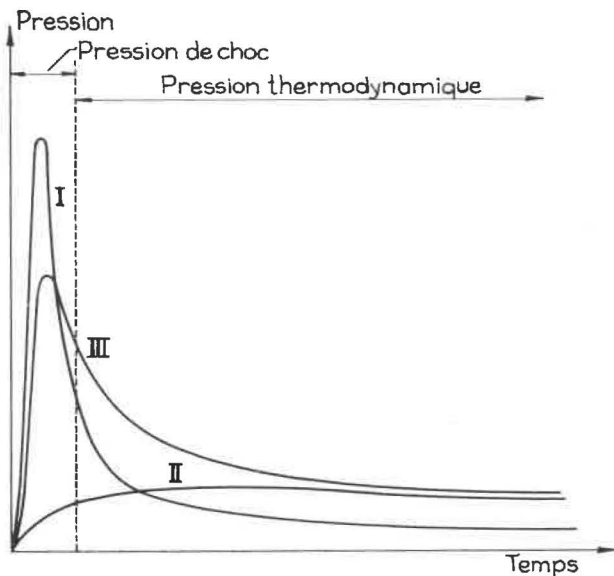


Fig. 40.

de détonation et le plan C - J (courbe I). C'est le cas des explosifs initiants ou des secondaires tels que la nitroglycérine, la penthrite.

2°) L'énergie est libérée suivant un régime déflagrant, sans formation d'une onde de détonation. Il s'agit par exemple de la combustion rapide de la poudre noire (courbe II).

3°) Entre ces cas extrêmes se placent les éventualités intermédiaires, dans lesquelles une partie seulement de la substance explosive se gazéifie dans la zone de réaction suivant le type de la courbe I, la décomposition ultérieure intéressant une autre partie de l'explosif d'après la courbe II. C'est ainsi que se comportent la plupart des explosifs industriels (courbe III).

Nous avons montré au chapitre 2 que l'énergie supportant la détonation est réduite, particulièrement dans le cas de C_1 , et que cette énergie est pratiquement indépendante des conditions extérieures (air libre ou confinement). De plus, en confinement résistant, l'explosif de haute sécurité à ions échangés libère son énergie secondaire de façon très progressive, en raison du fait que l'échange calorifique est optimal au sein des constituants solides de l'explosif, d'où dégagement énergétique relativement modéré dans les premiers moments de la réaction secondaire mais renforcé dans la phase ultime, le sel naissant se trouvant en mesure de céder de la chaleur aux fumées de l'explosion alors que ces dernières subissent un fort refroidissement par le travail qu'elles fournissent [59]. On comprend ainsi que l'action sur le massif à abattre n'est pas courte et brutale, mais prolongée tout en maintenant relativement longtemps des pressions utiles à l'abattage.

Autrement dit, l'explosif C_1 a une courbe du type III (fig. 40) avec profil se rapprochant de la courbe

II, pour le domaine de la pression thermodynamique s'entend. Quant à la pression de détonation, après l'exposé du chapitre 3 sur la transmission de la détonation et la mise en lumière d'une impulsion de choc particulièrement limitée dans tous les cas d'explosion, il est clair qu'elle reste très modérée. Elle est même inférieure à celle d'une bicarbonate [8]. C'est pourquoi l'idée a déjà été émise que la réaction secondaire est analogue à une combustion de poudre [5]. Il est donc indispensable de mettre l'explosif en œuvre avec le même soin qu'une poudre noire, notamment en plaçant un bourrage suffisant.

En pratique minière, il faut le déplorer, ceci n'est pas toujours le cas. C'est ainsi que nous avons vu bourrer des trous de mines de 40 mm de diamètre au moyen d'une ampoule cylindrique en matière plastique de 30 cm de longueur et au plus 35 mm de diamètre, contenant de l'eau et maintenue contre la charge par un bourrage d'argile de 5 - 6 cm. Dans de telles conditions, compte tenu aussi de la nature du massif foré et de l'importance des charges, la réaction secondaire ne peut se parachever jusqu'à son stade ultime. La mise à l'air prématurée est responsable de la subsistance de gaz nitreux (vapeurs rouge-brun caractéristiques parfois décelables), d'autant plus que le boute-feu, mécontent des résultats du tir, a alors tendance à surcharger les mines tout en continuant à utiliser le bourrage défectueux mis à sa disposition. Or, une telle pratique, tout à fait justifiable dans un travail à la dynamite, ne saurait amener aucune amélioration en cas de minage avec les explosifs à ions échangés [60]. Tout au plus peut-on parfois, en agissant ainsi, discerner un effet utile un peu meilleur si l'explosif à ions échangés employé dans le chantier possède une vitesse de détonation relativement élevée et est alors capable, comme nous l'avons vu (cf. 52), d'une réaction secondaire plus rapide à ses débuts. On pourra récupérer avec cet explosif, pendant la durée d'efficacité du bourrage, un peu plus d'énergie sous forme d'effet utile, mais le tir dégagera énormément de fumées irritantes.

Devant cet état de fait, nous nous sommes fixé, pour nos tirs réels au moyen de l'explosif C_1 , deux conditions préalables de mise en œuvre :

1°) Degré de chargement aussi élevé que possible, obtenu en ajustant au mieux le diamètre des cartouches à celui des trous de mine. Ces derniers étant forés en charbon par foreuse rotative armée d'un fleuret à nervures hélicoïdales (barre de 38 mm de diamètre effectif) avec taillant assorti en langue d'aspic (taillant du type à deux branches garnies de plaquettes dures), nous avons, après quelques tâtonnements, adopté 36 ± 1 mm comme diamètre des cartouches, de sorte qu'avec une bonne approximation on peut dire avoir chargé des cartouches d'au moins 35 mm de diamètre dans des fourneaux de 40 mm de passage intérieur (à fond de trou). Rap-

pelons que de telles conditions sont favorables à une bonne transmission de la détonation (cf. 347) ; d'autre part, nous n'avons pas hésité à procéder de la sorte puisque, avec l'explosif C₁, la sécurité au grisou et aux poussières est assurée aussi bien en 35 ou 40 mm qu'en 30 mm de diamètre (cf. 4113 1° - 412 - 421 et 422).

2°) Bourrage « complet », c'est-à-dire obturant le fourneau de mine pendant toute la durée d'action de l'explosif. Les charbonnages belges utilisent beaucoup actuellement une bourre constituée d'un boyau en matière plastique de 40 cm de longueur, obturé par soudure à une extrémité, le bout opposé comportant une valve d'admission. Cette valve fait également soupape d'étanchéité grâce à un dispositif simple ingénieusement constitué de membranes en matière plastique. Après avoir placé les cartouches d'explosif à fond de fourneau, le mineur enfle un boyau sur une canne d'injection en laiton, raccordée à une alimentation d'eau sous basse pression. La canne ainsi armée est introduite dans le fourneau jusqu'au contact de la charge, puis l'eau est admise, remplissant et faisant gonfler la bourre jusqu'à bon calage. La canne est alors retirée, et le trou de mine est prêt pour la mise à feu.

