

# A propos d'une série d'explosions survenues dans des installations à air comprimé

G. LOGELAIN

Inspecteur Général des Mines

par

G. COOLS

Ingénieur en Chef-Directeur des Mines

et

Dans une circulaire administrative datant du mois de février 1956, M. Robert Sténuît, à l'époque Inspecteur Général des Mines, a.i., attire l'attention sur la fréquence des explosions de réservoirs et des canalisations d'air comprimé et donne des précisions intéressantes.

Dans certains cas, ces explosions ne se propagent guère au delà du réservoir, dans d'autres cas, elles affectent plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de mètres de canalisations.

Les enquêtes faites à propos de tels accidents permettent d'expliquer la genèse et la propagation de l'explosion.

De fines particules d'huile de graissage des compresseurs sont entraînées par l'air comprimé vers les réservoirs et les canalisations. Elles y constituent des dépôts dont l'importance diminue au fur et à mesure de l'éloignement.

Sous l'action de la température et de l'air, ces dépôts s'oxydent et donnent lieu, par une réaction exothermique, à la formation de vapeurs combustibles. Ce processus est favorisé par l'oxyde de fer de la rouille recouvrant les parois.

La vitesse de circulation de l'air joue donc son rôle : un grand débit active l'oxydation, mais favorise, par contre, la dissipation des vapeurs et de la chaleur produite. Un débit faible, au contraire, peut conjuguer la concentration des vapeurs et l'élévation de leur température et conduire à l'explosion.

C'est ainsi que la marche à vide peut rapidement devenir dangereuse, surtout avec un compresseur à double effet où un repassage de l'air peut engendrer des élévations de température anormales d'un côté ou de l'autre du piston.

En résumé, le risque d'explosion est déterminé par : la quantité d'huile consommée, la qualité de l'huile, la température de l'air et sa vitesse de circulation.

Les points d'origine d'explosion les plus fréquents sont, soit les soupapes de refoulement des

compresseurs, soit les canalisations ou les réservoirs lorsque ceux-ci sont proches des compresseurs.

M. Sténuît conseille, en vue d'éviter les explosions, d'observer les règles suivantes :

1) utiliser, en quantités systématiquement contrôlées, des huiles stables homogènes, de viscosité moyenne, mais à haut pouvoir lubrifiant ;

2) éliminer des réservoirs et tuyauteries toutes les arêtes et cavités susceptibles de retenir les particules d'huile et d'échapper aux nettoyages, telles que bouts de tuyauteries inutiles (c'est le cas, notamment, dans des réservoirs constitués par d'anciens corps de chaudières) ;

3) contrôler les purges des réservoirs et canalisations ;

4) nettoyer, tous les mois, les clapets de refoulement ;

5) nettoyer les réservoirs au moins tous les trois mois ;

6) contrôler la température de l'air par des thermomètres convenablement placés et prendre, le cas échéant, des dispositions appropriées pour limiter cette température ;

7) placer à la sortie de chaque compresseur un thermostat qui permette d'arrêter, automatiquement si possible, le moteur du compresseur dès que la température de l'air atteint 135° (dans le cas de compression bi-étagée) ;

8) réduire au strict minimum la durée de marche à vide des compresseurs, soit par des consignes, soit par un dispositif approprié.

\* \* \*

La question s'est posée de savoir si les installations à air comprimé pouvaient encore présenter un danger d'explosion lorsque la température à la sortie des compresseurs était maintenue constamment en dessous de 135° C et si, dans ce cas, il était nécessaire de procéder au nettoyage trimestriel des réceptifs.

Il est difficile de répondre par oui ou par non à cette question, tant sont nombreux et variés les facteurs qui interviennent dans le phénomène de l'explosion et parmi lesquels il y a lieu, rappelons-le, de distinguer tout particulièrement :

1) La présence d'huile dans les conduites et récipients, qui, par oxydation en présence de catalyseurs toujours existants (notamment la rouille), suivie de pyrogénéation, donne lieu à la formation de vapeurs s'enflammant plus facilement que celles pouvant provenir directement de l'huile.

2) L'augmentation anormale de la température, due à l'oxydation précitée et à certains défauts de l'installation, grâce à laquelle la limite d'inflammabilité des vapeurs résultant de la pyrogénéation de l'huile peut facilement être atteinte.

Il est certain qu'en dépit de toutes les précautions, il ne pourra jamais être affirmé de façon indubitable que ces deux causes sont complètement éliminées. La seconde, notamment, comporte de nombreux facteurs pour lesquels il est difficile d'obtenir des données précises, savoir : la hauteur de la température critique correspondant au seuil d'oxydation de l'huile, la limite d'inflammabilité des vapeurs formées, la différence pouvant exister entre la température indiquée par le thermostat et celle existant aux divers points de l'installation, etc...

Dans ces conditions, il va de soi qu'il s'indique de ne négliger aucun des moyens qui s'offrent dans la lutte contre les dangers d'explosion dans les installations à air comprimé.

Le placement d'un thermostat capable d'assurer l'arrêt du compresseur en cas d'augmentation de la température au-dessus d'un degré déterminé ou de déclencher un signal lumineux ou sonore apparaît, dans cet ordre d'idées, comme indispensable dans la plupart des cas, indépendamment des autres mesures proposées par M. Sténuit.

Nous estimons toutefois que ces mesures ne doivent pas être considérées comme des règles immuables, mais plutôt comme des directives de caractère général qu'il faut avoir présentes à l'esprit, lors de l'examen de chaque cas particulier. Ainsi, par exemple, nous ne verrions pas d'inconvénient à ce que le délai proposé pour le nettoyage des récipients soit prorogé, dans les cas où l'expérience aurait montré de manière évidente que l'état des récipients à la fin de la période ne donne lieu à aucun motif d'inquiétude.

\* \* \*

La documentation qui suit est relative à quelques cas récents d'explosion qui se sont produits dans des installations établies dans les dépendances de la surface de certains charbonnages belges.

Cette documentation, qui comporte notamment les avis des instances administratives chargées de l'étude des accidents, est à l'origine des considérations émises ci-dessus.

### 1<sup>er</sup> cas.

#### Circonstances.

Inflammation d'huile dans la conduite de refoulement d'un compresseur François à piston de 162 kW.

Quelques ouvriers ont été incommodés dans le fond.

Ce compresseur est formé de quatre cylindres-tandem jumelés. A part un manomètre placé sur la conduite de refoulement, il ne possède aucun instrument de contrôle. Entre les deux étages de compression se trouvent deux réfrigérants tubulaires dont le débit d'eau est contrôlé à la tuyauterie de sortie. La marche à vide s'obtient par fermeture de la conduite d'aspiration.

La présence d'un raccord en T dans la tuyauterie de refoulement a favorisé le dépôt d'huile.

#### Mesures proposées par l'Ingénieur-rapporteur.

1) Remplacement du raccord en T par une courbe ;

2) Contrôle de l'efficacité du refroidissement par des mesures de température au refoulement.

#### Avis du Comité de Division.

Le Comité approuve les recommandations de l'Ingénieur-rapporteur quant aux précautions à observer pour éviter les inflammations et explosions dans les installations de compression d'air et spécialement celle-ci :

Suppression des courbes de faible rayon et des parties non balayées par le courant d'air (tels que anciens branchements désaffectés) dans les conduites de refoulement des compresseurs, en vue d'éviter des dépôts d'huile dans ces conduites.

#### Note de l'Inspecteur Général des Mines.

Il s'agit d'une inflammation survenue dans la conduite de refoulement d'un compresseur à réglage du débit par fermeture de la conduite d'aspiration. Ce système de réglage est très dangereux parce qu'après une période de débit nul, la température au refoulement peut atteindre 100° C de plus qu'en marche normale, température qui accélère l'oxydation de l'huile de graissage et conduit rapidement à l'inflammation.

\* \* \*

### 2<sup>e</sup> cas.

#### Circonstances.

Un compresseur Equerre, d'un débit de 90 m<sup>3</sup> aspirés par minute et construit par les ateliers de Thiriau, a éclaté subitement, à un moment où il semblait fonctionner tout à fait normalement.

L'explosion a produit les dégradations suivantes: destruction du cylindre haute pression, légères avaries à deux réservoirs horizontaux, refoulement vers l'extérieur du fond bombé vers l'intérieur d'un réservoir vertical, éclatement ou arrachement de tuyaux, vannes et colliers à la surface, arrachement ou éclatement de tuyaux dans le puits d'air, sur 270 m de hauteur à partir de la surface. Des flammes ont été aperçues dans ce puits à cette profondeur.

Un commencement d'incendie s'est déclaré au chevalement du puits d'extraction, où la graisse qui couvrait celui-ci et le calorifuge de certaines canalisations a pris feu. Cet incendie fut éteint rapidement.

L'enquête n'a pas permis de mettre en lumière, de manière certaine, les causes de l'accident. Il semble cependant que l'accident ne peut être dû qu'à l'explosion d'un mélange tonant que l'air a formé avec de l'huile de graissage volatilisé.

#### Conclusions de l'Ingénieur-rapporteur.

M. Etienne Audibert a publié dans la Note technique n° 48/7, octobre 1948, du Centre d'études et de recherches des Charbonnages de France, une étude très importante sur le mécanisme des explosions de compresseurs.

L'étude a été faite après l'explosion au siège 4/11 de Courrières, le 19/4/1948.

La tuyauterie a éclaté en 22 points sur une longueur de 300 m. Elle a donc été parcourue par une onde de choc entretenue qui a eu pour support, non pas de l'air, mais un mélange combustible apte à propager la détonation.

Comment un milieu apte à propager une détonation peut-il se former dans une canalisation d'air comprimé ?

L'auteur estime que l'élément combustible du mélange est de l'huile de graissage. Cette huile s'oxyde à une vitesse appréciable pour des pressions de 6 à 7 kg et pour une température de l'ordre de 80°.

Toutefois, la réaction conserve une allure modérée.

C'est ainsi que, si on pulvérise de l'huile dans l'oxygène, on n'observe d'inflammation que si la température atteint 300°. On n'atteint jamais cette température dans les compresseurs usuels. La question est donc de savoir si l'oxydation lente peut donner naissance à des produits combustibles plus légers que l'huile de départ.

L'étude de laboratoire prouve que :

1) l'oxydation de l'huile de graissage à une température inférieure à 300° et en présence d'un courant d'oxygène comporte l'addition l'un à l'autre des deux réactifs en présence. Son produit est vraisemblablement un peroxyde ;

2) la rouille active la réaction en présence d'air comprimé et fait en quelque sorte fonction de catalyseur. La réaction exothermique qu'elle provoque donne naissance à une variation de température dont l'amplitude dépend des conditions dans lesquelles la chaleur est dégagée, donc de la vitesse du courant gazeux. Il existe une valeur de la température, dite température critique, de part et d'autre de laquelle les choses se passent de manières différentes :

a) en dessous de la température critique la température du catalyseur reste constante ;

b) au-dessus de cette température critique, celle du catalyseur augmente. Dans une première élévation de température, la réaction d'oxydation se développe seule. Ensuite, s'y superposent une réaction de pyrogénéation donnant naissance à des produits plus volatils que l'huile et l'apparition d'une phase gazeuse constituée d'oxygène et de gaz combustible. Au cours de l'élévation de la température du catalyseur, la concentration des éléments combustibles augmente et peut être capable de propager la combustion et par la suite l'inflammation.

C'est aux faibles valeurs du courant d'oxygène que correspondent les valeurs les plus basses de la température critique.

M. Audibert a trouvé :

155° en faisant circuler l'oxygène au débit horaire de 20 litres dans un tube horizontal de 30 mm de diamètre,

148° en faisant circuler l'oxygène au débit de 24 litres dans un ballon de 300 cm<sup>3</sup>.

Tube et ballon étaient partiellement remplis de grains de rouille.

Cette température est celle que peut réaliser la compression adiabatique à la sortie haute pression d'un compresseur à 2 étages, pour peu que le refroidissement soit insuffisant.

La formation d'un milieu inflammable dans les installations de compression peut alors s'expliquer comme suit :

L'huile qui lubrifie le compresseur est entraînée par l'air. Celui-ci, en se laminant à travers les orifices des soupapes de refoulement, la pulvérise et c'est à l'état de fines gouttelettes qu'elle pénètre dans la canalisation en principe recouverte de rouille.

La distribution de la température à l'intérieur des appareils en acier faisant suite au compresseur est déterminée par trois phénomènes :

1) introduction de la chaleur sensible de l'air comprimé ;

2) libération de la chaleur dégagée par l'oxydation de l'huile ;

3) évacuation de la chaleur par écoulement vers l'extérieur à travers la paroi.

Si la température au voisinage de la soupape de refoulement dépasse la température critique, la pa-

roi s'échauffe et des produits combustibles plus légers sont émis.

Pour que ce milieu devienne le siège d'une réaction vive, il faut et il suffit que :

1) la vitesse de formation des constituants combustibles atteigne un niveau suffisant pour assurer une concentration capable de propager la combustion et

2) qu'en un point de la paroi la température des grains de rouille atteigne une valeur convenable.

Le risque est d'autant plus grand que :

1) le débit de la canalisation est moindre ;

2) le flux d'échange de la canalisation est moindre ;

3) l'huile déposée sur les parois y a fait un séjour de plus longue durée. Il est prouvé en effet que la température critique s'abaisse avec le vieillissement de l'huile.

\* \* \*

D'autre part, dans une étude extraite des minutes des réunions d'études du cercle des Ingénieurs mécaniciens de Birmingham le 4/1/1924, opuscule diffusé en Belgique sous les auspices de la Société Bellis et Morcom Ltd, à Birmingham, J. M. Walshe s'exprime comme suit :

« Le graissage des cylindres doit se faire avec de l'huile de première qualité, en quantité aussi faible que possible. On conseille l'huile minérale pure à point d'éclair élevé et de bonne viscosité à haute température.

» Les explosions sont produites par combustion de l'huile et des particules de carbone accumulées et qui s'enflamment sous l'action d'une élévation de température de l'air. L'huile sous l'action de la chaleur peut parfois se transformer en vapeur et causer de violentes explosions.

» Chaque compresseur recevra la quantité d'huile requise sans le moindre excès et sera pourvu d'un filtre d'aspiration efficace ; de plus, les tuyauteries et réservoirs seront visités périodiquement et nettoyés afin d'éviter les accumulations de matières inflammables.

» Les causes d'élévation excessive de température de l'air sont les suivantes :

1) Compresseur à un seul étage fonctionnant au-dessus du taux prévu ;

2) Mauvais fonctionnement de la soupape de réglage du débit ;

3) Repassage d'air par soupape ou piston défectueux ;

4) Fonctionnement de la machine sans ou avec réfrigération insuffisante. On recommande l'emploi d'un thermomètre à index qui actionne une sonnerie ou autre dispositif avertisseur quand la température devient exagérée. »

Signalons également que la firme Bellis recommande de laver les compresseurs à l'eau de savon

d'une façon régulière pour enlever les pellicules d'huile sur les fonds de cylindre.

\* \* \*

Quelles mesures préventives peut-on prendre pour éviter le retour de pareils accidents ?

Si l'on parvenait à limiter la température de l'air à une valeur inférieure à 80°, température en dessous de laquelle l'oxydation des huiles conserve une allure insignifiante, on aurait résolu le vrai problème de la sécurité dans les compresseurs d'air et dans les organes qui leur font suite. La formation de peroxydes instables susceptibles de provoquer une explosion ne se produit pas, en effet, en dessous de cette température.

Malheureusement, dans l'état actuel de la technique, la température au refoulement dépasse largement cette valeur.

Des solutions provisoires s'imposent :

1) Emploi d'huiles stables et homogènes, afin d'offrir une résistance maximum à l'oxydation et, par voie de conséquence, à la formation de complexes instables.

2) Les huiles à point d'éclair élevé sont de forte viscosité. Elles forment très facilement des dépôts de cambuis et agglomèrent bien davantage les matières organiques échappant au filtre à air. Il faut donc employer une huile à haut pouvoir lubrifiant, mais de viscosité moyenne.

3) Le débit d'huile doit être minimum.

4) Le nettoyage à l'eau de savon évite la formation de dépôts graisseux dans les cylindres. Cette opération, d'après les techniciens, s'effectue comme suit :

On démonte les soupapes, on nettoye les sièges et, avant de les remonter, on verse de l'eau savonneuse dans les cylindres, on fait tourner la machine à vide et on enlève les dépôts mousseux qui suintent par les sièges des soupapes.

Ce procédé reste intéressant avec l'emploi d'huiles minérales, car celles-ci agglomèrent des poussières organiques.

5) L'étude de M. Audibert prouve que la rouille favorise spécialement l'oxydation des huiles. Pourquoi, au placement, ne pas enduire les tuyauteries et autres pièces métalliques faisant suite au compresseur d'une bonne couche de peinture anti-rouille et nettoyer ces tuyauteries périodiquement ?

La visite des réservoirs d'air comprimé devrait être spécialement soignée. Il y a dans ces appareils, outre la formation de rouille, une vitesse d'écoulement de l'air plus faible que dans les tuyauteries, ce qui, d'après M. Audibert, favorise la formation de peroxydes. Les constatations pratiques prouvent d'ailleurs que les inflammations dans les installations d'air comprimé partent le plus souvent d'un réservoir.

6) Il faut éviter la marche à vide des compresseurs, qui entraîne fatalement une augmentation de la température.

7) Les clapets d'aspiration et de refoulement doivent être visités à intervalles fréquents.

8) Le débit d'eau doit être particulièrement élevé.

9) Un thermostat pourrait très facilement déclencher l'appareillage électrique en cas d'augmentation anormale de la température.

10) Des « fusibles » en nombre suffisant, constitués par de courtes conduites dérivées, obstruées chacune par un bouche-trou qui éclaterait à une pression supérieure de 2 à 3 kg à la pression de service, limiteraient les dégâts si l'onde de choc de l'explosion n'est pas très élevée. Ces pièces seraient orientées de manière à ne pas atteindre le personnel en cas de rupture.