Ce sont des bourres de ce type que nous avons adoptées pour pratiquer du tir en veine. Mais un cylindre d'eau de 40 cm de longueur nous a paru insuffisant. C'est pourquoi nous avons été amenés à effectuer des essais préliminaires en plaçant à la file, dans le même fourneau, trois bourres de 40 cm, de façon à disposer de 1,20 m de colonne d'eau. Dans ces conditions, la bourre proche de l'orifice du trou de mine a été parfois retrouvée intacte après le tir, et même, dans un cas, toujours logée dans le bloc de charbon où l'opération de bourrage l'avait calée. Le « bouchon complet » était donc réalisé. C'est ainsi que, pour les tirs que nous allons rapporter, chaque mine est bourrée par un seul boyau, mais d'un mètre de longueur, dont la mise en place est aussi commode que celle d'une bourre de 40 cm, et même plus pratique du fait qu'au moment de l'injection d'eau, l'opérateur constate de visu le gonflement parce que la valve est proche de l'orifice du trou de mine, et qu'il peut ensuite vérifier le calage jusqu'au moment de la mise à feu (*).

Nous avons procédé à une série d'essais dans un chantier en taille chassante ouvert dans la couche « Gros Pierre » de charbon réputé extrêmement dur, exploitée en défoncement à l'étage 450 m du siège Ste-Catherine de la S.A. des Charbonnages de

Roton-Farciennes et Oignies-Aiseau, a Farciennes (**).

Le chantier avait les caractéristiques suivantes (fig. 41) :

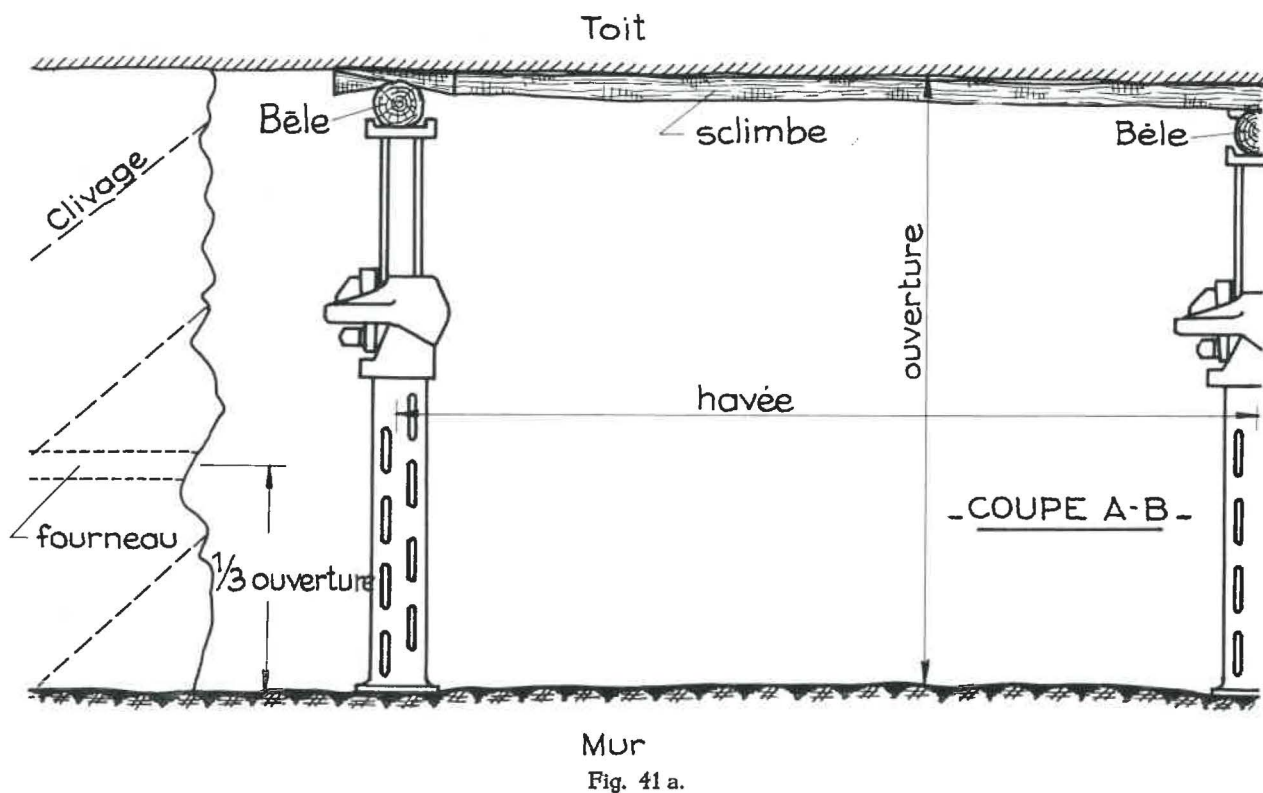
- Front de taille orienté nord-sud, progressant vers l'ouest.
- Pente d'environ 12° pied sud, avec parfois de légères contrepentes.
- Veine de 90 cm d'ouverture moyenne entre éponges de bonne qualité.
- Charbon anthraciteux très dur, avec quelques clivages souvent tourmentés, le réseau principal ayant une pente d'environ 45° pied couchant (clivages surplombants).
- Havée de 1,10 à 1,25 m.
- Soutènement chassant par bèles et sclimbres en bois, étaçons métalliques, la dernière file d'étaçons étant placée à 15 - 30 cm des fronts.
- Contrôle du toit par foudroyage.

L'abattage au marteau-piqueur est pratiquement impossible, même par des ouvriers qualifiés, en raison de la dureté du charbon et de l'orientation du chantier, la progression vers l'ouest rendant les clivages surplombants [61]. Aussi y pratique-t-on couramment du minage en veine. Le procédé employé est des plus énergiques : minage sous pression d'eau à l'Aquadex 30. Dans ce procédé, l'entrée du trou de mine est hermétiquement fermée par un dispositif spécial, constitué par un manchon dilatable branché sur une tuyauterie à forte pression d'eau et opposant, lorsqu'il est gonflé dans la partie antérieure du fourneau, une résistance à l'arrachement de l'ordre d'une tonne [62]. De plus, lorsqu'il est ainsi ancré, le manchon débite dans le fourneau contenant déjà l'explosif, de l'eau sous pression qui s'injecte et progresse dans les fissures éventuelles du massif. De cette façon, le degré de chargement est maximal et le mode de bourrage peut procurer le bouchon complet.

L'Aquadex 30 est un explosif gélatineux qui se présente sous forme d'une gomme à haute densité (1,6 g/cm³), de telle sorte qu'à son énergie spécifique de 48,5 m.t/kg correspond un niveau d'énergie de 77,6 m.t/litre. Il s'agit en fait d'une dynamite sismographique à 30 % de nitroglycérine et 36 % d'ingrédients inertes, capable de conserver sa détonabilité même sous forte pression d'eau et possédant, déjà en 20 mm de diamètre, une vitesse de détonation à l'air libre de l'ordre de 5000 m/s. Parmi les ingrédients inertes, une bonne proportion de chlorure sodique permet d'obtenir une sécurité relative

(*) Les bourres spéciales d'un mètre de longueur nous ont été obligeamment fournies par M. Dufrasne, Administrateur-délégué de la S.A. « Sertra », que nous remercions.

(**) Nous remercions la direction du charbonnage, et plus particulièrement M. l'Ingénieur en Chef Franquin, M. le Directeur des Travaux Leclercq et M. l'Ingénieur divisionnaire Michaux, pour les facilités qui nous ont été accordées à l'occasion de ces essais.



Mur

Fig. 41 a.

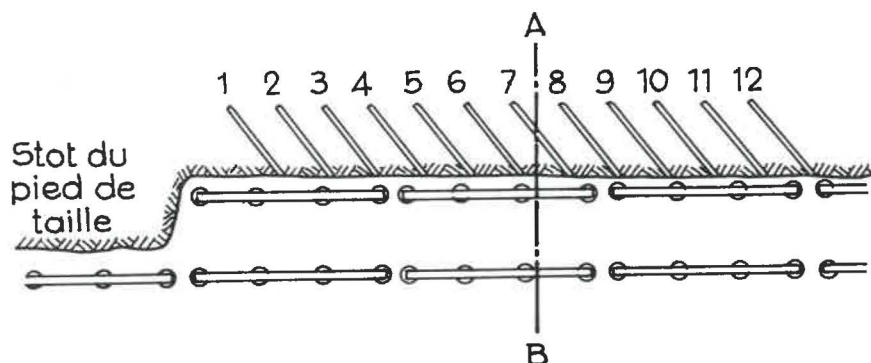


Fig. 41 b.



au tir débouillant, mais en tir d'angle la sécurité est évidemment nulle.

Seule la mise du trou de mine sous forte pression d'eau confère au procédé de tir une certaine sécurité, qui ne peut d'ailleurs être appréciée qu'en fonction des conditions de chantier et qui reste toujours tributaire du facteur humain.

Pour le minage dans la veine « Gros Pierre » au moyen de l'Aquadex 30, les mines sont forées à peu près au tiers de l'ouverture à partir du mur (30-35 cm); elles sont descendantes et inclinées à 45-50° sur le front de taille; leur longueur moyenne est de 1,25 m, de sorte que la profondeur minée est, suivant la progression de la taille, de l'ordre d'un mètre; l'écartement entre mines est de 65-70 cm (fig. 41). La charge est de 200 g par mine et on pratique le tir coup par coup.

Nous n'avons rien voulu changer à ce plan de minage, mais, pour nos essais, nous avons pratiqué le tir en séries par charges ajustées à l'importance voulue, au moyen de l'explosif C₁ avec bourres à l'eau autocalantes d'un mètre de longueur, comme dit plus haut. Les tirs ont eu lieu dans les trous de mines indiqués 1 à 12 à la figure 41. On remarque le stot laissé en pied de taille et l'absence de mines de bouchon. Le marquage a été opéré en tirant successivement les mines 1 et 2, chargées chacune à 400 g. A partir de ce moment, le massif présentant deux faces libres, celle du front de taille et la face dégagée par la mine 2 qui a travaillé sur toute sa longueur, tout était prêt pour le tir en séries.

Cinq mines, numérotées 3 à 7, ont été chargées, la première à 200 g, les trois suivantes à 250 g et la dernière à 300 g, le retard entre deux mines consé-



Fig. 42.

cutives étant de 60 millisecondes. Pour cette volée, la distance de la dernière ligne d'étaçons au front mesurait quelque 25 cm. La photographie (fig. 42) montre le résultat du tir. Une partie du charbon abattu a roulé dans la havée de passage, mais il n'y a à proprement parler pas de projections. On remarque la granulométrie particulièrement favorable. A l'avant-plan de la photographie, deux étaçons voisins, placés de guingois, vont nous servir de repères pour les autres prises de vues, faites après déblaiement à l'endroit des mines 4, 5 et 6. L'enlèvement des produits a été exécuté à mains nues et à la pelle, la lame de l'outil servant à maintes reprises de levier pour désancrer et détacher certains blocs, dont plusieurs ont dû être fragmentés ensuite à coups de



Fig. 43.

masse pour pouvoir être chargés sur la courroie à brin inférieur porteur. La photographie (fig. 43), sur laquelle on se repère par les étaçons obliques, montre le front déblayé sur l'espace des mines en question. A l'avant-plan, les effets de la mine 3 sont visibles. Dans le fond de l'aire dégagée, on distin-



Fig. 44.

gue des clivages surplombants. Ceux-ci apparaissent également sur la photographie suivante (fig. 44) prise à peu près de face par rapport au fond de la brèche. Enfin, une vue prise à partir du dessus de la brèche (fig. 45) montre bien, toujours par rapport au couple d'étaçons, le tas abattu par les mines 1, 2 (de marquage) et 3 (première mine de la volée), ainsi que le toit dégagé jusqu'au massif en place.



Fig. 45.

La volée suivante, comprenant les mines 8 à 12, a été chargée comme la première. Le massif disloqué s'est déplacé en bloc jusqu'à toucher la ligne d'étaçons qui n'était distante des fronts que de 10 à 15 cm. Peu de blocs sont tombés dans la havée de passage. Le dépeçage au marteau-piqueur fut très facile.

L'action des mines se caractérise en outre par les particularités suivantes :

— En aucun cas, on n'a constaté que le dernier coup d'une volée puisse influencer d'une quelconque façon le fourneau suivant non encore chargé.

Ceci est dû au fait que l'action de l'explosif, en raison de sa progressivité, se concentre sur le cube à abattre. Il n'y a donc pas de déperditions de travail comme dans le cas d'une trop grande énergie dépensée dans l'onde, de sorte que les fourneaux non encore bourrés restent intacts pour les chargements ultérieurs.

— En raison toujours de la progressivité de la réaction secondaire, qui en définitive est seule à produire de grandes quantités de gaz sous pression, l'action des mines est proportionnée automatiquement à la résistance du massif. Dès que les fissures s'ouvrent, que les blocs se détachent et se meuvent en foisonnant, la libération d'énergie se modère par mise à l'air des chambres d'explosion à tel point que, si un obstacle s'oppose aux déplacements en cours (ligne d'étaçons proche du front), les mouvements commencés s'arrêtent sans heurts ni percussions de grande violence. En d'autres mots, on constate l'endigement de la libération d'énergie dès que celle-ci n'est plus souhaitable.