11) Enfin, il serait intéressant d'étudier pendant quelques jours le régime des températures des tuyauteries par temps chaud.

#### Avis du Comité de Division.

Le Comité suggère de munir les tuyauteries, qui se trouvent au voisinage des compresseurs, de plombs fusibles analogues à ceux des sifflets Black des chaudières, plombs qui fondraient à une température de régime.

#### Note de l'Inspecteur Général des Mines.

Les suggestions de l'auteur du rapport, lesquelles sont basées notamment sur des études antérieures d'explosions dans les installations de compression d'air, sont très intéressantes.

Il importe surtout de limiter la température et d'éviter la rouille.

A ce dernier point de vue, on peut ajouter aux suggestions indiquées l'emploi de métal inoxydable dans certaines parties de l'installation.

\* \* \*

#### 3<sup>e</sup> cas.

##### Circonstances.

Une explosion s'est produite dans les tuyauteries principales de 150 et 200 mm de diamètre, conduisant l'air comprimé de la station de compression aux deux sièges de la société.

Des raccords furent sectionnés, des vannes brisées, des tronçons de tuyauteries et des coudes projetés jusqu'à 100 mètres de distance.

Des traces de combustion furent observées à l'intérieur de la canalisation.

L'installation était alimentée à la pression de 6 kg/cm<sup>2</sup> par trois compresseurs à pistons, qui refoulaient l'air dans un réservoir muni de deux soupapes de sûreté.

#### Conclusions de l'Ingénieur-rapporteur.

L'Ingénieur chargé de l'enquête se réfère à une étude faite par M. Loison, Ingénieur en chef du Cerchar, à la suite de deux accidents graves survenus l'un à Courrières, en avril 1948, l'autre à Béthune en 1949.

M. Loison étudie tout d'abord expérimentalement le comportement d'un dépôt d'huile au contact d'un courant d'air. Les réactions pouvant résulter de ce contact dépendent de la forme et du support du dépôt, de sa position dans le courant d'air et de la vitesse de ce dernier; l'élévation de la température provoquée par les réactions dépend des conditions d'évacuation de la chaleur dégagée, par conductibilité, rayonnement et convection.

A. — Au moyen d'un premier dispositif expérimental, il établit que le passage d'un courant d'oxygène à la pression atmosphérique, sur une masse de rouille imbibée d'huile de compresseur, peut, si la température atteint une limite de l'ordre de 150-160° :

1) porter la température du dépôt à une valeur nettement supérieure à celle de l'oxygène ;

2) donner naissance à des vapeurs combustibles pouvant s'enflammer, phénomène résultant vraisemblablement de réactions de cracking.

B. — Au moyen d'un deuxième dispositif expérimental, comportant de l'air à la pression de 7 kg, porté à des températures variables, M. Loison en arrive à conclure que, pour qu'une inflammation puisse se produire, les deux conditions suivantes doivent être réalisées :

1) La température du dépôt d'huile doit être assez élevée pour que les réactions de pyrogénéation puissent se développer et donner naissance à des vapeurs combustibles. Or, la température du dépôt d'huile est, pour une température donnée du courant d'air, d'autant plus élevée que la réaction est plus rapide et que la chaleur cédée par le dépôt est plus faible. Un accroissement du débit d'air augmentant à la fois la vitesse de réaction et le flux de chaleur cédé par convection, on conçoit que la température du dépôt soit maximum pour une certaine valeur du débit.

2) La concentration de l'air en vapeurs combustibles doit atteindre la limite inférieure d'inflammabilité. Or, pour une température donnée du dépôt d'huile, cette concentration varie en raison inverse du débit. On s'explique ainsi qu'une réduction, ou mieux un arrêt brusque du débit, alors que le dépôt d'huile est déjà à une température suffisamment élevée pour pouvoir se décomposer, provoque la formation d'un mélange gazeux inflammable.

Il y a lieu de remarquer que, dans le deuxième dispositif, les conditions opératoires étaient plus sévères que celles de la pratique, car le dépôt d'huile

était traversé par le courant d'air. La température d'inflammation déduite des expériences ne peut se transposer dans la pratique car, d'une part, la chaleur dégagée par l'oxydation de l'huile ne pouvait se transmettre que par convection et non par conductibilité, ce qui favorise l'élévation de la température, et d'autre part, la surface de contact du dépôt d'huile et de l'air était grande, ce qui favorise la concentration en combustibles.

En résumé, on peut conclure de ces expériences que des dépôts formés d'huile, de rouille et de poussières minérales, peuvent, sous l'action d'un courant d'air chaud, donner naissance à des produits gazeux combustibles. La réaction peut être activée par certains catalyseurs ; elle s'emballe si la chaleur dégagée est supérieure à celle évacuée.

Dans des conditions expérimentales données, le phénomène est régi par deux facteurs : la température de l'air et sa vitesse. Pour une température donnée du courant d'air, il existe une valeur de sa vitesse pour laquelle l'élévation de la température du dépôt est maximum ; dans le mode opératoire de M. Loison, cette valeur était de quelques centimètres par seconde.

C'est ainsi qu'il peut s'établir dans les canalisations un mélange d'air et de vapeur combustible dont la concentration peut entraîner l'inflammation, suivie de l'explosion, selon le débit d'air et la vitesse de décomposition du dépôt.

Un arrêt de courte durée du courant d'air est favorable à l'inflammation. Dans ces conditions et avec le mode opératoire de M. Loison, l'inflammation a été observée pour une température du courant d'air de 150° environ.

Il ressort de ce qui précède que, pour un compresseur donné, avec son dispositif de refroidissement, son état d'entretien, la qualité de son huile de graissage et toutes autres choses qui lui sont propres, le danger d'une inflammation est d'autant moins à craindre que le débit d'air traversant les conduites est plus élevé et plus régulier.

Un point sur lequel MM. Loison et Audibert insistent particulièrement, c'est le danger que présentent les marches à vide des compresseurs.

\* \* \*

L'Ingénieur-rapporteur envisage diverses solutions pour éviter le retour d'accidents de l'espèce, ou tout au moins pour rendre ceux-ci inoffensifs (flambées au lieu d'explosions), notamment :

1) Empêcher la formation des dépôts de rouille dans les réservoirs et les conduites. Il doit être possible de trouver un anti-rouille, dont on enduirait les parois à préserver. La difficulté serait peut-être de réaliser un produit résistant à la température de l'air comprimé à sa sortie du compresseur.

2) Empêcher, dans toute la mesure du possible, la formation de dépôts d'huile dans les réservoirs et conduites.

Ce serait là, sans aucun doute, le remède radical, mais, malgré toutes les précautions, il ne sera pas possible d'éviter d'une manière complète l'entraînement d'huile dans les conduites. Il est, en effet, douteux que la filtration efficace de l'air puisse être assurée de façon permanente sans des sujétions pratiques très lourdes.

On peut toutefois s'approcher de cette solution par la réduction de la consommation d'huile au strict minimum et la suppression des gaspillages, par le nettoyage des cylindres à l'aide d'eau savonneuse et par des nettoyages fréquents des clapets d'aspiration et de refoulement. En ce qui concerne les réservoirs à air comprimé, on peut éviter la stagnation d'huile altérée, plus facilement décomposable que l'huile fraîche, par des visites et nettoyages très fréquents.

3) Limiter la température de l'air comprimé à son entrée dans les conduites, en installant un réfrigérant après la haute pression. Toutefois, d'après M. Loison lui-même, ce procédé est extrêmement onéreux.

4) Etablir des coupe-flammes, dispositifs capables d'arrêter une explosion déjà amorcée. Toujours d'après M. Loison, il suffit, en effet, d'un dépôt d'huile très mince pour permettre la propagation d'une explosion.

Des dispositifs coupe-flammes doivent, pour être efficaces, être très largement dimensionnés ; ils sont donc très onéreux.

5) Placement d'un thermostat sur la conduite de refoulement, qui arrête l'installation dès que la température atteint une certaine valeur.

6) Éviter la marche à vide des compresseurs. Dans le cas qui nous occupe, il n'est pas possible d'éviter la chose au moins pendant de courts instants, étant donné que la régulation des compresseurs se fait par tout ou rien.

#### Avis du Comité de Division.

Le Comité estime que la meilleure mesure de prévention consiste dans le placement d'un réfrigérant après le compresseur. A défaut de celui-ci, dont le coût peut paraître élevé, il estime recommandable de recourir à un thermostat qui arrêterait le compresseur pour une température déterminée de l'air à l'intérieur des conduites.

Pour le surplus, il approuve les mesures proposées dans le rapport de l'Ingénieur-rapporteur.

#### Note de l'Inspecteur Général des Mines.

L'Inspecteur Général des Mines verse au dossier :  
I. — Les conclusions d'une étude présentée aux « Journées de la Lubrification » (Liège mai 1954) par M. Pitesche (R.U.M. juin 1954).