Signalons enfin, à titre documentaire, que des mines dont la charge est suffisamment ajustée sont peu bruyantes grâce au bourrage efficace et à l'eau qu'il contient ; elles n'envoient dans le courant d'air de ventilation du chantier qu'une quantité faible de fumée, et soulèvent peu de poussières. Pour obtenir les avantages maximaux, le boutefeu doit évidemment procéder avec doigté et ne pas exagérer les charges de plus de 50 g environ.

6. CONCLUSIONS

La connaissance approfondie de la détonation des explosifs de très haute sûreté à ions échangés, telle que nous l'avons développée au chapitre 2, constitue la pièce maîtresse de notre travail.

Il est opportun de rappeler d'ailleurs qu'en matière d'explosifs solides [16], le calcul des caractéristiques de détonation se heurte toujours actuellement à de multiples difficultés : choix d'une équation d'état appropriée, incertitudes relatives à la composition des produits de détonation, accès malaisé par voie tant expérimentale que théorique aux domaines concernés de pression et de température, interactions entre molécules compliquées et de natures différentes composant le mélange des produits de détonation. Seule la vitesse de détonation D est mesurable avec une bonne précision. Cette caractéristique ne peut cependant nous orienter dans le choix d'une équation d'état, alors que celle-ci influence beaucoup la température, la pression et la vitesse maté-

54. CONCLUSIONS

Ainsi, d'après nos divers essais, la puissance de l'explosif C_1 s'estime le mieux selon la règle de Naoum (cf. 51), c'est-à-dire en se référant à l'énergie spécifique plutôt qu'en retenant les essais classiques de laboratoire (bloc de Trauzl ou pendule balistique).

En effet, en tir réel dans des conditions de gisement des plus difficiles, l'abattage à l'explosif peut donner lieu à la comparaison énergétique suivante (cf. tirs rapportés ci-dessus) :

- dans le cas de l'Aquadex 30, douze mines chargées à 200 g, soit au total 2400 g correspondant à une énergie de 116,4 m.t ;
- avec C_1 , deux mines à 400 g, deux à 200 g, six à 250 g et deux à 300 g, soit au total 3300 g correspondant à 100,7 m.t.

Evidemment, par le procédé du tir sous pression d'eau, l'Aquadex 30 explose dans les conditions optimales pour un abattage efficace. Cet objectif sera également atteint avec C_1 , à condition de tirer de cet explosif tout l'effet utile dont il est capable. A noter d'ailleurs que la comparaison énergétique eût été plus encore à l'avantage de C_1 , si on avait tiré coup par coup, comme cela se pratique avec l'Aquadex.

Ainsi, sans recourir à des explosifs spéciaux (dérivés des dynamites sismographiques) dont la sécurité n'est pas toujours suffisante (tir d'angle), on peut réussir un minage en veine très efficace au moyen d'un explosif à ions échangés simple de mise en œuvre, à condition d'opérer rationnellement.

rielle dans l'onde de détonation. Même pour des explosifs solides qui sont des composés chimiques définis, on n'a pu encore fournir une mesure satisfaisante de l'une quelconque de ces dernières grandeurs. A fortiori le problème est-il compliqué dans le cas d'un mélange explosif. De plus, lorsqu'il s'agit de détonation non idéale, l'écoulement des produits de détonation à l'arrière du front courbe de l'onde ne s'effectue plus dans un régime monodimensionnel et la détente latérale occasionne une baisse plus rapide de la pression. Les réactions chimiques peuvent ne plus arriver à un stade d'accomplissement aussi avancé, ou peuvent en partie avoir lieu à l'extérieur de la zone comprise entre le front d'onde et le plan C-J sans plus intervenir dans le réglage de la vitesse d'onde. Le concept de longueur de zone de réaction et de temps de réaction est nécessaire pour expliquer les variations de la vitesse de détonation avec le confinement et la courbure du front, mais,

à l'heure actuelle, une étude exhaustive de la zone de réaction reste hors de portée en raison surtout des incertitudes qui pèsent sur la cinétique des réactions chimiques. On ne connaît pas, notamment, le degré d'avancement de la décomposition chimique en détonation non idéale, mais on sait cependant que les énergies supportant la détonation dans deux régimes stables différents sont sensiblement dans le même rapport que les carrés des vitesses de détonation. C'est la base de la théorie de la zone de réaction variable qui somme toute se propose, à partir d'un diagramme obtenu par des mesures de vitesses de détonation, d'établir en valeurs relatives le profil du support énergétique de la détonation en fonction du temps de réaction.

On comprend ainsi que, pour traiter la question des explosifs à ions échangés qui nous intéressent, nous ayons préféré faire table rase des conclusions théoriques généralement admises, et ce spécialement en matière de détonation non idéale, pour nous en tenir à une étude strictement expérimentale. Étude qui a été facilitée d'ailleurs par la théorie de la zone de réaction variable, laquelle ne nécessite que quelques manipulations numériques à partir des résultats obtenus à chaque stade de l'expérimentation. Une telle recherche s'est révélée fructueuse dans le domaine de la détonation sélective et a permis d'entrevoir les mécanismes de cinétique chimique agissant dans la zone de réaction, d'apprécier quantitativement les diverses interventions tout au moins en valeur relative, et finalement de contrôler la détonation.

C'est ainsi que nous avons réalisé une série de formules dont les sélectivités, qui ont été chiffrées, se rangent en ordre croissant. Le terme le plus élevé n'est atteint que par un réglage précis portant simultanément sur deux facteurs chimiques (sensibilisateur et additifs hydrofuges) et sur un facteur physique (granulométrie des sels). Nous avons défini plusieurs espèces de sélectivité, la plus caractérisée étant appelée permanente et distinguant une famille de formules montrant une baisse de la vitesse de détonation dans le domaine des gros diamètres (au moins 60 ou 90 mm). Il s'agit là d'un critère de très haute sélectivité. D'un point de vue quantitatif, nous avons été en outre amenés à tenir compte d'un niveau partiel d'énergie, ainsi que nous l'avons appelé, niveau repérable par des mesures de la vitesse de détonation et capable soit de caractériser le type de sélectivité, soit, à sélectivité permanente constante, de doser le support énergétique de la détonation.