II. — Une note de la Belgian Shell Company S.A. intitulée : Incendies au refoulement des compresseurs d'air.

III. — Une note de M. l'Ingénieur Michel concernant les incendies et explosions des installations de compression d'air.

#### I. — Conclusions de l'étude de M. Pitesche.

Les précautions pour prévenir des incendies ou des explosions dans une installation de compresseurs d'air peuvent être résumées comme suit :

- 1) Éviter toute température anormale de refoulement ;
- 2) Localiser les prises d'air où elles ne risquent pas d'aspirer des poussières ;
- 3) Prévoir des filtres à air efficaces et appliquer strictement un système de nettoyage ;
- 4) Purger régulièrement les réfrigérants intermédiaires s'ils existent ;
- 5) Prévoir des déshuileurs efficaces sur le refoulement et les purger régulièrement ;
- 6) Utiliser une huile appropriée ;
- 7) Régler les débits d'huile aux cylindres au strict minimum (s'assurer que l'huile des mouvements ne s'introduise pas dans les cylindres par les tiges de pistons au travers des bourrages) ;
- 8) Prévoir des thermomètres aux endroits à surveiller et noter systématiquement les températures ;
- 9) Arrêter le compresseur dès que les températures et pressions sont anormales ;
- 10) Rincer et désincruster s'il y a lieu les chambres d'eau des cylindres et les réfrigérants ;
- 11) Remplacer systématiquement, à des intervalles de temps régulièrement espacés, les jeux de clapets, pour examen et nettoyage éventuel ;
- 12) Envisager l'installation d'un réfrigérant après la haute pression, ce qui est onéreux pour l'exploitation, mais efficace lorsque, pour des raisons locales, les températures de refoulement trop élevées de l'air comprimé ne peuvent être réduites d'une autre manière.

#### II. — Extraits de la note de la Belgian Shell Company, S. A.

##### Causes.

Pour provoquer une explosion ou un incendie à un compresseur d'air grâce à l'inflammation de brouillard ou de vapeur d'huile, il faut qu'il y ait présence d'un mélange carburé à un taux supérieur à la limite minimum d'inflammation : pour un mélange d'huile pulvérisée et d'air, il faut au moins 3 % en poids (1 gramme par 30 litres d'air), ce qui ne se rencontre presque jamais.

En plus, pour provoquer l'allumage spontané de ce mélange, il faut aussi que sa température atteigne environ 400° C, ce qui n'est pas le cas, même dans les conditions les plus mauvaises d'exploitation.

Les incendies que l'on rencontre pourtant aux compresseurs et tuyauteries d'évacuation d'air sont

entièrement expliqués par les phénomènes bien connus d'oxydation des hydrocarbures avec formation de « peroxydes ». Ceux-ci se forment à environ 150° C et se décomposent exothermiquement lorsque la température atteint 210-230° C. Il en résulte une vive élévation de température et pression.

Si, à ce moment, au voisinage immédiat de cette région, surchauffée momentanément à plus de 400° C, se trouvent des accumulations d'huile stagnante ou des dépôts, charbonneux ou autres, imprégnés d'huile, les conditions nécessaires à un allumage spontané sont réalisées. C'est là, à notre avis, la cause essentielle des incendies constatés, liés nécessairement à l'existence d'une température anormale localisée, même momentanée.

#### Précautions et remèdes.

Il semble donc que la seule sécurité absolue est de ne jamais dépasser 140° C au refoulement des compresseurs d'air pour éviter la formation de peroxydes. Ceci dépend donc essentiellement du degré d'entretien et de surveillance des compresseurs eux-mêmes, c'est-à-dire :

- 1) de la propreté et de l'étanchéité des clapets qui doivent être vérifiés périodiquement ;
- 2) de la propreté et de l'efficacité des réfrigérants d'air entre basse et haute pression ;
- 3) de la surveillance des températures de refoulement. Des thermomètres plongeant dans les tuyauteries de sortie d'air comprimé sont indispensables à chaque cylindre ;
- 4) de la propreté de l'air aspiré. Des filtres à air efficaces et entretenus sont indispensables, surtout dans le voisinage d'un charbonnage (danger de dépôts).

Il faut en outre éviter les accumulations de lubrifiants stagnant après le compresseur. A cet effet, on veillera à :

- 1) éviter la présence de poche pleine d'huile près des clapets de refoulement. S'il y en a, on y mettra un robinet de purge ;
- 2) munir les deux premiers coudes de la tuyauterie d'air comprimé, de purges en point bas permettant l'enlèvement de l'huile séparée. Si cette précaution n'est pas prise, l'huile qui y stagnera en atmosphère d'air chaud s'oxydera et polymérisera en donnant lieu finalement à des dépôts abondants, cause d'obstruction et élément d'incendie si les conditions précitées d'allumage se rencontrent ;
- 3) éviter les repassages d'huile des carters vers les cylindres ;
- 4) éviter les consommations excessives aux cylindres ;
- 5) prohiber l'emploi d'huile trop visqueuse et trop adhérente ;
- 6) choisir un lubrifiant très stable, à haut point d'inflammabilité.

Toutes ces précautions peuvent en somme se résumer à : propreté et étanchéité.

III. — Note de M. l'Ingénieur Michel.

Dangers.

Projections de toutes sortes susceptibles de blesser ou tuer des ouvriers et d'endommager d'autres installations, telles que sous-stations électriques ou ventilateurs, qui se trouvent souvent dans la même salle que les compresseurs.

Dégâts dans les puits.

Possibilités d'incendie au jour et éventuellement au fond.

Asphyxie du personnel du fond, au voisinage des échappements d'appareils à air comprimé, si l'incendie dure un certain temps et donne naissance à du CO.

Inconvénient, en tout cas, de l'arrêt de la centrale et même du chômage de la mine.

Causes et mécanisme du phénomène.

Oxydation rapide et élévation de température des dépôts d'huile formés à la sortie des cylindres et dans le réseau des conduites de refoulement (activés par l'action catalytique de la rouille) sous l'effet du courant d'air chaud, donnant naissance à des produits gazeux combustibles.

Il peut y avoir alors :

a) fort échauffement, sans inflammation : *coup de feu* ;

b) inflammation des vapeurs combustibles, lorsque la limite d'inflammabilité est atteinte, généralement par réduction du débit d'air, engendrant une explosion locale : *flambée* ;

c) vaporisation, suivie d'inflammation, du dépôt d'huile existant dans les tuyaux, causée par l'onde de pression créée par la flambée initiale, si cette dernière est suffisamment importante : *explosion*.

Principe des mesures préventives.

Limiter la quantité d'huile entraînée par l'air comprimé et éviter les accumulations et dépôts susceptibles d'oxydation.

Refroidir l'air comprimé refoulé (au moins jusqu'à une température inférieure à celle provoquant l'oxydation rapide) et se prémunir contre les échauffements locaux.

Graissage.

Qualité de l'huile.

Huile minérale pure, de préférence à base naphthénique, donnant un très faible résidu de carbone à point d'inflammation élevé, mais d'une viscosité convenable. Éviter les huiles détergentes, composées ou graphitées. On peut retenir les normes suivantes :

Poids spécifique à 15° C : 0,89 à 0,92 kg/litre

Point d'inflammation > 220° C

Point de combustion > 255° C

Teneur en eau et asphalte : 0

Indice de carbone Conradson < 0,1

Indice d'acide < 0,05 (mg KOH par g huile)

Viscosité :

	t°	Centistokes	Degrés Engler
Cylindriques verticaux ou horizontaux à contre tige	50° C	60 à 70	8 à 9
	100° C	> 10	> 1,8
Cylindrique horizontal sans contre-tige	50° C	107 à 122	14 à 16
	100° C	> 16	> 2,5

Débit d'huile.

Le débit nécessaire varie avec les caractéristiques constructives de l'appareil ; logiquement, il doit être apprécié en fonction de la surface frottante balayée par les pistons. On peut cependant fixer les valeurs moyennes suivantes, se rapportant uniquement au lubrifiant utilisé dans le cylindre.

Cylindres verticaux (ou horizontaux avec contre-tige) : moins de 0,1 g/kWh.

Cylindres horizontaux sans contre-tige : moins de 0,2 g/kWh.

La référence à l'énergie consommée permet un calcul plus simple tout en conservant une signification assez correcte, vu la ressemblance des divers modèles de compresseurs.

Par bourrage de tige de piston, on compte 2 g/h en plus. Le graissage du mouvement (paliers, billes, crosses) doit être indépendant de celui des cylindres ; il faut éviter le passage de l'huile du carter dans les cylindres.

Mode de graissage.

Éviter le graissage par pulvérisation d'huile dans la tuyauterie d'admission ; l'amenée de l'huile à la paroi du cylindre (au milieu) est préférable.

Le graissage par pompes est le meilleur, surtout lorsque les pompes donnent des refoulements fréquents et à faible débit, sinon utiliser le graisseur compte-gouttes.

Vérifier régulièrement la consommation d'huile.

Dépôts d'huile.