Les caractéristiques de niveau partiel d'énergie et de sélectivité qui en découlent ont été mises, dans le chapitre 4, en relation directe avec le comportement au grisou et aux poussières charbonneuses, particulièrement dans les conditions les plus sévères du tir d'angle. Nous avons expliqué comment le défaut

de sélectivité, ou le niveau partiel d'énergie trop élevé, déclenche des activations des constituants salins de l'explosif et définit des états thermo-chimiques des produits en détente augmentant le risque d'inflammation. Le critère de sélectivité, complété par un réglage du niveau partiel d'énergie, est devenu ainsi un critère de sécurité. Partant de cette conception, nous avons auguré puis vérifié des propriétés ou caractéristiques spéciales : comportement favorable d'un explosif à sélectivité permanente dans tout le domaine des diamètres industriels (25 à 40 mm), détermination de la marge de sécurité d'un tel explosif, et ce par des moyens simples puisque nous n'avons recouru qu'à des mesures de la vitesse de détonation et à des essais en galerie expérimentale (inflammation ou non-inflammation), à l'exclusion de techniques spéciales telles que la photographie de flammes, etc. De même, nous avons expliqué certaines constatations sur la sévérité des tirs d'épreuve en galerie et sur leur signification.

Dans le chapitre 3, nous nous sommes attachés à déceler le mécanisme de transmission de la détonation en confinement résistant, c'est-à-dire dans les conditions du tir réel, et avons rattaché les phénomènes à un modèle unique mettant principalement en cause les fumées produites par la réaction complète.

Enfin, au chapitre 5, nous avons montré que la mise en œuvre rationnelle de l'explosif très sélectif est liée au mode de libération de l'énergie et exige notamment de recourir à un bourrage efficace, moyennant quoi en effet utile suffisant est garanti.

Qu'il nous soit permis de citer la méthode de travail qui est désormais possible pour la mise au point des formules de très haute sûreté, méthode que nous avons éprouvée afin d'exercer le contrôle expérimental le plus sévère de nos affirmations relatives à la constitution des explosifs très sélectifs. C'est ainsi que nous avons conçu diverses formules nouvelles en fixant de prime abord la composition chimique et en donnant une première approximation des caractéristiques granulométriques. La réalisation en a été menée de façon à placer la détonation dans un cadre déterminé, en l'occurrence celui de la sélectivité permanente. Dans ce but et afin de maintenir le niveau partiel d'énergie dans les limites adéquates, nous avons opéré le réglage chimique en modérant la teneur en nitroglycérine tout en maintenant l'additif hydrofuge *u* dans diverses formules, sans que la sécurité au grisou ait à souffrir de sa présence. C'est là un résultat nouveau, très important pour nos fabricants belges, car les compositions qui contiennent l'additif *u* particulièrement efficace en tant qu'hydrofuge, jouissent d'une protection intrinsèque contre l'humidité, qu'il s'agisse de la vapeur d'eau chargeant l'atmosphère des magasins d'explosifs ou du liquide que certains trous de mines peuvent contenir. Dans ce dernier cas, on parle d'une

« résistance à l'eau » dont témoigne l'essai suivant [60].

Quatre cartouches (100 g, Ø 30 mm) dont l'enveloppe est constituée de papier d'une qualité ordinaire, sont ligaturées en file sur une latte recouverte de feutre. L'enveloppe de chaque cartouche porte cinq entailles de 2 cm chacune, régulièrement réparties et mettant la composition explosive à nu. La première cartouche de la file est amorcée au moyen d'un détonateur électrique n° 8, tandis que dans la dernière est inséré un cordeau détonant. La charge ainsi apprêtée est déposée au fond d'un récipient sous 20 cm d'eau, et on laisse la macération s'opérer pendant cinq heures. Après quoi, la mise à feu du détonateur doit entraîner, par l'intermédiaire des cartouches, la détonation du cordeau.

La mise en œuvre de l'hydrofuge *u* permet d'obtenir dans ces conditions d'épreuve, 100 % de résultats positifs. Cependant, encore faut-il concilier la sécurité au grisou avec la détonabilité sous eau [63]. Notre étude systématique de la détonation a apporté la solution au problème, sans que ce résultat ait été particulièrement envisagé au départ. A titre documentaire, voici une des nouvelles formules, avec ses caractéristiques.

Composition :

nitroglycéroglycol 70/30	8,5
nitrate de potassium	59,4
chlorure d'ammonium	31,6
additifs (dont <i>u</i>)	0,5
	100,0

Densité d'encartouchage : 1,2 g/cm³

Vitesse de détonation à l'air libre :

Ø 30 mm	1335 m/s
Ø 60 mm	1270 m/s
Ø 90 mm	raté de détonation

On constate ainsi la sélectivité permanente, nonobstant la présence de l'additif *u*.

Seuil de transmission de la détonation entre deux cartouches de 30 mm de diamètre (100 g), placées en tuyau d'acier de Ø 40/76 mm : 6 cm

Résistance à l'eau 5 h : + + + + +

Sécurité au tir d'angle en grisou (cartouches de 30 mm de diamètre) :

800 g	—
1400 g	— —
2200 g	— — —

Sécurité au tir d'angle en poussières (cartouches de 30 mm de diamètre) :

2200 g	— — —
--------	-------

* * *

Nous estimons ainsi avoir tiré la conception et la mise au point des explosifs étudiés de l'ornière de l'empirisme, c'est-à-dire que nous pensons avoir tenu compte d'une recommandation faite par les Professeurs Copp et Ubbelohde en matière d'explosifs miniers de sûreté : « The role of flash suppressants in such explosives may be analysed in a semi-quantitative manner, and the subject developed along systematic lines rather than by trial and error » [17].

ANNEXE XI

Calcul du niveau d'énergie

Le niveau d'énergie est calculé pour deux formules d'explosifs à ions échangés, l'une au nitrate de potassium, l'autre au nitrate de sodium, sans additifs hydrofuges, la teneur en sensibilisateur liquide étant dans chaque cas de 10 % en poids et les sels se trouvant en proportion équimoléculaire.

Compositions explosives.

a) pour cent parties du poids	K	Na
nitroglycérine	3,0	3,0
nitroglycol	7,0	7,0
nitrate de potassium	58,8	—
nitrate de sodium	—	55,2
chlorure d'ammonium	31,2	34,8
	100,0	100,0

b) molaire (pour 1 kg d'explosif)

C ₃ H ₅ (NO ₃) ₃	30 g	0,132 mole	0,132 mole
C ₂ H ₄ N ₂ O ₆	70 g	0,4605	0,4605
KNO ₃	588 g	5,822	—
NaNO ₃	552 g	—	6,494
NH ₄ Cl	312 g	5,831	—
	348 g	—	6,505

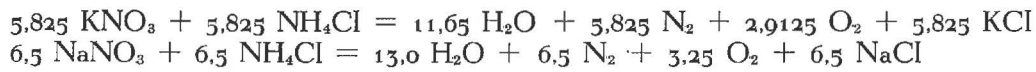
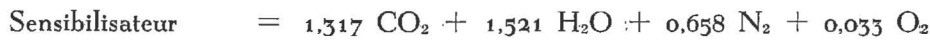
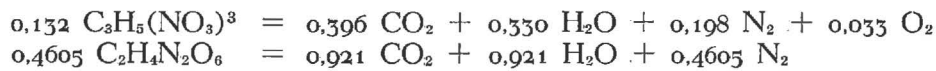
c) chaleur de formation des composants (pour 1 kg d'explosif), à volume constant

0,132 × 83,71 =	11,058	11,058
0,4605 × 55,77 =	25,682	25,682
5,822 × 116,93 =	680,766	—
6,494 × 110,56 =	—	717,988
5,831 × 73,20 =	426,829	—
6,505 × 73,20 =	—	476,144
	Q _f (I) = 1144,335	1230,872 kcal

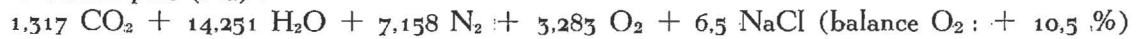
Fumées.