Même en cas de graissage correct, une certaine quantité d'huile est entraînée par le courant d'air : de 3 à 7 mg/m<sup>3</sup> et parfois plus (Cerchar, Note 5/52 p. 20).

Des dépôts se forment sur les clapets et dans les chambres de soupapes.

Une partie de l'huile entraînée dans les tuyaux se dépose dans le réfrigérant d'aval, lorsqu'il existe, et dans les réservoirs : ces appareils doivent être régulièrement purgés et nettoyés et établis de manière à permettre une purge complète.

Vitesse de l'air dans les tuyauteries entre compresseurs et réservoirs < 5 m/sec ; dans les réservoirs



voirs  $< 0,3$  m/sec (pour assurer une bonne séparation de l'eau et de l'huile) ; dans les conduites à l'aval des réservoirs  $< 10$  m/sec.

Volume total des réservoirs, en  $m^3$  : au moins  $\frac{1}{8}$  du débit réel des compresseurs, mesuré en  $Nm^3/min$  et de préférence  $\frac{1}{4}$  à  $\frac{1}{3}$ .

Les réservoirs seront placés de préférence à l'ombre et dans un endroit frais, verticalement (hauteur inférieure à 3,5 fois le diamètre) avec arrivée d'air centrale évasée et munie d'un chicanage (fig. 1) et départ à la partie supérieure. Les conduites d'air auront des courbes largement ouvertes (rayon de courbure  $> 4$  fois le diamètre).

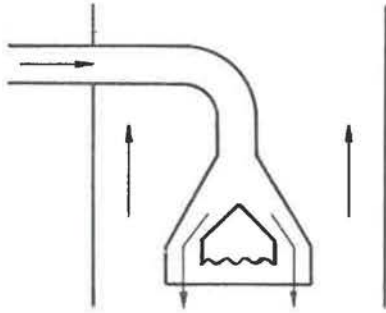


Fig. 1.

Il faut éviter les variations de section brusques et les parties non balayées par le courant d'air (telles que les anciens branchements désaffectés et obturés à une certaine distance de la conduite principale) où se créeraient des dépôts.

#### Causes de l'échauffement.

La compression de l'air est une transformation polytropique toujours très voisine de l'adiabatique, malgré le refroidissement :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \text{ avec } 1,30 < n < 1,41$$

Pour un taux de compression  $P_2/P_1 = 2,82 = \sqrt{8}$ , qui est celui théoriquement réalisé dans un compresseur à  $7,25$  kg/cm<sup>2</sup>, l'échauffement normal est donc de l'ordre de  $90$  à  $120^\circ$  C.

Les causes d'échauffement anormal sont :

- une température d'aspiration trop élevée : placer la prise d'air en un endroit frais, à l'ombre ; éviter la proximité de la conduite de refoulement et d'aspiration ;
- l'augmentation du taux de compression, due elle-même à :
  - des pertes de charges exagérées dans les conduits d'aspiration BP et intermédiaires entre BP et HP,
  - une conduite d'aspiration trop longue ou commune à plusieurs appareils, créant de fortes va-

riations de pression dues à la résonance des pulsations,

- des clapets encrassés ou déformés entraînant une vitesse de passage de l'air excessive,
- des fuites et repassages d'air par les pistons ou les clapets (ou la rupture d'un de ces derniers),
- une méthode défectueuse de réglage en marche à vide,
- un manque de graissage,
- un arrêt ou un ralentissement de l'eau de réfrigération ou l'entartrage des surfaces d'échange calorifique.

Il n'est pas toujours possible de constater rapidement ces incidents, ce qui rend absolument nécessaire la mesure de la température de l'air au refoulement HP.

D'autre part, tout ce qui contribue au refroidissement dans un but de sécurité est aussi un facteur d'augmentation de rendement.

#### Refroidissement.

Il faut refroidir les cylindres et leurs accessoires, ainsi que l'air après la basse pression et la haute pression. Sauf parfois (même le plus souvent) pour cette dernière opération, où l'on a recours alors au seul refroidissement par l'air, il est fait usage d'eau de réfrigération.

Le calcul montre que, pour un échauffement de l'eau de  $10^\circ$  C, il faut environ  $50$  litres d'eau par  $m^3$  (ou encore  $0,3$  m<sup>3</sup>/h d'eau par m<sup>3</sup>/min de débit d'air) pour ramener l'air à sa température initiale.

Il y a intérêt pour améliorer le rendement des machines, à employer de l'eau plus froide que l'air aspiré, mais cela n'est que rarement possible ; il faut disposer d'un important débit d'eau en circuit ouvert.

Si l'eau est incrustante, il s'impose de l'épurer ou tout au moins de faire usage d'un appareil qui rend les dépôts pulvérulents, car un entartrage, même léger, a pour effet de diminuer très considérablement les échanges calorifiques.

La suppression du refroidissement des cylindres, en augmentant la température moyenne de ceux-ci, diminue fortement la viscosité de l'huile de graissage et favorise donc sa dispersion dans l'air, tout en provoquant un échauffement sensible de l'air aspiré et refoulé : elle est donc préjudiciable tant au rendement qu'à la sécurité.

La suppression de la circulation d'eau au réfrigérant intermédiaire cause une élévation rapide de température de l'ordre de  $100^\circ$  C au refoulement de l'air ; elle doit donc entraîner obligatoirement l'arrêt du compresseur.

Il est fortement à conseiller d'employer également un refroidisseur à l'aval du cylindre HP, disposé le plus près possible de celui-ci, de manière à limiter les parties du circuit d'air portées à haute température. Outre l'accroissement de sécurité qu'il procure,

ce refroidisseur permet la séparation d'une grande partie de l'eau entraînée et d'une certaine quantité d'huile, et diminue, pour ces différentes raisons, les pertes de charges dans le début du réseau ; en outre, il amortit très efficacement les pulsations au refoulement.

Lorsqu'il n'existe pas de refroidisseur HP, il faut favoriser le refroidissement par rayonnement et convection dans l'air des conduites de refoulement : ces dernières, éventuellement munies d'ailettes, seront disposées en des endroits bien ventilés, à l'exclusion de caniveaux ; les parties extérieures seront autant que possible à l'ombre.

### Réglage.

L'adaptation du débit des compresseurs à la consommation, lorsque la machine motrice n'est pas à vitesse variable, peut se faire progressivement (par adjonction d'espaces morts additionnels — système « Clearance » de la Cie Ingersoll — ou en maintenant ouvertes les soupapes d'aspiration pendant une partie de la course de refoulement) ou par « tout ou rien ».

Le premier dispositif, peu fréquent d'ailleurs, semble préférable ; il permet cependant un certain échauffement de l'air, brassé entre le cylindre et les capacités additionnelles, dans lesquelles il faut veiller à éviter les accumulations d'huiles. Les capacités doivent être disposées sur les deux étages de compression.

Le réglage par tout ou rien peut se faire :

- par fermeture de l'aspiration,
- en maintenant ouvertes les soupapes d'admission,
- en fermant l'admission et en mettant en outre le refoulement HP à l'air libre.

Le premier de ces trois systèmes a pour effet d'augmenter très fortement le rapport de compression, le cylindre BP n'ayant plus à aspirer que la fuite, faible mais inévitable, qui existe à la vanne de fermeture. La température au refoulement de l'appareil peut alors croître de plus de 100° C. Ce système doit donc être absolument proscrit.

Le troisième présente les mêmes défauts, mais à un degré moindre ; le compresseur travaille en fait comme pompe à vide pendant les périodes de déclenchement. L'augmentation du rapport de compression est donc moindre que dans le premier cas et, d'autre part, la masse d'air intéressée est très faible.

Le second système paraît préférable, puisqu'il n'y a plus aucune compression, mais est peu employé pour des raisons constructives. Dans tous les cas, la marche à vide présente un autre inconvénient : le débit des graisseurs, lié à la vitesse de la machine, reste le même alors que le courant d'air diminue ou même cesse complètement ; en même temps, surtout si un échauffement se produit, la vaporisation de l'huile augmente et, à la reprise du débit, la quan-

tité de produits combustibles entraînée par l'air est sensiblement accrue, pouvant même atteindre des valeurs dangereuses.

Il y a donc lieu de contrôler strictement les marches à vide et de les limiter aux plus courtes périodes possibles, inférieures obligatoirement à 15 minutes. Lorsque la centrale de compression comporte plusieurs unités, on demandera la marche à vide à l'appareil qui est le mieux refroidi, a le plus faible débit d'huile et le dispositif de réglage le plus efficace et sûr ; ce sera généralement le compresseur le plus moderne et le plus puissant, et les périodes de déclenchement seront de ce fait d'une durée moindre.

### Entretien.

#### Aspiration.

Une conduite d'aspiration métallique (tôle galvanisée de préférence), avec filtre, est indispensable pour éviter d'introduire des poussières dans le compresseur. Une canalisation maçonnée se désagrège en effet lentement à cause des pulsations.

Nettoyage hebdomadaire des cellules filtrantes dans une solution de soude (proscrire les solvants volatils, même ininflammables) suivi de soufflage à l'air comprimé et d'un trempage dans l'huile minérale pure, de caractéristiques voisines de celles des compresseurs mais pas trop visqueuse (30 à 45 centistokes à 50° C, soit 4 à 5,5° Engler).