La détonation en vase clos est supposée entraîner la combustion complète.

On a les équations de décomposition :



D'où d'une part (K) :



a) Volume spécifique (aux conditions normales).

	K	Na
$v_0 \text{ (m}^3\text{/kg)}$	0,5290	0,5826

b) Chaleur de formation des composants (pour 1 kg d'explosif), à volume constant.

CO ₂	1,317	×	94,51	=	124,470	124,470
H ₂ O vap.	12,901	×	58,20	=	750,838	—
	14,251	×	58,20	=	—	829,408
KCl	5,825	×	104,07	=	606,208	—
NaCl	6,5	×	98,04	=	—	635,691
			Q _f (II)	=	1481,516	1589,569 kcal

c) Chaleur de fusion du résidu solide.

KCl	5,825	×	6,4	=	37,28	—
NaCl	6,5	×	7,4	=	—	48,1

d) Chaleur d'explosion Q_v

$$Q_v = Q_{f, \text{(II)}} - Q_{\text{fus}} - Q_{f, \text{(I)}}$$

Q _v	299,9 kcal	310,6 kcal
----------------	------------	------------

Température d'explosion.

	K	Na				
a) Chaleurs spécifiques (c = a + b t)						
CO ₂	1,317	×	0,00626	=	0,008244	0,008244
H ₂ O	12,901	×	0,00561	=	0,072375	—
	14,251	×	0,00561	=	—	0,079948
N ₂ + O ₂	9,4	×	0,0048	=	0,045118	—
	10,442	×	0,0048	=	—	0,050120
KCl	5,825	×	0,0125	=	0,072813	—
NaCl	6,5	×	0,0125	=	—	0,081250
					a = 0,198550	a = 0,219562

CO ₂	1,317	×	0,0000037	=	0,0000049	0,0000049
H ₂ O	12,901	×	0,0000033	=	0,0000426	—
	14,251	×	0,0000033	=	—	0,0000470
N ₂ + O ₂	9,4	×	0,0000006	=	0,0000056	—
	10,442	×	0,0000006	=	—	0,0000063

$$b = 0,0000531 \quad b = 0,0000582$$

$$b) \quad t = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4bQv}}{2b}$$

K

$$t = \frac{-0,19855 + \sqrt{0,039422 + 0,063699}}{0,0001062}$$

$$= \frac{-0,19855 + 0,32112}{0,0001062}$$

$$= 1154^{\circ} \text{ C}$$

$$T = 1427^{\circ} \text{ K}$$

Na

$$t = \frac{-0,21956 + \sqrt{0,048207 + 0,072307}}{0,0001164}$$

$$= \frac{-0,21956 + 0,34715}{0,0001164}$$

$$= 1096^{\circ} \text{ C}$$

$$T = 1369^{\circ} \text{ C}$$

Sel naissant (par kg d'explosif).

5,825 KCl de poids moléculaire 74,5 :	434 g	—
6,5 NaCl de poids moléculaire 58,5 :	—	380 g

K

Na

Energie spécifique et niveau d'énergie.

$$a) \quad f = p_0 v_0 \alpha T \quad \text{avec } p_0 = 1,033 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^2 \\ \alpha = 1/273$$

$$\frac{10^4}{273} \cdot 1,033 \times 0,5826 \times 1369 = \quad \text{—} \quad 30,179 \text{ kgm/kg}$$

$$\frac{10^4}{273} \cdot 1,033 \times 0,529 \times 1427 = 28,564 \text{ kgm/kg} \quad \text{—}$$

$$b) \quad E = f \Delta \quad \text{avec } \Delta = 1,2 \text{ kg/litre}$$

34 mt/litre

36 mt/litre

ANNEXE XII

Essai Trauzl

On emploie des blocs cylindriques de plomb tendre (c'est-à-dire exempts d'étain ou d'antimoine) ayant 200 mm de diamètre ainsi que de hauteur, comportant un canal axial de 25 mm de diamètre et 125 mm de profondeur.

Pour une série d'essais, les blocs utilisés doivent provenir d'une même opération de fusion et coulage en forme.

Au moyen de papier d'étain, on façonne pour chaque bloc un petit récipient cylindrique coulissant à frottement doux dans le canal axial. C'est ce récipient qui reçoit 10 g d'explosif pulvérulent, soit l'étalon (acide picrique pur, en petits cristaux passant entièrement au tamis de 0,6 mm et séché à 100°), soit la composition à ions échangés. Dans l'explosif est introduit un détonateur électrique n° 8 jusqu'à

enfouir sur toute sa hauteur la charge détonante contenue dans le tube de laiton, autour duquel on referme précautionneusement les pans du papier d'étain. L'ensemble ainsi constitué est glissé au fond du canal axial, que l'on ferme en y laissant couler du sable sec jusqu'à remplissage (sable tamisé sur toile de 144 mailles/cm²). Après tir, on mesure le volume de la cavité : c'est l'évasement brut. Le canal axial ayant d'origine un volume de 61 cm³, on retire 70 cm³ du résultat, de façon à tenir compte de l'effet du détonateur : c'est l'évasement net. Il y a aussi une correction de température. Si on opère à 1° C, il faut ajouter $(15 - 1) \times 0,25 = 3,5 \%$ à l'évasement net pour obtenir l'évasement net corrigé. Celui-ci est de 302,7 cm³ pour l'acide picrique, en ce qui concerne la série de blocs utilisés pour C₁ et C₂.

On a obtenu :

Explosif utilisé	Evasements mesurés	Evasement moyen	Evasement net	Evasement net corrigé	Rapport à l'acide picrique
C ₁	140 cm ³ 135 cm ³	137,5 cm ³	67,5 cm ³	69,9 cm ³	0,23
C ₂	140 cm ³ 140 cm ³	140 cm ³	70 cm ³	72,4 cm ³	0,24

ANNEXE XIII

Pendule balistique

On prépare une charge de 10 g de la même façon que pour l'essai Trauzl (cf. annexe XII), sauf que le récipient cylindrique en papier d'étain doit avoir 20 mm de diamètre et environ 40 mm de hauteur.

La pendule comporte un logement cylindrique de 58,2 mm de diamètre (fig. 46).

C'est dans cette chambre que la charge est placée axialement grâce à un étrier en fil de cuivre, les fils du détonateur aboutissant à l'extérieur par un mince canal ad hoc. Le boulet est alors placé dans l'âme.

Nous passons sous silence les détails du mode opératoire (mise à température, nettoyages, tirs de mise en régime).

En désignant par A l'angle maximal d'oscillation à partir de la verticale, on avait précédemment obtenu les résultats consignés au tableau.

Le jour des essais avec C₁ et C₂, le tarage à l'acide picrique a donné : $1 - \cos A = 0,0383$ et $0,0384$; soit $0,0385$ en moyenne.

Avec C₁ on a obtenu : $0,0173$ et $0,0168$; soit $0,01705$ en moyenne.

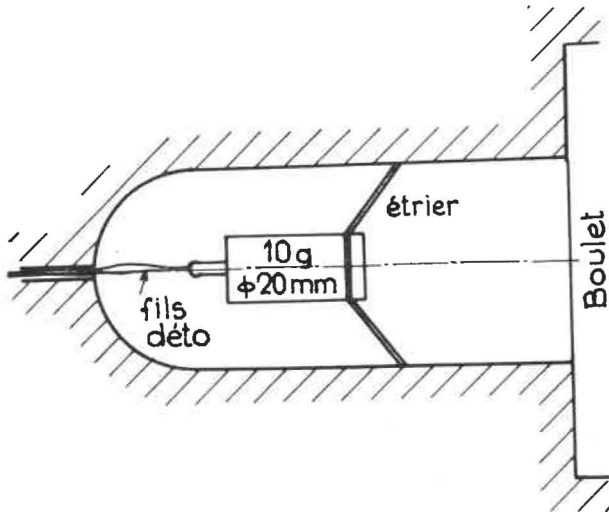


Fig. 46.

Explosif	1-cos A
acide picrique	0,0409
blasting	0,0555

Avec C_2 : 0,0284 ; 0,0290 et 0,0266 ; soit 0,0280 en moyenne.

Le rapport à l'acide picrique vaut
44,5 % pour C_1
et 73 % pour C_2 .

Celui à la blasting-gelatine (RWS) vaut
32,8 % pour C_1
et 53,8 % pour C_2 .

BIBLIOGRAPHIE

- [21] FOSSE C. — Etude du mécanisme de la transmission de la détonation des explosifs de sécurité - *Explosifs*, 1962, 15, 122 et 1963, 16, 41.
- [22] AHRENS H. & EITZ E. — Röntgenblitzaufnahmen bei der Untersuchung der Detonationsübertragung von Wettersprengstoffen - *Nobel Hefte*, 1958, 24, 244.
- [23] FOSSE C. — Transmission de la détonation des explosifs à ions échangés - *Explosifs*, 1961, 14, 63.
- [24] DEFFET L. & VANDEN BERGHE R. — Nouvelle lampe explosive et son utilisation avec une cellule de Kerr dans la méthode des ombres - *Explosifs*, 1962, 15, 60.
- [25] AHRENS H. — Erfahrungen und Einflüsse bei der Detonationsübertragungsfähigkeit neuartiger Wettersprengstoffe - *IX^e Conférence internationale des directeurs de stations d'essais*, Bruxelles - Heerlen 1956.
- [26] EITZ E. — Röntgenblitzaufnahmen zum Studium der Detonationsübertragung - Prüftechnische Erfassung der Detonationsübertragung von Bergbausprengstoffen im Hinblick auf ihr Verhalten im Kohlebohrloch - *IX^e Conférence internationale des directeurs de stations d'essais*, Bruxelles - Heerlen 1956.
- [27] AHRENS H. & EITZ E. — Röntgenblitzaufnahmen zur Untersuchung der Detonationsübertragung bei Wettersprengstoffen - *Z. Elektrochem. Ber. Bunsenges. physik. Chem.*, 1957, 61, 635.
- [28] ROTH J.F. — Le mesurage du choc de la détonation au moyen de mesureurs d'impulsion mécaniques - *XXXI^e Congrès international de Chimie industrielle*, Liège 1958.
- [29] BOUTRY C., FOSSE C. & DEFFET L. — Recherches sur les causes de variation d'aptitude à la détonation - *Explosifs*, 1960, 13, 16.
- [30] DEFFET L. & RUCQUOI R. — Examen de l'essai d'aptitude à la détonation par les éclairs de rayons X - *Explosifs*, 1955, 8, 119.
- [31] BERTHMANN A. — Untersuchungen über den Detonationsvorgang gewerblicher Sprengstoffe; Folgerungen über ihre Zusammensetzung, Prüfung und Anwendung in der Praxis - *Nobel Hefte*, 1957, 23, 2.
- [32] DEMELENNE E. & GOFFART P.R. — Contribution à l'étude de l'aptitude à la transmission de la détonation des explosifs à ions échangés - *Explosifs*, 1961, 14, 56.
- [33] GOL'DBINDER A.I. — Au sujet des propriétés explosives des mélanges de sels inertes avec la nitroglycérine - *Doklady Akad. Nauk S.S.S.R.*, 1945, 50, 199.
- [34] GOFFART P.R. — Essai sur la transmission de la détonation des explosifs à ions échangés - *Explosifs*, 1962, 15, 52.
- [35] DEFFET L. & VANDEN BERGHE R. — Utilisation de lampes explosives pour la photographie par le système Schardin - *Explosifs*, 1960, 13, 119.
- [36] VANDEN BERGHE R. — Lampe explosive à émission prolongée pour enregistrement au miroir tournant - *Explosifs*, 1961, 14, 29.
- [37] DEMELENNE E. — Rapport sur les travaux de 1960 de l'Institut National des Mines - *Annales des Mines de Belgique*, 1961, 60, 760.
- [38] AHRENS H. — Prüfstrecke und Prüfverfahren für Wettersprengstoffe - *Nobel Hefte*, 1959, 25, 111.
- [39] GILTAIRE M. — Inflammation de mélanges gazeux combustibles par onde de choc - *Revue de l'Industrie Minérale*, 1957, 39, 364.