#### Cylindres.

Vérifier la propreté et l'usure. Maintenir les enveloppes d'eau exemptes de tartre.

#### Clapets de soupapes.

Nettoyer au moins chaque quinzaine ou chaque mois selon le degré d'encrassement, et s'assurer que tous les ressorts développent une force identique.

Le meilleur procédé consiste à remplacer régulièrement les clapets par d'autres qui ont été nettoyés antérieurement, au moment et à l'endroit le plus convenables : il suffit de posséder en réserve un jeu complet de soupapes.

#### Réfrigérants.

Disposer, comme pour les clapets, de faisceaux tubulaires en réserve.

Les lavages fréquents sont à recommander : on les effectue en réalisant le circuit d'eau de manière à créer une circulation à contre-courant, par la manœuvre de vannes appropriées, et on peut alors laver à chaque arrêt. (Ce système est appliqué dans un charbonnage du bassin de Liège.)

#### Réseau de tuyauteries et réservoirs.

Outre la suppression des fuites, on s'assurera de temps à autre, par examen d'un tronçon, que les dépôts d'huile ne sont pas trop abondants, auquel cas il faudrait revoir le dispositif de lubrification.

Nettoyage soigné et complet du réservoir, par raclage ou mieux, au jet de sable, à l'occasion de la visite intérieure triennale et de préférence chaque année dans les installations importantes, suivi de peinture éventuelle.

Purge d'eau et d'huile à chaque poste à tous les points bas du réseau et aux réservoirs et réfrigérants.

### Contrôle.

Le contrôle doit porter à la fois sur l'efficacité technique et sur la sécurité de l'installation.

En ce qui concerne le premier point, on se borne généralement à mesurer, par des manomètres genre Bourdon, la pression au réfrigérant intermédiaire et au refoulement HP, et parfois la consommation d'énergie du moteur. Il serait utile également de connaître le volume débité, en posant un tube de Venturi, mais ce dernier ne pourra se placer qu'à l'aval des réservoirs (mesurant donc le débit global de la centrale) pour éviter l'erreur considérable due aux pulsations.

Quelques prises de température par thermomètres à mercure immergés dans des tubes d'huile, ne sont pas suffisantes pour assurer la sécurité ; ces appareils fournissent d'ailleurs des indications souvent fort erronées et la colonne mercurielle peut se diviser du fait des vibrations.

Une installation complète devrait comporter les éléments suivants :

#### Sur la circulation d'air.

Mesure de la température à la sortie BP et à l'entrée et la sortie HP, par thermocouples nus placés dans le courant d'air (à l'entrée) ou le plus près possible des clapets (à la sortie).

Egalement prises de températures après le réfrigérant d'aval, s'il existe, ou sinon en l'un ou l'autre point bien choisi du réseau de refoulement, pour y déceler un échauffement anormal ou un refroidissement insuffisant.

#### Sur la circulation d'eau.

Contrôle du débit par manomètre au refoulement des pompes et par chute visible à la sortie. Il est utile de placer un manomètre à la sortie des réfrigérants, qui permet d'évaluer l'entartrage par les variations de pression constatées.

Mesurer éventuellement l'échauffement de l'eau.

#### Sur la circulation d'huile.

Manomètre au refoulement de la pompe à l'huile ou compte-gouttes.

S'il y a un réfrigérant d'huile, mesure de la température à la sortie.

#### Contrôle automatique.

Toutes les installations de compression devraient obligatoirement comporter un équipement de con-

trôle automatique avec, au minimum, déclenchement de l'alimentation du moteur lorsque la température au thermo-couples placés sur les refoulements BP et HP et sur le réseau de conduites allant aux puits atteint  $150^{\circ}$  C ou encore lorsque la circulation d'huile s'interrompt.

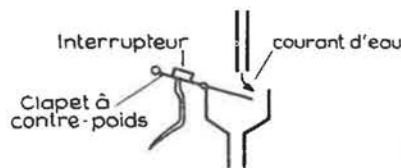


Fig. 2.

Il serait très utile que le déclenchement soit aussi commandé par l'arrêt de la circulation d'eau : il suffit pour cela de disposer, à la chute visible sur la sortie d'eau, un clapet basculant à contrepoids, muni d'un interrupteur à goutte de mercure ou équivalent. Le déclenchement devrait en outre se produire lorsque la marche à vide dure plus de 15 minutes. Un appareil avertisseur devrait fonctionner en cas de déclenchement.

#### Bibliographie relative à l'étude de M. Michel.

— (1929) LAHOUSSAY : Air comprimé - Tome IV des Etudes Techniques du Groupement des Houillères victimes de l'invasion - Paris - Gauthier - Villars.

— (1948) AUDIBERT : Le mécanisme des explosions de compresseurs - note technique 48/7 (octobre 48) des Charbonnages de France.

— (1952) LOISON : Mécanisme des explosions survenues dans les circuits de refoulement des compresseurs d'air - note technique 52/3 (avril 1952) des Charbonnages de France.

— (1952) LEFEVRE : Compresseurs d'air à pistons - note technique 52/5 (juin 1952) des Charbonnages de France.

\* \* \*

#### 4<sup>o</sup> cas.

#### Circonstances.

Une explosion s'est produite dans les canalisations et réservoirs d'air comprimé de la surface ; elle affecta aussi quelques éléments de l'extrémité supérieure de la tuyauterie placée dans le puits d'air. A la surface, elle provoqua la rupture de divers coudes et d'une vanne, tandis que dans le puits d'air plusieurs tuyauteries étaient gravement endommagées.

Cette explosion a été attribuée à de l'huile de graissage se vaporisant sous l'effet d'une température élevée.

### Conclusion de l'Ingénieur-rapporteur.

L'Ingénieur chargé de l'enquête rappelle que le mécanisme des explosions dans les tuyauteries est peu connu et que leurs effets sont surprenants.

Il cite à cet égard une expérience faite par M. Fripiat, Directeur divisionnaire des Mines, Administrateur-Directeur de l'Institut National des Mines à Paturages.

Ayant rempli une tuyauterie de 200 mm de diamètre avec un mélange grisouteux détonant, celui-ci fut allumé à une extrémité. La conduite avait 84 m de longueur et était ouverte à l'extrémité opposée à celle où se trouvait la bougie d'allumage. On constata que les effets mécaniques de l'explosion s'étaient seulement manifestés au dernier tronçon de tuyau, qui avait été entièrement ouvert. Il semblerait donc qu'il faille une certaine distance pour qu'une inflammation dans une tuyauterie devienne explosion (Rapport de l'I.N.M. sur les travaux de 1954, Annales des Mines de Belgique de juillet 1955, page 598).

A la suite de l'accident, d'autres essais ont été effectués à l'I.N.M. avec des échantillons d'huile et de cambouis prélevés à l'installation sinistrée. Ils ont confirmé le danger que présente, au point de vue risque d'explosion, un réservoir où existe une zone morte assez étendue.

Les expériences se répartissent en deux séries dont la première avait pour but de déterminer la température critique à partir de laquelle l'oxydation lente de l'huile utilisée se transforme en une combustion vive. Dans la seconde, on a essayé de reproduire les conditions dans lesquelles une telle oxydation pouvait s'effectuer dans un réservoir vertical, avec arrivée et départ de l'air à son sommet.

Une première constatation semble s'imposer : l'huile de remploi ne présente pas de caractéristiques sensiblement différentes de celles de l'huile vierge, au point de vue température critique ; ceci est corroboré par la courbe de M. Audibert, qui donne la quantité d'oxygène fixée par unité de temps et de poids d'huile en fonction du temps.

En effet, on y voit qu'il existe un seuil d'oxydation mais qu'à 100°, ce seuil n'est atteint qu'après un temps de plusieurs milliers d'heures. Or, l'huile récupérée a été utilisée à graisser les tiges de piston et les coulisseaux du compresseur François durant environ une journée, et ce, à une température notablement inférieure à 100°. Cette huile, toutefois, paraissait trouble, c'est la raison pour laquelle elle a été essayée.

L'huile vierge présentait des caractéristiques absolument normales et la première série d'essais n'a pas donné de température d'inflammation inférieure à 149° 5. On note toutefois l'influence de la nature des catalyseurs.

Les résultats de la seconde série d'essais sont à corriger en ajoutant 15° aux températures d'inflam-

mation mentionnées. Ceci est dû au fait que l'on a estimé que les températures lues au thermomètre pouvaient différer de la température maximum dans la masse au contact du verre ; on a remplacé cet instrument par un thermo-couple dont la soudure reposait sur le fond du vase.

Il faut noter également qu'un couple thermo-électrique possède une inertie thermique beaucoup moins grande que le thermomètre.

Compte tenu de la remarque précédente, il a été relevé des températures d'inflammation inférieures à 135° au cours des essais n° 36, 43, 44, 45, 46 et 53.