- [40] VANDEN BERGHE R. & DEFFET L. — Evaluation de la sécurité des explosifs à ions échangés par une méthode photographique. - *Explosifs*, 1963, 16, 101.
- [41] AHRENS H. — Ein einfaches Verfahren zur Erkennung des Reaktionsverhaltens verschiedener Typen von Bergbausprengestoffen - *Nobel Hefte*, 1962, 28, 2.
- [42] LEISINGER K.F. — Vergleichende Flammenbilder und Streak-Kameraaufnahmen von Wettersprengstoffen und die Abhängigkeit der Leuchterscheinungen von der Sprengstoffdichte und einem nur kurzzeitig standhaltenden Einschluss - *Nobel Hefte*, 1964, 30, 163.
- [43] SEELEMANN D. & MULLER G. — Influence du diamètre des cartouches sur la sécurité des explosifs - *Revue de l'Industrie Minérale*, 1962, 44, 118.
- [44] LEBRUIN F. & WATERLOT L. — Contribution à l'étude expérimentale des explosifs de sécurité - *Explosifs*, 1962, 15, 85.
- [45] EITZ E. — Hochfrequenz - kinematographische Aufnahmen der bei Schlagwetterzündversuchen in einer Sprengstoffprüfstrecke auftretenden Leuchterscheinungen - *Nobel Hefte*, 1959, 25, 136.
- [46] EITZ E. — Hochfrequenzkinematographische Untersuchungen der Zündung von Schlagwettern durch Wettersprengstoffe - *Nobel Hefte*, 1961, 27, 141.
- [47] DEMELENNE E. & GOFFART P.R. — Rapport sur les travaux de 1961 de l'Institut National des Mines - *Annales des Mines de Belgique*, 1962, 61, 719.
- [48] GERHARD S.L. & WILBERT J. HUFF — Phenomena in the ignition of firedamp by explosives, Part I - Particles from the detonation - *Bureau of Mines*, 1940, Technical Paper 603.
- [49] BEYLING & SCHULTZE - RHONHOF — Untersuchungen über die Schlagwettersicherheit von Wettersprengstoffen unter betriebsmäßigen Bedingungen - *Berichte der Versuchsgrubengesellschaft*, Heft 4, Gel-senkirchen, 1933.
- [50] LOISON R. & SARTORIUS R. — Recherches d'explosifs à faible densité pour le tir au charbon - *Revue de l'Industrie Minérale*, 1952, 33, 893.
- [51] GRANT R.L. & MASON G.M. — The mechanism of ignition of firedamp by explosives - *Bureau of Mines*, 1954, Report of Investigations 5049.
- [52] VENNIN L., BURLOT E. & LECORCHE H. — Les poudres et explosifs - *Librairie polytechnique. Ch. Béranger*, Paris et Liège, 1932.
- [53] LEMAIRE E. — Considérations sur les explosifs de sûreté et sur leurs essais en galerie - *Annales des Mines de Belgique*, 1922, 23, 649.
- [54] SCHULTZE - RHONHOF — Die Entwicklung der Wettersprengstoffe in Deutschland und den Nachbarländern seit 1933 - *Bergbau - Rundschau*, 1957, 9, 303.
- [55] NAOUM Ph. — Vorausbestimmung der praktischen Leistung der Sprengmittel auf Grund theoretischer und sprengtechnischer Daten - *Z. f. ges. Schiess- und Sprengstoffwesen*, 1944, 39, 49.
- [56] TAYLOR J. — Detonation in condensed explosives - *Oxford, Clarendon Press*, 1952.
- [57] SCHMIDT A. — Tafeln zur Berechnung von Explosionswärme, Gasvolumen und Zusammensetzung der Explosionsprodukte gewerblicher Sprengstoffe - *Nobel Hefte*, 1961, 27, 1.
- [58] MEDARD M.L. — Tables thermo-chimiques à l'usage des techniciens des substances explosives - *Mémorial de l'Artillerie française*, 1954, 28, 415.
- [59] BERTHMANN A. — Ueber den Zusammenhang von Detonations- und Flammgeschwindigkeit mit der Reaktionszone bei Bergbau-Sprengstoffen - *Nobel Hefte*, 1956, 22, 65.
- [60] AHRENS H. — Bergbausprengestoffe und ihre Beurteilung - *Glückauf*, 1960, 96, 325.
- [61] LABASSE H. — Les pressions de terrains dans les mines de houille - Le rôle des pressions de terrains dans l'abatage - *Annales des Mines de Belgique*, 1964, 63, 1099.
- [62] ISSELSTEIN T., PRESTAR F. & SEIFERT F. — Erfahrungen bei der Anwendung des Tränkungsschiessens im Nebengestein von Flöz- und Abbaustrecken-vortrieben - *Nobel Hefte*, 1960, 26, 128.
- [63] AHRENS H. — Stand der hochsicheren Wettersprengstoffe (Klasse III) in Deutschland - *Nobel Hefte*, 1959, 25, 129.

REMERCIEMENTS

La réalisation du présent travail prend appui sur de bienveillantes approbations dont elle ne saurait être dissociée.

C'est pourquoi nous tenons, en un bref aperçu chronologique, à dire notre reconnaissance aux personnes qui nous ont fourni avec confiance les moyens moraux et matériels d'aboutir.

En Belgique, les explosifs à ions échangés firent leur toute première apparition vers 1957. A l'époque, comme à l'heure actuelle, nous avions l'honneur de sconder M. I. Dehing, Directeur au Corps des Mines et chef du Service des Explosifs, qui, devant notre curiosité, ne nous ménagea pas ses encouragements et nous donna fort libéralement toute lati-

tude. Nous lui en savons particulièrement gré, ainsi que des marques d'intérêt qu'il nous a prodiguées tout au long de notre effort.

Provisoirement, nous dûmes nous limiter à suivre les publications scientifiques et techniques se rapportant au sujet neuf, jusqu'à ce qu'en 1960, peu après son arrivée à la tête de l'Institut National des Mines, à Paturages, M. E. Demelenne, Directeur au Corps des Mines, nous permit l'accès à l'expérimentation. Cette étape importante lui assure à elle seule notre entier dévouement.

Après nous être familiarisés avec la pratique des différents tirs d'épreuve, nous avons souhaité en 1963 voir s'élargir notre champ d'investigations. C'est alors que M. E. Raskin, Administrateur-délégué de la S.A. Poudreries Réunies de Belgique et Président du Centre de Recherches scientifiques et techniques pour l'Industrie des Produits explosifs (CRIPE), nous ouvrit à la fois les portes des labo-

ratoires de la dynamiterie de Balen et du Centre placé sous l'éminente direction de M. le Dr. L. Defet. Aussi l'été 1963 marque-t-il le début des travaux qui ont conduit au principal de nos résultats.

Les personnes appelées à nous prêter un concours direct on toutes droit à nos plus vifs remerciements. En particulier, nous pensons à M. le Dr. C. Fossé, Chef de travaux au CRIPE, à M. L. Waterlot, Ingénieur au Service des études de la S.A. Poudreries Réunies de Belgique à Balen, à M. M. Poivre, Maître-opérateur à l'Institut National des Mines, dont nous avons apprécié le savoir-faire et le sens de l'expérimentation.

Enfin, « last but not least », daigne M. A. Vandenneuvel, Directeur général des Mines, agréer l'assurance de nos sentiments très reconnaissants pour le précieux appui moral que constitue son attitude bienveillante à notre égard.