Cette température de 135° a pu exister à un moment donné, lors de l'accident, dans un des réservoirs, et l'état du milieu a pu être un de ceux correspondant aux essais précités. D'ailleurs, comme ces essais n'ont fait qu'effleurer le sujet, ils peuvent laisser supposer qu'il existe encore d'autres catalyseurs ou d'autres valeurs des facteurs physico-chimiques qui puissent donner l'inflammation à la température envisagée.

Les essais se sont presque toujours déroulés de la même façon : la température monte lentement et régulièrement jusqu'au moment où la masse se met à émettre des vapeurs blanchâtres durant un laps de temps très court (quelques secondes), puis une inflammation se produit et une explosion s'ensuit qui fait sauter le bouchon du vase et se propage jusqu'à l'orifice du tuyau d'évacuation des gaz. C'est l'importance relative de cette émission qui peut faire dégénérer une simple flambée en explosion généralisée.

Cette importance relative est fonction de deux facteurs : la quantité de vapeur émise et la quantité d'air diluant.

Si les compresseurs marchaient à plein régime, la quantité d'air diluant était maximum. Mais la quantité de vapeur émise dépend certainement de l'importance de la masse des matières entrant en réaction.

En effet, tout le cambouis ne réagit pas simultanément, quoique les conditions de pression et de température soient partout quasi identiques. A ce sujet, les essais de l'I.N.M. ont mis en évidence la diversité des températures d'inflammation obtenues, même au sein du même échantillon de cambouis ; on a remarqué l'influence de l'état chimique et physique du catalyseur : l'hydrate ferrique pur favorise beaucoup plus la réaction que l'oxyde de fer et la rouille. Dans certains cas donc, seule une petite partie du cambouis réagira et on aura un simple « coup de feu ». Dans d'autres cas, il se produira une flambée ou même (heureusement plus rarement) une explosion généralisée.

Après un rappel des conclusions de l'étude de M. Loison, le rapporteur conclut que les mesures préconisées par son collègue lors d'un accident semblable (voir 2° cas) sont toujours d'actualité.

Il signale que les mesures suivantes ont été décidées :

1) Placement de thermostats réglés entre 135° et 140° et pouvant déclencher l'appareillage électrique en cas d'augmentation anormale de la température.

2) Commande d'un nouveau compresseur qui sera conçu de manière à éviter toute zone morte aux alentours des soupapes de refoulement, par un dessin approprié du cylindre et des chambres de refoulement.

3) Le compresseur précité sera muni d'un réfrigérant placé immédiatement à la sortie de l'air comprimé. Ainsi, l'air qui sortira du réfrigérant aura une température inférieure à 80° et les risques d'inflammation seront extrêmement réduits.

4) La modification des réservoirs verticaux est envisagée de façon à réduire les zones mortes : l'air sera admis à la partie inférieure du corps cylindrique.

Le rapporteur estime, d'autre part, qu'il serait nécessaire d'adopter les deux mesures suivantes :

1) Tous les compresseurs, surtout les vieilles unités, devraient être pourvus de filtres d'aspiration efficaces pour réduire la formation de cambouis.

2) La fréquence des nettoyages des réservoirs devrait être augmentée de façon qu'on ne puisse plus y constater d'accumulation de cambouis.

Le rapporteur ajoute que, dans certains charbonnages, on a diminué quelque peu la température dans les réservoirs en les aspergeant abondamment (par exemple au moyen de l'eau d'exhaure).

Il rappelle enfin les mesures préconisées par M. Pitesche et dont il a été fait mention ci-avant.

\* \* \*

A la suite de cet accident, les recommandations suivantes ont été adressées à la direction de l'entreprise :

1) Emploi d'huiles stables et homogènes pour offrir une résistance maximum à l'oxydation et, par voie de conséquence, à la formation de complexes instables.

2) Les huiles à point d'éclair élevé sont de forte viscosité. Elles forment très facilement des dépôts de cambouis et agglomèrent bien davantage les matières organiques échappant au filtre à air. Il faut donc employer une huile à haut pouvoir lubrifiant mais de viscosité moyenne.

3) Le débit d'huile doit être minimum.

4) Le nettoyage à l'eau de savon évite la formation de dépôts graisseux dans les cylindres. Cette opération, d'après les techniciens, s'effectue comme suit :

On démonte les soupapes, on nettoie les sièges et, avant de les remonter, on verse de l'eau savonneuse dans les cylindres, on fait tourner la machine

à vide et on enlève les dépôts mousseux qui suintent par les sièges des soupapes.

Ce procédé reste intéressant avec l'emploi d'huiles minérales car celles-ci agglomèrent également des poussières organiques.

5) L'étude de M. Audibert prouve que la rouille favorise spécialement l'oxydation des huiles. Pourquoi, au placement, ne pas enduire les tuyauteries et autres pièces métalliques faisant suite au compresseur d'une bonne couche de peinture anti-rouille et nettoyer ces tuyauteries périodiquement ?

La visite des réservoirs d'air comprimé devrait être spécialement soignée. Il y a dans ces appareils, outre la formation de rouille, une vitesse d'écoulement de l'air plus faible que dans les tuyauteries, ce qui, d'après M. Audibert, favorise la formation de peroxydes. Les constatations pratiques prouvent d'ailleurs que les inflammations dans les installations d'air comprimé partent souvent d'un réservoir.

6) Eviter la marche à vide des compresseurs qui entraîne fatalement une augmentation de température.

7) Visiter à intervalles fréquents les clapets d'aspiration et de refoulement.

8) Maintenir un débit d'eau particulièrement élevé.

9) Placer un thermostat assurant le déclenchement de l'appareillage électrique en cas d'augmentation anormale de la température.

10) Munir tous les compresseurs, surtout les vieilles unités, de filtres d'aspiration efficaces pour réduire la formation de cambouis.

11) Augmenter la fréquence des nettoyages des réservoirs de façon qu'on ne puisse plus y constater d'accumulation de cambouis.

12) Eviter toute température anormale de refoulement.

13) Localiser les prises d'air aux endroits où elles ne risquent pas d'aspirer les poussières.

14) Prévoir des filtres à air efficaces et appliquer strictement un système de nettoyage.

15) Purger régulièrement les réfrigérants intermédiaires s'ils existent.

16) Prévoir des déshuileurs efficaces sur le refoulement et les purger régulièrement.

17) Prévoir des thermomètres aux endroits à surveiller et noter systématiquement les températures.

18) Arrêter le compresseur dès que les températures et pressions sont anormales.

19) Rincer et désincruster, s'il y a lieu, les chambres d'eau des cylindres et les réfrigérants.

20) Prévoir le remplacement systématique, à des intervalles de temps régulièrement espacés, des jeux de clapets pour examen et nettoyage éventuel.

21) Envisager l'installation d'un réfrigérant de l'air à la sortie du cylindre à haute pression des compresseurs.

**Note de l'Inspecteur Général des Mines.**

Le problème des explosions de compresseurs et de canalisations à air comprimé est posé depuis longtemps déjà. Le mécanisme de l'inflammation du mélange explosible n'a jamais été expliqué de façon précise. On en est réduit aux hypothèses. Aussi, dans l'incertitude où nous nous trouvons, il y a lieu de superposer toutes les mesures susceptibles d'éviter les phénomènes qui pourraient contribuer à la création d'une atmosphère inflammable, parmi lesquelles il convient de retenir particulièrement un entretien soigné de nature à éviter les dépôts de cambouis et la rouille.

\* \* \*

**5° cas.**

**Circonstances.**

Dans une centrale de compression d'air, au cours du fonctionnement normal de deux compresseurs de 830 ch de puissance, du type équerre à 2 étages, débitant chacun l'air comprimé à 5,8 kg/cm<sup>2</sup> dans un réservoir et reliés par l'intermédiaire d'un troisième réservoir, à la conduite d'air comprimé d'un siège, une explosion violente s'est produite, occasionnant des dégâts importants à la conduite de refoulement d'un des deux compresseurs, aux deux premiers réservoirs ainsi qu'à la canalisation d'air comprimé vers les travaux souterrains jusqu'à la profondeur de 160 m dans le puits où elle fut partiellement déchirée.

Un de ces compresseurs est muni d'un réglage par tout ou rien, faisant marcher le compresseur à vide lorsque la pression maximum est atteinte, par l'intermédiaire d'un régulateur bloquant les clapets d'aspiration des cylindres HP et BP dans la position d'ouverture ; ce compresseur fonctionnait à pleine charge au moment de l'accident. L'autre compresseur, qui ne marchait qu'à demi-charge au moment de l'accident, est pourvu d'un dispositif de réglage automatique qui augmente le volume des espaces morts dès que la pression de régime est atteinte.

Aucun appareil enregistreur de mesure n'était installé sur ces compresseurs, mais le machiniste, qui se trouvait dans la salle, a déclaré n'avoir rien remarqué d'anormal avant l'accident.

L'huile de graissage utilisée fut analysée par l'I.N.M. et reconnue de bonne qualité pour compresseurs.

Les réservoirs n'étaient nettoyés qu'une fois tous les 3 ans, et dans celui resté intact, on constata un dépôt huileux de 5 cm d'épaisseur.

**Conclusions de l'Ingénieur-rapporteur.**

Les mesures préventives qu'il y aurait lieu de prendre sont les suivantes :

1) Éviter, dans la mesure du possible, la présence d'huile dans les conduites de refoulement, dans les canalisations et les réservoirs :

a) en utilisant une huile adéquate ; il semble bien que l'huile utilisée ici présentait de bonnes caractéristiques ;

b) en limitant les quantités d'huile utilisées ; ces quantités devraient, à cet effet, être systématiquement contrôlées et non laissées à la seule appréciation du machiniste ;

c) en procédant au nettoyage des réservoirs à air comprimé au moins une fois tous les 3 mois.

2) Limiter la température de l'air au refoulement haute pression des compresseurs. Le placement d'un réfrigérant après la haute pression est une mesure excellente, mais onéreuse et difficilement réalisable en l'occurrence, faute de place. On se demande cependant si, malgré son coût élevé, elle ne devrait pas être envisagée. Elle ne résout cependant pas le problème pour la partie des canalisations situées entre le compresseur et le réfrigérant et pour le compresseur lui-même. La mesure qu'on peut actuellement préconiser est le placement d'un thermostat sur la conduite de refoulement haute pression. Ce thermostat aurait pour but, soit d'actionner un signal acoustique dès que la température dépasse une certaine limite, soit d'arrêter l'installation. La détermination de cette limite est délicate. La plupart des auteurs estiment qu'il ne faut pas dépasser 140°.

3) Organiser systématiquement le contrôle des températures, des pressions, des quantités d'huile utilisées, des dates de visite et de nettoyage des clapets et réservoirs.

**Avis du Comité de Division.**

Les membres se rallient aux conclusions du rapporteur.

**Directives données à la Direction de la mine.**

1) Réduire, dans toute la mesure du possible, les dépôts d'huile dans les canalisations et réservoirs d'air comprimé.

Pour cela, il convient :

a) de contrôler systématiquement la consommation d'huile des compresseurs, en se rappelant que, dans ces appareils, un graissage trop abondant est dangereux ;

b) de nettoyer fréquemment les réservoirs d'air comprimé, à raison d'une fois tous les 3 mois par exemple ;

c) de munir les réservoirs et les canalisations de nombreux purgeurs, d'entretenir convenablement ceux-ci et de les ouvrir plusieurs fois par jour.

2) Placer sur la conduite de refoulement de chacun des compresseurs, un thermostat destiné, soit à arrêter directement l'installation, soit à actionner un signal acoustique pour alerter le machiniste,

dès que la température de l'air comprimé atteint 140° C.

#### Note de l'Inspecteur Général des Mines.

L'accident paraît dû à l'explosion du mélange gazeux formé par les dépôts d'huile au contact d'un courant d'air chaud.

Il faut donc, dans des installations de l'espèce, comme le suggère l'ingénieur-rapporteur :

1) utiliser une huile de qualité, en quantités contrôlées ;

2) nettoyer souvent et régulièrement les appareils susceptibles d'en contenir des dépôts ;

3) limiter la température de l'air comprimé.

A cet égard, il ne faut pas perdre de vue qu'un repassage de l'air dans un compresseur à double effet, peut provoquer des élévations de température anormales d'un côté ou de l'autre du piston. Il serait souhaitable, à cet égard, de pouvoir contrôler la température des deux côtés, par des thermomètres convenablement placés.

\* \* \*

#### 6<sup>e</sup> cas.

##### Circonstances.

Un réservoir tampon à air comprimé, timbré à 8 kg/cm<sup>2</sup> et de forme cylindrique, a fait brusquement explosion, sans donner lieu ni à des flammes, ni à des fumées. Ce réservoir était installé entre le réservoir collecteur principal et un des trois compresseurs du siège, à savoir un compresseur François à deux étages. Ses dimensions étaient les suivantes : longueur : 950 mm ; diamètre : 1150 mm ; épaisseur originelle des tôles (en acier Siemens Martin) : 10 mm.

Il était en service depuis 12 ans.

La virole qui s'est déchirée ne présentait plus qu'une épaisseur de 0,6 à 1,5 mm le long de la déchirure, soit sur 350 mm de longueur. La rupture s'est produite sensiblement suivant la génératrice de contact, le long de laquelle le réservoir reposait sur un socle de soubassement en maçonnerie. Le réservoir se trouvait dans un caniveau sous le niveau du pavement. Pratiquement, l'extérieur n'était pas accessible. Un trou d'homme permettait d'y pénétrer. La dernière visite intérieure avait eu lieu 3 mois avant l'accident et le visiteur n'avait rien noté d'anormal.

A la suite de cet accident, M. Fripiat a prélevé des échantillons d'huile de graissage des compresseurs et a soumis cette huile à deux essais d'inflammation en présence d'hydrate ferrique. Les procédés employés sont minutieusement décrits dans la 4<sup>me</sup> livraison 1955 des Annales des Mines, page 598.

Au cours de ces essais, on a fait varier la quantité d'huile mélangée à l'hydrate ferrique entre 0,25 et 0,5 g et le débit horaire d'oxygène de 5 à 20 litres.

Les températures d'inflammation obtenues varient entre les limites suivantes :

1) Essais au tube :

oxygène traversant la masse d'hydrate ferrique + huile (72 essais) : 135,3° à 155,3° ;

7 essais seulement ont donné une température d'inflammation inférieure à 140°.

2) Essai en vase Erlenmeyer : oxygène avec la masse d'hydrate ferrique + huile (36 essais) : 126° à 139°.

Les échantillons de cambouis prélevés n'ont été soumis à aucun essai ; quatre mois plus tard, les enveloppes de papier où ce cambouis avait été placé étaient imbibées d'huile.

Il n'a pas été possible de fixer avec certitude si l'explosion est due à la déchirure de la paroi du réservoir sous l'effet de la pression statique de l'air, ou si elle est due à l'inflammation de vapeurs d'huile.

#### Mesures prises par la Direction de la mine.

1) Placement d'un troisième faisceau tubulaire intermédiaire de réfrigération ;

2) Réglage des thermostats à 130° au lieu de 140° ;

3) Placement, à la sortie du compresseur, d'un appareil réfrigérant-déshuileur-déshydrateur.

Selon le fournisseur, la température de l'air à la sortie de l'appareil ne dépassera pas de plus de 10° celle de l'eau à l'entrée, soit donc au maximum 35°.

#### Directives données à la Direction de la mine.

Le placement du réservoir dans un caniveau rendait le contrôle des parois extérieures difficile et même en partie impossible.

L'installation de tous les réservoirs devrait être revue de manière à permettre un examen aussi complet que possible de la surface extérieure des parois.

\* \* \*

#### 7<sup>e</sup> cas.

##### Circonstances.

Dans une station de compression, un seul compresseur à 2 étages, de 70 m<sup>3</sup> d'air aspiré par minute, était en fonctionnement.

Dès que la pression de 6,8 kg/cm<sup>2</sup> était atteinte au refoulement, un dispositif de réglage automatique fermait la vanne installée sur la conduite d'alimentation d'air, à l'amont du cylindre BP, et l'ouverture de deux soupapes spéciales mettait la chambre de compression du cylindre HP à l'air libre.

Alors que le dispositif de réglage précité fonctionnait depuis cinq minutes environ, une explosion se produisit dans la canalisation de refoulement du compresseur, dans le réservoir et dans la canalisation de distribution du siége.

Le graissage des cylindres était assuré par une pompe, au moyen d'huile de bonne qualité.

En aval du réservoir tampon, la canalisation fut trouvée, après l'accident, pratiquement exempte d'huile. Il semble, dès lors, que l'explosion ait pris naissance en un point situé entre le réservoir et l'intérieur du compresseur.

**Note de l'Inspecteur Général des Mines.**

Se référant aux conclusions de l'ingénieur chargé de l'enquête, l'Inspecteur Général préconise les mesures préventives suivantes :

- 1) utiliser des huiles de qualité, en quantités systématiquement contrôlées ;
- 2) éliminer des réservoirs et tuyauteries toutes les arêtes et cavités susceptibles de retenir les particules d'huile et d'échapper aux nettoyages, telles que

bouts de tuyauteries inutiles (c'est le cas, notamment, dans des réservoirs constitués par d'anciens corps de chaudières) ;

- 3) contrôler les purges des réservoirs et canalisations ;
- 4) nettoyer, tous les mois, les clapets de refoulement ;
- 5) nettoyer les réservoirs au moins tous les trois mois ;
- 6) contrôler la température de l'air par des thermomètres convenablement placés et prendre, le cas échéant, des dispositions appropriées pour limiter cette température ;
- 7) placer à la sortie de chaque compresseur un thermostat qui permette d'arrêter, automatiquement si possible, le moteur du compresseur dès que la température de l'air atteint 135° (dans le cas de compression bi-étagée) ;
- 8) réduire au strict minimum la durée de marche à vide des compresseurs, soit par des consignes, soit par un dispositif approprié.

Septembre 1957.